

Simulation d'un hypocauste

Benoît Vincent.

Comment ça marche ?

Le fonctionnement de l'hypocauste est simulé en résolvant l'équation de la chaleur dynamique dans un domaine à 2 dimensions suffisamment grand et supposé homogène. Pas d'effet de convection, pas d'effet d'humidité, pas d'effet de l'échangeur (par exemple un réseau de gros tuyaux, denses, peut jouer comme un isolant entre la partie supérieure et inférieure de l'hypocauste. Ce domaine peut être vu comme une tranche de 1 m de long du domaine réel tridimensionnel et les effets de la troisième dimension ne sont pas pris en compte. Les conditions imposées aux frontières de ce domaine de calcul sont :

- la température du sol profond, supposée constante (fond et cotés du domaine),
- la température du sol en surface (mais pas la chaleur apportée par l'irradiation solaire),
- la température du local au dessus de l'hypocauste ainsi qu'un isolant entre le sol et le local (représentant la résistance de la couche d'air au dessus du sol),
- deux isolants verticaux délimitant le sol du local au dessus de l'hypocauste et le sol extérieur,
- un échangeur de chaleur qui permet de dissiper une puissance thermique au sein de la masse constituant l'hypocauste.

Le cycle de fonctionnement est défini par l'utilisateur qui spécifie :

- intervalles de temps pendant les quels une puissance est transmise à la masse,
- valeur de la puissance,
- anecdotiquement température du sol extérieur (qui à peu d'influence sur les résultats) pendant cet intervalle.

Les résultats de calcul sont écrits dans un fichier toutes les heures simulées, l'écran est rafraîchi toutes les 2 seconde (de temps réel) pour représenter le champs de température dans le domaine de calcul ainsi que quelques informations chiffrées.

Validation

A faire à partir d'un logiciel commercial de mécaFlu ... en cours.

Paramètres en entrée

Les paramètres en entrée se trouvent dans un fichier txt.

Par exemple :

```
# les conditions sont modifiées à la date spécifiée, jusqu'à la prochaine date
# pour chaque ligne :
# date (heure), puissance transmise par l'échangeur (W par tranche de 1 mètre d'habitation),
# température extérieure (°)
0,500,10
4,0,10
100,500,10
104,0,10
200,999,999
#fin, on recommence
```

Le symbole # permet d'écrire des commentaires.

Dans cet exemple, on suppose qu'il y a du soleil pendant 4 heures qui permet, via des capteurs thermique solaires correctement dimensionnés (ou une résistance électrique, mais c'est pas le but !) et une technique d'échangeur qui n'est pas définie ici, de passer 500 w dans le sol, par tranche de 1 m d'hypocauste. Donc si le local au dessus de l'hypocauste fait 10m de long, il faudra collecter 5000w (après prise en compte des rendements de captage et transport ...).

Ensuite (à partir de la 4^{ième} heure), la puissance passe à 0 et reste 0 pendant 94 heures (jusqu'à 100 heures, soit 4 jours sans soleil donc ...). On recommence à chauffer l'hypocauste pendant 4 heures puis on arrête à nouveau pendant 96 heures.

A 200 heures, les valeurs 999 signifient qu'on recommence.

La température du sol extérieur est toujours 10° dans cet exemple.

On recommence ce cycle jusqu'à obtenir un état permanent (chaque cycle se répète identiquement au précédent). Ca prend un certain nombre de cycles car tout ça a une certaine inertie et que l'état initial ne correspond à rien de bien réel. Le thread de calcul s'arrête lorsque le flux de chaleur au niveau du sol du local varie de moins de 0.1% par rapport au cycle précédent.

Résultats de calcul

Toutes les heures simulées, des infos sont écrites dans un fichier nommé :

[HypoFile21-04-2008.log](#)

Ce fichier est écrit sur C:/ On retrouve la date de début de calcul à la fin du nom du fichier.

C'est un fichier texte à ouvrir avec Wordpad ou autre.

