

Fruit des travaux du laboratoire de recherche de l'école d'Architecture de Nancy, le logiciel Simula constitue un code de simulation thermique en régime variable, applicable à un bâtiment décomposé en plusieurs zones thermiques. La prise en compte de l'énergie thermique associée à un traitement précis des flux solaires au travers des baies vitrées en fait un outil performant en matière d'économie d'énergie et de confort d'été.

Le logiciel Simula a été mis au point à partir des travaux de recherche développés au Cerma, laboratoire de recherche de l'école d'Architecture de Nantes, dans le domaine de la simulation thermique et de l'ensoleillement. La version opérationnelle du logiciel a été réalisée en 1990 à la demande de l'Iptic (Institut de promotion des techniques de l'ingénierie et du conseil), organisme de promotion des techniques nouvelles au sein de la CICF (Chambre des ingénieurs conseils de France), pour répondre aux besoins des bureaux d'études affiliés à cet organisme.

Les exigences en matière de simulation évoluent et ne permettent plus de se contenter d'une simple évaluation des besoins de chauffage, souvent accessibles par des calculs en régime permanent. Les préoccupations liées à la recherche de bonnes conditions de confort aux diverses saisons autant qu'à une bonne gestion énergétique des projets imposent de prendre en compte de manière réaliste les diverses dispositions passives de la conception architecturale et d'analyser le bâtiment comme un système thermique dynamique.

Simula constitue, dans ce contexte, un code de simulation thermique en régime variable applicable à un bâtiment décomposé en plusieurs zones thermiques. L'utilisation de la méthode « harmonique » conduit à une résolution analytique des équations de bilan pour chaque ambiance soumise à des conditions diverses de température intérieure (consigne, évolution libre). L'intégration de la géométrie des parois vitrées permet d'envisager une simulation solaire exacte des flux solaires entrant dans chacune des ambiances. Enfin, l'accès sélectif à une gamme étendue de résultats offre au concepteur de nombreux moyens pour appréhender précisément la conception thermique de son projet.

### Principe de la méthode harmonique

Si un système linéaire est soumis à une sollicitation sinusoïdale de fréquence  $\omega$  donnée, la réponse en sortie du système est elle-même sinusoïdale et de même

# SIMULA

## Un logiciel de simulation thermique et solaire multizones en régime variable

Dominique GROLEAU et Christian MARENNE  
Laboratoire Cerma - Ecole d'Architecture de Nantes

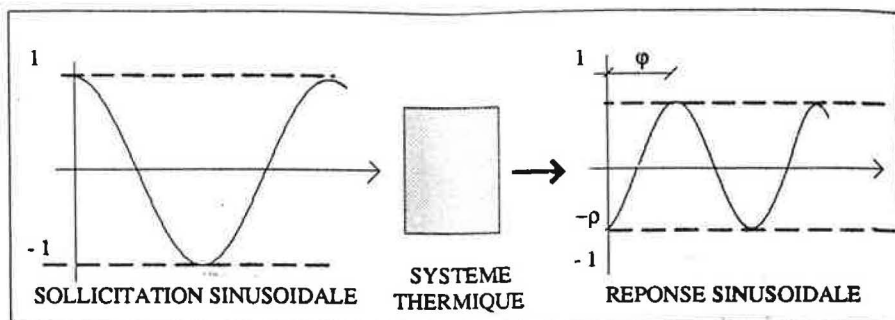


Fig. 1.

fréquence. Cependant, le signal initial est affaibli (amorti d'une valeur de  $\rho$ ) et déphasé ( $\varphi$ ). Le couple  $(\rho, \varphi)$  suffit à caractériser totalement le comportement du système (fig. 1).

