

BILGA , UN SIMULATEUR HYGROTHERMIQUE ET AÉRAULIQUE COMPLET POUR LES PROFESSIONS DU BATIMENT

A. GRELAT C.E.B.T.P.

1. PRESENTATION GENERALE

Le logiciel BILGA a été développé depuis 1980 par le C.E.B.T.P. et la F.N.B. (Fédération Nationale du Bâtiment), et progressivement enrichi par les confrontations à l'expérimentation et aux demandes de la profession.

Il s'agit d'un modèle de simulation hygro-thermique et aéraulique multizone, utilisant une description détaillée de l'enveloppe du bâtiment, du circuit de ventilation, de l'occupation, de l'environnement et du climat (fichiers météorologiques).

Il a fait l'objet de vérifications expérimentales approfondies (cellules-test en site naturel de Saint-Rémy-les-Chevreuse, campagne de mesures en Côte d'Ivoire) [2],[3].

Sans entrer dans une description complète [1], nous rappelons ici ses **principales caractéristiques**.

- La **conduction** dans les parois multicouches est traitée par la méthode des différences finies.
- Les **échanges convectifs et radiatifs** au niveau des parois sont traités séparément.
- La **ventilation** naturelle ou mécanique est simulée, et entièrement couplée aux échanges thermiques, à partir des caractéristiques aérauliques de l'enveloppe et des sollicitations extérieures (champs de pression).
- Un **bilan enthalpique total** est effectué à chaque pas sur l'air de chaque zone, tenant compte des échanges d'air humide entre locaux et avec l'extérieur et des échanges avec les occupants, ainsi qu'un **bilan massique** sur la vapeur d'eau.

Il permet en particulier d'obtenir :

- les **besoins** en chauffage ou en refroidissement du bâtiment.
- L'évolution des **températures** en l'absence de chauffage, ou en chauffage partiel.
- l'évolution des **renouvellements d'air** en ventilation naturelle ou mécanique (la simulation aéraulique est totalement couplée à la simulation thermique)
- Les **échanges de chaleur, d'air, d'humidité** entre les différentes zones du bâtiment.
- Une évaluation quantitative du **confort thermique** des occupants (basée sur un modèle physique du métabolisme).
- Les températures, les flux thermiques dans tous les composants du bâtiment.

Il s'applique donc à une très vaste gamme de problèmes, du bilan chauffage, conditionnement d'un immeuble à la conception de l'habitat économique en climat tropical, de l'étude des conditions réelles de ventilation d'une lame d'air en façade à celle (au prix de très légers ajustements) de la stratification des températures dans un réservoir de pétrole....

BILGA est maintenant implanté sur micro-ordinateur type compatible et sur station APOLLO.

Dans ses applications aux problèmes thermiques de l'enveloppe, il est complémenté par différents modèles de transferts thermiques 2D permettant une analyse fine du comportement du composant.

2. DEVELOPPEMENTS RECENTS

2.1 - Diffusion d'humidité dans les parois et le mobilier

La version de base, BILGA, ne considère que les échanges d'humidité entre zones et avec les occupants. Une nouvelle version, BILGH, intègre également les échanges avec les parois et le mobilier [4],[5].

La diffusion d'humidité à l'intérieur des parois est décrite par un modèle de type LUIKOV, en différences finies à une dimension (également appliqué à un modèle complémentaire de transfert en 2 dimensions), utilisant une bibliothèque de caractéristiques hygrothermiques concernant actuellement une quinzaine de matériaux.

Les échanges avec le mobilier sont décrits par un modèle du 1er ordre.

Ces développements sont motivés par deux types de préoccupations :

- la qualité de l'air intérieur aux logements.

La réduction des taux de ventilation, et, plus particulièrement, l'apparition de systèmes de ventilation dits "hygro-réglables" amènent à considérer de manière plus précise l'évolution de l'humidité relative dans les différents locaux d'un logement. Celle-ci est étroitement dépendante de la nature des matériaux intérieurs aux locaux, dont on a jusqu'ici ignoré l'influence.

