

OUTIL DE SIMULATION THERMIQUE DU BATIMENT, COMFIE

Thierry Salomon, Renaud Mikolasek¹ et Bruno Peuportier²

¹ *IZUBA Energies, 22 Bd Foch, 34140 Mèze*

² *Ecole des Mines de Paris, CEP, 60 Bd St Michel, 75272 Paris Cedex 06*

RESUME.

COMFIE est un logiciel permettant de réaliser des simulations dynamiques de l'enveloppe du bâtiment dès les premières esquisses d'un projet. Le calcul consiste à réduire un modèle aux différences finies par analyse modale, les phénomènes non linéaires ou à paramètres variables étant introduits en phase de simulation. Il est associé à PLEIADES, une interface développée et diffusée par IZUBA énergies. Cet outil a été amélioré et complété par la génération de fichiers météo horaires (module METEOCALC), la visualisation des masques à l'ensoleillement, l'extension à 20 zones thermiques, l'analyse par variations paramétriques et la visualisation graphique comparative. Le logiciel a également été enrichi d'ALCYONE, un module de saisie graphique par niveau avec visualisation 3D permettant d'accélérer considérablement la saisie des projets. Déjà utilisé par environ 130 architectes, assistant HQE à la Maîtrise d'Ouvrage HQE, BET et organismes de formation, PLEIADES + COMFIE a été confronté avec succès à des outils plus lourds (procédure Bestest de l'Agence Internationale de l'Energie par exemple).

MOTS-CLÉS : bâtiment, énergie, simulation thermique

ABSTRACT.

COMFIE performs hourly simulations of buildings, in order to provide mechanical, energy and architectural engineers or architects with accurate estimates of a building's energy needs and temperature profiles. The zone models of COMFIE (Calcul d'Ouvrages Multizones Fixé à une Interface Experte) are based upon a finite volume method on which a modal reduction technique is applied. The output comprises the yearly and hourly heating (possibly cooling) loads, hourly and mean temperatures in the thermal zones. The software is associated with PLEIADES, a user interface developed by IZUBA Energies. This tool has been improved and complemented with climatic data generation (METEOCALC module), visualization of shading, extension to 20 zones, parametric studies and comparative graphs (e.g. temperature profiles and histograms, heating or cooling loads). A 2-3D modeller, ALCYONE, reduces the time needed by the geometric description. Already used by around 130 architects, green building consultants, engineers and educational organisations, PLEIADES + COMFIE has been compared to more detailed models (Best Test procedure of the International Energy Agency).

KEYWORDS : building, energy, thermal simulation

1. INTRODUCTION

A la fin des années 80, deux types d'outils existaient pour étudier la performance thermique des bâtiments : les méthodes simplifiées (bilans mensuels comme celui de la réglementation thermique 1988), et les outils détaillés (TRNSYS, DOE2, ESP...) très peu utilisés par les professionnels car trop coûteux en temps de saisie et d'apprentissage. C'est dans ce contexte qu'a été développé COMFIE, grâce aux techniques de réduction de modèle développées au Centre d'Energétique (Bacot, 1984), (Peuportier, 1988), (Blanc Sommereux, 1989).

L'objectif est d'étudier la pertinence des approches « bioclimatiques », en particulier de concepts comme l'isolation transparente et les vérandas, à la fois en terme d'économie d'énergie et de confort. En effet certaines réalisations solaires des années 70 avaient constitué des contre références à cause de

fortes surchauffes d'été. Il est donc nécessaire d'étudier à la fois les besoins de chauffage et les évolutions de température, ce que ne permettent pas les méthodes simplifiées. D'autre part, la simulation permet de calculer de manière plus précise les apports solaires utiles en fonction de l'inertie du bâtiment, et de prendre en compte les échanges entre zones.

L'approche a pu paraître décalée dans un contexte d'énergie bon marché. Elle a néanmoins intéressé quelques concepteurs pionniers, et une première interface utilisateurs conviviale a été développée sur Macintosh.

