

ARCHICUBE ET CODYMUR, LOGICIELS DE SIMULATION DES PONTS THERMIQUES ET DU COMPORTEMENT THERMIQUE D'UNE PAROI EN RÉGIME VARIABLE

Joseph VIRGONE

Centre de Thermique de Lyon, Equipe TB
virgone@etb.insa-lyon.fr

Jean NOEL

Ingénieur Free Lance
jnsoft@infonie.fr

RÉSUMÉ

ARCHICUBE a pour objet le calcul de coefficients linéiques de ponts thermiques 3D du bâtiment. Le calcul se fait rapidement sur un maillage défini automatiquement. CODYMUR permet l'étude en régime variable du comportement thermique d'une paroi. Les sorties sont traduites en terme d'énergie consommées, ainsi qu'en puissance instantanée pour faciliter les comparaisons entre différentes solutions. Une présentation de ces deux logiciels est proposée dans cette communication ainsi que quelques exemples de simulation pour illustrer les nombreuses possibilités d'utilisation.

Mots-clés: logiciels, simulation, ponts thermiques, paroi régime variable.

INTRODUCTION

Dans la Nouvelle Réglementation Thermique française [1] (RT 2000), le calcul des déperditions par les ponts thermiques ainsi que l'aspect dynamique des transferts thermiques dans le bâtiment tiennent une place importante.

Il est donc intéressant de disposer d'outils numériques permettant de calculer très rapidement les coefficients linéiques ou connaître l'influence de la combinaison des couches d'une paroi (alors que la résistance thermique globale de la paroi reste identique). Les objectifs sont toujours de réduire les déperditions et améliorer le confort des occupants : donc trouver des systèmes de liaisons réduisant les ponts thermiques ou des arrangements de couches permettant d'obtenir une meilleure restitution de l'énergie gratuite à l'intérieur du bâtiment au moment de son occupation ou bien un meilleur confort en période estivale.

Un autre intérêt de disposer de tels outils est pédagogique. L'enseignant peut facilement illustrer certains phénomènes thermiques en montrant des champs de températures ou des évolutions temporelles. L'étudiant peut, sur des exercices d'application, faire varier certaines conditions ou certains paramètres, afin d'analyser l'influence de ceux-ci.

ARCHICUBE a pour objet le calcul de coefficients linéiques de ponts thermiques 3D du bâtiment. La géométrie est composée par assemblage de parallélépipèdes, le calcul se fait ensuite rapidement sur un maillage défini automatiquement.

CODYMUR permet l'étude en régime variable du comportement thermique d'une paroi. Les sorties sont traduites en terme d'énergie consommées, ainsi qu'en puissance instantanée pour faciliter les comparaisons entre différentes solutions. D'autre part, sont intégrées des fonctionnalités liées à l'ensoleillement afin de considérer les évolutions réelles sur une façade orientée des apports réels. Il est également possible de simuler la paroi avec des données climatiques représentatives de conditions estivales et hivernales pour différents sites français.

Une présentation plus complète est proposée dans cette communication ainsi que quelques exemples de simulation pour illustrer les nombreuses possibilités d'utilisation.

ARCHICUBE Objectifs

Le traitement des ponts thermiques est une préoccupation importante des législateurs français et des valeurs de plus en plus draconiennes de transmissions linéiques ψ vont être imposées aux concepteurs de bâtiments dans les textes réglementaires en projet. Aussi l'existence d'un outil de simulation permettant de quantifier les déperditions par les ponts thermiques et pouvant être utilisable par les bureaux d'études comme par les enseignants ou les étudiants concernés par ces problèmes est primordiale.

Les outils actuels ne permettent pas toujours un calcul simple et automatique des coefficients linéiques. Pour répondre de façon générale à cette demande, et en même temps pour mettre au point les outils qui lui permettent de mener à bien ses travaux de recherche, le CETHIL a dans les deux dernières années mis au point un certain nombre de prototypes de calculs thermiques dans des géométries classiques du bâtiment.