La méthode harmonique, utilisée dans Simula, permet :

- de caractériser chaque élément de transfert du système par une suite de coefficients de réponses (amortissement  $\rho$ , déphasage  $\varphi$ ) pour chaque pulsation (harmonique) :

$$\omega = 2\pi / \text{Période } T$$

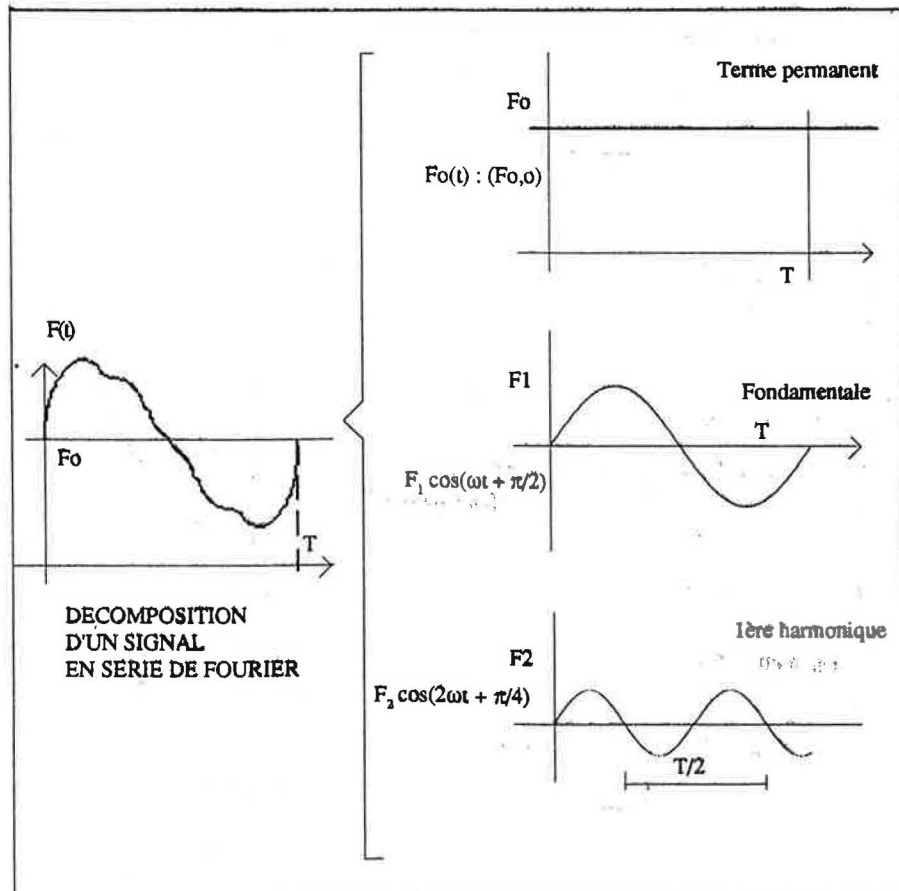
- d'obtenir la réponse d'un élément de

transfert à une sollicitation par superposition des réponses élémentaires obtenues pour chaque pulsation.

Elle impose alors une décomposition en série de Fourier des sollicitations périodiques considérées. Celles-ci se présentent sous la forme d'une somme d'un terme constant et de composantes sinusoïdales dont les périodes sont des sous-multiples de la période fondamentale  $T$  considérée (fig. 2).

$$F(t) = F_0 + \sum_{k=1}^n F_k \cos(k\omega t + \delta_k)$$

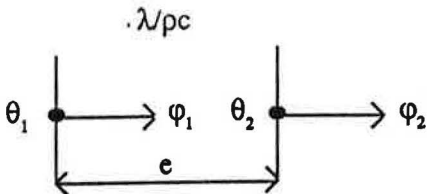
Fig. 2.



La précision de la décomposition dépend théoriquement du nombre d'harmoniques retenu et de la variation effective de la sollicitation. En pratique, le passage par le système thermique n'affecte qu'un nombre réduit d'harmoniques ; les premières sont prépondérantes. Le comportement statique du système est, quant à lui, caractérisé par le seul terme constant de la décomposition (indépendant du nombre d'harmoniques considérées) qui exprime le contenu énergétique du système sur la période de simulation.

