

DES ÉCO-TECHNIQUES À L'ÉCO-CONCEPTION DES BÂTIMENTS

Bruno Peuportier et Stéphane Thiers

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

RESUME.

Les recherches menées à l'Ecole des Mines de Paris depuis la fin des années 70 ont porté sur diverses techniques d'économie d'énergie et d'intégration des énergies renouvelables dans les bâtiments (solaire passif, solaire actif, solaire photovoltaïque). Plus récemment, des travaux ont été initiés sur les échangeurs air/sol (appelés parfois « puits canadiens »). Des modèles de bâtiments ont été développés pour évaluer les besoins de chauffage, de climatisation et d'éclairage, puis ils ont été étendus à l'évaluation des impacts environnementaux par l'analyse de cycle de vie. La programmation orientée objets a permis de capitaliser les connaissances, en facilitant le chaînage de ces différents modèles. Cet ensemble logiciel comporte un certain nombre de limites, en particulier sur la prise en compte des mouvements d'air, de l'humidité et de certains équipements. Des activités complémentaires de validation seraient utiles, en particulier dans le cas de bâtiments à très faibles besoins. L'utilisation de ces outils comme aide à la conception est facilitée par une interface conviviale, qui pourrait encore être améliorée de manière à progresser vers l'éco-conception des bâtiments. Enfin, une extension à l'échelle d'un quartier est en cours de développement.

MOTS-CLÉS : bâtiment, énergie, simulation thermique, éco-conception

ABSTRACT.

Research activities have been performed at Ecole des Mines de Paris since the seventies, regarding energy efficient techniques and the integration of renewable energy systems in buildings (passive and active solar, photovoltaic systems). More recently, earth/air heat exchangers have been studied. Building models have been developed to evaluate heating, cooling and lighting loads. These models have been complemented with life cycle assessment in order to estimate environmental impacts. Object oriented programming allowed the modelling contributions on each technique to be integrated in a whole software package. The limits of this model concern air movements, humidity transfer, and some types of equipment. Complementary validation work would be useful, particularly for low energy buildings. The use of these tools as design aid benefits from a user friendly interface, but further improvement would still be useful in order to progress towards eco-design. Finally, an extension of the models at a settlement level is in progress.

KEYWORDS : building, energy, thermal simulation, eco-design

1. INTRODUCTION

L'éco-conception, c'est à dire la prise en compte des aspects environnementaux dans la conception, ne consiste pas simplement à additionner des « éco-techniques », techniques favorables à l'environnement. La conception, en particulier d'un objet complexe comme un bâtiment, met en jeu une combinatoire d'éléments en interaction, d'où un risque de sous-optimisation. Par exemple une faible inertie est souvent conseillée dans les bâtiments tertiaires, du fait d'un chauffage intermittent. Dans ce cas, les apports solaires peuvent difficilement être valorisés et une étude de sensibilité sur ce paramètre conduit à réduire les surfaces vitrées au minimum imposé pour l'éclairage, ou à utiliser des vitrages à faible facteur solaire. Cette « optimisation » mériterait d'être comparée à une solution à forte inertie, avec une sur-ventilation nocturne en été permettant de réduire les consommations de climatisation, et avec une ouverture solaire importante réduisant les besoins de chauffage. Les résultats de calcul donnent l'avantage à cette deuxième solution, mais n'ont pas pu être vérifiés par la mesure, le projet étudié n'ayant pas été construit. Si ce résultat est confirmé, un certain nombre de pratiques devront être revues.

Les travaux passés ont souvent privilégié l'étude de chaque technique isolément, ce qui est plus facilement gérable au niveau des équipes de recherche, en particulier dans le cadre de thèses. Or la conception des bâtiments est en pratique multi-techniques, car d'une part de nombreux composants sont associés, et d'autre part de nombreux aspects

doivent être pris en compte simultanément : performance thermique, éclairage, acoustique, qualité de l'air, impacts environnementaux, sans oublier bien sûr les aspects économiques.