Un premier outil a été développé en 98 pour EDF pour la réalisation de modèles réduits 2D pour le logiciel CLIM2000. Ce développement a permis d'acquérir une première expérience et de pouvoir bien définir le cahier des charges des outils suivants.

Un second outil, XCube, a été développé par Jean NOEL pour le CETHIL. Il a permis de valider les concepts de saisie rapide d'une géométrie 3D. Les géométries manipulées sont construites sur une grille par un emboîtement de cubes. Cette méthode est simple et permet à un utilisateur entraîné de réaliser une saisie et un calcul d'un pont thermique classique en moins de 5 minutes. En sortie, on obtient la matrice des flux en fonction des températures de part et d'autre de la géométrie (une valeur pour une simple paroi, plusieurs si le pont thermique est en T, etc.). Le logiciel XCube est une première version du logiciel plus complet ArchiCube permettant la manipulation automatique de ponts thermique en vue de leur introduction dans des outils de simulation globaux de type CODYBA pour la simulation de bâtiments complexes..

Conception de l'outil

Le logiciel ArchiCube s'articule en trois modules.

Le premier est un modéleur qui permet de créer rapidement des géométries 3D et de leur associer des conditions aux limites.

Le deuxième est un module de calcul qui effectue un calcul par volumes finis en stationnaire en moins de 30 secondes pour des géométries 3D maillées en 10000 cellules (en quelques dixièmes de secondes pour des ponts thermiques 2D courants).

Le troisième est un module de visualisation, qui permet d'analyser les résultats obtenus. Les écrans suivants présentent des affichages "type".

L'objet affiché à l'écran peut subir une rotation "temps-réel" piloté par un déplacement de la souris.

Les maillages sont définis automatiquement sans intervention de l'utilisateur.

Dans le noyau de calcul, le mailleur est entièrement automatique (pas d'intervention de l'utilisateur), et permet de limiter le nombres de degrés de liberté en plaçant les points de calcul uniquement dans les zones de forts gradients. La discrétisation spatiale est de type "volumes finis". A noter sur l'exemple de la figure 1 le maillage dense uniquement par endroit.

A terme le modéleur pourrait être étendu au traitement de géométries non régulières.

Exemples de cas pouvant être traités

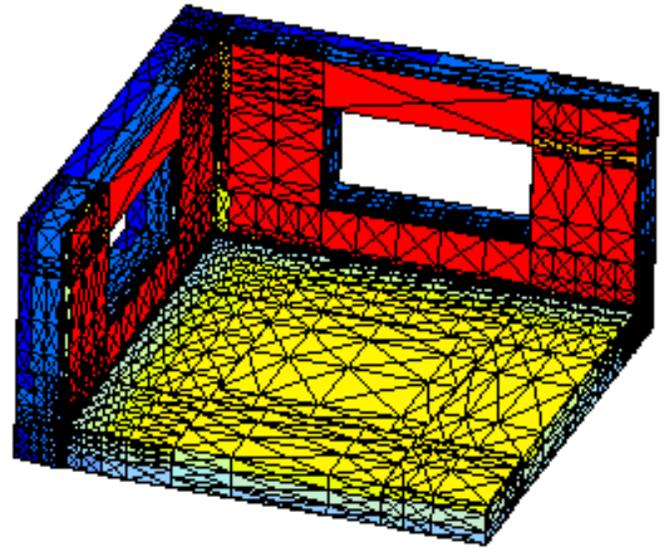


Figure 1 : Exemple de maillage en géométrie 3D traité sur une configuration classique du bâtiment