## Réponse harmonique d'une paroi multicouche

Pour résoudre commodément l'équation de la conduction unidirectionnelle dans le cas d'une paroi monocouche d'épaisseur  $e$  et de diffusivité  $a = \lambda/\rho c$ , on utilise la forme complexe des températures et des flux.



La température  $\theta_2$  et la densité du flux  $\phi_2$  à la sortie de la paroi sont reliées à la température  $\theta_1$  et à la densité de flux  $\phi_1$  appliquées sur la face avant de la paroi, par la relation suivante écrite sous forme matricielle :

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

avec

$$\begin{aligned} M_{11} &= \text{ch}[(1+i)e/\alpha] ; \\ M_{12} &= -(1-i)/2 \cdot \text{sh}[(1+i)e/\alpha] ; \\ M_{21} &= -(1+i)\lambda/\alpha \cdot \text{sh}[(1+i)e/\alpha] ; \\ \alpha &= \sqrt{2a/\omega} ; i^2 = -1 \end{aligned}$$

Pour une paroi composite de  $n$  couches en contact, on évalue successivement les flux échangés d'une couche à l'autre par la méthode précédente. Cela revient à construire, pour la paroi, une matrice de transfert harmonique, égale au produit matriciel des matrices de chacune des couches :

$$M_p = M_n \times M_{n-1} \times \dots \times M_1$$

Ce produit, non commutatif, traduit physiquement l'ordre des couches de la paroi. Suivant le type de sollicitation appliqué (température, flux solaire), on obtient simplement, pour chaque pulsation, les termes ( $\rho_k, \phi_k$ ) caractéristiques de la réponse de la paroi.

## Réponse harmonique du bâtiment

La simulation thermique doit permettre de déterminer, en fonction du temps, sur la période considérée, la réponse de chaque zone thermique aux diverses sollicitations climatiques extérieures et aux conditions intérieures. La réponse harmonique, sous la forme de coefficient d'amortissement  $\rho$  et de déphasage  $\phi$ , doit être étendue à tous les transferts pris en compte dans le bâtiment :

– les échanges d'air (renouvellement, infiltrations) se caractérisent par un échange de chaleur instantané, soit un déphasage nul et un amortissement égal au débit massique ;

– les échanges par les parois purement résistives correspondent à un terme d'amortissement égal au coefficient  $K$  de la paroi et à un déphasage nul. Si le coefficient est variable au cours du temps, les coefficients d'amortissement sont à calculer pour chaque pulsation ;

– la capacité calorifique  $C$  de l'air intérieur ; pour chaque pulsation  $\omega k$ , l'amortissement vaut  $C\omega k$  et le déphasage est  $\pi/2$  ;

– les apports internes constituent un cas limite d'une réponse non amortie et non déphasée.

Suivant le type de transfert, les coefficients s'appliquent aux différents termes de la décomposition des sollicitations en jeu : températures d'air de chacune des zones, flux solaires, sources internes.

Si le bâtiment est constitué de  $N$  zones, le bilan thermique de chaque zone  $L$  s'écrit :

$$\sum_{l=1}^N A_{l1} \cdot X_l + B^L = P^L$$

où  $X_l$  est la décomposition en série de Fourier des températures d'air des  $N$  zones

$A_{l1}$  la matrice des coefficients cumulés d'amortissements et de déphasage des éléments des transferts dus aux différences de températures

$P^L$  la décomposition des puissances fournies dans le local

$B^L$  la décomposition des flux solaires apportés dans l'ambiance

La réunion des équations de bilan pour chacune des zones constitue un système matriciel qui s'écrit pour  $N$  locaux et  $n$  harmoniques sous la forme schématique suivante  $A \cdot X = B$  (fig. 3).

La résolution de ce système permet de déterminer indifféremment, sous forme décomposée, les températures

d'air ou les puissances de climatisation suivant les conditions imposées dans chacune des zones.