- La réduction des risques pathologiques liés à l'humidité dans les parois.

L'étude de l'état hygrothermique des parois permettra d'évaluer les risques de détérioration des revêtements intérieurs, de développement de moisissures, de dégradations liées au gel dans les parois extérieures et aux interfaces.

Cette approche met en jeu des connaissances relatives au comportement hygrothermique des matériaux qui sont encore très incomplètes, et des algorithmes dont la validité devra être étayée par de multiples expérimentations.

Des validations partielles ont déjà été effectuées.

- Evolution des températures et hygrométries dans une cellule contenant des planches de pin, représentant un mobilier (figure 1). (E.D.F. Centre des Renardières)

- Séchage d'un mur en pierre tendre (figure 2)
(CSTB Nantes)

Figure 1 Echanges d'humidité avec le mobilier
Expérimentation en cellule-test (EDF)

Contenu : 50 kg de planches de pin

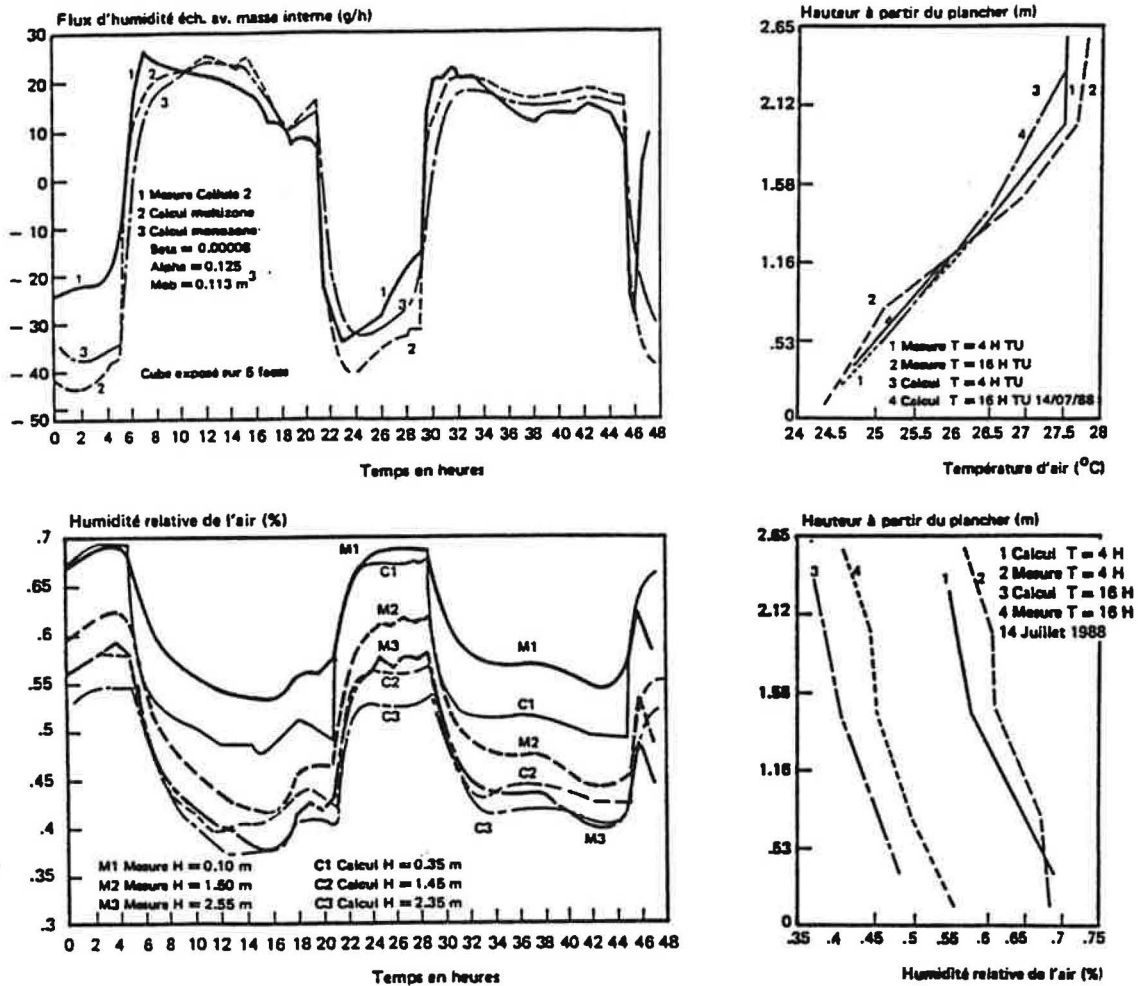
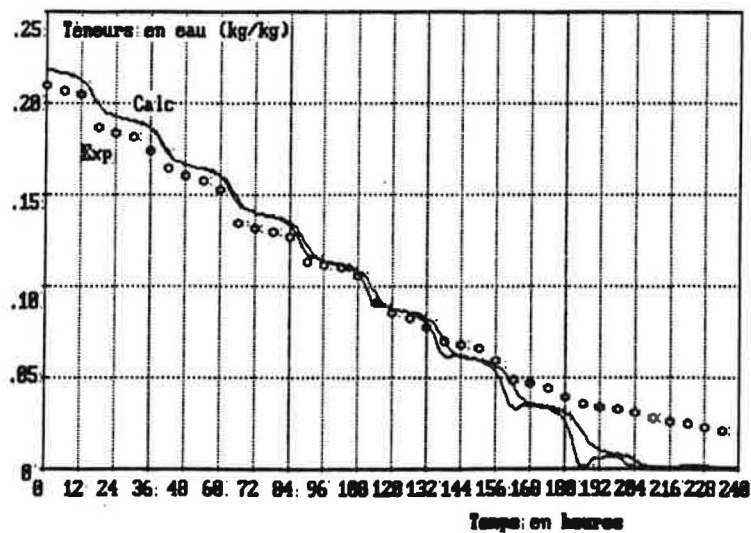