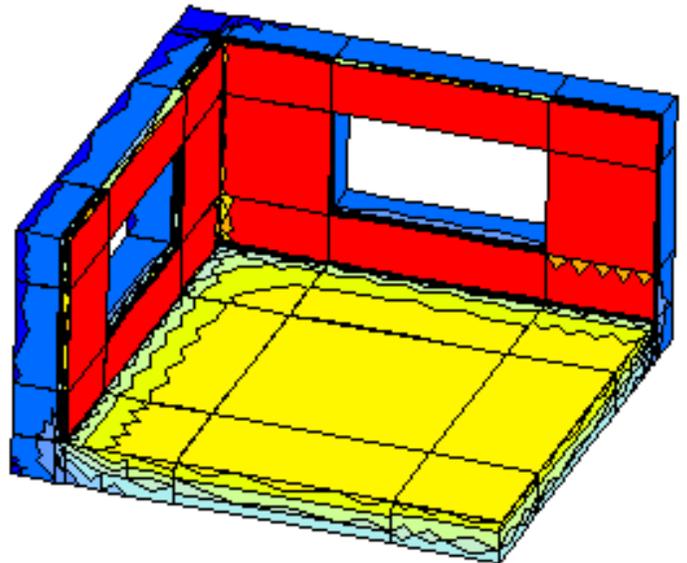


Figure 2 : Même exemple que la figure 1 avec représentation des parallélogrammes de la géométrie et des isothermes

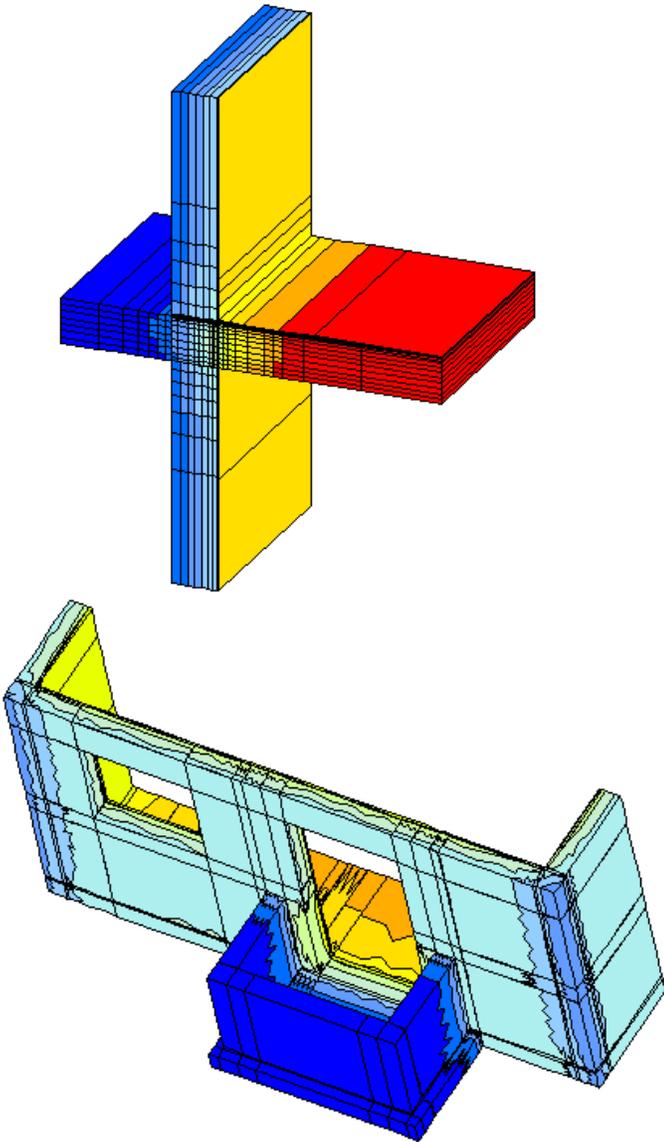


Figure 3 : autres exemples de cas traités par ArchiCube

KaLiBat

Une version 2D de ArchiCube appelée KaLiBat est disponible gratuitement par téléchargement sur le site <http://jnsoft.chez.tiscali.fr>.

Dans des géométries 2D en L ou en T, il permet d'obtenir rapidement la valeur du coefficient ψ : le calcul se fait habituellement en une seconde. Le noyau de calcul de KaLiBat est celui du logiciel ArchiCube. Le fonctionnement de KaliBat est analogue à celui d'une calculatrice.

