

Simplified Procedure for Determining Seasonal
Basement Heat Loss

Alain LEBRU

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (C.S.T.B.)
Etablissement de Sophia Antipolis
Boîte Postale 21
06562 VALBONNE CEDEX, FRANCE

KEY WORDS :

Building - Ground Heat Transfer, Finite Elements, Ground Water Table,
Simplified Method

Summary :

The procedure followed to elaborate a simplified method for determining steady-state basement heat loss over the heating season is discussed. Interpreting the results of bidimensional and threedimensional finite elements simulations led to a new simplified procedure, the heat loss through the floor being described by a linear component and a surface-one. It is proposed to evaluate the simplified model's parameters for a large range of insulation system configurations by using bidimensional-cylindrical geometry finite elements simulations. The parameters taken into account in the proposed evaluation procedure are :

- insulation system (vertical, global) ;
- thermal and geometric walls-floor characteristics ;
- height of basement wall below grade ;
- groundwater table characteristics (temperature and deepness) ;
- inside and outside temperatures ;
- soil thermal conductivity.

Procédure simplifiée d'évaluation à l'échelle de la saison de chauffage
des transferts thermiques des parois en contact avec le sol

Alain Lebru

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (C.S.T.B.)
Etablissement de Sophia Antipolis
Boîte Postale 21
06562 VALBONNE CEDEX, FRANCE

MOTS CLES :

Éléments finis, Modèle simplifié, Nappe phréatique, Transfert de chaleur
parois-sol

Sommaire :

On expose la démarche suivie pour mettre au point une formulation simplifiée permettant d'évaluer en régime stationnaire les pertes thermiques d'un bâtiment par ses parois en contact avec le sol, à l'échelle du mois ou de la saison de chauffage. Après une analyse de sensibilité aux paramètres influents, réalisée à l'aide d'un modèle aux éléments finis bidimensionnel cartésien, et une confrontation sur un exemple des pertes évaluées par ce type de modèle et un modèle aux éléments finis tridimensionnel, on montre qu'on peut estimer convenablement les transferts par des formules simples, faisant apparaître entre autres une composante linéique et une composante surfacique pour les pertes par le plancher ; on propose par ailleurs d'évaluer pour chaque configuration-type les paramètres du modèle simplifié à l'aide de simulations aux éléments finis en géométrie cylindrique. Les paramètres dont il est tenu compte explicitement dans la procédure d'évaluation proposée sont :

- type d'isolation (verticale, globale) ;
- caractéristiques thermiques et géométriques des parois ;
- profondeur d'enterrement ;
- caractéristiques de la nappe phréatique (température et profondeur) ;
- températures intérieure et extérieure ;
- conductivité du sol.

1. Introduction

Le C.S.T.B. s'intéresse à la thermique des sols dans le but d'améliorer les règles de calcul actuelles concernant l'évaluation des déperditions thermiques des bâtiments par leurs parois en contact avec le sol.

Ces règles actuelles (1) sont fondées sur des hypothèses simplificatrices : bidimensionnalité, lignes de flux circulaire, absence de nappe phréatique et conductivité du sol fixée à 1.9 W/m.°C. Ces hypothèses étaient justifiées à l'époque de leur élaboration en raison, d'une part, des faibles moyens de calcul du moment et, d'autre part, du caractère peu contraignant des premières exigences réglementaires en matière d'isolation thermique des bâtiments.

L'évolution des moyens informatiques et le renforcement des exigences réglementaires sur le plan thermique dans la construction neuve en France ont conduit le C.S.T.B. à réviser les règles de calcul, le but étant d'élaborer un jeu de formules simplifiées, d'un emploi aisé et prenant en compte avec pertinence :

- la géométrie du bâtiment ;
- la configuration géométrique du couple sol-bâtiment ;
- les caractéristiques typologiques et thermiques des isolants ;
- les caractéristiques des sols ;
- la présence éventuelle d'une nappe phréatique peu profonde.

L'objectif poursuivi étant d'évaluer correctement les pertes à l'échelle de mois ou de la saison de chauffage, l'étude, dont quelques résultats sont présentés ici, est réalisée en régime stationnaire.

On expose ici la démarche suivie pour aboutir à une formulation pertinente, c'est-à-dire à la fois simple, physique et fiable, ainsi qu'au choix d'un modèle numérique adapté à une bonne évaluation des paramètres des formules proposées.

