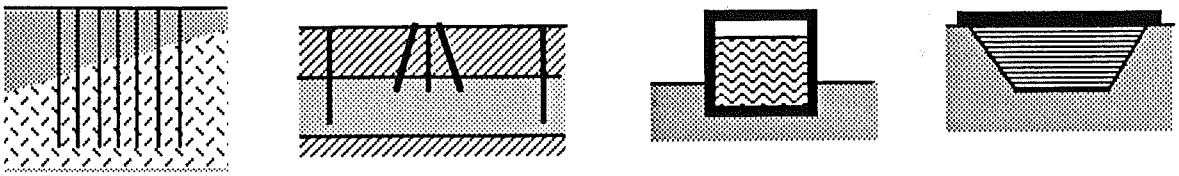
PANUD

2000

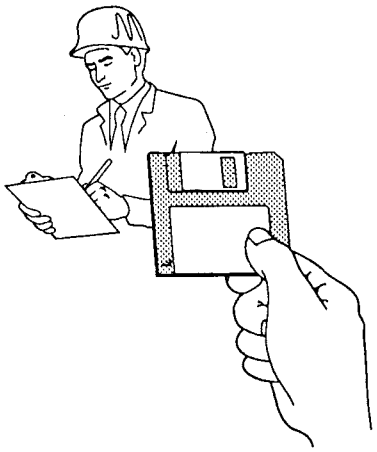
Office fédéral de l'énergie
Bundesamt für Energiewirtschaft
Ufficio federale dell'energia

FÖRDERPROGRAMM PROMOSTOCK
"SAISONALE KÄLTE/WÄRME SPEICHERUNG"



PROGRAMME DE PROMOTION PROMOSTOCK
STOCKAGE SAISONNIER DE CHALEUR et de FROID

Software "SAISONALE SPEICHERUNG"



Logiciels de calcul "STOCKAGE SAISONNIER"

Problèmes et solutions

Edition No 1 - 1994

Promostock 004/ 31.12.1994

J.C. Hadorn • Fleurettes 5 • CH-1007 Lausanne
Contrat BEW DIS 50908 du Projet DIS 494

AVANT-PROPOS à la première édition

Le présent document est la première édition d'un guide pratique des logiciels disponibles concernant le stockage saisonnier de chaleur et de froid.

Ce guide est réalisé dans le cadre du programme de promotion du stockage saisonnier de chaleur et de froid "PROMOSTOCK". Ce programme fait partie du programme nationale suisse "Energie 2000".

But d'un "Guide de solutions"

Lorsque l'on souhaite mettre en oeuvre des techniques énergétiques avancées, tel le stockage saisonnier de chaleur, le fait de trouver aide et appui est important. C'est pour répondre à cette demande d'aide que nous avons imaginé le présent guide.

Le guide est donc orienté vers la présentation de solutions complètes à des problèmes précis concernant le stockage saisonnier de chaleur pour aider les ingénieurs et concepteurs de systèmes avec stockage saisonnier. Il comprend:

- d'une part une liste des logiciels disponibles dans le domaine du stockage saisonnier (PARTIE A),
- et d'autre part un guide de solutions de base pour le calcul de stocks et de systèmes avec stockage saisonnier, en utilisant des logiciels existants et disponibles publiquement ou commercialement (PARTIE B). Les solutions exposées le sont de manière **commentée et didactique**, pour aider rapidement les concepteurs lors d'un avant-projet ou du dimensionnement d'un projet.

Les problèmes abordés dans le présent guide sont le plus possible **orientés par et vers la pratique**: un projeteur ne veut pas simplement "utiliser un logiciel"; il est confronté à des questions relevant d'un objectif à atteindre et il veut avoir aussi vite que possible une réponse à ses questions. Cette réponse doit être aussi précise et fiable que possible.

Par exemple, il ne se demande pas à priori "quel est le coefficient de transfert de l'échangeur souterrain" comme un chercheur académique, mais bien "combien de forages" il doit mettre dans tel cas de stockage. La **formulation** du problème est donc importante si l'on veut que le projeteur trouve rapidement dans notre guide un exemple proche de son propre problème. Cette constatation a orienté notre premier choix de problèmes et leur définition.

Une toute première version

La liste des logiciels "stockage" fournie dans cette édition 1994 n'est pas exhaustive. Il s'agit de la première version de l'idée de présenter les logiciels disponibles sur la marché principalement au travers d'exemples pratiques commentés, et non pas des caractéristiques de chaque logiciel. Cette idée pourra évoluer dans les versions futures selon les commentaires recueillis auprès des lecteurs.

Si ce document rencontre un écho favorable, il pourrait être enrichi au cours des années à venir, par le nombre, la diversité et le détail des cas présentés.

A moyen terme, il est également possible que l'utilisateur parcourant la version informatisée du guide de solutions "stockage", puisse non seulement cliquer sur un mot ou une valeur pour avoir plus d'explications, mais aussi lancer le programme nécessaire, en une version démonstration pour les logiciels commerciaux.

Cette première version a été réalisée avec le concours du Dr. Daniel Pahud de l'Université de Lund en Suède, que nous remercions très chaleureusement pour sa collaboration.

Jean-Christophe Hadorn, déc. 94

A. Liste 1994 de logiciels traitant de problèmes liés au stockage saisonnier de chaleur ou de froid

Les logiciels ci-dessous sont documentés, validés pour la plupart sur de nombreuses réalisations. Ils sont disponibles publiquement ou commercialement.

Logiciels plutôt orientés "Composants" (sans calcul d'un système complet)

1) LUND-DHEB, PC Programs for Heat extraction boreholes *(SUEDE)*
(TFSING, TFMULT, TFSTEP, DIM, INOUT, QSURF, QTOTSURF, GRWATER)

Contact: Department of Mathematical Physics, University of LUND, Box 118, S-221 00 LUND
Fax: 00 46 46 10 44 16

2) LUND-PC Programs for Ground Heat Systems *(SUEDE)*
(GHE, QGHS, QPOND, PERGHS, QPERGHS)

3) LUND-SBM *(SUEDE)*

4) HB-Multichamp *(SUISSE)*

Contact: BSI, Primerose 27, CH-1007 Lausanne
Fax: 021 617 17 80

5) LUND-DST *(SUEDE)*

6) LUND-AST *(SUEDE)*

7) LUND-SST *(SUEDE)*

8) LUND-TWOW *(SUEDE)*

9) LUND-CONFLOW *(SUEDE)*

10) CFEST *(USA)*

Contact: Lawrence Berkeley Laboratory, California

11) NUSOND *(SUISSE)*

Contact: Polydynamics Ltd., Zeltweg 16 CH-8032 Zürich
Fax: 01 261 03 50

12) THETA and AQSTOR *(FINLANDE)*

Contact: Helsinki University of Technology, Prof. P. Lund, FIN-02150 Espoo
Fax: 00 358 0 451 3195

Logiciels plutôt orientés "Systèmes"

1) TRNSYS + DST, AST, SST, XST *(USA + SUEDE + ITALIE)*

Contact: *Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, 500 Johnson Drive, Madison, WI 53706 USA*
Fax: 00 1 608 262 6707

2) SOLCHIPS *(FINLANDE)*

Contact: *Helsinki University of Technology, Prof. P. Lund, FIN-02150 Espoo*
Fax: 00 358 0 451 3195

3) SLT *(SUISSE)*

Contact: *SORANE sa, route du Châtelard 52, CH-1018 Lausanne*
Fax: 021 646 86 76

4) CSHPSS Task XV *(SUISSE+IEA)*

Contact: *SORANE sa*

5) G3 *(SUISSE)*

Contact: *GAP, Université de Genève, 4 chemin de Conches, CH-1231 Conches-Genève*
Fax: 022 347 86 49

6) POLYSUN *(SUISSE)*

Contact: *SPF/ITR, Oberseestrasse 10, CH-8640 Rapperswil*
Fax: 055 234 400

7) MINSUN-MINREP-NEWMIN *(SUEDE+USA+ITALIE+SUISSE)*

Contact: *SORANE sa*

8) SMARTSTORE *(SUEDE)*

Contact: *Luleå University of Technology, S-97187 Luleå*
Fax: 00 46 920 91 697

9) PIA 12 *(PAYS-BAS)*

Contact: *DWA, Van Tolstraat 4c, NL-2410 AG Bodegraven*
Fax: 00 31 1726 50 254

La plupart de ces logiciels sont également référencés et certains discutés dans le rapport Promostock 002 / 31.12.1993 "Actes du séminaire Promostock du 1er décembre 1993" à Zürich (disponible par ENET, Postfach 142, 3000 BERN 6).

B. Exemples pratiques commentés

Dans cette première édition, un nombre limité de logiciels est présenté au travers d'exemples types. Il s'agit de:

GHE (Problème 001, 002)

QPERGHS (Problème 002)

QGHS (Problème 003)

DST (Problème 500, 501)

G3 (Problème 600)

SMARTSTORE (Problème 1001)

XST + TRNSYS (Problème 2008)

Chaque problème (ou exemple) est numéroté selon le code suivant, qui permet de ranger un problème dans une classe (il s'agira de la classe principale, car souvent un problème touche à plusieurs classes !):

Codage des No de problème

de	à	Type de problème concerné:
1	99	élément de stock diffusif (échangeur ou stock)
100	199	plutôt orienté sonde terrestre
500	599	stockage complet (typiquement: DST)
600	699	captage solaire
1000	1999	système complet, hors solutions TRNSYS
2000	2999	composant et système complet avec TRNSYS

Chaque problème est présenté selon le même format.

Dans la mesure du possible, les données d'entrée (INPUTS) utilisées sont reproduites pour permettre au lecteur de reproduire lui-même les résultats annoncés, et d'effectuer ensuite des variantes ou études de sensibilité.

La complexité (ou la difficulté) de chaque problème abordé est indiquée dans une rubrique. L'échelle adoptée va de: **1 = très facile à 10 = difficile**
en considérant un utilisateur nouveau dans le domaine du stockage saisonnier, mais possédant tout de même des connaissances de base en thermique !

La complexité a été évaluée de manière très subjective. Plus que le problème en lui-même, c'est plutôt la solution que l'on a disposition qui a une certaine complexité. Pour cette raison, on a évalué une "complexité du cas", qui dépend de la solution utilisée, donc de l'état des connaissances à une époque donnée.

La liste des problèmes abordés dans l'édition 1994 est la suivante:

No	*Nom du problème*	*Complexité du cas*
001	Nombre de forages pour un stock diffusif	4
002	Taille minimale d'un stockage diffusif	5
003	Pertes thermiques d'un stockage diffusif	3
500	Pertes et baisse de qualité de l'énergie stockée dans un stock diffusif	5
501	Influence de l'épaisseur de terrain couvrant un stockage diffusif sur ses performances	4
600	Production annuelle d'un champ de capteurs solaires	2
1001	Dimensionnement "optimal" d'un stockage diffusif	3
2008	Pertes thermiques d'une caverne	5

No DU PROBLEME:
001

Nombre de forages pour un stock diffusif

ANALYSTE:
D. Pahud

TYPE DE STOCKAGE CONCERNE:
Stockages diffusifs
- forages verticaux (triple_U, double_U, simple_U ou tube annulaire);
- serpentins verticaux ou horizontaux (3_U, 2_U ou 1_U).

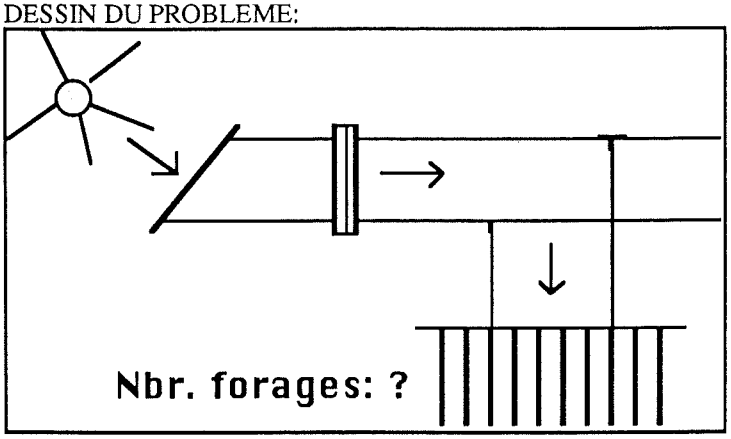
DESCRIPTION DU PROBLEME:
On veut dimensionner le nombre de forages en fonction du type d'échangeur souterrain de manière à pouvoir injecter une certaine puissance solaire estivale dans un stock diffusif.

