



HAL
open science

Développement de modules complémentaires au logiciel de simulation thermique SIMULA

Daniel Groleau, Christian Marenne, Fernand Fragnaud

► To cite this version:

Daniel Groleau, Christian Marenne, Fernand Fragnaud. Développement de modules complémentaires au logiciel de simulation thermique SIMULA. [Rapport de recherche] 304/85, Ministère de l'urbanisme et du logement / Secrétariat de la recherche architecturale (SRA); Ministère de l'industrie et de la recherche; Ecole nationale supérieure d'architecture de Nantes / Centre de recherches méthodologiques d'architecture (CERMA). 1985. hal-01890979

HAL Id: hal-01890979

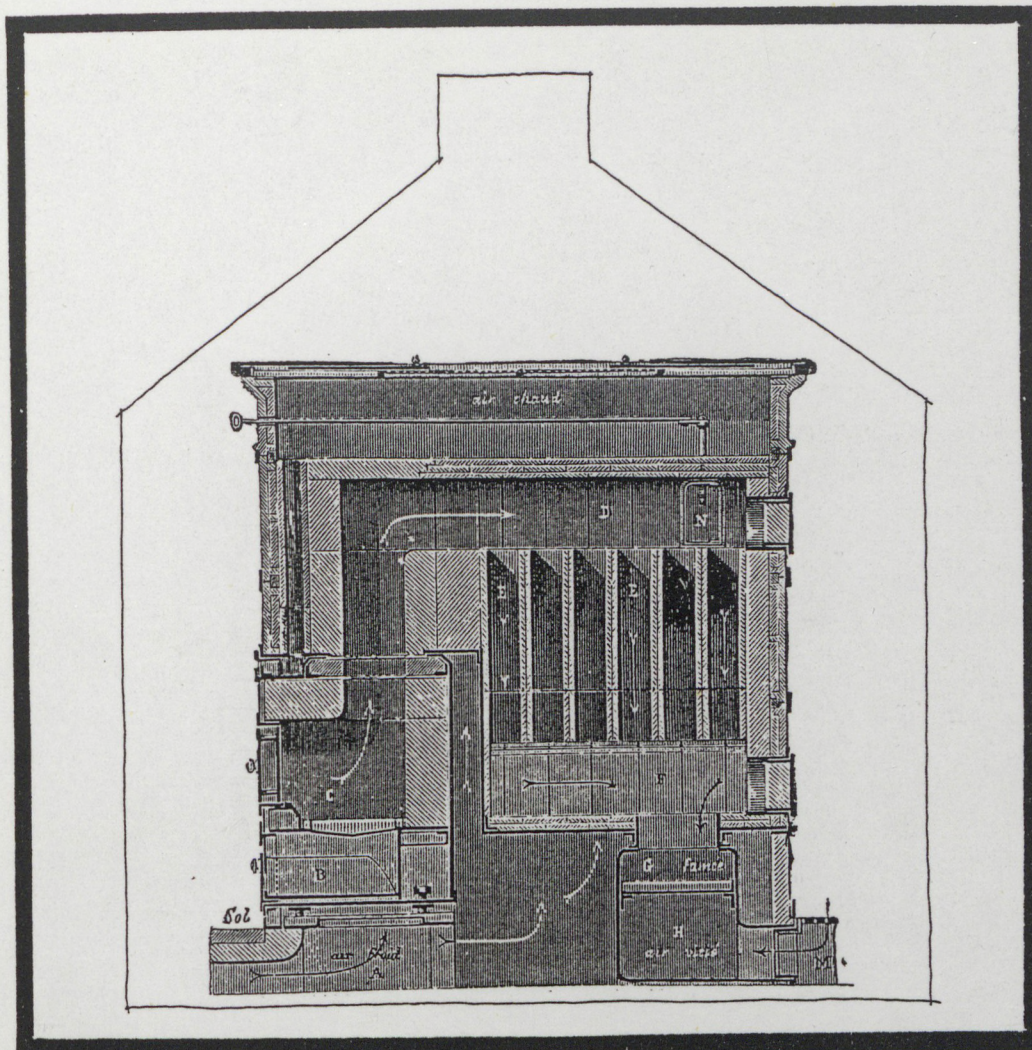
<https://hal.science/hal-01890979>

Submitted on 9 Oct 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

2021



DEVELOPPEMENT DE MODULES COMPLEMENTAIRES AU LOGICIEL DE SIMULATION THERMIQUE SIMULA

CERMA

CENTRE DE RECHERCHES METHODOLOGIQUES D'ARCHITECTURE ET D'AMENAGEMENT / ASSOCIATION DE RECHERCHE AGRÉÉE DE L'UNITÉ PÉDAGOGIQUE D'ARCHITECTURE DE NANTES / RUE MASSENET 44300 NANTES (40) 59.43.24

DEVELOPPEMENT DE MODULES COMPLEMENTAIRES AU LOGICIEL
DE SIMULATION THERMIQUE SIMULA

(Contrat n° 84 0114500223 7501 approuvé le 5 juillet 1984
Exercice 1984 - Chapitre 57-58 - Article 92)

Le présent document constitue le rapport final d'une recherche remise au Secrétariat de la Recherche Architecturale en exécution du programme général de recherche mené par le Ministère de l'Urbanisme et du Logement avec le Ministère de l'Industrie et de la Recherche. Les jugements et opinions émis par les responsables de la recherche n'engagent que leurs auteurs.

RAPPORT CERMA n° 58

C.E.R.M.A. - Association de Recherche agréée
de l'Unité Pédagogique d'Architecture de NANTES
Rue Massenet - 44300 NANTES
Tél. : (40) 59.43.24

Ont participé à cette recherche pour le C.E.R.M.A. :

- F. FRAGNAUD Physicien
- D. GROLEAU Architecte, Responsable de la Recherche
- C. MARENNE Ingénieur Architecte
- S. DELETTRE Secrétaire

SOMMAIRE

- Le logiciel de simulation thermique SIMULA
- Optimisation du calcul des coefficients d'amortissement et de déphasage des parois (module COFREP)
- Traitement des masques et des taches lumineuses intérieures et détermination automatique des flux solaires sur les parois (module TACHE)
- Simulation thermique pour des périodes de temps variables ; paramétrisation de la période et du nombre des harmoniques
- Simulation d'un bâtiment comportant des ambiances à renouvellement d'air variable
- Extraction des paramètres physiques de la simulation permettant la détermination des conditions de confort dans les ambiances
- Conclusion

LE LOGICIEL DE SIMULATION THERMIQUE SIMULA

Dans une perspective d'intégration des paramètres physiques et climatiques au processus de conception des bâtiments, l'équipe a élaboré et mis au point, dans la recherche précédente, un logiciel de simulation thermique interactif SIMULA, permettant l'évaluation et le contrôle thermique des projets. Le logiciel présente, au niveau de la simulation, un certain nombre d'avantages, notamment dans ses capacités à mettre en évidence les interactions entre le bâtiment et son contexte climatique, et à faciliter la compréhension des phénomènes thermiques en jeu dans le bâtiment.

En utilisant le principe de la décomposition d'un signal quelconque en somme de signaux sinusoïdaux (série de Fourier), la simulation en régime variable est traitée en se ramenant à la résolution d'un système thermique en régime périodique. Le bâtiment est découpé en différents domaines de températures homogènes (ambiances intérieures) ; chaque domaine étant couplé par l'intermédiaire des parois ou des échanges d'air. Les sollicitations connues (température, flux solaire, renouvellement d'air,...) sont également décomposées en série de Fourier. On détermine par ailleurs les coefficients d'amortissement et les valeurs de déphasages de chacune des parois, pour chaque période (48 h, ... 24 h, 12 h, 8 h, ...) et chaque type de sollicitation, caractérisant ainsi la réponse des parois.

Le système thermique s'exprime alors sous la forme d'un système d'équations linéaires, correspondant aux équations de bilan de chaque domaine (avec autant d'équations que d'ambiances homogènes et autant de systèmes d'équations que de niveaux de décomposition).

La simulation est réalisée en résolvant chacun des systèmes d'équations, permettant ainsi de trouver, pour chaque ambiance homogène, les inconnues qui sont :

- la variation de la température intérieure d'air au cours du temps en absence de régulation (ni chauffage, ni refroidissement ; cas d'une température "flottante") ;
- la courbe de puissance à fournir en chauffage et climatisation, pour obtenir une régulation totale de la température intérieure (cas d'une température "imposée", constante ou variable au cours du temps) ;
- la température et la puissance dans le cas de régulation de consigne minimale (chauffage) ou maximale (refroidissement) ; la puissance, lorsque la régulation agit et la température pendant le dépassement de la consigne.

L'utilisation pour la simulation d'une méthode analytique permet de se libérer des contraintes imposées par les techniques de résolution numérique (discrétisation en temps et en espace, problème de convergence, temps de calcul). Le niveau de précision des résultats obtenus dépend seulement du nombre de termes de la décomposition. Il est donc permis d'envisager divers types d'utilisation, allant de l'étude fine de phénomènes ou dispositifs particuliers à l'analyse thermique d'un bâtiment de géométrie plus ou moins complexe.

Les capacités interactives du logiciel SIMULA résultent de la méthode de résolution choisie :

- les temps de réponse rapide permettent une utilisation répétée du logiciel, intéressante dans les phases d'apprentissage (étude de pondération des paramètres) ou d'évaluation (incidence des modifications sur le comportement global du bâtiment) ;
- la méthode analytique permet d'avoir accès à l'ensemble des termes de l'échange (bilan de chaque pièce, réponse d'une paroi, évaluation des déperditions, apports gratuits, ...) ; à l'issue de la simulation, l'utilisateur peut, de manière interactive, analyser les résultats par des sorties sélectives, sur imprimante ou terminal graphique, et appréhender ainsi le comportement thermique du bâtiment dans son ensemble.

Le logiciel SIMULA constitue, à cet égard, une réponse intéressante à l'approche des phénomènes thermiques, tant dans les phases de formation et d'enseignement que dans celles d'évaluation ou d'aide à la conception des projets.

La version actuelle du programme, implantée sur mini-ordinateur PDP 11/34 a déjà permis de réaliser des sessions d'utilisation lors de stages de formation à la thermique du bâtiment et dans le cadre d'études opérationnelles. A cette occasion, divers problèmes liés aux procédures d'utilisation du logiciel ont été mis en évidence ; ils tiennent pour une large part aux calculs préliminaires nécessaires à la simulation thermique (calcul des coefficients de réponse des parois, contrôle des masques solaires, évaluation des flux, ...) dont la détermination, parfois longue et délicate, alourdit la tâche de modélisation réalisée par l'utilisateur.

Les limitations, sans remettre en cause les principes de résolution retenues et les capacités du logiciel appellent cependant diverses adaptations et l'élaboration de nouveaux modules de logiciel. Ainsi, afin de concrétiser les acquis des travaux précédents et conclure à terme à la constitution d'une nouvelle version du programme SIMULA, nous avons mis en place, au cours de la présente recherche, les principaux algorithmes de calcul prenant en charge certaines des opérations ou des étapes de la simulation thermique et plus particulièrement :

- l'optimisation du calcul des coefficients de réponse des parois (amortissement et déphasage) qui constitue actuellement une étape préliminaire de la simulation thermique proprement dite,
- la détermination automatique des flux solaires reçus par les différentes parois du bâtiment, en fonction des masques proches et lointains, des surfaces transparentes (vitrages), de la répartition des tâches lumineuses intérieures, et des conditions d'ensoleillement ; la résolution est liée à la définition géométrique du bâtiment et au calcul automatique des flux solaires incidents,
- la simulation sur des séquences de journées types, mettant ainsi en évidence la réponse du bâtiment lors de phases de changement de conditions climatiques ou d'utilisation. La résolution actuelle s'effectue pour des conditions de simulation variables fixées pour une période de 24 heures ; nous envisageons de travailler sur des périodes plus longues (72 ou 96 heures) afin de permettre l'étude du comportement thermique du bâtiment en conditions variables transitoires et appréhender les problèmes d'inertie et de stockage sur des périodes de durée plus grande que la journée.

- la détermination de procédures permettant de traiter un débit de renouvellement d'air variable dans les différentes ambiances (pièces) du bâtiment. Le renouvellement d'air constitue, au même titre que les parois entre locaux, une fonction d'échange entre diverses ambiances. La linéarité étant la condition de la résolution analytique, les éléments d'échange (paroi) sont nécessairement invariables au cours du temps (les propriétés géométriques et physiques des matériaux composant la paroi sont constantes). La prise en compte d'un renouvellement d'air variable implique donc la mise en place de procédures de calcul interactives de même nature que celles mises en oeuvre pour la détermination des bilans thermiques pour des ambiances à température de consigne dans le logiciel SIMULA.

- les modes d'extraction des paramètres physiques résultant de la simulation en vue de les intégrer dans le module (CONFOR) de détermination du bilan de confort (température d'air, température des parois, température radiante).

La question de l'intégration de ces nouveaux modules de programme dans le logiciel SIMULA est également abordée, permettant ainsi d'établir les diverses modalités de restructuration du logiciel dans la perspective d'une nouvelle version opérationnelle du logiciel et de son implantation sur des sites informatiques différents.

CALCUL DES COEFFICIENTS D'AMORTISSEMENT ET DE DEPHASAGE
DES PAROIS

1 - LA MODELISATION THERMIQUE DANS SIMULA

Pour réaliser la simulation thermique d'un bâtiment, celui-ci doit être modélisé comme un système thermique dans lequel les interactions et les échanges thermiques entre éléments puissent être analysés et calculés. Le système est composé des éléments constituant le bâtiment (locaux, parois) dont les caractéristiques géométriques et thermophysiques sont connues et des sollicitations variables au cours du temps (conditions climatiques extérieures ou conditions intérieures) qui leur sont appliquées.

Dans le logiciel SIMULA, la modélisation de l'habitat est effectuée en distinguant deux types d'éléments :

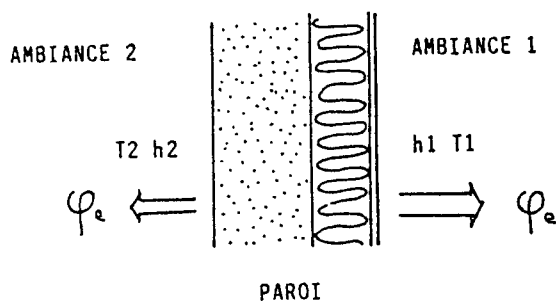
- les éléments dont la température est supposée homogène à tout instant (ambiance, pièce) ; ils sont caractérisés par une capacité calorifique (air des locaux, mobilier léger, ...) ,
- les éléments de couplage entre ambiances qui peuvent être :
 - . les éléments solides, essentiellement les parois enveloppes et intérieures (murs, toitures, planchers), placées en séparation entre les éléments à température homogène;
 - . les éléments de couplage à effet instantané : vitrages considérés comme résistances thermiques pures, renouvellement d'air, échanges d'air entre ambiances...

Le choix des conditions imposées définit le problème complètement :

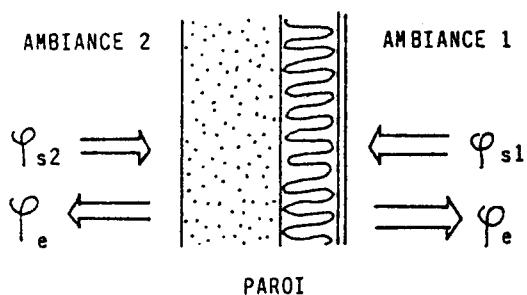
- le type de temps extérieur : répartition temporelle de la température extérieure d'air et des flux rayonnés solaires sur les éléments solides, parois extérieures ou intérieures ;
- le "statut" de régulation des éléments isothermes, chacun pouvant être imposé différemment : en régulation totale, sans régulation ou avec régulation de consigne.

Les éléments de couplage solides déterminent donc en partie les échanges thermiques entre ambiances. La simulation thermique doit en fait calculer les flux échangés φ_e , au travers de ces éléments (parois multicouches) vers les ambiances en réponse aux quatre types de sollicitations qui leur sont appliquées, à savoir :

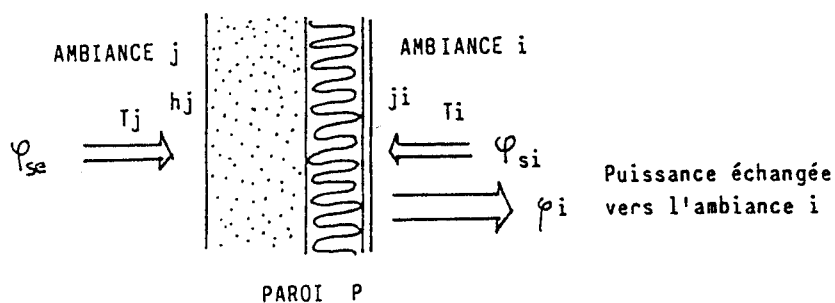
- les températures d'air sur chacune des faces de la paroi correspondant aux températures des deux ambiances adjacentes à la paroi (T_1 et T_2)



- les flux solaires incidents sur chacune des faces provenant soit de rayonnement direct, soit de rayonnement diffus et réfléchi (φ_{s1} et φ_{s2})



La puissance totale φ_i échangée vers l'ambiance i , par la paroi P , est la somme des réponses φ_e obtenues pour chaque sollicitation appliquée à la paroi :



Les parois du local introduisent des réponses vers l'ambiance considérée qui sont déphasées dans le temps et amorties par rapport aux sollicitations. Pour cette raison, le calcul des échanges au travers des parois nécessite un mode de calcul particulier en régime variable. En régime périodique, les fonctions de transfert qui règlent les échanges se ramènent à deux termes caractéristiques de la période et du type de la sollicitation : le coefficient d'amortissement et la valeur du déphasage.

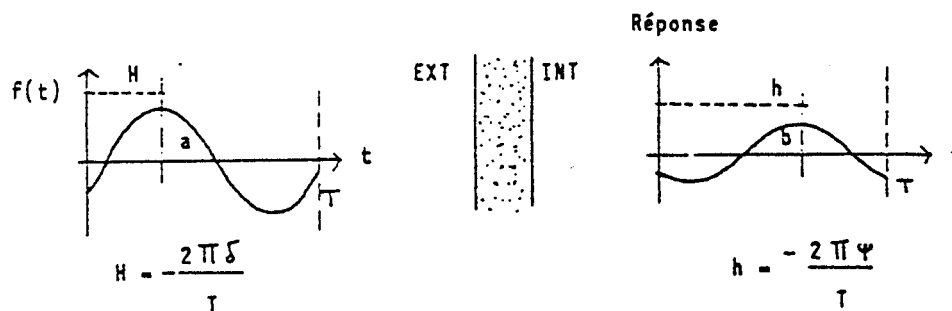
2 - REPONSE D'UNE PAROI A UNE SOLLICITATION SINUSOÏDALE

La réponse d'une paroi soumise à un signal sinusoïdal

$$f(t) = a \cos(\omega t + \delta)$$

est également sinusoïdale, de même période. Elle est cependant amortie et déphasée et peut s'écrire sous la forme :

$$\text{réponse}(t) = b \cos(\omega t + \psi)$$



L'amortissement m et le déphasage d de la réponse sont :

$$m = \frac{b}{a} \quad ; \text{ rapport des amplitudes}$$

$$d = \psi - \delta \quad ; \text{ différence des phases}$$

La réponse de la paroi à la sollicitation peut alors s'exprimer par :

$$\text{réponse}(t) = ma \cos(\omega t + \delta + d) = b \cos(\omega t + \psi)$$

L'amortissement m et le déphasage d sont des caractéristiques de la paroi, du type de sollicitation et de la période du signal.

En calculant la réponse de la paroi à un signal sinusoïdal unitaire $f(t) = \cos \omega t$ on obtient directement les valeurs de m et d .

3 - REPONSE D'UNE PAROI A UNE SOLLICITATION PERIODIQUE

Toute sollicitation périodique est préalablement décomposée en composantes sinusoïdales par analyse de Fourier. La réponse à une sollicitation périodique est la somme des réponses aux diverses composantes sinusoïdales de cette sollicitation. Ainsi, pour une sollicitation $F(t)$ de période T décomposée sous la forme :

$$F(t) = A_0 + \sum_{k=1}^n A_k \cos(\omega_k t + \delta_k)$$

le flux échangé sur la face intérieure est alors :

$$\text{réponse} = m_0 A_0 + \sum_{k=1}^n m_k A_k \cos(\omega_k t + \delta_k + d_k)$$

m_0 étant l'amortissement de la paroi pour la sollicitation moyenne constante (réponse de la paroi en régime permanent)

m_k et d_k étant l'amortissement et le déphasage de la paroi pour la période T/k .

Cette réponse est obtenue en déterminant au préalable les différents coefficients d'amortissement m et de déphasage d pour chacune des périodes T/k (k variant de 1 à n niveaux de décomposition) par rapport à la sollicitation unitaire $f(t) = \cos \omega t$ (avec $\omega = \frac{2\pi k}{T}$)

Ainsi, pour une décomposition en 5 niveaux d'un signal de période T , m et d seront calculés pour les périodes $T, T/2, T/3, T/4, T/5$ (ainsi pour $T = 24$ h, successivement 24 h, 12 h, 8 h, 6 h, 4.8 h).

4 - DETERMINATION DE L'AMORTISSEMENT ET DU DEPHASAGE D'UNE PAROI A L'AIDE D'UNE NOTATION MATRICIELLE COMPLEXE

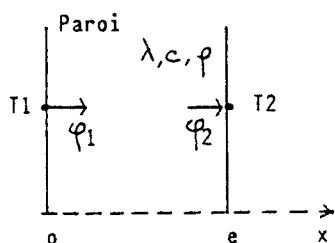
Le problème consiste à résoudre l'équation de la conduction unidimensionnelle de la chaleur à travers un mur composite. Jusqu'à présent, la détermination des coefficients d'amortissement et de déphasage était réalisée, dans SIMULA, en utilisant une méthode de résolution aux différences finies (module de calcul TERREP). Le temps de calcul nécessaire et les problèmes de convergence inhérents à ce type de méthode rendaient cette tâche préliminaire pénalisante vis-à-vis de la simulation thermique proprement dite.

En fait, le calcul reposant sur une décomposition des signaux en série de Fourier, la résolution du problème thermique se ramène au traitement du régime périodique établi. Il est donc possible d'utiliser une notation matricielle complexe pour aborder le calcul des flux transmis à travers une paroi en réponse à une sollicitation sinusoïdale.

DESCRIPTION DE LA METHODE

Cas d'une paroi homogène

L'objectif est de relier les grandeurs en température et en flux T_1, φ_1 sur la face extérieure aux grandeurs T_2, φ_2 obtenues sur la face intérieure.



Etant donné une sollicitation de température T_1 appliquée sur la surface extérieure de la paroi et de période T , et φ_1 la densité de flux qui lui est associée, on a :

$$T_1 = A \cos \omega t \quad \text{avec} \quad \omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$\varphi_1 = B \cos \omega t$$

En posant $\theta_1 = Ae^{i\omega t} = A(\cos \omega t + i \sin \omega t)$ et $\phi_1 = Be^{i\omega t}$

θ_1 et ϕ_1 sont alors les parties réelles des termes complexes θ_1 et ϕ_1 .

θ_1 et ϕ_1 doivent donc vérifier l'équation générale de la conduction :

$$a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1) \quad \text{avec } a = \frac{\lambda}{c\rho}$$

avec comme conditions aux limites sur la face extérieure :

$$(\theta)_{x=0} = \theta_1 \quad (2)$$

$$-\lambda \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)_{x=0} = \phi_1 \quad (3)$$

La solution θ recherchée est de la forme :

$$\theta = c e^{\alpha t + \beta x}$$

L'équation (2) entraîne : $c e^{\alpha t} = Ae^{i\omega t}$ soit $\alpha = i\omega$

En dérivant θ successivement par rapport à x (espace) et par rapport à t (temps) on obtient :

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = c \beta^2 e^{(i\omega t + \beta x)}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = i c \omega e^{(i\omega t + \beta x)}$$

et, en reportant ces valeurs dans l'équation générale (1), il résulte :

$$a \beta^2 = i \omega$$

$$\text{soit } \beta = \sqrt{i \frac{\omega}{a}} = \pm (1+i) \sqrt{\frac{\omega}{2a}}$$

On obtient ainsi deux solutions particulières de l'équation (1) et la solution générale est donc une combinaison linéaire de ces deux solutions, soit :

$$\theta = \left(C_1 e^{(1+i)\sqrt{\frac{\omega}{2a}} x} + C_2 e^{-(1+i)\sqrt{\frac{\omega}{2a}} x} \right) e^{i\omega t}$$

En reprenant θ_1 et ϕ_1 , sous la forme $\theta_1 = Ae^{i\omega t}$ et $\phi_1 = Be^{i\omega t}$, on calcule les constantes C_1 et C_2 à partir des équations (2) et (3) :

$$A = C_1 + C_2$$

$$B = -\lambda (1+i) \sqrt{\frac{\omega}{2a}} (C_1 - C_2)$$

soit

$$C_1 = \frac{A}{2} - \frac{B}{2(1+i)\lambda\sqrt{\frac{\omega}{2a}}}$$

$$C_2 = \frac{A}{2} + \frac{B}{2(1+i)\lambda\sqrt{\frac{\omega}{2a}}}$$

En posant $\delta = \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}$

et en reportant les valeurs de C1 et C2 dans la formulation de θ , on obtient :

$$\theta = e^{i\omega t} \left[A \left(\frac{e^{(1+i)\delta x} + e^{-(1+i)\delta x}}{2} \right) - \frac{B}{(1+i)\lambda\delta} \left(\frac{e^{(1+i)x} - e^{-(1+i)x}}{2} \right) \right]$$

et en utilisant les fonctions hyperboliques :

$$\theta = e^{i\omega t} \left(A \operatorname{ch}(1+i)\delta x - \frac{B}{(1+i)\lambda\delta} \operatorname{sh}\delta x \right)$$

avec $A = \theta_1 e^{-i\omega t}$; $B = \phi_1 e^{-i\omega t}$

On peut ainsi exprimer θ en fonction de θ_1 , ϕ_1 et x :

$$\theta = \theta_1 \operatorname{ch}(1+i)\delta x - \frac{\phi_1}{(1+i)\lambda\delta} \operatorname{sh}(1+i)\delta x$$

La densité de flux ϕ associée à la température θ à l'intérieur de la paroi est alors :

$$\phi = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x}$$

$$\phi = -(1+i)\lambda\delta\theta_1 \operatorname{sh}(1+i)\delta x + \phi_1 \operatorname{ch}(1+i)\delta x$$

En particulier sur la face extérieure correspondant à $x = e$

$$(\theta)_{x=e} = \theta_2$$

$$(\phi)_{x=e} = \phi_2$$

soit

$$\theta_2 = \theta_1 \operatorname{ch}(1+i)\delta e - \phi_1 \frac{(1-i)}{2\lambda\delta} \operatorname{sh}(1+i)\delta e$$

$$\phi_2 = -(1+i)\lambda\delta\theta_1 \operatorname{sh}(1+i)\delta e + \phi_1 \operatorname{ch}(1+i)\delta e$$

Ce système peut s'écrire sous la forme matricielle :

$$\begin{pmatrix} \theta_2 \\ \phi_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \phi_1 \end{pmatrix}$$

avec $M_{11} = \operatorname{ch}(1+i)\delta e$

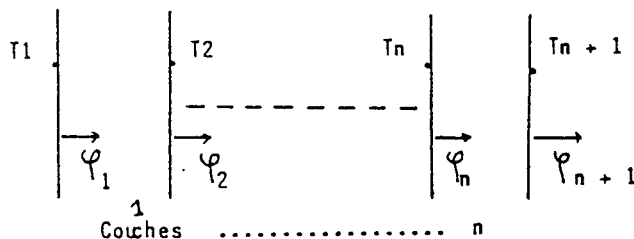
$$M_{12} = -\frac{1-i}{2\lambda\delta} \operatorname{sh}(1+i)\delta e$$

$$M_{21} = -(1+i)\lambda\delta \operatorname{sh}(1+i)\delta e$$

La matrice M caractérise alors les transferts par conduction à travers la paroi étudiée.