L'objet de cette communication est de présenter des travaux effectués sur les techniques, puis de proposer quelques pistes pour progresser vers des outils plus intégrés, et mieux adaptés aux pratiques professionnelles. Une étape intermédiaire consiste à élaborer des « concepts », associant plusieurs techniques. Par exemple les « maisons passives » associent une forte isolation, une ouverture solaire importante, une ventilation à double flux et un chauffage par air pulsé. La même notion de concept s'applique aussi à l'urbanisme, avec par exemple la « ville solaire », ensemble de bâtiments exposés plein sud et privilégiant la compacité. Le risque de cette approche est une réplique à l'identique et, à terme, un appauvrissement de la création architecturale. C'est pourquoi l'idée d'étape intermédiaire est proposée ici pour ces concepts, dont l'efficacité et donc l'utilité n'est pas contestée, mais qui pourraient ensuite être dépassés grâce à des outils plus intégrés.

2. MODÉLISATION DE COMPOSANTS

2.1. L'ISOLATION TRANSPARENTE

Les murs solaires ont été proposés dans les années 60 pour améliorer le bilan thermique des bâtiments en valorisant les apports solaires par les parois opaques (Trombe et Michel, 1971). A cette époque, la couverture transparente était un simple vitrage, et ce système s'est avéré moins efficace qu'une isolation opaque. Dans les années 80, des matériaux isolants et translucides sont apparus (Goetzberger et al., 1984), permettant cette fois de capter une quantité de chaleur supérieure aux déperditions. Aujourd'hui les performances des vitrages ont progressé et un double vitrage performant (basse émissivité, lame d'argon) permet de réaliser un mur solaire performant à moindre coût. L'intérêt de ce type de paroi est de stocker les apports solaires, et ainsi de prendre la relève, en soirée, des apports directs par les vitrages.

En ce qui concerne la modélisation de ces systèmes, un outil de simulation dynamique est nécessaire pour prendre en compte le stockage de chaleur et évaluer les gains solaires utiles. Dans cette famille d'outils, les modèles aux différences finies sont les plus répandus. 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. Par exemple, la méthode d'analyse modale 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, Sicard, 1984 à 1988).

Les principaux phénomènes liés à l'évolution thermique des bâtiments peuvent être représentés ou approximatés par des équations linéaires. Lorsqu'on peut isoler un tel système linéaire, il est possible d'appliquer l'analyse modale. 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.

Au niveau informatique, le modèle a été mis en œuvre dans le logiciel COMFIE, 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. Un modèle par volumes finis est d'abord constitué, le nombre de mailles par paroi étant paramétrable, puis ce modèle est réduit aux six modes principaux (correspondant à six constantes de temps). 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. Des années types à pas de temps horaire sont utilisées pour les données climatiques. La programmation orientée objets a permis de développer et de chaîner des modèles de composants au simulateur global de bâtiments, par exemple des murs solaires et des systèmes photovoltaïques. Cette approche de développement logiciel s'est avérée très utile pour capitaliser les connaissances issues de différentes contributions.

Cet outil de simulation a été appliqué pour analyser une opération expérimentale de six maisons individuelles, construites dans les Ardennes par l'architecte Jacques Michel en 1992 (Peuportier et Michel, 1995). Différents matériaux isolants transparents ont été comparés, dans des murs solaires mais également pour former des capteurs à air en toiture. Dans la configuration murs solaires, les besoins de chauffage du bâtiment sont de $60 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$, ce qui a été confirmé par la mesure.

2.2. PRÉCHAUFFAGE DE L'AIR DE VENTILATION

Le modèle décrit précédemment étant multi-zones, il permet d'étudier le préchauffage d'air neuf dans des espaces comme des vérandas ou des balcons vitrés. Une application a concerné une opération de réhabilitation de logements sociaux à Montreuil, dans le cadre du projet européen REGEN LINK. D'après les calculs, l'isolation par l'extérieur, le remplacement du simple vitrage par du double vitrage à isolation renforcée et les balcons vitrés permettent de réduire par deux les besoins de chauffage, qui passent de 160 à $80 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$. Les mesures conduisent à une consommation supérieure de 20% aux estimations, car la température des logements est passée de 20 à 23°C et une action est en cours pour revenir progressivement à un niveau de température plus modéré.

Un autre projet européen, SOLANOVA, vise à réduire d'un facteur 6 la consommation de logements semblables, situés en Hongrie. Dans ce cas, l'air neuf est préchauffé par une ventilation double flux. Le modèle estime les besoins après réhabilitation à $30 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$, dans un immeuble sans balcon (ce qui réduit les ponts thermiques). Les mesures sont en cours sur ce bâtiment.