On se donne 2'000 m2 de capteurs solaires couplés à un stockage diffusif de 20'000 m3 via un échangeur de chaleur.
Capteurs solaires (plomberie incluse): FavEtao=0.7; FavUl=5 W/m2K;
Echangeur de chaleur: UA=240 kW/K;
Terrain: conductivité thermique: 2.5 W/mK; capacité calorifique volumique: 2.5 MJ/m3K;
Stockage: profondeur: 50 m.

On tolère une chute de température maximum de 30 K lors de l'injection de la chaleur dans le stockage.

QUESTIONS A RESOUDRE:
Quelle est la puissance solaire maximum à injecter dans le stockage ?
Quelle doit être la capacité de transfert de chaleur de l'échangeur souterrain ?
Quelle est la longueur de forage nécessaire ?
Est-elle admissible ? Comment la diminuer ?

DESSIN DU PROBLEME:



COMPLEXITE:
4

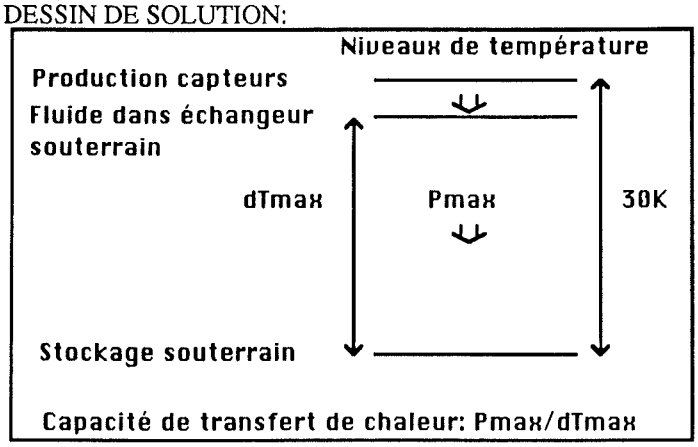
NOM DU LOGICIEL UTILISE:
GHE

ORIGINE DU LOGICIEL:
GHE: G. Hellström, PC-Programs for Ground Heat Systems, Department of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden, mai 1989.

SOLUTION PROPOSEE:
Les transferts de chaleur dans le stockage sont supposés suffisamment bien estimés avec la notion de capacité de transfert de chaleur de l'échangeur souterrain. Celle-ci est calculée avec le programme GHE. La valeur désirée est obtenue en ajustant l'espacement entre les forages après avoir fixé le type d'échangeur souterrain.

REPONSES AUX QUESTIONS:
La puissance solaire maximum à injecter dans le stockage est estimée à 800 kW (efficacité: 40%).
La capacité de transfert de chaleur du stockage doit être de 30 kW/K.
Si des tubes annulaires peuvent être utilisés (circulation en circuit ouvert), la longueur totale des forages correspond à 5'200 m (environ 100 forages). Elle augmente à 6'500 m (130 forages) avec l'utilisation de double_U (circulation en circuit fermé).
L'espacement entre forages est plutôt faible (tube annulaire: 2 m; double_U: 1.8 m). L'utilisation d'un stockage tampon permettrait d'absorber les puissances de pointes, et ainsi de réduire le nombre de forages et/ou la surface des capteurs.

DESSIN DE SOLUTION:



DONNEES COMPLEMENTAIRES NECESSAIRES:
Il faut définir des conditions types pour évaluer la puissance de pointe des capteurs; rayonnement incident: I=1'000 W/m2, température moyenne de production: Tc=80 C et température extérieure: Ta=20 C.
Il faut également spécifier le type d'échangeur souterrain ainsi que ses dimensions et caractéristiques thermiques.

ATTENTION A:
Garantir un régime d'écoulement turbulent (spécialement pour tube annulaire).
Dans le cas de profondeur importante (>100m), la dégradation de l'échange thermique le long du tube n'est pas prise en compte dans le modèle GHE.

DONNEES (INPUT):

GROUND HEAT STORAGE - Heat transfer capacity of Ground Heat Exchangers (GHE)
INPUT PARAMETER VALUES

Storage volume	20000	m3
Thermal conductivity of the ground	2.5	W/mK
GHE type	Bore 2 U	
GHE pattern	Quadratic	
GHE active length	50	m
GHE spacing	1.76	m
Thermal res. fluid/filling material	0.0797	K/(W/m)
Borehole radius	0.0550	m
U-pipe radius	0.0160	m
U-pipe shank spacing	0.0500	m
Heat capacity of the ground	2500000	J/m3K
Therm. cond. of the filling material	1.5	W/mK
Heat capacity of the filling material	2500000	J/m3K

Thermal resistance between fluid and filling material

Pipe: Outer radius	0.0160	m
Pipe: Inner radius	0.014	m
Pipe: Thermal conductivity	0.400	W/mK
Contact resistance pipe/filling	0.0200	K/(W/m)
Volumetric flow rate per pipe	0.0002	m3/s
Reference temperature	40.0	C

OUTPUT (EXTRAIT):
Puissance de pointe à transférer: P =2'000*[FavEtao*I - FavUl*(Tc - Ta)] = 800 kW.
Chute de température dans l'échangeur de chaleur: dT1≅ UA/P = 3.3 K.
Chute de température dans l'échangeur souterrain: dT2=30K-3.3K=26.7K.
Capacité de transfert de chaleur requise de l'échangeur souterrain: CT≅P/dT2=30kW/K.

OUTPUT GHE:

Thermal resistances (pipe)	
Fluid/pipe	0.0066 K/(W/m)
Pipe material	0.0531 K/(W/m)
Contact pipe/filling	0.0200 K/(W/m)
Total	0.0797 K/(W/m)
Reynolds number	13844
Thermal resistance (borehole+ground)	0.215 K/(W/m)
Cross-sectional area	3.098 m2
Heat transfer length	1.290 m
Vol. heat transfer capacity	1.501 W/(m3K)
Total heat transfer capacity	30.027 kW/K
Number of GHE	129

TEMPS DE CALCUL:
Instantané.

* * *

No DU PROBLEME:
002

Taille minimale d'un stockage diffusif

ANALYSTE:
D. Pahud

TYPE DE STOCKAGE CONCERNE:
Stockages diffusifs
- forages verticaux (triple_U, double_U, simple_U ou tube annulaire);
- serpentins verticaux ou horizontaux (3_U, 2_U ou 1_U).

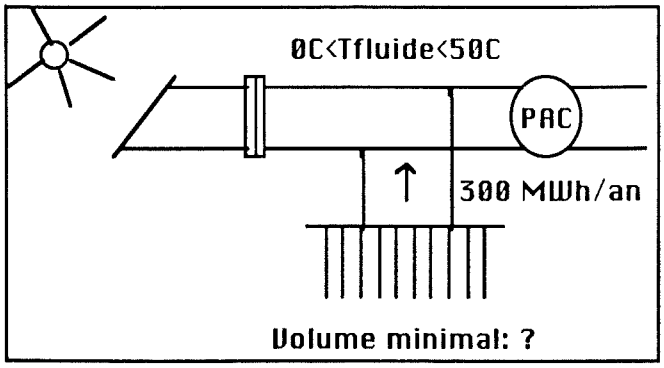
DESCRIPTION DU PROBLEME:
On aimerait évaluer la taille minimale requise pour un stockage saisonnier de type diffusif de manière à pouvoir lui extraire 300 MWh par an. Les matériaux utilisés et l'emplacement du stockage imposent les contraintes suivantes: la température du fluide caloporteur dans l'échangeur souterrain ne peut pas excéder 50°C et doit rester supérieure à 0°C. La production de chaleur est assurée par un champ de capteurs solaires. Une pompe à chaleur (PAC) est nécessaire pour extraire l'énergie stockée.

Le terrain (stockage) a les propriétés thermiques suivantes:
- conductivité thermique: 2.5 W/mK;
- capacité thermique volumique: 2.5 MJ/m3K.

L'échangeur souterrain est constitué par un réseau carré (maille: 2.5 m) de forages en double_U (profondeur: 30 m). Le toit du stockage est isolé par 10 cm d'isolation de conductivité thermique 0.04 W/mK. La température moyenne de l'air varie de manière sinusoïdale. (Moyenne: 10°C, amplitude: 10K et période: 1 année).

QUESTIONS A RESOUDRE:
Quelle est la capacité de transfert de chaleur volumique de l'échangeur souterrain ?
Quelle est la température moyenne maximale dans le stockage?
Quelle est l'amplitude de travail du stockage ?
Quel est le volume minimal ?
Est-ce que des tailles plus petites sont possibles ?

DESSIN DU PROBLEME:



COMPLEXITE:
5

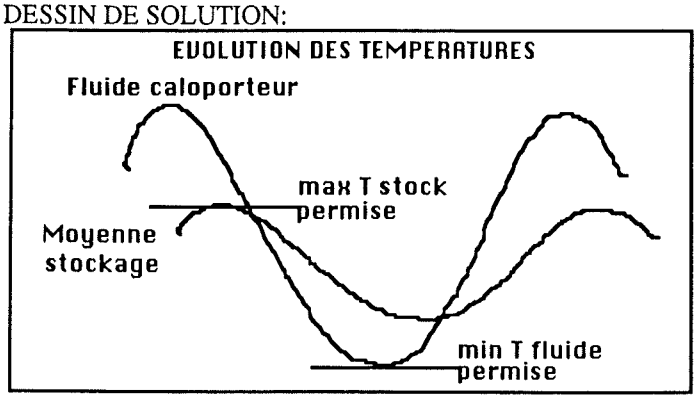
NOM DU LOGICIEL UTILISE:
GHE et QPERGHS

ORIGINE DU LOGICIEL:
GHE et QPERGHS: G. Hellström, PC-Programs for Ground Heat Systems, Department of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden, mai 1989.

SOLUTION PROPOSEE:
La capacité de transfert de chaleur volumique du stockage est calculée avec GHE. Cette valeur est nécessaire au programme QPERGHS, qui calcule la réponse du stockage sous l'influence d'une variation lente et périodique de la température du fluide caloporteur (variation sinusoïdale de période 1 année). L'hypothèse d'un régime permanent est généralement bien vérifiée lors de l'extraction de chaleur. Ce n'est pas le cas lors de l'injection, ce qui nécessite l'évaluation de la température maximale permise dans le stockage en fonction de la puissance de pointe à injecter.

REPONSES AUX QUESTIONS:
La capacité de transfert de chaleur volumique de l'échangeur souterrain est calculée à 0.67 W/m3K. La température moyenne dans le stockage varie entre 6 et 27°C, avec une moyenne annuelle de 16.5°C. L'amplitude de travail correspond à environ 20K, pour un volume minimal de 20'000m3. Des tailles plus petites sont possibles si l'amplitude de travail peut être augmentée. (Echangeur plus dense, réduction des puissances de pointes, etc.). Mais la température moyenne annuelle devrait être plus élevée, résultant en des pertes plus importantes malgré un volume plus petit. D'autre part il est inutile de procurer de la chaleur à plus de 20°C à l'évaporateur d'une pompe à chaleur actuelle.

DESSIN DE SOLUTION:



DONNEES COMPLEMENTAIRES NECESSAIRES:
L'utilisation de GHE requiert la connaissance de la géométrie et des propriétés thermiques des matériaux impliqués dans les échangeurs en double_U.
Il faut également spécifier les performances des capteurs solaires. On peut attendre une efficacité annuelle de 40-50% avec des capteurs plans vitrés. On admet une efficacité de 50% pour les puissances de pointe.

ATTENTION A:
Les calculs considèrent un comportement purement saisonnier du stockage. Ils excluent les effets du stockage à court terme.
Les pertes sont calculées en régime stationnaire et ne prennent que le processus de conduction de la chaleur en considération.

DONNEES (INPUT):
Processus itératif; (il faut se donner un volume de stockage arbitraire pour commencer).

La température moyenne du fluide caloporteur ne peut pas descendre en-dessous de 2°C. Après quelques itérations, la température maximale permise dans le stockage est estimée à 28°C.