Cas d'une paroi multicouche

Soit une paroi composite comprenant n couches successives :



En appliquant, pour chaque couche homogène la relation précédente, on obtient :

$$\begin{pmatrix} \theta_2 \\ \phi_2 \end{pmatrix} = M_1 \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \phi_1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \theta_3 \\ \phi_3 \end{pmatrix} = M_2 \begin{pmatrix} \theta_2 \\ \phi_2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \theta_{n+1} \\ \phi_{n+1} \end{pmatrix} = M_n \begin{pmatrix} \theta_n \\ \phi_n \end{pmatrix}$$

En multipliant membre à membre, on établit une relation entre les couples de valeurs $(\theta_{n+1}, \phi_{n+1})$ et (θ_1, ϕ_1) telle que :

$$\begin{pmatrix} \theta_{n+1} \\ \phi_{n+1} \end{pmatrix} = M_n \times M_{n-1} \times \dots \times M_2 \times M_1 \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \phi_1 \end{pmatrix}$$

La multiplication des matrices n'étant pas commutative, le résultat dépend de la position des différentes couches de matériaux à l'intérieur de la paroi composite. La matrice M_p égale au produit des matrices particulières de chaque couche homogène caractérise la paroi composite :

$$M_p = M_n \times \dots \times M_1$$

Les échanges superficiels

Dans le cas d'une sollicitation en température seule, les échanges superficiels sont caractérisés par les relations

- sur la face extérieure

$$\begin{array}{l} \phi_e = h_e (\theta_e - \theta_1) \text{ soit} \\ \phi_e = \phi_1 \end{array} \left| \begin{array}{l} \theta_1 = \theta_e - \frac{\phi_e}{h_e} \\ \phi_1 = \phi_e \end{array} \right.$$

- sur la face intérieure

$$\begin{array}{l} \phi_i = h_i (\theta_{n+1} - \theta_i) \text{ soit} \\ \phi_i = \phi_{n+1} \end{array} \left| \begin{array}{l} \theta_i = \theta_{n+1} - \frac{\phi_{n+1}}{h_i} \\ \phi_i = \phi_{n+1} \end{array} \right.$$

Sous forme matricielle, on peut donc écrire :

$$\begin{pmatrix} \theta_1 \\ \phi_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - 1/h_e & \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_e \\ \phi_e \end{pmatrix} = M_e \begin{pmatrix} \theta_e \\ \phi_e \end{pmatrix}$$

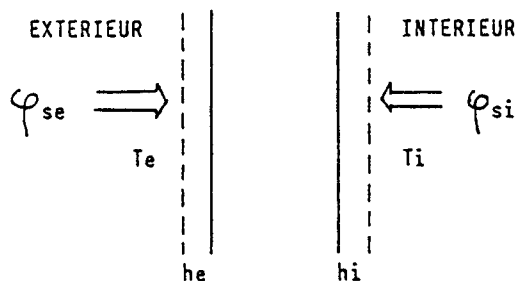
$$\text{et} \begin{pmatrix} \theta_i \\ \phi_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - 1/h_i & \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_{n+1} \\ \phi_{n+1} \end{pmatrix} = M_i \begin{pmatrix} \theta_{n+1} \\ \phi_{n+1} \end{pmatrix}$$

Tenir compte des échanges superficiels équivaut donc à inclure une couche supplémentaire sur les faces intérieures et extérieures, caractérisée par les matrices M_e et M_i .

APPLICATION DE LA METHODE AU CALCUL DES AMORTISSEMENTS ET DEPHASAGES D'UNE PA-
ROI COMPOSITE

Les coefficients de réponse d'une paroi aux différents types de sollicitation sont caractérisés par l'amortissement et le déphasage correspondant à chaque pulsation des termes de la décomposition en série de Fourier.

Dans le cas général, les faces extérieures et intérieures d'une paroi sont soumises aux sollicitations de température et de flux : T_e , φ_{se} , T_i , φ_{si} . On pose h_e et h_i , les coefficients d'échange superficiel.



La matrice caractéristique de la paroi M est alors le produit : $M = M_i \times M_p \times M_e$.

Les termes de cette matrice sont des nombres complexes et sont notés :

$$M = \begin{pmatrix} a_1 + ib_1 & a_2 + ib_2 \\ a_3 + ib_3 & a_4 + ib_4 \end{pmatrix}$$

Réponse à une température extérieure $T_e(t)$

les conditions sont :

$$T_e = A \cos \omega t \quad \text{soit} \quad \theta_e = A e^{i\omega t}$$

$$\varphi_{se} = 0$$

$$\varphi_{si} = 0$$

$$T_i = 0$$

Les matrices caractéristiques des échanges superficiels sont celles décrites précédemment :

$$M_e = \begin{pmatrix} 0 & -1/h_e \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad M_i = \begin{pmatrix} 1 & -1/h_i \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

En notation matricielle complexe, la température intérieure θ_i est reliée à θ_e par la matrice M, telle que :

$$\begin{pmatrix} \theta_i \\ \phi_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 + ib_1 & a_2 + ib_2 \\ a_3 + ib_3 & a_4 + ib_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_e \\ \phi_e \end{pmatrix}$$

En développement, θ_i et ϕ_i deviennent :

$$\begin{aligned} \theta_i &= (a_1 + ib_1)\theta_e + (a_2 + ib_2)\phi_e \\ \phi_i &= (a_3 + ib_3)\theta_e + (a_4 + ib_4)\phi_e \end{aligned}$$

La condition $\theta_i = 0$ entraîne :

$$\begin{aligned} \phi_e &= -\frac{a_1 + ib_1}{a_2 + ib_2}\theta_e \\ \theta_i &= \left[(a_3 + ib_3) - \frac{(a_1 + ib_1)(a_4 + ib_4)}{a_2 + ib_2} \right] \theta_e \end{aligned}$$

Le terme entre crochet peut s'écrire sous la forme $X + iY$; on a alors :

$$\begin{aligned} \phi_i &= (X + iY)\theta_e = \sqrt{X^2 + Y^2} (\cos d + i \sin d) \theta_e \\ \theta_e &= A e^{i\omega t} \quad \text{avec} \quad d = \arctg Y/X \end{aligned}$$

On en déduit alors :

$$\phi_i = A \sqrt{X^2 + Y^2} e^{i(\omega t + d)}$$

La densité de flux intérieur est la partie réelle de ϕ_i ; la température T_e la partie réelle de θ_e .

L'amortissement et le déphasage du flux transmis vers l'intérieur en réponse à un signal température appliqué à l'extérieur de la paroi sont alors :

$$\begin{aligned} m &= \sqrt{X^2 + Y^2} \\ d &= \arctg \frac{Y}{X} \end{aligned}$$

Réponse à une température intérieure $T_i(t)$

Les conditions sont $T_e = 0$, $\varphi_{se} = 0$, $\varphi_{si} = 0$.

Les matrices d'échanges superficiels sont inchangées et en reprenant le système d'équations, on a Θ_i et Φ_i :

$$\Theta_i = (a_1 + ib_1) \Theta_e + (a_2 + ib_2) \Phi_e$$

$$\Phi_i = (a_3 + ib_3) \Theta_e + (a_4 + ib_4) \Phi_e$$

La condition $\Theta_e = 0$ entraîne :

$$\Theta_i = (a_2 + ib_2) \Phi_e$$

$$\Phi_i = (a_4 + ib_4) \Phi_e$$

$$\text{soit } \Phi_i = \frac{a_4 + ib_4}{a_2 + ib_2} \Theta_i$$

qui mis sous la même forme que précédemment s'écrit :

$$\Phi_i = (X + iY) \Theta_i$$

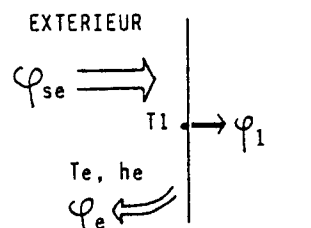
Les coefficients d'amortissement et de déphasage sont alors :

$$m = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

$$d = \arctg \frac{X}{Y}$$

Réponse au flux solaire extérieur $\varphi_{se}(t)$

Les conditions sont : $T_e = 0$, $\varphi_{si} = 0$, $T_i = 0$.



Sur la face extérieure, les conditions aux limites deviennent :

$$\varphi_{se} = \varphi_1 + h_e (T_i - T_e)$$

$$\text{et } \varphi_e = h_e (T_e - T_i)$$

$$\text{donc } \varphi_{se} = \varphi_1 - \varphi_e$$

En notation complexe, on a :

$$\begin{aligned} \phi_{se} &= \phi_1 - \phi_e \\ \text{et } \theta_1 &= \theta_e - \frac{\phi_e}{he} \end{aligned}$$

La condition $\theta_e = 0$ entraîne :

$$\begin{aligned} \theta_1 &= - \frac{\phi_e}{he} \\ \phi_1 &= \phi_e + \phi_{se} \end{aligned}$$

soit

$$\begin{pmatrix} \theta_1 \\ \phi_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -1/he \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_{se} \\ \phi_e \end{pmatrix}$$

La matrice d'échange sur la face intérieure est inchangée et on a :

$$M_e = \begin{pmatrix} 0 & -1/he \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad M_i = \begin{pmatrix} 1 & -1/hi \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

La matrice globale M exprime les valeurs de (θ_i, ϕ_i) en fonction de $(\phi_{se}$ et ϕ_e

$$\text{soit } \begin{pmatrix} \theta_i \\ \phi_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 + ib_1 & a_2 + ib_2 \\ a_3 + ib_3 & a_4 + ib_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_{se} \\ \phi_e \end{pmatrix}$$

La condition $\theta_i = 0$ entraîne :

$$\begin{aligned} 0 &= (a_1 + ib_1) \phi_{se} + (a_2 + ib_2) \phi_e \\ \phi_i &= (a_3 + ib_3) \phi_{se} + (a_4 + ib_4) \phi_e \end{aligned}$$

Le système permet d'obtenir ϕ_i et les coefficients de transferts m et d de la paroi à la sollicitation en flux extérieur ϕ_{se} :

$$\phi_i = \left[a_3 + ib_3 - \frac{(a_1 + ib_1)(a_4 + ib_4)}{a_2 + ib_2} \right] \phi_{se}$$

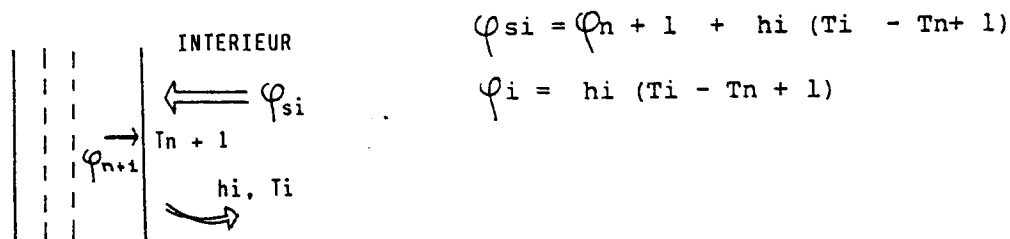
$$\phi_i = (X + iY) \phi_{se}$$

$$m = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

$$d = \text{arctg} \frac{Y}{X}$$

Réponse au flux solaire intérieur ϕ_{si}

Les conditions sont $T_e = 0$, $T_i = 0$, $\phi_{se} = 0$. En écrivant le bilan des flux sur la face intérieure, on a :



$$\phi_{si} = \phi_{n+1} + h_i (T_i - T_{n+1})$$

$$\phi_i = h_i (T_i - T_{n+1})$$

soit en notation complexe, avec $T_i = 0$:

$$\phi_{si} = \phi_{n+1} - h_i \theta_{n+1}$$

$$\phi_i = -h_i \theta_{n+1}$$

Sous forme matricielle, on obtient :

$$\begin{pmatrix} \phi_i \\ \phi_{si} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -h_i & 0 \\ -h_i & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_{n+1} \\ \phi_{n+1} \end{pmatrix}$$

La matrice d'échange sur la face extérieure est inchangée et les matrices M_e et M_i sont :

$$M_e = \begin{pmatrix} 1 & -1/h_e \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad M_i = \begin{pmatrix} -h_i & 0 \\ -h_i & 0 \end{pmatrix}$$

La relation entre (ϕ_i, ϕ_{si}) et $(\theta_{n+1}, \phi_{n+1})$ est alors :

$$\phi_i = (a_1 + ib_1) \theta_e + (a_2 + ib_2) \phi_e$$

$$\phi_{si} = (a_3 + ib_3) \theta_e + (a_4 + ib_4) \phi_e$$

La condition $\theta_e = 0$ entraîne :

$$\phi_i = (a_2 + ib_2) \phi_e$$

$$\phi_{si} = (a_4 + ib_4) \phi_e$$

$$\text{soit } \phi_i = \frac{a_2 + ib_2}{a_4 + ib_4} \phi_{si}$$

$$\phi_i = (X + iY) \phi_{si}$$

$$\text{et } m = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

$$d = \text{arctg } \frac{Y}{X}$$

5 - LE MODULE DE CALCUL "COFREP"

Un module de calcul COFREP a été développé pour déterminer les coefficients de transferts des parois à l'aide de la notation matricielle. Reposant sur une résolution analytique globale de l'équation de la conduction, le calcul devient alors extrêmement rapide et introduit une grande souplesse d'utilisation. On peut ainsi envisager de traiter sans difficultés :

- des parois composites complexes sans contrainte sur les épaisseurs des couches de matériau constituant la paroi (épaisseur inférieure au centimètre, ou épaisseur importante, comme dans le cas du traitement d'un sol) ;
- un nombre de niveaux de décomposition quelconque avec les amortissements et déphasages pour des sollicitations de grande ou de très courte période, sans augmentation sensible des temps de calcul.

Compte tenu de ses performances de calcul, le module COFREP peut aisément être intégré à la phase de simulation thermique proprement dite et devenir ainsi totalement transparent à l'utilisateur. Le calcul des coefficients d'amortissement et de déphasage est réalisé à chaque définition de paroi par l'utilisateur. La période fondamentale de la simulation et le nombre de niveaux de décomposition sont alors des paramètres de la simulation.

L'utilisateur doit seulement indiquer les matériaux constituant la paroi multicouche, leur épaisseur et les coefficients d'échanges superficiels ; les caractéristiques λ , c , ρ des matériaux stockés dans une banque sont disponibles dans le programme.

A titre d'illustration, nous présentons ci-après quelques exemples de calcul mettant en évidence les termes nécessaires à déterminer pour chaque paroi lors d'une simulation :

- cas d'une paroi enveloppe béton avec isolant intérieur ; période 24 h, décomposition sur 5 niveaux ;
- cas d'une paroi enveloppe béton avec isolant extérieur et enduit plâtre intérieur ; période 48 h, décomposition sur 10 niveaux,
- cas d'un plancher béton isolé sur terre plein incluant une épaisseur de terre de 2 m ; la température du sol à cette profondeur peut être considérée comme constante dans l'année, on impose la température du sol à cette profondeur en prenant un coefficient d'échange superficiel élevé (période 24 h, 5 niveaux).

COMPOSITION DE LA PAROI

MILIEU 1

LAMBDA = 0.875 BETON
 RHO = 1800.000
 C = 850.000
 EPAIS = 0.150

MILIEU 2

LAMBDA = 0.040 ISOLANT
 RHO = 40.000
 C = 1250.000
 EPAIS = 0.070

AUX LIMITES HE = 16.00 HI = 8.00

REPONSE M ET D PERIODE = 24.00

A TEMPERATURE EXTERIEURE

P= 0.00	NIVEAU= 0	0.47417	0.00000
P= 24.00	NIVEAU= 1	0.21368	-5.92105
P= 12.00	NIVEAU= 2	0.10888	-4.23839
P= 8.00	NIVEAU= 3	0.06675	-3.46364
P= 6.00	NIVEAU= 4	0.04451	2.98953
P= 4.80	NIVEAU= 5	0.03117	2.09501

A FLUX EXTERIEUR

P= 0.00	NIVEAU= 0	0.02964	0.00000
P= 24.00	NIVEAU= 1	0.01335	-5.92106
P= 12.00	NIVEAU= 2	0.00680	-4.23829
P= 8.00	NIVEAU= 3	0.00417	-3.46376
P= 6.00	NIVEAU= 4	0.00278	2.98948
P= 4.80	NIVEAU= 5	0.00195	2.09472

A FLUX INTERIEUR

P= 0.00	NIVEAU= 0	0.94073	0.00000
P= 24.00	NIVEAU= 1	0.93526	-0.04994
P= 12.00	NIVEAU= 2	0.93314	-0.04202
P= 8.00	NIVEAU= 3	0.93112	-0.03990
P= 6.00	NIVEAU= 4	0.92868	-0.03856
P= 4.80	NIVEAU= 5	0.92580	-0.03759

A TEMPERATURE INTERIEURE

P= 0.00	NIVEAU= 0	-0.47417	0.00000
P= 24.00	NIVEAU= 1	0.52773	-11.28794
P= 12.00	NIVEAU= 2	0.56122	-5.43278
P= 8.00	NIVEAU= 3	0.60154	-3.49406
P= 6.00	NIVEAU= 4	0.64999	-2.54200
P= 4.80	NIVEAU= 5	0.70414	-1.98463

COMPOSITION DE LA PAROI

MILIEU 1

LAMBDA = 0.040 ISOLANT
 RHO = 140.000
 C = 1250.000
 EPAIS = 0.070

MILIEU 2

LAMBDA = 0.875 BETON
 RHO = 1800.000
 C = 850.000
 EPAIS = 0.150

MILIEU 3

LAMBDA = 0.350 PLATRE
 RHO = 800.000
 C = 1040.000
 EPAIS = 0.015

AUX LIMITES HE = 16.00 HI = 8.00

REPONSE M ET D PERIODE = 48.00

A TEMPERATURE EXTERIEURE

P = 0.00	NIVEAU = 0	0.46473	0.00000
P = 48.00	NIVEAU = 1	0.23361	-10.00000
P = 24.00	NIVEAU = 2	0.12654	-5.98695
P = 16.00	NIVEAU = 3	0.08253	-5.58489
P = 12.00	NIVEAU = 4	0.05887	-4.74470
P = 9.60	NIVEAU = 5	0.04415	-4.20078
P = 8.00	NIVEAU = 6	0.03419	-3.82554
P = 6.86	NIVEAU = 7	0.02709	-3.32599
P = 6.00	NIVEAU = 8	0.02180	-2.73110
P = 5.33	NIVEAU = 9	0.01778	-2.22562
P = 4.80	NIVEAU = 10	0.01468	-1.82562

A FLUX EXTERIEUR

P = 0.00	NIVEAU = 0	0.02765	0.00000
P = 48.00	NIVEAU = 1	0.01461	-10.00000
P = 24.00	NIVEAU = 2	0.00791	-6.98914
P = 16.00	NIVEAU = 3	0.00515	-6.58695
P = 12.00	NIVEAU = 4	0.00368	-4.74680
P = 9.60	NIVEAU = 5	0.00277	-4.20078
P = 8.00	NIVEAU = 6	0.00214	-3.82554
P = 6.86	NIVEAU = 7	0.00167	-3.32599
P = 6.00	NIVEAU = 8	0.00137	-2.73110
P = 5.33	NIVEAU = 9	0.00109	-2.22562

A FLUX INTERIEUR

P = 0.00	NIVEAU = 0	0.94191	0.00000
P = 48.00	NIVEAU = 1	0.51910	-10.00000
P = 24.00	NIVEAU = 2	0.30860	-6.98914
P = 16.00	NIVEAU = 3	0.46900	-6.58695
P = 12.00	NIVEAU = 4	0.44769	-4.74680
P = 9.60	NIVEAU = 5	0.43143	-4.20078
P = 8.00	NIVEAU = 6	0.41767	-3.82554
P = 6.86	NIVEAU = 7	0.40537	-3.32599
P = 6.00	NIVEAU = 8	0.39443	-2.73110
P = 5.33	NIVEAU = 9	0.38471	-2.22562
P = 4.80	NIVEAU = 10	0.37600	-1.82562

A TEMPERATURE INTERIEURE

P = 0.00	NIVEAU = 0	-0.46473	0.00000
P = 48.00	NIVEAU = 1	2.93387	-10.00000
P = 24.00	NIVEAU = 2	4.42887	-7.98695
P = 16.00	NIVEAU = 3	4.80246	-7.58489
P = 12.00	NIVEAU = 4	4.74110	-5.74470
P = 9.60	NIVEAU = 5	4.69773	-5.20078
P = 8.00	NIVEAU = 6	4.66254	-4.82554
P = 6.86	NIVEAU = 7	4.63597	-4.32599
P = 6.00	NIVEAU = 8	4.61680	-3.73110
P = 5.33	NIVEAU = 9	4.60411	-3.22562
P = 4.80	NIVEAU = 10	4.59700	-2.82562

COMPOSITION DE LA PAROI

MILIEU 1

LAMBDA =	1.740	TERRE
RHO =	2000.000	
C =	1840.000	
EPAIS =	2.000	

MILIEU 2

LAMBDA =	0.040	ISOLANT
RHO =	40.000	
C =	1250.000	
EPAIS =	0.050	

MILIEU 3

LAMBDA =	0.875	BETON
RHO =	1800.000	
C =	850.000	
EPAIS =	0.150	

AUX LIMITES HE = 25.00 HI = 5.88

REPONSE M ET D PERIODE = 24.00

A TEMPERATURE EXTERIEURE

P = 0.00 NIVEAU = 0 0.35959 0.00000

A FLUX EXTERIEUR

P = 0.00 NIVEAU = 0 0.01438 0.00000

A FLUX INTERIEUR

P = 0.00	NIVEAU = 0	0.93884	0.00000
P = 24.00	NIVEAU = 1	0.38396	-2.29094
P = 12.00	NIVEAU = 2	0.30198	-1.07297
P = 8.00	NIVEAU = 3	0.26709	-0.73347
P = 6.00	NIVEAU = 4	0.24204	-0.57355
P = 4.80	NIVEAU = 5	0.22219	-0.47481

A TEMPERATURE INTERIEURE

P = 0.00	NIVEAU = 0	-0.35959	0.00000
P = 24.00	NIVEAU = 1	4.21367	-10.82442
P = 12.00	NIVEAU = 2	4.47831	-8.69184
P = 8.00	NIVEAU = 3	4.54245	-3.74398
P = 6.00	NIVEAU = 4	4.77411	-2.88834
P = 4.80	NIVEAU = 5	4.87755	-2.26037

DETERMINATION AUTOMATIQUE DES FLUX SOLAIRES

PRISE EN COMPTE DES MASQUES ET PAROIS VITREES

La prise en compte du calcul des flux solaires sur l'enveloppe du bâtiment et les ambiances intérieures constitue une tâche délicate et longue à réaliser dès lors qu'on recherche une certaine précision. Elle alourdit actuellement considérablement la phase préparatoire de la modélisation thermique du bâtiment et de la définition des sollicitations. Chaque simulation, pour un type de temps donné, induit en effet un calcul des sollicitations en flux solaires sur les différentes parois et, par le fait même, la détermination des masques et des taches lumineuses intérieures correspondant à chacune des parois des différents locaux.

En raison de l'incidence des apports solaires sur le comportement thermique du bâtiment, soit par l'intermédiaire des baies vitrées, soit par des dispositifs spécifiques de récupération de l'énergie solaire, un traitement automatique d'évaluation des flux solaires a donc été entrepris. La méthode de résolution utilisée repose à la fois, sur des procédures courantes en visualisation graphique informatisée et en traitement d'images (intersection de polygones, algorithmes de remplissage, détermination des parties vues et cachées) pour ce qui concerne la détermination des parois ensoleillées, et, sur des programmes d'ensoleillement déjà opérationnels au CERMA pour les questions liées au contrôle de l'ensoleillement (programmes PROSOL et PROHEL) et au calcul des flux solaires.

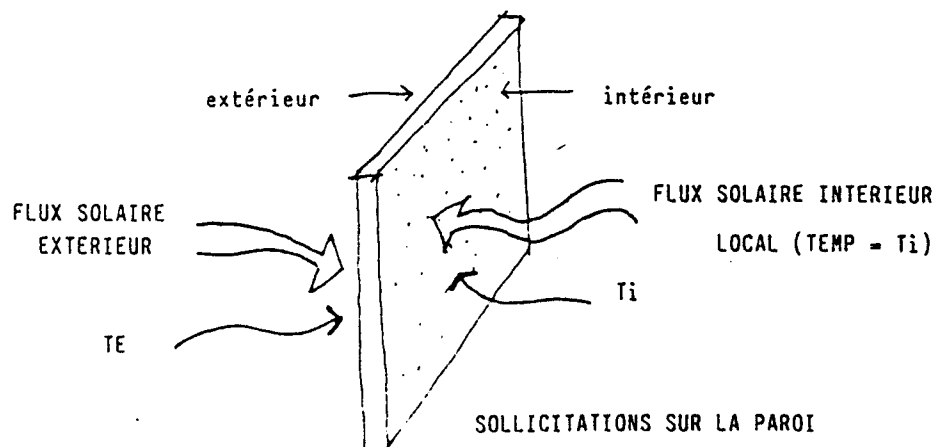
Nous présentons ici le processus de résolution et les algorithmes de traitement mis en oeuvre pour gérer automatiquement la phase de détermination des flux solaires (directs, diffus et réfléchis) sur les parois d'un bâtiment. Quelques exemples illustrent l'utilisation du logiciel TACHE développé pour traiter ce problème.

1 - DETERMINATION DES FLUX SOLAIRES

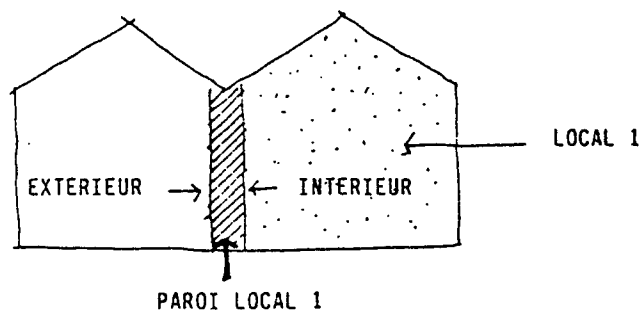
Parmi l'ensemble des sollicitations à déterminer pour les parois, celles qui concernent les flux solaires intérieurs et extérieurs sont les plus délicates à appréhender. Elles jouent pourtant, dans certaines configurations, un rôle important dans la bilan thermique résultant du local. La difficulté à définir ces flux provient, à la fois :

- d'une analyse préalable des masques (pour les flux extérieurs) et des taches lumineuses (pour les flux intérieurs) sur les parois du local ; la répartition des taches est variable au cours d'une même journée, d'une saison à l'autre ;
- des facteurs de transmission des vitrages variables avec l'angle d'incidence des rayons solaires, fonctions du type de vitrage ;
- des phénomènes de réflexion ; les flux non absorbés par les parois irradiées sont réémis dans le local. Dans le cas de parois réfléchissantes (couleur claire), la proportion de flux réfléchi peut devenir prépondérante et doit donc être prise en compte.

Au niveau du logiciel SIMULA, chaque paroi est définie par ses caractéristiques thermiques et ses sollicitations en flux, et en température sur ses deux faces.



Connaissant la surface de la paroi (homogène quant à ses sollicitations) et ses coefficients de réponse aux différents types de sollicitations, on peut ainsi déterminer le flux échangé vers l'ambiance intérieure du local. La notion d'intérieur et d'extérieur pour la paroi n'est appréhendée, ici, que par rapport au local considéré.

