



## **DYNASIMUL : Projet ANR-06-PBAT-004-01**

### **Rapport scientifique final**

#### **Coordinateurs du projet :**

*Coordination générale* : Etienne Wurtz (LMOPS INES-CNRS)

[Etienne.Wutz@univ-savoie.fr](mailto:Etienne.Wutz@univ-savoie.fr)

*Volet 1* : Peter Riederer (CSTB) [Peter.Riederer@cstb.fr](mailto:Peter.Riederer@cstb.fr)

*Volet 2* : Gilles Rusaouen (CETHIL) [Gilles.Rusaouen@insa-lyon.fr](mailto:Gilles.Rusaouen@insa-lyon.fr)

*Volet 3* : Elena Palomo del Bario (TREFLE)

[Elena.Palomo@bordeaux.ensam.fr](mailto:Elena.Palomo@bordeaux.ensam.fr)

#### **Rédacteurs du rapport :**

*Coordination* : Pierre Tittlein (LGCgE) [Pierre.Tittlein@univ-artois.fr](mailto:Pierre.Tittlein@univ-artois.fr)

*Volet 1* : Peter Riederer (CSTB) [Peter.Riederer@cstb.fr](mailto:Peter.Riederer@cstb.fr)

*Volet 2* : Mickael Albaric (CEA INES) [Mickael.Albaric@cea.fr](mailto:Mickael.Albaric@cea.fr)

*Volet 3* : Elena Palomo del Bario (TREFLE)

[Elena.Palomo@bordeaux.ensam.fr](mailto:Elena.Palomo@bordeaux.ensam.fr)

Aout 2010



# SOMMAIRE GÉNÉRAL

<i>Sommaire général</i> .....	3
<i>Introduction</i> .....	5
<i>Contexte et objectifs du projet</i> .....	7
1 Etat de l'art concernant le développement d'outils de modélisation .....	7
2 Enjeux scientifiques du développement de la plate-forme.....	8
3 Pertinence et portée du projet par rapport à la demande économique.....	8
4 Organisation des travaux dans le cadre de ce projet .....	9
<i>Volet 1 : Développement de plateformes de simulation opérationnelles</i> .....	12
1 Sommaire du volet 1.....	13
2 Présentation générale du volet 1 .....	14
3 Harmonisation des environnements .....	19
4 Couplage des environnements.....	32
5 Réalisation de Couplages "encapsulés".....	59
6 Bibliographie.....	73
<i>Volet 2 : Contenu de la base de données pour les parties propriétés thermo-physiques et caractérisation des modèles</i> .....	76
1 Sommaire du volet 2.....	76
2 Introduction .....	76
3 Propriétés thermo-physiques.....	77
4 Caractérisation des modèles de composants de bâtiments .....	84
5 Intégration de l'approche environnementale.....	96
6 Utilisation de la base de données.....	101
7 Perspective et avenir .....	114
<i>Volet 3: Développement d'une nouvelle approche de modélisation</i> .....	118
1 Sommaire du volet 3.....	118
2 Présentation générale .....	120
3 Réduction de problèmes linéaires de conduction par application de la méthode des facteurs de réponse.....	123
4 Réduction de problèmes de diffusion non linéaires.....	124
5 Application de la méthode P.O.D à l'équation de conservation de l'énergie dans l'air .....	137
6 Modèles LES pénalisés .....	141
7 Expérimentation d'une méthode multi-niveaux pour la résolution d'équations aux dérivées partielles avec couplage multi-échelles. ....	150
8 Modeleur-mailleur bâtiment .....	156
9 Conclusion et perspectives .....	162
<i>Conclusion générale et perspectives</i> .....	165

<i>Annexes</i> .....	168
<i>Sommaire des annexes</i> .....	168
<i>Annexes volet 1</i> .....	171
<b>1</b> État de l’art en termes de modèles et d’outils de simulation .....	171
<b>2</b> Enquête utilisateurs de logiciels de simulation.....	193
<b>3</b> Rapport sur les tests de l’exportation des types TRNSYS vers Simulink .....	202
<i>Annexes volet 2</i> .....	231
<b>1</b> Exemple de fiche Proforma.....	231
<i>Annexes volet 3</i> .....	241
<b>1</b> Complément d’information sur l’application de la méthode P.O.D. à l’équation de conservation de l’énergie dans l’air pour un cas 3D.....	241

# INTRODUCTION

L'objectif du projet dynasimul est de concevoir une plate-forme de simulation destinée à des chercheurs et transférable à des bureaux d'étude dans le domaine de l'énergétique du bâtiment.

Il s'articule autour de trois volets. Le premier concerne le développement de plates-formes de simulations opérationnelles. Le deuxième touche au développement d'une bibliothèque de modèles documentés au sein d'une base de données. Le dernier s'intéresse au développement de nouvelles méthodes de modélisations.

Ce rapport présente les avancées concernant les différents volets et plus particulièrement les résultats concrets obtenus en particulier le couplage SIMBAD-TRNSYS, le développement d'une base de données et de nouvelles méthodes de simulation.

Ce rapport est également envoyé au groupe miroir composé de Mat Santamoris de l'université d'Athènes, Daren Robison de l'EPFL de Lausanne et de Jean Michel Nataf de l'IGN à Paris qui pourront donner leur avis sur le travail réalisé et proposer une orientation pour ce projet à l'occasion de la prochaine réunion plénière qui aura lieu le 16 octobre 2008 à l'ENTPE à Lyon



# Contexte et objectifs du projet

## 1 Etat de l'art concernant le développement d'outils de modélisation

Le secteur des bâtiments résidentiels et tertiaire représente le deuxième poste d'émission de CO<sub>2</sub> (25%) et le premier poste de consommation énergétique en France (46 %) et l'énergie utilisée n'est pas nécessairement la mieux adaptée (*par exemple, l'électricité, énergie noble, est gâchée lors d'usages basse température ou thermiques directs*). Il est donc indispensable, d'une part de limiter cette consommation énergétique en réduisant les besoins et en visant l'efficacité énergétique optimale et, d'autre part de rechercher des sources nouvelles à intégrer dans l'habitat et le tertiaire. Pour atteindre ces objectifs énergétiques, des développements technologiques sont nécessaires aussi bien au niveau des enveloppes des bâtiments que des systèmes énergétiques eux-mêmes. Ces développements doivent s'appuyer sur des résultats de recherche à caractère plus fondamental touchant tout d'abord les aspects de connaissance et de compréhension des phénomènes, en particulier ceux relatifs aux transferts de chaleur (*radiatifs, conductifs, convectifs*) et de masse (*espèces chimiques, odeurs, particules...*), à la qualité des ambiances (*éclairage, acoustique, confort hygrothermique, qualité de l'air...*), à l'instrumentation et aux moyens d'investigation adaptés ainsi qu'à la modélisation des comportements des occupants. Dans ce contexte, la modélisation est un instrument incontournable car elle répond au besoin incessant d'améliorer les connaissances et d'apporter des solutions au problème de bilan énergétique positif, tout en étant un vecteur efficace de transfert de connaissances vers le milieu professionnel. L'étude des transferts de chaleur et de masse dans les bâtiments remonte à maintenant presque un siècle, les modèles élaborés s'étant complexifié et raffiné au fil des décennies. A partir des années 70, des nombreux logiciels de simulation thermique du bâtiment vont également voir le jour. Au fil des années, les architectures monolithiques qui ont caractérisé les premiers développements ont laissé la place à des approches bien plus flexibles et modulaires : la description du problème, l'identification de phénomènes et de leurs liens, l'affectation de modèles, la résolution et l'analyse deviennent des mondes distincts. Ces évolutions se sont fortement inspirées de concepts empruntés à la systémique et à l'informatique (*ex. objets, hiérarchie, héritage, etc.*) et elles ont été accompagnées des plusieurs efforts de définition de sémantiques de modélisation transverses. Cependant, les besoins de la recherche et d'un métier qui exige des approches d'évaluation de plus en plus globales et transverses n'ont pas été encore comblés. Aujourd'hui, les développements sont marqués par la notion d'interopérabilité et par l'apparition de plate-formes numériques regroupant des codes dédiés (*thermique, acoustique, éclairage, analyse de cycle de vie, etc.*) capables de partager des informations, de dialoguer entre eux et d'apporter de solutions de conception plus globales.

## 2 Enjeux scientifiques du développement de la plate-forme

L'objectif de ce projet est de concevoir une plate-forme virtuelle de recherche dans le domaine "Apport des énergies renouvelables et maîtrise des échanges dans l'habitat". Il s'agit d'un projet ambitieux qui doit être entrepris dans le cadre d'un réseau liant les différents laboratoires de recherche compétents dans le domaine au plan national tout en restant ouvert à l'échange et à la discussion avec les acteurs socio-économiques du bâtiment. Dans le futur, cette plate-forme devra jouer un rôle moteur dans :

- La capitalisation des connaissances et des compétences des laboratoires de recherche publics et privés dans le domaine du bâtiment en France.
- L'innovation et la création d'idées nouvelles sur le problème de bilan énergétique positif. En effet, l'intégration de solutions de captation de l'énergie solaire, de gestion énergétique de systèmes couplés, de production d'énergie sous diverses formes, de stockage et de distribution ou de mise à disposition sur des réseaux, des nouvelles solutions d'enveloppe, a besoin d'être testée et évaluée et, à ce titre, la simulation sur ordinateur du fonctionnement des dispositifs imaginés par le chercheur permet d'apporter des réponses rapides et à moindre coût.
- Les transferts interdisciplinaires, à travers un réseau comportant à la fois des thermiciens, des électriciens, des automaticiens et des acteurs socio-économiques et du bâtiment (*architectes, bureaux d'études, gestionnaires, etc.*)
- Le développement d'une approche globale d'évaluation et de conception intégrant des aspects énergétiques, de qualité de l'air et de confort, environnementales, socio-économiques, etc. avec l'ambition de répondre à des objectifs de nature diverse (*certification, conception, gestion, diagnostic, etc.*) et qui impliquent des compétences et des échelles spatio-temporelles d'analyse très variées.
- La génération d'outils dédiés suivant les besoins (*certification énergétique, de conception, de suivi et d'opération, de régulation, de diagnostic énergétique, etc.*) et les questions posées par les acteurs du bâtiment, ceci étant un point clé pour un transfert efficace des technologies innovantes et des connaissances scientifiques.

## 3 Pertinence et portée du projet par rapport à la demande économique

La conception des bâtiments et des équipements à très faible consommation d'énergie tant dans l'existant que dans le neuf passe par :

- La mise au point par les industriels de produits innovants,
- La capacité pour les concepteurs de définir des conceptions globales pertinentes.

Une tendance possible serait de poursuivre les tendances actuelles de développement appliqué. Ceci présente un risque certain car il semble illusoire de considérer qu'un bâtiment à basse consommation ou à énergie positive est la simple amélioration des composants mis en œuvre. On peut en citer quelques exemples pour l'existant

- La diminution des déperditions énergétiques rend importantes en valeur relative les pertes par défaut d'étanchéité,
- L'isolation par l'intérieur risque de dégrader le confort d'été,
- Les faibles besoins de chauffage demandent des systèmes adaptés,
- La prise en compte des occupants est indispensable pour l'acceptabilité des concepts techniques.

Il importe donc de développer la recherche sur tous ces aspects ce qui nécessite de capitaliser le savoir élaboré par les différentes équipes au sein d'une base de donnée disponibles à l'ensemble des acteurs travaillant dans le domaine de l'énergétique du bâtiment. Cette mutualisation du savoir a pour intérêt majeur d'éviter la duplication de tâches communes à l'ensemble des équipes, en appliquant la règle de subsidiarité. Elle concerne la capitalisation des actions de recherche sur les composants et assemblages mais également la mise à disposition de la communauté de recherche d'environnements de simulation intégrant de façon directement utilisable tous les éléments supports pouvant être mis en commun (*tels que données climatiques, bâtiments type, scénarios...*).

## **4 Organisation des travaux dans le cadre de ce projet**

Comme il a été déjà signalé, la plate-forme virtuelle doit être un outil d'expérimentation numérique permettant l'innovation et la création d'idées nouvelles, les transferts interdisciplinaires, le développement d'approches globales d'évaluation et de conception et la génération d'outils dédiés. Il est également important de prévoir la dissémination et la formation sur la plate-forme virtuelle créée Ceci exige, dans un premier temps :

- une enquête approfondie sur les besoins et une analyse des plate-formes existantes ;
- une réflexion poussée sur l'architecture requise pour que la plate-forme soit capable de satisfaire les besoins d'aujourd'hui et d'évoluer dans le temps pour s'adapter à des nouveaux besoins ;
- une connaissance approfondie des modèles disponibles, des sémantiques de modélisation, des méthodes de documentation, des méthodes d'affectation, des solveurs, etc ;
- une réflexion sur l'exploitation des modèles comportant bien sûr l'analyse des méthodes de simulation directe, mais aussi des techniques d'analyse de sensibilité, d'optimisation, de régulation commande, d'assimilation de données, etc.

## Contexte et objectifs du projet

Le projet pourrait s'articuler autour de trois volets avec des tâches distinctes mais connexes qui seraient pilotées par les intervenants décrits dans le tableau ci-dessous:

Coordination du projet INES-CNRS	VOLET 1 Développement de plate-formes de simulation opérationnelles CSTB
	VOLET 2 Développement d'une bibliothèque de modèles documentés au sein d'une base de données CETHIL et CEP
	VOLET 3 Développement d'une nouvelle approche de modélisation TREFLE

# **DYNASIMUL**

## **Contribution au Rapport Final**

### **-Volet 1-**

## **Développement de plateformes de simulation opérationnelles**

Coordinateur : CSTB

Juillet 2010

# Volet 1 : Développement de plateformes de simulation opérationnelles

## Résumé du volet 1: Développement de plateformes de simulation opérationnelles

La simulation dynamique s'applique à différents métiers qui nécessitent, chacun, son outil adapté. De même, pour les utilisateurs, une application de la simulation nécessitera différents outils s'il s'agit d'un chercheur, d'un bureau d'étude ou d'un industriel. L'application de la simulation qui peut être par exemple l'optimisation de la performance énergétique du bâtiment et de ses systèmes, la régulation et gestion, l'optimisation de produits (*isolés ou dans un ensemble*) ou d'autres, demande également un outil adapté. L'ensemble de ces raisons ont conduit à la création d'une panoplie d'outils de simulation.