Figure 2 Expérience de séchage naturel d'un muret
en pierre de Vassens préalablement saturé



Quelques observations se dégagent de ces confrontations.

- L'effet de la stratification de l'air d'un local en zones à températures différentes joue un rôle fondamental à la fois sur le confort hygrothermique des occupants et les risques de condensations. Les variations spatiales de l'humidité relative - l'humidité spécifique de l'air étant, elle pratiquement uniforme - sont souvent plus importantes que les variations temporelles dues aux productions de vapeur d'eau.
- La présence de mobilier influe notablement sur la régulation de l'humidité relative. Cet aspect compromet en particulier l'efficacité des ventilations hygro-modulantes, et devrait également être pris en compte dans le calcul des charges de climatisation et la prévision du confort thermique dans les ambiances climatisées.
- La prise en compte des échanges d'humidité avec les parois ne modifie pas substantiellement le régime des températures de locaux en libre évolution. Elle limite par contre les excès d'humidité relative en climat chaud et humide, et joue un rôle systématiquement favorable dans l'évaluation du confort.
- Les variations journalières d'humidité dans les matériaux des parois n'intéressent que les couches superficielles (1 à 2 cm) - la masse de la paroi étant affectée par les variations saisonnières - ce qui laisse prévoir la possibilité d'utilisation de modèles simplifiés du premier ordre dans l'évaluation de leur influence dans la régulation hygrométrique des ambiances.

2.2 - Transfert de polluants intérieurs

Une version particulière de BILGA, dénommée BILGP, mise au point en collaboration avec Gaz de France, permet d'associer aux transferts hygrothermiques celui de polluants, présents dans l'ambiance extérieure, ou créés à l'intérieur des locaux par les processus (appareils de chauffage de cuisson), les occupants (CO₂, fumée de tabac), les produits stockés ou les matériaux présents dans la construction.

