

A. VERGARA
S. VIANNAY

Bertin et Cie - Les Milles

**Un prototype de système
expert en échanges
thermiques**

R E S U M E

La Société BERTIN & Cie développe un prototype de système expert en diagnostic thermique, EXTHER, dont l'objectif est l'aide au conditionnement thermique d'enceintes et de systèmes clos.

Les phénomènes thermophysiques mis en jeu dans ce type de problèmes sont variés (convection naturelle ou forcée, rayonnement, conduction) et fortement couplés. Aussi, dans un premier temps, pour la réalisation de ce prototype, nous nous sommes intéressés au seul phénomène de convection naturelle.

Les caractéristiques de ce système expert sont les suivantes :

- l'écriture en PROLOG II de la base de connaissances et de faits apporte une grande ouverture à la manipulation et à l'interprétation des règles de type Si <conditions> Alors <buts>.
- les règles du système manipulent des calculs d'ordres de grandeur de façon à donner toute son ampleur aux connaissances heuristiques de l'expert.
- des règles de géométrie et une saisie graphique de l'enceinte thermique permettent de traiter une classe importante de problèmes.

Après avoir décrit le détail de la base de faits et de connaissances utilisées, nous présentons un exemple de diagnostics thermiques.

Les perspectives de développement de ce système expert sont également évaluées:

- * Extension aux autres phénomènes thermophysiques,
- * Outils d'aide à l'analyse physique pour optimiser l'emploi des codes calculs thermiques classiques,
- * Utilisation comme générateur de réseaux de conductances thermiques.

Societe BERTIN & Cie is funding the development of a expert system prototype dealing with heat exchanges : it is aiming at designing complex thermal systems such as furnaces or buildings where the involved thermo-chemical phenomena are very complex and coupled. The expert system prototype is characterized by :

- writing of the fact and knowledge data bases under Prolog II which helps in manipulating and interpreting rules such as "If" Conditions "Then" goals ,
- using order of magnitude calculations within the rules to support heuristic thinking typical of experts in thermal sciences,
- implementing graphics input to characterize complexe geometrical data typical of real world problems.

The development work is continuing along three lines :

- the implementation of complex thermal phenomena to be analyzed,
- the coupling with complex software packages which simulate thermal transients of industrial systems,
- the use of the expert system to calculate thermal conductance.

I - POSITION DU PROBLEME

Dans de nombreux problèmes à caractère industriel, il est nécessaire de connaître l'équilibre en température de systèmes complexes où l'énergie est dissipée sous forme de chaleur.

Il existe de nombreux logiciels qui, à partir d'une modélisation thermique du système étudié, permettent de déterminer l'équilibre recherché.

Le plus souvent, ce modèle thermique se ramène à un réseau plus ou moins complexe de conductance dont :

- les noeuds représentent des points ou des zones particulières du système étudié,
- les branches représentent les phénomènes physiques mis en jeu dans la transmission de la chaleur entre les diverses zones du système et sont donc des conductances thermiques.

La solution du problème thermique passe par la bonne connaissance de ces conductances. Or, il se pose les problèmes suivants :

- les phénomènes physiques probables sont multiples (rayonnement, convection forcée ou naturelle),
- leur importance relative ou même leur existence dépend du champ de température et de la géométrie et d'autres grandeurs plus ou moins bien définies (vitesse...),
- si la géométrie du système est bien connue en général, on ne connaît guère que la température extérieure et la puissance thermique dégagée.

On conçoit donc que, avant d'entreprendre la modélisation thermique d'un système complexe, il est indispensable de procéder à une expertise qui permette de construire ultérieurement le réseau de conductance.

Et, c'est dans cette phase préliminaire que se trouve tout le savoir faire du thermicien.

Un système expert thermique serait donc une aide pour l'analyse préalable d'un problème industriel. Etant donné la multiplicité des phénomènes physiques intervenant et des géométries possibles, il n'est pas raisonnable de concevoir d'emblée un système à caractère général.

De nombreux systèmes thermiques peuvent être schématisés comme une juxtaposition d'enceintes plus ou moins étanches où l'on ne crée pas de circulation forcée de fluide. Dans ce cas, les échanges thermiques se font essentiellement par : convection naturelle, rayonnement et conduction.

Nous avons donc réalisé un système expert permettant d'analyser ce type de problème en le limitant, dans un premier temps, au phénomène de convection naturelle.

Le système représenté en est une partie mais fournit un bon exemple de ses possibilités d'analyse.

II - DESCRIPTION GENERALE D'EXHERT

II.1 - Analyse simplifiée du phénomène de convection naturelle

Ce phénomène prend naissance parce que, pour la plupart des fluides, la masse spécifique varie avec la température et parce qu'il existe un champ de gravité.

Lorsque une différence de température existe au sein d'un fluide, celui-ci se met donc en mouvement sous l'effet des forces d'Archimède. Ce phénomène est résumé par la phrase "l'air chaud monte". Ces mouvements améliorent le transfert de chaleur entre une paroi et le fluide qui la baigne. Il est facile de concevoir que plus les écarts de températures seront forts, plus les mouvements du fluide seront intenses et plus les échanges thermiques seront élevés.

D'autre part, en considérant que l'air chaud monte, on conçoit facilement que, si dans une enceinte, ce sont les parois supérieures qui seront les plus chaudes, il sera difficile à l'air de se mettre en mouvement. Dans ce cas, l'échange de chaleur entre une paroi et le fluide la baignant se fera seulement par conduction.

A partir de ces constatations, on peut dire que dans une enceinte, si les transferts thermiques s'effectuent en convection naturelle, la chaleur se transmet de paroi à paroi par l'intermédiaire d'un fluide interstitiel.

II.2 - Base de connaissances

En général, les calculs thermophysiques classiques sans un appui du savoir-faire de l'expert thermicien n'aboutissent pas à une modélisation satisfaisante des phénomènes étudiés. L'intérêt d'EXTHER est donc d'aider l'utilisateur dans l'appréciation qualitative puis quantitative des phénomènes suivants.

II.2.1 - Les phénomènes thermiques

Le savoir-faire de l'expert thermicien permet de déterminer si, a priori ou à l'aide de très peu de calculs, les échanges de chaleur se font en convection naturelle ou forcée, en conduction ou par rayonnement vers telle ou telle partie de l'objet étudié. Le diagnostic fourni influe sur tout le reste de l'analyse et dans certains cas peut être modifié en fonction des premiers calculs d'ordres de grandeur.