Le volet 1 du projet Dynasimul s'inscrit dans une démarche d'harmonisation de ces outils pour d'un côté augmenter la fiabilité des outils et de l'autre côté rendre les outils plus puissants en les combinant.

La démarche appliquée est la suivante :

- Décrire et cataloguer les outils actuellement utilisés.
- Définir les besoins des utilisateurs (*travail de simulation et de production de résultats*).
- Connaître les modèles disponibles dans les outils en vue d'un partage de modèles.
- Assurer la bonne précision des modèles.
- Réaliser des couplages entre outils pour augmenter les possibilités de simulation (*modèles non disponibles dans l'outil x*) et pour couvrir plusieurs métiers, utilisateurs, buts, systèmes et technologies ;

Il comporte trois parties, le développement d'une stratégie globale pour la mise en commun des environnements, l'harmonisation des outils en terme de données d'entrées (*données météorologiques, profils d'occupation etc.*) ainsi que la réalisation de couplages entre différents environnements.

# 1 Sommaire du volet 1

<b>Volet 1 : Développement de plateformes de simulation opérationnelles</b> .....	<b>12</b>
<b>1 Sommaire du volet 1</b> .....	<b>13</b>
<b>2 Présentation générale du volet 1</b> .....	<b>14</b>
2.1 Définition d'une architecture globale pour regrouper les environnements .....	14
2.2 Harmonisation des données d'entrée .....	15
2.3 Couplage des environnements .....	16
2.3.1 Couplage global .....	16
2.3.2 Couplage "encapsulé" .....	17
<b>3 Harmonisation des environnements</b> .....	<b>19</b>
3.1 Analyse des environnements potentiels en termes de modèles, de fonctionnalité et de leur utilisation typique <sup>19</sup>	
3.2 Enquête auprès des utilisateurs potentiels des environnements .....	19
3.3 Exercices de comparaison (bancs d'essais).....	20
3.3.1 Introduction.....	20
3.3.2 Validation expérimentale .....	20
3.3.3 Banc d'essais , comparaisons interlogicielles .....	23
3.3.4 Etude des données climatiques.....	29
3.3.5 Autres données.....	30
3.3.6 Conclusions.....	30
<b>4 Couplage des environnements</b> .....	<b>32</b>
4.1 état de l'art des couplages .....	32
4.1.1 Introduction.....	32
4.1.2 Problématique du couplage .....	33
4.1.3 Méthodes d'échange de données.....	34
4.1.4 Les techniques numériques de couplage .....	36
4.1.5 Quelques mises en œuvres de ces couplages appliqués au bâtiment.....	39
4.2 Réalisations de Couplages globaux.....	40
4.2.1 Introduction.....	40
4.2.2 Le modèle HYBCELL .....	41
4.2.3 Le modèle MOCASOLI.....	52
4.2.4 Le modèle AdOCC.....	56
<b>5 Réalisation de Couplages "encapsulés"</b> .....	<b>59</b>
5.1 Introduction.....	59
5.2 Principe .....	59
5.3 L'architecture de TRNSYS .....	60
5.4 L'architecture de MATLAB .....	61
5.5 Utilisation de composants TRNSYS sous MATLAB .....	62
5.5.1 Le concept.....	62
5.5.2 L'implémentation : génération automatique de code Simulink par TRNSYS Simulation Studio.	64
5.6 Utilisation de composants MATLAB sous TRNSYS .....	64
5.6.1 Le concept.....	64
5.6.2 L'implémentation : Un « template » RTW pour la génération de Types TRNSYS .....	65
5.7 Comportement numérique des composants importés.....	66
5.8 Limitations .....	66
5.9 Version de SIMBAD en cours de développement .....	67
5.9.1 Architecture.....	67
5.9.2 Modèle de données.....	69
5.9.3 Description de l'enveloppe bâtiment.....	69
5.9.4 Description des systèmes .....	70
5.9.5 Validation.....	71
<b>6 Bibliographie</b> .....	<b>73</b>

## 2 Présentation générale du volet 1

Les concepts modernes de construction (*mixage d'énergies, bâtiments basse-consommation, à énergie positive...*) et les produits associés (*matériaux à changements de phase, isolants sous vide, systèmes de chauffage et refroidissement performants, équipements multi-agents de régulation...*) sont de plus en plus complexes et doivent répondre à des exigences de performance et de qualité de plus en plus sévères.

Une optimisation de l'ensemble "bâtiment-systèmes" devient donc de moins en moins faisable en raison de la complexité de l'ensemble, en travaillant de façon isolée sur un phénomène. Pour optimiser le problème, une prise en compte globale des phénomènes est nécessaire. Aujourd'hui il ne s'agit donc plus d'utiliser un seul outil logiciel mais des environnements de simulation qui collaborent entre eux, permettant ainsi d'améliorer la qualité de la simulation en prenant en compte un plus grand nombre de phénomènes physiques de façon couplée.

Pour l'instant, la modélisation numérique des problèmes physiques, la mise en œuvre de solutions et leur intégration dans le processus de conception sont souvent traitées dans des environnements très spécifiques, chacun de ces environnements ayant son avantage dans son domaine et ses particularités (*tel que les pas de temps utilisés etc.*) par exemple :

- TRNSYS ou Energy+, environnements spécialisés sur la simulation dynamique du bâtiment et de ses systèmes pour la conception des bâtiments,
- SIMBAD Building and HVAC toolbox, développé pour le développement de stratégies de régulation innovants et du test de produits de régulation dans le cadre de la normalisation européenne,
- Spark, à la base un solveur numérique, mais adapté en France pour la simulation des phénomènes thermo-aérauliques et de la caractérisation des systèmes pour un bâtiment.

L'optimisation d'un bâtiment dans sa globalité nécessite donc le recours à ces différents environnements de simulation soit de façon chaînée soit de façon simultanée.

Dans les deux cas, une mutualisation s'avère nécessaire et devra porter sur :

- la définition d'une architecture globale permettant de regrouper les environnements de simulation sélectionnés,
- l'harmonisation des données d'entrée des environnements (*modèles de données etc.*),
- le couplage entre les environnements lors de la simulation pour combiner au maximum les avantages de chaque environnement.

Le travail dans le volet 1 se divise en trois parties décrites ci-dessous :

### 2.1 DÉFINITION D'UNE ARCHITECTURE GLOBALE POUR REGROUPER LES ENVIRONNEMENTS

La réalisation d'une architecture globale du fonctionnement est à définir dans un premier temps. Cette architecture décrira les interactions en phase de description du projet de simulation telles que l'utilisation des modèles de données et de leur prise en compte dans les environnements. Ensuite, les modes de couplage seront définis ainsi que les phénomènes d'interaction entre ces environnements lors d'une simulation couplée. Cette phase a le rôle d'identifier et ensuite de lever les différentes barrières scientifiques et technologiques du couplage et de la mutualisation des modèles et de données, de les implémenter en partie ainsi que des proposer des méthodologies pour la suite.

## **2.2 HARMONISATION DES DONNÉES D'ENTRÉE**

Le premier pas vers la modélisation consiste à décrire l'objet d'étude. Pour le bâtiment, ceci se traduit par une description géométrique de ses éléments constitutifs, de leurs propriétés et de leurs relations. Il s'agit d'une tâche lourde, coûteuse en temps, et qui est souvent accomplie à l'intérieur des environnements de modélisation-simulation en prenant comme point de départ les informations contenues dans des plans ou des fichiers de plans. Ceci constitue un handicap majeur à la diffusion des outils de simulation en milieu professionnel car à chaque besoin (*certification, conception des enveloppes, conception des installations, régulation, ACV, etc.*) correspond un outil de modélisation dédié et donc une saisie "ad hoc" de la description du bâtiment. La réduction du temps nécessaire à la préparation des informations requises pour l'analyse et la simulation est un besoin exprimé de longue date. Les premières initiatives dans ce sens ont porté sur l'échange de fichiers entre des systèmes CAO et des outils d'évaluation. Il est apparu rapidement le besoin de s'accorder sur un modèle de référence pour que ces échanges soient indépendants des logiciels. En 1996, l'Alliance Internationale pour l'Interopérabilité (IAI) a été créée ; il s'agit d'une association à but non lucratif dont l'objectif est de spécifier un langage commun indispensable à l'amélioration de l'interopérabilité entre logiciels. Ses travaux ont donné lieu aux IFC (*Industry Foundation Classes*), des classes d'objets spécifiques à la construction et destinés à répondre aux besoins d'échange et de partage d'informations. Bien qu'ils soient l'objet aujourd'hui d'un large consensus au niveau international et qu'ils aient été adoptés par différents éditeurs de logiciels leur utilisation reste lourde en raison de leur vocation à être très général donc peu adaptés à une application particulière comme le bâtiment.

Un projet PREBAT est actuellement en cours sur le développement d'un modèle de données uniforme et utilisé par l'ensemble des outils de simulation en France et les développements seront très utiles dans le cadre de la réalisation de ce projet. Le développement d'une interface graphique généralisée permettant d'obtenir les données est également nécessaire dans un second et devra être développé dans une prochaine étape à l'issue de la réalisation de ce projet.

Dans le cadre de ce projet, la définition d'une méthodologie pour une création future de modèles de données pour l'ensemble des systèmes de chauffage et de climatisation dans le bâtiment est envisagée. Ces modèles de données représentent les données nécessaires pour

paramétrer les modèles de simulation. Leur prise en compte permettra de s'assurer que les mêmes paramètres soient utilisés lorsqu'un projet est simulé dans différents environnements (*dans les diverses phase de conception*).

Les données à prendre en compte lors de ce travail seront :

- systèmes de chauffage (de la production à l'émission de chaleur),
- systèmes de climatisation (de la production à l'émission de chaleur),
- systèmes et réseaux de ventilation (incluant les données de bâtiment interagissant sur l'aéraulique tel que les portes, ouvertures etc.),
- réseaux hydrauliques pour le chauffage et la climatisation,
- données climatiques pour la simulation du bâtiment,
- scénarii type et comportement des occupants.

Ce type de données est en effet requis par toutes les plateformes virtuelles, et un gain d'efficacité important réside dans leur mise en commun.

Il s'agit, dans le cadre de ce projet, de se mettre d'accord sur le mode de description des systèmes. Dans une future étape la prise en compte directe par les environnements sera à développer.

## **2.3 COUPLAGE DES ENVIRONNEMENTS**

Deux types de couplages seront analysés et réalisés lors de ce projet :

### **2.3.1 COUPLAGE GLOBAL**

Ce type de couplage se réalisera par un fonctionnement en parallèle de plusieurs environnements. L'avantage de ce couplage est une grande flexibilité d'utilisation des différents solveurs en parallèle et d'assemblage des modèles dans chaque environnement (*des macromodules peuvent ainsi être couplés*). L'inconvénient de ce couplage par contre est le temps de simulation ralenti du au fonctionnement en parallèle des environnements qui rend son utilisation plus lourde mais l'augmentation des puissances de calcul des ordinateurs peut pallier cette difficulté.

Le couplage est actuellement existant pour l'appel de Matlab par TRNSYS mais n'est pas encore assez généralisé et fonctionnel dans un seul sens. D'autres couplages sont à réaliser entre Simulink / SIMBAD, TRNSYS, Energie+ et Spark.

Le couplage en parallèle des environnements de simulation Simbad-TRNSYS et SPARK-Energy+ pourra se réaliser par la mise en place des passerelles tout en gardant l'intégrité de chacun (*liaisons DDE, lien OLE etc.*). Une attention particulière sera accordée aux découpages dans le temps des deux environnements (*synchronisation, exécution simultanée, communication*) et leurs conséquences sur la convergence numérique. Ce type de couplage est

plus simple à réaliser que le deuxième type et son achèvement dans le temps du projet est possible. L'application de la démarche à un autre environnement, PLEIADES-COMFIE, sera étudiée afin de permettre une diffusion plus large des résultats de la recherche, et de chaîner l'évaluation énergétique à l'analyse de cycle de vie. A titre d'illustration, cet outil sera appliqué à un système constitué d'un bâtiment et de plusieurs composants en interaction.

### **2.3.2 COUPLAGE "ENCAPSULÉ"**

Ce deuxième type de couplage n'existe pas actuellement mais simplifiera énormément les travaux de simulation dans le cadre d'un projet. Le principe est d'utiliser le code d'un composant de la bibliothèque de modèles (*qui est en fait associé de modèles de différents environnements*) de façon encapsulée. Il serait donc possible d'intégrer un seul modèle ou un assemblage de modèles d'un environnement dans un autre environnement sans faire appel direct à l'environnement d'origine de ce modèle. Le résultat est la possibilité, pour le "simulateur" de simuler dans son environnement préféré mais en utilisant des modèles qui ne sont pas dans la bibliothèque de modèles de cet environnement.

La réutilisation de portions de code nécessitera le développement des entités encapsulées (*modules*) utilisables dans les deux environnements (*dll, code en C etc.*) et des interfaces associées pour le couplage. La généralisation des interfaces devra faire appel à la définition de vecteurs de transfert d'interface qui seront définis ainsi que la construction d'une interface de couplage avec génération automatique de l'interface de couplage.

Dans le cadre du projet, ce mode de couplage sera développé sur la base d'un exemple et, selon la faisabilité, généralisé pour une utilisation courante dans les environnements.

Étant données les ambitions de la plateforme, modularité, partage-échange d'informations et dialogue apparaissent comme étant des mots clés. Les problèmes principaux à traiter concernent :

- La description du problème qui doit être unique et partagée ensuite par toutes les applications, avec la possibilité de faire remonter des informations depuis l'application jusqu'à la description. Ceci est facilité par un langage commun permettant les transferts d'informations.
- Les outils médiateurs description-applications requis, capables d'extraire les informations pertinentes pour une application donnée sans encombrer l'étude avec des données non nécessaires.
- La définition d'outils d'interprétation des résultats en fonction des applications et des questions posées par l'utilisateur.
- Les besoins d'évolution et de maintenance de la plateforme.

## Volet 1 : Développement de plateformes de simulation opérationnelles

Le travail fourni dans ce volet devra également tenir compte des efforts entrepris dans le cadre de projets antérieurs visant notamment à définir un format standard de description des bâtiments entre des outils réglementaires et des outils d'évaluation des performances.