On y trouve les données relatives au domaine et à la résolution du problème numérique (du sable ici) :

```
Dimension domaine : x 16.000000 y 10.000000
Profondeur hypocauste 1.000000
Position isolants verticaux 5.000000 11.000000
Masse volumique (kg/m3) 1500.000000
Capacité thermique massique (J/kg/°) 835.000000
Conductivité thermique (W/m/°) 0.330000
Coefficient de diffusivité thermique (m²/s) 2.634731e-007
```

Pas de temps (s) 250.000000
Pas d'espace x 0.053333 y 0.050000

Puis un résumé des données décrivant un cycle de fonctionnement, puis des résultats de calcul :

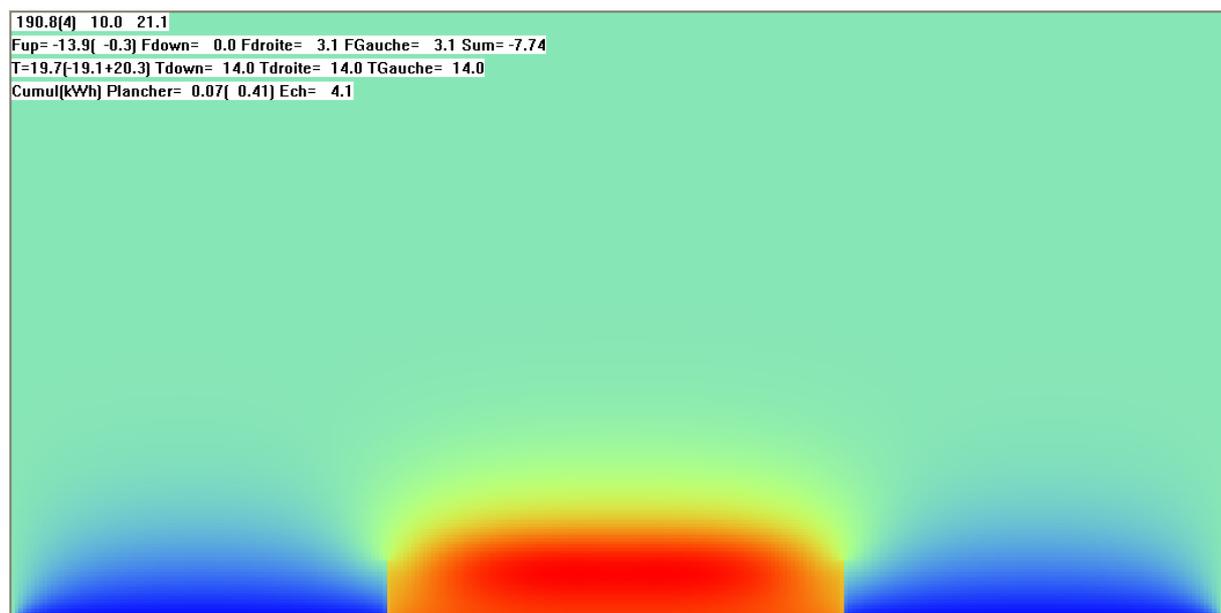
Date (heures);Température Sol;TempératureEchangeur;CumulChaleurEchangeur(kWh);CumulChaleurTransféréeSol(kWh)
1.041667;20.530775;21.731070;0.074236;-0.001123
2.013889;20.530085;21.730068;0.079097;-0.002161
3.055556;20.529346;21.731239;0.084306;-0.003269
4.027778;20.528656;21.734167;0.089167;-0.004300
5.000000;20.527969;21.738247;0.094028;-0.005326
6.041667;20.527235;21.743256;0.099236;-0.006421
7.013889;20.526550;21.748098;0.104097;-0.007438
8.055556;20.525814;21.753180;0.109306;-0.008524
.....

La température du sol du local est une moyenne, par contre la température au niveau de l'échangeur est prise en un point. L'échangeur est simulé par 10 cellules qui vont dissiper la chaleur. La surface de l'échangeur étant plus petite que dans la réalité, on observe des températures trop élevées pendant la simulation. Mais c'est bien la valeur choisie de la puissance qui est diffusée dans le sol.