Exemple de règles

- SI
- (1) une paroi P horizontale, considérée comme isolée par rapport aux autres parois de l'objet
 - (2) la paroi P est considérée comme
 - (2 + 1) limitée dans l'objet
 - ou
 - (2 - 2) possédant des petits rebords aux extrémités
 - (3) il existe un écart de température entre P et l'air la baignant tel que l'élément (P ou l'air) le plus froid soit au-dessous de l'autre
- ALORS
- (a) il y a convection naturelle
 - (b) le phénomène est faible, avec des effets de bords

II.2.2 - Les calculs d'ordres de grandeur

Progressivement, les règles manipulent des calculs d'ordres de grandeur de façon à quantifier plus précisément les connaissances heuristiques de l'expert. Ces calculs passent par une simplification de calculs complexes mais ne doivent pas compromettre la validité des résultats.

Exemple de règles

SI (1) il existe un échange de chaleur entre 2 parois horizontales A et B,

$$(2) e^3 \cdot T > 2,3 \cdot 10^{-5}$$

où e est l'écartement entre A et B

et T est la différence de températures de ces parois

ALORS la convection naturelle apparaît.

II.2.3 - Les règles de géométrie utilisées dans les chaleurs thermiques

L'analyse de la propagation de la chaleur et du type d'échange est totalement dépendante de la géométrie de l'objet étudié. La position de chaque paroi l'une par rapport à l'autre, des sources de chaleur dans l'enceinte, ... est déterminée par des règles produisant donc un certain nombre de données géométriques.

Exemple de règles

SI (1) il existe deux arêtes I et J verticales, constituées des points extrêmes (x_1, y_1) et (x_1, y_2) , respectivement (x_3, y_3) et (x_3, y_4)

(2) il existe une arête K constituée des points extrêmes

(a_1, a_2) et (b_1, b_2) tels que

$$a_1 = x_1 ; a_2 = \text{Inf}(y_1, y_2)$$

$$b_1 = x_3 ; b_2 = \text{Inf}(y_3, y_4)$$

ALORS les parois I et J sont fermées sur le bas par la paroi K

II.2.4 - Le couplage de l'ensemble des connaissances (meta-règles)

Toutes ces connaissances décrites sont indépendantes les unes des autres. Le savoir-faire de l'expert permet de prendre les meilleures méthodes de raisonnement aboutissant à des conclusions caractérisant l'étude thermique complète de l'objet considéré. Le système expert utilise à tout moment les résultats qu'il a obtenu pour choisir le chemin optimal à suivre dans l'analyse.

Exemple de règles

- SI
- (1) les chemins empruntés par la chaleur sont estimés
 - (2) les types d'échanges sont évalués
 - (3) les flux de chaleur sont répartis
- ALORS
- (a) il faut déterminer les différences de températures tout au long de chacun de ces chemins
 - (b) puis, connaissant la température extérieure à l'objet, on remonte les valeurs des températures des éléments
 - (c) il faut vérifier la validité des types d'échange et la répartition de la chaleur

II.3 - Création des faits

L'utilisateur dessine, à l'aide d'une souris et d'une console graphique, l'enceinte (en coupe) qu'il veut analyser. Le système interprète le dessin de façon à extraire toutes les informations générales concernant l'objet (paroi, volume d'air, ...). Les dimensions exactes qui intéressent le système sont demandées (hauteurs réelles, position des sources de chaleur, etc ...). La base de faits est ainsi créée et ajoutée aux connaissances. L'entrée graphique permet de ne pas restreindre la forme de l'objet considéré tout en restant dans le type "enceinte" (conteneur, pièce d'habitat, four, ...).

II.4 - Moteur d'inférence

Le but des règles du système est de donner une analyse complète comprenant une succession de raisonnements assez différents les uns des autres.

Pour la mise au point des règles, nous avons gardé le moteur d'inférence de PROLOG, mais la diversité des connaissances nous a poussés à utiliser des techniques de programmation permettant de modifier le déroulement de ce moteur.

Tout au long de la démonstration, il est nécessaire de créer tout ce que l'on peut connaître à partir des règles de production et augmenter ainsi la banque des faits (plus précisément on parle du "chaînage avant"). Les faits déduits permettent d'en produire d'autres.

On établit le diagnostic final par des techniques de chaînage arrière.

III - CONFIGURATION OPERATIONNELLE D'EXOTHER

Dans diverses installations industrielles, les phénomènes thermophysiques mis en jeu sont variés et fortement couplés. Aussi, dans un premier temps on a mis au point une version opérationnelle d'EXOTHER traitant les phénomènes de convection naturelle. Ce type de phénomène, de par l'utilisation de données semi-empiriques se prête bien à l'analyse par système expert, qui donne :

- un diagnostic sur le type d'échanges thermiques existant dans chaque partie de l'enceinte, ainsi que la nature de l'écoulement,
- un diagnostic sur le réseau de conductances thermiques constituant l'objet (liaison thermique, températures, coefficients d'échange, ...).

Les applications industrielles touchent aujourd'hui la thermique des systèmes électroniques et la thermique de l'habitat. L'introduction des connaissances propres au rayonnement (en cours) permettra de compléter le potentiel d'utilisation de cet outil. Par ailleurs, des travaux préliminaires sont en cours pour traiter les phénomènes de couplage rayonnement/conduction typiques du conditionnement thermique en environnement spatial.