KaLiBat se compose d'une interface graphique permettant une visualisation immédiate de la géométrie, avec les données qui la caractérise.

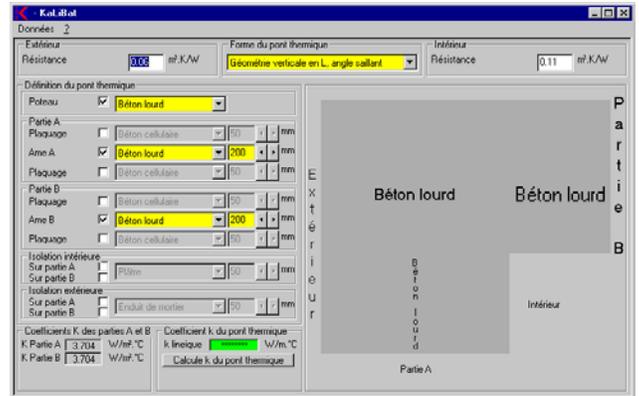


Figure 4 : Ecran d'entrée des données de KaLiBat

CODYMUR Objectifs

Dans la Nouvelle Réglementation Thermique, l'aspect dynamique des transferts thermiques dans les bâtiments tient une place importante. En particulier pour la thermique d'été où la nouvelle réglementation impose des valeurs limites de température atteinte dans les locaux sans climatisation.

Conçu pour répondre à ces nouveaux besoins, CoDyMur est un logiciel qui permet d'appréhender le comportement thermique d'un mur soumis à des sollicitations variées. Il s'adresse aux bureaux d'études et aux organismes d'enseignement et de recherche. Il permet par son interactivité une bonne compréhension des phénomènes de transferts de chaleur à travers une paroi en régime variable.

CoDyMur est un logiciel qui peut être utilisé pour l'enseignement de la thermique du bâtiment à partir du niveau de la terminale. L'exploitation de ce logiciel se situe à deux niveaux :

- Pour l'enseignant, le logiciel constitue un moyen d'élaboration de sujets de travaux dirigés sur micro-ordinateur adaptés au degré de connaissances de ses étudiants. Il peut permettre aussi d'illustrer rapidement, à l'aide d'un exemple concret, un point particulier d'un cours.
- Pour l'étudiant, il doit être considéré comme un outil de simulation qui sera utilisé suivant les directives du texte proposé par l'enseignant. Si ses connaissances de base sont suffisantes, l'étudiant pourra l'utiliser seul pour améliorer sa compréhension de phénomènes physiques dont l'interprétation est complexe.

CoDyMur réalise le calcul des températures au sein de la paroi ainsi que des flux aux surfaces, et cela en fonction du temps. Les résultats permettent d'analyser l'influence de certains paramètres comme la constitution de la paroi (épaisseurs, matériaux utilisés pour les couches ou les positions respectives de celles-ci), les ambiances thermiques de part et d'autre de la paroi.

En sortie figurent les évolutions temporelles des densités de flux intérieur et extérieur. Outre la connaissance des déperditions et des gains, il est possible de déterminer et de

comparer le temps de réponse de divers types de paroi. Ces évolutions permettent de visualiser le déphasage et l'amortissement de la paroi dans le cas d'une sollicitation périodique.

Conception

L'étude est réalisée sur une paroi correspondant à un mur, un plancher, un plafond ou tout autre surface de séparation d'un bâtiment.

Elle est composée d'un ensemble de couches associé à une liste de paramètres caractérisant les échanges thermiques en surface. Le nombre de couches est modifiable, mais la limite est de 7.