Un aspect fondamental du problème est la caractérisation thermique des sols ainsi que la caractérisation de la nappe phréatique en profondeur et température ; ce point n'est pas abordé ici, le lecteur intéressé pouvant se reporter aux références (2) et (3).

2. Etude de sensibilité en bidimensionnel cartésien

On considère un champ infini de bâtiments identiques, infiniment longs, disposés en parallèle ; par symétrie, il suffit de considérer le domaine hachuré (Fig. 1).

Le problème tridimensionnel d'évaluation des déperditions se ramène alors à un problème bidimensionnel, les notations utilisées étant précisées sur la Fig. 2.

Des simulations ont été réalisées à l'aide du code aux éléments finis TWOPEPEP développé par IMSL (International Mathematical Statistical Libraries Inc.) et implanté sur VAX 11/750 au C.S.T.B. ; ces simulations ont eu pour objectif de préciser l'influence sur les pertes par le mur et le plancher

des facteurs suivants :

- conductivité du sol ;
- présence d'une nappe phréatique ;
- configuration du bâtiment : largeur et profondeur d'enterrement du plancher ;
- technique d'isolation.

Les calculs ont été effectués en conduction pure et en régime stationnaire. Les hypothèses complémentaires sont :

- le sol est modélisé par un matériau homogène, de conductivité constante ;
- la nappe phréatique est représentée par une frontière à température constante.

En respectant les notations de la Fig. 2 et en introduisant les grandeurs suivantes :

k : coefficient linéique de déperditions par degré d'écart entre l'intérieur du bâtiment et l'extérieur (W/m.°C) $\left\{ \begin{array}{l} \text{indice :} \\ \text{(m) pour le mur} \end{array} \right.$

d : déperditions par degré d'écart entre l'intérieur et l'extérieur (W/°C) $\left\{ \begin{array}{l} \text{(p) pour le} \\ \text{plancher} \end{array} \right.$

$$TINE = (TI - TN)/(TI - TE)$$

L'étude de sensibilité (2) menée avec TWOPEPEP a montré que les coefficients de déperditions k pouvaient se mettre sous la forme :

$$k = a_1 \times \lambda^{a_2} \quad (\text{mur et plancher}) \quad (1)$$

$$k_p = b_1 + b_2 \times TINE \quad (2)$$

$$k_p = c_1 + c_2 / (PN + Z)^{c_3} \quad (3)$$

$$k_p = d_1 + d_2 \times L \quad (4)$$

$$k_m = e_1 \times \text{Log}(e_2 \times |Z| + 1) \quad (5)$$

Les coefficients $\{a_i, b_i, c_i, d_i, e_i\}$ dépendant de la technique d'isolation retenue et des résistances thermiques des parois considérées.

3. Validité du modèle bidimensionnel cartésien

On considère un champ doublement infini de bâtiments identiques, disposés régulièrement en quinconce ; par symétrie, il suffit de considérer le domaine hachuré (Fig. 3).

Les notations sont identiques à celles de la Fig. 2 et des précisions sur la géométrie du problème sont données Fig. 4.

Les frontières verticales sont adiabatiques, les autres conditions étant identiques au cas bidimensionnel exposé au paragraphe précédent.

Les données sont :

$$\lambda = 1.9 \text{ W/m.}^\circ\text{C} ; E_1 = 0.25 \text{ m}, R_1 = 0.227 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W} ; E_2 = 0.30 \text{ m}, \\ R_2 = 0.375 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W} ; E_3 = 0.30 \text{ m}, R_3 = 0.171 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W} ; 1/h_e = 0.05 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W} \\ 1/h_{i1} = 0.17 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}, 1/h_{i2} = 0.11 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W} ; Z = -0.60 \text{ m} ; PN = 10 \text{ m} ; \\ TI = 19^\circ\text{C}, TE = 5^\circ\text{C}, TN = 11^\circ\text{C}$$

L'évaluation du problème tridimensionnel ainsi posé s'est faite par application du code aux éléments finis tridimensionnel ROSALIE développé par le LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées).

Le Tableau I donne les résultats obtenus pour les déperditions par les murs verticaux d_m et par le plancher d_p ($W/°C$) ; on a reporté également les valeurs obtenues par l'application du modèle bidimensionnel cartésien suivant les coupes AA et BB (Fig. 3).