Les transferts de polluants entre zones s'effectuent selon 3 modes :

CONVECTION, DIFFUSION, ET GRAVITE

Les caractéristiques physiques utilisées pour un polluant gazeux sont :

- son coefficient de diffusion dans l'air (m^2/s)
- sa masse volumique (kg/m^3)
- sa vitesse de sédimentation, calculée à partir des deux valeurs précédentes.
- le cas échéant, un facteur de pénétration dans les locaux.

Dans un local, même faiblement ventilé, le mode de transfert par convection est généralement prédominant.

Une option du modèle permet d'introduire directement dans l'air d'une zone un débit programmé d'un gaz choisi dans une bibliothèque, où sont stockées ses caractéristiques physiques utiles au modèle.

3. ALGORITHMES DE VENTILATION

L'un des points forts du logiciel est de permettre de coupler complètement la simulation de la ventilation naturelle ou mécanique d'un bâtiment à la simulation thermique.

Nous allons maintenant revenir sur les algorithmes de ventilation inclus dans le logiciel.

3.1 - Principe du calcul

Le débit d'air transitant entre deux ambiances dépend :

- du champ de pression existant entre ces deux ambiances, induit par des différences de température et par l'effet du vent et des systèmes de VMC.
- des caractéristiques aérauliques des éléments reliant ces deux ambiances (Fenêtres, portes ouvertes ou fermées, parois perméables, bouches d'entrée ou d'extraction, etc...)

Les ambiances sont supposées isothermes et en équilibre statique.

Il est possible de décomposer un local en plusieurs sous-zones thermiques. Dans ce cas, des pertes de charges fictives sont créées entre sous-zones, sous forme de parois fictives perméables, ou d'ouvertures en position ouverte.

Dans chaque ambiance s'établit un gradient de pression linéaire en fonction de la hauteur . Les pressions sont référencées au niveau 0 du bâtiment et de chaque ambiance.

La pression due au vent sur une façade s'écrit sous la forme :

$$p_v = 1/2 C_{\alpha} \cdot \rho_a \cdot v^2,$$

les coefficients de pression C_{α} étant calculés en fonction de la forme et de l'environnement du bâtiment.

Les relations débit-écart de pression au travers d'un élément de paroi d'aire S reliant deux ambiances sont de la forme :

$$Q = C_d \cdot S \cdot (dp)^n$$

C_d étant un coefficient de débit , n un coefficient compris entre 0,5 et 1 , dépendant du type de perméabilité .

Pour les parois à perméabilité répartie (parois perméables , ouvertures ouvertes) , on admet que cette relation peut être intégrée sur la surface de l'élément . Ainsi , deux débits de sens contraire peuvent être obtenus entre deux ambiances à températures différentes .

Les équations de conservation de la masse permettent d'obtenir un système d'équations, avec pour inconnues les pressions de référence des zones , linéarisé et résolu à chaque pas de temps .

3.2 - Eléments de validation

Des validations expérimentales partielles de ces algorithmes ont été réalisées :

- Application au chauffage aéraulique (Version AEROGAZ)
(Pavillons expérimentaux GDF)
- Ventilation naturelle en climat tropical (logiciel DEBIT)
(Mesures en soufflerie des débits traversants sur maquettes au CSTB de Nantes et à l'Université de Poitiers , qui ont permis de préciser les valeurs des coefficients de débit applicables aux portes et fenêtres ouvertes).
- Champs de température dans une pièce chauffée par radiateur
(Cellules-test de Saint-Rémy-les -Chevreuse)

Cependant , le niveau de validité et les modalités d'application de l'approche des mouvements d'air entre zones communicantes par introduction de perméabilités fictives , qui apparait , au moins qualitativement , très prometteuse ,nécessitent encore quelques vérifications .