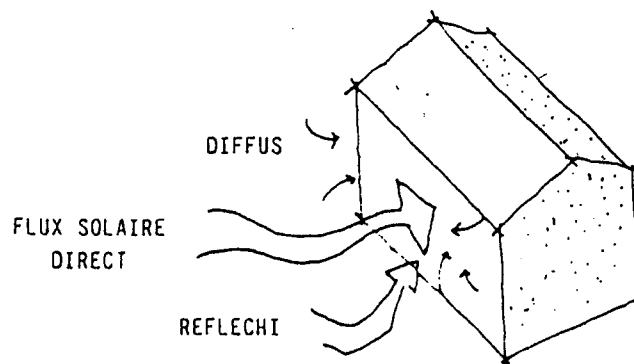


Le problème posé est alors de déterminer, pour chaque paroi de chaque local, ses sollicitations en flux sur ses deux faces, intérieure et extérieure.

On peut distinguer deux cas élémentaires :

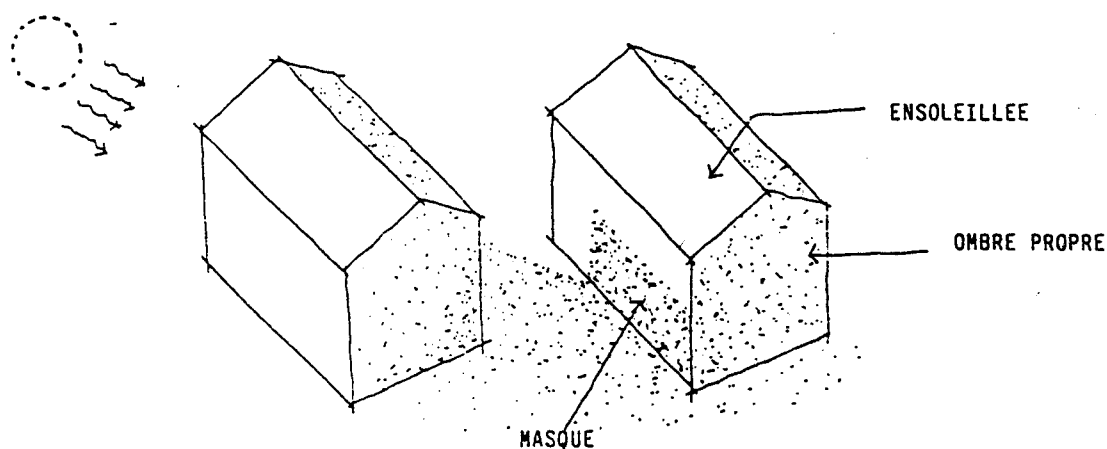
a) La paroi reçoit le flux solaire directement ; sa face est alors directement en contact avec l'ambiance extérieure (mur enveloppe, toit ...).

Le flux global reçu est la somme du flux solaire direct, du flux diffus (provenant de la voûte du ciel) et du flux réfléchi (généralement le sol, caractérisé par son albédo).



On peut utiliser directement les données météorologiques ou effectuer, par les méthodes existantes, un calcul du flux solaire incident en W/m^2 .

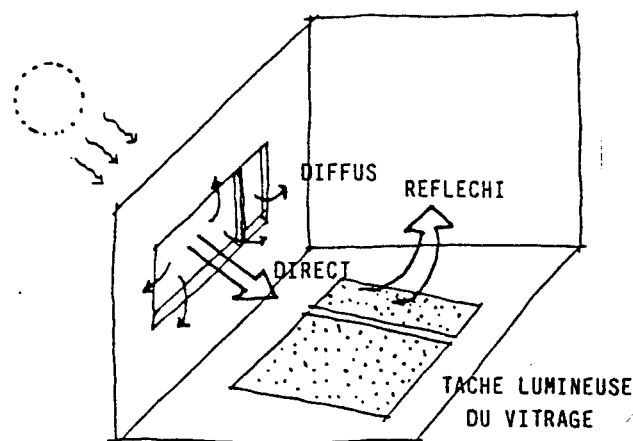
Cependant, tout ou partie de la paroi peut être masqué du soleil par les obstacles voisins (relief, bâtiment, auvent,...)



On utilise généralement un coefficient de masque pour la paroi qui a pour effet de réduire la valeur du flux solaire direct par unité de surface, les flux diffus et réfléchi étant considérés comme inchangés. Il suffit alors de déterminer la proportion éclairée de la paroi, donc d'évaluer, au cours du temps, la surface du masque, en projection sur la paroi.

Cette façon de procéder introduit une légère erreur quand on s'intéresse effectivement aux températures de surface de paroi ; en effet, celle-ci n'est plus homogène vis-à-vis des sollicitations. Cependant, l'approximation, en considérant le flux réparti sur l'ensemble de la paroi, est tout à fait acceptable, si on cherche à connaître les flux échangés globalement par la paroi.

b) La paroi reçoit le flux, après traversée d'un vitrage ; le flux reçu par la paroi est la somme du flux direct transmis par le vitrage (correspondant à la tache lumineuse de la vitre sur la paroi), du flux diffus transmis par le vitrage et des flux réfléchis par les autres parois du local.



Pour déterminer le flux direct reçu par la paroi, il suffit, comme dans le cas précédent pour le masque, de calculer la surface de la tache lumineuse produite sur la paroi et d'établir un coefficient d'éclairement de la paroi. Le flux direct incident est, en outre, réduit du facteur de transmission du vitrage, à l'instant du calcul (fonction de l'angle d'incidence des rayons solaires et des caractéristiques du vitrage).

Pour les flux diffus et réfléchis à l'intérieur des pièces, nous ferons l'approximation suivante :

- le flux diffus transmis par le vitrage sera réparti sur l'ensemble des parois du local appartenant au vitrage ; la répartition étant réalisée à partir des surfaces et des coefficients d'absorption de chacune des parois ;
- les flux réfléchis sont liés aux taches lumineuses ; chaque paroi ensoleillée par les vitrages absorbe une part du rayonnement, fonction de son coefficient d'absorption solaire, et réémet le reste vers les autres parois du local. Nous supposons que l'ensemble des rayonnements réémis est réparti, en une seule réflexion, vers les autres parois du local, dans le rapport des surfaces et des coefficients d'absorption des parois.

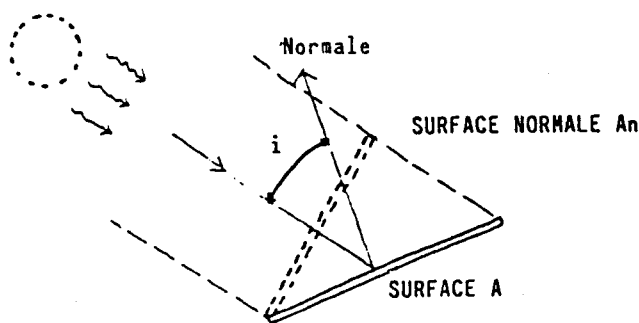
Les deux cas élémentaires présentés ci-dessus mettent en évidence la difficulté à déterminer manuellement, par des procédures graphiques, les flux directs, en tenant compte des masques et des taches lumineuses. Des cas plus complexes sont d'ailleurs à envisager : masque devant un vitrage, tache lumineuse d'un vitrage répartie sur plusieurs parois, rayonnement direct sur une paroi, après traversée de plusieurs vitrages, ... Nous mettrons donc l'accent, dans la suite de la présentation, sur la procédure de résolution automatique, retenue pour le calcul des flux solaires directs sur les parois.

2 - CALCUL AUTOMATIQUE DES FLUX DIRECTS

Si S_n est le flux direct normal, par unité de surface, à un instant donné, pour un lieu donné, alors le flux direct incident sur la paroi S_p est :

$$S_p = S_n \times \cos i \quad (\text{W/m}^2)$$

i étant l'angle d'incidence entre la normale à la paroi et la direction du rayon solaire.



Pour connaître le flux total direct incident sur une paroi, il suffit donc de déterminer sa surface normale A_n aux rayons solaires :

$$\text{Flux direct incident} = \text{Flux direct normal/m}^2 \times \text{Surface normale Paroi}$$

La Projection "Héliodon"

On peut réaliser graphiquement, sur écran ou machine à dessiner, une représentation des objets tels qu'ils sont vus par le soleil, en un lieu et un instant déterminés. La visualisation est alors une vue axonométrique (le soleil étant considéré à l'infini et les rayons parallèles) qui restitue les plans des objets directement ensoleillés ; le plan de projection est perpendiculaire aux rayons solaires.

Le programme HEL, mis au point au C.E.R.M.A., constitue ainsi une aide intéressante aux analyses préliminaires, nécessaires à la simulation thermique du bâtiment, telles que :

- l'évaluation des masques proches ou lointains sur les différentes parois du bâtiment,
- l'analyse de la répartition des taches lumineuses pénétrant par les vitrages à l'intérieur des locaux.

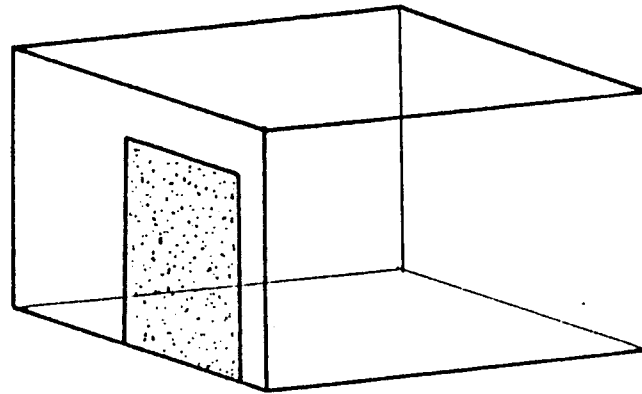
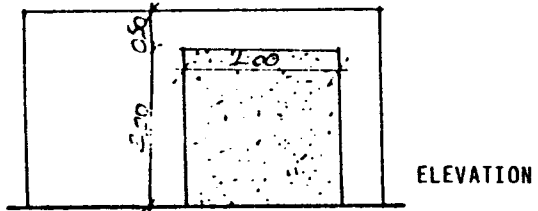
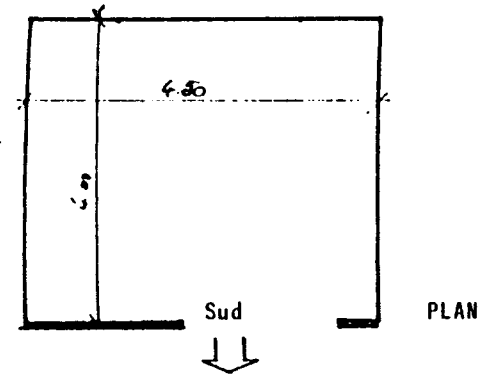
Utilisant l'image comme support d'information, on peut envisager un traitement automatique pour évaluer les flux solaires, puisque l'image permet de calculer précisément les surfaces normales de chacune des parois aux rayons solaires. Dans une procédure automatisée, il est cependant nécessaire

- d'être capable d'identifier chacune des parois,
- de reconnaître les parois vues par le soleil, en totalité ou en partie (problème de masque),
- de traiter les parois vitrées comme des parois permettant le passage du soleil,
- de calculer les surfaces normales vues par le soleil, pour chacune des parois
- d'évaluer le flux direct incident reçu par les parois vues, en tenant compte des facteurs de transmission des vitrages quand il y a lieu.

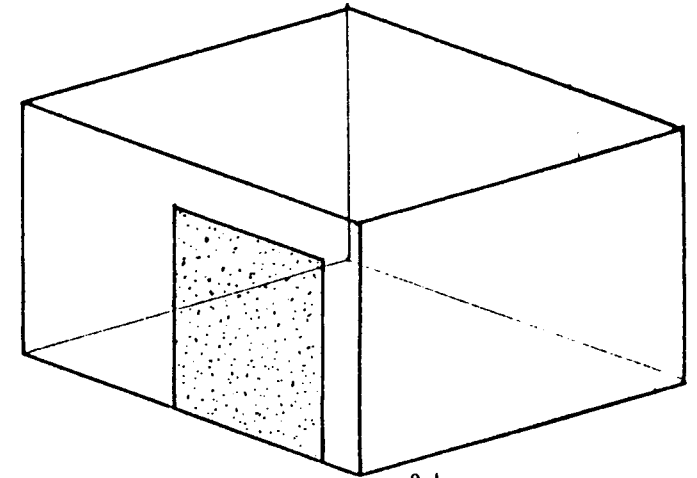
Les techniques de résolution que nous avons retenues s'inspirent des méthodes de traitement en visualisation graphique automatique, utilisées pour produire des images sur des écrans type vidéo. Examinons chacune d'elles successivement

SORTIE GRAPHIQUE DU LOGICIEL PROHEL (OBJETS VUS PAR LE SOLEIL)

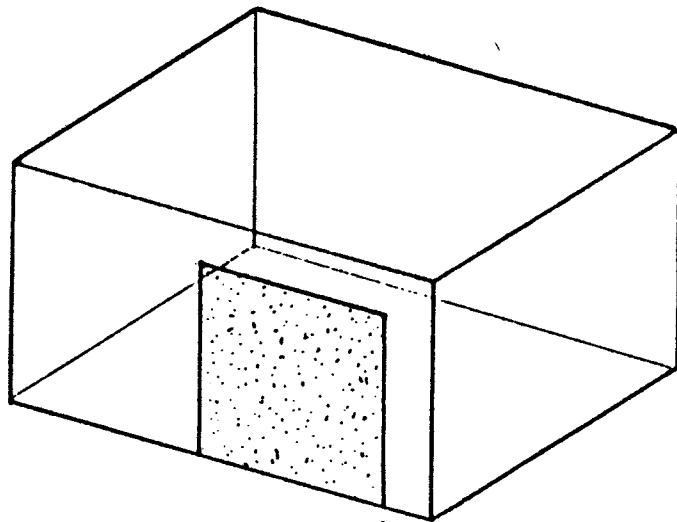
20 FEVRIER - Latitude 47° N



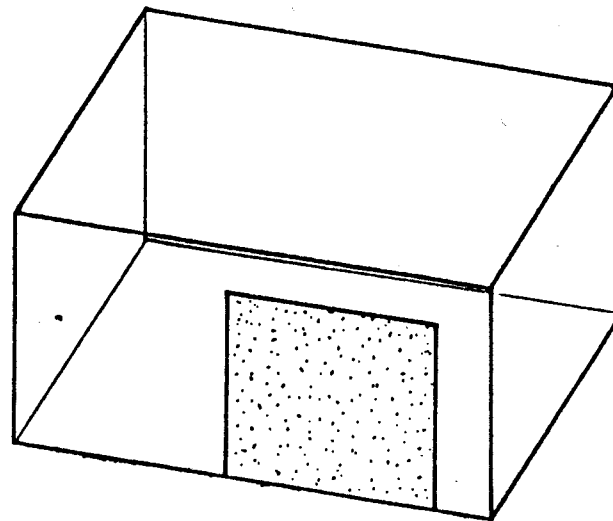
8 h



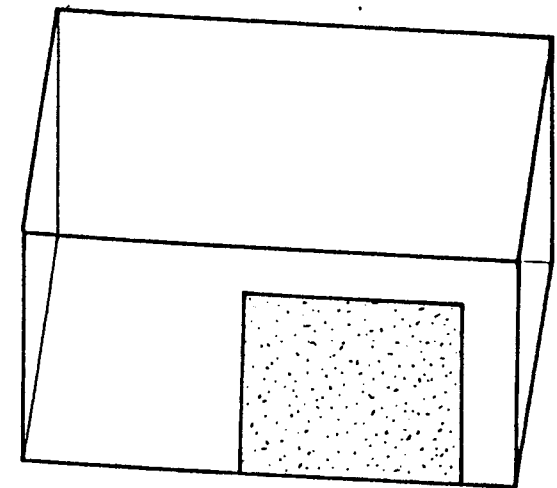
9 h



10 h



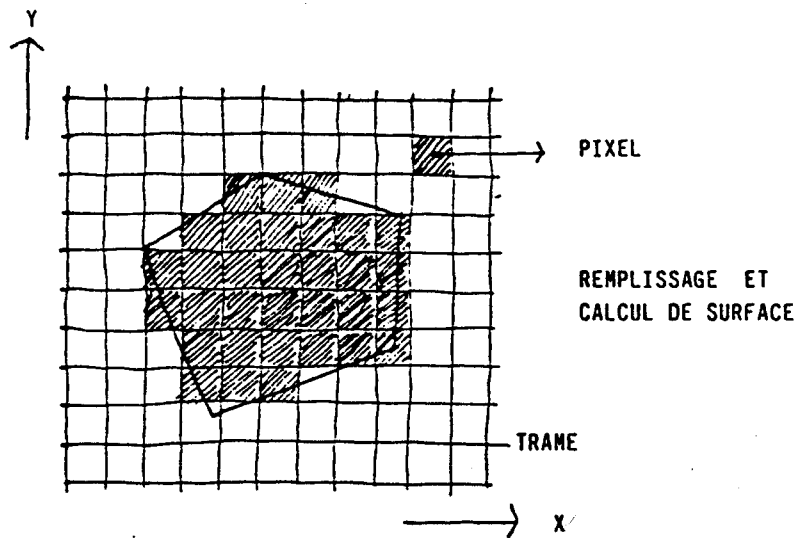
11 h



11 h 45

3 - CALCUL DE SURFACE

Pour calculer la surface d'un polygone fermé, connaissant sa projection dans le plan de visualisation choisi, on peut superposer au polygone une trame carrée, suffisamment fine, et totaliser le nombre d'éléments de trame contenus dans la face. La surface du polygone est alors le nombre d'éléments comptés, multiplié par la surface d'un élément de la trame.



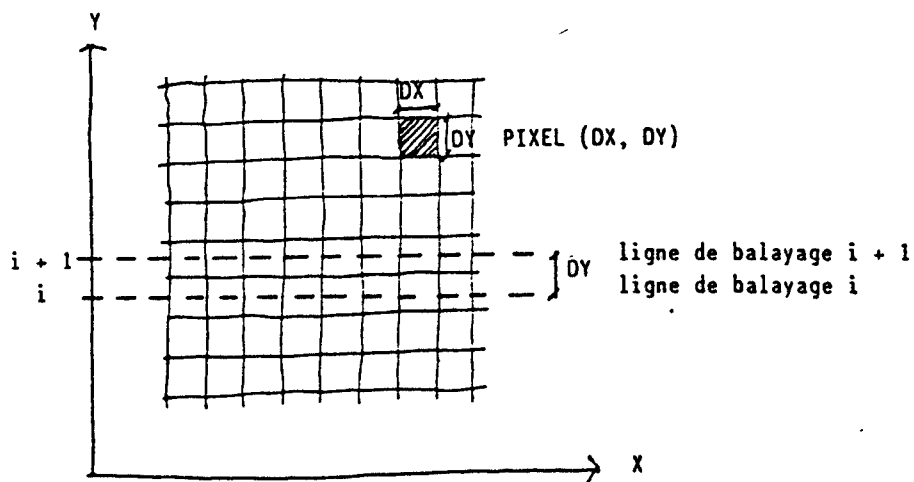
La précision du calcul est fonction des dimensions de l'élément de trame. En traitement d'images, un élément de trame est appelé "PIXEL".

Pour déterminer les pixels contenus dans la polygone, on utilise une technique de remplissage.

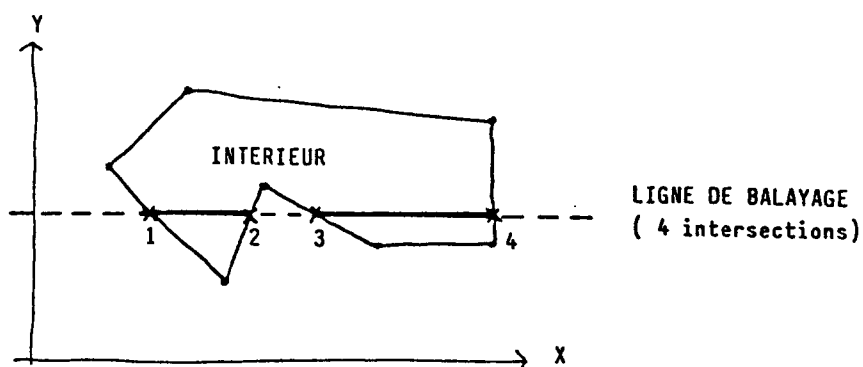
4 - REPLISSAGE D'UN POLYGONE PLAN

Le remplissage consiste à établir, sur chaque ligne de balayage (horizontale par exemple) les pixels intérieurs au polygone.

La ligne de balayage passe par le centre des pixels, chaque ligne étant séparée de la dimension d'un pixel, soit Dy .

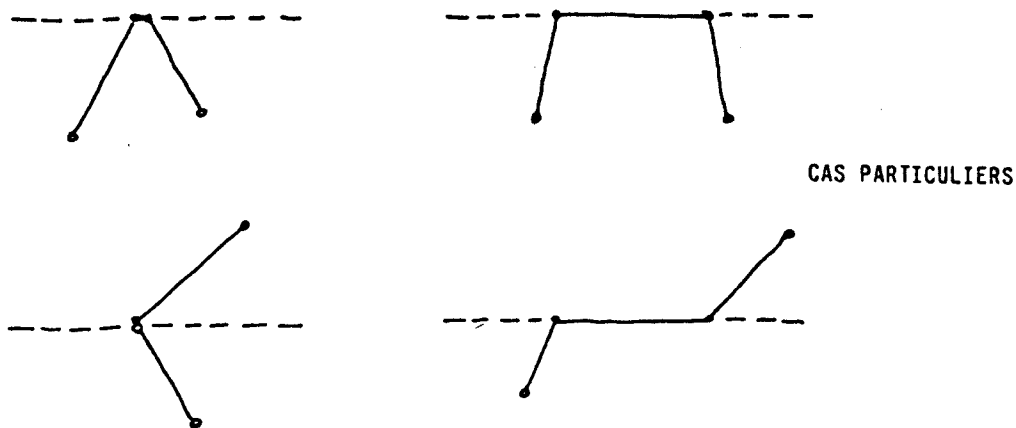


Supposons la face définie par son contour polygonal fermé. Pour chaque ligne de balayage, on détermine la (ou les) partie(s) de la ligne intérieure au polygone.



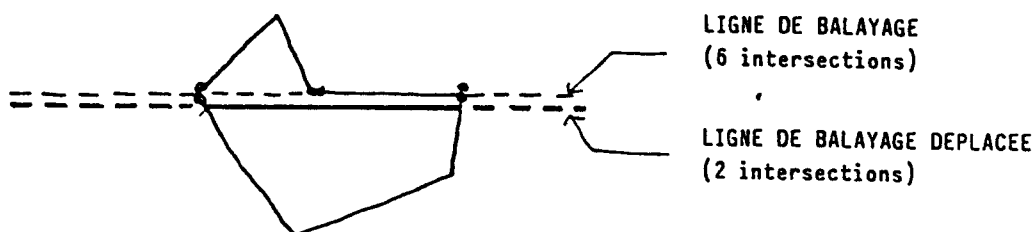
On calcule alors les différentes intersections de la ligne avec les arêtes du polygone. Pour un polygone fermé, le nombre d'intersections est toujours pair. On trie ensuite les intersections suivant x en ordre croissant, et, à partir des valeurs d'intersections prises en séquence deux à deux, on obtient les bornes inférieures et supérieures successives de remplissage du polygone sur la ligne de balayage.

Un certain nombre de cas particuliers amènent à gérer de façon spécifique les intersections trouvées ; ils correspondent aux cas où la ligne de balayage passe par un point, extrémité d'une arête du polygone ou par une arête du polygone :

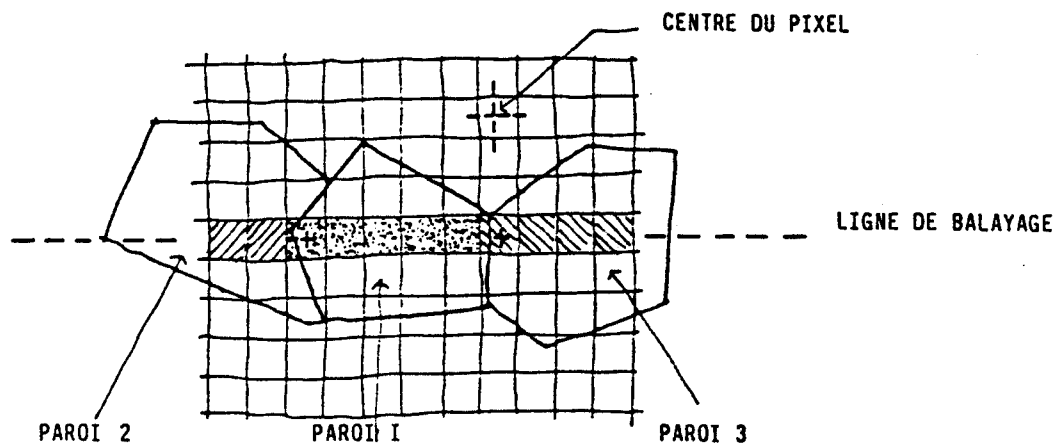


Il est alors nécessaire de compter certaines intersections deux fois ou d'en éliminer. On peut résoudre ces cas particuliers en examinant la position des arêtes, précédant et suivant l'intersection, par rapport à la ligne de balayage.

On peut également lever les ambiguïtés en évitant de trouver une intersection confondue avec un point extrémité d'une arête du polygone. Dans une telle situation, il suffit de déplacer légèrement la ligne de balayage.



Connaissant les bornes en x des intersections sur la ligne de balayage, on place les pixels correspondant au remplissage. Pour éviter les problèmes de jonction entre faces (arêtes mitoyennes entre deux polygones), on effectue le remplissage de façon qu'aux extrémités du remplissage, le centre du pixel soit à l'intérieur du polygone. Ainsi, un pixel n'appartient qu'à une seule face.



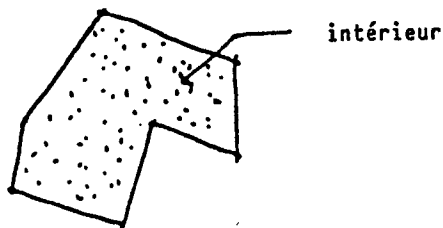
Procédure de remplissage d'un polygone

- Faire varier la ligne de balayage entre YMIN et YMAX du polygone par pas Dy d'un pixel
- initialiser le nombre d'intersections à 0 pour la ligne
- pour chaque arête du polygone, chercher l'intersection avec la ligne de balayage ; si l'intersection existe, stocker la valeur x de l'intersection et incrémenter de 1 le nombre d'intersections
- trier la liste des intersections obtenues par ordre croissant
- attribuer les pixels correspondants du remplissage entre les intersections triées, prises deux à deux ; aux bornes inférieure et supérieure de remplissage, vérifier que le pixel appartient à la face
- FIN

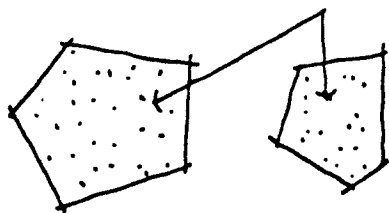
Pour calculer la surface du polygone, on cumule le nombre de pixels attribués lors du remplissage sur chacune des lignes de balayage.

5 - MODELISATION GEOMETRIQUE DU BATIMENT

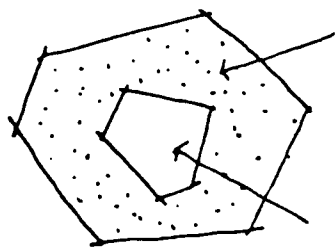
Le bâtiment ou les locaux composant le bâtiment sont définis par les parois. Chaque paroi, identifiée, est constituée d'un ou plusieurs contours polygonaux fermés, quelconques, mais non croisés et disjoints, pour lesquels la notion d'intérieur est parfaitement établie.