### **3 Harmonisation des environnements**

#### **3.1 ANALYSE DES ENVIRONNEMENTS POTENTIELS EN TERMES DE MODÈLES, DE FONCTIONALITÉ ET DE LEUR UTILISATION TYPIQUE**

De nombreux outils d'énergétique du bâtiment ont été développés par le passé. L'objet de cette partie est de présenter les caractéristiques des outils suivants : EnergyPlus, ESP-r, TRNSYS, Comfie, Codyba, Th-C-E et SimSPARK. Un questionnaire, élaboré pour mettre en avant les aspects discriminants d'un point de vue des modèles mis en œuvre et de l'architecture des logiciels, a été transmis aux développeurs ou utilisateurs experts.

Les résultats de l'enquête mettent en avant deux catégories d'outils. Les premiers se limitent à évaluer le comportement thermique (et parfois aéraulique) du bâtiment seul (enveloppe et zones thermiques) alors que les seconds permettent de plus de prévoir les performances des équipements et de leur système de gestion.

Si tous les outils sont en mesure de traiter les transferts de chaleur (avec une limitation pour Th-C-E qui ne prend pas en compte les échanges entre zones dus à la ventilation) dans le bâtiment, seuls EnergyPlus, TRNSYS (associé à Comis/TRNFlow) et SimSPARK sont en mesure de traiter les transferts thermo-aérauliques couplés (et par voie de conséquence les problèmes qualité de l'air ou de ventilation naturelle).

Concernant l'architecture des outils, seuls TRNSYS, SimSPARK et dans une certaine mesure EnergyPlus permettent à l'utilisateur d'ajouter ses propres modèles. Si certains codes sources sont disponibles (sous licence GPL ou payante) la mise en œuvre de nouveaux modèles requiert un effort important pour identifier les hypothèses et structures nécessaires à la formulation et la résolution du problème. Pour les autres outils il faudra s'en remettre aux développeurs ou éditeurs pour l'intégration de nouveaux modèles. Ceci peut être un frein à l'usage d'un outil dans le cadre de la recherche.

Enfin, les nouveaux besoins identifiés concernent à la fois la modélisation physique dans le cadre de bâtiments très performants et l'usage de méthodes pour améliorer et fiabiliser les processus de diagnostic et de conception. A ce stade de l'étude il n'est pas possible de préciser les besoins concernant les méthodes. En revanche, la capacité des outils à intégrer de nouveaux modèles dans un cadre de résolution numérique robuste est un atout indéniable pour palier les faiblesses actuelles des outils dans l'analyse de la qualité de l'air, de l'impact du micro-climat urbain, de systèmes énergétiques innovants et de leur gestion intégrée.

L'étude complète est reportée en annexe de ce document.

#### **3.2 ENQUÊTE AUPRÈS DES UTILISATEURS POTENTIELS DES ENVIRONNEMENTS**

Une enquête a été réalisée pour connaître les attentes des utilisateurs de logiciels de simulation en terme d'adéquation entre leurs études et des possibilités des logiciels utilisés. Cette étude a permis de montrer que les utilisateurs sont demandeurs d'outils multifonctionnels ou ayant des possibilités de couplages leur permettant de faire à la fois des études en thermiques mais aussi en acoustique, en éclairage etc. Le questionnaire ainsi qu'une synthèse des réponses à cette étude se trouve en annexe.

### **3.3 EXERCICES DE COMPARAISON (BANCS D'ESSAIS)**

#### **3.3.1 INTRODUCTION**

Les outils de simulation thermique permettent d'évaluer les besoins énergétiques et le niveau de confort thermique des bâtiments. La question de la validité de ces modèles est souvent posée par les utilisateurs. Afin de répondre à cette question, plusieurs activités de validation ont été menées, en particulier :

- des comparaisons par rapport à des mesures,
- des comparaisons inter-modèles, dans le cadre de bancs d'essais de logiciels,
- la comparaison des données climatiques utilisées.

Ce document fait le point sur ces activités, de manière à constituer un état de l'art mais aussi dans le but de contribuer à la réflexion concernant les limites de ces travaux antérieurs, et la proposition de nouvelles activités.

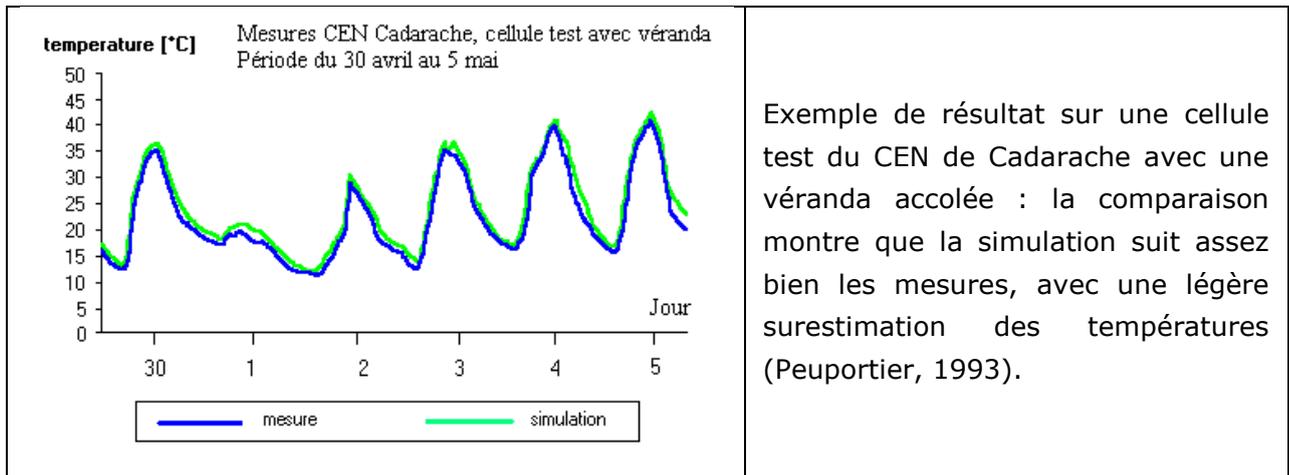
#### **3.3.2 VALIDATION EXPERIMENTALE**

##### **3.3.2.1 Cellules test Passys**

La Commission Européenne a lancé dans les années 80 un programme de recherche, PASSYS, concernant l'énergie solaire "passive". L'un des axes de ce programme a consisté à réaliser des cellules test dans plusieurs pays. Il s'agit de petits bâtiments instrumentés, situés en ambiance extérieure, dont la façade sud peut être démontée et remplacée par divers types de composants : par exemple, une façade standard avec une fenêtre, une façade avec véranda accolée, une façade avec isolation transparente par l'extérieur.

Ces bâtiments ont permis de collecter des données expérimentales adaptées à la validation des modèles. En effet, l'absence d'occupants évite certains phénomènes difficiles à quantifier (*ouverture des fenêtres, apports internes etc.*) et permet ainsi une comparaison plus rigoureuse entre les calculs et les mesures.

#### **Résultats pour le logiciel COMFIE**



### 3.3.2.2 Banc d'essais en multizones, agence internationale de l'énergie

Une des activités menées dans le cadre de la tâche 34 du programme Solar Heating and Cooling (cf. § 3.3) consiste à comparer les résultats de simulation à des mesures effectuées sur une cellule test de l'EMPA (Dübendorf, Suisse) montrée sur la figure ci-dessous :



Figure 1a Outdoor test facility with removable façade element.

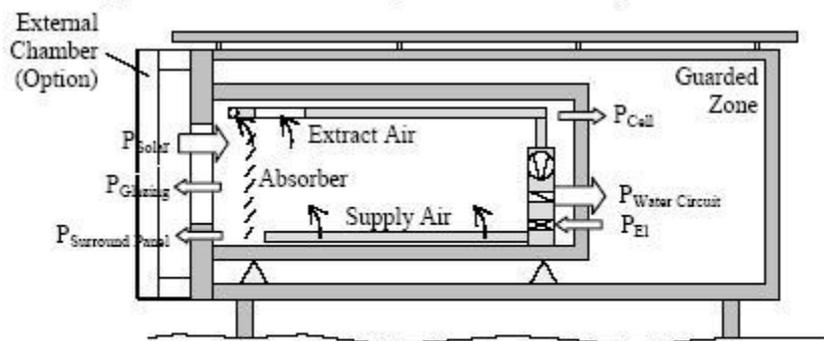
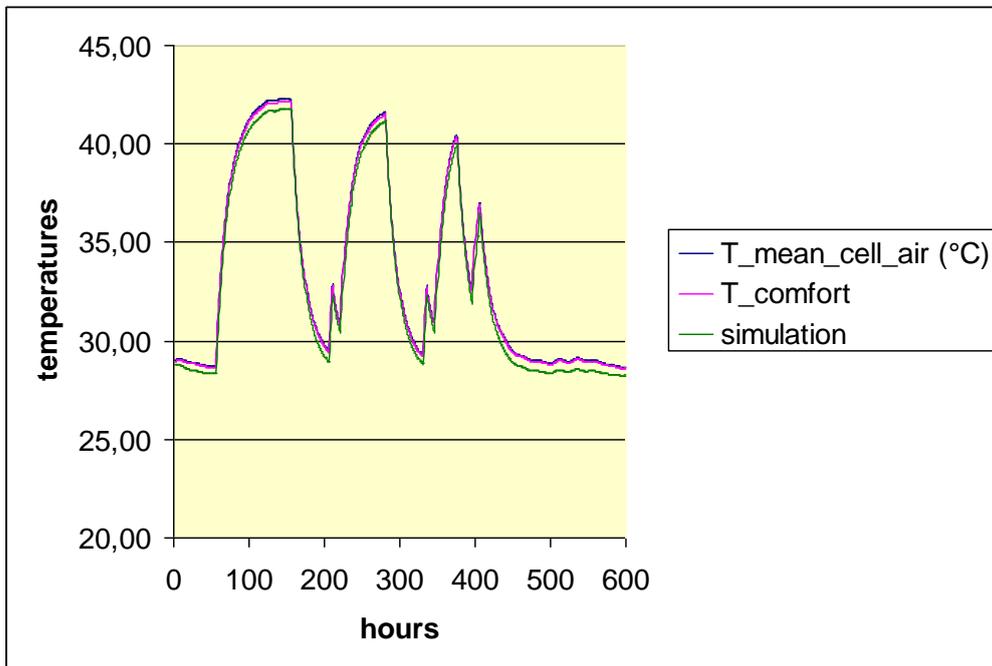


Figure 1b Diagram of test room with an optional external chamber.

Une source de chaleur située dans la zone intérieure a été mise en marche de manière aléatoire : à l'arrêt pendant 55 heures, puis 100 heures de fonctionnement, arrêt de 50 heures et 5 heures de marche, etc. Les propriétés thermo-physiques et les conditions aux limites (*zone gardée*) étant données, des simulations ont été effectuées sur une période de 600

heures. La comparaison avec les évolutions de température mesurées (*température de l'air et des surfaces*) permet de vérifier la prise en compte du comportement dynamique du système par les modèles.

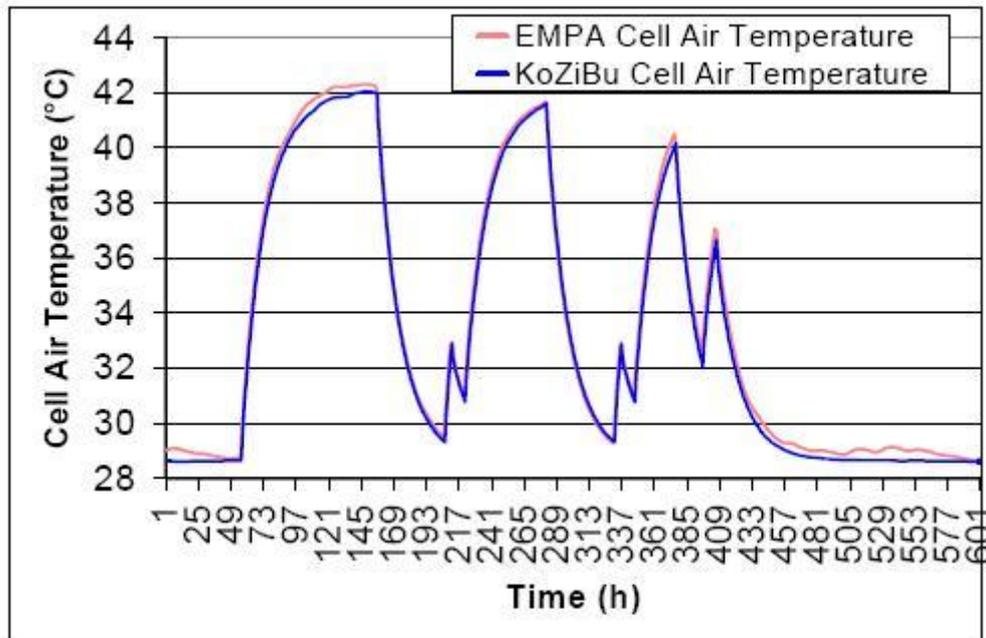
Dans l'énoncé, certaines propriétés physiques varient en fonction de la température. Une valeur moyenne a été considérée par la plupart des outils. Les résultats du logiciel COMFIE sont donnés ci-dessous à titre d'illustration.



On constate une légère sous-estimation des températures : la différence  $T_{\text{simulation}} - T_{\text{confort}}$  (température résultante) varie entre  $- 1,3$  °C et  $+ 0,2$  °C, avec une moyenne de  $- 0,4$  °C. Les causes de cet écart n'ont pas été identifiées. D'autres comparaisons avec des résultats expérimentaux, en particulier sur les maisons INCAS de l'INES, permettraient de mieux cerner si les écarts sont liés à la configuration étudiée (faible inertie de la cellule par exemple, qui pourrait amplifier l'influence de l'inertie associée aux ponts thermiques, non prise en compte dans le modèle).

Les autres outils ayant participé à ce test sont : DOE 2, ENERGY PLUS et TRNSYS (USA), ESP (*Grande Bretagne*), HELIOS (*Suisse*), SIMBAD et KOZIBU (*France*) .

Le graphe ci-dessous montre les résultats obtenus avec KOZIBU.



Les températures évaluées par simulation sont également un peu inférieures aux mesures. Une comparaison a été menée en considérant les ponts thermiques comme de simples résistances, alors que la courbe précédente correspond à des ponts thermiques modélisés comme des murs. Les écarts sont alors plus importants.