IV - EXEMPLE D'UTILISATION D'EXTER

=====

SYSTEME EXPERT THERMIQUE

=====

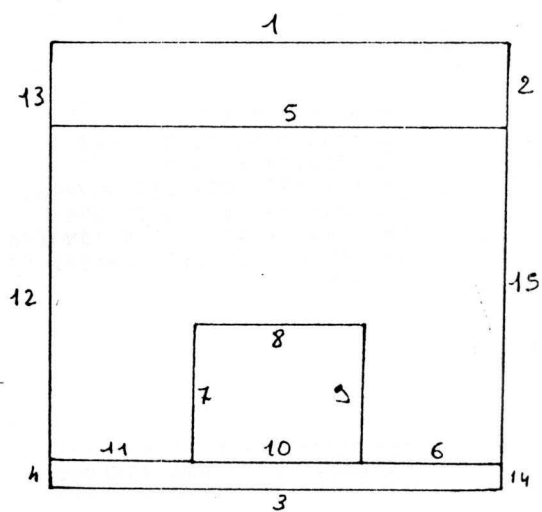
E -ENTREE DES DONNEES
L -ANCEMENT DU SYSTEME
R -ESULTATS EN MEMOIRE
M -ODIFICATION DES DONNEES
S -AUVEGARDE DES DONNEES
V -ISUALISATION DES DONNEES
A -NNULATION DES DONNEES ET DES RESULTATS
F -IN

VOTRE CHOIX : V

VISUALISATION DES DONNEES

H -AUTEURS DES PAROIS
D -ISTANCE SUR LAQUELLE 2 PAROIS SE FONT FACE A FACE
E -CARTEMENT ENTRE 2 PAROIS
P -AROI CONSIDEREES COMME SOURCE
S -CURCE TRAVERSABLE OU NON
R -ETOUR AU MENU PRINCIPAL

VOTRE CHOIX : H



 HAUTEURS DU LONGUEURS DES PAROIS

HAUTEUR DE LA PAROI 1 = +1.600000E+00 M
 HAUTEUR DE LA PAROI 2 = +3.000000E-01 M
 HAUTEUR DE LA PAROI 3 = +1.600000E+00 M
 HAUTEUR DE LA PAROI 4 = +1.000000E-01 M
 HAUTEUR DE LA PAROI 5 = +1.600000E+00 M
 HAUTEUR DE LA PAROI 6 = +5.000000E-01 M
 HAUTEUR DE LA PAROI 7 = +3.000000E-01 M
 HAUTEUR DE LA PAROI 8 = +6.000000E-01 M
 HAUTEUR DE LA PAROI 9 = +5.000000E-01 M
 HAUTEUR DE LA PAROI 10 = +6.000000E-01 M
 HAUTEUR DE LA PAROI 11 = +5.000000E-01 M
 HAUTEUR DE LA PAROI 12 = +1.200000E+00 M
 HAUTEUR DE LA PAROI 13 = +3.000000E-01 M
 HAUTEUR DE LA PAROI 14 = +1.000000E-01 M
 HAUTEUR DE LA PAROI 15 = +1.200000E+00 M

 DISTANCE DE FACE A FACE DE DEUX PAROIS

LES PAROIS 12 ET 7 SONT FACE A FACE SUR +5.000000E-01 M
 LES PAROIS 7 ET 9 SONT FACE A FACE SUR +5.000000E-01 M
 LES PAROIS 12 ET 15 SONT FACE A FACE SUR +7.000000E-01 M
 LES PAROIS 10 ET 5 SONT FACE A FACE SUR +6.000000E-01 M
 LES PAROIS 8 ET 5 SONT FACE A FACE SUR +6.000000E-01 M
 LES PAROIS 11 ET 5 SONT FACE A FACE SUR +5.000000E-01 M
 LES PAROIS 6 ET 5 SONT FACE A FACE SUR +5.000000E-01 M
 LES PAROIS 5 ET 1 SONT FACE A FACE SUR +1.600000E+00 M
 LES PAROIS 9 ET 15 SONT FACE A FACE SUR +5.000000E-01 M
 LES PAROIS 3 ET 10 SONT FACE A FACE SUR +6.000000E-01 M
 LES PAROIS 3 ET 6 SONT FACE A FACE SUR +5.000000E-01 M
 LES PAROIS 3 ET 11 SONT FACE A FACE SUR +5.000000E-01 M
 LES PAROIS 13 ET 2 SONT FACE A FACE SUR +3.000000E-01 M
 LES PAROIS 4 ET 14 SONT FACE A FACE SUR +1.000000E-01 M

 ECARTÉMENT ENTRE DEUX PARCIS

LES PARCIS 12 ET 7 SONT ECARTÉES DE +5.00000E-01 M
 LES PARCIS 7 ET 9 SONT ECARTÉES DE +6.00000E-01 M
 LES PARCIS 12 ET 15 SONT ECARTÉES DE +1.60000E+00 M
 LES PARCIS 10 ET 2 SONT ECARTÉES DE +5.00000E-01 M
 LES PARCIS 8 ET 5 SONT ECARTÉES DE +7.00000E-01 M
 LES PARCIS 11 ET 5 SONT ECARTÉES DE +1.20000E+00 M
 LES PARCIS 6 ET 5 SONT ECARTÉES DE +1.20000E+00 M
 LES PARCIS 5 ET 1 SONT ECARTÉES DE +3.00000E-01 M
 LES PARCIS 9 ET 15 SONT ECARTÉES DE +5.00000E-01 M
 LES PARCIS 3 ET 10 SONT ECARTÉES DE +1.00000E-01 M
 LES PARCIS 3 ET 6 SONT ECARTÉES DE +1.00000E-01 M
 LES PARCIS 3 ET 11 SONT ECARTÉES DE +1.00000E-01 M
 LES PARCIS 13 ET 2 SONT ECARTÉES DE +1.60000E+00 M
 LES PARCIS 4 ET 14 SONT ECARTÉES DE +1.60000E+00 M

 PARCI SOURCE

LA PARCI-SOURCE 1 ÉMET UN FLUX DE +5.00000E+01 W
 LA PARCI-SOURCE 7 ÉMET UN FLUX DE +1.00000E+02 W
 LA PARCI-SOURCE 8 ÉMET UN FLUX DE +1.00000E+02 W
 LA PARCI-SOURCE 9 ÉMET UN FLUX DE +1.00000E+02 W
 LA PARCI-SOURCE 10 ÉMET UN FLUX DE +1.00000E+02 W

 SOURCE TRAVERSABLE OU NON

LA PARCI-SOURCE 1 EST TRAVERSABLE.

=====

SYSTEME EXPERT THERMIQUE

=====

E -ENTREE DES DONNEES
L -LANCEMENT DU SYSTEME
R -RESULTATS EN MEMOIRE
M -MODIFICATION DES DONNEES
S -SOUVENIR DES DONNEES
V -VISUALISATION DES DONNEES
A -ANNULATION DES DONNEES ET DES RESULTATS
F -FIN

VOTRE CHOIX : L

LANCEMENT DU SYSTEME

LA LOCALISATION DES SOURCES DE CHALEUR PERMET DE FAIRE DES
HYPOTHESES SUR LES CHEMINS EMPRUNTES PAR LA CHALEUR QUI SE PROPAGE.