4. EXEMPLES D'APPLICATIONS

4.1 - Eléments de façades

De nombreuses applications concernent le comportement hygrothermique d'éléments de façades :

- Echauffement de vitrages isolants situés devant une paroi en béton , avec un espace ventilé ou non .(fig. 3)
(Tenue des joints , risques de casse thermique)
- Risques de condensation dans les vitrages respirants (fig.4)

Figure 3 Vitrage isolant devant une paroi béton

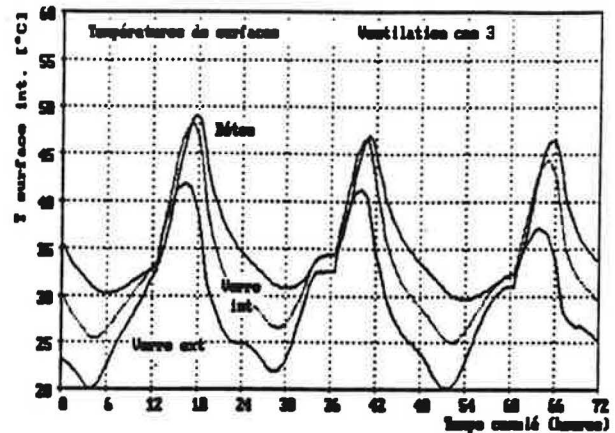
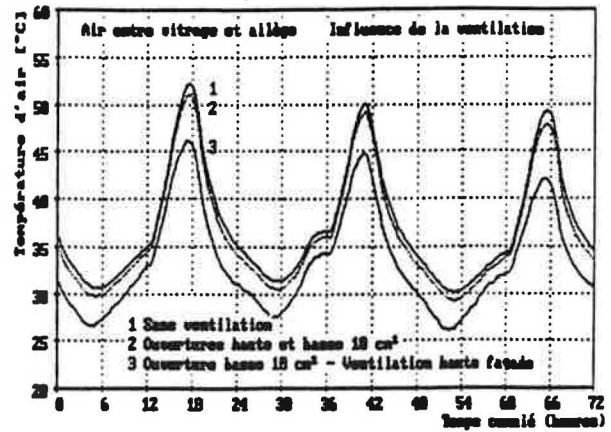
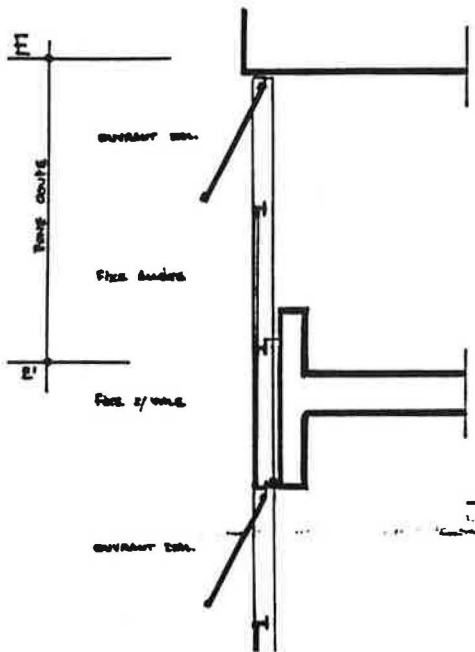
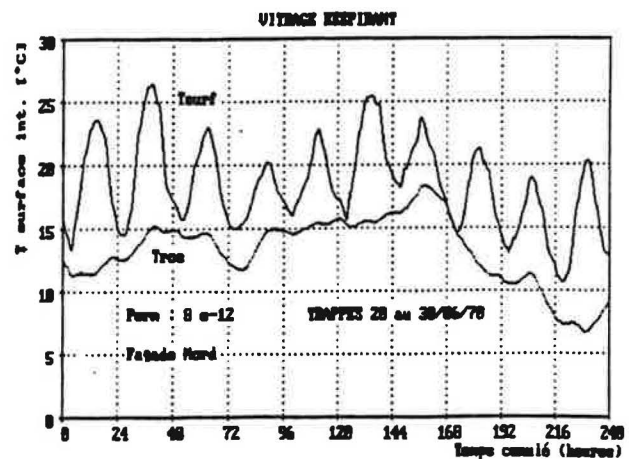
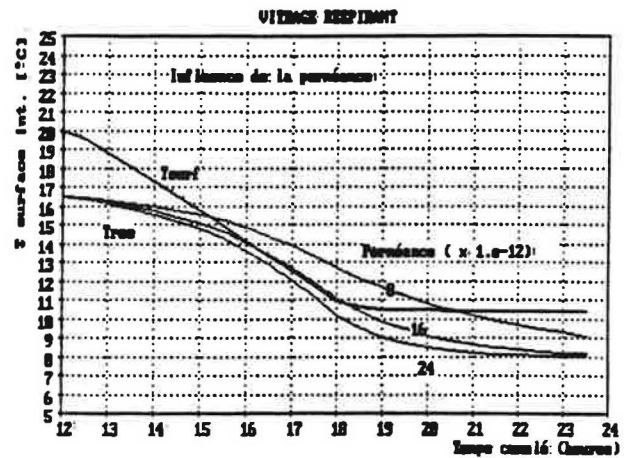
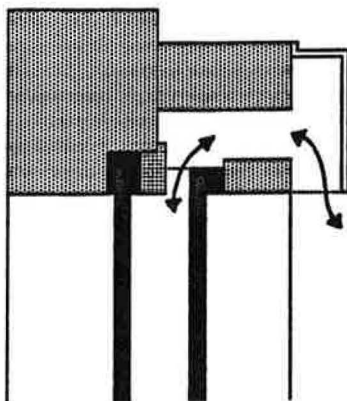
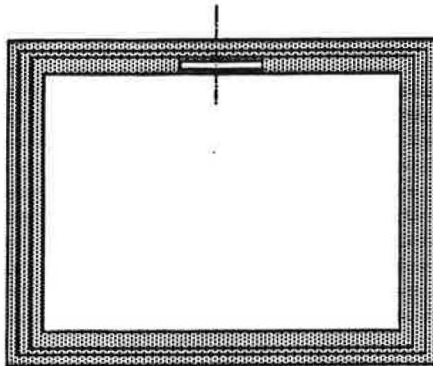