## La modélisation thermique du bâtiment

Reposant sur la notion de couplage thermique entre locaux, la modélisation du bâtiment est exprimée dans Simula par trois types d'éléments :

- les ambiances
- les couplages,
- les éléments de transfert.

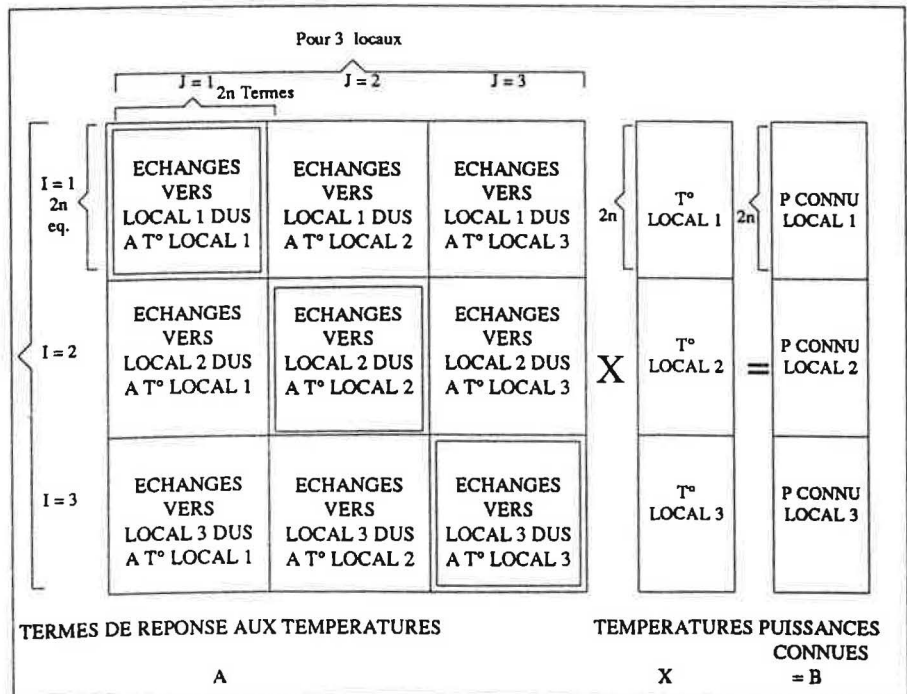
Les ambiances sont les éléments volumétriques à température d'air homogène. Elles correspondent aux diverses zones climatiques extérieures et intérieures (ambiance extérieure, pièce, ensemble de pièces...) qui peuvent être régulées différemment. La « régulation » exprime en fait des conditions sur la température d'air de l'ambiance :

- imposition d'un profil de température ; le logiciel calcule alors la puissance de climatisation (chaud, froid) nécessaire pour maintenir la température ;
- consigne minimale ou maximale ; le logiciel évalue les puissances de chaud ou de froid pour assurer la consigne de température et détermine la température d'air en cas de dépassement de la consigne ;
- évolution libre ; aucune contrainte n'est imposée sur la température qui sera calculée par le programme.

Les couplages mettent en relation thermique deux ambiances. Ils fixent les conditions d'échanges thermiques (quelles sollicitations, quels transferts) pour chacune des ambiances couplées. Un couplage est donc défini par un élément de transfert situé entre deux ambiances et soumis à des sollicitations.

Les éléments de transfert établissent les caractéristiques du transfert thermique sous forme de coefficients d'amortis-

Fig. 3.



sement et de déphasage qui sont indépendants de l'environnement climatique. On peut distinguer :

- les transferts de type *paroi* ; les échanges sont régis par les caractéristiques thermophysiques de la paroi (paroi résistive, inerte, vitrages...);
- les transferts de type *échange d'air* ; ils définissent des échanges thermiques instantanés correspondant à un débit d'air transmis d'une ambiance vers une autre ;
- les transferts de type *source* ; ils permettent d'affecter, directement à une ambiance, une puissance intérieure disponible (éclairage, occupation...);
- les transferts de type *capacité* qui permettent d'introduire dans une ambiance des éléments purement capacitifs (air de l'ambiance, par exemple), ou considérés comme tels (meublier léger), réagissant instantanément aux fluctuations de la température d'air.