LA CHALEUR PEUT SE DEPLACER DE 7 VERS 12
LA CHALEUR PEUT SE DEPLACER DE 9 VERS 13
LA CHALEUR PEUT SE DEPLACER DE 8 VERS 5
LA CHALEUR PEUT SE DEPLACER DE 5 VERS 1
LA CHALEUR PEUT SE DEPLACER DE 10 VERS 3
LA CHALEUR PEUT SE DEPLACER DE 1 VERS 5
LA CHALEUR PEUT SE DEPLACER DE 5 VERS 11
LA CHALEUR PEUT SE DEPLACER DE 11 VERS 3
LA CHALEUR PEUT SE DEPLACER DE 5 VERS 6
LA CHALEUR PEUT SE DEPLACER DE 6 VERS 3

---> <RETURN>

D'APRES LA GEOMETRIE DE L'OBJET ET LE CHEMIN PROBABLE EMPRUNTE PAR LA CHALEUR, J'ESSAIE DE DETERMINER LE TYPE D'ECHANGES THERMIQUES POUVANT EXISTER DANS CHAQUE PARTIE DE L'OBJET.

LE SYSTEME CONSIDERE QUE LES PAROIS SUIVANTES ONT UNE FAIBLE ACTION ENTRE ELLES VERS LA PAROI 12 :

ENTRE LES PAROIS 12 ET 7,
IL Y A CONVECTION NATURELLE, EN ECOULEMENT LAMINAIRE

VERS LA PAROI 7 :

ENTRE LES PAROIS 7 ET 12,
IL Y A CONVECTION NATURELLE, EN ECOULEMENT LAMINAIRE

ENTRE LES PAROIS 12 ET EXT (+2.50000E+01 C),
IL Y A CONVECTION NATURELLE

ENTRE LES PAROIS 8 ET 5,
IL Y A CONVECTION NATURELLE

ENTRE LES PAROIS 8 ET 9,
IL Y A CONVECTION NATURELLE

ENTRE LES PAROIS 5 ET 1,
IL Y A CONVECTION NATURELLE

ENTRE LES PAROIS 1 ET EXT (+2.50000E+01 C),
IL Y A CONVECTION NATURELLE

----> <RETURN>

LE SYSTEME CONSIDERE QUE LES PAROIS SUIVANTES ONT UNE FAIBLE ACTION ENTRE ELLES
VERS LA PAROI 9 :

ENTRE LES PAROIS 9 ET 15,
IL Y A CONVECTION NATURELLE, EN ECOULEMENT LAMINAIRE

VERS LA PAROI 15 :

ENTRE LES PAROIS 15 ET 9,
IL Y A CONVECTION NATURELLE, EN ECOULEMENT LAMINAIRE

ENTRE LES PAROIS 15 ET EXT (+2.50000E+01 C),
IL Y A CONVECTION NATURELLE

ENTRE LES PAROIS 3 ET 10,
IL Y A CONDUCTION

ENTRE LES PAROIS 3 ET EXT (+2.50000E+01 C),
IL Y A FAIBLE CONVECTION NATURELLE

----> <RETURN>

EN DEDUCTION DE CES PREMIERS PHENOMENES, ET SELON LES ECHANGES
DIRECTES OU INDIRECTES DEBITS ENTRE LES PAROIS, JE CALCULE LES FLUX
RECUS OU EMIS PAR CHAQUE PAROI.

LE FLUX ARRIVANT SUR LA PAROI 3 ET VENANT DU VOLUME D'AIR N 1
EST EGAL A ----> +1.00000E+02 W

LE FLUX ARRIVANT SUR LA PAROI 5 ET VENANT DU VOLUME D'AIR N 3
EST EGAL A ----> +1.20000E+02 W

LE FLUX ARRIVANT SUR LA PAROI 15 ET VENANT DU VOLUME D'AIR N 3
EST EGAL A ----> +9.00000E+01 W

LE FLUX ARRIVANT SUR LA PAROI 12 ET VENANT DU VOLUME D'AIR N 3
EST EGAL A ----> +9.00000E+01 W

LE FLUX ARRIVANT SUR LA PAROI 1 ET VENANT DU VOLUME D'AIR N 4
EST EGAL A ----> +1.20000E+02 W

----> <RETURN>

CONNAISSANT MAINTENANT LES TYPES D'ECHANGES ET LES FLUX, JE PEUX
CALCULER LES TEMPERATURES DE CHAQUE PAROI. PUIS JE VERIFIE LES TYPES
D'ECHANGES EN Y AJOUTANT LE TYPE D'ECOULEMENT POUR LA CONVECTION.

LA DIFFERENCE DE TEMPERATURE ENTRE LA PAROI 3
ET L'AIR EXTERIEUR EST EGALE A ---> +2.43430E+01
TEMPERATURE DE LA PAROI 3 ---> +4.93430E+01

LA DIFFERENCE DE TEMPERATURE ENTRE LA PAROI 3
ET LA PAROI 10 EST EGALE A ---> +2.03333E+02
TEMPERATURE DE LA PAROI 10 ---> +1.58990E+02

ENTRE LES PAROIS 3 (+4.93430E+01 C) ET 10 (+1.58990E+02 C),
IL Y A CONDUCTION

ENTRE LES PAROIS 3 (+4.93430E+01 C) ET EXT (+2.50000E+01 C),
IL Y A FAIBLE CONVECTION NATURELLE, EN ECOULEMENT LAMINAIRE
COEFFICIENT D'ECHANGE H = +1.28374E+00

LA DIFFERENCE DE TEMPERATURE ENTRE LA PAROI 15
ET L'AIR EXTERIEUR EST EGALE A ---> +2.62679E+01
TEMPERATURE DE LA PAROI 15 ---> +5.12679E+01

LA DIFFERENCE DE TEMPERATURE ENTRE LA PAROI 15
ET L'AIR, VERS LA PAROI 9 EST EGALE A ---> +2.52679E+01
TEMPERATURE DE L'AIR ENTRE LES PAROIS 15 ET 9 ---> +7.75359E+01

LA DIFFERENCE DE TEMPERATURE ENTRE LA PAROI 9
ET L'AIR EST EGALE A ---> +2.77546E+01
TEMPERATURE DE LA PAROI 9 ---> +1.05290E+02