Enfin, le plus important, on trouve le cumul durant le cycle, de la chaleur (en kWh) passée par l'échangeur (c'est-à-dire ce qu'on paye, encore que le soleil soit gratuit, mais pas les capteurs ...) et le cumul de chaleur passé au local. Le ratio des deux peut être vu comme le rendement de l'installation.

Excel est là pour faire de jolies courbes.

Informations affichées sur l'interface



D'abord le domaine de calcul est affiché à l'envers (haut/bas) et n'est pas à l'échelle. Mais est ce bien important ?

Les couleurs représentent la température dans chaque cellule de calcul. Bleu froid, rouge chaud.

On reconnaît les isolants verticaux, le sol extérieur, et la masse thermique chaude, la chaleur qui part vers le sol profond et sur les cotés. Le sol profond est (aux limites du domaine) à 14°.

En haut, dans l'ordre de lecture, on trouve :

Le nombre d'heures simulées (le nombre de cycles simulés), la température mini dans le domaine, la température maxi dans le domaine.

Fup : le flux de chaleur sur la face supérieure (donc celle affichée en bas) (le flux qui passe dans le sol du local), le flux sur la face inférieure, sur les faces de droite et de gauche, la somme des flux sur les 4 faces (en régime stationnaire, converge vers la puissance de l'échangeur, car ce qui rentre dans le domaine doit sortir).

Puis la température moyenne du sol du local (-temp mini +temp maxi), la température des autres frontières du domaine.

Enfin le cumul de chaleur qui passe dans le plancher (la valeur atteinte à la fin du cycle précédent), le cumul de chaleur qui passe dans l'échangeur.

Le seul bouton de contrôle permet de mettre le calcul en pause. Si vous fermez le programme sans mettre en pause alors que la simulation tourne, vous obtenez un message d'erreur.

Exemple

Exécuter le programme SolveurChaleur.exe

Il vous demande de sélectionner un fichier txt.

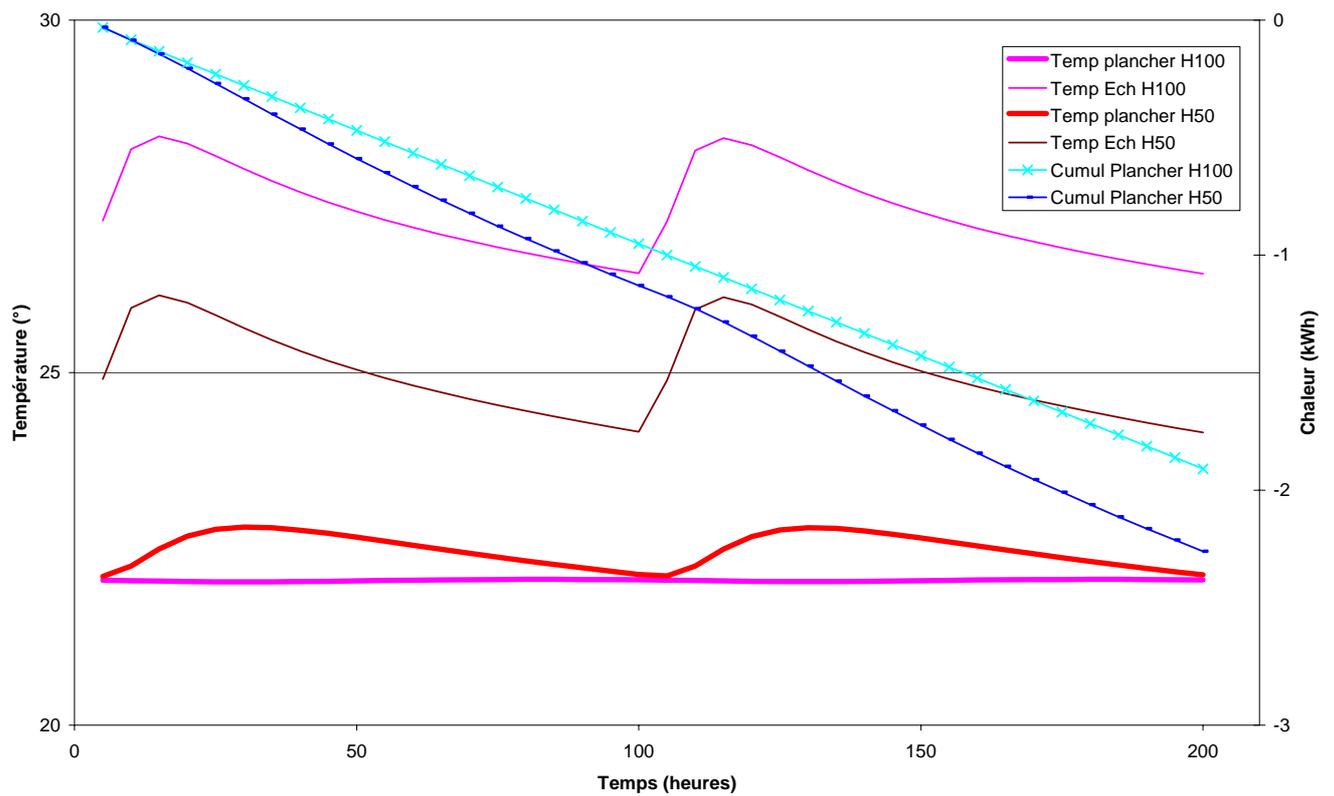
Sélectionner dataHypo3.txt fourni dans le dossier.