Les éléments de transferts sont définis dans une bibliothèque ; ils contribuent donc à la modélisation thermique de plusieurs projets.

Le bâtiment est alors modélisé thermiquement par les éléments à température homogène (ambiances) connectés entre eux par les couplages thermiques. Le système est fermé par les ambiances et chaque couplage fait référence à un élément de transfert spécifique. On peut le représenter par le schéma de la figure 4.

## La modélisation géométrique

Conçu comme un outil d'aide à la conception thermique passive du projet, le logiciel Simula favorise la prise en compte solaire des composantes du bâtiment telles que l'orientation des parois, la compacité, l'inertie, la dimension et l'implantation des baies vitrées.

Pour que la simulation solaire soit suffisamment réaliste, la modélisation thermique des parois vitrées peut être complétée par une définition géométrique. Celle-ci exprime, sous forme de coordonnées dans un repère 3D, la géométrie des parties vitrées et des masques, associée au couplage « paroi vitrée » correspondant.

Le niveau de précision de la modélisation géométrique est fonction des dispositifs proposés dans le bâtiment et des effets recherchés. Trois types de définition géométrique, qui peuvent être combinés au sein d'une même modélisation, sont proposés à l'utilisateur :

- une géométrie « *réduite* » où l'utilisateur fournit orientation et inclinaison de la paroi ainsi que son facteur de masque au cours du temps. On utilisera ce type pour des fenêtres sans grande incidence sur les flux solaires entrants (vitrage de dimension réduite ou orientation solaire peu intéressante) ;
- une géométrie « *de fenêtre* » où sont donnés, pour un couplage vitré, forme et positionnement des vitrages et des parties opaques ; le logiciel évalue alors précisément le facteur de masque suivant un pas de temps donné. Ce type permet de traiter un plan de vitrage en contact avec l'extérieur en lui associant les masques propres de la baie, ceux du bâtiment ou de l'environnement (fig. 5) ;

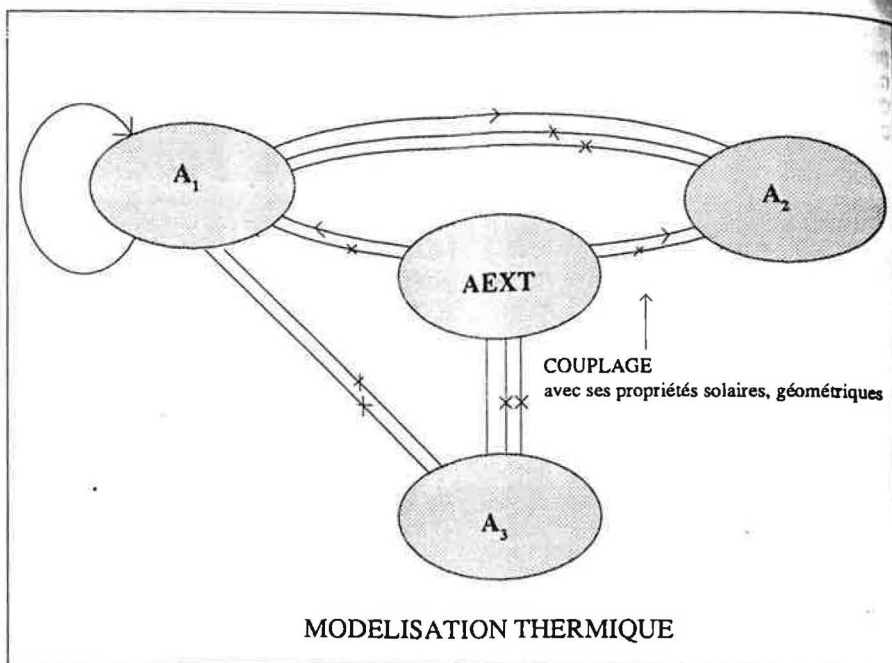


Fig. 4.