L'analyse de ce tableau montre que sur l'exemple traité :

- les pertes par les murs verticaux sont comparables (à 7% près) ;
- les pertes par le plancher sont largement surestimées en bidimensionnel cartésien et sont évidemment fonction de l'endroit où l'on fait la coupe pour traiter le problème en bidimensionnel.

Cela signifie que, dans le cas présent (nappe phréatique peu profonde), l'hypothèse de superposition de deux problèmes bidimensionnels n'est pas applicable.

4. Interprétation et validité d'un modèle bidimensionnel à géométrie cylindrique

L'étude paramétrique précédente (cf. § 2.), montre qu'en présence d'une nappe phréatique, les déperditions d'un plancher enterré se composent, en première approximation, d'une partie linéique et d'une partie surfacique. Ce sont respectivement les pertes vers l'extérieur et vers la nappe. Si P et A sont le périmètre extérieur et la surface du bâtiment, les pertes par le mur et par le plancher, par degré d'écart entre l'intérieur et l'extérieur s'expriment, en première approximation, comme suit :

$$d_m = \alpha_m \times P \quad (6)$$

$$d_p = (\alpha_p \times P + \beta_p \times A) \quad (7)$$

Par ailleurs, en généralisant les enseignements tirés de l'exemple traité au § 3., on note qu'en raison de la présence éventuelle d'une nappe, l'évaluation des pertes est un problème à trois noeuds. La topologie des lignes de flux est notablement différente en bi et tridimensionnel. Une formulation pertinente des règles de calcul ne peut donc pas se baser sur des évaluations bidimensionnelles cartésiennes. Néanmoins, si la formulation (6) (7) est satisfaisante, les cas tridimensionnels peuvent se traiter à l'aide de résultats bidimensionnels en géométrie cylindrique (cf. Fig. 5) ; en effet, on a réalisé un jeu de simulations (3) à l'aide de TWODEPEP en géométrie cylindrique sur la base de l'exemple défini au § 3. De quatre simulations pour $A = \{100, 200, 400, 800\} m^2$, on a déduit par la méthode des moindres carrés les coefficients α_m , α_p et β_p des formules (6) et (7) ; il en découle pour d_m et d_p les valeurs proposées dans le Tableau I.

Pour comparer avec pertinence les résultats offerts par les configurations tridimensionnel-ROSALIE et bidimensionnel-géométrie cylindrique-TWODEPEP, il faut tenir compte des effets de coins liés à l'influence des maisons environnantes dans le cas tridimensionnel, phénomène non intégré dans le second cas ; bien que cet effet n'ait pas été évalué dans le cadre de cette étude, les

résultats proposés par MITALAS (4) laissent penser que pour l'exemple traité, il faille multiplier les déperditions issues du cas tridimensionnel par un facteur de l'ordre de 1.15 pour se recalculer sur l'environnement spécifique du bâtiment traité en bidimensionnel cylindrique ; dans ces conditions, on peut considérer que la méthode proposée pour l'évaluation des coefficients des formules (6) et (7) est tout à fait satisfaisante.

5. Formulation définitive

De ce qui précède, il ressort que l'évaluation des pertes doit tenir compte :
 - de la conductivité du sol ;
 - de l'influence d'une nappe phréatique éventuelle peu profonde. Celle-ci est traduite notamment par l'introduction d'une composante surfacique dans les pertes du plancher.

Avec les notations ci-dessus, compte tenu des équations (1), (4), (6) et (7), on peut exprimer les pertes par un mur et par un plancher enterrés sous les formes respectives suivantes :

$$d_m = \alpha_m \cdot P \cdot \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^{\gamma_m} \quad (8)$$

$$d_p = (\alpha_p \cdot P + \beta_p \cdot A) \cdot \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^{\gamma_p} \quad (9)$$

On prend comme référence une conductivité du sol λ_0 , γ est le poids du composant sol dans le phénomène d'échanges thermiques par le sol entre l'intérieur du bâtiment et l'environnement extérieur. γ est d'autant plus élevé que l'épaisseur du sol traversé est grande et que l'isolation des murs et planchers enterrés est comparativement faible. Pour le mur et le plancher, on a :

$$\gamma_m = f(-Z, PN, 1/R2, TINE) \quad (10)$$

$$\gamma_p = g(-Z, PN, 1/R1, 1/R2, 1/R3, TINE) \quad (11)$$

f et g étant des fonctions monotones croissantes des variables.