Couleur	Nom	Conductivité (W/m.K)	Masse vol. (kg/m3)	Capacité (J/kg.K)	Diffusivité 10-6 (m²/s)	Effusivité 10-6 (U.S.I.)
	Béton lourd	2	2450	1000	0.82	2214
	Béton de granulats légers	0.35	1100	1000	0.32	620
	Béton d'argille expansé	0.2	550	1000	0.36	332
	Béton cellulaire	0.145	400	1000	0.36	241
	Pisé	1.1	1800	1000	0.61	1407
	Enduit de mortier	1.3	1900	1000	0.68	1572
	Asphalte	0.7	2200	1000	0.32	1241
	Métal ferreux	72	7870	450	20.33	15968
	Plâtre	0.43	1050	1000	0.41	672
	Plaque de plâtre à parement de carton	0.25	825	1000	0.30	454
	Caoutchouc	0.17	1200	1400	0.10	534
	Plastique	0.25	1700	1400	0.11	771
	Carrelage	1.7	2300	1000	0.74	1977
	Bois résineux	0.15	500	1600	0.19	346
	Panneau fibrage	0.12	400	1700	0.18	286
	Laine de verre	0.041	15	1030	2.65	25
	Laine de roche	0.039	80	1030	0.47	57
	Polystyrène expansé	0.037	25	1450	1.02	37
	Laine d'air non ventilée	0.031	1	1000	31.00	6

Figure 5 : Liste des matériaux de construction disponibles

Couche	Matériau	Epaisseur (mm)	Résistance (m².K/W)
1	Béton lourd	200	0.1
2	Laine de verre	50	1.22
3	Plâtre	10	0.0233

Figure 6 : Exemple de constitution d'une paroi

Par hypothèse, les transferts de chaleur se font de façon unidimensionnelle.

La méthode de calcul utilisée pour la simulation du transfert de chaleur par conduction au sein de la paroi est une méthode par éléments finis en espace. Le nombre de points de calcul est fixé à 5 par couche.

L'intégration en temps se fait selon un schéma implicite pur. Le pas en temps est de 1 heure.

Les conditions initiales sont soit la température solution du problème stationnaire à l'instant initial, soit la température du précédent calcul.

Les conditions aux limites sont définies par les ambiances intérieures et les ambiances extérieures (qui correspondent bien évidemment aux conditions climatiques).

Une ambiance possède deux variables : la température d'air et le flux radiatif incident. La période correspond à la plage de temps sur laquelle la fonction de la variable est définie. La période peut être une semaine ou un jour (figure 10).

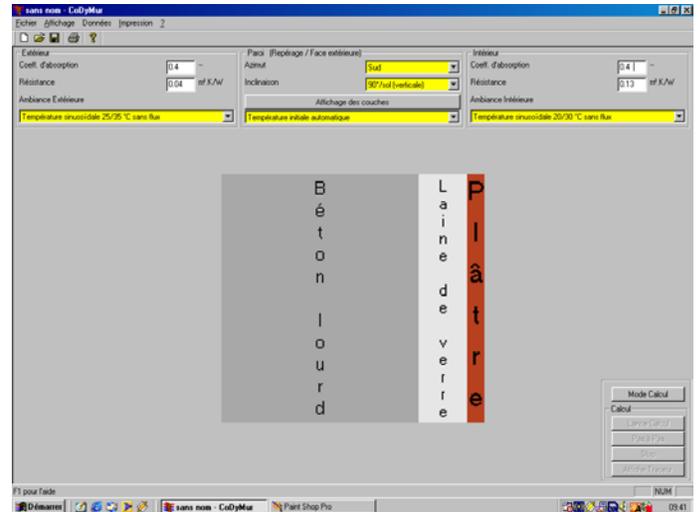


Figure 7 : Écran d'accueil de CoDyMur

Nom	Période	T min (°C)	T max (°C)	Période	F min (W/m²)	F max (W/m²)
Température constante 26 °C	Jour	26	26	Jour	0	0
Température constante 20 °C	Jour	20	20	Jour	0	0
Température sinusoïdale 20/30 °C sans flux	Jour	20	30	Jour	0	0
Température sinusoïdale 5/15 °C sans flux	Jour	5	15	Jour	0	0
Rampe de température de 5/20 °C sans flux	Semaine	5	20	Jour	0	0
Saut de température de 0/20 °C sans flux	Semaine	0	20	Jour	0	0
Température nulle avec saut de flux	Jour	0	0	Semaine	0	200
Température de 20 °C avec saut de flux	Jour	20	20	Semaine	0	200
Créneau de température 15/20 °C sans flux	Jour	15	20	Jour	0	0