2.3. COMPOSANTS SOLAIRES THERMIQUES

De nombreux travaux effectués durant les années 70-80 dans ce domaine ont conduit à l'élaboration de modèles détaillés et simplifiés, en particulier le logiciel TRNSYS (Klein, 1976). Un modèle de système d'eau chaude sanitaire solaire issu de ces travaux a été chaîné au simulateur de bâtiments décrit précédemment, ainsi qu'un modèle de plancher chauffant. La stratification des températures dans le ballon d'eau chaude est prise en compte en découpant le ballon en 100 segments. Le modèle de capteur sélectionné est un modèle sans inertie.

Ces modèles, adaptés au pas de temps horaire et donc de niveau de détail homogène à celui du simulateur global, permettent d'évaluer l'intérêt énergétique de systèmes solaires thermiques. Les consommations d'énergie liées à l'eau chaude sanitaire tendent à devenir importantes en valeur relative, les besoins liés au chauffage étant réduits. Il est donc important d'intégrer ces aspects dans la conception globale des bâtiments.

2.4. EVALUATION DES CONSOMMATIONS ÉNERGÉTIQUES LIÉES À L'ÉCLAIRAGE

Un modèle issu de la méthode « Lumen » (Rabl et Kreider, 1994) a été développé et chaîné au simulateur COMFIE. L'éclairage naturel est d'abord déterminé en considérant une pièce rectangulaire découpée en 9 mailles (3 en largeur x 3 en profondeur), puis la consommation d'électricité correspondant à l'éclairage artificiel est évaluée en fonction d'un scénario (par exemple possibilité d'allumer seulement les lampes les plus éloignées des fenêtres ou éclairage en tout ou rien).

L'efficacité lumineuse du ciel est évaluée à chaque pas de temps, en fonction d'un type de ciel déduit des données de rayonnement solaire global et diffus. Le calcul de l'éclairage naturel prend en compte le facteur de transmission et

la surface des vitrages, les masques éventuels et des coefficients d'utilance, qui correspondent à l'efficacité avec laquelle la lumière parvient sur le plan de travail compte tenu des réflexions sur les différentes parois.

La consommation d'électricité pour l'éclairage artificiel constitue un apport interne d'énergie. Cette valeur est alors transmise au simulateur thermique, de manière à être prise en compte dans l'évaluation des besoins de chauffage et de climatisation.

2.5. SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES INTÉGRÉS AUX BÂTIMENTS

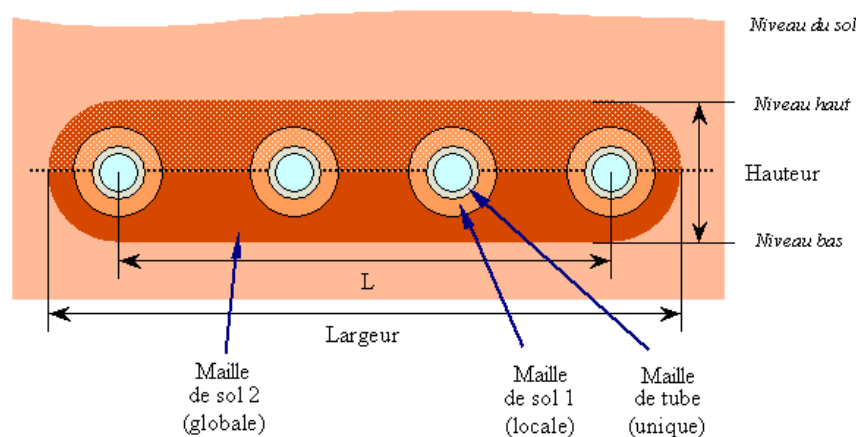
La production d'électricité est évaluée en utilisant le modèle à une diode (Ricaud, 1997). Cette production dépend de la température des modules, et donc de leur intégration au bâti. D'autre part, les modules peuvent constituer l'absorbeur ou la couverture d'un capteur solaire à air (ils sont semi-transparents si les cellules sont espacées), ce qui permet une récupération supplémentaire d'énergie sous forme de chaleur.