6. Procédure d'évaluation des pertes

L'état de la procédure envisagée est schématisée sur le synoptique 1 : Pour chaque configuration-type, des tableaux ou abaques fournissant le quintuplet $\{\alpha_m, \gamma_m, \alpha_p, \beta_p, \gamma_p\}$ seront proposés, leur élaboration étant issue de simulations aux éléments finis bidimensionnelles en géométrie cylindrique. La procédure actuelle n'introduit pas de facteur correctif pour les effets de coins. Sa validité se restreint donc à des bâtiments convexes de formes pas trop éloignées du disque et du rectangle ; à titre indicatif, on peut l'appliquer à des rapports $A/P > 2$.

L'identification du paramètre fondamental λ pourrait être proposée selon deux approches :

- par forfait (valeurs cartographiées avec choix d'un nombre de classes raisonnable) ;
- par calcul relativement fin, connaissant la texture, la structure, la composition et la teneur en eau du sol : on appliquerait alors les abaques JOHANSEN proposées dans la procédure FAROUKI (5).

Une procédure d'identification des paramètres PN et TN caractérisant la nappe phréatique si elle existe est en cours d'élaboration (3).

7. Conclusion

On dispose aujourd'hui, d'une part d'un ensemble de résultats de calcul effectués en géométrie bidimensionnelle cylindrique, d'autre part de méthodes permettant l'appréciation des caractéristiques thermiques des sols. Cela devrait nous permettre de proposer prochainement une modification des Règles de calcul des déperditions thermiques par les parois en contact avec le sol.

REFERENCES

1. "Règles Th-K77 - Règles de calcul des caractéristiques thermiques utiles des parois de construction", C.S.T.B., (novembre 1977)
2. J. Martin, B. Delcambre, "Thermique des sols", Rapport C.S.T.B. n°345, (avril 1984)
3. J. Martin, "Thermique des sols", Rapport C.S.T.B. n°417, (mars 1985)
4. G-P. Mitalas, "Basement Heat Loss Studies at DBR/NRC", DBR paper n°1045 of the Division of Building Research, Ottawa, (septembre 1982)
5. O.T. Farouki, "Thermal Properties of soils", C.R.E.R.L. Monograph 81-1, Hanover, New-Hampshire, U.S.A., (décembre 1981)

TABLEAU I. Déperditions selon les trois modèles étudiés

	$d_m (W/°C)$	$d_p (W/°C)$
tridimensionnel	31.6	44.9
bidimensionnel cartésien		
coupe AA	33.6	68.9
coupe BB	34.0	57.4
bidimensionnel géométrie cylindrique	34.0	53.6

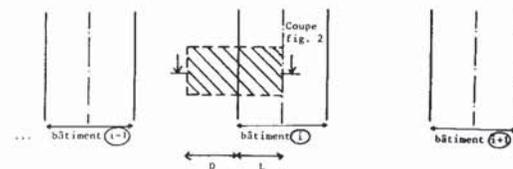


Fig. 1 : Implantation des bâtiments

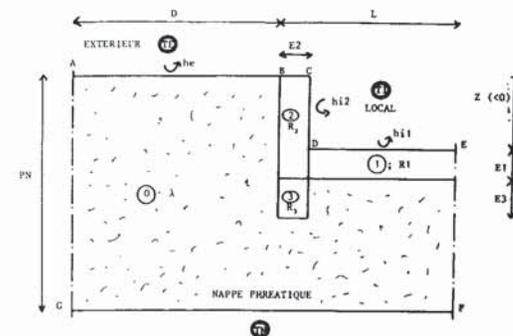


Fig. 2 : Coupe bidimensionnelle : domaine modélisé et notations

• DOMAINES :

- ① = Sol, de conductivité thermique λ ($W/m \cdot °C$)
- ② = Plancher, de résistance thermique $R1$ ($m^2 \cdot °C/W$)
- ③ = Mur enterré, de résistance thermique $R2$ "
- ④ = Fondations, de résistance thermique $R3$ "

• CONDITIONS FRONTIERES :

- 3 surfaces d'échange : AB(h_e) ; CD (h_{i2}) ; DE (h_{i1})
- 3 flux nuls : AG et EF (par symétrie); BC
- Nappe phréatique à température constante T_n

- h_e : coefficient d'échange sol-atmosphère
- h_{i1} : coefficient d'échange plancher-air intérieur du local
- h_{i2} : coefficient d'échange mur vertical-air intérieur du local

• DIMENSIONS :