L'idée de prendre en compte les aspects environnementaux dans la conception des bâtiments a fait son chemin, avec la médiatisation apportée par l'association HQE. Même si cette association ne fait pas la promotion de la simulation thermique, les exigences en matière de confort conduisent un nombre croissant de concepteurs à utiliser cette méthode. Le développement de l'interface PLEIADES a facilité l'usage et donc la diffusion de COMFIE parmi les professionnels.

2. PRINCIPES DE LA MODELISATION

Dans l'analyse thermique d'un bâtiment, un outil en dynamique est nécessaire pour modéliser le stockage de chaleur et évaluer les gains solaires utiles. Dans cette famille d'outils, les modèles aux différences finies sont les plus généraux car ils peuvent prendre en compte des phénomènes très variés. Développés sur micro-ordinateurs, les outils de ce type à usage professionnel étaient dans les années 80 limités au cas monozone (une température d'air unique dans tout le bâtiment). On peut citer par exemple CASAMO (Watremez, 1985).

Grâce aux techniques de réduction de modèles, il a été possible de décrire plus finement un bâtiment, en considérant plusieurs zones thermiques. Nous présentons ici une simulation simplifiée, dans laquelle un modèle aux différences finies a été réduit par analyse modale. Cette méthode a été initialement développée pour la mécanique avant d'avoir été appliquée à la thermique (Carter, 1979). La théorie a été complétée (Bacot, 1984) pour donner lieu à diverses applications en thermique du bâtiment (Neveu, Lefebvre, Salgon, Sicard, 1987).

Les principaux phénomènes liés à l'évolution thermique des bâtiments peuvent être représentés ou approximés par des équations linéaires. Lorsqu'on peut isoler un tel système linéaire, il est possible d'appliquer l'analyse modale. On obtient alors une modélisation simplifiée des phénomènes linéaires. Cette simplification est un peu coûteuse en temps calcul car il faut diagonaliser une matrice et effectuer un changement de base. Si le système linéaire ne varie pas ou si la période de simulation peut être découpée en un nombre restreint d'intervalles sur lesquels le système est invariable, l'investissement en temps est rentabilisé car la réduction du modèle accélère la simulation.

Mais il existe aussi des phénomènes représentés par des équations non linéaires (par exemple la convection naturelle), et d'autre part le système linéaire peut être variable (la fermeture d'un volet augmente la résistance thermique d'une fenêtre). Nous avons donc séparé ces équations du système linéaire fixe, et nous les avons couplées en phase de simulation au modèle modal réduit. Pour assurer l'homogénéité de la modélisation, les phénomènes non linéaires ont été pris en compte par des équations simplifiées.

2.1. PRINCIPALES HYPOTHESES ET LIMITES DU MODELE

Le modèle repose sur le concept de "zone thermique", sous-ensemble du bâtiment considéré à température homogène. Si dans le cas général, cette description est une bonne approximation de la réalité, le modèle ne convient plus pour des pièces de grande hauteur dans lesquelles l'air est stratifié (exemple des atriums). Dans le futur, il sera peut-être possible de diviser ces pièces en plusieurs zones (par exemple rez-de-chaussée et mezzanine) et de considérer un échange d'air interzones calculé de manière simplifiée, mais cela n'est pas réalisé pour le moment.

Les équations de mécanique des fluides ne sont pas intégrées dans notre démarche de simulation simplifiée. Les échanges d'air sont donc approximés par des corrélations (Blay, 1986). Les infiltrations d'air ne sont pas calculées, car il faudrait connaître la distribution des vitesses et directions du vent sur le site même du bâtiment une fois construit, ce qui pose problème. Des indications sont données pour évaluer les échanges d'air en fonction de la configuration.

Les transferts convectifs et radiatifs au niveau des surfaces des parois sont combinés dans un coefficient d'échange "h" unique. La conséquence est que la température de zone n'est pas une température d'air, mais se rapproche de la température résultante, pondération de la température d'air et des températures des parois. Cette température est un bon indicateur du confort thermique, et nous supposons que l'occupant règle le thermostat pour obtenir une température résultante confortable : il peut compenser un effet de paroi froide en augmentant un peu la consigne. C'est donc la température résultante qui est régulée et non la température d'air.