Figure 8 : Liste des ambiances intérieures

Nom	Période	T min (°C)	T max (°C)	Période	F min (W/m²)	F max (W/m²)
Température constante de 30 °C sans flux	Jour	30	30	Jour	0	0
Température constante de 0 °C sans flux	Jour	0	0	Jour	0	0
Température sinusoïdale 25/35 °C sans flux	Jour	25	35	Jour	0	0
Température sinusoïdale 0/20 °C sans flux	Jour	0	20	Jour	0	0
Rampe de température 0/20 °C sans flux	Semaine	0	20	Jour	0	0
Saut de température de 0 à 20 °C sans flux	Semaine	0	20	Jour	0	0
Créneau de température 0/20 °C sans flux	Semaine	0	20	Jour	0	0
Température nulle avec saut de flux	Jour	0	0	Jour	0	500
Température sinusoïdale 25/35 °C et saut de flux	Jour	25	35	Semaine	0	500
Température nulle avec créneau de flux	Jour	0	0	Jour	0	500
Température nulle avec flux solaire	Jour	0	0	Semaine	45	50
Météo de la ville de Mâcon	Jour	0	0	Jour	0	0

Figure 9 : Liste des ambiances extérieures

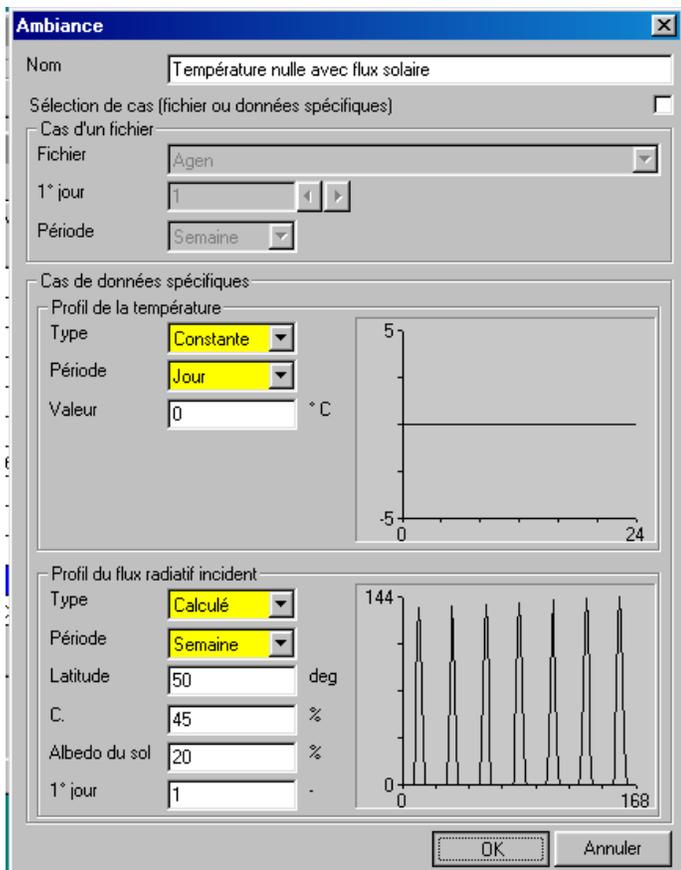


Figure 10 : Caractérisation d'une ambiance : par exemple, ici « température nulle avec flux solaire »

La forme de la variable correspond au profil de son graphe représentatif. Il peut s'agir d'une fonction constante nulle, constante, rampe, créneau. Un flux peut être également solaire. Les valeurs des variables d'ambiances peuvent également provenir des fichiers météo du logiciel CoDyBa [2, 3].

Il existe deux modes de travail : mode "saisie" ou mode "calcul". Les boutons qui apparaissent en bas et à droite de l'écran servent à piloter le calcul.