---> <RETURN>

SUR LA PAROI DE GAUCHE, L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE LIMITE EST ÉGALE A:
E = +1.33131E-02 M
SUR LA PAROI DE DROITE, L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE LIMITE EST ÉGALE A:
E = +2.31158E-02 M
LE SYSTEME CONSIDERE QUE LES PAROIS SUIVANTES ONT UNE FAIBLE ACTION ENTRE ELLES
VERS LA PAROI 9 (+1.05290E+02 C) :

ENTRE LES PAROIS 9 (+1.05290E+02 C) ET 15 (+5.12679E+01 C),
IL Y A CONVECTION NATURELLE, EN ECOULEMENT LAMINAIRE

VERS LA PAROI 15 (-5.12679E+01 C) :

ENTRE LES PAROIS 15 (+5.12679E+01 C) ET 9 (+1.05290E+02 C),
IL Y A CONVECTION NATURELLE, EN ECOULEMENT LAMINAIRE

ENTRE LES PAROIS 15 (+5.12679E+01 C) ET EXT (+2.50000E+01 C),
IL Y A CONVECTION NATURELLE, EN ECOULEMENT LAMINAIRE

LA DIFFERENCE DE TEMPERATURE ENTRE LA PAROI 1
ET L'AIR EXTERIEUR EST ÉGALE A ---> +2.22235E+01
TEMPERATURE DE LA PAROI 1 ---> +4.72265E+01

LA DIFFERENCE DE TEMPERATURE ENTRE LA PAROI 1
ET LA PAROI 5 EST ÉGALE A ---> +3.16223E+01
TEMPERATURE DE LA PAROI 5 ---> +7.93513E+01

LA DIFFERENCE DE TEMPERATURE ENTRE LA PAROI 5
ET LA PAROI 8 EST ÉGALE A ---> +1.71192E+01
TEMPERATURE DE L'AIR ENTRE LES PAROIS 5 ET 3 ---> +9.59695E+01

---> <RETURN>

LA DIFFERENCE DE TEMPERATURE ENTRE LA PAROI 8
ET L'AIR EST EGALE A ---> +1.35253E+01
TEMPERATURE DE LA PAROI 8 ---> +1.14495E+02

SUR LA PAROI 8 (+1.14495E+02 C) DU COTE DE LA PAROI 5 (+7.99513E+01 C),
IL Y A CONVECTION NATURELLE, EN ECOULEMENT TURBULENT

SUR LA PAROI 5 (+7.99513E+01 C) DU COTE DE LA PAROI 8 (+1.14495E+02 C),
IL Y A CONVECTION NATURELLE, EN ECOULEMENT TURBULENT

ENTRE LES PAROIS 5 (+7.99513E+01 C) ET 1 (+4.72285E+01 C),
IL Y A CONVECTION NATURELLE, EN ECOULEMENT TURBULENT

ENTRE LES PAROIS 1 (+4.72285E+01 C) ET EXT (+2.50000E+01 C),
IL Y A CONVECTION NATURELLE, EN ECOULEMENT TURBULENT
COEFFICIENT D'ECHANGE H = +4.77955E+00

LA DIFFERENCE DE TEMPERATURE ENTRE LA PAROI 12
ET L'AIR EXTERIEUR EST EGALE A ---> +2.62679E+01
TEMPERATURE DE LA PAROI 12 ---> +5.12679E+01

LA DIFFERENCE DE TEMPERATURE ENTRE LA PAROI 12
ET L'AIR, VERS LA PAROI 7 EST EGALE A ---> +2.62673E+01
TEMPERATURE DE L'AIR ENTRE LES PAROIS 12 ET 7 ---> +7.75359E+01

LA DIFFERENCE DE TEMPERATURE ENTRE LA PAROI 7
ET L'AIR EST EGALE A ---> +2.77546E+01
TEMPERATURE DE LA PAROI 7 ---> +1.05290E+02

---> <RETURN>

SUR LA PAROI DE GAUCHE, L'EPAISSEUR DE LA COUCHE LIMITE EST EGALE A:
E = +2.31153E-02 M

SUR LA PAROI DE DROITE, L'EPAISSEUR DE LA COUCHE LIMITE EST EGALE A:
E = +1.33131E-02 M

LE SYSTEME CONSIDERE QUE LES PAROIS SUIVANTES ONT UNE FAIBLE ACTION ENTRE ELLES
VERS LA PAROI 12 (+5.12679E+01 C) :

ENTRE LES PAROIS 12 (+5.12679E+01 C) ET 7 (+1.05290E+02 C),
IL Y A CONVECTION NATURELLE, EN ECOULEMENT LAMINAIRE

VERS LA PAROI 7 (+1.05290E+02 C) :

ENTRE LES PAROIS 7 (+1.05290E+02 C) ET 12 (+5.12679E+01 C),
IL Y A CONVECTION NATURELLE, EN ECOULEMENT LAMINAIRE

ENTRE LES PAROIS 12 (+5.12679E+01 C) ET EXT (+2.50000E+01 C),
IL Y A CONVECTION NATURELLE, EN ECOULEMENT LAMINAIRE

---> <RETURN>

SI C'EST NECESSAIRE, J'UNIFORMISE LES TEMPERATURES DE L'AIR DANS CERTAINS VOLUMES ET JE RELANCE LE CALCUL DES TEMPERATURES AINSI QUE LA VERIFICATION DES PHENOMENES.

LA DIFFERENCE DE TEMPERATURE ENTRE LA PAROI 3
ET L'AIR EXTERIEUR EST EGALE A ---> +2.43430E+01
TEMPERATURE DE LA PAROI 3 ---> +4.93430E+01

LA DIFFERENCE DE TEMPERATURE ENTRE LA PAROI 3
ET LA PAROI 10 EST EGALE A ---> +1.04167E+02
TEMPERATURE DE LA PAROI 10 ---> +1.53510E+02

ENTRE LES PAROIS 3 (+4.93430E+01 C) ET 10 (+1.53510E+02 C),
IL Y A CONDUCTION

ENTRE LES PAROIS 3 (+4.93430E+01 C) ET EXT (+2.50000E+01 C),
IL Y A FAIBLE CONVECTION NATURELLE, EN ECOULEMENT LAMINAIRE
COEFFICIENT D'ECHANGE H = +1.23374E+00

LA DIFFERENCE DE TEMPERATURE ENTRE LA PAROI 15
ET L'AIR EXTERIEUR EST EGALE A ---> +2.86774E+01
TEMPERATURE DE LA PAROI 15 ---> +5.36774E+01

LA DIFFERENCE DE TEMPERATURE ENTRE LA PAROI 15
ET L'AIR, VERS LA PAROI 9 EST EGALE A ---> +2.36774E+01
TEMPERATURE DE L'AIR ENTRE LES PAROIS 15 ET 9 ---> +3.23549E+01.