Le rayonnement solaire entrant dans une zone par les vitrages est réparti sur les différentes parois opaques au prorata des surfaces, après avoir déduit, en fonction des facteurs d'absorption, la fraction redirigée vers l'extérieur. On considère donc ce rayonnement comme diffus, sans suivre la "tâche solaire". Il est difficile de savoir comment les espaces seront meublés, et en pratique le rayonnement direct est réfléchi par les meubles. La répartition du flux, considéré comme diffus, est donc sans doute une hypothèse assez réaliste.

Comme on l'a vu au paragraphe précédent, les phénomènes non linéaires ou à paramètres variables sont découplés du système linéaire fixe. Cela peut introduire des écarts sur les dynamiques rapides. En fait, l'outil est utilisé en pratique avec un pas de temps d'une heure lorsqu'on évalue des besoins de chauffage/climatisation, et d'un quart d'heure à un dixième d'heure lorsqu'on souhaite obtenir des profils de température plus précis (étude de l'intermittence ou du confort d'été). L'analyse n'est donc pas poussée jusqu'aux intervalles de temps très fins, des modèles plus détaillés seraient nécessaires.

Les mécanismes de changement de phase ne sont pas pris en compte dans le modèle actuel, en ce qui concerne l'humidité ou le stockage par chaleur latente. La prise en compte de l'humidité pourrait se faire par des bilans enthalpiques pour chaque zone, d'une manière analogue à la prise en compte actuelle des échanges d'air. L'intégration de matériaux à changement de phase serait plus problématique, car leur couplage thermique avec le reste de l'enveloppe ne concerne pas que la température de zone. En effet, ils peuvent être intégrés dans une paroi. Des sorties supplémentaires sont alors nécessaires pour déterminer les températures d'interface (ce qui ne pose pas de problème, comme l'a montré une autre étude concernant des murs solaires).

Il ne semble donc pas que l'étape de réduction modale soit un frein pour la prise en compte des phénomènes complexes décrits ci-dessus, problèmes communs à tous les outils de simulation. Les

avantages des modèles réduits en terme de réduction du temps de calcul permettent de décrire plus finement le bâtiment (nombre de zones) et/ou d'effectuer des études de sensibilité plus complètes.

2.2. ALGORITHME DE RESOLUTION

La constitution d'un modèle aux différences finies est assez classique (Neveu, 1984), elle est menée ici pour chaque zone. Les parois sont décomposées, en monodimensionnel, en mailles sur lesquelles un bilan thermique est écrit en supposant la température uniforme. Pour que cette hypothèse d'uniformité ne s'écarte pas trop de la réalité, il faudrait en théorie découper en mailles très fines. Or l'objectif est de réduire le temps de calcul pour s'adapter à la pratique professionnelle, ce qui impose des limites sur la taille du modèle. Le compromis choisi consiste à placer le petit nombre de mailles auquel on est limité de telle sorte que l'uniformité de la température soit maximale.

La première idée est de ne pas regrouper dans une maille des couches de matériaux séparées par un isolant. Ensuite, le nombre de mailles doit être plus important dans les murs massifs que dans les cloisons légères. Enfin, on s'intéresse aux températures dans les différentes zones du bâtiment, et celles-ci sont plus influencées par les faces internes des parois, elles-mêmes influencées par les variations de puissance de chauffe (équipement régulé, intermittence,...), que par les faces externes. La possibilité a alors été donnée, de définir des mailles plus fines à la surface interne de la paroi. Une raison géométrique r relie l'épaisseur des mailles successives: si e est l'épaisseur de la maille la plus interne, sa voisine a pour épaisseur $r.e$, la suivante $r^2.e$, etc... La valeur de r peut être modifiée, comme celle du nombre n de mailles placées dans les murs massifs.

Etant définies en fonction de n et r , les mailles ne correspondent en général pas à des couches de matériaux. Les propriétés physiques des différents matériaux constituant une maille sont alors combinées: les inerties et les résistances thermiques sont additionnées.