Un modèle a été développé, en collaboration avec l'Université de Cergy Pontoise pour la partie mécanique des fluides, et chaîné au modèle de bâtiment pour évaluer la production d'électricité et de chaleur dans différentes configurations : mur solaire, capteur à air, cheminée solaire accentuant la ventilation naturelle (Guiavarch, 2003).

2.6. ECHANGEURS AIR/SOL

Ce système, appelé parfois « puits canadien » ou « puits provençal », a pour objectif de tempérer l'air neuf en le faisant circuler dans des tubes enterrés : en hiver, le sol est moins froid que l'extérieur donc les besoins de chauffage sont réduits ; en été, le sol reste plus frais que l'extérieur donc le bâtiment est rafraîchi.

Le modèle met en œuvre un maillage du sol comprenant des couches cylindriques autour des tubes, et une couche plus épaisse englobant la nappe de tubes (cf. figure ci-dessous). Ces couches sont séparées en deux parties, supérieure et inférieure, car la température du sol varie en fonction de la profondeur. Cette température est estimée par le modèle du massif semi-infini, ce travail étant réalisé en collaboration avec l'INSA de Toulouse, en considérant une variation annuelle sinusoïdale de la température extérieure (les variations journalières deviennent négligeables au delà d'une certaine profondeur), et en intégrant le rayonnement solaire absorbé par le sol.



Maillage du sol autour des tubes enterrés

Les tubes et les mailles de sol sont sectionnés en 10 tronçons le long du parcours de l'air. Le système d'équations différentielles résultant du bilan thermique des mailles est ensuite transformé par diagonalisation matricielle pour faciliter sa résolution numérique. L'objet informatique a été chaîné au simulateur de bâtiment, l'échangeur air/sol pouvant alimenter une ou plusieurs zones thermiques. Dans le cadre d'une collaboration avec l'entreprise Canada CLIM, le modèle a été appliqué dans le cas d'une maison de retraite à Presles (95) et la comparaison avec les résultats de mesures est en cours.

3. PRINCIPALES HYPOTHÈSES ET LIMITES DES MODÈLES, VALIDATION

Le modèle de bâtiment repose sur le concept de "zone thermique", sous-ensemble du bâtiment considéré à température homogène. Ce modèle présente des limites pour des pièces de grande hauteur dans lesquelles l'air est stratifié (par 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 réfléchi 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 précédemment, 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 phénomènes 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 nécessiterait des sorties supplémentaires pour déterminer les températures d'interface, ce qui ne pose pas de problème comme l'a montré une 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, problème commun à tous les outils de simulation. L'avantage des modèles réduits en terme de réduction du temps de calcul permet de décrire plus finement le bâtiment (nombre de zones) et/ou d'effectuer des études de sensibilité plus complètes.

Le modèle utilisé pour les calculs d'éclairage est plus simplifié : les modèles détaillés imposent un calcul par suivi de rayons, très coûteux en temps calcul et qui n'est en général pas effectué heure par heure, mais par type de ciel et pour des bâtiments particuliers (musées par exemple).

Des activités de validation ont été menées, par comparaison à des mesures sur cellule test ou à d'autres modèles détaillés (Peuportier, 2005). Il serait utile de poursuivre ces travaux dans le cas de bâtiments à très faibles besoins, dans lesquels les aspects dynamiques prennent une importance accrue.

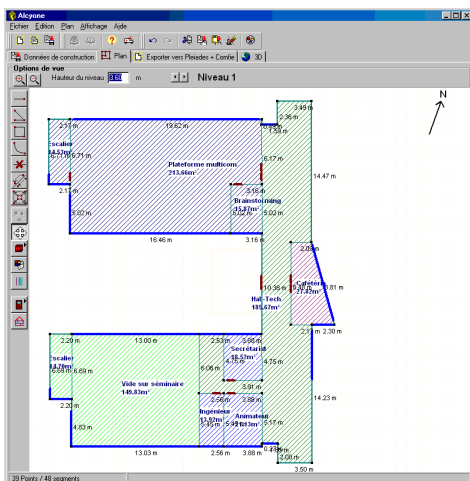
4. DES ÉCO-TECHNIQUES À L'ÉCO-CONCEPTION