L'écran de l'application présente l'aspect de la figure 11 pendant la phase de calcul, tandis que dans la fenêtre annexe de la figure 12 défilent les valeurs du flux au cours du temps.

Les données de base sont modifiables par l'utilisateur :

- matériaux
- composition du mur
- conditions climatiques et conditions intérieures ("ambiances")
- paramètres de surface (coefficient d'échange et coefficient d'absorption)
- météo : les fichiers météo de 10 villes de France sont fournis.

Les conditions climatiques et les conditions intérieures sont constituées par combinaison d'un flux radiatif et d'une température ambiante.

CoDyMur détermine au cours du temps la température en chaque point du mur, ainsi que les flux de surface. Ces résultats défilent à l'écran en cours de calcul. Une gestion des impressions permet d'obtenir rapidement un rapport complet sur les évolutions temporelles des températures et des flux. Les résultats sont stockés automatiquement dans un fichier utilisable avec un tableur de type EXCEL : ceci permet de configurer à volonté la mise en forme des résultats.

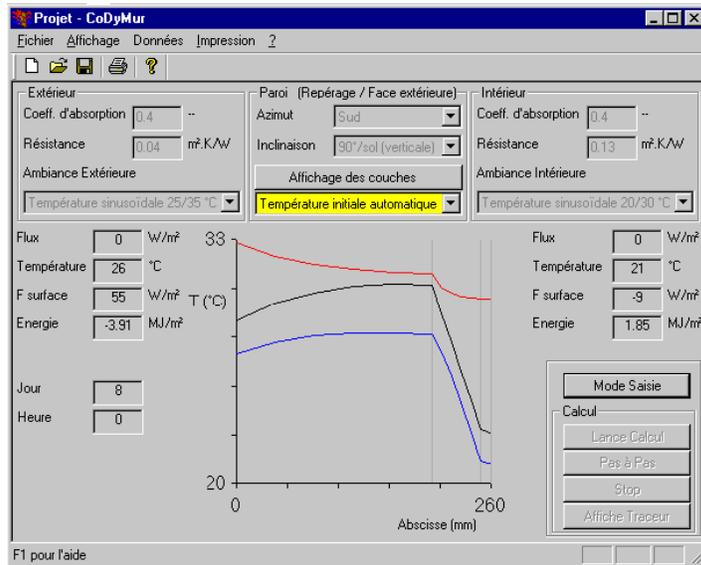


Figure 11: Écran d'application CodyMur en phase de calcul

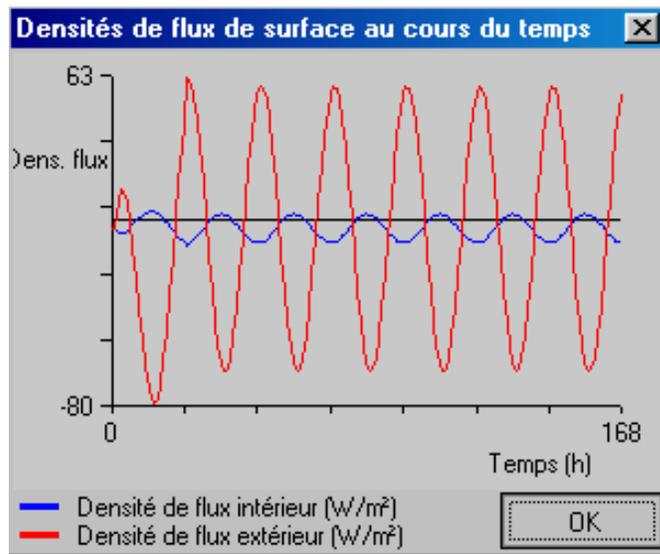


Figure 12 : Écran annexe donnant les flux au cours du temps

Le calcul peut s'effectuer de façon continue ou bien pas à pas. Pour chaque heure sont affichées sur un graphique la répartition de température dans la paroi et les courbes donnant les maxima et minima atteints au cours des dernières 24 heures.