On dispose donc d'un mailleur paramétrable (en fonction de n et de r), ce qui permet de construire des modèles plus ou moins fins. Ce maillage peut être qualifié d'automatique: les parois sont "auscultées" pour déterminer le nombre de mailles et leur disposition, donc l'utilisateur n'a pas besoin de définir lui-même ces choix. Diverses valeurs de n et r ont été comparées (Peuportier et Blanc Sommereux, 1988). Pour divers types de murs, il apparaît que trois mailles sont suffisantes pour obtenir des résultats quasiment identiques (au dixième de degré près) à une référence correspondant à 20 mailles. La valeur de r est peu influente, une valeur de trois a également été choisie.

Une paroi interne à une zone est divisée en mailles de manière analogue, avec une légère différence dans le cas sans isolant ou si les deux parties séparées par l'isolant sont toutes les deux légères ou toutes les deux massives. Dans ces trois cas, tous les matériaux de la paroi sont regroupés en un matériau unique équivalent, divisé en deux parties symétriques. Le plan central est considéré comme adiabatique. On place alors n noeuds dans l'une des deux moitiés, avec une condition de flux nul au niveau du plan médian. Cela permet d'accroître la précision pour un nombre de mailles donné.

Il n'y a jamais de maille dans les isolants, car leur capacité thermique est considérée comme négligeable par rapport à celle des autres matériaux. Un isolant est donc modélisé simplement par une résistance thermique, son inertie thermique est ajoutée à celle de la ou des mailles voisines.

On ne place pas non plus de maille dans un vitrage: la surface des vitres est grande comparée à leur volume, et on suppose que le régime permanent est atteint rapidement dans ces composants. La

résistance thermique variable liée à l'usage des occultations (stores, volets,..) est prise en compte au niveau de la simulation, en introduisant une puissance de chauffe équivalente à la diminution des déperditions. L'air, le mobilier et les cloisons légères éventuelles contenues dans la zone sont regroupés dans une maille unique. En effet, on suppose que le volume des meubles est petit par rapport à leur surface d'échange, et qu'ils sont quasiment à la température de la zone.

Durant le maillage, les sollicitations sont répertoriées pour permettre leur calcul horaire ultérieur à partir des rayonnements global horizontal et diffus. Le climat est représenté par des années types, par exemple des "Test Reference Year"(Lund, 1985).

Chaque modèle de zone est ensuite réduit par analyse modale. Les études de validation ont montré, par comparaison avec un modèle non réduit, que six modes suffisent pour rendre compte du comportement dynamique des zones. Le premier mode, associé à la plus grande constante de temps, représente l'évolution globale vers le régime permanent. Les autres sont représentatifs de dynamiques plus rapides liées à des composants (murs, planchers...) et à des sollicitations, par exemple des variations quotidiennes d'ensoleillement, une puissance de chauffe régulée, etc.

Les modèles réduits sont alors couplés (Blanc Sommereux et Lefebvre, 1989). Il s'agit de rassembler les sous-systèmes matriciels de chaque zone en un modèle global de bâtiment. Les sollicitations externes sont séparées des températures d'interface, qui constituent les variables de couplage. Le système global est ensuite intégré selon le pas de temps choisi par l'utilisateur (en pratique de 6 minutes à une heure), et les variables de couplage sont éliminées.

Les phénomènes non linéaires et/ou variables sont couplés à ce modèle modal global grâce aux sollicitations de puissances injectées dans les différentes zones. Les échanges par ventilation par exemple sont donc ajoutés à la puissance de chauffage et aux apports internes de manière à constituer une sollicitation unique pour chaque zone.

2.3. *IMPLEMENTATION INFORMATIQUE*

Le logiciel est écrit en langage pascal, dans l'environnement Delphi. Un bâtiment est décrit sous la forme d'une structure d'objets reliés par des pointeurs (Peuportier et Blanc Sommereux, 1988). Les composants de base, matériaux, vitrages, revêtements de murs etc. sont combinés pour former des structures plus complexes: parois, zones, bâtiment entier. Le comportement des occupants, lié à l'utilisation du bâtiment (habitations, bureaux,...), est défini dans un scénario d'occupation, contenant les profils de températures de consigne, de ventilation et d'apports internes pour chaque jour de la semaine.