- une géométrie « *de bâtiment* » qui met en jeu plusieurs plans de vitrages associés à différents couplages vitrés et de masques. L'évaluation du seul facteur de masque ne suffit plus ; il est nécessaire de suivre le rayon solaire au niveau des vitrages pour déterminer toutes les composantes transmises, absorbées et réfléchies et gérer les flux solaires correspondants (fig. 5).

Ce type de géométrie correspond par exemple à un espace vitré (serre) situé devant des espaces de séjour.

Les géométries de « *fenêtre* » et de « *bâtiment* » sont construites à partir de bibliothèques d'éléments géométriques définis par l'utilisateur, tels que fenêtres simples, fenêtres composées et masques. Des utilitaires de visualisation (axonométrie, vue héliodone) permettent de vérifier et d'analyser les géométries modélisées.

L'ensemble des géométries référencées par les couplages « *parois vitrées* » de la modélisation thermique constitue la modélisation géométrique du bâtiment.

## La simulation solaire

La simulation solaire dans Simula consiste, à partir des différentes géomé-

tries de couplages parois de la modélisation thermique, à définir et à calculer à chaque instant de la période considérée :

- les flux solaires globaux (direct et diffus), sollicitations en flux appliquées de part et d'autre de chaque paroi, en utilisant :

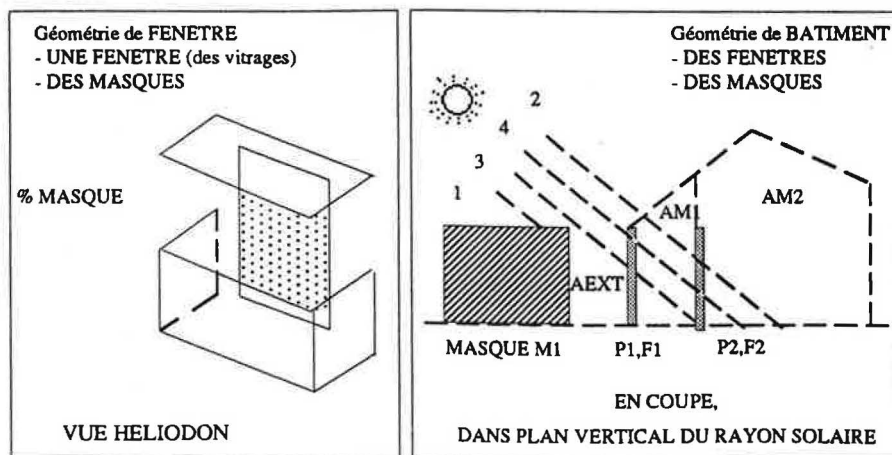
- les flux directs transmis par les vitrages dans chaque ambiance, et récupérés en absorption par les parois et réfléchis vers l'ambiance ;
- les flux diffus disponibles dans chaque ambiance et distribués de façon isotrope sur les parois d'ambiances.

Finalement, suivant le type de parois, réceptrices de ces flux, la réponse aux sollicitations du flux est évaluée et permet d'obtenir la restitution des apports solaires dans les ambiances tout au long de la période simulée. Considérés alors comme des apports internes, ils participent au bilan résultant (puissance de climatisation, températures d'air) de la simulation thermique.

La simulation du flux direct est réalisée pour chaque géométrie de fenêtre ou de bâtiment indépendamment.