Figure 4 Vitrage respirant



4.2 - Confort thermique . Espaces semi-ouverts

Etude thermique d'un Atrium . Opération Grand Ecran .
Place d'Italie . Paris.

Le projet Grand Ecran concerne la réalisation d'un vaste complexe tertiaire , commercial , culturel et hôtelier ouvert sur la Place d'Italie , dont les travaux ont débuté en 1989.

Il comporte quatre bâtiments principaux enserrant un large patio protégé par une couverture transparente , l'Atrium, espace privilégié donnant accès à l'ensemble des commerces , salles de spectacle et restaurants (fig.5).

De par ses dimensions (1700 m² de surface , 25 m de hauteur) et du fait de l'hétérogénéité de son environnement , l'Atrium est le siège d'échanges thermiques et aérauliques complexes .

En vue de préciser les options du projet , pour respecter à la fois les impératifs de sécurité et les exigences de confort des futurs usagers , le climat intérieur de cet espace a pu être analysé avec le programme de simulation BILGA , au stade de l'avant-projet , puis du projet d'exécution.

Le volume intérieur a été découpé en 16 zones , le programme permettant d'évaluer , dans différentes conditions climatiques, l'évolution des climats intérieurs de chaque zone et les échanges d'air (fig.6).

Les conclusions opérationnelles ont permis de retenir les dispositions souhaitables vis-à-vis de la protection solaire, de la ventilation de l'Atrium , ainsi que des éléments chauffants intérieurs (dalles et films chauffants).

4.3 - Qualité de l'air intérieur des logements

La qualité de l'air intérieur des logements est actuellement un axe important de recherches de la FNB et de ses partenaires (EDF , GDF):
production et transferts des polluants domestiques , protection de la pollution extérieure, définition d'indices de la qualité de l'air .