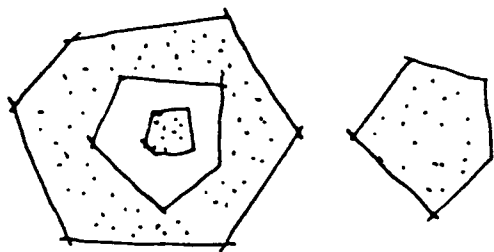
PAROI COMPOSEE D'UN SEUL CONTOUR POLYGONAL



PAROI COMPOSEE DE 2 CONTOURS POLYGONAUX

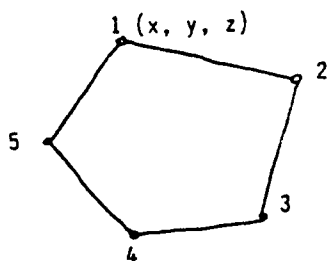


PAROI CONSTITUEE DE 2 CONTOURS POLYGONAUX,
L'UN ENGLOBALANT L'AUTRE
(NOTION DE PERCEMENT)



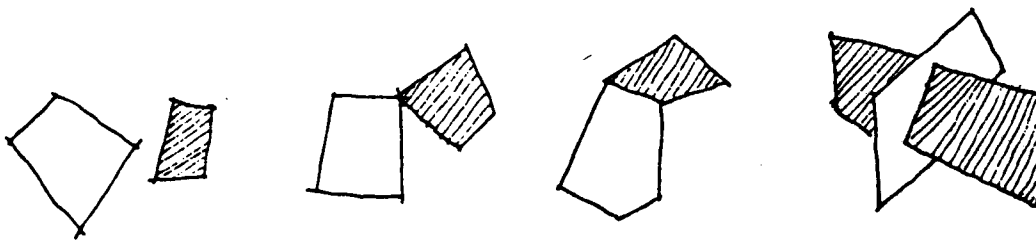
CAS GENERAL

Chaque contour polygonal est défini par un circuit de points caractérisés par leurs coordonnées x, y, z .



CONTOUR FERME DE POINTS

Une paroi peut être opaque ou vitrée (attribut de la paroi). Les parois peuvent être disjointes, avoir un ou plusieurs points communs, avoir des arêtes communes ou même s'intersecter :



SITUATION DES PAROIS LES UNES PAR RAPPORT AUX AUTRES

Pour chaque paroi, on retient le nombre de points composant l'ensemble des polygones ; les coordonnées du dernier point de chaque polygone sont égales à celles du premier point (fermeture du polygone) ; les différents polygones constituant la paroi sont séparés par des coordonnées fictives, égales à - 999.999.

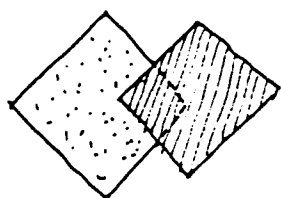
Les coordonnées objet x, y, z des différentes parois sont transformées en coordonnées image X, Y , après projection axonométrique à partir d'une position du soleil.

On obtient alors la projection normale de chaque paroi (en XOY) par rapport à la direction des rayons solaires, à l'instant choisi.

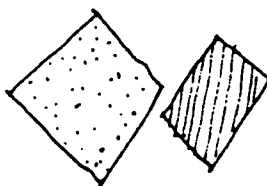
Les masques lointains ou proches sont également définis sous forme de parois, avec contours polygonaux. Ils n'interviennent que pour le calcul des flux solaires directs et non dans la simulation thermique proprement dite.

6 - PAROIS VUES ET CACHEES : CAS DES PAROIS OPAQUES

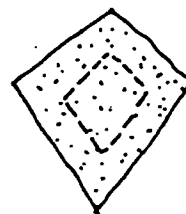
En projection "Héliodon", les différentes parois du local et obstacles environnants peuvent se recouvrir. Il s'agit de déterminer celles qui sont vues, donc d'éliminer les parties cachées. Toutes les configurations de recouvrement sont possibles entre les parois.



RECouvreMENT PARTIEL



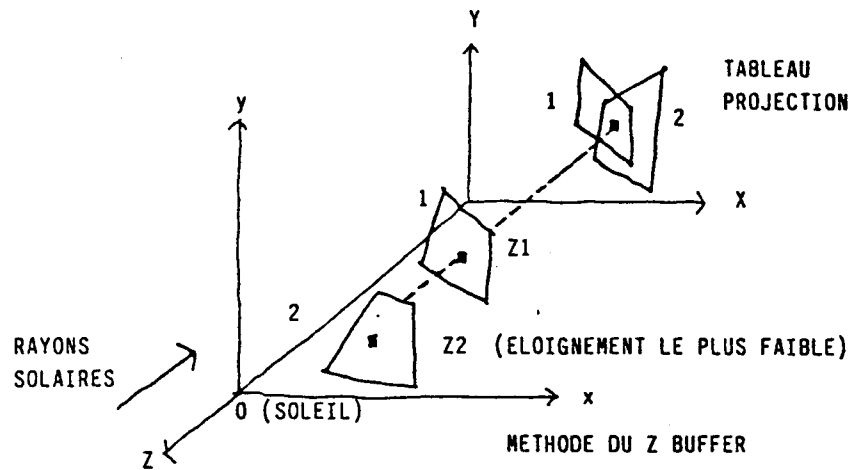
DISJOINT



RECouvreMENT TOTAL

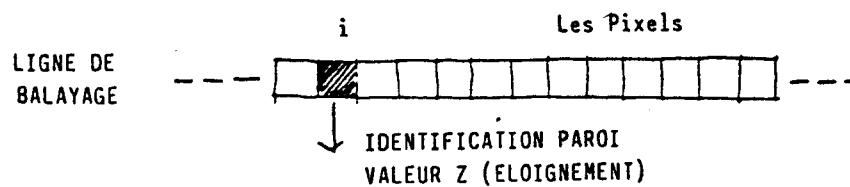
La résolution des parties cachées utilise la méthode dite du "Z BUFFER". Etant donné un point en projection, appartenant à deux faces différentes, la face vue est celle pour laquelle l'éloignement du point, rapporté dans l'espace sur la face, est le plus faible par rapport à l'observateur (dans ce cas, le soleil).

Supposons 0 le soleil et l'axe Z négatif la direction des rayons du soleil, la paroi, pour laquelle le Z objet du point est le plus grand, est vue.



En raisonnant au niveau du pixel, la solution est immédiate, si on retient pour chaque pixel affiché (par remplissage de la paroi) l'identification de la face à laquelle il appartient, et la valeur d'éloignement par rapport à l'observateur. Dans le cas de superposition (recouvrement d'un pixel), on attribue au pixel l'identification de la paroi ayant le moindre éloignement.

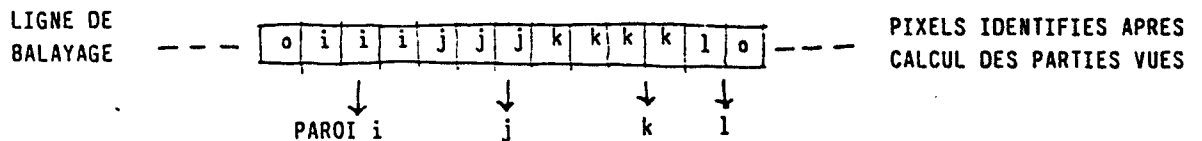
Pour des raisons d'occupation en mémoire, le traitement s'effectue pour l'ensemble des parois opaques, au niveau d'une ligne de balayage. Chaque pixel de la ligne est initialisé à un éloignement très grand (valeur Z très petite) et attribué à une paroi d'identification (0) correspondant au fond de l'image.



Chacune des parois du bâtiment et chacun des masques sont ensuite examinés successivement, pour la ligne de balayage en cours. Suivant les intersections du contour polygonal de chaque paroi, on effectue le remplissage de la paroi en déterminant, pour chaque pixel, son éloignement par rapport au soleil. Deux cas peuvent se présenter :

- l'éloignement du pixel est plus faible que le pixel actuellement placé sur la ligne de balayage en mémoire ; on modifie l'éloignement du pixel et on retient, pour celui-ci, l'identification de la paroi correspondante.
- l'éloignement est plus grand ; on ne modifie rien et on poursuit le remplissage.

Lorsque toutes les parois (bâtiment, masque) sont passées en revue, la ligne est composée des pixels des parois ou parties de parois vues par le soleil (donc recevant un rayonnement direct). Les surfaces sont alors calculées sur la ligne en cumulant les pixels associés aux parois.



Nota : - En raison des contraintes imposées précédemment sur le remplissage (le centre d'un pixel doit être à l'intérieur de la paroi), il n'y a aucune ambiguïté sur l'évaluation du Z, donc sur l'appartenance d'un pixel à une paroi (pour autant qu'il n'y ait pas de recouvrement des parois dans le même plan)

- Après transformation des objets pour une position du soleil donnée, on détermine les équations des plans des parois et les valeurs extrêmes de la fenêtre, image de visualisation.

Dans le cas de parois opaques seules, le résultat du traitement permet, à partir des surfaces normales, de calculer les flux normaux reçus au niveau des parois. Pour la paroi i , de surface normale A_i , on aurait :

$$\text{Flux direct pour Paroi } i = A_i \times S_n$$

S_n étant le flux solaire direct normal.

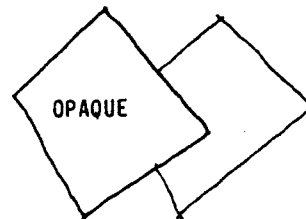
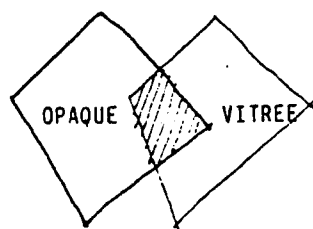
Pour une date et une heure données, les différents A_i sont connus ; on peut donc faire varier la valeur de S_n pour tenir compte de conditions d'ensoleillement variables, sans exécuter à nouveau le traitement.

7 - CAS DES PAROIS VITREES

Les parois vitrées entraînent un traitement supplémentaire, puisqu'il est nécessaire de connaître, d'une part, le flux direct et diffus qu'elles reçoivent, d'autre part, l'affaiblissement énergétique qu'elles peuvent produire au niveau des parois opaques.

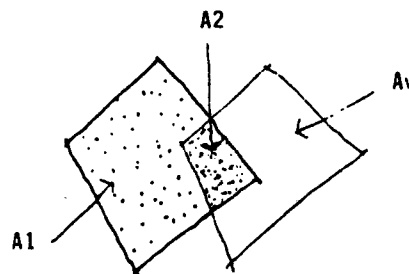
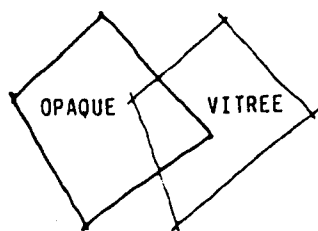
Les différents cas qui peuvent se présenter sont les suivants :

a) paroi vitrée recouverte par paroi opaque, correspondant au cas où le pixel d'un vitrage est masqué par une paroi ; il n'y a aucune incidence sur la paroi opaque et la paroi vitrée n'est représentée que dans ses parties vues.



VITRAGE DERRIERE
PAROI OPAQUE
(MASQUEE)

b) paroi vitrée recouvrant une paroi opaque ; la paroi opaque reçoit, pour une partie ou dans sa totalité, le flux solaire, après transmission par le vitrage.



VITRAGE DEVANT
PAROI OPAQUE
(VITRAGE ET PAROI OPAQUE VUS)

Dans ce cas, les parois opaque et vitrée sont, toutes les deux, vues.
Le flux solaire au niveau du vitrage est alors fonction de la surface normale du vitrage A_v . Pour la paroi opaque, on peut distinguer deux surfaces normales :

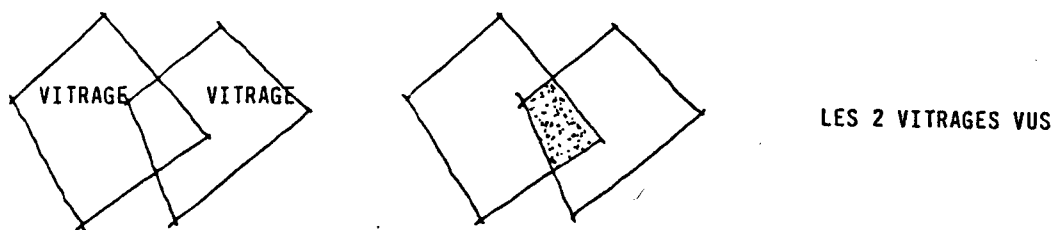
A_1 : surface sans affaiblissement du flux solaire

A_2 : surface recevant le flux solaire avec affaiblissement.

Si T_v est le taux de transmission solaire direct du vitrage, le flux solaire direct pour la paroi opaque est alors :

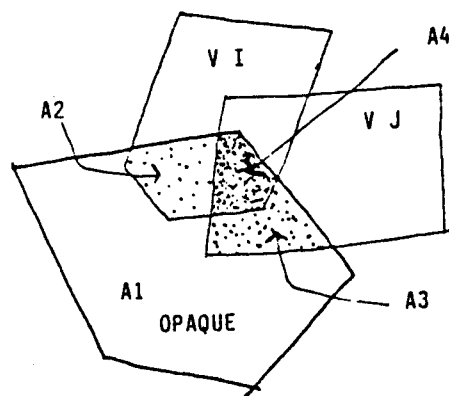
$$(A_1 + A_2 \times T_v) \times \text{Flux Normal Direct}$$

c) paroi vitrée recouverte par paroi vitrée ; le traitement est identique au précédent.



Le vitrage situé derrière subit un affaiblissement du flux. Il est nécessaire de considérer les surfaces normales homogènes vis-à-vis du rayonnement.

d) recouvrement d'une paroi opaque par plusieurs parois vitrées ; c'est le cas général à partir duquel le traitement a été réalisé.



Dans l'exemple illustré par le schéma, on isole, pour la paroi opaque, quatre zones :

- zone directement vue : A_1
- zone vue à travers le vitrage VI : A_2
- zone vue à travers le vitrage VJ : A_3
- zone vue au travers des vitrages VI et VJ : A_4

La surface normale de la paroi, pour le calcul du flux direct, est alors :

$$A_1 + A_2 \times TVI + A_3 \times TVJ + A_4 \times TVI \times TVJ$$

Pour les vitrages VI et VJ, on raisonnerait de la même façon, après détermination du vitrage placé devant.

En fait, le taux de transmission des vitrages revient à réduire la taille de surface du pixel à prendre en compte pour chaque paroi, après traitement des parties vues et cachées, sur chaque ligne de balayage. Si A_p est la surface normale du pixel, on utilisera pour une paroi la surface

A_p si la paroi est vue directement

$A_p \times TVI$ si la paroi est vue après traversée du vitrage VI

$A_p \times TVI \times TVJ$ si la paroi est vue après traversée de deux vitrages VI et VJ

...etc.

Pour ce faire, il est nécessaire de connaître, pour chaque pixel de la scène, le cheminement du rayon solaire parvenant sur celui-ci et d'être capable d'identifier le ou les vitrages rencontrés.

La résolution s'effectue en trois temps, au niveau de chaque ligne de balayage :

- traitement des parois opaques seules (tel que exposé en 6),
- traitement des parois vitrées,
- calcul des surfaces normales pour chaque paroi opaque et vitrée pour l'évaluation ultérieure des flux.

8 - TRAITEMENT DES PAROIS VITREES

On utilise le même principe de résolution que pour les parois opaques ; cependant, toutes les parois vitrées, même quand elles se superposent en projection, sont vues et doivent donc être représentées. Le traitement va donc gérer autant de plans d'affichage sur la ligne de balayage en cours que de recouvrements de vitrages rencontrés.

A l'initialisation, la ligne de balayage pour les parois vitrées est initialisée sur le premier plan : les pixels sont identifiés comme étant le fond de l'image et l'éloignement (Z) est fixé très grand.

Le nombre de "plan vitrage" est initialisé à 1.

Chaque vitrage est examiné ensuite un à un et le remplissage s'effectue sur la ligne de balayage. La procédure de résolution, pour chaque pixel de remplissage, est la suivante :

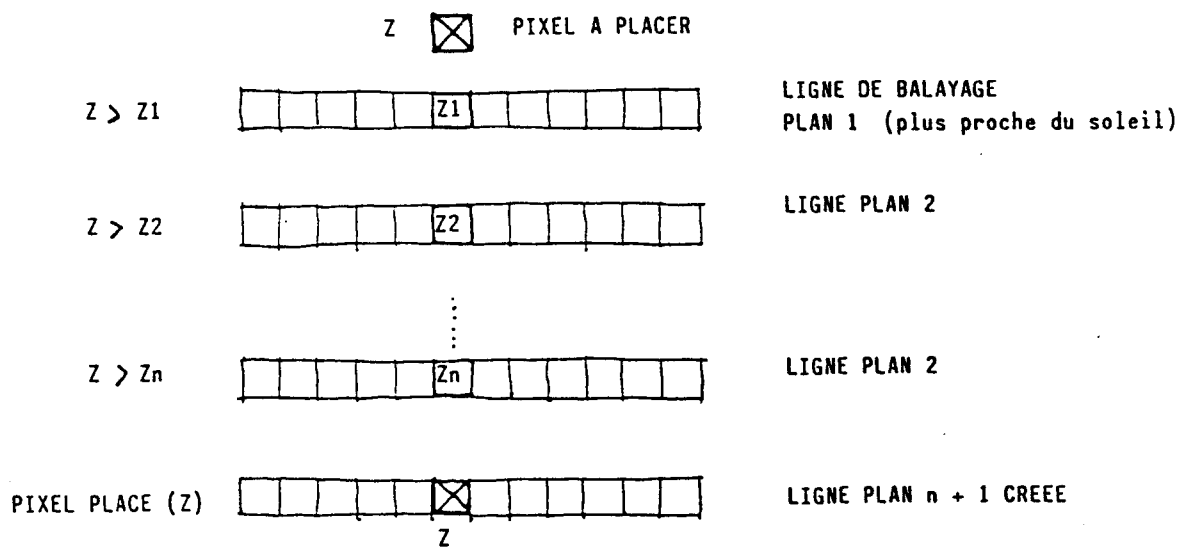
a) Test si le pixel de la paroi vitrée est vu, c'est à dire non masqué par une face opaque. On examine alors si l'éloignement du pixel correspondant sur la ligne de balayage (résolue) des parois opaques est plus faible que celui du vitrage :

- . si oui, le pixel vitrage n'est pas vu ; on examine le pixel suivant
- . si non, le pixel du vitrage est placé sur la ligne de balayage des parois vitrées comme suit :

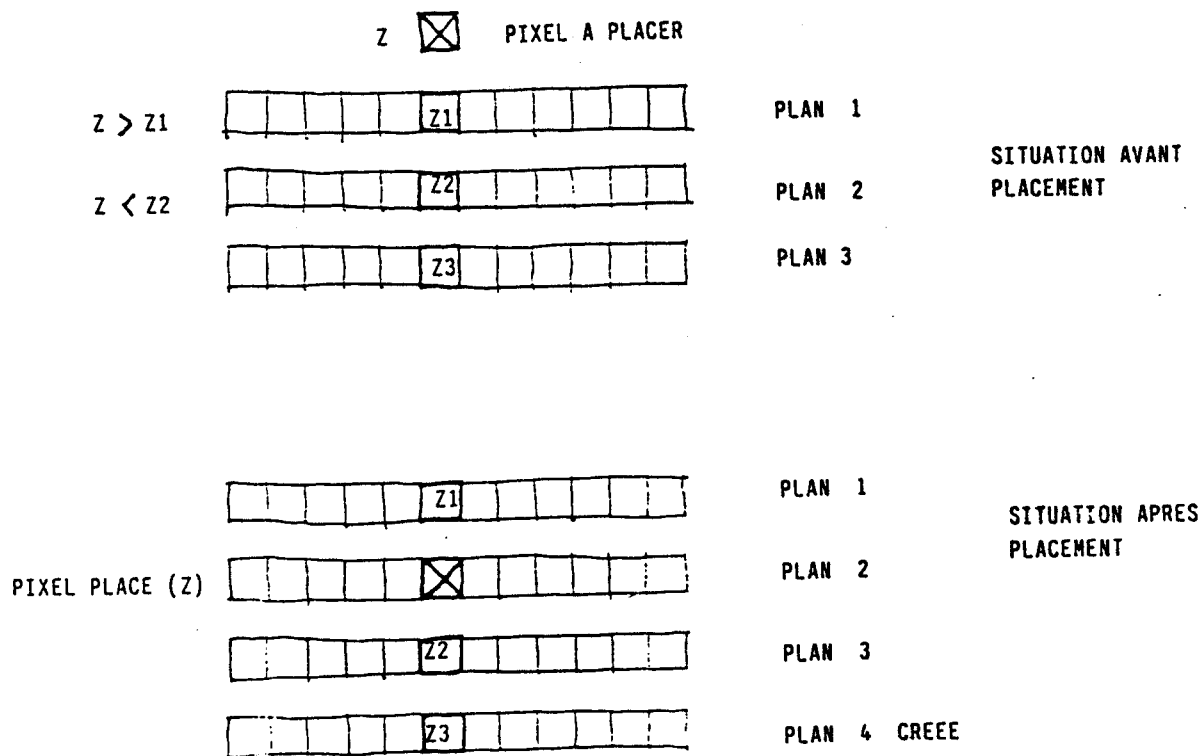
b) test du pixel vitrage par rapport au pixel vitrage déjà placé sur la ligne de balayage, sur les différents plans.

On procède alors à un examen par plan pour déterminer sur quel plan doit être positionné le pixel du vitrage.

On teste, sur chacun des plans existants, l'éloignement du pixel correspondant par rapport à l'éloignement du pixel à placer. Si l'éloignement du pixel à placer est plus grand, on examine le plan suivant et on recommence l'opération. Si le pixel n'a pu être placé sur aucun des plans existants, on crée un nouveau plan et on positionne le pixel avec identification du vitrage et son éloignement sur ce plan.



Dans le cas contraire, on trouve le plan sur lequel placer le pixel. Le pixel recouvert est alors déplacé et positionné, à son tour, sur un des plans de niveau supérieur, par la même méthode.



A l'issue du traitement des parois vitrées, on obtient sur chacun des plans (du plus proche au plus éloigné du soleil) les pixels correspondants aux vitrages vus du soleil, soit par exemple :

i	i	i	o	k	k	k	k	k	k	o	o
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

 PLAN 1

o	o	o	o	j	j	j	j	o	o	o	o
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

 PLAN 2 (j derrière k)

(o = fond)

o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

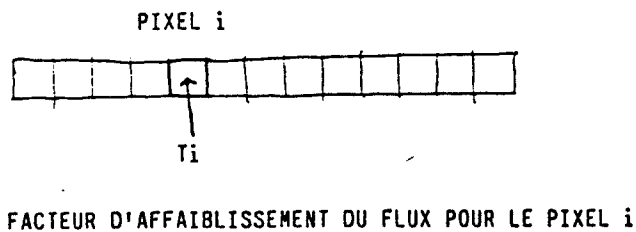
indiquant que le vitrage i est vu directement, comme le vitrage j, mais que le vitrage j reçoit le rayonnement solaire après traversée du vitrage k.

9 - CALCUL DES SURFACES NORMALES

Les surfaces normales corrigées des facteurs de transmission des vitrages sont calculées après traitement de chaque ligne de balayage et les résultats sont cumulés, pour les parois, sur l'ensemble des lignes de balayage.

Pour une ligne de balayage, on procède comme suit :

- on initialise à 1 l'ensemble des coefficients d'affaiblissement solaire dus à la traversée des vitrages, pour chacun des pixels de la ligne ;



- on met à jour la valeur des facteurs d'affaiblissement pour chacun des pixels, au fur et à mesure du calcul de surfaces des parois, en commençant par les parois vitrées ; ainsi :

. pour le premier plan des vitrages, le coefficient d'affaiblissement est 1 on cumule donc, pour chaque paroi vitrage, la surface des pixels associés à la paroi, soit : $A_p \times 1 \times$ nombre de pixels de la paroi.

On modifie, pour chaque pixel vitrage utilisé, la valeur du coefficient, en lui intégrant le coefficient de transmission du vitrage, soit $T_i \times 1$. Après traitement, les coefficients d'affaiblissement tiennent donc compte de la traversée d'un premier plan de vitrage.

. pour le second plan des vitrages, le coefficient du pixel i est alors T_i (qui peut être différent de 1) et la surface à prendre est $A_p \times T_i$. Le coefficient d'affaiblissement est ensuite réactualisé et devient $T_i = T_i \times T_v$ (T_v étant le facteur de transmission du vitrage pour le pixel considéré).

. on procède ainsi jusqu'au dernier plan des vitrages, obtenant pour chaque vitrage la surface normale corrigée pour le calcul des flux directs ; les flux diffus transmis par chaque vitrage seraient calculés de la même manière.

. on traite enfin le plan des faces opaques ; il suffit alors de multiplier chaque surface de pixel par le coefficient d'affaiblissement associé T_i , établi à l'issue du calcul de surface des parois vitrées.

10 - PROGRAMME "TACHE"

Un programme préliminaire a été établi en utilisant les procédures exposées précédemment. Il permet le calcul des surfaces normales aux rayons solaires, tenant compte des parties vues et cachées (masque) et des coefficients de transmission des vitrages (taches lumineuses).

Une sortie graphique, sur écran, permet de contrôler l'image obtenue. La taille du pixel est donnée par l'utilisateur ; une très bonne précision est obtenue avec un maillage de 10 x 10 cm.

Le programme se décompose en plusieurs modules :

a) Lecture des parois et des contours polygonaux ; attribution des caractéristiques de parois : opaque, vitrée et coefficient de transmission des vitrages ;

b) Définition de la visualisation héliodion : entrée de la latitude, date et heure, et calcul de la transformation à appliquer aux objets pour réaliser la projection axonométrique, à partir de la position du soleil ;

c) Préparation du traitement : transformation des coordonnées-objet, x, y, z , des parois en coordonnées-image, X, Y (vue axonométrique), calcul des extrêmes en X et Y pour chaque paroi et de l'équation normale de chacun des plans correspondants aux parois ;

d) Procédure de remplissage et calcul de surface :

- . Initialisation : taille du pixel, calcul de l'étendue de la fenêtre d'affichage en nombre de pixels ligne et nombre de lignes de balayage ; initialisation des surfaces des parois ;
- . Traitement pour chaque ligne de balayage
 - pour chaque paroi opaque, effectuer le remplissage pour les pixels vus, après calcul de l'éloignement ;
 - pour chaque paroi vitrée, réaliser, en tenant compte des recouvrements possibles des vitrages, le remplissage par pixels (un ou plusieurs plans peuvent être nécessaires) ;
 - à l'issue du traitement, on obtient la ligne de remplissage pour les parois opaques et les lignes pour les parois vitrées, dans les différents plans ;
 - calcul des surfaces normales corrigées des taux de transmission des vitrages, en traitant les vitrages plan par plan, puis les parois opaques ;
 - affichage sur écran (en option) de la ligne de balayage pour les parois opaques (affichage par pixel avec un code graphique de pixel par paroi, permettant son identification) ;
- . Impression des surfaces normales pour chacune des parois soumises au rayonnement solaire direct ; ces surfaces permettent le calcul immédiat du flux direct sur chaque paroi, connaissant la valeur du flux normal incident pour les conditions choisies d'ensoleillement et de site.