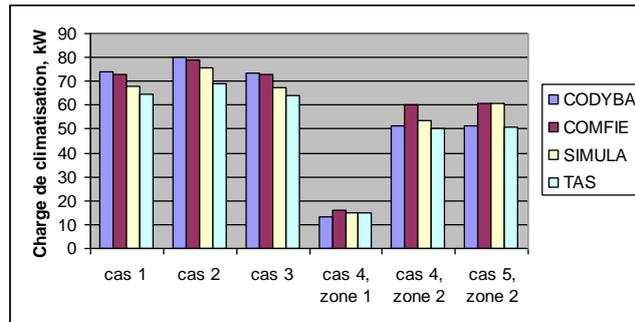
### 3.3.3 BANC D'ESSAIS , COMPARAISONS INTERLOGICIELLES

#### 3.3.3.1 Banc d'essais de l'AICVF

L'Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie et EDF ont confié aux associations AICVF, AITF et ARMINES la réalisation d'un banc d'essais de logiciels pour le calcul des charges de climatisation (*Brasselet, 1993*). Une douzaine de logiciels ont participé à cet exercice, concernant un bâtiment bi-zones avec une zone très solarisée et une autre soumise à des apports internes variables, selon différents scénarios :

- cas 1 : climatisation des deux zones à 21 °C,
- cas 2 : prise en compte d'un vitrage en toiture de la zone 1,
- cas 3 : prise en compte de stores extérieurs,
- cas 4 : zone 1 climatisée à 25 °C et zone 2 à 21 °C,
- cas 5 : zone 1 non climatisée et zone 2 climatisée à 21 °C.

Les résultats sont illustrés sur le graphe suivant.

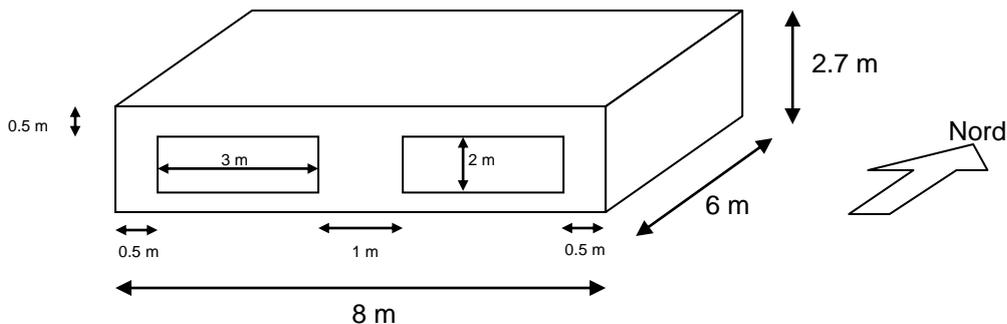


L'étude présente également une synthèse des principales hypothèses des modèles.

### 3.3.3.2 Procédure bestest de l'agence internationale de l'énergie

La tâche 12 du programme "chauffage et rafraîchissement solaire des bâtiments" a concerné la comparaison d'outils de simulation thermique des bâtiments. Elle a abouti à la définition d'une procédure de test appelée "Bestest" (Judkoff, 1995). La méthode de test définie dans la norme ANSI / ASHRAE 140-2001 est basée sur cette procédure, qui spécifie des protocoles pour évaluer les capacités techniques et les limites d'application des codes de calcul des performances thermiques des bâtiments et des équipements. Ce paragraphe présente les résultats de cette méthode appliquée au logiciel COMFIE-PLEIADES 2.1. Le test consiste à simuler une série de cas, et les résultats sont comparés à ceux d'autres logiciels du même type (par exemple TRNSYS, DOE-2, SERIRES).

Les différents cas sont décrits brièvement ci-dessous. Le cas de base correspond à un bâtiment de plain pied de surface au sol égale à 48 m<sup>2</sup>, de faible inertie (*murs et sol légers*), parallélépipédique (8 m x 6 m x 2.7 m), avec 12 m<sup>2</sup> de fenêtres orientées au sud. Le bâtiment est chauffé à 20 °C et refroidi à 27 °C, il est situé dans un climat sec et chaud (*les données climatiques sont fournies avec la norme*). La résistance thermique des murs est de 1.94 m<sup>2</sup>.K/W, le taux de renouvellement d'air est de 0.5 volume par heure, les apports internes de chaleur sont de 200 W.



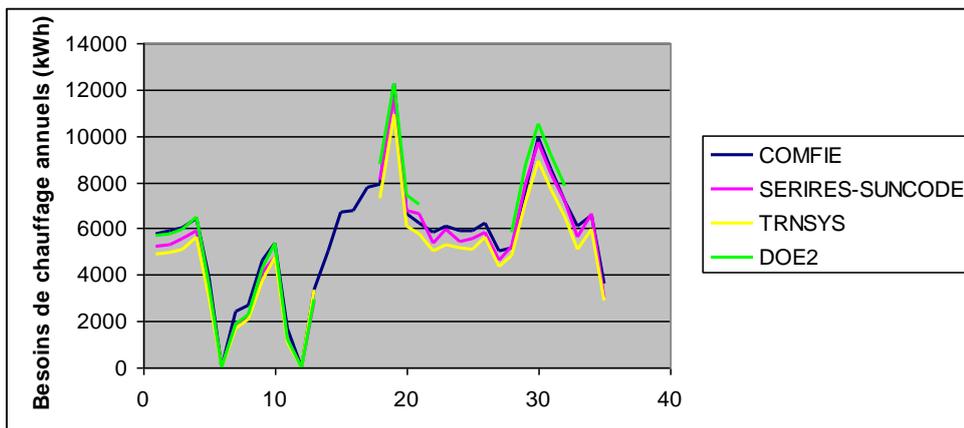
La sensibilité des logiciels est étudiée en faisant varier différents paramètres : l'orientation des fenêtres, la présence d'occultations, la température fixée par le thermostat, la ventilation

nocturne, l'inertie thermique, l'ajout d'une véranda, les propriétés radiatives des murs, les infiltrations d'air et les apports internes de chaleur. Un scénario sans chauffage (*évolution libre des températures*) est également étudié.

Les différents cas sont synthétisés dans la liste ci-dessous :

- Cas 600 : cas de base.
- Cas 610 : avec protection solaire (*casquette au dessus des vitrages*).
- Cas 620 : les deux fenêtres sud sont remplacées par une fenêtre ouest et une fenêtre est.
- Cas 630 : = cas 620 (resp. 290 = 270 et 310 = 300) avec protections solaires au dessus des fenêtres.
- Cas 640 : réduction de la température de chauffage à 10° la nuit, de 23 h à 7 h.
- Cas 650 : ventilation de nuit, chauffage arrêté et climatisation en marche le jour seulement.
- Cas 900 à 950 : = cas 600 à 650 avec des murs lourds (10 cm de parpaings du côté intérieur) et une dalle béton (d'épaisseur 8 cm).
- Cas 960 : = cas 600 avec une véranda accolée (8 m x 2 m x 2.7 m), de forte inertie.
- Cas 600FF (resp. 650FF, 900FF, 950FF) : = cas 600 (resp. 650, 900, 950) sans chauffage ni climatisation (*évolution libre*).
- Cas 220 : = cas 600 sans infiltration d'air, sans apports internes, fenêtres remplacées par des murs opaques, la consigne de climatisation est la même que celle de chauffage (20 °C).
- Cas 210 : = cas 220 (resp. 280 = 270, 440 = 600, 810=900) avec en plus l'émissivité des surfaces intérieures égale à 0.1 au lieu de 0.9.
- Cas 215 : = cas 220 avec en plus l'émissivité des surfaces extérieures égale à 0.1 au lieu de 0.9.
- Cas 200 : = cas 220, émissivité des surfaces intérieures et extérieures égale à 0.1 au lieu de 0.9.
- Cas 195 : = cas 200 (resp. cas 395 = cas 400) sans remplacer les 2 fenêtres par le mur, tout le mur sud a la même composition (inertie légère, résistance thermique égale à 1.94 m<sup>2</sup>.K/W).
- Cas 230 : = cas 220 avec un taux de renouvellement d'air de 1 volume par heure.
- Cas 240 : = cas 220 (resp. 420 = 410) avec des apports internes de 200 W.
- Cas 250 : = cas 220 avec l'absorptivité des surfaces extérieures de 0.1 au lieu de 0.6.
- Cas 270 : = cas 220 absorptivité des surfaces intérieures 0.9 et fenêtres conservées.
- Cas 300 : = cas 270, les deux fenêtres sud sont remplacées par une fenêtre ouest et une fenêtre est.
- Cas 320 : = cas 270 (resp. 400 = 220) avec une consigne de climatisation de 27 °C.
- Cas 410 : = cas 400, mais le taux de renouvellement d'air est de 0.5 volume par heure.
- Cas 430 : = cas 420, mais l'absorptivité des surfaces extérieures est de 0.6.
- Cas 800 : = cas 430, avec des murs de forte inertie (10 cm de béton du côté intérieur).

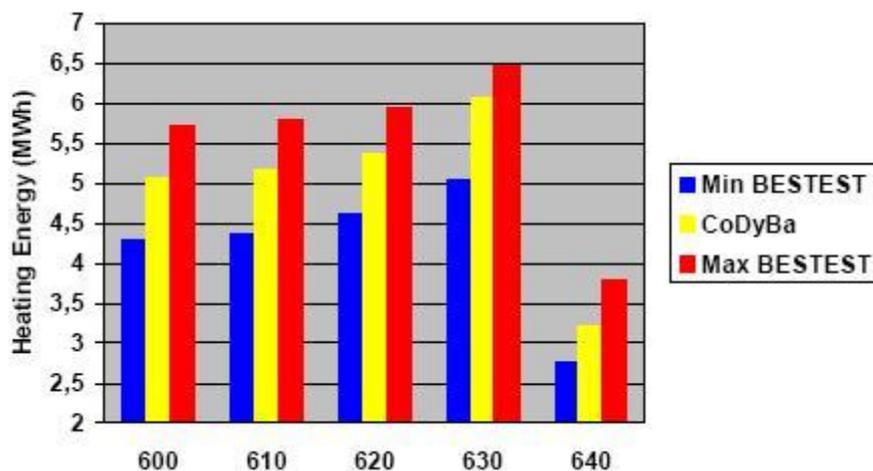
En ce qui concerne COMFIE, les résultats comparatifs concernant les besoins de chauffage annuels sont les suivants pour les différents cas numérotés de 1 à 36.



Les écarts entre les

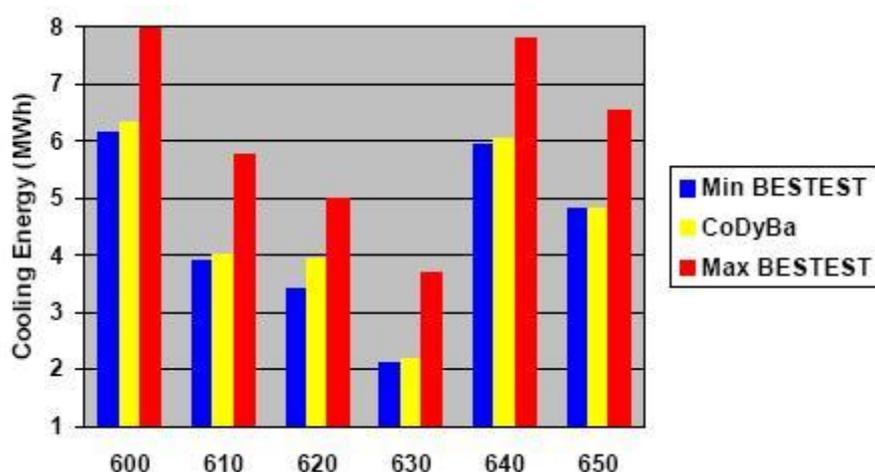
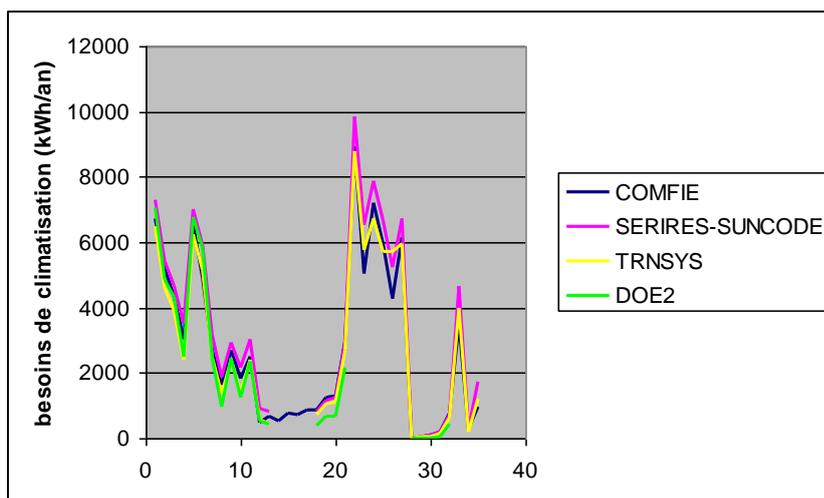
logiciels restent relativement faibles : en moyenne 10 % par rapport à DOE-2 et SERIRES, 16 % par rapport à TRNSYS, il faut noter que les écarts les plus importants en valeur relative correspondent aux plus faibles besoins. D'autre part la sensibilité aux différents paramètres est assez proche (*à noter que certains logiciels ne calculent pas tous les cas*).

Un exemple de résultat concernant le logiciel CODYBA est donné ci-dessous.



La comparaison à des mesures présentée précédemment pourrait permettre de mieux cerner quels sont les outils les plus proches de l'expérimentation, mais d'autres résultats expérimentaux seraient utiles afin d'élargir l'échantillon analysé.

En ce qui concerne les besoins de climatisation, les écarts sont du même ordre (15 %) avec TRNSYS et SERI-RES, alors que DOE-2 donne des besoins beaucoup plus faibles que les autres logiciels pour les cas sans apports solaires et internes.