Chaque objet est relié aux autres par un pointeur: une zone thermique contient des pointeurs sur ses parois, chaque paroi contenant elle-même des pointeurs sur des vitrages, des masques, etc. La description d'un projet peut être plus ou moins complexe: une grande façade par exemple peut être découpée en plusieurs parois de zone pour évaluer plus précisément l'effet d'un masque. L'intérêt d'une telle structure est de faciliter la modification, l'addition, la suppression ou le remplacement d'un objet à n'importe quel niveau. La programmation orientée objets a permis d'ajouter des composants, par exemple : calcul d'éclairage, murs solaires, systèmes photovoltaïques et solaires thermiques.

3. L'INTERFACE PLEIADES 2004

L'environnement PLEIADES a été conçu et développé par Gefosat puis IZUBA énergie avec le soutien de l'ADEME. PLEIADES + COMFIE ont notamment été utilisés dans le cadre du programme européen SOLMI (THERMIE) et de l'action ALTENER "Développement de la simulation des ambiances pour l'architecture solaire bioclimatique" (AL/192/96/FR).

PLEIADES + COMFIE intègre plusieurs bibliothèques de données thermiques sur les matériaux et les éléments constructifs, les menuiseries, les états de surface, les albédos et les écrans végétaux. Le logiciel comprend aussi des bibliothèques de modes de gestion du bâtiment étudié selon un scénario horaire pour une semaine-type (occupation, apports internes, températures de consigne de chauffage ou de climatisation).

Chaque ouverture vitrée peut être affectée d'un masque intégré à la construction (auvent, brise-soleil etc.). Les masques lointains (relief, autres bâtiments), les obstacles à l'ensoleillement à proximité de chaque paroi (arbre, masques architecturaux) sont également pris en compte (cf. Fig. 1).

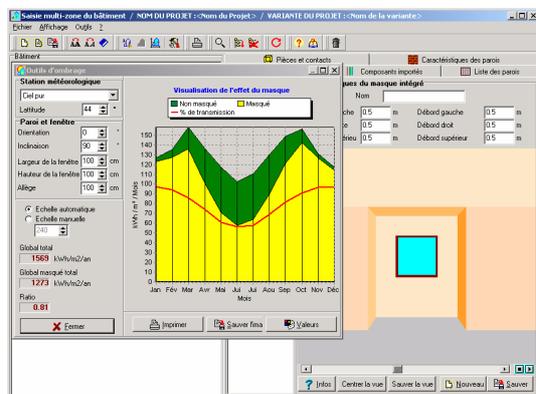


Figure 1 : analyse de l'influence d'un masque constructif

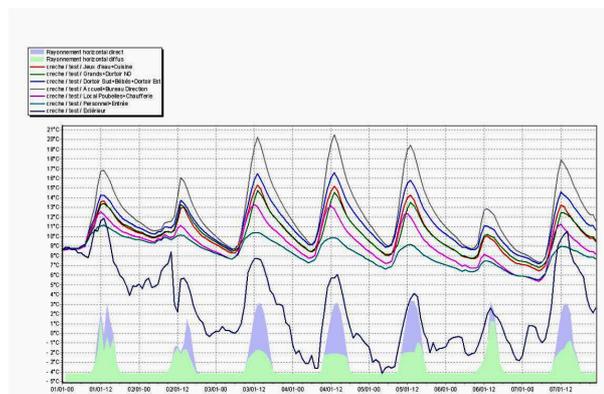


Figure 2 : courbes comparatives entre variantes

Les ventilations extérieures sont définies pour chaque zone par un scénario hebdomadaire et horaire. Il est également possible de prendre en compte différents types de ventilation interne entre les pièces : ouverture de porte avec indication de la fréquence d'ouverture ou d'une régulation, orifices de ventilation, ventilation mécanique inter zones, mur Trombe.