Parmi les concepts élaborés pour améliorer la performance thermique des bâtiments, le standard « maisons passives » est sans doute l'un des plus intéressants actuellement. Il s'agit de logements très bien isolés, tant au niveau des parois opaques que vitrées, et équipées d'une ventilation double flux. Les besoins de chauffage annuels sont réduits à moins de 15 kWh/m², ce qui permet de les couvrir par un chauffage à air, en complément de la ventilation double flux : le système classique de chauffage (radiateurs, convecteurs ou plancher chauffant) n'est alors plus nécessaire, ce qui réduit les coûts. Ce concept peut être complété par un système d'eau chaude sanitaire solaire. En se basant sur cette approche, l'architecte Rolf Disch a construit à Freiburg (Allemagne) des maisons à énergie positive : grâce à une toiture photovoltaïque, les bâtiments produisent davantage d'énergie qu'ils n'en consomment. Les besoins de chauffage annuels, mesurés par l'Institut Fraunhofer pour les systèmes énergétiques solaires, sont de 11 kWh/m² (Wittwer et Voss, 2001).

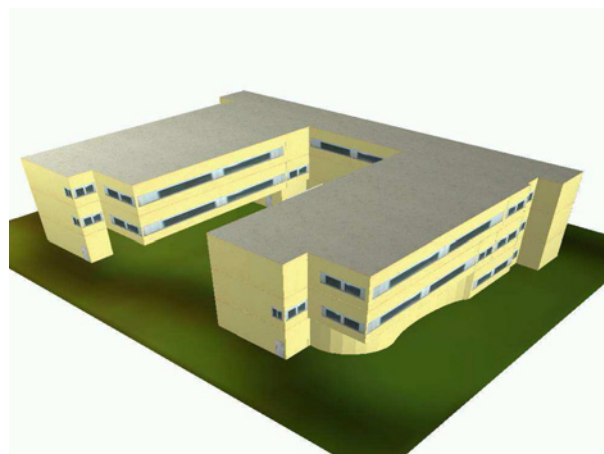
Ces concepts ont été reproduits à de nombreux exemplaires en Allemagne mais aussi en Suisse, en Autriche et en Suède, et avec des styles architecturaux variés. Ils sont plus difficiles à mettre en œuvre en réhabilitation, car d'une part certains ponts thermiques sont difficiles à corriger (liaisons au niveau des fondations, et des balcons éventuels) et d'autre part la mise en œuvre d'une ventilation double flux nécessite le passage de gaines d'air dans les logements. L'isolation thermique des bâtiments anciens pose également des problèmes : limite de parcelle et esthétique pour l'isolation par l'extérieur, encombrement et esthétique pour l'isolation par l'intérieur).

D'autre part, il peut être intéressant d'adapter la conception à un site donné, en particulier en fonction des masques et de l'exposition au soleil. Les outils d'aide à la conception ont donc une utilité, au delà des concepts « prêts à l'emploi ». Mais l'utilisation des modèles en tant qu'aide à la conception nécessite une interface utilisateur adaptée à la pratique des professionnels concernés, en particulier les bureaux d'études techniques et les architectes : il faut réduire le temps de saisie d'un projet, et faciliter l'interprétation des résultats.

C'est dans cet objectif que l'environnement PLEIADES a été conçu et développé par Gefosat puis IZUBA énergie avec le soutien de l'ADEME (Salomon, 2005), dont a bénéficié l'ensemble des travaux décrits dans cette communication. ALCYONE, un module de saisie graphique par niveau avec visualisation en 3D permet de tracer rapidement un projet, d'affecter des ouvertures (fenêtres, portes) sur les parois, etc. Une image scannée peut être insérée en fond d'écran pour faciliter la saisie, même dès la première esquisse. 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 ci-dessous).