A côté de cet affichage figurent les températures d'air, les flux radiatifs incidents et les températures de surface, ainsi que le cumul des flux aux surfaces (c'est-à-dire l'énergie). Par ce dernier affichage, il est possible de quantifier les quantités de chaleur absorbées pendant la journée et restituées pendant la nuit.

Les menus spécifiques de l'écran de la figure 11 sont :

1° : "Fichier" : gestion des lectures et sauvegardes des fichiers d'étude

2° : "Affichage" : affichage ou non de la barre d'outils et de la barre d'état

3° : "Données" : menus d'appel des différents écrans de saisie des données d'une étude

4° : "Impression" : fait apparaître les menus de gestion des impressions

Une version de démonstration de CODYMUR est disponible par téléchargement sur le site <http://jnsoft.chez.tiscali.fr>.

Exemples d'applications

Parmi les principaux thèmes que ce module permet d'étudier, un cahier d'exercices propose pour l'instant 5 applications :

- EXERCICE n°1 : Influence des caractéristiques thermophysiques des matériaux constituant une paroi homogène ;
- EXERCICE n°2 : Étude des phénomènes d'amortissement et de décalage dans le cas d'une sollicitation sinusoïdale ;
- EXERCICE n°3 : Étude des phénomènes d'amortissement et de décalage avec flux solaire ;
- EXERCICE n°4 : Étude comparative de parois de même conductance ;
- EXERCICE n°5 : Influence de la position de l'isolant relativement aux sollicitations intérieures et extérieures.

Pour chacun des exercices, un rappel des paramètres caractéristiques (comme le décalage et l'amortissement) est donné. Ensuite, le travail dirigé est détaillé pour aider l'étudiant dans la création de ses projets d'application : définition de la constitution des parois à étudier, des ambiances intérieures et extérieures à constituer. Enfin, une série de questions est posée dans lesquelles il est nécessaire d'analyser les résultats du logiciel et calculer certaines grandeurs permettant de réaliser des comparaisons.

Un grand nombre d'autres applications peut venir compléter ces quelques exercices comme par exemple l'analyse de l'influence de l'orientation d'une paroi par rapport au sud ou l'influence de l'inclinaison. On peut étudier aussi le cas du comportement d'une paroi soumise à un climat réel, avec chauffage continu ou intermittent.

CONCLUSION

L'utilisation des moyens informatiques dans le monde actuel se généralise. La thermique du bâtiment n'échappe pas à

l'engouement vers les outils conviviaux, qui ne requièrent pratiquement plus de manuel d'utilisation.

Les deux outils qui sont présentés pour le calcul des coefficients de déperditions linéiques et les transferts de chaleur en régime variable seront très utiles dans ce contexte. En pédagogie particulièrement, l'enseignant peut mieux faire comprendre les phénomènes au travers d'exemples traités, et les étudiants peuvent manipuler eux-mêmes, à leur rythme, afin d'analyser l'influence des paramètres introduits.

L'étape ultérieure de l'apprentissage de la thermique du bâtiment est de faire l'étude à l'aide d'un outil permettant d'étudier un bâtiment complet, avec ses vitrages, sa ventilation, ses occupants, les échanges entre zones thermiques : un outil multizone simplifié comme CODYBA [2, 3] peut alors être utilisé. Une version de démonstration est également disponible sur le même site web que les deux autres logiciels présentés dans cette communication.

REFERENCES

- [1] Arrêté du 29 novembre 2000 relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments.
- [2] NOEL, J., ROUX, J.J., KEILHOLZ, W., BRADLEY, D., Lien entre les logiciels SimCAD, TRNSYS et CODYBA, *V° Colloque InterUniversitaire Franco-Québécois, Thermique des Systèmes*, Lyon, France, p311-318, (2001).
- [3] DUTA, A., NOEL, J., ROUX, J.J., CoDyBa V6 : new version of software for building dynamical behaviour simulation, *PLEA 2000*, Cambridge, UK, p746-751, (2000).