Les zones peuvent être à évolution libre (température flottante), ou bien thermostatées (avec une consigne de chauffage et une consigne de climatisation hebdomadaire et horaire). Dans ce dernier cas les puissances de chauffe et de rafraîchissement nécessaires pour maintenir la température souhaitée sont calculées à chaque pas de la simulation. Pour chaque zone, il est aussi possible de définir la puissance de l'équipement de chauffage et de refroidissement, l'efficacité de l'échangeur récupérateur (en ventilation double flux) et la position du thermostat (qui peut être dans une autre zone).

Un éditeur de graphes facilement paramétrable permet l'analyse graphique des résultats et la comparaison des variantes (cf. Figure 2). Une série d'indices est générée automatiquement après la simulation pour apprécier rapidement les performances du bâtiment. Ils permettent de mieux appréhender sur la période analysée les *surchauffes* (calcul de la moyenne de dépassement de température durant la période de surchauffe la plus importante), *l'amplification* (moyenne des pourcentages journaliers d'amplification de la température extérieure), *le taux d'inconfort* (pourcentage

de temps durant lequel la température a été supérieure ou inférieure à certaines valeurs), *les besoins énergétiques* (somme des besoins nets de chauffage et de rafraîchissement) et le *pourcentage de besoins nets* de chauffage par rapport aux déperditions théoriques sans apports solaires ni apports internes. Tous les résultats (analyses, valeurs et courbes) peuvent être imprimés, récupérés par copier coller, ou bien enregistrés sous forme de fichier RTF ou PICT pour exportation dans d'autres logiciels comme Word™ ou Excel™.

MétéoCalc est un module utilitaire permettant de traiter très rapidement des fichiers de données météorologiques sur les 8760 heures annuelles. Il comprend les fonctions suivantes : passage au format PLEIADES + COMFIE, visualisation des données en graphiques ou en tableau, vérification des données, avec contrôle de cohérence sur les valeurs ou les écarts aberrants, importation universelle à partir d'un fichier texte quelque soit son formatage initial, recopie de bloc de données, interpolation à partir de données trihoraires, calcul de l'ensoleillement diffus à partir du coefficient d'insolation ou de la nébulosité (octas). Enfin différents algorithmes permettent de générer des fichiers météorologiques annuels à pas horaire à partir de données mensuelles (moyenne mensuelle des températures journalière moyenne, minima et maxima et durée d'insolation), plus facilement disponibles que des fichiers horaires.

PLEIADES + COMFIE 2004 a maintenant été enrichi d'ALCYONE, un module de saisie graphique par niveau avec visualisation en 3D permettant d'accélérer considérablement la saisie des projets. Une palette d'outils très complète permet de tracer rapidement un projet, d'affecter des ouvertures (fenêtres, portes) sur les parois, de créer des masques proches, de recopier un niveau, de sélectionner les zones thermiques, de changer l'orientation, etc. Une image scannée peut être insérée en fond d'écran pour faciliter la saisie, même dès la première esquisse (cf. Figure 3).