Tableau d'entrée du programme QPERGHS (après quelques itérations):
GROUND HEAT STORAGE - Periodic model with steady-state heat losses

Storage volume	20000	m3	|Calculations are performed
Depth of storage volume	30	m	|for storage volumes in the
Ground: Thermal conductivity	2.5	W/mK	|following range:
Ground: Volumetric heat capacity	2.5e6	J/m3K	|Min: 2356.2
Insulation: Depth on vertical side	2.0	m	|Max: 8482293.0
Insulation: Thermal conductivity	0.04	W/mK	
Insulation: Thickness	0.1	m	
GHE: Volumetric heat transfer capacity	0.672	W/(m3K)	
Air temperature: Average	10	°C	
Air temperature: Amplitude	10.0	K	
Air temperature: Phase	0.0	days	
Fluid temperature: Average	17	°C	
Fluid temperature: Amplitude	15	K	
Fluid temperature: Phase	-36.4	days	

OUTPUT (EXTRAIT):
Energie fournie par collecteurs solaires: 360 MWh/an, soit environ 600 m2.
Puissance de pointe à transférer: P = 600m2 * 1'000W/m2 * 50% = 300 kW.
Capacité de transfert de chaleur: UA = ua * V
ua: cap. de transf. de chal. volumique; V: volume stockage.
Chute de température dans l'échangeur souterrain: dT ≡ UA/P = 22 K.

OUTPUT QPERGHS: (correspondant au tableau d'entrée ci-dessus)

Energy injection	357.97	MWh/year	Recovery factor	84.1 %
Energy extraction	301.01	MWh/year		
Energy loss	56.96	MWh/year		

	Average	Amplitude	Phase
Heat injection rate	6.503 kW	117.986 kW	7.5 days
Mean storage temperature	16.516 °C	10.512 °C	-71.9 days

TEMPS DE CALCUL:
Instantané.

* * *

No DU PROBLEME:
003

Pertes thermiques d'un stockage diffusif

ANALYSTE:
D. Pahud

TYPE DE STOCKAGE CONCERNE:
Stockages diffusifs
- forages verticaux (triple_U, double_U, simple_U ou tube annulaire);
- serpentins verticaux ou horizontaux (3_U, 2_U ou 1_U).

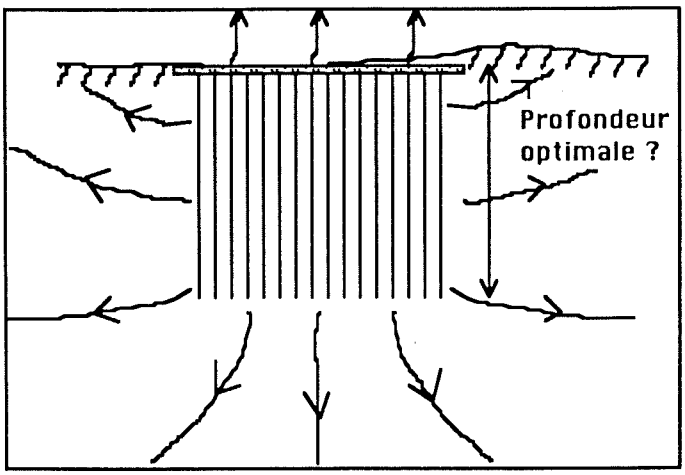
DESCRIPTION DU PROBLEME:
On aimerait évaluer la profondeur optimale d'un stockage diffusif de 20'000 m3 de manière à minimiser ses pertes. Le stockage n'est isolé que sur sa face supérieure. La couche d'isolation déborde de 2 mètres sur les bords du stockage.

Le terrain (stockage) a les propriétés thermiques suivantes:
- conductivité thermique: 2.5 W/mK;
- capacité thermique volumique: 2.5 MJ/m3K.

Isolation: épaisseur: 10 cm; conductivité thermique: 0.04 W/mK.
La température moyenne annuelle de l'air et la température moyenne du terrain non perturbé sont égales à 10°C.
La température moyenne annuelle du stockage est fixée à 50°C.

QUESTIONS A RESOUDRE:
Quelles sont les pertes annuelles minimales du stockage en régime stationnaire?
Quelle est la profondeur optimale correspondante ?
Est-ce que les pertes en régime transitoire sont également minimisées ?

DESSIN DU PROBLEME:



COMPLEXITE:
3

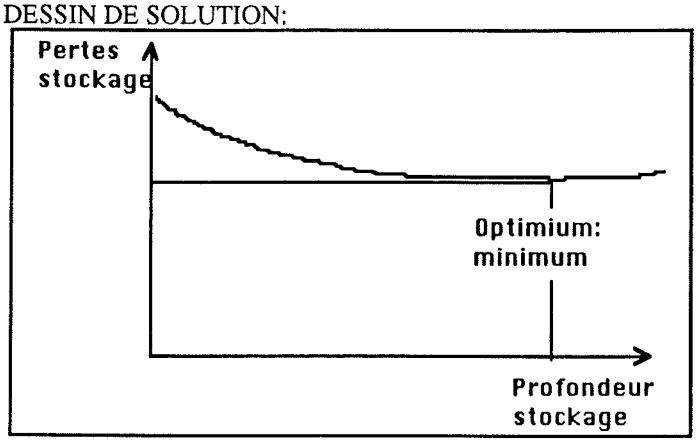
NOM DU LOGICIEL UTILISE:
QGHS

ORIGINE DU LOGICIEL:
QGHS: G. Hellström, PC-Programs for Ground Heat Systems, Department of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden, mai 1989.

SOLUTION PROPOSEE:
Le programme QGHS permet de calculer les pertes annuelles d'un stockage en régime stationnaire et transitoire. Elles sont déterminées par quelques paramètres seulement; (propriétés thermiques du terrain, température moyenne annuelle de l'air, du stockage, isolation, etc.). La forme du stockage est supposée cylindrique.
Les pertes sont calculées pour différentes profondeurs de stockage.

REPONSES AUX QUESTIONS:
Les pertes minimales en régime stationnaire sont calculées à 360 MWh par an. La profondeur correspondante équivaut à 65 m. Les pertes en régime transitoire, cumulées sur 25 ans, sont minimales si la profondeur du stockage vaut 45 m. Elles sont inférieures à 400 MWh/an après 15 ans. Elles sont augmentées de 4% si la profondeur du stockage fait 65 m.
La profondeur optimale du stockage est indépendante du niveau de température du stockage. Plus généralement, les pertes transitoires, cumulées sur 25 ans, sont minimisées si le rapport "profondeur sur diamètre" du stockage est approximativement égal à 2; (avec l'isolation comme ci-dessus).

DESSIN DE SOLUTION:



DONNEES COMPLEMENTAIRES NECESSAIRES:
On a admis que les pertes transitoires sont à minimiser sur une durée de 25 ans.

ATTENTION A:
Les pertes sont calculées en ne considérant que le processus de conduction de la chaleur. Attention à un éventuel écoulement d'eau souterrain ou une perméabilité trop élevée du terrain; (brassage convectif).
L'effet de l'isolation est généralement réduit; (infiltrations d'eau, ponts thermiques, tassement etc.). La prise en compte de cet effet dans les calculs revient, bien souvent, à prendre au maximum la moitié de l'épaisseur de l'isolation comme isolation réellement efficace.

DONNEES (INPUT):
Données d'entrée du programme QGHS:
GROUND HEAT STORAGE - Cylindrical heat store at the ground surface
Heat losses Ref: Markvärme, Del 1, 4.8.2-3, 5.1.2.

INPUT PARAMETER VALUES

Storage volume	20000	m3
Depth of storage volume	45	m
Thermal conductivity of the ground	2.5	W/mK
Vol. heat capacity of the ground	2500000	J/m3K
Depth of insulation on vertical side	2	m
Thermal conductivity of insulation	0.04	W/mK
Thickness of thermal insulation	0.1	m
Storage temperature	50	°C
Ground surface temperature	10	°C
Years	25	ans

OUTPUT (EXTRAIT):
Résultats produits par QGHS:

TRANSIENT HEAT LOSS (MWh)

Year	Annual	Total
1	888.8	888.8
2	537.9	1426.7
3	485.1	1911.8
4	460.0	2371.8
5	444.5	2816.3
6	433.9	3250.2
7	426.0	3676.3
8	420.0	4096.3
9	415.2	4511.5
10	411.3	4922.8
11	408.0	5330.8
12	405.2	5736.1
13	402.8	6138.9
14	400.7	6539.6
15	398.9	6938.5
16	397.2	7335.7
17	395.7	7731.4
18	394.2	8125.6
19	393.0	8518.5
20	391.8	8910.3
21	390.8	9301.1
22	389.8	9690.9
23	388.9	10079.8
24	388.1	10467.9
25	387.3	10855.2

ANNUAL STEADY-STATE HEAT LOSS

Uninsulated part	=	293.6	MWh
Insulated part	=	72.8	MWh

Total	=	366.3	MWh
Steady-state heat flow	=	41.82	kW

TEMPS DE CALCUL:
Pertes stationnaires: instantané.
Pertes transitoires sur 25 ans: environ 15 sec. (Pentium, 60MHz).

* * *

No DU PROBLEME:
500

Pertes et baisse de qualité de l'énergie stockée dans un stockage diffusif

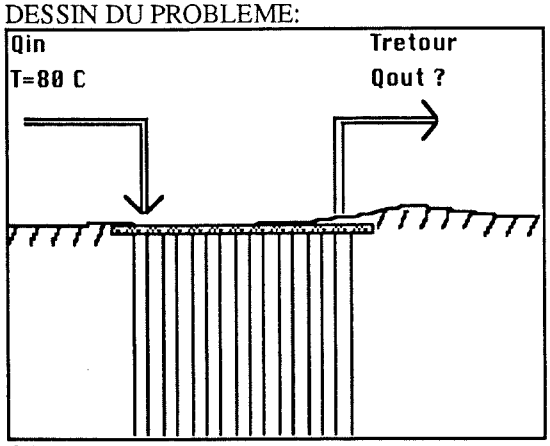
ANALYSTE:
D. Pahud

TYPE DE STOCKAGE CONCERNE:
Stockages diffusifs
- forages verticaux;
- serpentins verticaux ou horizontaux.

DESCRIPTION DU PROBLEME:
On dispose d'une source de chaleur à 80°C délivrant en permanence un débit de 20 m3/h. Cette source est utilisée 6 mois par année pour stocker l'énergie thermique dans un stockage diffusif de 20'000 m3.
On aimerait évaluer l'énergie que l'on peut récupérer du stockage en fonction de la température de retour de l'utilisateur en période de soutirage. Celle-ci est supposée constante sur les 6 mois qui suivent la période d'injection de chaleur dans le stockage.
Le terrain (stockage) a les propriétés thermiques suivantes:
- conductivité thermique: 2.5 W/mK;
- capacité thermique volumique: 2.5 MJ/m3K.
L'échangeur souterrain est constitué par un réseau carré de forages en double_U (maille: 2.5 m, profondeur: 60 m). Une couche d'isolation, (épaisseur: 20 cm, conductivité thermique: 0.04 W/mK) couvre le toit du stockage. Elle déborde de 2 m sur les bords du stockage.
La température moyenne de l'air varie de manière sinusoïdale. (Moyenne: 10°C, amplitude: 10K et période: 1 année).

QUESTIONS A RESOUDRE:
Pour un niveau de température donné, quel est l'énergie thermique récupérable après un cycle ?
La situation s'améliore-t-elle après 5 cycles ?

DESSIN DU PROBLEME:



COMPLEXITE:
5

NOM DU LOGICIEL UTILISE:
DST

ORIGINE DU LOGICIEL:
DST, Duct Ground Heat Storage Model: G. Hellström, Manual for Computer Code, Department of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden, mars 1989.

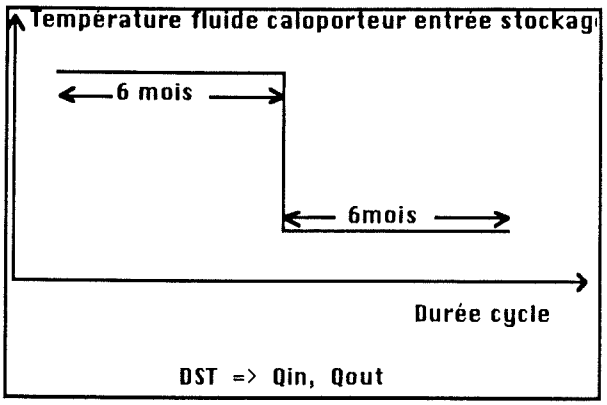
SOLUTION PROPOSEE:
On utilise la version autonome de DST développée à l'université de Lund. Deux alternatives sont possibles pour définir les paramètres d'entrée du programme. La deuxième, moins détaillée, est choisie pour sa simplicité; (le maillage de l'espace est généré automatiquement).

Une solution TRNSYS est également possible avec l'utilisation du module DST (version 1990). Ce module utilise la deuxième alternative de la version autonome pour la définition des paramètres.