Le calcul commence. Vous pouvez le mettre en pause pour lire les informations.

Quand le calcul s'arrête (ou avant) vous pouvez lire le fichier contenant les résultats sur C:\

Dans ce cas le calcul s'arrête après 80 cycles (une petite boîte signale « Convergé »).

Pour cette simulation (4 heures de soleil suivie de 4 jours sans soleil), on obtient ce genre de résultat :



Ici l'échangeur (et les isolants) sont testés à 2 profondeurs (1 m : H100 et 50 cm : H50). On injecte donc 4 kWh dans le sol par cycle (8 heures à 500 w) et on récupère 1.9 ou 2.3 kWh (voir le graphe). Ce qui est cohérent avec ce qu'on trouve dans les bouquins : la moitié de la chaleur seulement est restituée au plancher. On peut voir aussi le déphasage (80 heures pour H100, 30 heures pour H50) et l'amortissement en température (voir ci-dessous).

Temps (h)	Temp plancher H100	Temp Ech H100	Cumul Ech	Cumul Plancher H100
5	22.054113	27.156616	2.048542	-0.031507
10	22.049006	28.170862	2.048542	-0.082879
15	22.043358	28.351175	2.048542	-0.132563
20	22.038115	28.249638	2.048542	-0.181399
25.000001	22.034435	28.075275	2.048542	-0.229738
30.000001	22.033041	27.891579	2.048542	-0.277776
35.000001	22.034008	27.717875	2.048542	-0.32565
40.000001	22.036922	27.559122	2.048542	-0.373463
45.000001	22.041166	27.415394	2.048542	-0.421288
50.000001	22.046104	27.285192	2.048542	-0.469174
55.000001	22.051153	27.166681	2.048542	-0.517149
60.000001	22.055904	27.0581	2.048542	-0.565223
65.000002	22.060005	26.957949	2.048542	-0.613392
70.000002	22.063242	26.864952	2.048542	-0.661644
75.000002	22.06547	26.778061	2.048542	-0.709958
80.000002	22.066614	26.696407	2.048542	-0.758307
85.000002	22.06665	26.619289	2.048542	-0.806666
90.000002	22.06559	26.546125	2.048542	-0.855005
95.000002	22.063459	26.476425	2.048542	-0.903295
100.000002	22.060312	26.409794	2.048542	-0.951508
105.000003	22.056204	27.145687	4.062431	-0.99963
110.000003	22.05121	28.148676	4.062431	-1.047608
115.000003	22.045668	28.327456	4.062431	-1.095436
120.000003	22.040476	28.227192	4.062431	-1.143109
125.000003	22.036797	28.054764	4.062431	-1.19065
130.000003	22.035345	27.87302	4.062431	-1.238106
135.000003	22.0362	27.701094	4.062431	-1.285537
140.000003	22.03896	27.543896	4.062431	-1.332997
145.000004	22.043016	27.401501	4.062431	-1.380534
150.000004	22.047743	27.272444	4.062431	-1.428179
155.000004	22.05257	27.154911	4.062431	-1.475947
160.000004	22.057093	27.047197	4.062431	-1.523838
165.000004	22.060974	26.947798	4.062431	-1.571844
170.000004	22.063993	26.855459	4.062431	-1.619947
175.000004	22.066015	26.769146	4.062431	-1.668122
180.000004	22.066971	26.688013	4.062431	-1.716342
185.000004	22.066828	26.611353	4.062431	-1.76458
190.000005	22.065599	26.538603	4.062431	-1.812802
195.000005	22.063316	26.469276	4.062431	-1.860979
200.000005	22.060026	26.402981	4.062431	-1.909082