Pour une géométrie de fenêtre, il suffit de déterminer le pourcentage de masque du vitrage. C'est un problème géométri-

Fig. 5.



que qui exprime le rapport de la surface ensoleillée à la surface totale de la baie vitrée. Pour réaliser cette opération, on utilise des méthodes numériques de calcul d'image. Ainsi l'image Héliodon d'une baie vitrée est analysée, grâce à une discrétisation du plan de vue, pour déterminer et stocker les seuls éléments visibles, donc ensoleillés, de l'image (fig. 6). L'évaluation du nombre d'éléments de grille pour le vitrage avant application des masques, et après, conduit directement au facteur de masque de la baie vitrée. Il est ensuite aisé de déduire le flux solaire transmis et absorbé par les vitrages associés à la géométrie simulée.

En géométrie de bâtiment, la dissociation du problème géométrique (recherche des masques) et du problème solaire (quantification et répartition du flux solaire) n'est plus possible.

La superposition des vitrages sur le parcours solaire implique de rechercher comme précédemment les seules parties visibles des vitrages, mais en plus de gérer le cheminement du rayon solaire en chaque point de la grille de discrétisation choisie. Il est alors nécessaire de suivre la progression du flux solaire à l'intérieur de chacune des ambiances exposées au soleil et de le quantifier. Le nombre de grilles à considérer est lié aux nombres de plans de vitrage susceptibles de se superposer.

Ainsi, à chaque élément en correspondance sur les grilles de discrétisation de la vue Héliodon correspond un rayon solaire auquel est associé une valeur de flux normal, en relation directe avec la discrétisation choisie. Ce flux normal est décomposé à la rencontre d'un vitrage en trois composantes : le flux absorbé par le vitrage, le flux réfléchi vers l'ambiance dont il est issu (l'extérieur si c'est le premier plan de vitrage rencontré) et le flux transmis vers l'ambiance couplée par ce vitrage. Ce flux transmis est ensuite redécomposé de la même manière à chaque rencontre d'un nouveau plan de vitrage... Cette décomposition s'effectue suivant les coefficients solaires des vitrages et l'angle d'incidence du rayon solaire.

Ces opérations sont réalisées, pour la période considérée, en utilisant un pas de temps d'une heure.

### La simulation thermique et l'analyse des résultats

La simulation s'effectue en deux temps en réalisant :

- la simulation solaire : elle détermine les apports solaires disponibles en fonction du temps dans les différentes ambiances ;