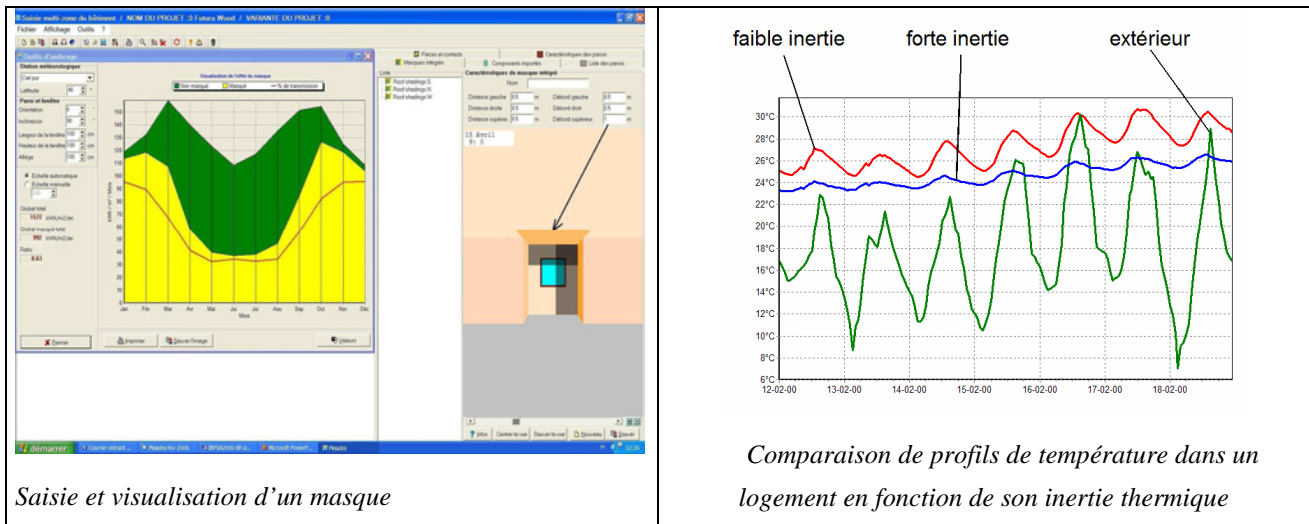
Saisie graphique par niveau



Visualisation 3D
Cf. www.izuba.fr

Le logiciel comporte plusieurs bibliothèques de données thermiques sur les matériaux et les éléments constructifs, les menuiseries, etc. Il comprend aussi des bibliothèques concernant la gestion d'un bâtiment selon un scénario horaire pour une semaine-type (occupation, apports internes, températures de consigne de chauffage ou de climatisation, gestion des occultations).

En phase de conception, il est par exemple utile d'étudier un masque intégré au dessus d'une baie vitrée (auvent, brise-soleil etc.). Le logiciel permet de visualiser l'ombre créée au cours de l'année, et la transmission du rayonnement mois par mois (cf. la figure ci-dessous). Un éditeur de graphes facilement paramétrable permet l'analyse graphique des résultats, en particulier les profils de température et la comparaison des variantes (cf. l'exemple ci-dessous).



PLEIADES + COMFIE permet ainsi à un architecte, un BET ou un maître d'ouvrage d'étudier un projet de construction ou de réhabilitation dans une démarche complète d'analyse thermique, depuis les premières esquisses jusqu'aux étapes plus avancées du projet.

5. EXTENSIONS À L'ANALYSE ENVIRONNEMENTALE

Les objectifs de réduction des consommations énergétiques sont liés à des préoccupations environnementales comme la protection du climat et la préservation des ressources. Il est alors intéressant de compléter l'analyse énergétique par l'évaluation des impacts environnementaux des bâtiments. Pour éviter des « déplacements de pollution » (par exemple réduire une pollution dans un bâtiment mais en générant des impacts au niveau de la production d'énergie), il convient de prendre en compte les impacts en amont et d'inclure le cycle de vie des bâtiments : depuis l'extraction des matières premières, la fabrication des matériaux et le chantier de construction jusqu'au chantier de démolition et au traitement des déchets.

Le logiciel COMFIE a alors été chaîné à l'outil d'analyse de cycle de vie EQUER (Polster, 1995), permettant d'évaluer les impacts environnementaux sous la forme d'une douzaine d'indicateurs : ressources en énergie, en eau et en matières premières épuisables, contribution au changement climatique et autres pollutions de l'air, pollution de l'eau, toxicité, production de déchets. 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 meilleure connaissance du comportement interne d'un bâtiment et de son impact environnemental global.