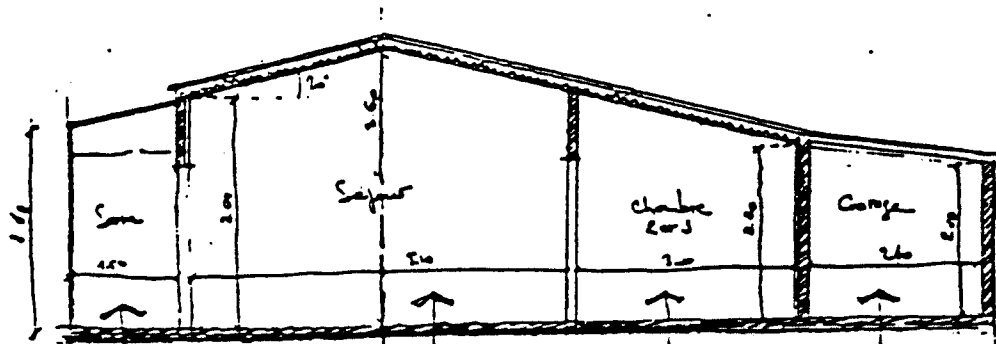
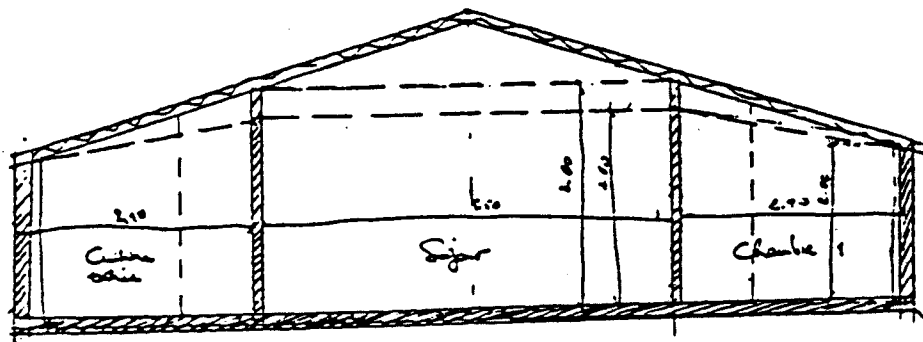
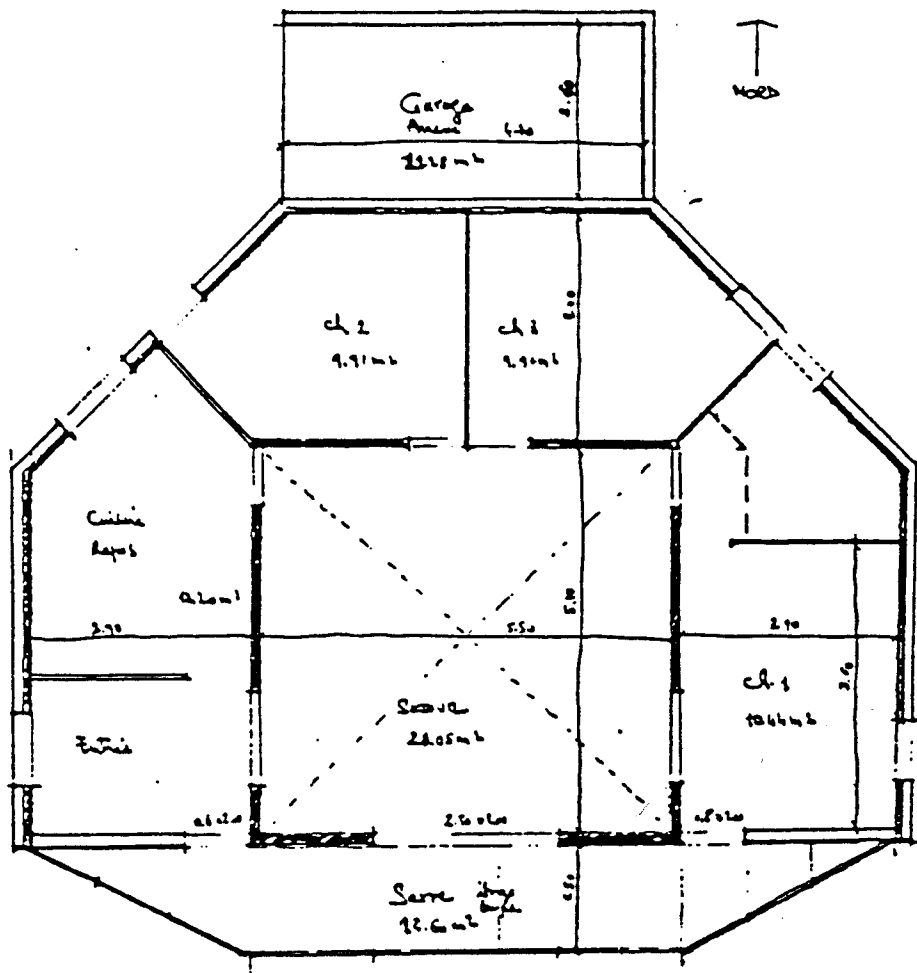
11 - EXEMPLE D'UTILISATION : CALCUL DES PAROIS ENSOLEILLEES ET DE LEUR SURFACE NORMALE DE RAYONNEMENT SOLAIRE

Le programme TACHE nécessite en entrée :

- la définition de tous les objets ayant une incidence sur l'ensoleillement ; chaque objet est défini géométriquement en trois dimensions par ses faces planes polygonales fermées (contour des points X, Y, Z).
- l'identification des faces transparentes (parois vitrées) et de leur coefficient de transmission sur rayonnement solaire direct ; ce dernier peut être variable en fonction de l'angle d'incidence entre la normale au vitrage et le rayon solaire.
- la détermination des conditions de simulation pour l'ensoleillement : latitude, date, heure.

En sortie, le programme indique pour chaque face plane polygonale (opaque ou transparente) la surface normale au rayon incident à l'instant de la simulation. Des sorties graphiques sur traceur de courbe ou écran peuvent également être fournies à titre d'illustration.

L'exemple que nous présentons correspond à un bâtiment proposé par J.L. CORDIER pour le concours "5000 maisons solaires". Ce projet a déjà fait l'objet de la démonstration du logiciel SIMULA dans la recherche précédente sur la présentation du logiciel de simulation thermique . Le projet est une maison individuelle, en rez-de-chaussée, caractérisée par une volumétrie compacte s'organisant autour d'un séjour central. Sur la façade Sud, se greffe une serre, tandis qu'au Nord, le garage constitue un espace tampon pour les pièces de nuit. Nous ne considérons le projet ici que sous l'angle de la répartition des flux solaires extérieurs et intérieurs.



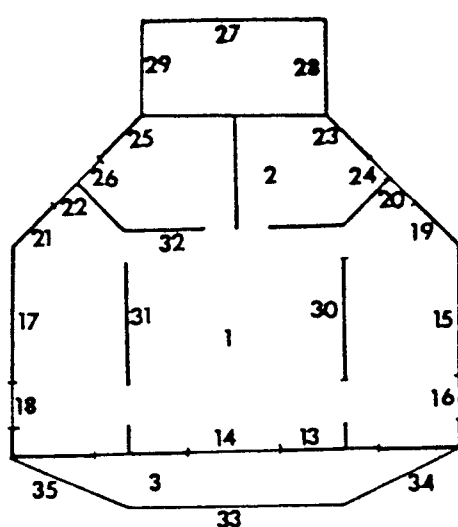
LOCAL N°3
SERRE

LOCAL N°1
HABITATION
JOUR

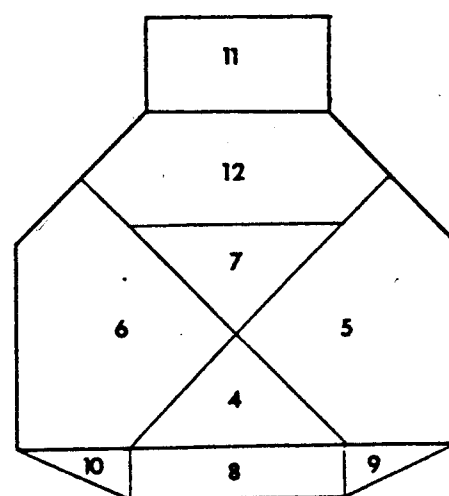
LOCAL N°2
CHAMBRES
NORD

LOCAL N°4
CACHES
NORD

Pour l'ensemble de la maison d'habitation, nous avons ainsi isolé 35 parois, pour lesquelles nous avons déterminé les coordonnées X, Y, Z des points des contours des plans polygonaux qui leur correspondent. Ce travail de modélisation géométrique peut apparaître comme une contrainte supplémentaire de la simulation thermique. En fait, dès qu'on s'attache à la résolution de problèmes d'ensoleillement et de traitement des masques, une définition géométrique simplifiée, voire complète, des objets s'avère nécessaire.



PAROIS VERTICALES



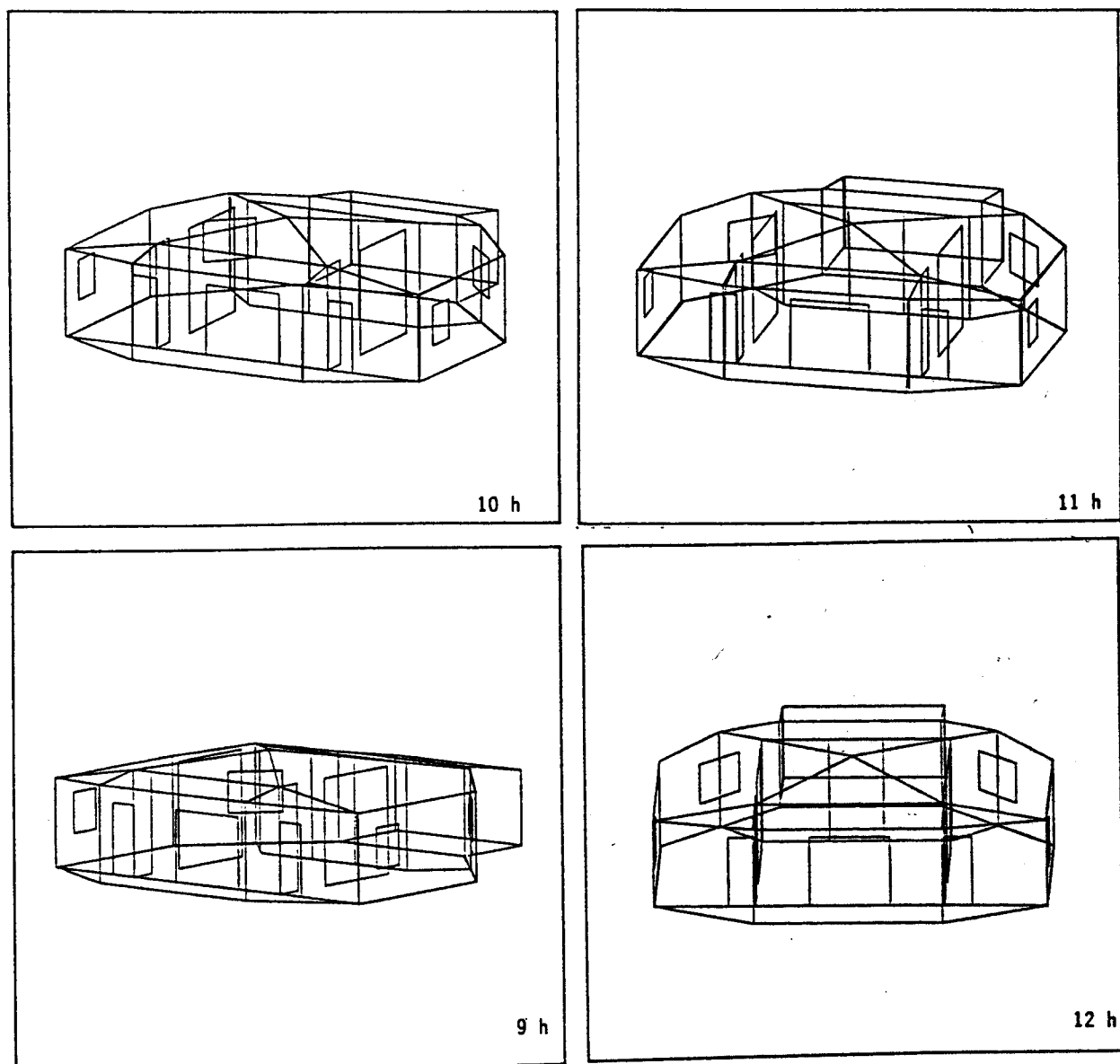
PAROIS DE TOITURE

Le tableau suivant identifie les différentes parois avec leur numéro d'identification (de 1 à 35) et leur code graphique de représentation (repérage sur les sorties graphiques par un caractère alpha-numérique).

A des fins de vérification, le coefficient de transmission au rayonnement solaire direct des vitrages a été pris égal à 1. On peut ainsi vérifier que la surface normale aux rayons solaires de chaque vitrage est égale à la somme des surfaces normales des parois irradiées à travers lui. On peut noter également que les parois ont été modélisées sans épaisseur et que le rayonnement direct peut parvenir sur l'une quelconque de ses faces. En donnant une normale à la face (ou seulement une orientation), on peut déterminer aisément quelle est la face ensoleillée en recherchant sa période d'insolation pour la journée considérée. Les ambiguïtés sont, de toutes façons, levées avec une représentation graphique.

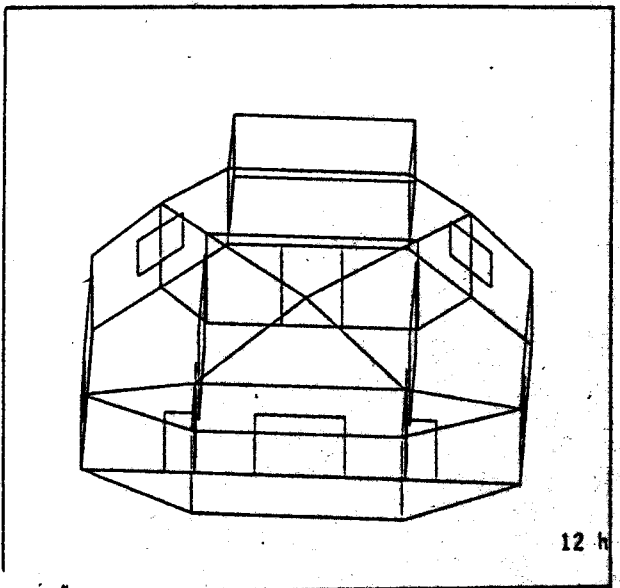
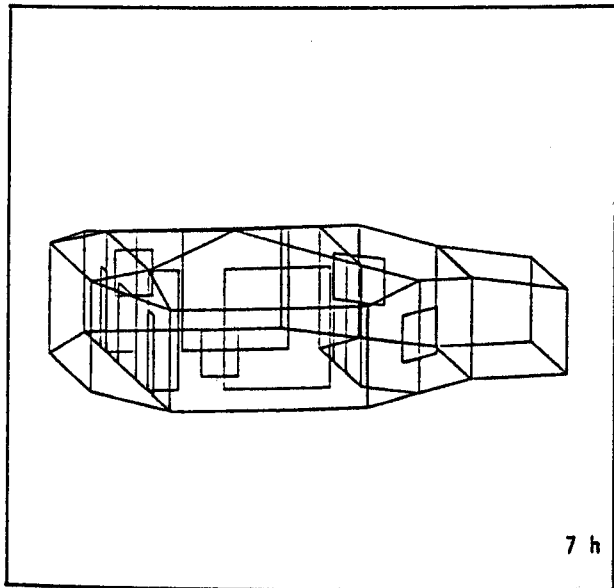
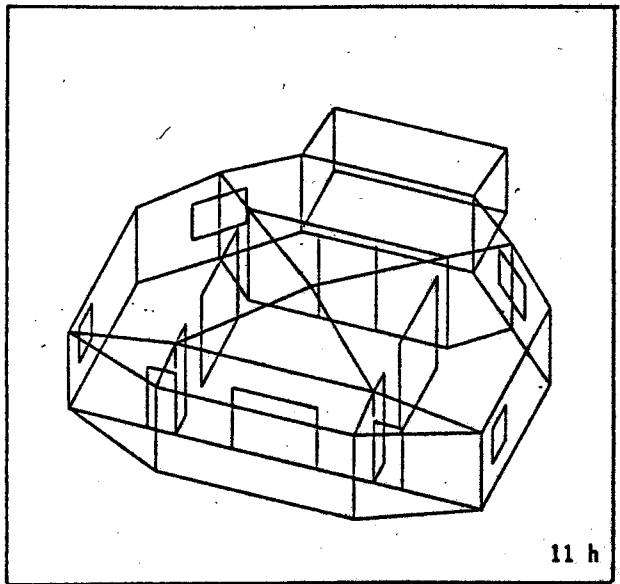
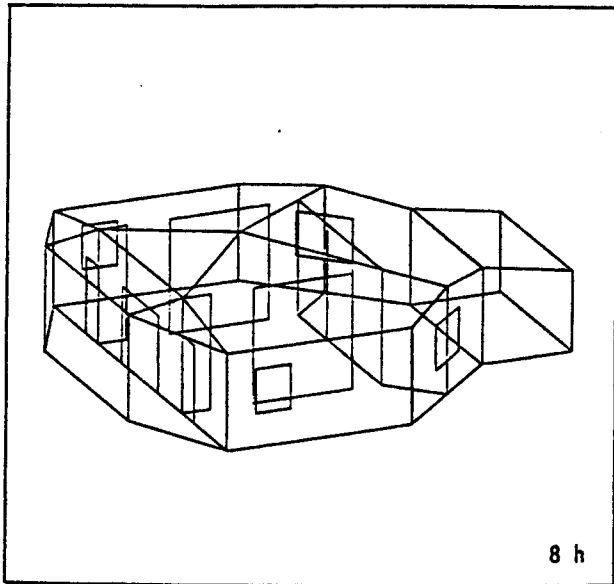
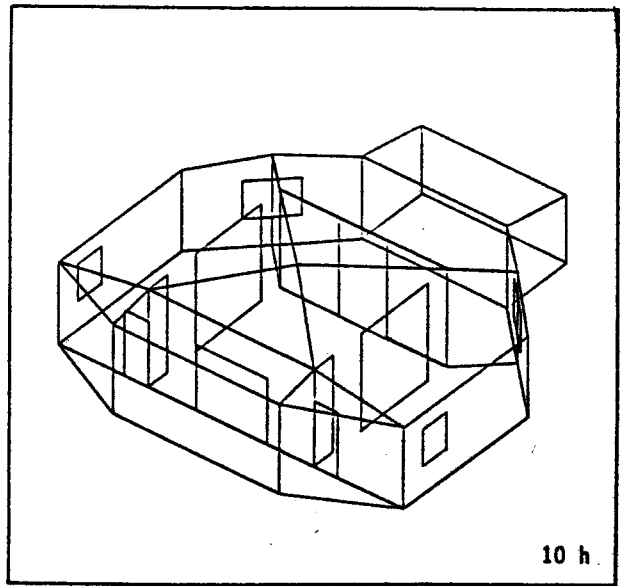
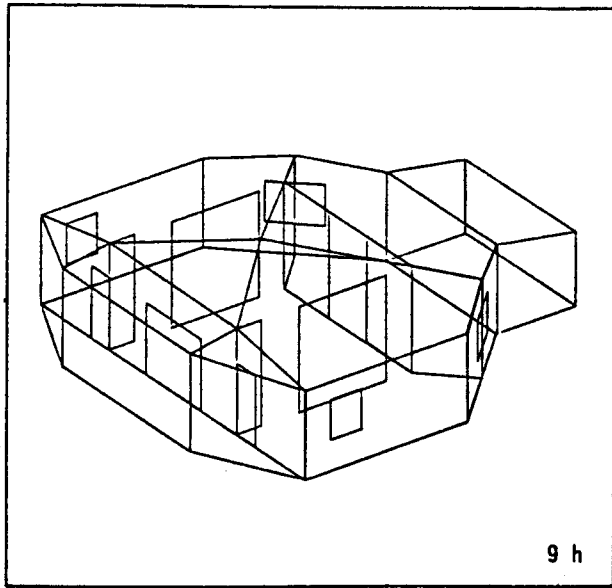
IDENTIFICATION DES PAROIS

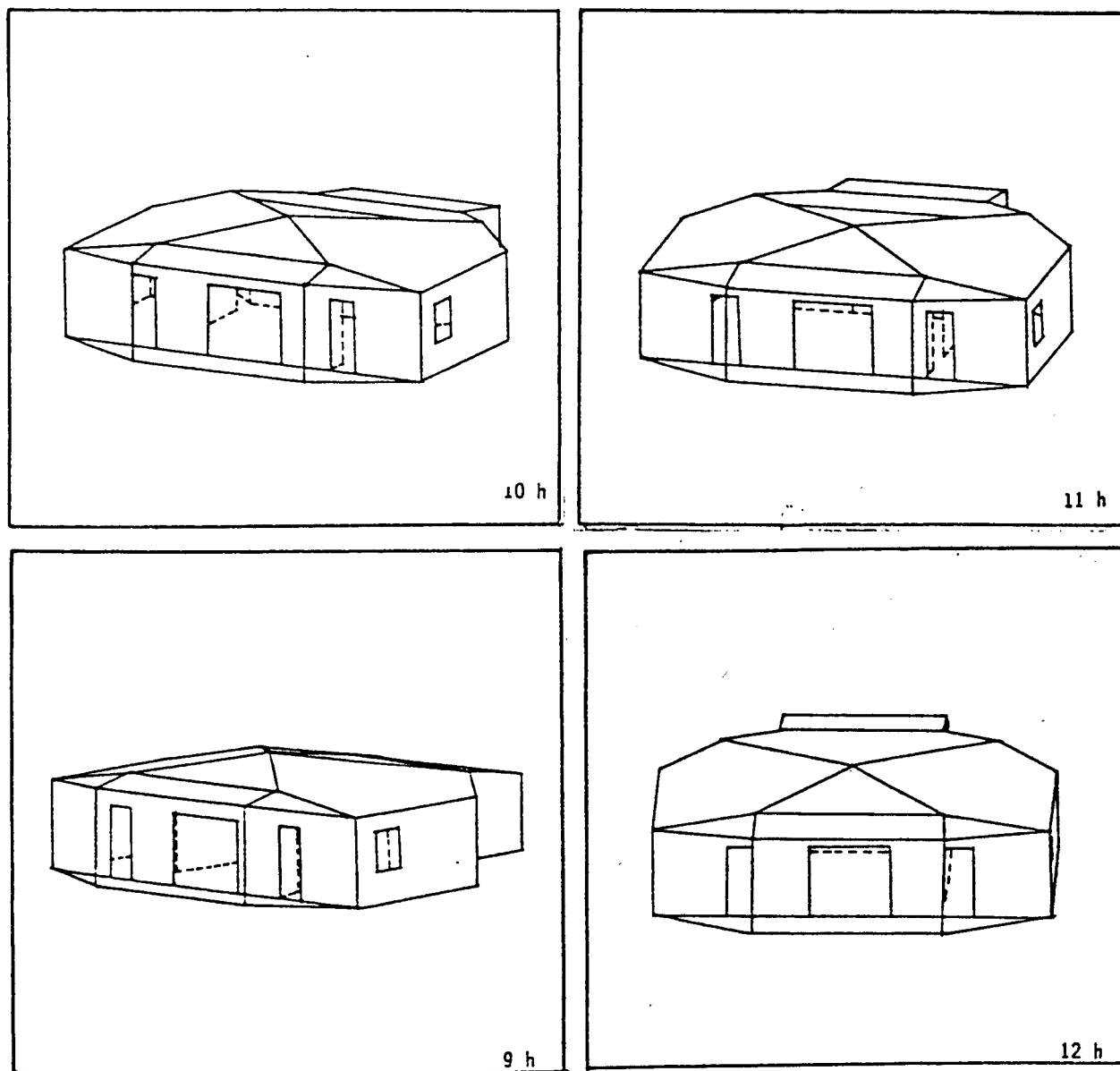
Numéro	Codage	Vitrage	DEFINITION DE LA PAROI
1	1		Plancher Séjour
2	2		Plancher Chambres
3	3		Plancher Serre
4	4		Toiture du SEJOUR : pan Sud
5	5		pan Est
6	6		pan Ouest
7	7		pan Nord
8	8		Toiture de la SERRE : SUD
9	9		(non vitrée) EST
10	A		OUEST
11	B		Toiture du GARAGE
12	C		Toiture des CHAMBRES
13	D		Mur séparation Séjour-Serre
14	E	oui	Vitrage mur séparation Séjour-Serre
15	F		Mur EST Séjour
16	G	oui	Fenêtre EST
17	H		Mur OUEST Séjour
18	I	oui	Fenêtre OUEST Séjour
19	J		Mur N.E. Séjour
20	K	oui	Fenêtre N.E. Séjour
21	L		Mur N.O. Séjour
22	M	oui	Fenêtre N.O. Séjour
23	N		Mur N.E. Chambre
24	O	oui	Fenêtre N.E. Chambre
25	P		Mur N.O. Chambre
26	Q		Fenêtre N.O. Chambre
27	R		Mur NORD Garage
28	S		Mur EST Garage
29	T		Mur OUEST Garage
30	U		Mur intérieur EST Séjour
31	V		Mur intérieur OUEST Séjour
32	W		Mur séparation Séjour-Chambre
33	X	oui	Serre : vitrage vertical SUD
34	Y	oui	vitrage vertical S.E.
35	Z	oui	vitrage vertical S.O.



21 DECEMBRE - Latitude 47°

Deux sorties héliodon (programme PROHEL) permettent d'illustrer la représentation "fil de fer" des différentes parois du bâtiment et rendre compte, après un traitement manuel de l'image (coloriage) des parties ensoleillées du bâtiment, soit directement, soit par l'intermédiaire des vitrages ; elles correspondent aux journées du 21 décembre pour 9, 10, 11 et 12 h et du 21 mars entre 7 et 12 h à une latitude de 47°. On obtient sur ces représentations les surfaces normales des parois vues du soleil.





21 DECEMBRE - Latitude 47°
 (représentations avec lignes cachées)

Un exemple de résultats du programme TACHE est donné ci-après pour chaque heure de la journée du 21 décembre. Pour chaque paroi, la surface normale au rayonnement solaire est indiquée. Le calcul a été réalisé par un découpage de l'objet suivant une trame de 12 par 12 cm normale au rayon solaire. Le programme évalue également la surface réelle de chacune des parois identifiées.