REPONSES AUX QUESTIONS:
Avec une température de retour de 35°C, 300 MWh sont extraits du stockage lors du premier cycle. L'efficacité énergétique correspond à 25%. La situation s'améliore avec le temps (préchauffage terminé, réchauffement progressif du terrain autour du stockage), et ces valeurs passent respectivement à 410 MWh et 50 % le 5e cycle.

La version autonome de DST, utilisée ici dans l'option la plus simple, permet également une étude détaillée du comportement thermique du stockage.

DESSIN DE SOLUTION:



DONNEES COMPLEMENTAIRES NECESSAIRES:
Le rayon des forages en double_U ainsi que leur résistance thermique sont nécessaires. On admet respectivement 0.055 m et 0.1 K/(W/m). (Le programme GHE peut être utilisé pour calculer la résistance thermique des forages).
La température initiale du terrain est admise égale à la température moyenne annuelle de l'air. La faible profondeur du stockage permet de négliger le gradient géothermique.
Le débit en période de soutirage est fixé à 20 m3/h. Dans le cas d'une température de retour élevée, il est possible d'injecter de la chaleur dans le stockage. Il en résulte une phase d'injection plus longue que 6 mois.

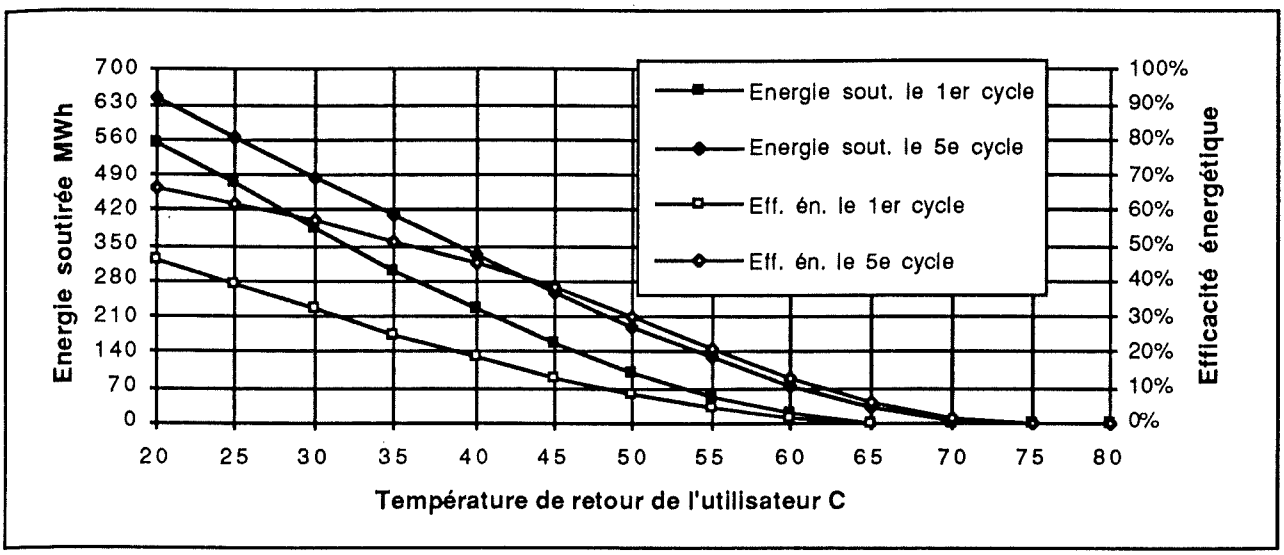
ATTENTION A:
Les calculs ne prennent que les transferts de chaleur par conduction en considération; (pas de convection libre, d'infiltrations ou d'écoulement d'eau souterraine).
La résistance thermique des forages est constante; (pas de dépendance avec le régime d'écoulement, la température du fluide caloporteur, etc.).
Les forages sont supposés couplés en parallèle; (le problème local est le même pour tous les forages échangeurs). Cette restriction peut être levée en choisissant la première alternative pour la définition des paramètres d'entrée du programme.

DONNEES (INPUT):

Résumé des paramètres utilisés avec DST:

1	Paramètre pour impression questions
0	Paramètre pour impression input data
0	Paramètre pour impression spécifiques
0	Paramètre pour illustration graphique
1	Version courte:1, version longue:0
20000	Volume zone stockage, m3
60	Profondeur fond stockage, m
2.69	Maille réseau échangeur (hexagonal), m
0.055	Rayon forage échangeur, m
0.2	Epaisseur isolation, m
0.04	Conductivité thermique isolation, W/mK
2	Paramètre relatif à isolation, -
0.033	Paramètre relatif à isolation, -
0	Profondeur toit stockage, m
2.5 2.5E+6	Propriétés thermiques du terrain dans le stockage, W/mK, J/m3K
4.184E+6	Capacité thermique volumique du fluide caloporteur, J/m3K
0.1	Résistance thermique des forages échangeurs, K/(W/m)
10	Durée simulation, an
10	Température initiale du terrain (vers la surface), °C
0	Gradient géothermique, K/m
1	Nombre de couches de terrain à propriétés therm. différentes, -
2.5 2.5E+6 1000	Propr. therm. et épaisseur de la 1ère couche, W/mK, J/m3K, m
10.0 10.0 T1Y T0S	Temp. air: moyenne, amplitude, période, déphasage, °C, K, s, s
10	Temp. de référence pour la thermalité °C
T0S T6Y1D	Début et fin des calculs, s
T100Y T100Y	Temps pour impression des résultats de type 1
T100Y T100Y	Temps pour impression des résultats de type 2
T100Y T100Y	Temps pour impression des résultats de type 3
13 T6Y 0.0 0.0 0.0	Conditions d'exploitation du stockage
3 T6Q 80.0 99999.0 0.00556	
3 T6Q 35.0 99999.0 0.00556	
-1 T0Q 0.0 0.0 0.0	

OUTPUT (EXTRAIT):



TEMPS DE CALCUL:
Environ 6 secondes par cas; (Pentium, 60MHz).

* * *

No DU PROBLEME:
501

Influence de l'épaisseur de terrain couvrant un stockage diffusif sur ses performances

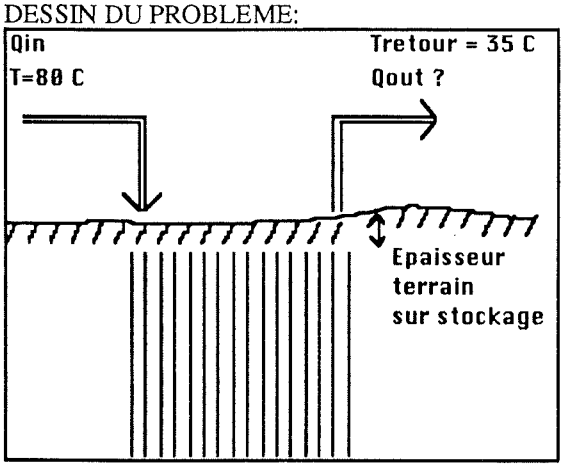
ANALYSTE:
D. Pahud

TYPE DE STOCKAGE CONCERNE:
Stockages diffusifs
- forages verticaux;
- serpentins verticaux.

DESCRIPTION DU PROBLEME:
On dispose d'une source de chaleur à 80°C délivrant en permanence un débit de 20 m3/h. Cette source est utilisée 6 mois par année pour stocker l'énergie thermique dans un stockage diffusif de 20'000 m3. L'isolation du stockage est réalisée par une couche de terrain dans laquelle les forages sont isolés de manière à ne pas échanger de chaleur. On aimerait évaluer l'influence de l'épaisseur de cette couche sur l'énergie que l'on peut soutirer du stockage. La température de retour de l'utilisateur est supposée constante à 35°C sur les 6 mois qui suivent la période d'injection de chaleur dans le stockage.
Le terrain (stockage) a les propriétés thermiques suivantes:
- conductivité thermique: 2.5 W/mK;
- capacité thermique volumique: 2.5 MJ/m3K.
L'échangeur souterrain est constitué par un réseau carré de forages en double_U (maille: 2.5 m, profondeur active: 60 m, sans la couche de terrain). La température moyenne de l'air varie de manière sinusoïdale. (Moyenne: 10°C, amplitude: 10K et période: 1 année).

QUESTIONS A RESOUDRE:
Combien de forages doivent être isolés ?
Quel est le gain d'énergie que l'on peut attendre du stockage quand l'épaisseur de terrain est augmentée de 1 à 5m, de 5 à 10m ?
Si le stockage est isolé par 20 cm d'isolation, quelle est l'épaisseur de terrain équivalente ? (voir le problème n°500 pour les caractéristiques de l'isolation).

DESSIN DU PROBLEME:



COMPLEXITE:
4
NOM DU LOGICIEL UTILISE:
DST
ORIGINE DU LOGICIEL:
DST, Duct Ground Heat Storage Model: G. Hellström, Manual for Computer Code, Department of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden, mars 1989.

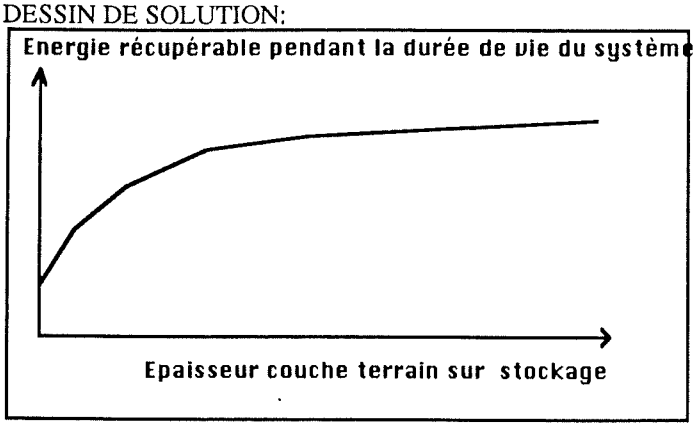
SOLUTION PROPOSEE:
On utilise la version autonome de DST développée à l'université de Lund. Deux alternatives sont possibles pour définir les paramètres d'entrée du programme. La deuxième, moins détaillée, est choisie pour sa simplicité; (le maillage de l'espace est généré automatiquement).

Une solution TRNSYS est également possible avec l'utilisation du module DST (version 1990). Ce module utilise la deuxième alternative de la version autonome pour la définition des paramètres.

L'énergie soutirée est calculée sur 25 ans de marche du système.

REPONSES AUX QUESTIONS:
L'échangeur souterrain est formé par 53 forages. La couche de terrain sur le stockage, augmentée de 1 à 5m, permet de gagner en moyenne 33 MWh/an, ou 150 kWh/an par mètre de forage. Doublée de 5 à 10m, 10 MWh/an ou environ 40 kWh/an par mètre de forage sont encore gagnés.
Une isolation de 20 cm d'épaisseur correspond à une couche de terrain de 6 à 7 m. Sur une durée de vie de 25 ans, l'énergie à injecter dans le stockage est pratiquement la même dans les deux cas (+1% avec la couche de terrain). Le prix de l'équipement d'un forage dans la couche de terrain (percement supplémentaire, tubes, isolation, etc.) doit être comparé à celui du placement de 9m2 d'isolation en surface. Dans les deux cas une certaine garantie de l'étanchéité de l'isolation (autour des tubes ou au toit du stockage) est requise.