Un programme de recherche commun sur trois ans est actuellement en cours , et vise à définir le cahier des charges de systèmes de chauffage et de ventilation permettant d'améliorer la qualité de l'air des locaux d'habitation :

- Enquête socio-culturelle large sur les insatisfactions actuelles et les attentes des usagers en matière de santé et confort dans l'habitat .
- Modélisation des phénomènes influant sur la qualité de l'air intérieur , et validation expérimentale (logiciel BILGA) .
- Elaboration de critères de qualité des ambiances , et de concepts en réponse aux attentes des usagers ,
- Cahier des charges de procédés de maîtrise des ambiances.

Figure 5 Vue intérieure de l'Atrium , depuis l'hôtel

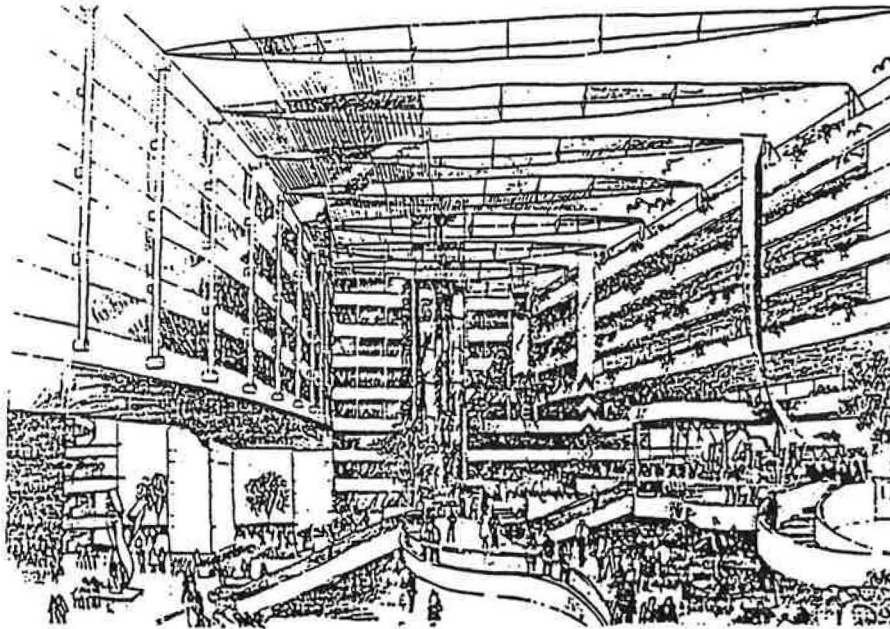
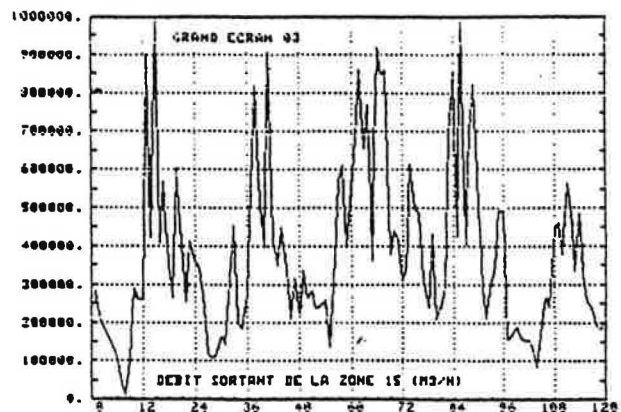
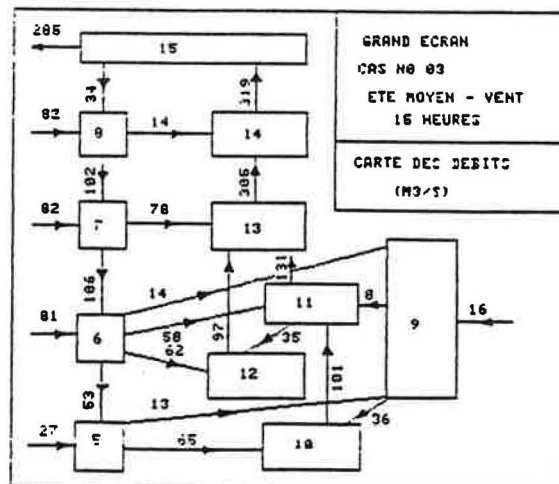