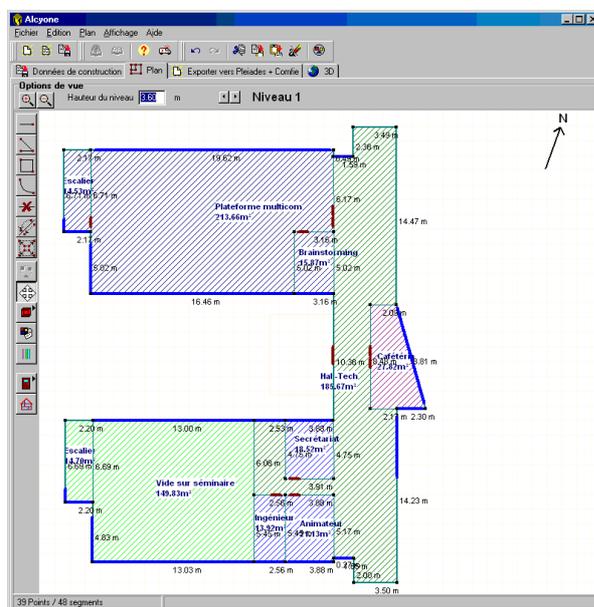


Figure 3 : saisie graphique par niveau

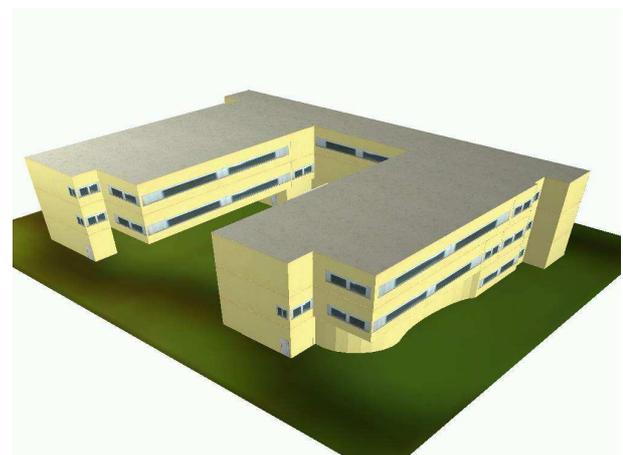


Figure 4 : visualisation 3D

ALCYONE permet également de visualiser les projets en 3D avec diverses possibilités de représentation (zoom, vues par niveau, rotation, affichage des zones thermiques, etc.). Il est ainsi possible de contrôler facilement la cohérence de la saisie, mais aussi de visualiser une première esquisse (cf. Figure 4).

4. CONCLUSION

PLEIADES + COMFIE permet à un architecte, un BET ou un maître d'ouvrage d'analyser un projet ou d'envisager une réhabilitation dans une démarche complète d'analyse thermique, depuis les premières esquisses jusqu'aux étapes plus avancées du projet. Le logiciel est chaîné à EQUER, permettant d'évaluer les impacts environnementaux par analyse de cycle de vie. Cette double approche, à la fois précise sur la maîtrise des ambiances et à large spectre sur l'environnement permet de choisir entre différentes options avec une bien meilleure connaissance du comportement interne d'un bâtiment et de son impact environnemental global.

5. BIBLIOGRAPHIE

- Patrick Bacot , Analyse modale des systèmes thermiques, Doctorate Thesis, University Paris VI, 1984
- Patrick Bacot, Alain Neveu, Jean Sicard, Analyse modale des phénomènes thermiques en régime variable dans le bâtiment, Revue Générale de Thermique, n°267, Paris, 1984
- Isabelle Blanc Sommereux, Gilles Lefebvre, Simulation de bâtiment multizone par couplage de modèles modaux réduits, CVC, n°5, mai 1989
- Isabelle Blanc Sommereux, Bruno Peuportier, a bioclimatic design aid based on multizone simulation, ISES Conference, Denver, 1991
- Dominique Blay, Comportement et performance thermique d'un habitat bioclimatique à serre accolée, Bâtiment-Energie n°45, 1986
- C. Carter, A validation of the modal expansion method of modelling heat conduction in passive solar buildings, Solar Energy 23 n°6, 1979
- Gilles Lefebvre, Analyse et réduction modale d'un modèle de comportement thermique de bâtiment, Doctorate Thesis, University Paris VI, 1988
- H. Lund, Short Reference Years and Test Reference Years for EEC countries, EEC Contract ESF-029-DK, 1985
- Alain Neveu, Etude d'un code de calcul d'évolution thermique d'une enveloppe de bâtiment, Doctorate Thesis, University Paris VI, 1984
- Bruno Peuportier, Validation of COMFIE, Rapport C.E.C., Université de Stuttgart (I.T.W.), 1989
- Bruno Peuportier, Isabelle Blanc Sommereux, Simulation tool with its expert interface for the thermal design of multizone buildings, International Journal of Solar Energy, 1988
- J.J. Salgon et A. Neveu, Application of modal analysis to modelisation of thermal bridges in buildings, Energy and buildings, october 1987
- Gabriel Watremez, Dominique Campana, François Neirac, Elaboration d'un logiciel sur micro ordinateur pour l'aide à la conception des bâtiments en pays tropicaux secs, rapport final REXCOOP, 1985