LA DIFFERENCE DE TEMPERATURE ENTRE LA PAROI 9
ET L'AIR EST EGALE A ---> +2.77546E+01
TEMPERATURE DE LA PAROI 9 ---> +1.10109E+02

---> <RETURN>

SUR LA PAROI DE GAUCHE, L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE LIMITE EST ÉGALE A:
 $E = +1.33181E-02$ M

SUR LA PAROI DE DROITE, L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE LIMITE EST ÉGALE A:
 $E = +2.26141E-02$ M

LE SYSTÈME CONSIDÈRE QUE LES PAROIS SUIVANTES ONT UNE FAIBLE ACTION ENTRE ELLES:
 VERS LA PAROI 9 (+1.10109E+02 C) :

ENTRE LES PAROIS 9 (+1.10109E+02 C) ET 15 (+5.36774E+01 C),
 IL Y A CONVECTION NATURELLE, EN ÉCOULEMENT LAMINAIRE

VERS LA PAROI 15 (+5.36774E+01 C) :

ENTRE LES PAROIS 15 (+5.36774E+01 C) ET 9 (+1.10109E+02 C),
 IL Y A CONVECTION NATURELLE, EN ÉCOULEMENT LAMINAIRE

ENTRE LES PAROIS 15 (+5.36774E+01 C) ET EXT (+2.50000E+01 C),
 IL Y A CONVECTION NATURELLE, EN ÉCOULEMENT LAMINAIRE

LA DIFFÉRENCE DE TEMPÉRATURE ENTRE LA PAROI 1
 ET L'AIR EXTÉRIEUR EST ÉGALE A ---> +2.22235E+01
 TEMPÉRATURE DE LA PAROI 1 ---> +4.72225E+01

LA DIFFÉRENCE DE TEMPÉRATURE ENTRE LA PAROI 1
 ET LA PAROI 5 EST ÉGALE A ---> +3.16223E+01
 TEMPÉRATURE DE LA PAROI 5 ---> +7.88513E+01

LA DIFFÉRENCE DE TEMPÉRATURE ENTRE LA PAROI 5
 ET LA PAROI 8 EST ÉGALE A ---> +1.43330E+01
 TEMPÉRATURE DE L'AIR ENTRE LES PAROIS 5 ET 8 ---> +9.36843E+01

LA DIFFÉRENCE DE TEMPÉRATURE ENTRE LA PAROI 8
 ET L'AIR EST ÉGALE A ---> +1.35259E+01
 TEMPÉRATURE DE LA PAROI 9 ---> +1.12210E+02

----> <RETURN>

 SUR LA PAROI 8 (+1.12210E+02 C) DU COTE DE LA PAROI 5 (+7.83513E+01 C),
 IL Y A CONVECTION NATURELLE, EN ECOULEMENT TURBULENT

 SUR LA PAROI 5 (+7.83513E+01 C) DU COTE DE LA PAROI 8 (+1.12210E+02 C),
 IL Y A CONVECTION NATURELLE, EN ECOULEMENT TURBULENT

 ENTRE LES PAROIS 5 (+7.83513E+01 C) ET 1 (+4.72235E+01 C),
 IL Y A CONVECTION NATURELLE, EN ECOULEMENT TURBULENT

 ENTRE LES PAROIS 1 (+4.72235E+01 C) ET EXT (+2.50000E+01 C),
 IL Y A CONVECTION NATURELLE, EN ECOULEMENT TURBULENT
 COEFFICIENT D'ECHANGE H = +4.77935E+00

 LA DIFFERENCE DE TEMPERATURE ENTRE LA PAROI 12
 ET L'AIR EXTERIEUR EST EGALE A ---> +2.36774E+01
 TEMPERATURE DE LA PAROI 12 ---> +5.36774E+01

 LA DIFFERENCE DE TEMPERATURE ENTRE LA PAROI 12
 ET L'AIR, VERS LA PAROI 7 EST EGALE A ---> +2.85774E+01
 TEMPERATURE DE L'AIR ENTRE LES PAROIS 12 ET 7 ---> +3.23549E+01

 LA DIFFERENCE DE TEMPERATURE ENTRE LA PAROI 7
 ET L'AIR EST EGALE A ---> +2.77546E+01
 TEMPERATURE DE LA PAROI 7 ---> +1.10109E+02

---> <RETURN>

 SUR LA PAROI DE GAUCHE, L'EPAISSEUR DE LA COUCHE LIMITE EST EGALE A:
 $\delta = +2.26141E-02$ M

 SUR LA PAROI DE DROITE, L'EPAISSEUR DE LA COUCHE LIMITE EST EGALE A:
 $\delta = +1.33181E-02$ M

 LE SYSTEME CONSIDERE QUE LES PAROIS SUIVANTES ONT UNE FAIBLE ACTION ENTRE ELLES
 VERS LA PAROI 12 (+5.36774E+01 C) :

 ENTRE LES PAROIS 12 (+5.36774E+01 C) ET 7 (+1.10109E+02 C),
 IL Y A CONVECTION NATURELLE, EN ECOULEMENT LAMINAIRE

 VERS LA PAROI 7 (+1.10109E+02 C) :

 ENTRE LES PAROIS 7 (+1.10109E+02 C) ET 12 (+5.36774E+01 C),
 IL Y A CONVECTION NATURELLE, EN ECOULEMENT LAMINAIRE

 ENTRE LES PAROIS 12 (+5.36774E+01 C) ET EXT (+2.50000E+01 C),
 IL Y A CONVECTION NATURELLE, EN ECOULEMENT LAMINAIRE

=====

SYSTEME EXPERT THERMIQUE

=====

E -ENTREE DES DONNEES
L -LANCEMENT DU SYSTEME
R -RESULTATS EN MEMOIRE
M -MODIFICATION DES DONNEES
S -SAUVEGARDE DES DONNEES
V -VISUALISATION DES DONNEES
A -ANNULATION DES DONNEES ET DES RESULTATS
F -FIN