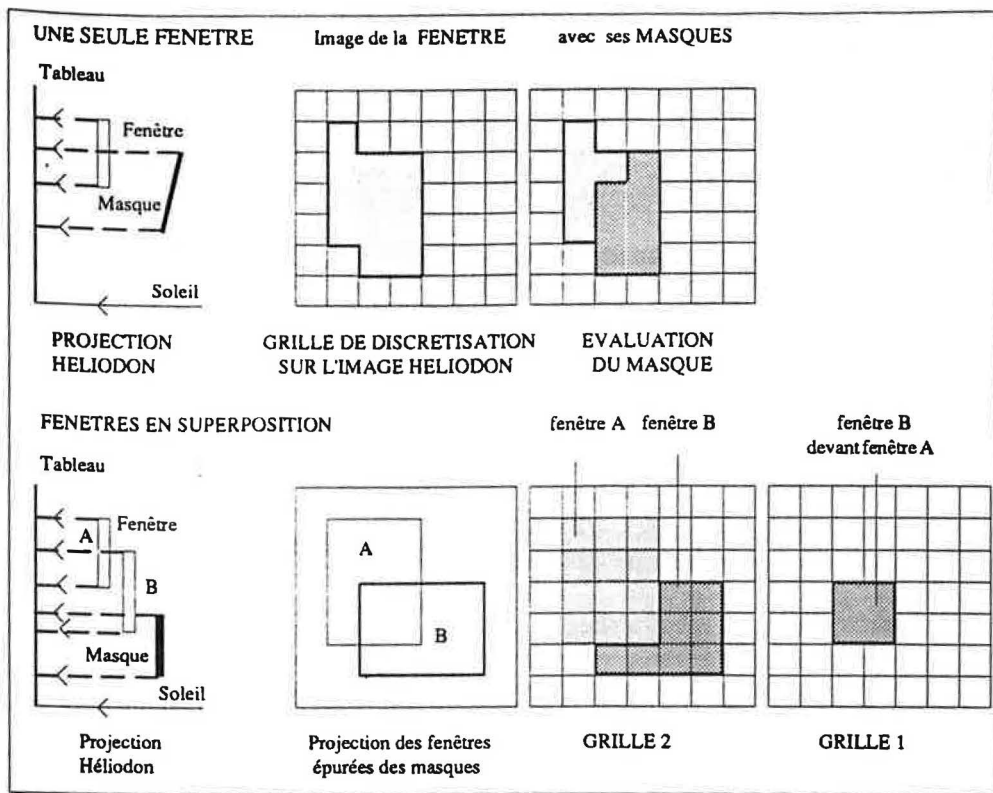


Fig. 6.

- la simulation thermique : elle évalue les puissances de climatisation ou les températures d'air suivant le type de régulation de l'ambiance, température imposée ou évolution libre.

Les conditions de simulation sont données par une séquence climatique (une ou plusieurs journées) définie dans une bibliothèque « climat ». Elles indiquent les températures d'air à maintenir dans les ambiances ainsi que le profil de la température d'air extérieur pour la période considérée. Les conditions solaires sont simplement établies par la date (jour, mois) du début de la séquence et l'évaluation de la fraction d'insolation au cours de cette même séquence. La latitude est une caractéristique du projet.

Trois niveaux de résultats sont accessibles rapidement :

- température d'air et puissances de climatisation des ambiances (chaud et froid) ;
- puissance par poste des ambiances : les différents échanges (apports ou pertes) sont regroupés par poste tel que paroi, vitrage, plancher, échanges d'air et permettent un examen plus détaillé du bilan thermique des ambiances ;
- analyse des couplages : l'examen est alors beaucoup plus précis puisqu'il est alors possible d'analyser le comporte-

ment thermique d'un seul ou de plusieurs éléments du bâtiment (analyse d'une paroi, par exemple, avec ses sollicitations en température et en flux solaire et ses réponses correspondantes).

Cette souplesse d'interrogation des résultats permet de réaliser une analyse fine du comportement thermique du bâtiment et d'interagir, en modifiant les paramètres de la modélisation ou des séquences climatiques, sur la conception thermique du bâtiment simulé.

### Conclusion

L'optimisation des algorithmes de calcul, en taille mémoire comme en temps de calcul, permet l'implantation du logiciel Simula dans l'environnement informatique des micro-ordinateurs. Conçu pour la simulation du projet en régime variable, il s'attache à réaliser une analyse fine du comportement thermique du bâtiment, en interaction directe avec les paramètres d'enveloppe et les dispositions intérieures du bâtiment étudié. La prise en compte de l'inertie, avec un traitement précis du flux solaire au travers des baies vitrées, en fait un outil performant dans le domaine de l'économie d'énergie et de la recherche du confort d'été

## CONCOURS « OPTICLIM » : Conception et optimisation des bâtiments tertiaires climatisés

L'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe) organise dans les régions Alsace, Lorraine et Provence, Alpes, Côte-d'Azur le concours « OPTICLIM » destiné à promouvoir la réalisation de bâtiments tertiaires énergétiquement performants, confortables été comme hiver et économes en énergie.

Ainsi 10 projets de bâtiments climatisés, publics ou privés, bénéficieront d'une prestation exceptionnelle : la réalisation gratuite de leur « optimisation énergétique », grâce à des outils informatiques extrêmement pointus et très peu connus en France.

Date limite de dépôt des dossiers de candidatures : 15 mai 1992

Retrait des dossiers de candidature et renseignements complémentaires à l'Ademe : Délégation Alsace, tél. 88.32.67.68, Pierre FISCHER - Délégation Lorraine, tél. 87.74.05.23, Marc VOLPIANI - Délégation Provence Alpes Côte d'Azur, tél. 91.78.91.85, Jack FIOL.