DESSIN DE SOLUTION:



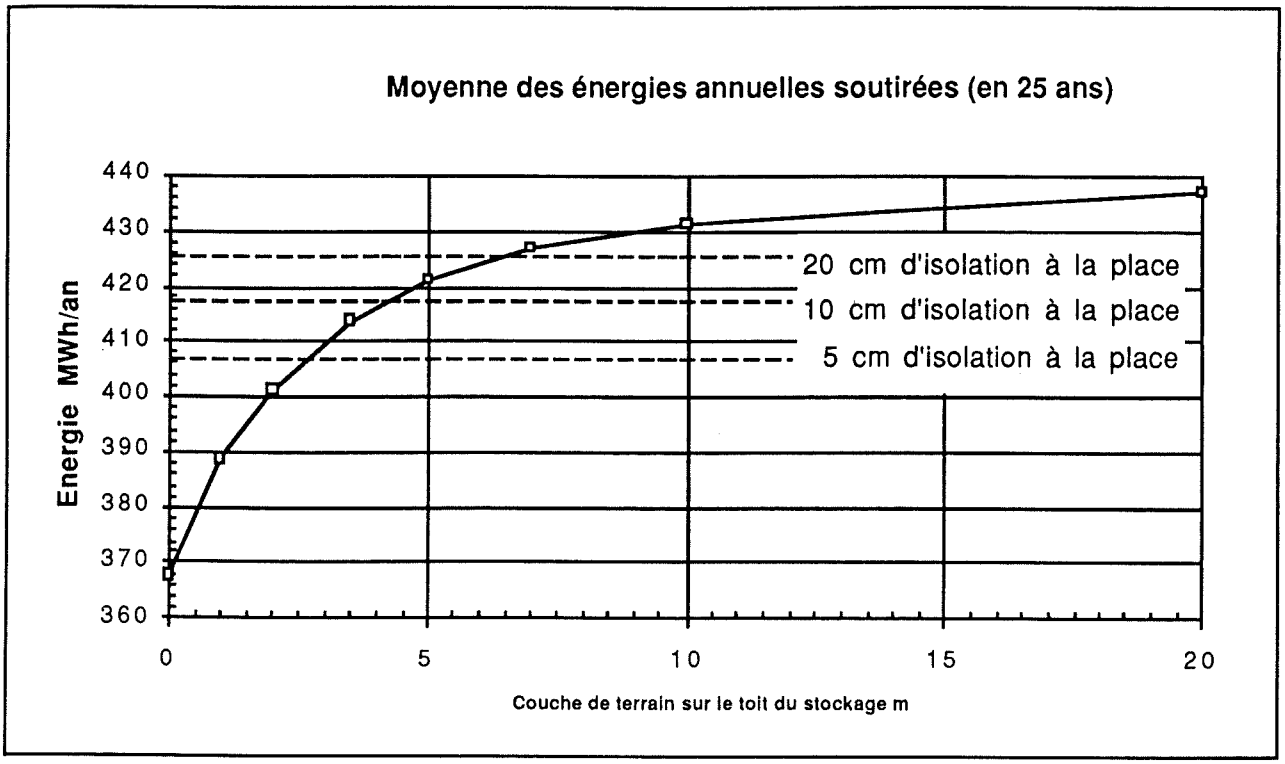
DONNEES COMPLEMENTAIRES NECESSAIRES:
Le rayon des forages en double_U ainsi que leur résistance thermique sont nécessaires. On admet respectivement 0.055 m et 0.1 K/(W/m). (Le programme GHE peut être utilisé pour calculer la résistance thermique des forages).
La température initiale du terrain est admise égale à la température moyenne annuelle de l'air. La faible profondeur du stockage permet de négliger le gradient géothermique.
Le débit en période de soutirage est fixé à 20 m3/h.

ATTENTION A:
Les calculs ne prennent que les transferts de chaleur par conduction en considération; (pas de convection libre, d'infiltrations ou d'écoulement d'eau souterraine).
La résistance thermique des forages est constante; (pas de dépendance avec le régime d'écoulement, la température du fluide caloporteur, etc.).
Les forages sont totalement inactifs dans la couche de terrain couvrant le stockage; (pas de transfert de chaleur avec le terrain et entre le fluide entrant et sortant du forage).
Les forages sont supposés couplés en parallèle; (le problème local est le même pour tous les forages échangeurs). Cette approximation peut être levée en choisissant la première alternative pour la définition des paramètres d'entrée du programme.

DONNEES (INPUT):
Résumé des paramètres utilisés avec DST:

1	Paramètre pour impression questions
0	Paramètre pour impression input data
0	Paramètre pour impression spécifiques
0	Paramètre pour illustration graphique
1	Version courte:1, version longue:0
20000	Volume zone stockage, m3
65	Profondeur fond stockage, m
2.69	Maille réseau échangeur (hexagonal), m
0.055	Rayon forage échangeur, m
0.0	Epaisseur isolation, m
0.04	Conductivité thermique isolation, W/mK
0	Paramètre relatif à isolation, -
0.0	Paramètre relatif à isolation, -
5	Profondeur toit stockage, m
2.5 2.5E+6	Propriétés thermiques du terrain dans le stockage, W/mK, J/m3K
4.184E+6	Capacité thermique volumique du fluide caloporteur, J/m3K
0.1	Résistance thermique des forages échangeurs, K/(W/m)
25	Durée simulation, an
10	Température initiale du terrain (vers la surface), °C
0	Gradient géothermique, K/m
1	Nombre de couches de terrain à propriétés therm. différentes, -
2.5 2.5E+6 1000	Propr. therm. et épaisseur de la 1ère couche, W/mK, J/m3K, m
10.0 10.0 T1Y T0S	Temp. air: moyenne, amplitude, période, déphasage, °C, K, s, s
10	Temp. de référence pour la thermalité °C
T0S T25Y1D	Début et fin des calculs, s
T100Y T100Y	Temps pour impression des résultats de type 1
T100Y T100Y	Temps pour impression des résultats de type 2
T100Y T100Y	Temps pour impression des résultats de type 3
12 T25Y 0.0 0.0 0.0	Conditions d'exploitation du stockage
3 T6Q 80.0 99999.0 0.00556	
3 T6Q 35.0 99999.0 0.00556	
-1 T25Y 0.0 0.0 0.0	

OUTPUT (EXTRAIT):



TEMPS DE CALCUL:
Environ 20 secondes par cas; (Pentium, 60MHz)

* * *

No DU PROBLEME:
600

Production annuelle d'un champ de capteurs solaires

ANALYSTE:
D. Pahud

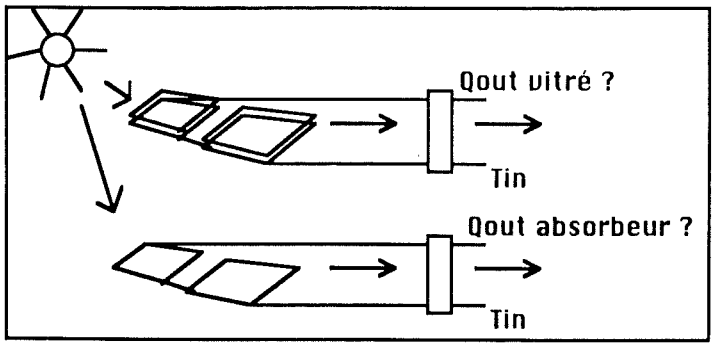
TYPE DE CHAMP DE CAPTEURS CONCERNES:
Champ de collecteurs solaires avec
- capteurs évacués;
- capteurs plans;
- absorbeurs nus (sans effet de vent).

DESCRIPTION DU PROBLEME:
On aimerait évaluer et comparer la production annuelle d'un champ de capteurs plans avec celle d'un champ d'absorbeurs nus. Si le prix de ces capteurs diffèrent avec un facteur 2, on désire également évaluer le niveau de température pour lequel les capteurs plans produisent deux fois plus que les absorbeurs nus. (On ne prend pas en compte d'autres facteurs comme par exemple la place disponible pour les capteurs, etc.).

Les 2 champs sont orientés au sud et les capteurs inclinés à 30°.
Capteurs plans:
efficacité optique: 0.8, facteur de pertes (capteurs + plomberie): 4.8 + 0.5 W/m2K;
capacité thermique (capteurs + plomberie): 17 + 10 kJ/m2K.
Absorbeurs nus:
efficacité optique: 0.9, facteur de pertes (absorbeurs + plomberie): 10 + 0.5 W/m2K;
capacité thermique (absorbeurs + plomberie): 13 + 10 kJ/m2K.
L'énergie collectée par les champs de collecteurs est délivrée à l'utilisateur par le biais d'un échangeur de chaleur. Son facteur d'échange est fixé à 100 W/K par m2 de collecteur. Le débit du fluide caloporteur correspond à 0.008 kg/m2sec.
Les effets d'ombrage sont négligés.

QUESTIONS A RESOUDRE:
Pour un niveau de température donné de l'utilisateur, quel est l'énergie thermique collectée par chacun des champs ?
A partir de quelle température les capteurs plans délivrent annuellement deux fois plus d'énergie ?

DESSIN DU PROBLEME:



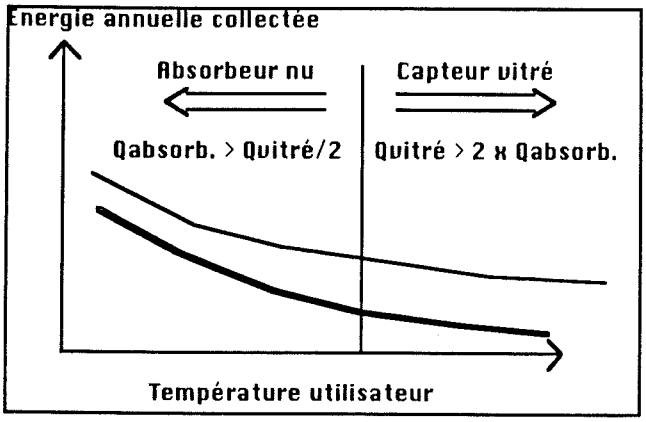
COMPLEXITE:
2

NOM DU LOGICIEL UTILISE:
G3
ORIGINE DU LOGICIEL:
Le programme G3 pour PC, description, validations et mode d'emploi: B. Lachal, O. Guisan, A. Mermoud, O. Rudaz, O. Kaelin. Groupe de Physique Appliquée (GAP), Université de Genève, mai 1988.

SOLUTION PROPOSEE:
Le programme G3 est utilisé pour évaluer les performances annuelles des deux champs. Parmi les six configurations possibles, un système sans stockage est choisi. Il comporte simplement le champ de collecteurs, un échangeur de chaleur et la plomberie nécessaire pour les connecter. On suppose que l'utilisateur consomme la totalité de l'énergie collectée. Le niveau de température de l'utilisateur est donné par la température de retour dans l'échangeur de chaleur (circuit secondaire).

REPONSES AUX QUESTIONS:
Avec une température de retour de 60°C, le champ de capteurs vitrés aurait pu délivrer 380 kWh/m2 en 1991. Le champ d'absorbeurs aurait donné environ deux fois moins. Pour des températures supérieures, les capteurs vitrés sont plus avantageux.
Les performances des absorbeurs nus sont relativement optimistes (aucun effet de vent n'a été considéré). D'autre part, on peut espérer un facteur de pertes plus faible avec des capteurs plans vitrés que la valeur considérée de 4.8 W/m K.
Le programme peut prendre en considération une efficacité optique différente pour le rayonnement direct et diffus, ainsi qu'un terme quadratique en température pour le facteur de pertes. La donnée des caractéristiques des collecteurs pourrait donc être plus détaillée.

DESSIN DE SOLUTION:



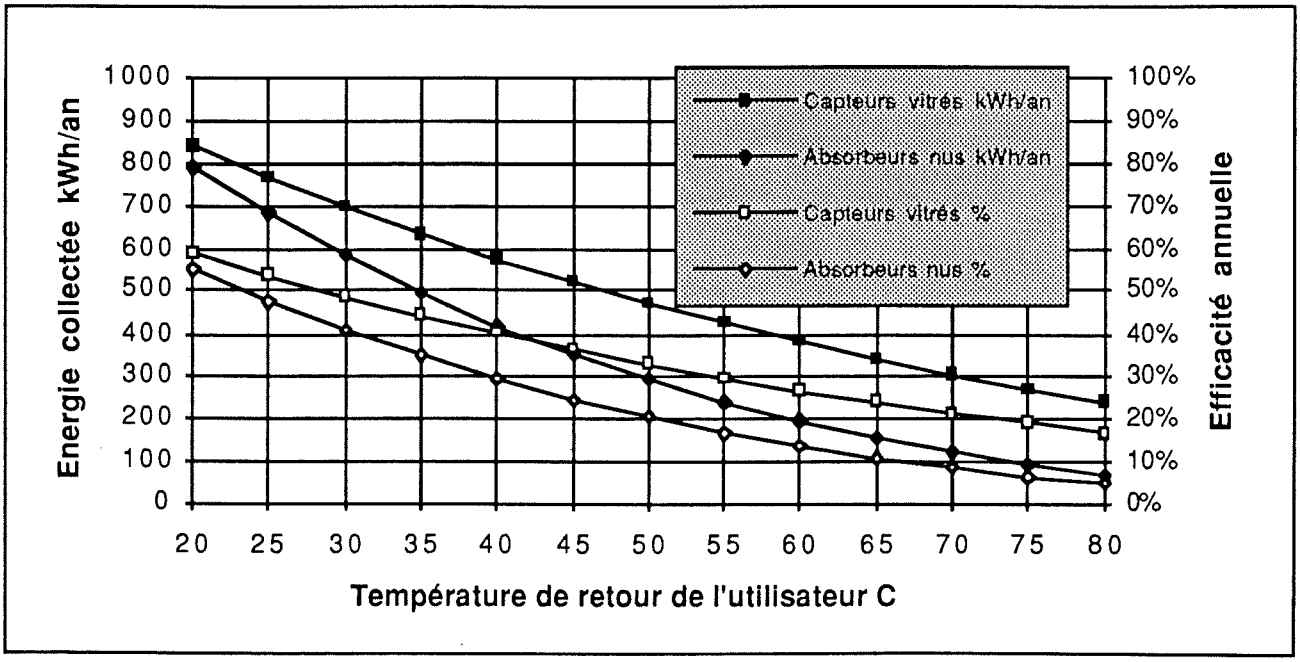
DONNEES COMPLEMENTAIRES NECESSAIRES:
Une année météorologique complète est nécessaire. Les valeurs mensuelles de la température moyenne de l'air extérieur et de l'ensoleillement global sur un plan horizontal suffisent déjà pour l'emploi de G3.
Les valeurs mensuelles mesurées à Genève en 1991 sont utilisées. L'ensoleillement global horizontal correspondait à 1'270 kWh/m2an et la température moyenne annuelle à 11°C.
Les effets d'incidence sont pris en compte avec le facteur ASHRAE bo. Une valeur de 0.1 est admise pour les capteurs vitrés (simple vitrage). Ils sont inexistants avec les absorbeurs nus.