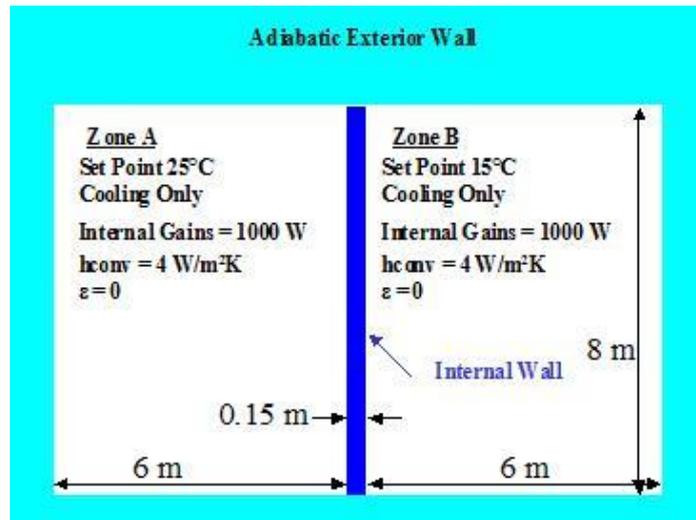


En ce qui concerne les cas en évolution libre, les températures moyennes et minimales sur l'année obtenues par COMFIE sont assez proches de celles évaluées par les autres logiciels, alors que les températures maximales sont un peu sous-estimées dans le cas d'une inertie faible : 62 °C pour le cas 600FF, par rapport à 66 °C TRNSYS et 70 °C pour DOE-2. Mais les écarts constatés sur ces températures élevées ne sont pas forcément significatifs, dans la mesure où de telles situations de surchauffe ne sont pas vraiment rencontrées en pratique.

### 3.3.3.3 Banc d'essais en multizones, agence internationale de l'énergie

Le banc d'essais décrit précédemment n'a concerné qu'un bâtiment monozone. Une nouvelle tâche a été lancée plus récemment dans le cadre du programme "chauffage et rafraîchissement solaire des bâtiments" (*tâche 34*, Octobre 2003 à Décembre 2007), conjointement avec le programme "Économie d'énergie dans les systèmes bâtiments et collectivités" (*annexe 43*) afin d'étudier les bâtiments multizones.

La première étape a consisté à vérifier la précision des calculs en régime permanent, par rapport à une solution analytique. Une configuration bi-zone est définie (cf. Figure ci-dessous) :



La composition du mur entre les deux zones étant donnée ainsi que les apports internes dans chaque zone, il s'agit de déterminer les puissances de climatisation pour réguler la température de la zone A (resp. B) à 25 °C (resp. 15 °C). Plusieurs variantes sont ensuite comparées :

- émissivité des surfaces intérieures = 0,9 (MZ 210 et 310) au lieu de 0 (MZ 200 et 300),
- une troisième zone, à température flottante, est insérée entre les deux premières (MZ 300 et 310). Les logiciels doivent alors également calculer la température de cette zone en régime permanent.

Les résultats sont comparés à une solution analytique. Le test montre l'influence des coefficients d'échange superficiels considérés, qui peuvent être différents d'un outil à l'autre. Le test impose un coefficient d'échange convectif, de cette manière les résultats des différents outils sont inférieurs à 0,3%.

### Résultats pour le logiciel COMFIE

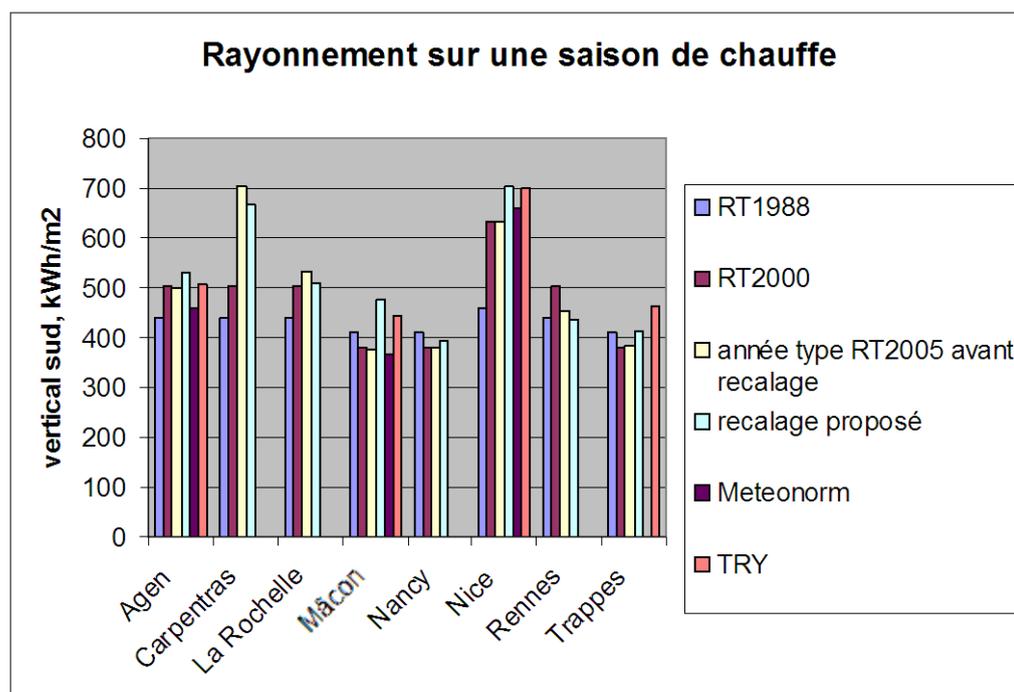
Les résultats sont donnés dans les tableaux ci-dessous. Les écarts entre les simulations et les résultats analytiques sont très faibles, ce qui valide le modèle sur ces configurations en régime permanent.

Steady State Cooling Loads				
	Simulation		Analytical	
	$q_A$	$q_B$	$q_A$	$q_B$
	(W)	(W)	(W)	(W)
MZ200	704	1294	705	1295
MZ210	416	1581	416	1584
MZ300	1282	1578	1285	1579
MZ310	1139	1722	1140	1725

Steady State Zone Air Températures						
	Simulation			Analytical		
	T <sub>A</sub>	T <sub>C</sub>	T <sub>B</sub>	T <sub>A</sub>	T <sub>C</sub>	T <sub>B</sub>
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
MZ200	25	n/a	15	25	n/a	15
MZ210	25	n/a	15	25	n/a	15
MZ300	25	34,63	15	25	34,66	15
MZ310	25	27,41	15	25	27,41	15

### 3.3.4 ETUDE DES DONNEES CLIMATIQUES

Une composante importante de la précision des évaluations est la pertinence des années types considérées comme représentatives des climats. Nous avons ainsi comparé pour 8 stations les années types préparées par le CSTB pour la réglementation thermique RT2005 à des mesures sur 20 ans de Météo France. La figure ci-dessous montre le rayonnement solaire vertical sud cumulé sur une saison de chauffe, évalué à partir de différentes années types et à partir des mesures Météo France.



En moyenne pour les huit stations, le recalage proposé, basé sur les mesures de Météo France et sur le service SODA1 (Wald, 2002) en l'absence de mesures de rayonnement diffus ou direct, augmente le rayonnement vertical sud sur une saison de chauffe de 10 % par rapport à la RT2000, de 20 % par rapport à la RT1988, de 17 % par rapport à la base suisse Météonorm.

<sup>1</sup> <http://www.soda-is.com/fr>

La solution mise en œuvre pour la RT 2005 a consisté à multiplier toutes les valeurs de rayonnement par le ratio Rayonnement mensuel donné par MétéoFrance / rayonnement mensuel avant recalage. Mais pour les stations de Nice et d'Agen, le recalage a conduit pour certaines heures à des valeurs supérieures à la constante solaire. Une limite a donc dû être imposée. D'autre part, même à rayonnement mensuel équivalent, 5 journées exceptionnelles ne sont pas équivalentes à 10 belles journées car le rayonnement peut être moins facilement stocké dans le bâtiment si il est concentré sur quelques journées. Un projet complémentaire est donc à l'étude pour améliorer ces données.

### **3.3.5 AUTRES DONNÉES**

Les propriétés physiques des matériaux et composants de construction, les caractéristiques du comportement des utilisateurs (*ouverture des fenêtres, gestion de l'éclairage et des protections solaires, régulation du chauffage...*) pourraient également donner lieu à des activités de validation.

### **3.3.6 CONCLUSIONS**

La revue des bancs d'essais de logiciels présentée ci-dessus n'est pas exhaustive, une enquête internationale auprès des développeurs d'outils n'étant pas prévue dans la présente étude. Des informations sur la validation de certains outils sont fournies dans un répertoire accessible sur le site du Département de l'Énergie des USA :

[http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools\\_directory/](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/). Par exemple, la présentation du logiciel Energy Plus mentionne les tests suivants :

➤ tests analytiques

HVAC tests, based on ASHRAE Research Project 865, Building fabric tests, based on ASHRAE Research Project 1052

➤ tests: comparatives

ANSI/ASHRAE Standard 140-2007, International Energy Agency Solar Heating and Cooling Programme (IEA SHC) BESTest (Building Energy Simulation Test) methods not yet in Standard 140, EnergyPlus HVAC Component Comparative teststs, EnergyPlus Global Heat Balance tests.

Ces bancs d'essais ont ainsi permis de comparer les outils de simulation thermique des bâtiments. Ces outils permettent de reproduire avec une précision relativement bonne (*de l'ordre de 1 °C*) les évolutions de température mesurées sur des cellules test. Des simulations effectuées sur plusieurs types de bâtiment ont montré qu'une différence de 1°C sur la température peut faire varier d'environ 12% les besoins de chauffage. Des écarts peuvent apparaître entre les outils en ce qui concerne les besoins de chauffage et de climatisation des

bâtiments, mais les sensibilités aux principaux paramètres (*enveloppe, équipements*) sont analogues.

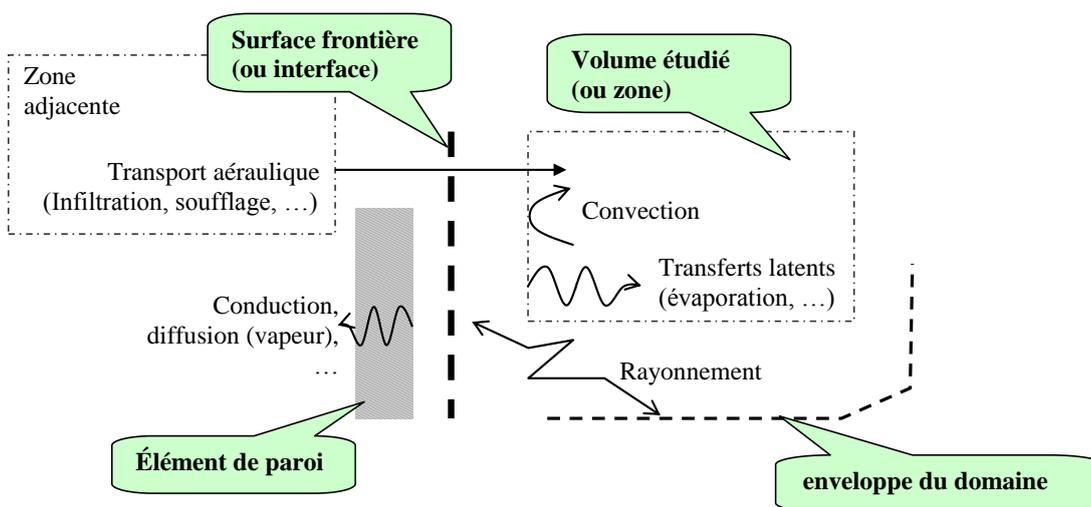
Une comparaison des outils français sur des cas plus représentatifs du contexte local (*climat, techniques de construction*) permettrait de mieux cerner les écarts entre les modèles. Par exemple, l'isolation par l'intérieur (*technique typiquement française*) pourrait être comparée à l'isolation par l'extérieur ou répartie. Une limite des bancs d'essais de l'AIE est que certains paramètres ont été harmonisés pour les tests (*coefficients de transferts superficiels, données climatiques*). Il serait intéressant de comparer différents logiciels sur un même bâtiment, sans ces adaptations. Certains aspects des modèles mériteraient un approfondissement, par exemple la variation du facteur solaire en fonction de l'angle d'incidence du rayonnement et l'influence des masques n'ont pas été souvent abordées. La pertinence des normes CEN qui imposent un modèle de référence (*CEN, 2003*), pourrait aussi être étudiée. Différents logiciels ont été utilisés pour l'étude des maisons passives de l'INES : TRNSYS, COMFIE, PHPP, ENERGY+, SPARK et sans doute prochainement CODYBA. Cette étude pourrait alors constituer une base pour une comparaison portant sur une configuration potentiellement représentative de la construction neuve en France à l'horizon 2012. Ce type de travail répond aux exigences des utilisateurs qui souhaitent connaître le niveau de précision des outils qui leur sont proposés.

## 4 Couplage des environnements

### 4.1 ÉTAT DE L'ART DES COUPLAGES

#### 4.1.1 INTRODUCTION

Au sein du bâtiment coexistent de nombreux phénomènes physiques qui influencent l'environnement thermique. Qu'ils soient de nature thermique (*rayonnement, convection, conduction, changements de phase*) ou liés à la vapeur d'eau (*transport, diffusion*), des modèles existent pour décrire leurs effets et leurs interactions. Leur couplage est réalisé au niveau de leur frontière commune, que ce soit une paroi ou une ouverture séparant deux zones distinctes (*Figure 1*).



**Figure 1 : la surface frontière, l'élément de couplage entre les phénomènes de transferts thermiques et les différents éléments (*paroi, zones et enveloppe*)**

Plusieurs familles d'outils peuvent être recensées dans le cadre de simulations appliquées au bâtiment. Ainsi, nous citerons d'une part les modèles nodaux qui permettent de caractériser les phénomènes de transferts de masse et de chaleur au sein d'un bâtiment dans son ensemble, et d'autre par les modèles zonaux et les modèles de type CFD qui donnent accès aux détails de l'écoulement, des champs de température ou de concentration dans un local avec des niveaux de précision différents. Le couplage des "zones" du bâtiment entre elles et/ou avec l'enveloppe se fait au niveau des éléments de paroi avec la prise en compte plus ou moins complexe des transferts radiatifs, convectifs et conductifs. Ainsi, le calcul du rayonnement thermique peut se faire avec des modèles de complexité variable : température radiante moyenne, méthode des enceintes fictives, des radiosités, etc. L'association de ces différents outils se révèle d'un grand intérêt puisqu'ils peuvent permettre d'une part de traiter individuellement les différents phénomènes physiques et d'autre part de faire varier la finesse des résultats en fonction des zones traitées. Enfin, chaque outil fait appel à ses propres hypothèses, qui correspondent parfois aux résultats donnés par d'autres, ce qui renforce leur complémentarité.