- L : demi-largeur du bâtiment
- D : demi-distance entre 2 bâtiments
- Z < 0 : profondeur du plancher
- PN : profondeur de la nappe
- E_1, E_2, E_3 : épaisseurs des domaines ①, ② et ③

• TEMPERATURES :

- ① : intérieure du bâtiment (éventuellement, vide-sanitaire)
- ② : extérieure (moyenne sur la saison de chauffage)
- ③ : nappe phréatique (moyenne annuelle)

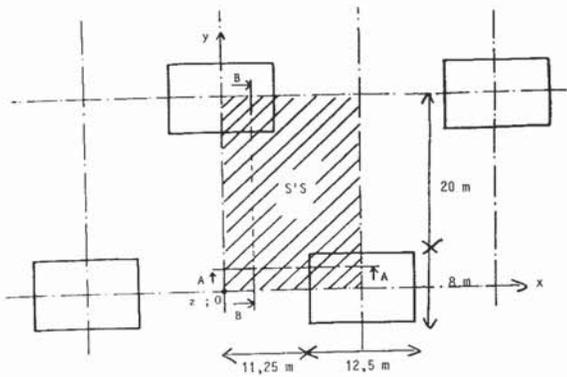


Fig. 3 : Simulation tridimensionnelle : implantation des bâtiments

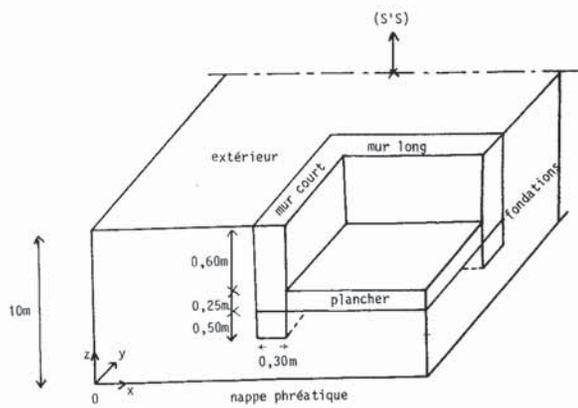


Fig. 4 : Cas tridimensionnel

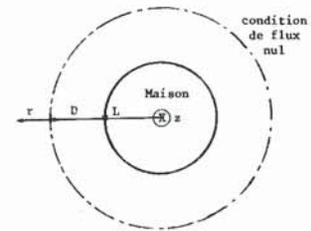
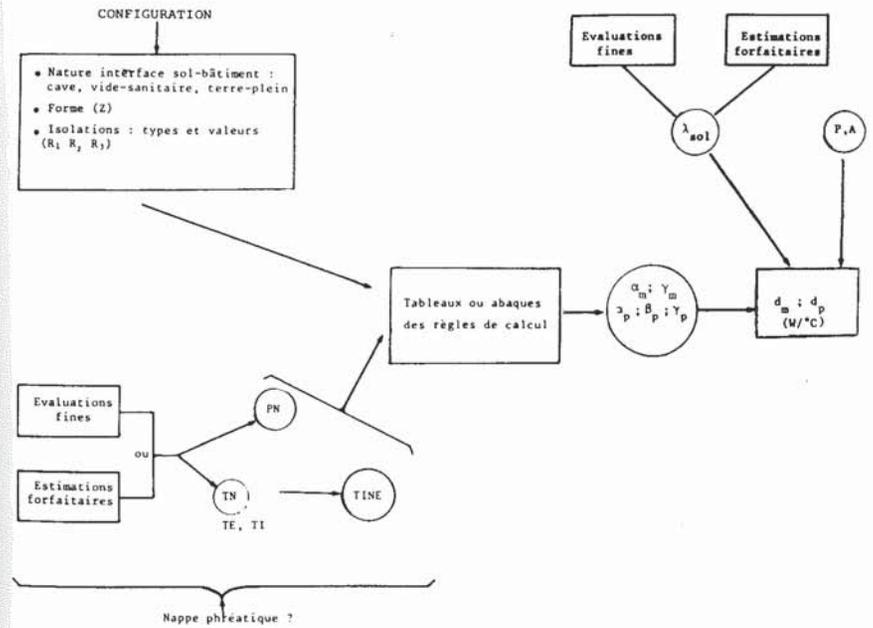


Fig. 5 : Géométrie cylindrique



Synoptique 1 : Procédure pour évaluer les échanges thermiques entre un bâtiment et le sol