ATTENTION A:
Attention au domaine de validité des caractéristiques des capteurs; (pas de terme quadratique en température pour les pertes des capteurs, etc.).
Le programme ne considère pas l'effet du vent. Cet effet peut être important avec des absorbeurs nus peu ou pas protégés. Le débit dans les capteurs est supposé suffisamment élevé pour ne pas influencer de manière significative leurs performances.

DONNEES (INPUT):
Résumé des paramètres utilisés avec G3 pour les capteurs vitrés.
Paramètres pour l'ensoleillement effectif:
PROJET : N600 VERSION N° : 0 METEO : GENEVE91
LATITUDE : 46 ° ALTITUDE : 400 m
COMMENTAIRE Captvitre
PLAN DES COLLECTEURS Azimut : 0 ° inclinaison : 30 °
EFFET D'INCIDENCE ETA0dif/dir : 1.00 orientation : 3 (1 : E/O 2 : N/S 3 : PLAN)
b0 ASHRAE : 0.10
ABSORB. % COLLECT. Ú : 0 ° absorbeur : larg.: 0 mm; écart: 0 mm
OMBRAGE LOINTAIN [°] (pas d'ombrage spécifié)

Paramètres pour la définition du système:
PROJET : N600 VERSION N° : 0
CAPTEURS A : 0.80 Surface : 1.0 [m2] | CHARGE
D [W/m2K] : collecteur : 4.8 plomberie : 0.5 | APPOINT:**A**val-**E**xt.
E [W/m2K2] : collecteur :0.0 B [1/K] :0.0 | **H**aut-**B**as =**E**
C [kJ/m2K] : collecteur :17.0 plomberie :10.0 | STOCK :**O**ui-Non-**M**ixte =**N**
SYSTEME INDUSTRIEL, CHAUFFAGE A DISTANCE: SANS STOCK, APPOINT EXTERNE
UTILISATEUR Soutirage Jour : 30.00 [MJ]
Température in : 50. [°]
Débit : 0.03 [m3/h]
K échangeur : 0.10 [kW/K]
Débit : 0.03 [m3/h]

OUTPUT (EXTRAIT):



TEMPS DE CALCUL:
Quelques secondes par cas; (Pentium, 60MHz).

* * *

No DU PROBLEME:
1001

Dimensionnement "optimal" d'un stockage diffusif

ANALYSTE:
D. Pahud

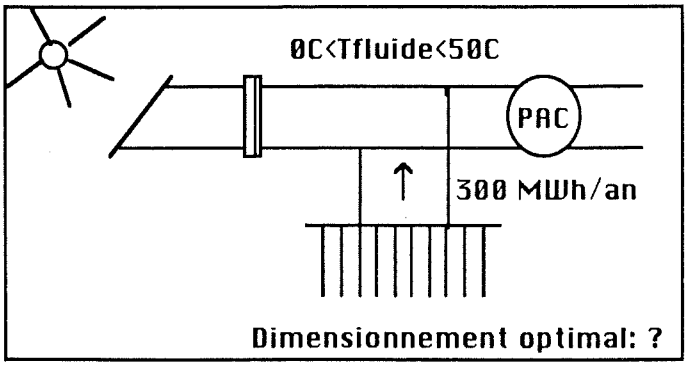
TYPE DE STOCKAGE CONCERNE:
Stockages diffusifs
- forages verticaux (triple_U, double_U, simple_U ou tube annulaire).

DESCRIPTION DU PROBLEME:
On aimerait dimensionner un stockage saisonnier de type diffusif de manière à pouvoir lui extraire 300 MWh par an. Les matériaux utilisés et l'emplacement du stockage imposent les contraintes suivantes: la température du fluide caloporteur dans l'échangeur souterrain ne peut pas excéder 50°C et doit rester supérieure à 0°C. La production de chaleur est assurée par un champ de capteurs solaires. Une pompe à chaleur (PAC) est nécessaire pour extraire l'énergie stockée.

Le terrain (stockage) a les propriétés thermiques suivantes:
- conductivité thermique: 2.5 W/mK;
- capacité thermique volumique: 2.5 MJ/m3K.
La température moyenne de l'air varie de manière sinusoïdale. (Moyenne: 10°C, amplitude: 10K et période: 1 année).

QUESTIONS A RESOUDRE:
Quel est le volume optimal ?
Quelle est la profondeur optimale correspondante ?
Quelle est l'espacement optimal des forages ?
D'autres "optimums" sont-ils possibles?

DESSIN DU PROBLEME:



COMPLEXITE:
3

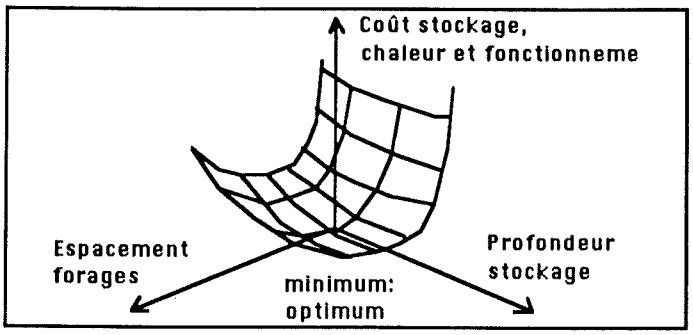
NOM DU LOGICIEL UTILISE:
SMARTSTORE

ORIGINE DU LOGICIEL:
SMARTSTORE version 1.0 (20.11.91, préliminaire): B. Nordell, Division of Water Resources Engineering, Luleå University of Technology, S-95 187 Luleå, Sweden.

SOLUTION PROPOSEE:
Le programme SMARTSTORE permet l'optimisation du stockage. Le mode d'exploitation de ce dernier, qui dépend du système dans lequel il est inséré, doit être spécifié dans le programme. Il est défini comme pour le programme QPERGHS; se référer au problème n° 002 pour son établissement.
Il faut encore spécifier le type d'échangeur souterrain (fonction du type de sous-sol rencontré), ainsi que les coûts des composants du stockage, de leur mise en place et le coût de l'énergie à stocker.

REPONSES AUX QUESTIONS:
Le volume optimal se chiffre à 30'000 m3. L'échangeur souterrain est formé de forages en double_U, creusés à 60 m et espacés de 3.5 m. Ce stockage est optimal relativement aux informations que l'on a fournies au programme. En particulier, le coût de l'énergie à stocker influence le dimensionnement du stockage. Plus ce coût est élevé, plus l'échangeur souterrain sera dense et le stockage compact, résultant en un coût de construction plus élevé. Il ne faut pas confondre "stockage optimal" avec "système optimal".

DESSIN DE SOLUTION:



DONNEES COMPLEMENTAIRES NECESSAIRES:
Le mode d'exploitation supposé est le même que pour le problème n° 002. Toutefois il faut vérifier sa compatibilité avec les puissances de pointes à transférer au stockage.
L'utilisation de SMARTSTORE requiert la connaissance de la géométrie et des propriétés thermiques des matériaux impliqués dans les forages échangeurs (choisis ici en double_U).
Le toit du stockage est isolé avec 10 cm d'isolation de conductivité thermique 0.04 W/mK.
Il faut également spécifier les coûts utilisés. Bien que pouvant être très détaillés, ils sont ici réduits au strict minimum: seuls les coûts des forages équipés et des connections en surfaces sont donnés (100 CHF/m). Le coût de l'énergie à stocker est fixé à 200 CHF/MWh.

ATTENTION A:
Les calculs considèrent un comportement purement saisonnier du stockage. Ils excluent les effets du stockage à court terme.
Les pertes sont calculées en régime stationnaire et ne prennent que le processus de conduction de la chaleur en considération.

DONNEES (INPUT):
Résumé des paramètres utilisés avec SMARTSTORE:
OPTIMIZATION PRESUMPTIONS
TECHNICAL DATA

Drilling Pattern	QUADRATIC
Borehole Installation	DOUBLE-U
Borehole Diameter	0.110 m
Borehole Spacing	1.0 - 5.0 m +/- 0.05 m
Borehole Depth	0.0 - 80.0 m +/- 0.08 m
Land Strip Width	5.0 m
Soil Depth	0.2 m
Soil Thermal Conductivity	2.50 W/m,K
Rock Thermal Conductivity	2.50 W/m,K
Rock Thermal Capacity	2500000 J/(m3,K)
Ground Heat Insul. Depth	0.1 m
Insul. Thermal Conductivity	0.04 W/m,K
Construction Time	1.0 years
Mortgage Time	25.0 years
Interest Rate	6.0 %
Extracted Heat	300 MWh
Inj. Water Temperature	17.0 +/- 15.0 °C
Air Temperature	10.0 +/- 10.0 °C
Phase Inj.Water Temp/Air Temp	0.0 days

BOREHOLE INSTALLATION DATA TYPE: DOUBLE-U

Borehole Diameter	0.110 m
U-Pipe Outer Diameter	0.0320 m
U-Pipe Wall Thickness	0.0020 m
U-Pipe Shank Spacing	0.0500 m
U-Pipe Thermal Conductivity	0.400 W/m,K
Filling Thermal Conductivity	1.500 W/m,K
Filling Thermal Capacitivity	2500000 J/(m3,K)
Cont. Th. Resist. Pipe/Filling	0.020 K/(W/m)
Volumetric Flow Rate/Borehole	0.0004 m3/s
Reference Temperature	15.0 °C

UNIT-COSTS USED IN OPTIMIZATION

LAND AREA COST	
DRILLING COST	
Soil Drilling	
- Drilling Cost	100.00 CHF/m
Rock Drilling	
- Drilling Cost	100.00 CHF/m
PIPE COST	
Borehole Pipe	
Connecting Pipe	100.00 CHF/m
INDOOR COST	
PROJECT ADMINISTRATION COST	
HEAT COST	
Injection Heat Cost	
- Variable	200.00 CHF/MWh
- Annual Cost Increase	0.00 %
Extraction Heat Cost	
- Variable	200.00 CHF/MWh
- Annual Price Increase	0.00 %
MAINTENANCE AND OPERATION COST	
Maintenance Cost	
- Variable	1.00 %
Operation Cost	
- Variable	1.00 %

OUTPUT (EXTRAIT):
Résumé des résultats produits avec SMARTSTORE:

OPTIMUM DESIGN	
Drilling Pattern	QUADRATIC
Borehole Spacing	3.50 m
Borehole Depth	60.08 m
No. Boreholes	41
Storage Land Area	835 m2
Storage Volume	30134 m3
Injected heat	350 MWh
Heat loss	50 MWh
Recovery factor	85.8 %
SUB-TOTALS OF CONSTRUCTION COST	[CHF]
Land Cost	0
Drilling Cost	250908
Piping Cost	14331
Indoor Cost	0
Administration Cost	0
TOTAL CONSTRUCTION COST	265239
Initial Heating Cost	26789
TOTAL INVESTMENT COST	292028
CALCULATED STORAGE DATA	
Maximum Injection Power	122 kW
Maximum Extraction Power	111 kW
Storage Mean Temperature	16.4 °C
CALCULATED THERMAL RESISTANCES	
Borehole Pipe Installation	DOUBLE-U
Fluid/Pipe	0.0089 K/(W/m)
Pipe Material	0.0531 K/(W/m)
Cont. Resist. Pipe/Filling	0.0200 K/(W/m)
Tot. Borehole Thermal Resistance	0.0821 K/(W/m)
Borehole/Ground Thermal Resist.	0.259 K/(W/m)
Vol. Heat Transfer Capacity	0.315 W/(m3,K)
Total Heat Transfer Capacity	9.482 kW/K

SPLIT-UP CONSTRUCTION COSTS	[CHF]	SUB-TOTALS [CHF]
Total Land Cost		0
Soil Drilling	4913	
Rock Drilling	245995	
Total Drilling Cost		250908
Connect. Pipe	14331	
Total Piping Cost		14331
Total Indoor Cost		0
Total Administration Cost		0
TOTAL CONSTRUCTION COST		265239
Initial Heating Cost		26789
TOTAL INVESTMENT COST		292028
ANNUAL STORAGE COST		
Capital Cost of Investment	22844	
Operation and Maintenance Cost	5305	
Heat Loss Cost	9956	
Total Annual Storage Cost		38106

TEMPS DE CALCUL:
Quelques secondes.