Dans ce document, nous nous appuyons sur l'étude du couplage tant physique que numérique entre les phénomènes aérauliques et thermiques qui a déjà fait l'objet de nombreuses études. De par la complexité de ce couplage, les conclusions qui en découlent peuvent tout à fait être étendues à d'autres couplages. Dans un premier temps, nous identifierons les difficultés liées au couplage de différents outils. Dans une deuxième partie, les différentes méthodes d'échange de données entre outils seront décrites avant d'aborder les techniques numériques de couplage. Enfin, plusieurs exemples de mise en œuvre de couplages dans le bâtiment permettront d'illustrer ces propos.

#### **4.1.2 PROBLÉMATIQUE DU COUPLAGE**

Dans le cadre de l'étude du couplage entre les phénomènes aérauliques et thermiques, nous allons succinctement décrire les particularités des différentes approches utilisées puis nous examinerons les difficultés pour réaliser un couplage direct.

##### **4.1.2.1 Les différents niveaux de modélisation**

###### **L'approche nodale**

A l'échelle d'un bâtiment, l'approche nodale permet d'estimer la température des surfaces de paroi, le comportement dynamique sur de longues périodes de temps et l'efficacité des systèmes énergétiques et de ventilation. Supposant que l'air dans les locaux est parfaitement mélangé, elle repose sur l'écriture et la résolution du bilan énergétique pour chaque local, et pour chaque surface. Il est alors nécessaire de fournir au code de simulation la température de l'air dans chaque local ainsi que les coefficients d'échange superficiel convectif.

###### **Les modèles zonaux**

La modélisation zonale constitue une approche intermédiaire entre la modélisation nodale et la modélisation fine à code de champs. Le volume étudié est partitionné en sous-volumes ou zones, sur lesquels les grandeurs d'état sont supposées être constantes, et entre lesquels les transferts de masse et d'énergie sont déterminés à partir des lois de bilan intégrées ou de lois empiriques. Dans l'étude de locaux par modèles zonaux, le maillage du local considéré comme parallélépipédique se fait en sous-volumes eux-mêmes parallélépipédiques et adaptés aux éléments spécifiques du local tels que vitrages, convecteurs, bouches de ventilation, etc. Cette méthode nécessite d'identifier les écoulements dominants qui doivent être modélisés spécifiquement dans le code (*jets, panaches, etc.*).

###### **Les modèles CFD**

Les simulations CFD tridimensionnelles au sein d'un local permettent entre autres d'obtenir les champs de vitesse et les distributions des températures, de l'humidité relative ou de la concentration en éléments polluants dans le local. Basées sur la résolution des équations de conservation, elles nécessitent de la part de l'utilisateur la donnée des conditions aux limites dont dépend fortement la précision des résultats.

#### **4.1.2.2 Difficultés du couplage**

La section précédente montre que l'échange superficiel convectif à la surface des parois est important pour les trois types de simulations. D'un côté, l'approche nodale et les modèles zonaux exigent la connaissance des coefficients d'échange convectif superficiel, voire de la température de l'air, tous calculables par les simulations CFD. D'un autre côté, Les CFD et les modèles zonaux doivent être couplés à leur limite avec les zones adjacentes (*p. ex. au niveau de la température de surface des parois*) ce qui peut se faire simplement par l'approche nodale. Il y a donc tout intérêt à coupler ces différents outils afin de supprimer les inconnues de chacun ou d'étendre leur précision. Ainsi tous les paramètres influant sur le confort et la qualité de l'air peuvent être appréhendés avec des niveaux de précision et des temps de calcul variables.

Une première idée peut conduire à traiter les deux modèles comme un système d'équations unique. Cette approche se révèle rapidement peu pratique à utiliser en raison du temps de calcul important et des disparités importantes des modèles physiques et des schémas numériques. Trois discontinuités principales existent [1] :

- L'échelle de temps : de quelques heures pour les méthodes nodales à quelques secondes pour les CFD. Il est cependant possible de diviser le calcul en un processus à long terme pour la simulation nodale et un processus à court terme pour le CFD. Par exemple, une simulation énergétique d'un bâtiment sur une journée peut être couplée avec un calcul CFD lancé toute les deux heures en utilisant les résultats de la simulation énergétique en conditions aux limites pour remettre à jour les informations utilisées par la simulation énergétique.
- L'échelle spatiale : d'une moyenne spatiale pour les simulations énergétiques à une connaissance détaillée pour les CFD. Cette discontinuité peut être contournée en utilisant des approximations numériques. Cependant, chaque approximation aura son influence propre sur la performance du couplage.
- Vitesse de calcul : de quelques secondes par zone pour une analyse énergétique annuelle avec les méthodes nodales en nécessitant très peu de mémoire à plusieurs heures pour une zone en CFD en utilisant beaucoup de mémoire.

#### **4.1.3 MÉTHODES D'ÉCHANGE DE DONNÉES**

Le paragraphe précédent met en avant la possibilité de simuler un même phénomène physique avec des modèles différents en fonction du niveau de détail souhaité pour chaque zone. Nous reprenons ici des éléments de la thèse de Laurent Mora [2] qui a distingué plusieurs approches possibles pour traiter l'échange de données entre 2 codes en distinguant d'une part les transferts aérauliques et d'autre part les transferts de chaleur.

##### **4.1.3.1 Transferts aérauliques**

**Approche {nodale + zonale}**

L'approche nodale détermine les transferts aérauliques au sein et au travers du bâtiment par la caractérisation des pertes de charge au travers des ouvertures et par conservation de la masse dans chacune des zones. Cette méthode consiste alors à déterminer le champ de pression dans le bâtiment. Il est donc nécessaire de vérifier la continuité de ce champ de pression au travers du local représenté par l'approche zonale. Cependant, la variable de pression utilisée dans les modèles zonaux ne semble pas être représentative de la pression physique. Il est alors nécessaire de renforcer le couplage en imposant les résultats du modèle nodal comme conditions aux limites aérauliques du modèle zonal.

#### **Approche {nodale + CFD}**

Dans un modèle CFD, la pression garde son sens physique et peut donc assurer la continuité avec la pression calculée par un modèle nodal. Le couplage aéraulique s'effectue au niveau des ouvertures communes aux deux modèles. Il faut alors prendre soin du type de conditions aux limites employées pour le modèle CFD. Ainsi, une ouverture avec un débit de masse entrant dans le local doit être représentée par une condition en vitesse de manière à caractériser l'apport de quantité de mouvement à l'air du local. En sortie du local détaillé, les conditions peuvent être prescrites en pression. Dans ce cas, la difficulté est de changer le type de conditions aux limites du modèle CFD en fonction du sens de l'écoulement au travers de l'ouverture. Enfin, dans tous les cas, une itération entre les deux modèles est nécessaire pour obtenir une solution compatible en terme de débit et de pression au niveau des ouvertures du local détaillé. Pour le transport de polluant, il s'agit d'assurer la propagation des valeurs dynamiques de concentration aux abords des ouvertures, de manière à traduire les effets de l'hétérogénéité du champ des concentrations dans le local détaillé sur la dissémination du polluant dans le reste du bâtiment.

#### **4.1.3.2 Transferts de chaleur**

##### **Approche {nodale + zonale}**

Ces deux approches étant très proches l'une de l'autre de par la nature de leurs modèles, leur couplage est alors naturel. Seule subsiste une complication au niveau de la géométrie puisqu'il faudra veiller à adapter le détail des conditions aux limites à l'interface des 2 modèles à la finesse de celles du modèle zonale.

##### **Approche {nodale + CFD}**

Le modèle CFD se limite à déterminer les transferts dans l'ambiance. Le couplage avec le modèle nodal de l'enveloppe s'effectue au travers du flux de convection, et plus précisément dans le bilan d'énergie à la surface de la paroi en contact avec le modèle CFD. Trois méthodes d'échange de données peuvent être envisagées.

1. La première méthode (Dirichlet-h) consiste à imposer les températures de surface calculées par le modèle nodal comme conditions aux limites du modèle CFD. Celui-ci détermine alors l'écoulement et le champ des températures puis les coefficients d'échange superficiel convectif moyens pour chacune des surfaces qui deviennent les nouvelles conditions aux

limites du modèle nodal. Si l'on considère que le premier modèle à être évalué est le modèle nodal, celui-ci pourra utiliser les lois empiriques habituelles comme prédicteur des coefficients d'échange superficiel convectif lors du premier calcul.

2. La deuxième méthode (Dirichlet-q) d'échange de données consiste, comme précédemment, à imposer les températures de surface comme conditions aux limites du modèle CFD. Mais dans ce cas ce sont les flux convectifs intégrés sur chaque surface qui sont utilisés comme conditions aux limites du modèle nodal.
3. Enfin, la troisième méthode (Neumann-h) consiste à imposer maintenant le flux convectif déterminé par le modèle nodal comme conditions aux limites du modèle CFD. Celui-ci évalue alors les nouveaux coefficients d'échange superficiel convectif que l'on utilise pour le calcul suivant du modèle nodal.

Discutons maintenant l'intérêt d'utilisation des trois méthodes proposées. Tout d'abord nous pouvons remarquer que les méthodes 1 et 3 consistent à déterminer un coefficient d'échange superficiel convectif à l'aide du modèle CFD pour injecter cette valeur dans le modèle nodal en remplacement des lois empiriques usuelles. Comme nous l'avons souligné, la détermination des coefficients impose de se fixer une température d'air caractéristique soit de la zone proche de la paroi, soit de la zone toute entière si l'on souhaite se rapprocher de l'hypothèse d'uniformité spatiale de l'approche nodale. Dans les deux cas, le fait de se fixer une température biaise la caractérisation des transferts convectifs. Par conséquent, il semble que de ce point de vue, la méthode de couplage 2 soit plus acceptable car elle transmet directement, au modèle nodal, le flux convectif échangé au niveau de chacune des surfaces. Et de ce fait, nous imposons au modèle nodal de respecter le bilan d'énergie en fonction de ces transferts ainsi que de l'hétérogénéité des températures dans l'ambiance. Néanmoins, la méthode 1, qui consiste à déterminer les coefficients d'échange superficiel convectif à l'aide du modèle CFD pourrait être intéressante afin de limiter le nombre d'appels de la résolution du modèle CFD en constituant une base de données des coefficients d'échange superficiel convectif pour la cavité étudiée. Ainsi la résolution du modèle CFD pourrait se limiter aux cas non encore présents dans cette base. Mais dans tous les cas ceci constitue une manière approchée d'accéder au résultat.

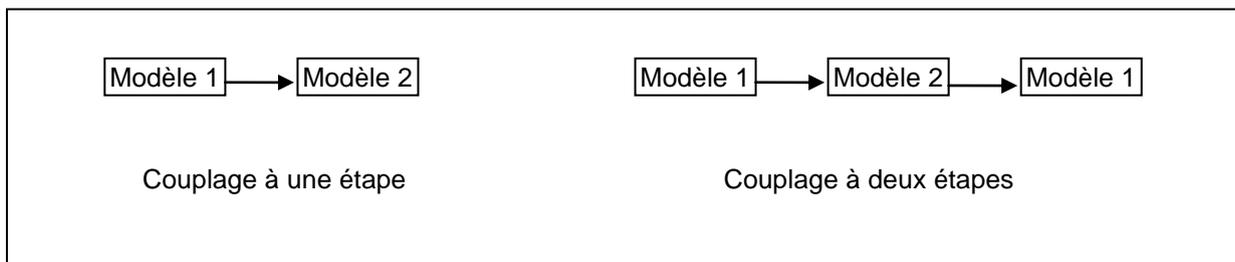
#### **4.1.4 LES TECHNIQUES NUMÉRIQUES DE COUPLAGE**

Afin de remédier aux discontinuités détaillées dans la partie 4.1.2, des stratégies de couplage numériques entre outils ont été développées. Elles peuvent être classées en deux grandes familles : les couplages statiques et les couplages dynamiques. Zhai et al. [1] proposent plusieurs stratégies pour chacune de ces 2 familles. Dans la suite le pas de temps fera référence au pas de temps des méthodes nodales, pouvant varier de quelques minutes à 1 heure dans le cas de l'étude des performances d'un bâtiment.

##### **4.1.4.1 Les couplages statiques**

Dans cette première famille, les échanges entre les modèles ne sont qu'occasionnels (*Figure 2*). Dans le cas des méthodes asynchrones [2], il n'y a d'ailleurs, à aucun pas de temps, bouclage entre les modèles. Les résultats d'un des deux modèles peuvent être utilisés comme conditions aux limites du second. Par exemple un modèle CFD simule les détails d'une ou plusieurs pièces d'un bâtiment multi-zone en utilisant les résultats du modèle nodal comme conditions aux limites (*ex. débits d'infiltration, température et concentration provenant des zones adjacentes*). Ce couplage à une étape convient bien aux cas où un des modèles au moins est peu sensible aux variations des paramètres. Par exemple, la simulation énergétique est quasi insensible aux variations de température de surface et des coefficients d'échange superficiel convectif dans le cas d'une ventilation par mélange à faible vitesse. Par contre, si les informations du deuxième modèle, telles que les coefficients d'échange, diffèrent significativement par rapport à celles du premier, alors il faudra utiliser celles du deuxième modèle comme entrées du premier lors de son utilisation suivante, c'est un couplage statique à deux étapes.

Ce type de couplage doit se limiter aux bâtiments et aux simulations avec peu de changement dans les informations échangées lors du couplage.