Temps (h)	Temp plancher H50	Temp Ech H50	Cumul Ech	Cumul Plancher H50
5	22.108149	24.907722	2.048542	-0.030536
10	22.257759	25.918707	2.048542	-0.08478
15	22.499594	26.095863	2.048542	-0.143329
20	22.680876	25.991976	2.048542	-0.205517
25.000001	22.776827	25.816776	2.048542	-0.269761
30.000001	22.80846	25.633951	2.048542	-0.334765
35.000001	22.799238	25.462511	2.048542	-0.399641
40.000001	22.765985	25.306871	2.048542	-0.463817
45.000001	22.719349	25.166538	2.048542	-0.52694
50.000001	22.665764	25.039566	2.048542	-0.588796
55.000001	22.609047	24.9238	2.048542	-0.649266
60.000001	22.551441	24.817322	2.048542	-0.708287
65.000002	22.49424	24.718523	2.048542	-0.76584
70.000002	22.43819	24.626106	2.048542	-0.821926
75.000002	22.383698	24.539064	2.048542	-0.876563
80.000002	22.330967	24.456581	2.048542	-0.929782
85.000002	22.280083	24.378029	2.048542	-0.981619
90.000002	22.231064	24.302904	2.048542	-1.032112
95.000002	22.183874	24.230804	2.048542	-1.081303
100.000002	22.13846	24.161402	2.048542	-1.129233
105.000003	22.113834	24.894234	4.062431	-1.176493
110.000003	22.258804	25.893961	4.062431	-1.22733
115.000003	22.49585	26.069567	4.062431	-1.283891
120.000003	22.673782	25.966925	4.062431	-1.344698
125.000003	22.767775	25.793592	4.062431	-1.407874
130.000003	22.798397	25.612616	4.062431	-1.471994
135.000003	22.788761	25.442816	4.062431	-1.536109
140.000003	22.755444	25.288582	4.062431	-1.599612
145.000004	22.708944	25.149441	4.062431	-1.662131
150.000004	22.655613	25.023479	4.062431	-1.723437
155.000004	22.599207	24.908573	4.062431	-1.7834
160.000004	22.541937	24.802837	4.062431	-1.841954
165.000004	22.485085	24.704687	4.062431	-1.89907
170.000004	22.42938	24.612844	4.062431	-1.954746
175.000004	22.375223	24.526306	4.062431	-2.008998
180.000004	22.322819	24.444284	4.062431	-2.061854
185.000004	22.272247	24.366152	4.062431	-2.113345
190.000005	22.223522	24.291405	4.062431	-2.16351
195.000005	22.176611	24.219658	4.062431	-2.212388
200.000005	22.131462	24.150585	4.062431	-2.260019

N'imprimez pas ce document ... ça ne sert à rien !