* * *

No DU PROBLEME:
2008

Pertes thermiques d'une caverne

ANALYSTE:
D. Pahud

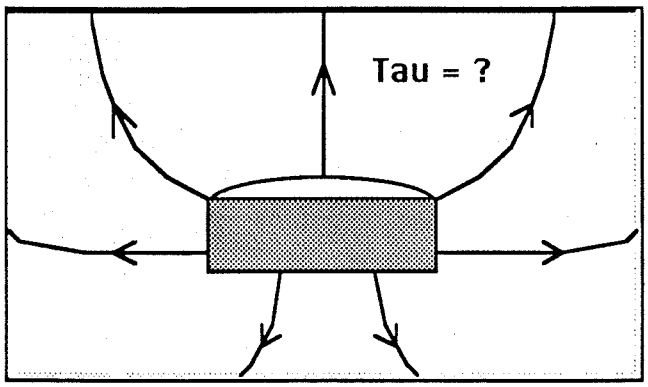
TYPE DE STOCKAGE CONCERNE:
Caverne & Cuve enterrée

DESCRIPTION DU PROBLEME:
On veut évaluer si une caverne existante de 2'000 m3 est adaptée au stockage saisonnier de chaleur. Le stock sera constitué par de l'eau chauffée en été.
Dimensions de la caverne (approximation cylindrique): diamètre 22.6 m, hauteur moyenne 5 m.

La caverne se trouve à une profondeur moyenne d'environ 20 m, dans un granite de caractéristiques thermiques:
conductivité thermique: 3 W/mK;
capacité calorifique volumique: 2.5 MJ/m3K.
La température de l'air extérieur varie de 0 (mi janvier) à 20 C (mi juillet) selon une sinusoïde.
La température initiale du granite est de 10 C.
On admettra que l'on peut charger le stock en été pour atteindre 80 C à fin septembre de la première année de fonctionnement.

QUESTIONS A RESOUDRE:
Comment évolue la température de l'eau d'octobre à mars, en l'absence de soutirage de chaleur ?
Quelle est la constante de temps du stock ?
La caverne est-elle adaptée au stockage saisonnier ?
La situation s'améliore-t-elle au bout du 5ème cycle annuel ?

DESSIN DU PROBLEME:



COMPLEXITE:
5

NOM DU LOGICIEL UTILISE:
XST + TRNSYS

ORIGINE DU LOGICIEL:
XST: Mazzarella, L. (1992) Multi-flow Stratified Thermal Storage Model with Full Mixed Layers. Pdm - XST. TRNSYS Version September 1992, ITW, Universität Stuttgart, Germany, and Dipartimento di Energetica, Politechnico di Milano, Italy.
TRNSYS: A Transient Simulation Program. Version 13.1, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, USA.

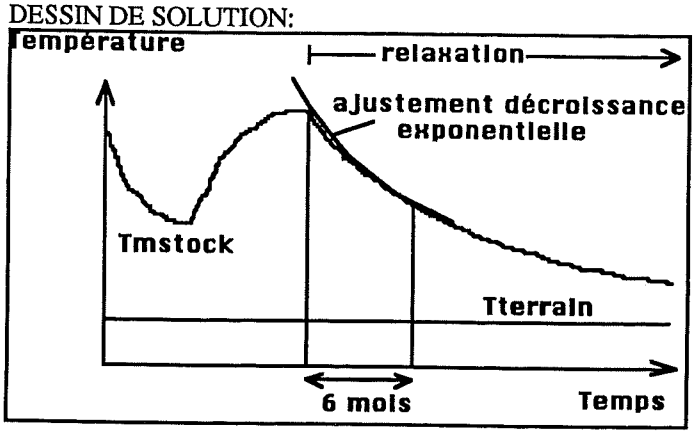
SOLUTION PROPOSEE:
On utilise le module XST développé pour TRNSYS pour calculer l'évolution de la température de la caverne pendant sa relaxation.

Ce module découle du modèle SST issu de l'université de Lund, dont une version pour TRNSYS existe également. Le module XST permet de connecter plusieurs circuits d'injection ou de soutirage au stockage. La version autonome de SST peut également être utilisée.

La constante de temps de la caverne est estimée en ajustant une décroissance exponentielle sur les 6 premiers mois de relaxation.

REPONSES AUX QUESTIONS:
Pour que la caverne soit adaptée au stockage saisonnier, sa constante de temps doit être supérieure à une année.
Après une charge estivale, la constante de temps de la caverne est estimée à environ 290 jours. La situation s'améliore d'année en année, et après 5 cycles, elle augmente à 380 jours.
Une caverne cylindrique de 2'000m3, dans les conditions ci-dessus, représente un volume minimum pour réaliser un stockage saisonnier.

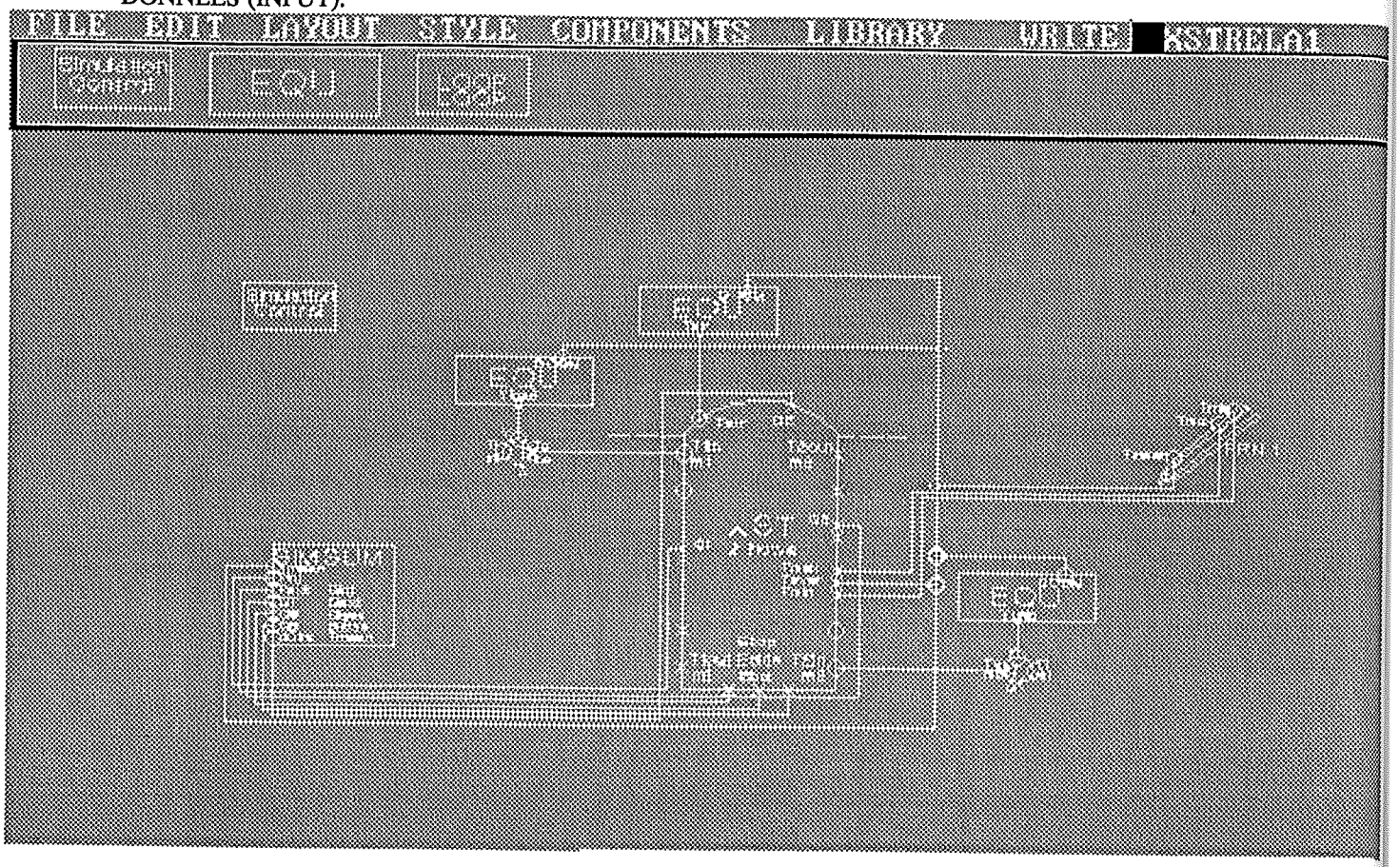
DESSIN DE SOLUTION:



DONNEES COMPLEMENTAIRES NECESSAIRES:
En plus des informations données dans la description du problème, il faut définir un mode d'exploitation de la caverne: avril à septembre, injection d'eau à 80C au sommet de la caverne (10m3/h). D'octobre à mars, injection d'eau à 35C par le fond (10m3/h) si pas de relaxation.

ATTENTION A:
La constante de temps diminue avec l'augmentation des pertes. Attention à la qualité du rocher; les pertes sont augmentées par: infiltrations, écoulement d'eau souterrain, failles et tunnel d'accès permettant des circulations convectives de l'eau stockée.

DONNEES (INPUT):



TRNSYS INPUT DECK:

```
ASSIGN XSTRELA0.LST 6
*          Start time  End time  Time step
SIMULATION     2160     19680       1
*          Integration Convergence
TOLERANCES    -0.01     -0.01
*
*          Max iterations;  Max warnings; Trace limit;
LIMITS         10          4          10
*
*          TRNSYS output file width, number of characters
WIDTH          72
*
*          TRNSYS numerical integration solver method
DFQ            1
*
*  EQUATIONS in Simulation Control Component
EQUATIONS 11
NbYear = 1
RELAXT = 6540 + (NbYear-1)*8760
VOLUME = 2000
HEIGHT = 5
DEPTH  = 20
LAMBDA = 3.0 *3.6
RHOC   = 2500
TGROUN = 10
FLOW   = 10000
TINL   = 80
TINU   = 35
*
*  EQUATIONS in Equation Components
EQUATIONS 9
Tair   = 10 + 10*SIN(4.11E-2*TIME+255.2) + [3,8] - [3,8]
Yload1 = AND(GT(MOD(TIME,8760),2160),LT(MOD(TIME,8760),6540))
Yload  = Yload1 * LT(TIME,RELAXT)+[3,8]-[3,8]
Yunlo1 = NOT(AND(GT(MOD(TIME,8760),2160),LT(MOD(TIME,8760),6540)))
Yunlo  = Yunlo1 * LT(TIME,RELAXT) + [3,8] - [3,8]
RESET  = LT(1-EQL(TIME,RELAXT),0.00001)
RATIO  = ([3,8]-TGROUN)/([5,1]-TGROUN)
```

```
SWITCH = GT(RATIO,0.3679)
TAU    = SWITCH*(TIME+1-RELAXT)
*
UNIT 1  TYPE 3  Pump   PRESIM TYPE 20
PARAMS 4
*    1  Maximum flow rate  [ mf(max) ]
       FLOW
*    2  Maximum power consumption  [ P(max) ]
         0
*    3  C0.  Constant in relation P = C0 + C1 * mf
         0
*    4  C1.  Constant in relation P = C0 + C1 * mf
         0
INPUTS 3
*  1  Inlet fluid temperature  Not connected. Fix value
   0,  0
*  2  Inlet mass flow rate  Not connected. Fix value
   0,  0
*  3  Control function..from..L  LBL " Yload "
Yload
*  INPUT INITIAL VALUES
*    1
       TINL
*    2
         0
*    3
         0
*
UNIT 2  TYPE 3  Pump   PRESIM TYPE 20
PARAMS 4
*    1  Maximum flow rate  [ mf(max) ]
       FLOW
*    2  Maximum power consumption  [ P(max) ]
         0
*    3  C0.  Constant in relation P = C0 + C1 * mf
         0
*    4  C1.  Constant in relation P = C0 + C1 * mf
         0
INPUTS 3
*  1  Inlet fluid temperature  Not connected. Fix value
   0,  0
*  2  Inlet mass flow rate  Not connected. Fix value
   0,  0
*  3  Control function..from..L  LBL " Yunlo "
Yunlo
*  INPUT INITIAL VALUES
*    1
       TINU
*    2
         0
*    3
         0
*
UNIT 3  TYPE 62  PdM - XST   PRESIM TYPE 4062
PARAMS 44
*    1  IMODE (TRQ input required 0=NO, 1=YES)
         0
*    2  No. of const. volume segments (NN)
         10
*    3  Convection (0=any, 1=mix.inv., 2=mixed)
         1
*    4  No. of flow streams through storage
         2
*    5  No. of inlets-1
         1
*    6  Inlet-1 pos.  (from collector)
         1
*    7  No. of outlets-1
         1
*    8  Outlet-1 pos. (to collector choose NN)
         10
*    9  No. of inlets-2
         1
*    10  Inlet-2 pos. (from load choose NN)
         10
*    11  No. of outlets-2
         1
*    12  Outlet-2 pos. (to load)
         1
*    13  Storage volume
       VOLUME
*    14  Storage height/depth (>0)
       HEIGHT
*    15  Dist. ground surf. to stor. top (pos=down)
       DEPTH
*    16  Stor. material thermal conductivity
       2.1598
*    17  Stor. material vol. therm. cap.(kJ/m3-K)
         4200
*    18  Fluid velocity - conv. on (not appl.)
       35997
*    19  Max perm fluid flow rate (not appl.)
       20000
```