**Figure 2 : Illustration des stratégies de couplages statiques**

#### **4.1.4.2 Les couplages dynamiques**

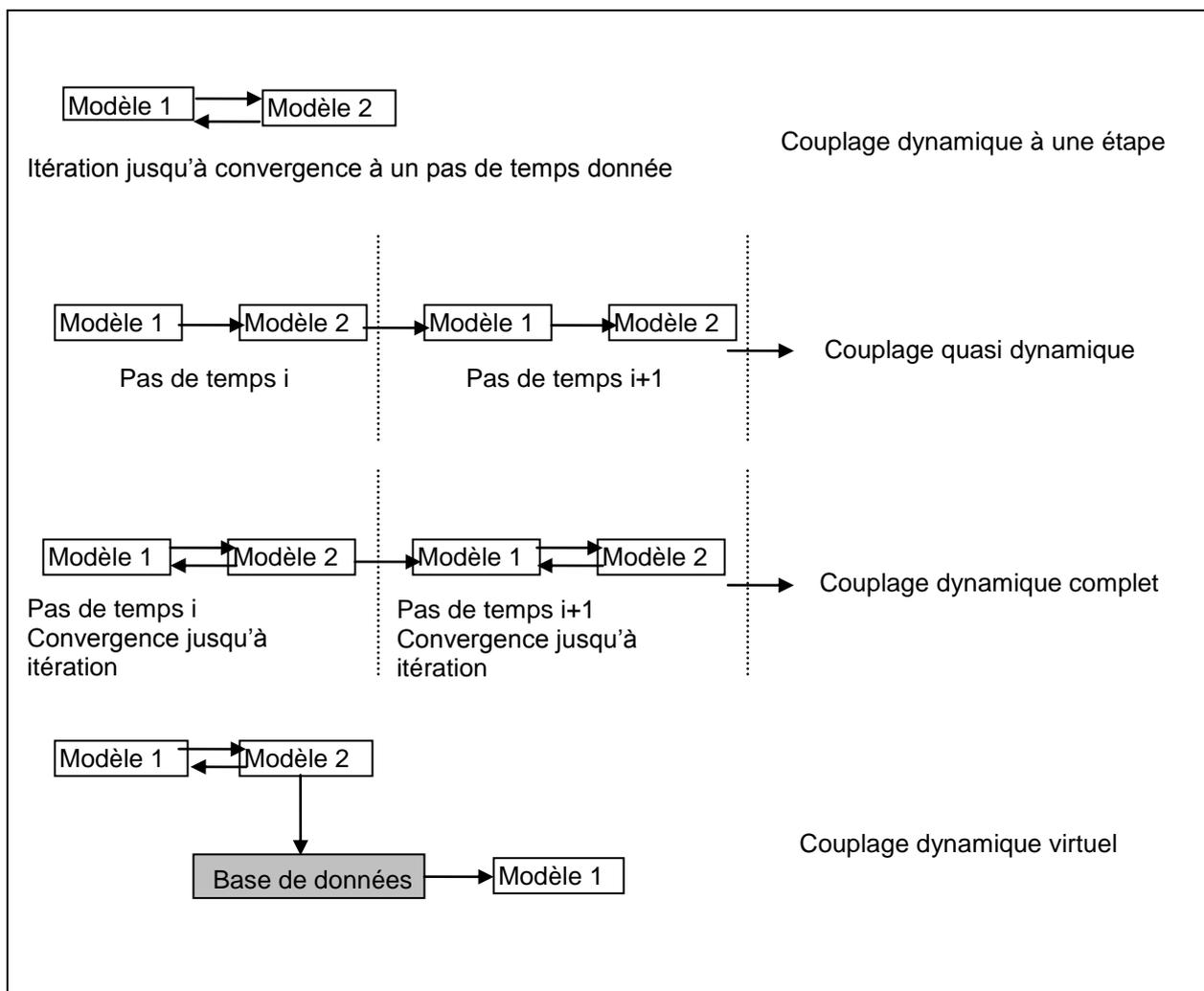
Ces méthodes impliquent une synchronisation des données à chaque pas de temps. Elles s'imposent quand les modèles sont sensibles aux variations des conditions aux limites du couplage. Hormis le couplage complet dont les limites ont été décrites précédemment, Il est possible de distinguer 4 niveaux de couplages dynamiques (*cf. Figure 3*).

Le couplage dynamique à un pas de temps permet de réaliser un couplage à un pas de temps déterminé pour lequel les itérations entre les deux codes sont lancées jusqu'à convergence. Il convient au cas où le concepteur ne s'intéresse qu'à quelques scénarii.

Le couplage quasi-dynamique, encore appelé méthode des blocs ou du ping-pong. Chaque modèle est résolu une fois à chaque pas de temps sans procédure itérative de convergence. Cette procédure est utile quand le pas de temps est faible devant la constante de temps du système dynamique étudié.

Le couplage dynamique complet, également dénommé méthode super-blocs ou couplage en oignon, implique une procédure de convergence par itération à chaque pas de temps. Cette méthode permet d'obtenir des résultats compatibles avec les deux modèles à chaque pas de temps. Couplage le plus précis, c'est aussi le plus gourmand en ressources informatiques.

Pour réduire les ressources informatiques, Zhai et al. [1] utilisent un couplage dynamique virtuel dans lequel les paramètres du couplage sont préalablement déterminés. Par exemple dans le cas du couplage entre un code de simulation énergétique du bâtiment et un code CFD, les coefficients d'échange superficiel convectif et les températures de l'air dans chaque pièce sont préalablement déterminés par un code CFD comme fonction de la puissance de chauffage ou de climatisation ou de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur pour ainsi créer une base de données. Lors de la simulation énergétique, les conditions aux limites de modèle nodal sont alors déterminées par interpolation. Cette méthode est bien adaptée aux bâtiments sans variations trop brutales des charges de chauffage ou de climatisation et de la température extérieure.



**Figure 3 : Illustration des stratégies de couplages dynamiques**

#### **4.1.5 QUELQUES MISES EN ŒUVRES DE CES COUPLAGES APPLIQUÉS AU BÂTIMENT**

##### **4.1.5.1 Des outils énergétiques et aérauliques dédiés : TRNSYS+COMIS**

TRNSYS est à l'origine un code énergétique qui permet notamment de modéliser un bâtiment multizone grâce à un module spécifique (*le Type 56*) selon une approche de type nodale. Ce module seul ne permet cependant pas de prévoir les écoulements couplés aux phénomènes thermiques et aux effets du vent, ce qui est nécessaire dans les calculs de ventilation naturelle. Parallèlement, des codes spécifiques sur la ventilation se sont développés tels que COMIS. Leur couplage s'est donc tout naturellement développé, comme dans le cas de TRNSYS et COMIS qui permettent de résoudre des phénomènes thermo-aérauliques couplés. Néanmoins, ce type de couplage d'outils dédiés fait apparaître de nombreuses difficultés de mises en œuvres du fait de l'indépendance des solveurs et des problèmes de convergence qui peuvent en découler.

##### **4.1.5.2 CFD + code énergétique du bâtiment**

Plusieurs études [3-8] ont permis d'appliquer les techniques numériques de couplage décrites dans le chapitre 4 au couplage entre un logiciel CFD et un code de simulation énergétique du bâtiment. Le code de simulation énergétique résout le transfert de chaleur dans les parois du bâtiment avec un pas de temps important (*quelques heures à quelques minutes*) tandis que le code CFD simule l'écoulement d'air pour certains de ces pas de temps. Elles mettent toutes en évidence une amélioration de la précision des résultats des CFD et des simulations énergétiques grâce à la suppression d'hypothèses utilisées par ces deux méthodes lorsqu'elles sont appliquées séparément. Par exemple, le code CFD peut fournir les coefficients d'échange superficiel convectif et le gradient de température intérieur au code de simulation énergétique, éléments primordiaux pour la précision des résultats de ce dernier. Le code de simulation énergétique peut préciser les conditions aux limites du code CFD avec les températures de surface des parois et les charges de conditionnement d'air, améliorant ainsi la précision du code CFD. Nous nous proposons maintenant de décrire plusieurs exemples d'application.

##### **4.1.5.3 Vérification des performances du couplage**

Zhai et Chen [9] ont cherché à vérifier les performances des méthodes de couplage en étudiant un cas simple constitué d'une pièce cubique ( $3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 3\text{ m}$ ) situé dans un étage intermédiaire d'un bâtiment, dont seule la paroi Sud (sans vitrage) est en contact avec l'extérieur. Il n'y a pas de source de chaleur interne, les températures de l'air extérieur et intérieur sont supposées constantes (*respectivement  $-12.8\text{ C}$  et  $25\text{ °C}$* ). Un système de conditionnement d'air à volume d'air variable insuffle un air à  $25\text{ °C}$  par une bouche de soufflage placé sur la paroi Nord, près du plafond. La bouche d'extraction est également située sur la paroi Nord, mais près du plancher.

Les trois méthodes d'échange de données décrites dans le précédemment ont été implémentées dans le programme E+MIT-CFD issu d'un couplage entre le programme EnergyPlus(E+) et MIT-CFD. E+ est un programme de simulation énergétique développé par le département

américain de l'énergie basé sur DOE-2 et BLAST. MIT-CFD est un programme CFD résolvant des écoulements stationnaires et instationnaires, laminaires et turbulents, pour des géométries quelconques.

Bien que ce cas d'étude soit stationnaire, il est nécessaire de réaliser une simulation sur plusieurs jours afin d'atteindre un régime permanent. Étant donné le peu de variation des paramètres, un couplage dynamique à une étape est appliqué une seule fois par jour. Le code CFD utilise un maillage rectangulaire grossier ( $12 \times 12 \times 14$ ) et un modèle de turbulence à 0 équation afin de réduire le temps de calcul du CFD, tout en étant suffisamment précis en phase d'étude d'un bâtiment.

Les résultats montrent d'une part qu'il est possible d'obtenir une solution convergente avec les trois méthodes à condition d'utiliser des critères de convergence suffisamment fins pour le code CFD et la simulation énergétique. Quelque soit la méthode, un faible nombre d'itérations est suffisant, la méthode 1 étant la plus rapide et la 3 la plus lente.

#### **4.1.5.4 Complexe indoor de course automobile de Pittsburg**

Toujours avec le programme E+MIT-CFD, Zhai et al. [1] appliquent cette fois-ci le couplage statique à deux étapes au cas d'un complexe de course automobile, composé d'un espace de 250 000 m<sup>2</sup>, de 46 m de hauteur sous plafond, accueillant jusqu'à 120 000 spectateurs et 45 voitures pouvant rouler à 250 km/h. Il s'agit ici d'utiliser un code CFD pour assister la conception du système de ventilation. La prédiction de l'écoulement d'air, des distributions de température et de concentration en polluants permet d'évaluer le confort thermique et la qualité de l'air dans le complexe et ainsi d'améliorer la conception du système de ventilation. Les coefficients d'échange superficiel convectif s'éloignent dans ce cas très fortement des valeurs usuelles à cause de la convection forcée provoquée par les voitures. Aussi le couplage statique à deux étapes va dans un premier temps permettre de calculer avec le code de simulation énergétique les températures de surface des parois et les charges de climatisation en utilisant les coefficients d'échange par défaut. Puis utilisant ces résultats comme conditions aux limites, le code CFD calcule la distribution de températures et le champ de vitesse afin d'obtenir des conditions aux limites plus réalistes pour relancer le code de simulation énergétique qui donne alors des charges de climatisation plus précises pour dimensionner la ventilation. Les résultats montrent qu'une simulation énergétique seule minimise de plus de 10 % la charge de climatisation par rapport au programme couplé. La principale raison vient d'une très forte augmentation des coefficients d'échange.

## **4.2 RÉALISATIONS DE COUPLAGES GLOBAUX**

### **4.2.1 INTRODUCTION**

L'analyse énergétique d'un bâtiment est une démarche complexe en raison de multiples interactions existant entre l'enveloppe du bâti et les systèmes conçus et mis en œuvre afin de maîtriser les paramètres thermo aéraulique du climat intérieur. Ceci impose une approche

globale. Sur la base de travaux en laboratoire et in situ, cette approche traite par exemple, des problèmes de transfert et de masse, de consommation d'énergie, d'acoustique des systèmes énergétiques, mais également de la prise en compte de l'évolution technologique appliquée à la conduite des systèmes et à l'intégration des besoins liés au confort de l'individu en conditions climatiques estivales et de l'impact environnemental des bâtiments.

Le développement des outils de simulation des bâtiments au sein du DGCB-LASH est de contribuer à la résolution des problèmes énergétiques et environnementaux liés aux bâtiments. La démarche de recherche adoptée consiste à prendre en considération, d'une manière systémique, le bâtiment et son environnement, les équipements et leur gestion ainsi que l'occupant et ses exigences. Ainsi, les principaux modèles numériques développés au Département concernent :

- Les phénomènes de transfert de chaleurs à travers l'enveloppe du bâtiment.
- Les phénomènes des transferts aérauliques liées aux systèmes de ventilation.
- La modélisation des composants actifs ou passifs intégrés au bâtiment.
- Le confort thermique et la qualité de l'air.

Ce rapport présente trois modèles développés récemment et en cours de valorisation.

#### **4.2.2 LE MODÈLE HYBCELL**

##### ***Introduction***

Le modèle HYBCELL1.0 (*El Mankibi, 2003*) est un outil qui permet de simuler le comportement thermo-aéraulique et la qualité de l'air dans un local monozone. Le choix s'est porté sur l'environnement Matlab/Simulink pour développer le modèle HYBCELL1.0. En plus des différentes fonctions mathématiques et techniques de résolution numérique que fournit cet environnement, nous l'avons choisi pour les raisons suivantes :

- La flexibilité du langage graphique de Simulink par rapport à un langage procédural.
- Le langage graphique de Simulink est similaire à celui de Labview (*outil utilisé pour les expérimentations au laboratoire*). Cette similitude permet la reproduction des architectures des modèles à l'identique de façon rapide.
- L'environnement Matlab est compatible avec d'autres langages (*C ou Fortran*).
- L'environnement Matlab / Simulink est doté d'une boîte à outils de logique floue permettant la définition et l'ajustement rapide des contrôleurs flous. De plus, des classes de contrôleurs Tout ou Rien et PI sont déjà définies sous Simulink.

Le langage C a d'ailleurs été utilisé C pour le développement des modules qui nécessitent des temps de calcul élevés (*tâche solaire, distribution des rayonnements GLO et CLO à l'intérieur du local et résolution numérique du modèle aéraulique*).

Le modèle HYBCELL1.0 dispose de plusieurs interfaces permettant la définition des entrées du problème géométrie, climat, équipement techniques, option de contrôle. La figure 5 présente par exemple, l'interface de définition de la géométrie du local. En sortie, Il permet d'obtenir l'évolution de la température d'air, de la concentration de CO<sub>2</sub>, du PMV, ainsi que celle des consommations énergétiques. Cette liste n'est pas exhaustive car l'utilisateur peut spécifier d'autres sorties selon les besoins de l'étude.

Le schéma de la figure 4 résume l'ensemble des modules implémentés dans HYBCELL1.0. Un exemple d'interface utilisateur est illustré par la figure 5.