L'analyse de cycle de vie a ensuite été étendue à l'échelle d'un quartier, dans le cadre du projet européen Eco-housing et du projet ADEQUA. Le modèle ARIADNE intègre plusieurs types de bâtiments, des rues et des espaces extérieurs, ainsi que des réseaux : eau potable, eaux usées, réseau de chaleur (Popovici, 2006). Ce modèle a été appliqué à titre expérimental sur trois opérations à Trondheim (Norvège), Dunaujvaros (Hongrie) et Montreuil (93). L'échelle du quartier permet d'aborder des aspects d'organisation d'un plan masse, qui ont des conséquences importantes en terme

d'orientation et d'exposition au soleil des façades, de compacité des constructions, d'éclairage public et d'efficacité de certains équipements collectifs.

6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cet ensemble de modèles développé depuis une vingtaine d'années et complété en capitalisant les travaux successifs constitue une plate forme d'aide à la conception, avec actuellement près de 150 utilisateurs. Une utilisation pédagogique plus large serait utile, en particulier pour la formation des architectes, qui intègre encore assez peu ces aspects.

Plusieurs pistes peuvent être proposées pour améliorer la précision des modèles et les valider, prendre en compte des aspects supplémentaires ou de nouvelles technologies. Le chaînage avec d'autres outils techniques (par exemple les calculs d'acoustique) et avec l'évaluation économique répondrait aussi à une demande des praticiens.

7. BIBLIOGRAPHIE

Bacot P., Analyse modale des systèmes thermiques, Doctorate Thesis, University Paris VI, 1984

Bacot P., Neveu A., Sicard J., Analyse modale des phénomènes thermiques en régime variable dans le bâtiment, Revue Générale de Thermique, n°267, Paris, 1984

Blay D., Comportement et performance thermique d'un habitat bioclimatique à serre accolée, Bâtiment-Energie n°45, 1986

Carter C., A validation of the modal expansion method of modelling heat conduction in passive solar buildings, Solar Energy 23 n°6, 1979

Goetzberger A., Schmid J. and Wittwer V., Transparent insulation system for passive solar utilization in buildings, 1st E.C. Conference on solar heating, Amsterdam, 1984

Guiavarch A., Etude de l'amélioration de la qualité environnementale du bâtiment par intégration de composants solaires, thèse de Doctorat, Université de Cergy-Pontoise, novembre 2003

Klein, S. A., Duffie, J.A., and Beckman, W.A., "TRNSYS - A Transient Simulation Program", ASHRAE Trans, 82, 623, 1976

Lefebvre G., Analyse et réduction modale d'un modèle de comportement thermique de bâtiment, Doctorate Thesis, University Paris VI, 1988

Peuportier B. et Blanc Sommereux I., Simulation tool with its expert interface for the thermal design of multizone buildings, International Journal of Solar Energy, 1988

Peuportier B. and Michel J., Comparative analysis of active and passive solar heating systems with transparent insulation, Solar Energy vol. 54 n°1, janvier 1995

Peuportier B., Bancs d'essais de logiciels de simulation thermique, Journée SFT-IBPSA « Outils de simulation thermo-aéraulique du bâtiment », La Rochelle, mars 2005

Polster B., contribution à l'étude de l'impact environnemental des bâtiments par analyse du cycle de vie, thèse de docteur en énergétique, Ecole des Mines de Paris, décembre 1995

Popovici E., Contribution à l'analyse de cycle de vie des quartiers, thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, février 2006

Rabl A. et Kreider J., Heating and Cooling of Buildings, Mac Graw Hill, 1994

Ricaud, A., Photopiles solaires. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. Lausanne, 1997

Salomon T., Mikolasek R. et Peuportier B., Outil de simulation thermique du bâtiment, COMFIE, Journée SFT-IBPSA « Outils de simulation thermo-aéraulique du bâtiment », La Rochelle, mars 2005

Trombe F. et Michel J., Brevet ANVAR TROMBE MICHEL BF 7123778 (France 29/06/1971)

Watremez G., Campana D., Neirac F., Elaboration d'un logiciel sur micro ordinateur pour l'aide à la conception des bâtiments en pays tropicaux secs, rapport final REXCOOP, 1985

Wittwer V. et Voss K., Solar Passiv-haus „Wohnen und Arbeiten“, Freiburg, Vauban, rapport n° TOS-1-0103-VK-02, mars 2001