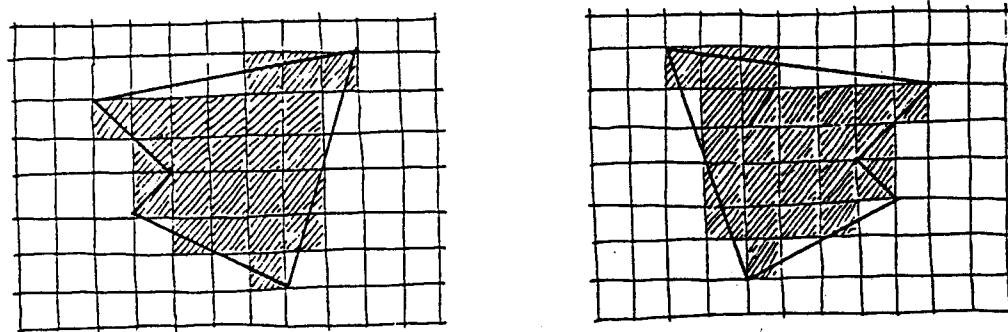
SURFACES NORMALES DES PAROIS AU SOLEIL LE 21 DECEMBRE

EVOLUTION EN FONCTION DU TEMPS

Nbre PAROI	surface PAROI	SURFACES NORMALES IRRADIEES (m ²)						
		9 h	10 h	11 h	12 h	13 h	14 h	15 h
1	68,2	1.9	4.7	6.7	7.3	6.9	4.8	1.6
2	20,0		0.6	0.1	0.2	0.1	0.6	
3	12,9	1.9	3.1	4.0	5.1	4.0	3.1	2.0
4	8,0	2.2	3.1	3.7	4.0	3.7	3.1	2.2
5	26,6	6.9	8.6	9.3	8.8	7.2	4.5	1.1
6	26,6	1.1	4.5	7.2	8.9	9.2	8.6	6.9
7	8,0	0.2	0.9	1.2	1.5	1.2	0.9	0.2
8	8,5	2.3	3.3	3.9	4.1	3.9	3.3	2.4
9	2,3	0.9	1.1	1.2	1.1	1.0	0.7	0.4
10	2,3	0.4	0.7	1.0	1.1	1.2	1.1	0.9
11	12,2	0.3	1.3	1.9	2.3	1.9	1.3	0.3
12	20,3	0.5	2.1	3.2	3.3	3.2	2.1	0.5
13	26,3	15.8	17.7	18.2	18.3	18.0	17.4	16.1
14	8,4	6.5	7.1	7.7	7.6	7.9	7.1	6.2
15	14,8	8.3	5.5	3.0			0.4	0.9
16	1,2	0.7	0.6	0.3				
17	14,8	0.9	0.3			3.0	5.8	8.3
18	1,2					0.3	0.6	0.7
19	5,7			0.1			0.1	0.1
20	1,0							
21	5,7	0.1	0.1					
22	1,0					0.1		
23	5,7							
24	1,0							
25	5,7							
26	1,0							
27	10,5							
28	6,0	3.2	0.4	0.2				
29	6,0					0.1	0.5	3.2
30	11,2	1.4	0.7	0.7			0.7	2.4
31	11,2	2.5	0.8			0.7	0.7	1.6
32	12,5	0.4	0.4	0.4	0.1	0.4	0.4	0.3
33	16,1	11.9	13.7	14.7	15.6	14.7	13.7	11.9
34	9,2	8.8	8.8	8.4	7.7	6.6	5.1	3.6
35	9,2	3.6	5.4	6.9	7.7	8.7	8.8	8.8

CALCUL AVEC UN PIXEL DE 12 cm REEL

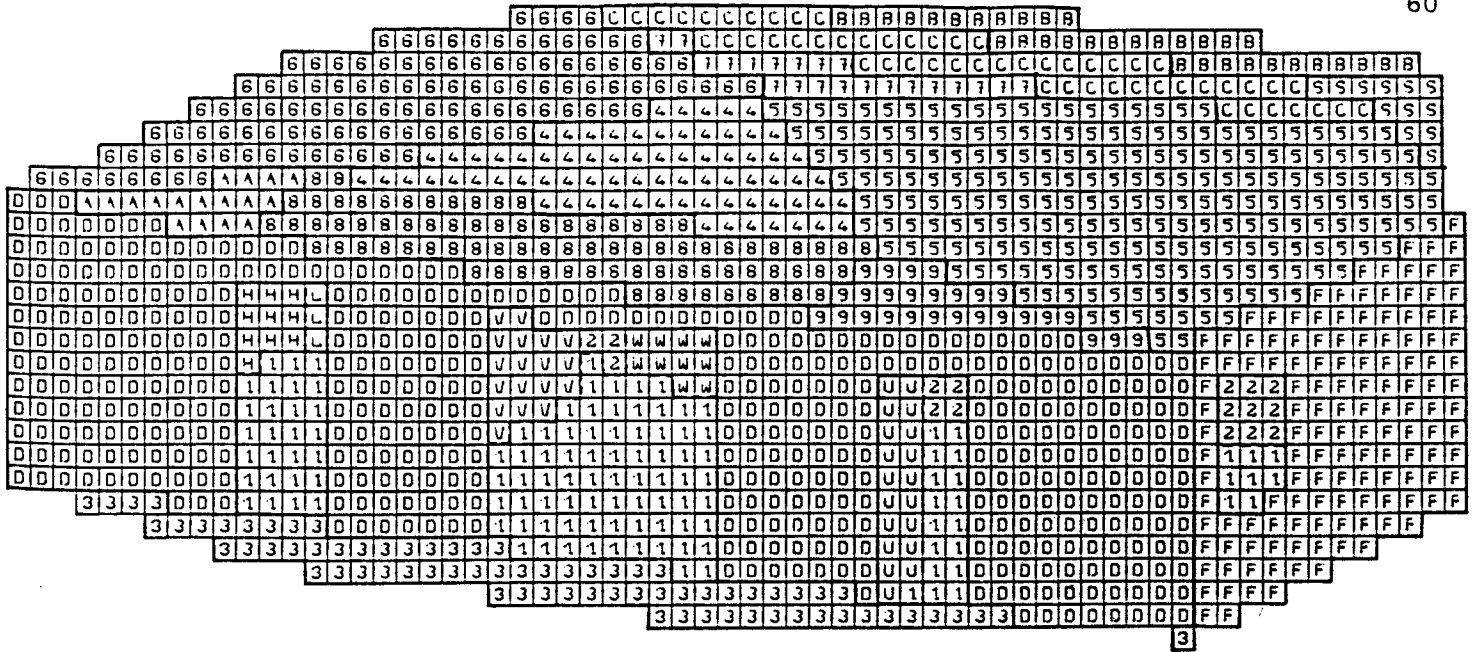
Malgré la symétrie de la maison par rapport à la direction Sud, on note une légère distorsion entre les valeurs obtenues pour des heures symétriques par rapport à 12 h. Elle résulte de la taille choisie des éléments de trame et de la position de la trame dans le plan ; celle-ci est ajustée pour cadrer au mieux avec l'image de l'objet obtenue. On pourrait y remédier en appliquant la trame dans une position fixe, par exemple, le point central de l'image.



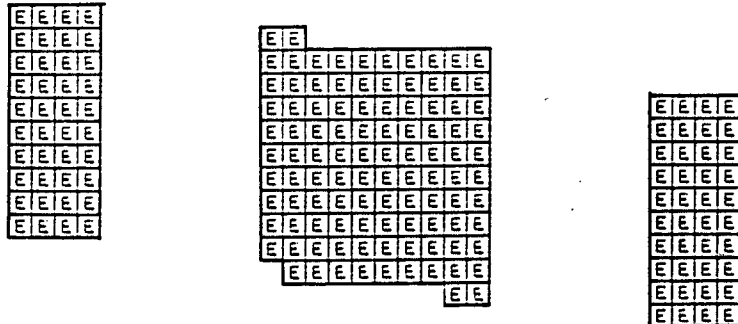
TRAME CENTREE SUR L'IMAGE (IMAGE SYMETRIQUE)

La sortie graphique réalisée par le programme TACHE pour ce bâtiment, le 21 décembre à 9 heures, illustre la méthode de résolution utilisée pour la détermination des parois ensoleillées et le calcul de leur surface. On distingue le maillage carré (un élément de trame représente ici 20 cm) ; chaque élément de la trame fait référence à une paroi ensoleillée. La représentation est réalisée sur plusieurs plans : le plan des parois opaques auquel viennent se superposer autant de plans de parois transparentes qu'il y a de recouvrement de parois vitrées. On retrouve ainsi les parties des parois ensoleillées après traversée d'un ou de plusieurs vitrages.

Le programme TACHE traite donc en une seule opération les masques proches ou lointains, la transmission des rayons solaires à travers les vitrages et leur répartition sur les parois intérieures ainsi que les valeurs du rayonnement solaire incident direct sur chacune des parois du bâtiment simulé.

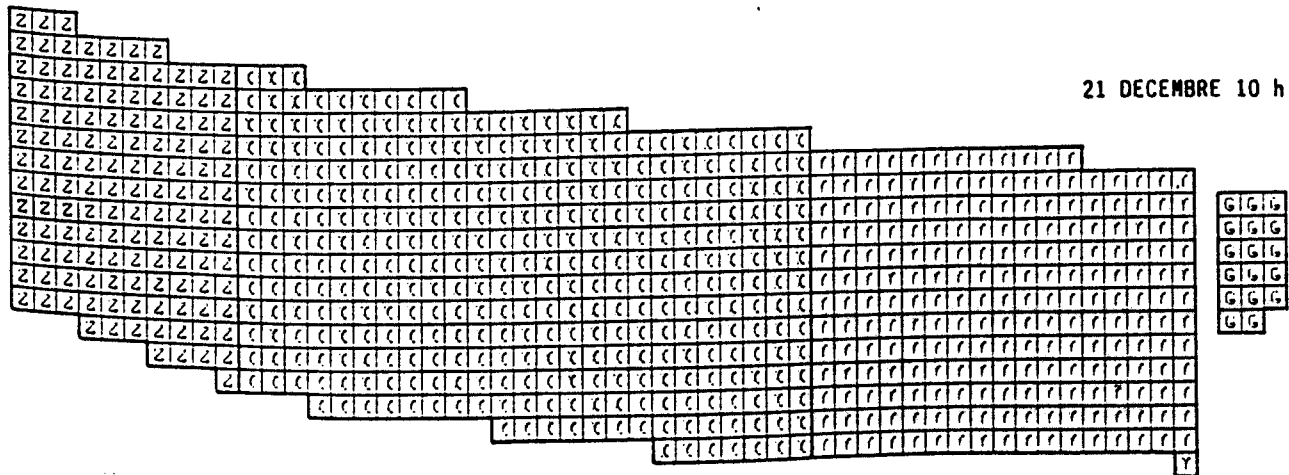


SECOND PLAN DES VITRAGES : VITRAGE MITOYEN SERRE-SEJOUR



PREMIER PLAN DES VITRAGES : SERRE ET VITRAGE PAROI EST

21 DECEMBRE 10 h



12-EVALUATION DES FLUX SOLAIRES ABSORBES PAR LES PAROIS

Le traitement automatique d'évaluation des sollicitations en flux solaires implique une réorganisation partielle du logiciel de simulation SIMULA au niveau de la saisie des informations concernant la géométrie du bâtiment.

Dans la version actuelle du programme, seules les inclinaisons, orientations et surfaces des parois étaient nécessaires au calcul. Des procédures de définition géométrique interactives seront sans doute à envisager. Il ne s'agit pas pour autant d'imposer, dans tous les cas, une définition géométrique précise des parois sous forme de polygones (X, Y, Z). Seules les parois ou ensembles constituant une difficulté pour le calcul des flux (masques, taches lumineuses) pourraient être saisies.

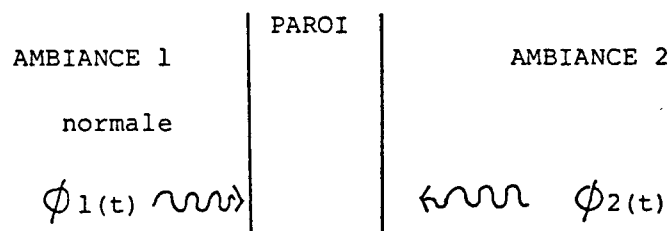
La détermination automatique des flux directs, diffus et réfléchis s'effectuera donc à partir des données géométriques des parois, quand celles-ci seront définies ; sinon elle sera appréhendée à partir des caractéristiques d'implantation (inclinaison, orientation et surface des parois) comme c'est le cas actuellement.

Le problème consiste donc, à l'issue de la simulation solaire réalisée par le module TACHE, à attribuer, sous forme de sollicitations en flux, sur chacune des faces des parois du bâtiment simulé les flux solaires incidents absorbés.

Pour l'évaluation des flux, on raisonne au niveau des parois et au niveau des ambiances (milieu à température homogène) qu'elles séparent. Rappelons que, pour chaque paroi, on dispose des informations suivantes :

- identification de la paroi,
- surface S,
- statut de la paroi : opaque ou vitré,
- normale ou inclinaison i et orientation γ de la paroi,
- pour les parois opaques : coefficients d'absorption solaire a_1 et a_2 sur ses deux faces (côté normale et côté opposé à la normale) ; ces coefficients sont valables pour le rayonnement direct et le rayonnement diffus (notés a),
- pour les parois transparentes (vitrages) :
 - . coefficients de transmission τ_d au rayonnement direct variable avec l'angle d'incidence du rayon solaire
 - . coefficients de transmission τ_a au rayonnement diffus (constant)

- . coefficients d'absorption α_d au rayonnement direct, variable avec l'angle d'incidence
 - . coefficient d'absorption α_d au rayonnement diffus (constant)
- l'albédo du sol pour les parois en contact avec l'extérieur
 - les ambiances (identification) situées de part et d'autre de la paroi (côté normal et côté opposé) ; la paroi sépare, soit l'ambiance extérieure et une ambiance intérieure, soit deux ambiances intérieures. (Il est possible de connaître ainsi toutes les parois appartenant à une même ambiance).

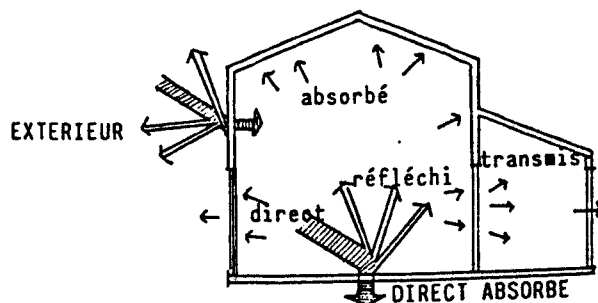


Il s'agit donc de déterminer, pour chaque paroi, les flux globaux solaires absorbés $\phi_1(t)$ et $\phi_2(t)$ exprimés en w/m^2 qui constituent les sollicitations en flux à appliquer, sur chaque face, à l'ensemble de la paroi de surface S .

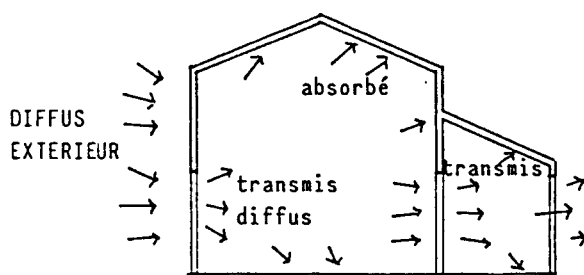
PRINCIPE D'EVALUATION DES FLUX SOLAIRES

Les parois sont soumises aux rayonnements directs, réfléchis et diffus. On fait alors, pour l'évaluation, les hypothèses suivantes :

- tout flux direct non absorbé par une paroi est réfléchi de manière diffuse isotrope vers toutes les autres parois de l'ambiance auxquelles elle appartient. Lors de cette réflexion, les éléments de vitrages transmettent une partie du rayonnement réfléchi vers les autres ambiances (intérieures et/ou extérieures). Pour l'ambiance extérieure, cette réflexion n'est pas prise en compte ; le flux non absorbé par les parois extérieures est réémis à l'extérieur.



- le rayonnement diffus extérieur est transmis par les vitrages extérieurs vers les ambiances correspondantes ; sa répartition vers les autres parois du local s'effectue de la même manière que pour les flux directs intérieurs réfléchis. Les caractéristiques de transmission des vitrages sont également pris en compte.



- au niveau de chaque ambiance, on peut donc considérer que le flux solaire ϕ_i est alors :

ϕ_i à répartir entre toutes les parois de l'ambiance

ϕ_i = Flux direct réfléchi par les parois de l'ambiance i
 + flux diffus transmis par les vitrages extérieurs de l'ambiance i
 + flux diffus transmis par les vitrages intérieurs provenant des ambiances mitoyennes avec i
 - flux transmis par les vitrages intérieurs et extérieurs de l'ambiance i vers les autres ambiances intérieures ou extérieures.

- la répartition du flux total ϕ_j sur chacune des parois d'une ambiance j se fait au prorata des coefficients d'absorption et des surfaces de chacune d'elles. Pour une paroi i , la fraction A_i du flux ϕ_j absorbé est alors proportionnelle au rapport du flux absorbé par cette paroi à la totalité du flux et transmis par tous les éléments de l'ambiance j , soit :

$$A_{ij} = \frac{a_i S_i}{\sum_p (a_p + \zeta_p) S_p}$$

avec a_i : coefficient d'absorption au diffus de la paroi i

ζ_i : coefficient de transmission au diffus de la paroi i

p : nombre de parois de l'ambiance j .

De la même façon, la fraction B_i du flux transmis par la paroi i s'écrit :

$$B_{ij} = \frac{\zeta_i S_i}{\sum_p (a_p + \zeta_p) S_p}$$

On a alors pour une ambiance j donnée :

$$\sum_p A_p + \sum_p B_p = 1$$

Pour les parois opaques, le coefficient de transmission τ est nul. On ne considère alors pour celle-ci que le flux absorbé. En revanche, pour les parois vitrées, on s'intéresse également au flux absorbé par le vitrage et au flux transmis vers les autres ambiances.

Détermination des flux directs absorbés ϕ_s et réfléchis ϕ_r par les parois

Après passage du programme d'ensoleillement TACHE, les surfaces normales aux rayons solaires, pour chacune des parois, sont connues aux divers instants de la journée simulée. Il est alors aisé d'évaluer les flux directs ϕ_{s1} et ϕ_{s2} sur les deux faces des parois à partir des surfaces normales. La procédure est la suivante à un instant t :

- calcul du flux direct solaire normal (w/m^2), compte tenu de la fraction d'insolation, soit I ;
- pour chaque paroi j du bâtiment, la surface normale effective de la paroi irradiée directement ou indirectement après traversée des vitrages est SN_j ;
- le flux incident vaut donc : $I \times SN_j$
- le flux absorbé ϕ_s vaut : $a_j \times I \times SN_j$ en watts
- on affecte le flux ϕ_s à la face de la paroi ensoleillée après examen de l'angle incident du rayon solaire par rapport à la normale de la paroi ; on aura ainsi :

$$\begin{aligned} \phi_{s1} &= 0 = \phi_{s2} \quad \text{si } SN_j = 0 \\ \text{ou } \phi_{s1} &= \phi_s \quad \text{et } \phi_{s2} = 0 \quad \text{si la face 1 est ensoleillée} \\ \text{ou } \phi_{s2} &= \phi_s \quad \text{et } \phi_{s1} = 0 \quad \text{si la face 2 est ensoleillée} \end{aligned}$$

Pour obtenir le flux direct absorbé en w/m^2 , il suffit de diviser le flux obtenu par la surface S_j de la paroi. Le coefficient d'absorption a_j utilisé peut être dépendant du temps (et de l'angle d'incidence) pour les parois vitrées.

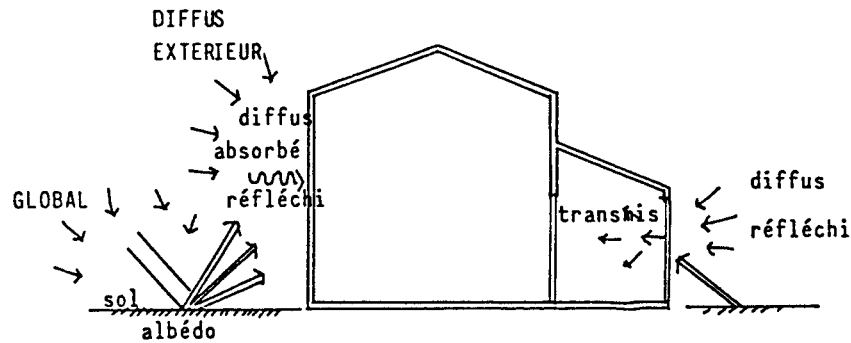
Le flux non absorbé et réfléchi vers les éléments des ambiances mitoyennes de la paroi vaut :

$$\phi_r = (1 - a_j - \tau_j) I \times SN_j$$

Le flux ϕ_r est attribué, à l'instant t , à l'ambiance en contact avec la face ensoleillée de la paroi considérée. A l'issue du calcul, on connaît donc la sollicitation en flux direct sur l'ensemble des parois et l'ensemble des flux réfléchis intérieurs dans chaque ambiance.

Détermination des flux diffus absorbés ϕ_d et transmis ϕ_t par les parois

On ne considère, pour les flux diffus, que les parois de séparation avec l'ambiance extérieure. Dans ce cas, le flux diffus provient à la fois du rayonnement diffus de la voûte céleste et du rayonnement réfléchi par le sol.



Le flux diffus incident à un instant t , s'écrit (en w/m^2) pour la paroi j :

$$F_j = D(t) (1 + \cos i)/2 + G(t) \times \text{Albédo} (1 - \cos i)/2$$

avec D : diffus incident au sol

avec G : global incident au sol

avec i : inclinaison de la paroi considérée.

Sur sa face extérieure, le flux diffus absorbé vaut alors ;

$$\phi_d = a_j \times F_j \quad w/m^2$$

où a_j est le coefficient d'absorption au diffus de la paroi.

Pour les parois vitrées, une partie du flux diffus incident est transmis vers l'ambiance intérieure ; elle correspond à :

$$\phi_t = s_j \times \zeta_j \times F_j \quad \text{en watts}$$

où ζ est le coefficient de transmission au diffus de la paroi. La valeur ϕ_t est alors attribuée à l'ambiance intérieure correspondante pour être ensuite répartie sur l'ensemble des parois du local.

Répartition des flux réfléchis et transmis sur les parois des ambiances

A l'issue du calcul des flux directs et diffus sur chaque paroi, on connaît, pour chaque ambiance, une partie du flux à redistribuer ; on a ainsi, à l'instant t , pour l'ambiance i :

$$\phi_{ci} = \sum_p \phi_{rp} + \sum_p \phi_{tp}$$

où ϕ_{ci} est le flux connu à répartir en provenance de l'ambiance i .

ϕ_r est le flux réfléchi sur les parois de l'ambiance i

ϕ_t est le flux diffus transmis par les vitrages extérieurs de l'ambiance i

p le nombre de parois de l'ambiance i .

Pour une ambiance i , le flux total à répartir ϕ_i s'exprime alors :

$$\phi_i = \phi_{ci} + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^p \delta_{kj} B_{kj} \phi_j - \sum_{k=1}^p B_{ki} \phi_i$$

avec $\delta_{jk} = 1$ si la paroi k de l'ambiance j est mitoyenne avec i .

La double sommation exprime l'ensemble des flux transmis par les parois de toutes les ambiances j en contact avec l'ambiance i , vers l'ambiance i . La sommation, en négatif, totalise les flux transmis par les parois de l'ambiance i vers les autres ambiances. Le terme B_{kj} est la fraction du flux transmis par la paroi k de l'ambiance j ; il est indépendant du temps.

L'égalité peut s'écrire :

$$\phi_i \left(1 + \sum_{k=1}^p B_{ki} \right) - \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^p \delta_{jk} B_{kj} \phi_j = \phi_{ci}$$

On obtient alors un système avec autant d'équations que d'ambiances n ; il s'exprime sous la forme :

$$\begin{cases} \alpha_{11} \phi_1 + \alpha_{12} \phi_2 + \alpha_{13} \phi_3 + \dots = C_1 \\ \alpha_{21} \phi_1 + \alpha_{22} \phi_2 + \alpha_{23} \phi_3 + \dots = C_2 \\ \vdots \\ \alpha_{n1} \phi_1 + \alpha_{n2} \phi_2 + \alpha_{n3} \phi_3 + \dots = C_3 \end{cases}$$

Les termes C_i correspondent aux valeurs ϕ_{ci} calculées dans chaque ambiance i après décomposition en série de Fourier. En écrivant le système d'équations pour chaque niveau de décomposition et en résolvant chacun d'eux séparément, on calcule alors les flux ϕ_i à répartir dans chaque ambiance pour chaque pulsation, tel que :

$$\phi_i = \sum_k A_k \cos(\omega_R t + D_k) \quad \text{avec } k \text{ niveau de la décomposition.}$$

La dernière opération consiste alors à calculer pour chaque paroi la partie du flux absorbé. Pour chaque paroi k du local i , on a alors :

$$\phi_{ki}^a = A_{ki} \times \phi_i$$

Les sollicitations en flux sur les parois intérieures sont alors la somme des flux directs ϕ_s et des flux ϕ_a suite à la diffusion et à la réflexion.

SIMULATION SUR DES PERIODES DE TEMPS VARIABLES
PARAMETRISATION DE LA PERIODE ET DU NOMBRE DES HARMONIQUES

Le logiciel de simulation SIMULA permet d'étudier le comportement thermique des ambiances d'un bâtiment en réponse à des sollicitations extérieures et intérieures variables dans le temps. Cependant, le mode de résolution analytique, utilisé dans SIMULA, qui repose sur une décomposition des signaux en composantes sinusoïdales, implique la définition d'une période fondamentale.

Dans cette hypothèse, le problème des conditions initiales (valeurs prises par chaque variable du système thermique au temps de départ de la simulation) ne se pose pas -en considérant les conditions imposées périodiques, les mêmes phénomènes, sollicitations et réponses, se reproduisent, identiques à eux-mêmes, au même moment à chaque période-, il est alors possible d'utiliser un mode de calcul en régime établi. Au niveau de la simulation, nous avons mis précédemment en évidence les avantages que ce type de résolution apporte, notamment au niveau de la vitesse de calcul, puisque les réponses des parois sont elles-mêmes connues (en amortissement et déphasage) pour des sollicitations unitaires également périodiques et de même période fondamentale.

Ainsi, la définition des sollicitations pour une journée type, correspondant par exemple à un type de temps significatif, impose un traitement avec une période fondamentale de 24 h. Le régime variable étant périodique, on obtient finalement le comportement thermique des ambiances du bâtiment, en fonction du temps, pour cette journée après une série de journées identiques.

Pour généraliser les conditions de simulation et étudier des phénomènes variables dans le temps, de durée quelconque, il est possible de jouer à la fois sur les deux paramètres qui sont à la base de la simulation en régime variable périodique :

- le niveau de décomposition des sollicitations pour une période fondamentale donnée, donc le nombre d'harmoniques à prendre en compte,
- la valeur de la période fondamentale des phénomènes simulés ; elle est régie par les sollicitations en jeu (durée, profil de variation) et les temps de réponse des éléments du bâtiment.

1 - LE NIVEAU DE DECOMPOSITION

Nous supposons, dans ce cas, que la période fondamentale T est fixée. Pour toute sollicitation ou signal, on a donc : $f(0) = f(T)$. Le nombre de niveaux de décomposition détermine alors la durée des fluctuations des phénomènes pris en compte et donc leur degré d'approximation.

Ainsi, en ne considérant que le premier terme de la décomposition, on se ramène à l'étude des phénomènes en régime permanent où seuls les termes moyens des sollicitations et des réponses sont utilisés dans la simulation. L'approximation qui en résulte fixe l'ordre de grandeur des sollicitations en négligeant leurs fluctuations au cours du temps. Elle peut se justifier dans certains cas (calcul d'un coefficient G , évaluation de consommation) mais constitue un cas limite de la simulation.

Avec une période de 24 h et une décomposition en un terme moyen, la fondamentale ($P = 24$ h) et une harmonique ($P = 12$ h), les phénomènes dont les variations sont inférieures à 12 h seront mal pris en compte dans la simulation. En augmentant le nombre d'harmoniques, on devient plus précis sur les phénomènes de moindre durée que la période fondamentale (signal solaire, variation rapide d'un paramètre...). Ainsi, avec cinq harmoniques, les phénomènes de durée 4, 8 h sont significatifs pour une période de 24 h ; avec 10 harmoniques, on descend jusqu'à 2, 4 h. Pour analyser des changements de conditions établis sur une heure, il serait nécessaire de réaliser une décomposition minimum en 24 niveaux.

Les applications développées à ce jour concernant l'étude thermique de bâtiments pour des journées type (période 24 h) ont montré qu'avec cinq niveaux seulement, on obtient une bonne approximation des phénomènes climatiques et du comportement des bâtiments. Seules des variations relativement marquées et brutales des valeurs des paramètres peuvent justifier une décomposition plus fine : cas d'une occupation intermittente des locaux ; simulation d'un rayonnement solaire réaliste intermittent...

Au niveau du logiciel SIMULA, chaque simulation s'effectue pour une période fondamentale donnée et un nombre de niveaux de décomposition fixé (harmoniques). Chacun des éléments du système doit être en accord avec ces deux données ; ainsi :

- la réponse de chacun des éléments de couplage (parois) du bâtiment à simuler doit être connue pour la période fondamentale et le nombre d'harmoniques décidées par l'utilisateur pour chaque type de sollicitation .
- toute sollicitation s'appliquant sur le bâtiment doit être décomposée en composantes sinusoïdales selon le même niveau de décomposition ;
- toute inconnue du système (puissance, température) est appréhendée globalement par ses différents harmoniques.