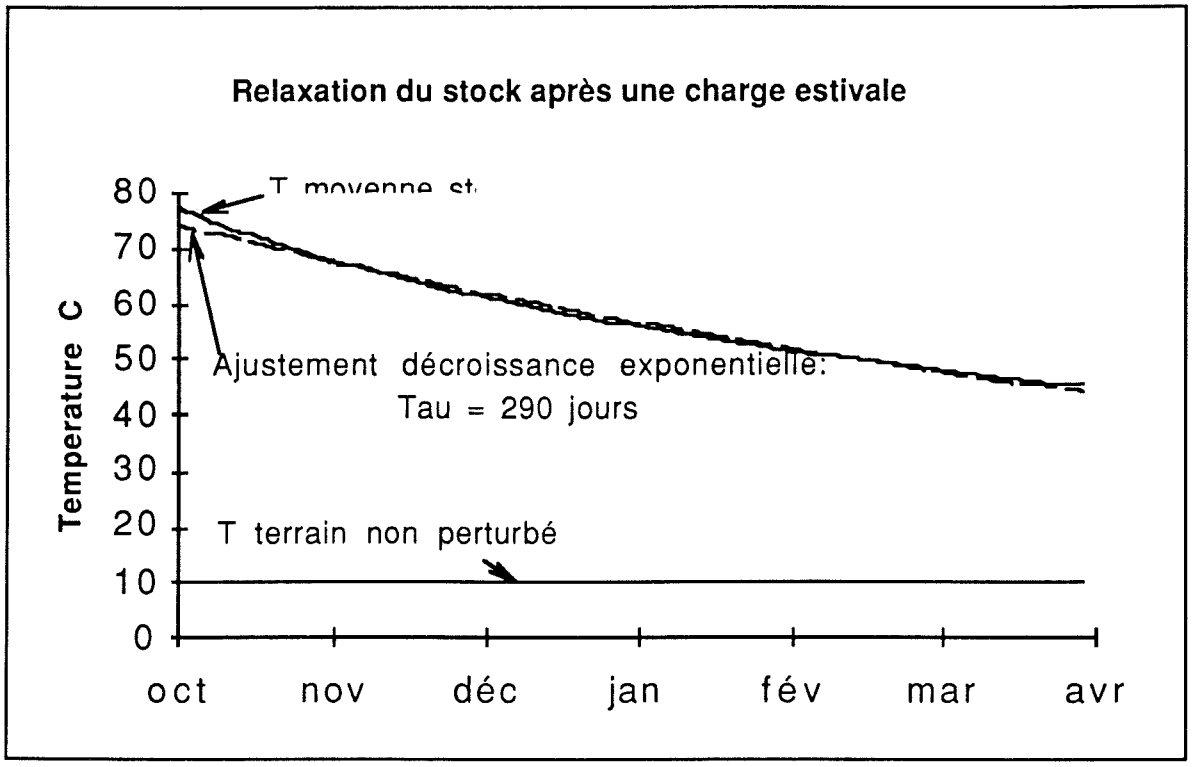
```
*    20  Spec. therm. cap. of fluid
       4.2
*    21  Mass density of fluid
      1000
*    22  Dispersion length (not appl.)
        0
*    23  Power of Darcy's flow (not appl.)
        1
*    24  Thickness of therm insulation
        0
*    25  Top insul. fraction of thickness above
        0
*    26  Side insul. fraction of thickness above
        0
*    27  Bottom insul. fraction of thickn. above
        0
*    28  Therm cond. of insulation material
    0.17999
*    29  No. of years to simulate (init. num. mesh)
       20
*    30  Max temperature to storage
      100
*    31  Initial storage temperature
     TGROUN
*    32  Initial ground surface temperature
       10
*    33  Initial temp. grad. in ground (K/m)
        0
*    34  No. of preheating cycles (0=no preheat)
        0
*    35  Max stor. temp. during preheat
       80
*    36  Min stor. temp. during preheat
       40
*    37  Annual air temp. during preheat
       10
*    38  Annual air temp. ampl. during preheat
       10
*    39  No. of ground layers
        1
*    40  Thermal cond. in surr. ground layer 1
     LAMBDA
*    41  Vol therm. cap. in surr. ground layer 1
      RHOC
*    42  Thickness of ground layer 1 (MIN 150 !!)
      1000
*    43  Print input data (0=NO, 1=YES)
        0
*    44  Print misc. output 1-4 (0=NO, 1=YES)
        0
INPUTS 5
* 1  Inlet temp. of flow-1..from..Pump " To "
   1, 1
* 2  Mass flow-1 rate ..from..Pump " mo "
   1, 2
* 3  Inlet temp. of flow-2..from..Pump " To "
   2, 1
* 4  Mass flow-2 rate..from..Pump " mo "
   2, 2
* 5  Amb air temp..from..L  LBL " Tair "
Tair
*   INPUT INITIAL VALUES
*    1
        0
*    2
        0
*    3
        0
*    4
        0
*    5
        0
*
UNIT 4   TYPE 24     PRESIM TYPE 1
PARAMS 1
*    1  Time interval for integr. (>0 hour, <0 month)
        1
INPUTS 4
* 1  1st quantity to be integrated..from..PdM - XST " Taver "
   3, 8
* 2  2nd quantity to be integrated..from..L  LBL " Taui "
TAU
* 3  3rd quantity to be integrated  Not connected. Fix value
   0, 0
* 4  4th quantity to be integrated  Not connected. Fix value
   0, 0
*   INPUT INITIAL VALUES
*    1
    -1E+008
*    2
        0
*    3
     1E+008
```

```
*   4
    1E+008
*
UNIT 5  TYPE 15  Algebraic Operator mode B   PRESIM TYPE 1
PARAMS 49
*   1
      -1
*   2  1/timestep
       1
*   3  1/Tau
      -23
*   4
      -1
*   5  INITVAL MAX
   -1E+008
*   6
      -21
*   7
      -1
*   8  INITVAL MIN
    1E+008
*   9
      -22
*   10  IN1
      -11
*   11  1/Tau
      -33
*   12
       1
*   13  OLDIN1
      -12
*   14  MAX
       12
*   15  RESET
      -19
*   16  INITVAL MAX
      -31
*   17
       1
*   18
       3
*   19  NEWIN1
      -4
*   20  IN3
      -13
*   21  1/Tau
      -33
*   22
       1
*   23  OLDIN3
      -14
*   24  MAX
       12
*   25  RESET
      -19
*   26  INITVAL MAX
      -31
*   27
       1
*   28
       3
*   29  NEWIN3
      -4
*   30  IN5
      -15
*   31  1/Tau
      -33
*   32
       1
*   33  OLDIN5
      -16
*   34  MIN
       11
*   35  RESET
      -19
*   36  INITVAL MIN
      -32
*   37
       1
*   38
       3
*   39  NEWIN5
      -4
*   40  IN7
      -17
*   41  1/Tau
      -33
*   42
       1
*   43  OLDIN7
      -18
*   44  MIN
       11
```

```
*   45  RESET
      -19
*   46  INITVAL MIN
      -32
*   47
        1
*   48
        3
*   49  NEWIN7
      -4
INPUTS 9
* 1  1st input..from.. " Ttau "
   4, 1
* 2  2nd input..from..Algebraic Operator mode B " T1 "
   5, 1
* 3  3rd input..from.. " ttau "
   4, 2
* 4  4th input..from..Algebraic Operator mode B " t2 "
   5, 2
* 5  5th input  Not connected. Fix value
   0, 0
* 6  6th input  Not connected. Fix value
   0, 0
* 7  7th input  Not connected. Fix value
   0, 0
* 8  8th input  Not connected. Fix value
   0, 0
* 9  9th input..from..L  LBL " RESET "
RESET
*  INPUT INITIAL VALUES
*   1
        0
*   2
    -1E+008
*   3
        0
*   4
        0
*   5
        0
*   6
    1E+008
*   7
        0
*   8
    1E+008
*   9
        0
*
UNIT 6  TYPE 25  Printer                PRESIM TYPE 1125
PARAMS 4
*   1  Print time interval   (>0=hours <0=months)
        24
*   2  Time for start of printer     -"-
    RELAXT
*   3  Time for stop of printer      -"-
    100000
*   4  Logical unit No (<=0 for std Line Printer)
        23
INPUTS 5
* 1  The 1th INPUT to be printed..from..PdM - XST " Taver "
   3, 8
* 2          ..from..PdM - XST " Tmax "
   3, 7
* 3            ..from..PdM - XST " Tmin "
   3, 9
* 4  The 2nd INPUT to be printed..from..Algebraic Operator mode B " t2 "
   5, 2
* 5  The 3rd INPUT to be printed  Not connected. Fix value
   SWITCH
 Tmean
 Tmax
 Tmin
 Tau
 SWITCH
FORMAT
(F8.0,5F9.2)
ASSIGN XSTRELA0.PR1        23
*
UNIT 7  TYPE 28  Simulation summary   PRESIM TYPE 1128
PARAMS 36
*   1  Time interval for summaries (>0=hours,<0=month)
       -1
*   2  Time at which summaries begin       -"-
        0
*   3  Time at which summaries to end      -"-
    100000
*   4  Logical unit number for output (see manual)
        22
*   5  Output mode:
        2
*   6  1st inp
      -11
```

```
*   7
      -1
*   8   kJ to MWh
  2.78E-007
*   9
       1
*   10   1st out
      -3
*   11  2nd inp
     -12
*   12
      -1
*   13   kJ to MWh
  2.78E-007
*   14
       1
*   15   write 2nd
      -3
*   16  3rd inp
     -13
*   17  4rd inp
     -14
*   18  5rd inp
     -15
*   19
       3
*   20
       3
*   21
      -1
*   22   kJ to MWh
  2.78E-007
*   23
       1
*   24   3rd out
      -3
*   25  6th inp
     -16
*   26
      -1
*   27   kJ to MWh
  2.78E-007
*   28
       1
*   29
       3
*   30
       4
*   31
       3
*   32   4th out
      -4
*   33   7th input
     -17
*   34
      -2
*   35
       2
*   36   5th out
      -4
INPUTS 7
* 1  1st input ..from..PdM - XST " Q1 "
   3,  3
* 2  2nd input ..from..PdM - XST " Q2 "
   3,  6
* 3  3th input ..from..PdM - XST " Etop "
   3, 10
* 4  4th input ..from..PdM - XST " Eside "
   3, 11
* 5  NEW PROMPT..from..PdM - XST " Ebot "
   3, 12
* 6  NEW PROMPT..from..PdM - XST " DE "
   3, 13
* 7  NEW PROMPT..from..PdM - XST " Taver "
   3,  8
LABELS 5
 Qinj Qext Qloss BilSys Tmean
FORMAT
(4F8.3)
ASSIGN XSTRELA0.SUM        22
*
END
```

OUTPUT (EXTRAIT):



TEMPS DE CALCUL:
Relaxation après une charge: 13sec; après 5 cycles: 1min (Pentium, 60MHz)

* * *