VOTRE CHOIX : R

RESULTATS EN MEMOIRE

F -LUX
D -DELTA-T
T -TEMPERATURES
P -PHENOMENES THERMIQUES
C -COEFFICIENTS D'ECHANGE
E -EPAISSEURS DES COUCHES LIMITEES
R -RETOUR AU MENU PRINCIPAL

VOTRE CHOIX : F

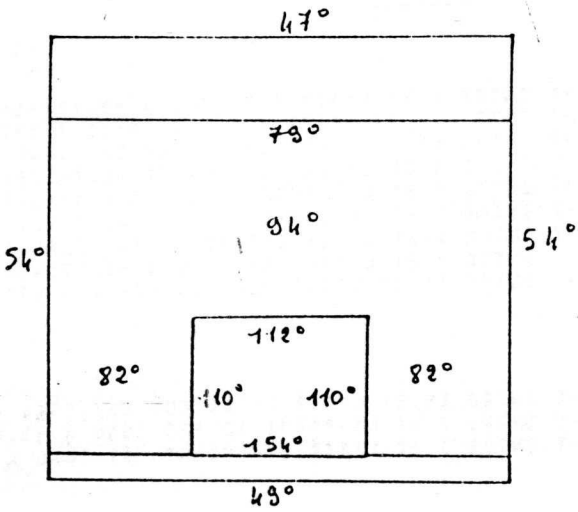
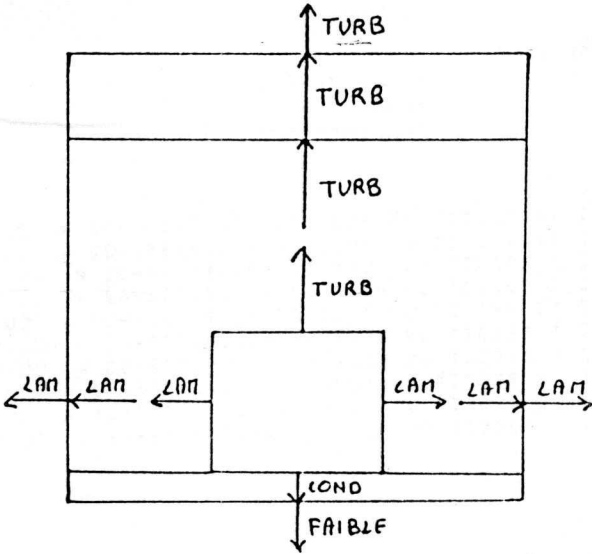
 FLUX D'UNE SOURCE

LA PAROI 15 RECOIT UN FLUX DE +1.00435E+02 W DU VOLUME N 3
 LA PAROI 12 RECOIT UN FLUX DE +1.00435E+02 W DU VOLUME N 3
 LA PAROI 5 RECOIT UN FLUX DE +9.91306E+01 W DU VOLUME N 3
 LA PAROI 2 RECOIT UN FLUX DE +1.20000E+02 W DU VOLUME N 4
 LA PAROI 13 RECOIT UN FLUX DE +1.20000E+02 W DU VOLUME N 4
 LA PAROI 1 RECOIT UN FLUX DE +1.20000E+02 W DU VOLUME N 4
 LA PAROI 4 RECOIT UN FLUX DE -6.25000E+00 W DU VOLUME N 1
 LA PAROI 14 RECOIT UN FLUX DE -6.25000E+00 W DU VOLUME N 1
 LA PAROI 10 RECOIT UN FLUX DE -3.75000E+01 W DU VOLUME N 1
 LA PAROI 3 RECOIT UN FLUX DE +5.00000E+01 W DU VOLUME N 1

 DELTA-T

LE DELTA-T ENTRE 7 ET L'AIR EST EGAL A +2.77546E+01 C
 LE DELTA-T ENTRE 12 ET L'AIR VERS LA PAROI 7 EST EGAL A +2.35774E+01 C
 LE DELTA-T ENTRE 12 ET L'AIR EXTERIEUR EST EGAL A +2.35774E+01 C
 LE DELTA-T ENTRE 3 ET L'AIR EST EGAL A +1.35255E+01 C
 LE DELTA-T ENTRE 5 ET LA PAROI 6 EST EGAL A +1.43330E+01 C
 LE DELTA-T ENTRE 1 ET LA PAROI 5 EST EGAL A +3.16225E+01 C
 LE DELTA-T ENTRE 1 ET L'AIR EXTERIEUR EST EGAL A +2.22235E+01 C
 LE DELTA-T ENTRE 9 ET L'AIR EST EGAL A +2.77546E+01 C
 LE DELTA-T ENTRE 15 ET L'AIR VERS LA PAROI 9 EST EGAL A +2.85774E+01 C

LE DELTA-T ENTRE 15 ET L'AIR EXTERIEUR EST EGAL A +2.85774E+01 C
 LE DELTA-T ENTRE 3 ET LA PAROI 10 EST EGAL A +1.04167E+02 C
 LE DELTA-T ENTRE 3 ET L'AIR EXTERIEUR EST EGAL A +2.43430E+01 C



TEMPERATURE DES PAROIS

LA PAROI 1 A UNE TEMPERATURE DE +4.72285E+01 C
 LA PAROI 3 A UNE TEMPERATURE DE +4.93420E+01 C
 LA PAROI 5 A UNE TEMPERATURE DE +7.38513E+01 C
 LA PAROI 7 A UNE TEMPERATURE DE +1.10109E+02 C
 LA PAROI 8 A UNE TEMPERATURE DE +1.12210E+02 C
 LA PAROI 9 A UNE TEMPERATURE DE +1.10109E+02 C
 LA PAROI 10 A UNE TEMPERATURE DE +1.53510E+02 C
 LA PAROI 12 A UNE TEMPERATURE DE +5.36774E+01 C
 LA PAROI 15 A UNE TEMPERATURE DE +5.36774E+01 C
 LA TEMPERATURE DE L'AIR ENTRE 12 ET 7 EST DE +9.23549E+01 C
 LA TEMPERATURE DE L'AIR ENTRE 9 ET 5 EST DE +9.36943E+01 C
 LA TEMPERATURE DE L'AIR ENTRE 9 ET 15 EST DE +3.23549E+01 C
 LA TEMPERATURE DE L'AIR ENTRE 15 ET EXT EST DE +2.50000E+01 C
 LA TEMPERATURE DE L'AIR ENTRE 14 ET EXT EST DE +2.50000E+01 C
 LA TEMPERATURE DE L'AIR ENTRE 2 ET EXT EST DE +2.50000E+01 C
 LA TEMPERATURE DE L'AIR ENTRE 12 ET EXT EST DE +2.50000E+01 C
 LA TEMPERATURE DE L'AIR ENTRE 4 ET EXT EST DE +2.50000E+01 C
 LA TEMPERATURE DE L'AIR ENTRE 13 ET EXT EST DE +2.50000E+01 C
 LA TEMPERATURE DE L'AIR ENTRE 1 ET EXT EST DE +2.50000E+01 C
 LA TEMPERATURE DE L'AIR ENTRE 3 ET EXT EST DE +2.50000E+01 C