Pour les parois, l'utilisation de la notation matricielle complexe dans COFREP permet un calcul très rapide des coefficients d'amortissement et de déphasage. La résolution ne dépend pas de la durée de la période fondamentale choisie, elle est réalisée indépendamment pour chaque harmonique. L'augmentation du nombre de niveaux de décomposition n'influe donc que sur le temps de calcul, qui reste faible, pour une paroi, même au delà de 100 niveaux pour les quatre types de sollicitations en température et flux sur les deux faces.

L'occupation en mémoire des coefficients de réponse des parois correspond à un nombre de mots réels égal à huit fois le nombre de niveaux plus un, de la décomposition choisie ; elle correspond aux quatre types de sollicitations et aux termes de la réponse de la paroi (amortissement et déphasage) pour chaque niveau de la décomposition choisie. On a ainsi 48 mots pour 5 niveaux, 96 mots pour 10 niveaux...

On peut admettre que généralement, lors de la modélisation, il y a harmonisation entre le nombre de parois et le nombre d'harmoniques de façon à conserver une certaine cohérence dans la simulation et les approximations effectuées. Pour cette raison, la gestion des parois ne devrait pas créer de contraintes trop fortes sur l'encombrement de la mémoire centrale.

MILIEU 1

LAMBDA = 0.875 BETON
 RHO = 1800.000
 C = 850.000
 EPAIS = 0.150

MILIEU 2

LAMBDA = 0.040 ISOLANT
 RHO = 40.000
 C = 1250.000
 EPAIS = 0.070

AUX LIMITES HE = 16.00 HI = 8.00

REPONSE M ET D PERIODE = 72.00

A TEMPERATURE EXTERIEURE

P= 0.00	NIVEAU= 0	0.47417	0.00000
P= 72.00	NIVEAU= 1	0.39821	-8.29130
P= 36.00	NIVEAU= 2	0.28864	-6.96217
P= 24.00	NIVEAU= 3	0.21368	-5.92105
P= 18.00	NIVEAU= 4	0.16524	-5.17992
P= 14.40	NIVEAU= 5	0.13240	-4.64243
P= 12.00	NIVEAU= 6	0.10888	-4.23839
P= 10.29	NIVEAU= 7	0.09127	-3.92380
P= 9.00	NIVEAU= 8	0.07762	-3.67130
P= 8.00	NIVEAU= 9	0.06675	-3.46364
P= 7.20	NIVEAU= 10	0.05792	-3.28937
P= 6.55	NIVEAU= 11	0.05064	-3.14007
P= 6.00	NIVEAU= 12	0.04451	2.98953
P= 5.54	NIVEAU= 13	0.03936	2.64200
P= 5.14	NIVEAU= 14	0.03497	2.34717
P= 4.80	NIVEAU= 15	0.03117	2.09501

A FLUX EXTERIEUR

P= 0.00	NIVEAU= 0	0.02964	0.00000
P= 72.00	NIVEAU= 1	0.02489	-8.29131
P= 36.00	NIVEAU= 2	0.01804	-6.96218
P= 24.00	NIVEAU= 3	0.01335	-5.92106
P= 18.00	NIVEAU= 4	0.01033	-5.17991
P= 14.40	NIVEAU= 5	0.00827	-4.64248
P= 12.00	NIVEAU= 6	0.00680	-4.23829
P= 10.29	NIVEAU= 7	0.00570	-3.92379
P= 9.00	NIVEAU= 8	0.00485	-3.67134
P= 8.00	NIVEAU= 9	0.00417	-3.46376
P= 7.20	NIVEAU= 10	0.00362	-3.28941
P= 6.55	NIVEAU= 11	0.00316	-3.14005
P= 6.00	NIVEAU= 12	0.00278	2.98948
P= 5.54	NIVEAU= 13	0.00246	2.64190
P= 5.14	NIVEAU= 14	0.00219	2.34709
P= 4.80	NIVEAU= 15	0.00195	2.09472

A FLUX INTERIEUR

P= 0.00	NIVEAU= 0	0.94073	0.00000
P= 72.00	NIVEAU= 1	0.93881	-0.07504
P= 36.00	NIVEAU= 2	0.93655	-0.05836
P= 24.00	NIVEAU= 3	0.93526	-0.04994
P= 18.00	NIVEAU= 4	0.93443	-0.04575
P= 14.40	NIVEAU= 5	0.93377	-0.04344
P= 12.00	NIVEAU= 6	0.93314	-0.04202
P= 10.29	NIVEAU= 7	0.93251	-0.04106
P= 9.00	NIVEAU= 8	0.93184	-0.04035
P= 8.00	NIVEAU= 9	0.93112	-0.03980
P= 7.20	NIVEAU= 10	0.93036	-0.03933
P= 6.55	NIVEAU= 11	0.92954	-0.03893
P= 6.00	NIVEAU= 12	0.92868	-0.03856
P= 5.54	NIVEAU= 13	0.92776	-0.03822
P= 5.14	NIVEAU= 14	0.92680	-0.03790
P= 4.80	NIVEAU= 15	0.92580	-0.03759

A TEMPERATURE INTERIEURE

P= 0.00	NIVEAU= 0	-0.47417	0.00000
P= 72.00	NIVEAU= 1	0.49214	-34.85297
P= 36.00	NIVEAU= 2	0.51373	-17.14568
P= 24.00	NIVEAU= 3	0.52773	-11.28794
P= 18.00	NIVEAU= 4	0.53889	-8.36007
P= 14.40	NIVEAU= 5	0.54974	-6.60299
P= 12.00	NIVEAU= 6	0.56122	-5.43278
P= 10.29	NIVEAU= 7	0.57365	-4.59898
P= 9.00	NIVEAU= 8	0.58710	-3.97607
P= 8.00	NIVEAU= 9	0.60154	-3.49406
P= 7.20	NIVEAU= 10	0.61690	-3.11082
P= 6.55	NIVEAU= 11	0.63308	-2.79947
P= 6.00	NIVEAU= 12	0.64999	-2.54200
P= 5.54	NIVEAU= 13	0.66753	-2.32594
P= 5.14	NIVEAU= 14	0.68561	-2.14234
P= 4.80	NIVEAU= 15	0.70414	-1.98463

Pour les sollicitations, la décomposition en un nombre quelconque d'harmoniques est sans incidence au niveau du mode de calcul. Les signaux $f(T)$ entrés, heure par heure, par exemple, sont décomposés en un certain nombre n de termes, à raison de deux par harmoniques (A et D) :

$$F(t) = \sum_{k=0}^N A_k \cos(\omega_k t + D_k)$$

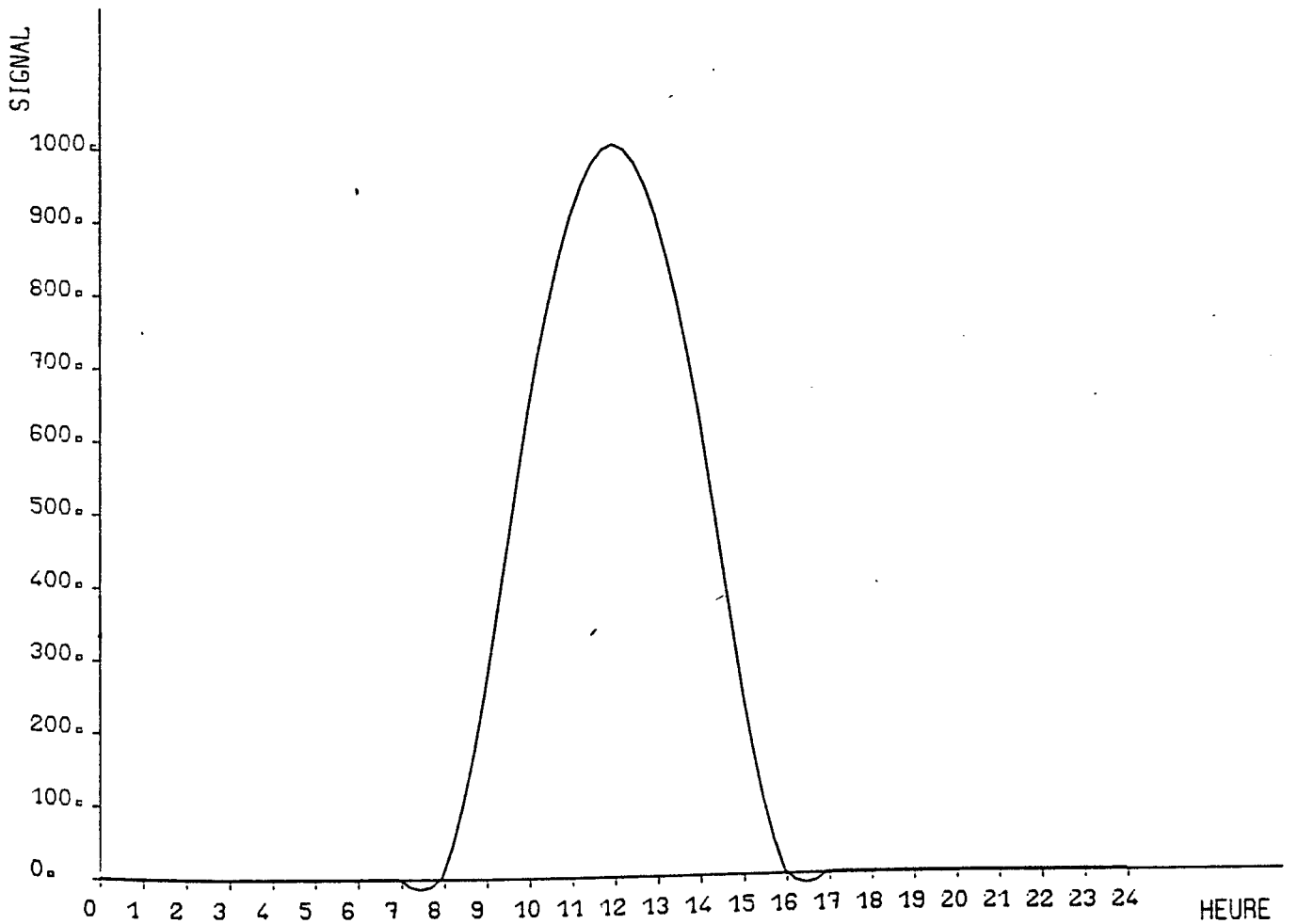
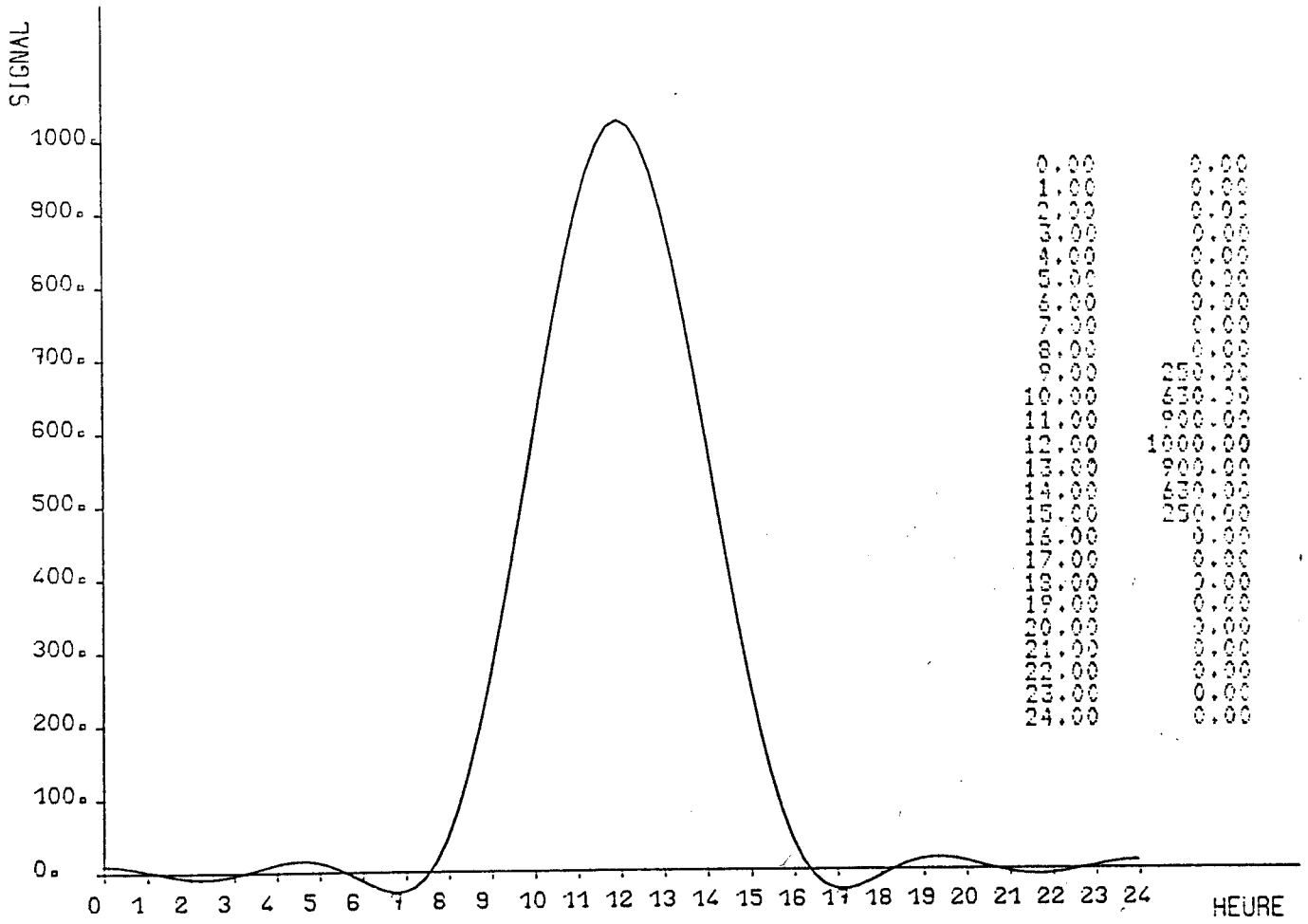
avec $\omega_k = 2\pi/kT$ et T période fondamentale

Outre la durée de la période fondamentale, le profil ou l'allure des variations de la sollicitation joue un rôle important dans le choix du niveau de décomposition. Plus le signal comporte de variations brusques de faible durée, plus la saisie doit être fine et la décomposition importante. Jusqu'alors, le programme de calcul gérant la décomposition en série de Fourier fonctionnait avec des valeurs de signal fournies par l'utilisateur pour un pas de temps fixe (1 h ou 3 h). Certaines irrégularités du signal (profil "non lissé") nécessitent de descendre à un pas de temps très faible à certains moments, alors qu'à d'autres, un pas de temps plus important suffit pour approximer correctement le signal.

La mise en place d'un nouveau module de calcul (FOURIE) permet de traiter des signaux périodiques quelconques à partir de valeurs fournies inégalement dans le temps. Moyennant un nombre suffisant d'harmoniques, le signal décomposé s'ajuste ainsi plus précisément au tracé réel du signal. A titre d'illustration, nous fournissons les résultats de la décomposition :

- pour un signal d'une durée de 8 heures (flux solaire par exemple) et de période de 24 heures ; les valeurs fournies en entrée sont définies heure par heure et la décomposition est réalisée sur 5 niveaux (4,8 h) : on remarque au début et à la fin du signal, tracé après recombinaison des différentes composantes calculées par FOURIER, de légères distorsions des valeurs ;
- pour le même signal de 8 heures, mais avec une décomposition réalisée en 96 niveaux ; on prend ainsi en compte les fluctuations des valeurs correspondant au 1/4 d'heure. Le signal reconstitué colle alors parfaitement aux valeurs horaires définies en entrée. Les oscillations précédentes ont été corrigées par les harmoniques de faible période de la décomposition. A l'amorce du signal, on note toutefois une légère perturbation due au passage brutal de la valeur 0 à 8 heures à celle de 250 pour 9 heures ;

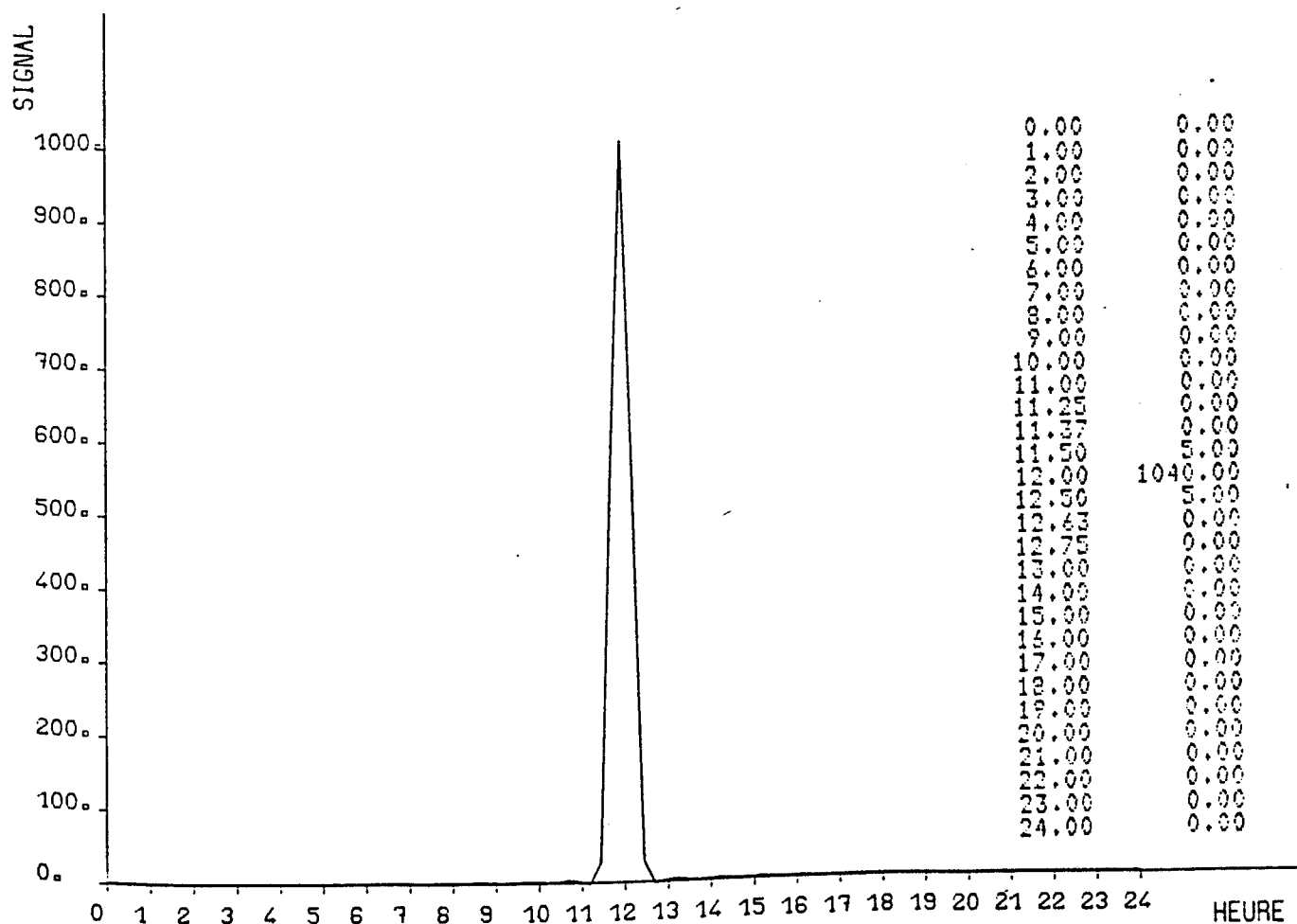
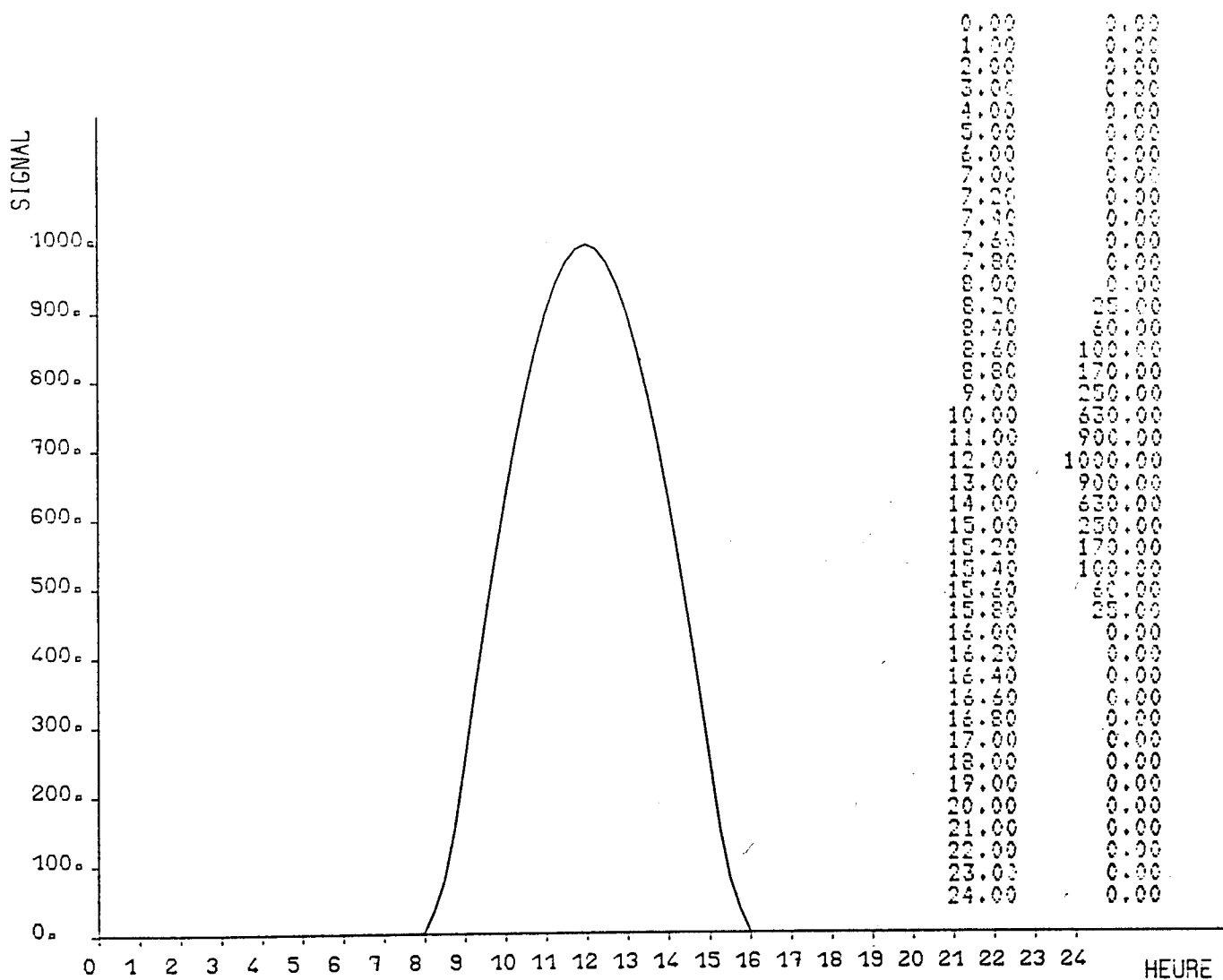
Le tracé des signaux est obtenu par recombinaison des différentes composantes calculées par FOURIE, pour un pas de temps de 1/4 heure.



- en utilisant le même niveau de décomposition que précédemment, soit 96 niveaux, le signal de 8 heures est alors amélioré dans sa définition. On introduit des valeurs intermédiaires du signal entre 7 h et 9 h de façon à préciser son allure lors de l'apparition du signal. On précise également les valeurs à la fin du signal. Le tracé obtenu dans ces conditions correspond alors exactement au signal d'entrée ;

- enfin, un signal de courte durée (1 heure) centré à midi et décomposé en 120 niveaux ; la période est de 24 heures et l'harmonique de plus faible période correspond alors à 12'. Les valeurs fournies en entrée sont horaires mais la précision est augmentée dans la période d'approche du signal triangulaire en utilisant un pas de temps plus faible. Le signal finalement obtenu après décomposition s'approche très sensiblement des valeurs imposées en entrée.

Pour le logiciel de simulation thermique SIMULA, l'incidence du nombre de niveaux de décomposition est minime. L'occupation en mémoire est alors seulement liée au nombre maximum de termes de la décomposition autorisé qui serait fixé comme paramètre dans le programme. Le temps de calcul de la simulation est, quant à lui, en relation directe avec le nombre des harmoniques des divers termes des équations à traiter. A chaque niveau de décomposition correspond un système d'équations linéaires à résoudre en fonction du nombre d'ambiances simulées.



2 - LA PERIODE FONDAMENTALE

La période fondamentale définit l'intervalle de temps pour lequel les phénomènes se reproduisent identiques à eux-mêmes, au même temps t :

$$f(t) = f(t + T) = f(t + 2T)$$

Ainsi, avec une période de 24 heures, on peut analyser le comportement d'un local en réponse aux conditions climatiques d'une journée type auxquelles le bâtiment serait éventuellement soumis. Avec une période de 48 heures, le bâtiment peut être étudié lors d'une séquence répétitive de deux journées consécutives différentes (par exemple, avec et sans soleil), mettant alors en évidence l'effet sur le bâtiment d'une journée ensoleillée après une journée non ensoleillée et inversement.

On peut envisager de travailler sur des périodes encore plus longues (72 ou 96 heures) et simuler l'évolution du comportement thermique d'un bâtiment au cours du temps ou analyser sa réponse à des changements de temps. Cependant, le temps de réponse des bâtiments est généralement limité, fonction du type de bâtiment, de son inertie. On peut admettre que, généralement, les conditions climatiques survenues trois ou quatre jours plus tôt n'influencent guère la situation thermique présente du bâtiment. Quelques dispositions intérieures ou configurations particulières peuvent cependant nécessiter des simulations sur de plus longues périodes dès lors que les fonctions d'apports gratuits et de restitution à moyen terme sont envisagées.

Néanmoins, dans l'hypothèse d'une période importante, le nombre de niveaux de décomposition choisi peut être restreint à l'appréhension des seuls phénomènes significatifs à cette échelle de temps. D'une manière générale, la valeur de la période fondamentale est sans effet sur le calcul de la simulation ; la période des harmoniques est effectivement fixée par la période fondamentale mais cette dernière n'implique pas systématiquement un niveau de décomposition. Le temps de calcul ne dépend que du nombre des harmoniques.

Ainsi, si on admet qu'avec 5 niveaux de décomposition, on approxime bien les conditions climatiques courantes pour une période de 24 heures, on conserve la même précision en utilisant 10 niveaux pour une période de 48 heures, 20 niveaux pour 72 heures et 40 pour 96 heures.

Le choix de la période fondamentale n'a, pour l'utilisateur, une incidence que sur la définition des sollicitations intérieures et extérieures appliqués au bâtiment. Elles doivent, en effet, être définies pour l'ensemble de la période fondamentale. L'utilisation d'un pas de temps variable pour la décomposition en série de Fourier permet de prendre en compte le signal sans imposer des contraintes importantes sur le nombre de valeurs à fournir par l'utilisateur. Le nombre des sollicitations à fournir est cependant limité aux températures des différentes ambiances quand celles-ci sont imposées (régulation totale ou partielle en consigne) et aux flux solaires.