Figure 6 Echanges d'air dans l'Atrium

Les échanges d'air suivent globalement l'évolution des températures , avec une influence marquée du scénario d'occupation et du régime des vents



Dans ce schéma complexe d'échanges d'air (en coupe verticale) on distingue un mouvement ascendant prédominant le long des façades chauffées ,et une recirculation vers le bas entraînant les débits extraits de la zone hôtel



Les études en cours avec le logiciel BILGA visent à définir la représentativité d'indices de la qualité de l'air au travers de multiples scénarios d'occupation , de production de polluants et de conditions climatiques .

Parallèlement , les possibilités de BILGA sont utilisées pour représenter l'effet de conditions accidentelles :

- Conception d'un système de ventilation et de mise en confinement pour la réhabilitation de logements situés en zone à risque de pollution industrielle majeure .
- Modélisation et validation du logiciel pour l'étude des risques d'explosion liés aux fuites de gaz à l'intérieur des bâtiments.

5 CONCLUSION

Dans sa vocation initiale , BILGA était conçu comme un outil de recherche , principalement destiné à la caractérisation des performances énergétiques des composants du bâtiment . Un souci permanent de validation lui confère le caractère d'un banc d'essai numérique .

Constamment enrichi par les apports de la recherche et la variété des applications , il constitue actuellement un outil d'ingénierie multiforme , intéressant l'ensemble des disciplines du Bâtiment .

Références

- [1] R. FAUCONNIER , Ph. GUILLEMARD , A. GRELAT
Algorithmes des simulateurs du comportement thermique des Bâtiments BILGA et BILBO . Annales de l'ITBTP n°457/458
Septembre-Octobre 1987
- [2] A. GRELAT , R. FAUCONNIER
Exploitation des expérimentations en site naturel.
Confrontation aux résultats de la simulation numérique.
Rapport recherche FNB n°63019 . Janvier 1986
- [3] A. GRELAT , R. FAUCONNIER , M. TITECAT
Aide à la conception thermique de l'habitat courant en Afrique Tropicale . Rapport final
REXCOOP Avril 1985
- [4] R. FAUCONNIER , A. GRELAT
Modélisation des transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les bâtiments . Journée
S.F.T. Les transferts thermiques dans les milieux poreux . Mai 1989
- [5] P. DALICIEUX , Ph. NIARD , R. FAUCONNIER
Les échanges hygriques dans un logement. Modélisation et tentative de validation
expérimentale .
Congrès CIB 89 . Juin 89 . Paris

BILGA, A COMPLETE HYGROTHERMAL AND AERAULIC SIMULATOR FOR BUILDING PROFESSIONS

A. GRELAT

**G.E.R.M./C.E.B.T.P., Domaine de St Paul, BP 37
78470 Saint Remy Les Chevreuse**

Summary of communication

Computer program BILGA is a multi-zone type hygrothermal and aeraulic simulator of buildings behaviour , developped by C.E.B.T.P. and Fédération Nationale du Bâtiment since 1980.

It was progressively enriched by new developments , especially related to coupling of hygrothermal transfers between ambiances with moisture diffusion in walls and furniture , and account for transfers of interior pollution in a building .

Ventilation algorithms have recently been the matter of an original experimental validation , for natural ventilation in hot climates , in collaboration with C.S.T.B. of Nantes and University of Poitiers .

Integral coupling of thermal and aeraulic effects in multizone calculation allows to solve efficiently complex problems related to buildings and their envelope .

An enlightenment is proposed with a study of winter and summer thermal comfort in the Atrium of Grand Ecran project in Paris.

Indoor air quality of dwellings is now an important research axis for FNB and her partners : production and transfer of domestic pollution , protection from external pollution , definition of indexes of air quality . Present actions and some results will be discussed .

Keywords : Simulation , Hygro-thermal , Ventilation