PHENOMENES THERMIQUES

SUR 12, DU COTE DE EXT, LE PHENOMENE THERMIQUE SE RESUME EN : <CONV,X1351,LAM>
 SUR 7, DU COTE DE 12, LE PHENOMENE THERMIQUE SE RESUME EN : <CONV,X1975,LAM>
 SUR 12, DU COTE DE 7, LE PHENOMENE THERMIQUE SE RESUME EN : <CONV,X1901,LAM>
 SUR 5, DU COTE DE 1, LE PHENOMENE THERMIQUE SE RESUME EN : <CONV,X1926,TURB>
 SUR 3, DU COTE DE 3, LE PHENOMENE THERMIQUE SE RESUME EN : <CONV,X1951,TURB>
 SUR 3, DU COTE DE 5, LE PHENOMENE THERMIQUE SE RESUME EN : <CONV,X1976,TURB>
 SUR 15, DU COTE DE EXT, LE PHENOMENE THERMIQUE SE RESUME EN : <CONV,X2001,LAM>
 SUR 15, DU COTE DE 9, LE PHENOMENE THERMIQUE SE RESUME EN : <CONV,X2026,LAM>

SUR 9, DU COTE DE 15, LE PHENOMENE THERMIQUE SE RESUME EN : <CONV,X2051,LAM>
 SUR 1, DU COTE DE EXT, LE PHENOMENE THERMIQUE SE RESUME EN : <CONV,X2076,TURB>
 SUR 3, DU COTE DE EXT, LE PHENOMENE THERMIQUE SE RESUME EN : <CONV,FAISLE,LAM>
 SUR 3, DU COTE DE 10, LE PHENOMENE THERMIQUE SE RESUME EN : COND

 CCEFFICIENTS D'ECHANGE

SUR 12, DU COTE DE L'EXTERIEUR, LE CCEFFICIENT D'ECHANGE EST EGAL A +2.91853E+00
 SUR 7, DU COTE DE 12, LE CCEFFICIENT D'ECHANGE EST EGAL A +3.60299E+00
 SUR 12, DU COTE DE 7, LE CCEFFICIENT D'ECHANGE EST EGAL A +2.91853E+00
 SUR 1, DU COTE DE L'EXTERIEUR, LE CCEFFICIENT D'ECHANGE EST EGAL A +4.77985E+00
 SUR 5, DU COTE DE L'EXTERIEUR, LE CCEFFICIENT D'ECHANGE EST EGAL A +4.17691E+00
 SUR 8, DU COTE DE L'EXTERIEUR, LE CCEFFICIENT D'ECHANGE EST EGAL A +4.49817E+00
 SUR 15, DU COTE DE L'EXTERIEUR, LE CCEFFICIENT D'ECHANGE EST EGAL A +2.91853E+00
 SUR 15, DU COTE DE 9, LE CCEFFICIENT D'ECHANGE EST EGAL A +2.91853E+00
 SUR 9, DU COTE DE 15, LE CCEFFICIENT D'ECHANGE EST EGAL A +3.60299E+00
 SUR 3, DU COTE DE L'EXTERIEUR, LE CCEFFICIENT D'ECHANGE EST EGAL A +1.28374E+00

 EPAISSEUR DE COUCHE LIMITE

SUR LA PAROI 12 ET VERS L'EXTERIEUR,
 L'EPAISSEUR DE LA COUCHE LIMITE ATTEINT +2.26142E-02 M
 SUR LA PAROI 7 ET VERS LA PAROI 12,
 L'EPAISSEUR DE LA COUCHE LIMITE ATTEINT +1.93151E-02 M
 SUR LA PAROI 12 ET VERS LA PAROI 7,
 L'EPAISSEUR DE LA COUCHE LIMITE ATTEINT +2.26141E-02 M
 SUR LA PAROI 15 ET VERS L'EXTERIEUR,
 L'EPAISSEUR DE LA COUCHE LIMITE ATTEINT +2.26142E-02 M
 SUR LA PAROI 15 ET VERS LA PAROI 9,
 L'EPAISSEUR DE LA COUCHE LIMITE ATTEINT +2.26141E-02 M
 SUR LA PAROI 9 ET VERS LA PAROI 15,
 L'EPAISSEUR DE LA COUCHE LIMITE ATTEINT +1.93181E-02 M

V - CONCLUSION

Ce système expert analyse les phénomènes de convection naturelle pouvant exister dans une enceinte.

Il est indispensable d'élargir ce système expert à d'autres phénomènes physiques intervenant dans la transmission de la chaleur, celle-ci se faisant, en règle générale, sous plusieurs modes de simulation. Mais la démarche à suivre sous cette extension sera la même.

Ce système expert, tel qu'il a été précisé, peut être considéré comme un générateur automatique de conductances thermiques. A terme, il est donc possible d'envisager son couplage à des codes de calculs thermiques plus complets. Ainsi, on aurait un ensemble de CAO permettant l'analyse thermique automatique de systèmes de complexité moyenne.

R E M E R C I E M E N T S
=====

Ce travail est entièrement financé par la Société **BERTIN & Cie**.

Messieurs **MORDCHELLES-REGNIER, DAHAN, DE TURCKEIM et GALANT** doivent être remerciés pour leur confiance et l'aide apportée tout au cours de la phase de développement.

Nom des auteurs **A. VERGARA**
 S. VIANNAY

Adresse **BERTIN et Cie**
 BP 22 - 13762 - LES MILLES

Téléphone **42.60.01.11**

Télex : 420729