Les parois, éléments de couplage entre deux ambiances, font directement référence aux températures des ambiances définies. Les flux solaires sont en revanche à calculer pour chacune des parois du bâtiment. En l'absence de procédure automatisée, la définition des flux solaires sur plusieurs jours peut, en revanche, constituer une tâche fastidieuse de préparation des données.

En utilisant la méthode de calcul exposée précédemment pour l'évaluation des flux solaires, le programme peut prendre en charge totalement cette partie du travail à partir d'un traitement successif par période de 24 heures. Dans cette optique, les résultats fournis par le programme de calcul des taches solaires (TACHE) demeurent valables sur l'ensemble de la période fondamentale : les positions apparentes du soleil restent pratiquement constantes durant une séquence de quelques jours. Il suffit alors seulement de spécifier, pour la fraction d'ensoleillement, les conditions d'ensoleillement de chacune des journées considérées. L'évaluation des flux solaires directs, réfléchis et diffus est alors réalisée pour chaque paroi et pour chaque journée de 24 heures avec des conditions d'ensoleillement différentes. Le raccordement entre les différents signaux de flux des parois est immédiatement assuré en raison de la non-existence du rayonnement solaire pendant la nuit et la décomposition s'effectue alors sur la période fondamentale (multiple de 24 heures).

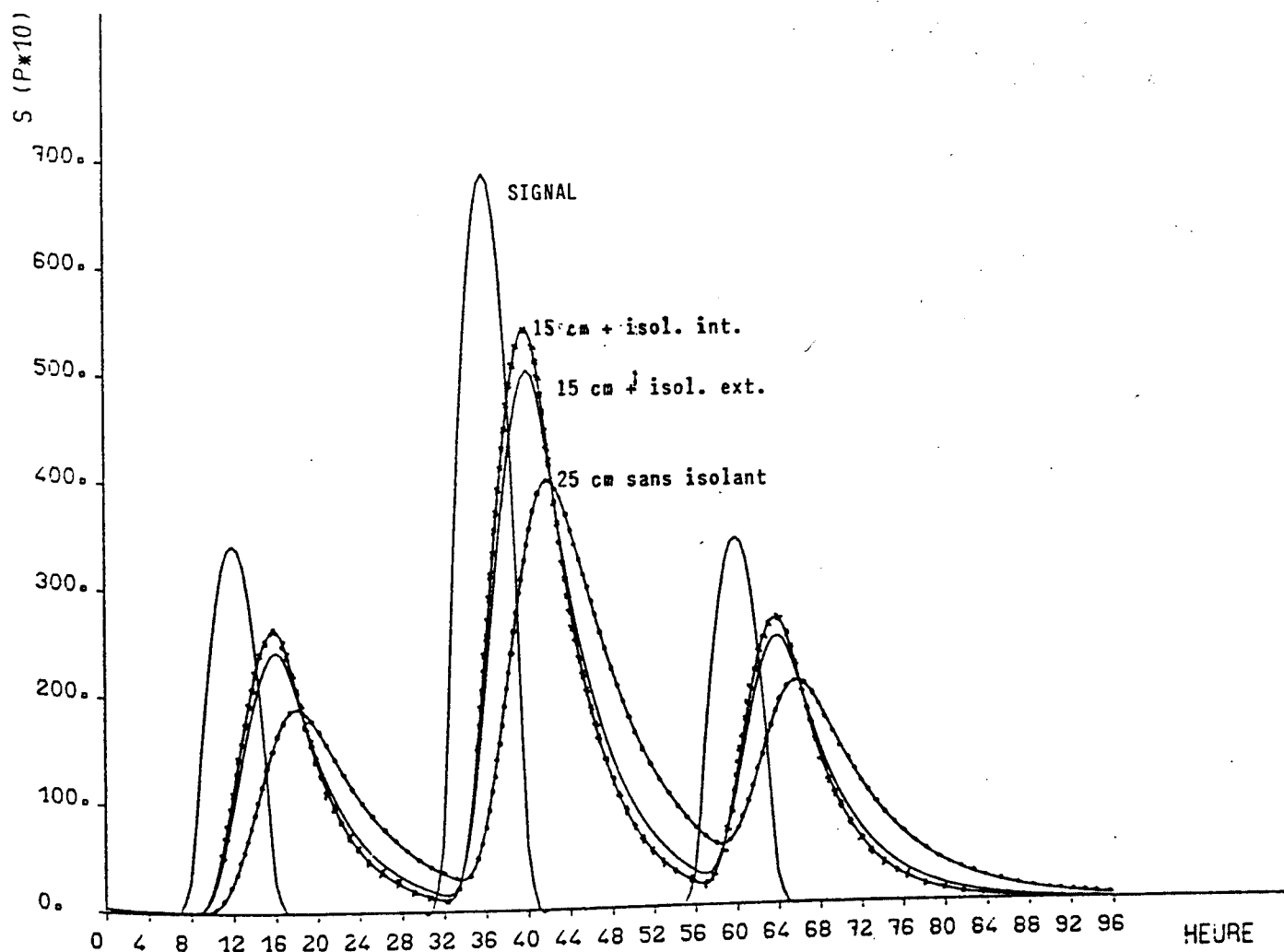
3 - EXEMPLE D'APPLICATION

L'application réalisée concerne l'analyse de la transmission des flux solaires par des murs en réponse à une séquence de journées non identiques. La période fondamentale retenue est de 96 heures ; le nombre de niveaux de décomposition choisi est de 120. L'étude est faite pour un mur extérieur exposé au Sud, soumis à un ensoleillement extérieur entre 8 h et 16 h, variable en intensité sur les 4 journées : moyen la 1ère journée, maximum la seconde, moyen la 3ème jour-

née et nulle sur la dernière journée. Les sollicitations en température ont été supposées nulles sur les deux faces des parois étudiées.

Trois murs de même coefficient K de transmission permanente mais de structure différente ont été analysés : béton 25 cm, béton 15 cm + isolation 4 mm intérieure, béton 15 cm avec la même isolation extérieure.

Le graphique ci-dessous illustre le signal de flux solaire appliqué et l'évolution des réponses en flux transmis par les trois parois.



Dans le tableau, on a indiqué pour chaque paroi, d'une part, l'énergie transmise dans la période 8-16 h durant l'apparition du soleil, d'autre part, l'énergie transmise de façon différée hors de la durée du signal. La fraction d'énergie transmise de façon différée varie un peu avec la place de l'isolant (malgré sa faible épaisseur). En moyenne, sur la période de 96 h, elle est de 77 % pour 25 cm, 59 % pour 15 cm avec isolation intérieure et 62 % pour 15 cm avec isolant extérieur.

PAROI	Energie incidente wh	1834		3782		1834		0	
	HEURE	8	16	8	16	8	16	8	16
BETON 25 cm	Energie transmise	40	178	98	373	74	193	18	7
	Fraction différée		82 %		79 %		72 %		
	Taux de transmission	11,8 %		12,4 %		14,5 %			
15 cm + isol. int.	Energie transmise	96	140	203	290	105	142	4	1
	Fraction différée		59,5 %		59 %		57,5 %		
	Taux de transmission	12,9 %		13 %		13,5 %			
15 cm + Isol. ext.	Energie transmise	86	148	183	307	99	152	6	2
	Fraction différée		63,2 %		62,6 %		60,5 %		
	Taux de transmission	12,9 %		13 %		13,5 %			

En comparant, pour la paroi de 25 cm, les deux journées de soleil voilé, on remarque que l'énergie transmise pendant la seconde, qui suit la journée d'ensoleillement maximum, est supérieure à celle transmise durant la première. Ceci traduit l'aptitude de la paroi à reporter au jour suivant une partie de l'énergie emmagasinée. Ce report est insignifiant avec des parois de 15 cm.

La fraction d'énergie transmise en différée est élevée. Elle est cependant à mettre en relation avec le faible taux de transmission global de la paroi voisin de 13 % de l'énergie solaire incidente. Les 87 % d'énergie renvoyé par la face ensoleillée sont donc perdus dans le cas d'une paroi extérieure.

SIMULATION D'UN BATIMENT COMPORTANT DES AMBIANCES

AVEC RENOUVELLEMENT D'AIR VARIABLE

Une des hypothèses nécessaires pour la résolution analytique complète en régime périodique, par le biais des décompositions en série de Fourier, est la stationnarité des caractéristiques des éléments de couplage intervenant dans le bâtiment. Si cette hypothèse n'est pas satisfaite, il est alors nécessaire d'utiliser des procédures de calcul différentes de celles actuellement développées ; elles reposeraient sur des évaluations au pas de temps, beaucoup plus lourde à mettre en oeuvre.

Cependant, dans quelques cas, il peut être intéressant d'introduire au niveau de la simulation des éléments de couplage variables dans le temps : c'est le cas, notamment, de parois dont la structure et la composition est différente au cours de la journée ou celui d'un renouvellement d'air variable modulé dans les ambiances en fonction du temps.

Nous examinerons ici l'incidence de la prise en compte de telles conditions dans le logiciel SIMULA. Nous ne considérons cependant la faisabilité d'une telle simulation que pour des éléments de couplage à effet instantané tels que parois sans inertie avec coefficient K variable et débit de renouvellement d'air.

Si on raisonne au niveau des ambiances dont la température d'air intérieure est imposée, variable ou constante dans le temps, (en régulation totale), il est donc possible de déterminer la puissance de climatisation à fournir en utilisant une résolution au pas de temps. A l'instant t du calcul, la puissance est calculée en prenant en compte la valeur instantanée du couplage correspondant ; le coefficient K des parois résistives au temps t , le taux de renouvellement d'air ou le débit des infiltrations au même moment.

Pour des ambiances aux températures inconnues (climatisation partielle ou sans climatisation), le problème est sensiblement différent. En effet, le système à résoudre pour la détermination des températures intérieures des ambiances est obtenue en écrivant l'équation de bilan, pour chaque local ; les couplages entre locaux sont alors introduits directement et le système d'équations est de la forme :

$$\begin{aligned} \alpha_{11}^i T_1^i + \alpha_{12}^i T_2^i + \dots &= P_1^i \\ \alpha_{21}^i T_1^i + \alpha_{22}^i T_2^i + \dots &= P_2^i \end{aligned}$$

Il a y autant de systèmes d'équations à résoudre que de niveaux de décomposition :

- i représente le ième niveau ;
- T_j^i est le terme de niveau i de la décomposition en série de Fourier de la température intérieure du local j ;
- les termes α_{jk}^i représentent les fonctions de transfert des éléments de couplage entre les ambiances j et k ; ils contiennent donc les amortissements et les déphasages dans le cas des éléments solides (parois) et le terme du renouvellement d'air $0,34 \dot{V}$, où \dot{V} est le débit ;
- P_{ji} est la puissance disponible connue de l'ambiance j ; elle résulte des échanges connus internes au local (flux solaire) ou externes en provenance des autres ambiances à température connue.

Dans le cas d'éléments de couplage stationnaires, les termes α_{jk}^i sont constants au cours du temps et fixés pour chaque niveau de décomposition. Leur calcul se fait aisément à l'aide des amortissements et des déphasages des parois et du débit de renouvellement d'air correspondant à un niveau donné.

Le renouvellement d'air variable introduit une instationnarité. Les termes correspondant au renouvellement d'air varient au cours du temps. Le débit de renouvellement d'air s'écrit alors sous la forme d'une décomposition en série de Fourier :

$$\dot{V} = \sum_k a_k \cos(\omega_k t + d_k)$$

La puissance inchangée par renouvellement d'air, entre les ambiances j et k par exemple, est :

$$P = 0,34 \dot{V} (T_j - T_k)$$

En supposant la température T_j de l'ambiance j inconnue, on cherche alors à déterminer sa valeur sous la forme :

$$T_j = \sum_k F_k \cos(\omega_k t + \delta_k)$$

Le terme $0,34 \dot{V}T_j$ de la puissance P échangée par renouvellement d'air est donc de la forme :

$$P = 0,34 \sum_i^N \sum_k^N a_i \cos(\omega_i t + d_i) \times F_k \cos(\omega_k t + \delta_k)$$

$$P = 0,34 \sum_k^N \sum_i^N \frac{1}{2} F_k a_i [\cos((i+k)\omega t + \delta_i + \delta_k) + \cos((i-k)\omega t + \delta_i - \delta_k)]$$

N = nombre de niveaux

L'inconnue est la température intérieure, soit les termes d'amortissement F_k et de déphasage δ_k de sa décomposition. Pour qu'une résolution par niveau soit possible, il faut que chaque couple (F_j, δ_j) n'intervienne que pour la pulsation j , ce qui est le cas si le renouvellement d'air est constant. S'il est variable, la suite des deux signes sommes entraîne que chaque couple (F_k, δ_k) intervient pour les pulsations $(i+k)$ et $(i-k)$ de $i=1$ à N , dont pour l'ensemble des pulsations. On obtient alors un seul système d'équations à résoudre comportant la totalité des inconnues.

Ainsi, pour n ambiances à renouvellement d'air constant, et pour un nombre N de niveaux, on a N systèmes indépendants à résoudre comportant $2n$ inconnues chacun. Dans le cas du renouvellement d'air variable, la résolution par niveau n'est plus possible et le système global à résoudre comporte alors $2n$ fois N inconnues.

Pour éviter la résolution analytique de ce système, de façon systématique pour l'ensemble des ambiances, nous avons adopté dans un premier temps une méthode de calcul itérative permettant de résoudre le débit d'air variable pour des ambiances dont la température d'air est non imposée (sans régulation) sur toute la période. Le processus itératif est alors le suivant :

- détermination analytique de la température intérieure d'air en considérant le seul terme permanent du débit de renouvellement d'air variable,
- calcul de la puissance de climatisation résultante en évaluant au pas de temps la puissance due au renouvellement d'air variable, compte tenu de la température d'air précédemment calculée,

- décomposition de cette puissance qui est alors ajoutée aux termes de puissances déjà connues pour l'ambiance,
- répéter l'ensemble de ces phases jusqu'à ce que la puissance résultante calculée à partir de la température intérieure soit négligeable.

Dans le cas précis d'ambiances à température flottante, ce type de résolution paraît intéressante puisqu'en quelques itérations seulement, on obtient une bonne approximation des résultats.

Pour des ambiances à température de consigne (climatisation partielle), et pour lesquelles les éléments de couplage sont stationnaire, on utilise déjà un calcul itératif analogue à celui décrit précédemment. Le problème réside seulement dans la recherche rapide de la convergence. Pour ces mêmes ambiances avec un renouvellement d'air variable au cours du temps, il est alors nécessaire de réaliser successivement deux calculs itératifs :

- déterminer au pas de temps la puissance de climatisation pour maintenir la température de consigne incluant le renouvellement d'air variable ; les puissances de refroidissement sont alors mises à zéro ;
- détermination itérative de la température résultante en appliquant la puissance de chauffage calculée dans la phase précédente ; on retrouve la même procédure de calcul utilisée pour le renouvellement d'air variable dans une ambiance à température flottante ;
- réajustement de la puissance appliquée à l'ambiance en fonction de l'écart de température entre la consigne et la température flottante ;
- répéter les phases de calcul jusqu'à l'obtention d'une puissance nulle lorsque la température résultante est supérieure à la température de consigne.

Cette méthode a été partiellement mise en oeuvre, mais il reste à étudier plus précisément la convergence des différents systèmes itératifs et leur influence réciproque pour des ambiances à températures de consigne. Le nombre de niveaux de décomposition nécessaire pour éviter des oscillations trop fortes dont la période serait inférieure à la plus petite harmonique doit également être étudié. Dans cette optique, le nombre de niveaux utilisé pour le calcul itératif, indépendamment des autres calculs réalisés dans la simulation, pourrait être augmenté en conséquence.

Le traitement du renouvellement d'air variable, par la méthode analytique ou par la méthode itérative, oblige donc à forcer les hypothèses posées au départ qui sont la stationnarité des éléments du couplage et la linéarité des équations.

Ce type de traitement est, par conséquent, mal adapté aux principes de bases du logiciel SIMULA et aux méthodes de calcul qui en résultent.

L'intégration dans le programme de parois variables au cours du temps (occultation des ouvertures avec modification de la résistance thermique par exemple) poserait le même problème que le renouvellement d'air variable.

A l'issue de cette première approche de la non-stationnarité des éléments de couplage, et compte-tenu de l'intérêt à simuler des conditions variables dans le cas d'échanges instantanés, nous engageons actuellement une recherche complémentaire pour étudier la faisabilité d'une résolution analytique couvrant l'ensemble des cas. Cette résolution serait systématiquement appliquée quel que soit les conditions de simulation avec ou sans termes variables. Le problème essentiel réside dans le calcul des différents coefficients et leur positionnement dans la matrice à résoudre ainsi que dans le découpage de la matrice en grandes dimensions pour en permettre sa résolution dans un espace mémoire de calcul restreint.

EXTRACTION DES PARAMETRES PHYSIQUES DE LA SIMULATION

PERMETTANT LA DETERMINATION DES CONDITIONS DE CONFORT

L'évaluation du confort thermique est un problème complexe régi par l'interaction entre l'individu et son environnement climatique. La maîtrise du confort thermique nécessite la prise en compte des facteurs physiologiques, physiques et psychologiques de l'individu ainsi que les paramètres physiques de son environnement.

Nous nous intéressons ici qu'à la détermination des paramètres physiques des ambiances intérieures simulées par le logiciel SIMULA.

Les données climatiques intérieures qui permettent d'appréhender les conditions de confort sont la température de l'air, la température moyenne radiante, l'humidité relative et la vitesse de l'air.

L'humidité relative et la vitesse de l'air à l'intérieur d'un local n'interviennent pas dans les procédures de calcul de la simulation thermique. Les problèmes de changement de phase (condensation, évaporation) ne sont pas traités et la vitesse de l'air est seulement prise en compte au niveau des coefficients globaux d'échange superficiel des parois.

Pour la détermination du confort, ces deux paramètres constitueront, au même titre que les données physiologiques et physiques du sujet, des entrées du programme ; ils pourront faire l'objet, notamment pour la détermination de la vitesse d'air intérieure, d'un traitement numérique ou expérimental, indépendant de la simulation thermique.

D'une façon générale, sous nos climats et, pour des conditions intérieures, l'humidité et la vitesse de l'air varient peu, la température d'air intérieure et la température moyenne radiante ont alors une influence prépondérante sur le confort. Pour les déterminer à partir de la simulation thermique, il faut connaître les températures en chaque point du local considéré, dans l'ambiance et sur les parois. En plus, il faudrait déterminer le flux direct et diffus provenant des ouvertures arrivant en chacun des points pour établir un bilan de confort qui soit fonction de la position de l'occupant dans l'espace.

- la température d'air

Dans le logiciel SIMULA, chaque ambiance est considérée à température homogène. Le type de climatisation de chacune d'entre-elles est défini par l'utilisateur et peut être une climatisation totale, une climatisation partielle (température de consigne) ou pas de climatisation du tout (température flottante). Suivant les cas, le calcul détermine la puissance de chauffage nécessaire pour maintenir la température imposée ou la température de l'ambiance lorsque la puissance de chauffage est nulle. Donc quelque soit le type de climatisation, la température d'air de chaque ambiance est connue à l'issue de la simulation.

- Les températures de paroi

Connue pour les ambiances, les parois sont des éléments de transfert à température homogène où les sollicitations sur les deux faces sont également homogènes. Si on désire, par exemple, prendre en compte plus précisément la répartition des tâches solaires sur une paroi, celle-ci peut être décomposée en plusieurs éléments de transfert, de façon à se ramener à des ensembles à température homogène.

Dans la version actuelle du programme SIMULA, les températures de parois ne sont pas calculées. Par contre, les calculs des flux échangés avec l'ambiance sont connues par élément de paroi.

Connaissant la température d'air de chaque ambiance, le coefficient d'échange superficiel et la puissance échangée par l'ambiance calculée pour chaque paroi, la température de surface peut être aisément déterminée par la formule :

$$\begin{aligned} \varphi_i &= h (T_a - T_p) \\ \text{soit } T_p &= T_a - \frac{\varphi_i}{h} \end{aligned}$$

La température d'air T_a et le flux φ_i sont enregistrés sous la forme d'une décomposition en série de Fourier ; les températures de paroi correspondant à chaque élément de transfert peuvent alors être calculés directement, sous cette même forme, par sommation vectorielle.

Lorsque l'on cherche à caractériser, de façon générale, le confort thermique d'une ambiance intérieure, tous les paramètres physiques en jeu sont connus à l'issue de la simulation thermique. Différentes méthodes ou différents indices ont été préconisés pour évaluer les situations de confort intérieur : température effective (E.T.), température effective standard (S.E.T.), température résultante définie par MISSENARD, le Predictive Mean Vote établi par FANGER... généralement liés à un cadre d'application bien déterminé (acclimatation, changement de conditions, ambiances thermiques de travail...).

Sur la base de ces travaux, il apparaît que la température opérative, température moyenne entre la température d'air et la température radiante pondérée par les coefficients d'échanges, représente un bon indicateur global du confort dans des climats tempérés. Ceci ne serait plus vrai sous des climats très chauds et humides où la sudation et la mouillure de la peau sont prédominants sur la sensation de confort.

- Détermination de la température opérative

La température T_{op} est fonction de la température d'air et de la température radiative. Dans un premier temps, et comme la température d'air, la température radiative T_r est considérée homogène pour chaque ambiance et égale à la moyenne des températures des parois pondérées par les surfaces de chacune d'entre elles, soit :

$$T_r = \frac{\sum T_i S_i}{\sum S_i}$$

La température opérative est alors :

$$T_{op} = \frac{h_e T_a + h_r T_r}{h_e + h_r}$$

Les coefficients d'échange par rayonnement h_r étant légèrement supérieurs aux coefficient d'échange par convection h_c , on peut considérer, en première approximation, que :

$$\frac{h_e}{h_e + h_r} \approx 0,4$$

$$\text{et } \frac{h_r}{h_e + h_r} \approx 0,6$$

ce qui entraîne une formulation plus simple de T_{op} :

$$T_{op} = 0,4 T_a + 0,6 T_r$$

De la température opérative, certains abaques tels que ceux établis, notamment par FANGER (Université du Danemark) donnent la température opérative optimale (correspondant à 80 % de gens satisfaits) en fonction du taux de métabolisme de l'individu lié à l'activité et de la résistance thermique de l'habillement. On peut ainsi déterminer si une ambiance sera confortable en fonction du type d'occupation envisagé et de la température opérative.

Dans une étape ultérieure, connaissant tous les paramètres physiques intervenant sur la sensation de confort, il serait possible d'évaluer le bilan énergétique d'un individu, la sudation et la mouillure.

En première approximation, nous nous en tiendrons seulement à la température opérative comme indice de confort des ambiances intérieures. Néanmoins, nous avons mis au point, dans le cadre d'une étude spécifique sur le confort, un programme de calcul du bilan thermique d'un individu en fonction des paramètres physiologiques et climatiques. L'évaluation est réalisée sur la base des travaux menés au C.N.R.S. de Strasbourg. Bien que ce programme ne soit pas encore suffisant pour une caractérisation du confort dans toutes les conditions climatiques, il est toujours possible d'intégrer, dans ce programme, les données climatiques tirées de la simulation thermique pour étudier l'influence des différents paramètres sur le confort.

CONCLUSION

La présente recherche sur le développement de modules complémentaires au logiciel de simulation thermique SIMULA a permis de concrétiser et de généraliser les procédures de simulation utilisées dans la version actuelle du logiciel. Plus précisément, elle met en évidence l'intérêt de la méthode analytique de calcul en régime périodique établi pour aborder toutes conditions de simulation où les paramètres et les données climatiques sont variables au cours du temps. Grâce à la paramétrisation de la période fondamentale et du nombre des harmoniques, le programme aborde simplement et, par une procédure unique et avec la précision souhaitée, les différents types de régime, permanent, périodique et variable ; on élargit ainsi considérablement le champ des applications liées au bâtiment.

Parallèlement à cette généralisation du logiciel, un certain nombre de modules ont été, soit améliorés, soit développés. Ainsi, pour la détermination des coefficients d'amortissement et de déphasage des parois, le module de calcul COFREP permet tout à la fois une réduction considérable du temps de calcul par rapport au précédent code de calcul et son intégration directe dans le logiciel de simulation proprement dit. Il élimine alors, pour l'utilisateur, une tâche préalable nécessaire lors de la définition des parois, le libérant, par le fait même des contraintes, notamment au niveau des connaissances théoriques, liées à ce type d'opération.

La non-stationnarité des éléments de couplage entre ambiances a également été envisagée pour satisfaire un certain nombre d'exigences correspondant à la simulation réaliste de phénomènes thermiques du bâtiment. Ainsi, le renouvellement d'air à débit variable au cours du temps et différencié suivant les ambiances devient, du fait même des techniques de renouvellement d'air et de la réglementation thermique, une contrainte importante de la simulation en régime variable. Il en est de même pour le changement de structure des parois au cours du temps telles que les protections isolantes devant les vitrages durant la nuit.

A cet égard, la procédure itérative envisagée ici pour aborder ce type de problème semble poser quelques difficultés pour l'obtention rapide de la convergence et de la précision voulue. Il paraît souhaitable d'approfondir le mode de calcul permettant la recherche analytique de la solution, analogue à celui utilisé dans le logiciel SIMULA. Il en résulterait vraisemblablement un gain considérable aux niveaux des temps de calcul et de la précision ; en contrepartie, l'encombrement mémoire plus important nécessiterait une résolution par sous-ensembles de la matrice de calcul. En tout état de cause, cette procédure doit être optimisée au mieux puisqu'elle serait utilisée par toutes les conditions de simulation rencontrées.

On peut signaler également le développement important consacré par cette recherche aux questions d'ensoleillement et de rayonnement solaire. Il correspond, d'une part, à la volonté de réduire les temps de préparation des données solaires pour la simulation thermique, d'autre part, au souci de traiter et de simuler les sollicitations en flux solaires à l'extérieur comme à l'intérieur des ambiances du bâtiment de manière plus rigoureuse et plus conforme aux phénomènes réels.

Ainsi, le logiciel TACHE, mis au point à cet effet, résoud, par une procédure unique reposant sur les algorithmes de visualisation et d'élimination des parties cachées pour des scènes tridimensionnelles, les masques au soleil et les taches lumineuses au cours du temps pour l'ensemble des parois du bâtiment à simuler. L'utilisateur doit alors fournir la définition géométrique des parois et de tous les objets de l'environnement susceptibles, soit de masquer, soit de recevoir le soleil. Les parois transparentes (vitrages) intégrées au traitement permettent d'obtenir la répartition des flux directs transmis sur les parois à l'intérieur du bâtiment, en tenant compte des affaiblissements du rayonnement solaire incident reçu.

A partir des résultats obtenus par le logiciel TACHE, une procédure de détermination automatique des sollicitations en flux solaire est mise en oeuvre pour toutes les parois du bâtiment simulé. Elle prend notamment en compte les flux réfléchis non absorbés par les parois irradiées et les flux diffus transmis par les vitrages extérieurs. Au cours de la réflexion et de la diffusion, les caractéristiques de transmission des parois sont également traitées et permettent des distributions de flux d'une ambiance à une autre. Pour le calcul, le programme utilise les données d'ensoleillement et les caractéristiques thermiques des parois

au rayonnement solaire fournies par l'utilisateur. La préparation du jeu de données de la simulation est alors réduite à la définition géométrique des parois du bâtiment, de leurs caractéristiques thermiques et des conditions de simulation (type de climatisation des ambiances, données d'ensoleillement et température d'air extérieure).

L'intégration des nouveaux modules de calcul et les développements apportés au logiciel de simulation SIMULA implique à terme une restructuration globale du logiciel, tant au niveau de la base de données qu'à celui des algorithmes de calcul utilisés. Elle permettrait de constituer une nouvelle version du logiciel, performante sur le plan des calculs et couvrant un large éventail d'applications, dont le développement et la diffusion serait possible sur les nouveaux micro-ordinateurs disponibles sur le marché.