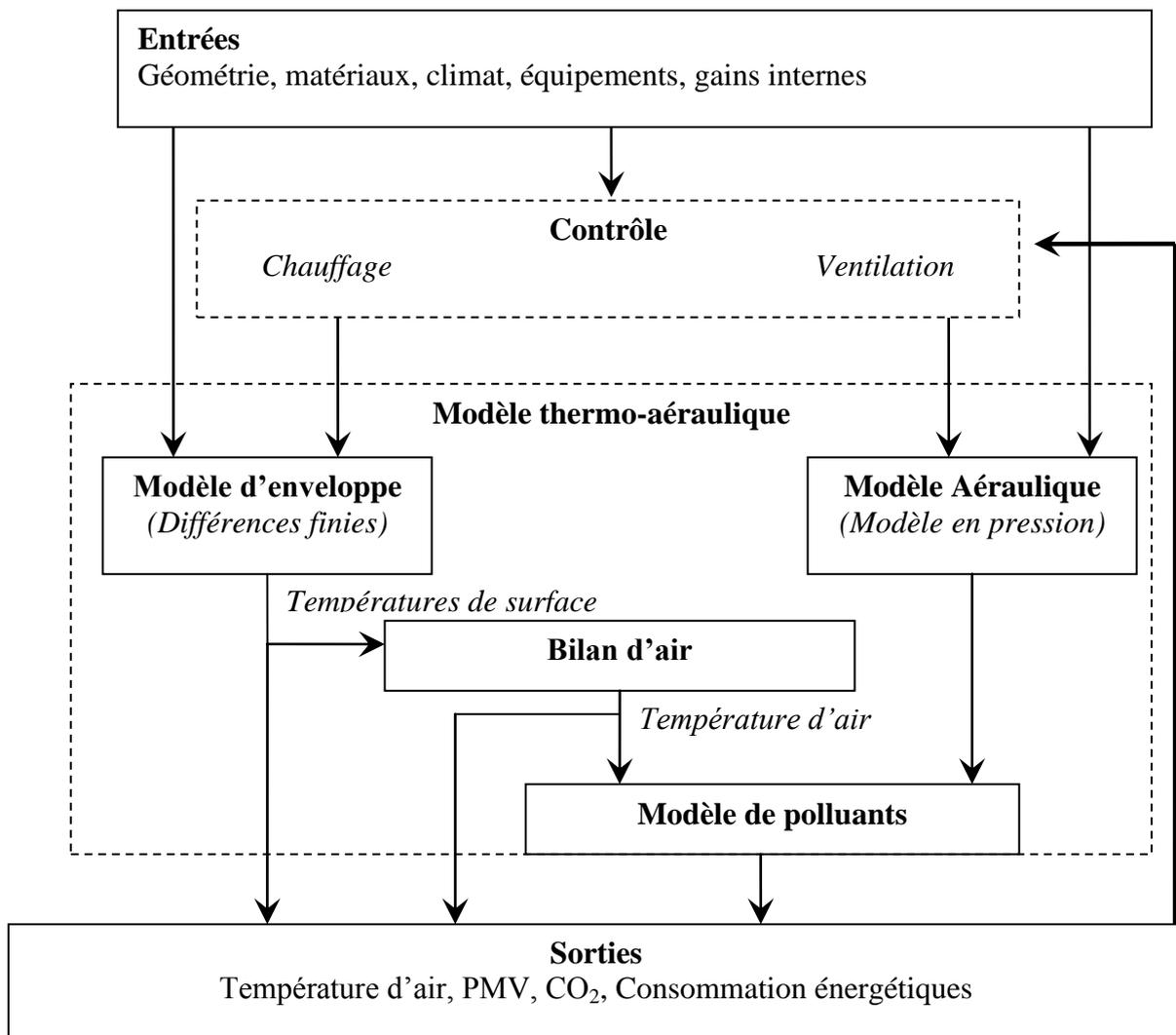
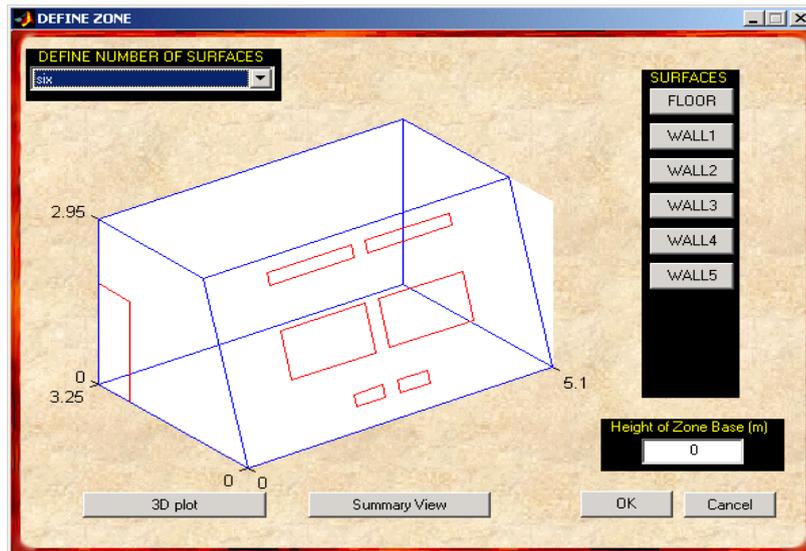


Figure.4 : Structure générale du modèle HYBCELL1.0



*Figure 5 : Exemple d'interface utilisateur de HYBCELL1.0*

### *Démarche de développement*

La démarche suivante a été adoptée dans le développement du modèle HYBCELL1.0 :

- Définition des entrées et des sorties du modèle :  
La zone à modéliser étant définie par sa géométrie et ses matériaux, nous avons défini les sollicitations extérieures et intérieures à prendre en compte (*conditions climatiques, locaux entourant la cellule et gains internes*) sont définies. Les sorties du modèle peuvent être définies en fonction de son utilisation température de l'air, concentration de CO<sub>2</sub>, température radiante moyenne.
- Définition des modèles physiques :  
Durant cette étape, les phénomènes physiques intervenant dans la modélisation sont étudiés et des hypothèses simplificatrices proposées. Il s'agit d'effectuer un choix sur les phénomènes à prendre en compte et le degré de simplification à adopter. Par exemple, la conduction unidirectionnelle et les échanges linéaires, la discrétisation et le maillage.
- Établissement des modèles mathématiques :  
Cette étape consiste à établir les différents systèmes d'équations avec les conditions aux limites. Pour ce faire, des lois de conservation et de transfert doivent être mises en œuvre. D'autres hypothèses simplificatrice sont émises à ce niveau concernant les erreurs de troncatures lors de l'utilisation de la méthode des différences finies par exemple.
- Résolution numérique :  
Le modèle déduit de l'étape précédente est rendu opérationnel en l'implémentant au niveau de l'outil de résolution et de simulation Matlab \ SIMULINK.

➤ Validation :

La dernière étape de la modélisation consiste à confronter les résultats prédits par le modèle HYBCELL1.0 aux résultats obtenus par expérimentation en utilisant la cellule HYBCELL (*El Mankibi et al, 2001*). Les résultats du modèle aéroulique de HYBCELL1.0 sont confrontés à ceux obtenus par simulation en utilisant un modèle validé basé sur les mêmes hypothèses (*AIOLOS Allard et al, 1998*).

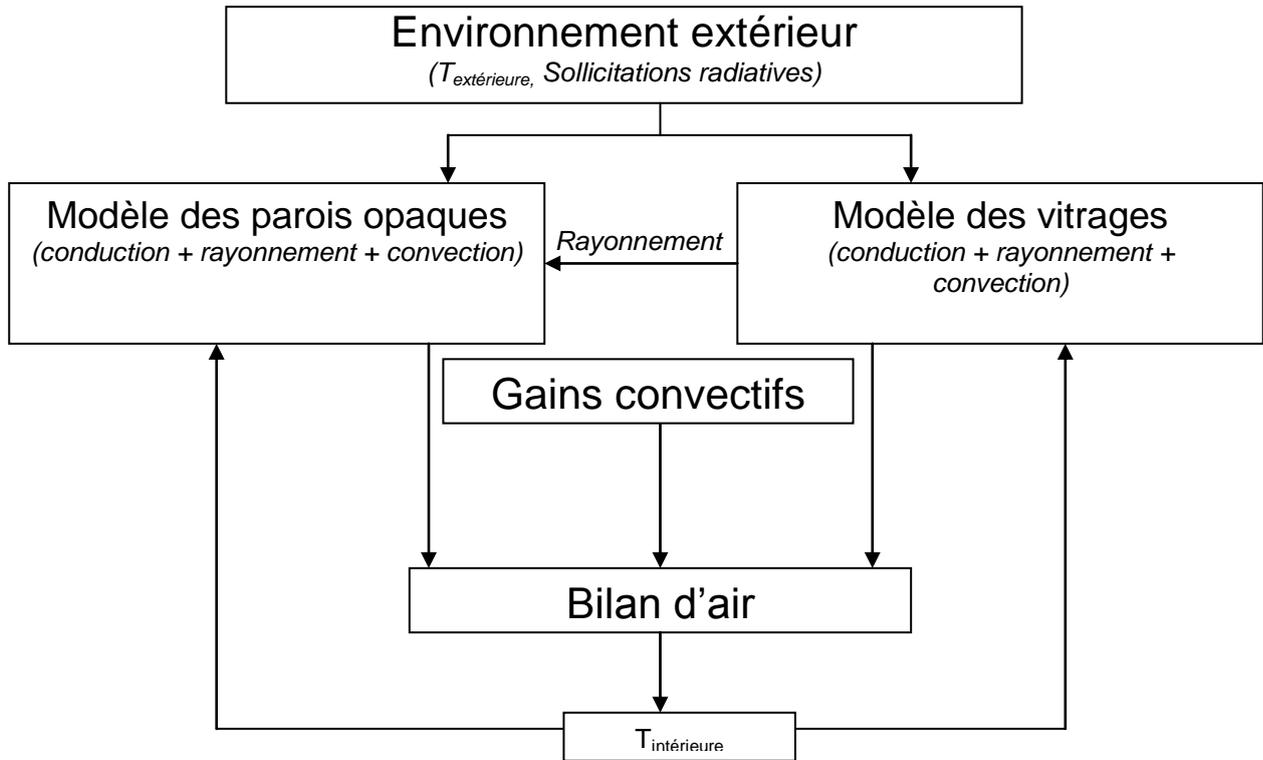
**Modèle d'enveloppe**

Le modèle d'enveloppe repose sur l'écriture d'un bilan de chaleur pour l'ensemble des surfaces opaques et transparentes constituant l'enveloppe du local en prenant en compte les flux radiatifs, convectifs et conductifs.

Les parois du local modélisé sont découpées en facettes selon un maillage spécial avec deux facettes par paroi. Ces facettes sont différenciées par leurs surfaces et leurs températures. L'objectif de ce découpage est de prendre en compte la tache solaire ainsi que la distribution des rayonnements CLO et GLO à l'intérieur du local. Nous avons aussi distingué les facettes opaques des facettes transparentes. Ces deux types de facettes sont différenciés par les modèles conductifs et radiatifs utilisés.

- Modèle conductif : Deux modèles conductifs ont été adoptés selon que la facette soit opaque ou transparente. Pour les facettes opaques nous avons utilisé un modèle dynamique basé sur un modèle d'état. IL consiste à discrétiser la paroi en plusieurs nœuds de température. Pour les facettes transparentes nous avons utilisé un modèle de conduction en régime permanent.
- Modèle radiatif : Les facettes transparentes et opaques sont différenciées au niveau du modèle de rayonnement CLO. Nous prenons ainsi en compte la part du rayonnement CLO transmis vers l'intérieur et la part perdue vers l'extérieur.

Le principe du modèle d'enveloppe est illustré dans la Figure 6 ci-dessous.



**Figure 6 : Principe du modèle d'enveloppe de HYBCELL1.0**

### *Bilan du volume d'air intérieur*

Le modèle du bilan thermique du volume d'air intérieur est un modèle à un nœud de température. Il traduit les échanges par convection entre l'air et les facettes du maillage considéré, les apports ou pertes dus au renouvellement d'air, les apports du chauffage ou de la climatisation ainsi que les gains internes en termes d'occupation, éclairage et équipements techniques. Le bilan de chaleur du volume d'air en régime dynamique s'écrit comme suit.

$$\underbrace{\rho \cdot V \cdot C_p \cdot \frac{dT_{\text{int}}}{dt}}_{\text{Variation de l'énergie interne}} = \underbrace{\sum_{\text{facettes}} A_i \cdot h_{\text{int}} \cdot (T_i^t - T_{\text{int}}^t)}_{\text{Echanges convectifs au niveaux des facettes}} + \underbrace{\Phi_{\text{Chauf\_clim}} + \Phi_{\text{gain}}}_{\text{Partie convective des gains internes et du chauffage}} + \underbrace{Q_{\text{ventil}} \cdot C_p \cdot (T_{\text{air\_vent}}^t - T_{\text{int}}^t)}_{\text{Ventilation}}$$

Avec :

$\rho$	: Masse volumique de l'air	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$V$	: Volume d'air	[m <sup>3</sup> ]
$C_p$	: Chaleur massique de l'air	[J.kg <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup> ]
$T_{\text{int}}^t$	: Température intérieure au pas de temps t	[°C]
dt	: Pas de temps	[s]

$A_i$	: Surface de la facette i	$[m^2]$
$h_{int}$	: Coefficient de convection intérieure	$[W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}]$
$T_i^t$	: Température de surface de la facette i	$[^{\circ}C]$
$T_{air\_vent}^t$	: Température de ventilation	$[^{\circ}C]$
$\Phi_{gain}$	: Gains internes	$[W]$
$\Phi_{Chauf\_cli}$	: Flux de chaleur de chauffage ou de la climatisation	$[W]$
$Q_{ventil}$	: Débit massique de renouvellement d'air	$[kg.s^{-1}]$

### **Modèle des parois opaques**

Pour les calculs des échanges de chaleur au sein des parois opaques, nous avons opté pour un modèle d'état utilisant la méthode des différences finies. Le schéma utilisé est un schéma explicite avec le principe de discrétisation monodirectionnelle à pas d'espace variable.

La méthode utilisée est basée sur une traduction de l'équation de la chaleur et les conditions aux limites en un système d'équations aux différences finies. Le modèle d'état utilisé est défini par:

- Une équation d'état :  $\dot{X}(t) = AX(t) + Bu(t)$
- Une équation d'observation :  $Y(t) = CX(t) + Du(t)$
- Des conditions initiales :  $X(t) = X_0$

Avec:

$\dot{X}(t)$  : Vecteur des variables d'état (les températures aux nœuds dans notre cas),

$u(t)$  : Vecteur des sollicitations extérieures et intérieures

$Y(t)$  : Vecteur des variables de sortie

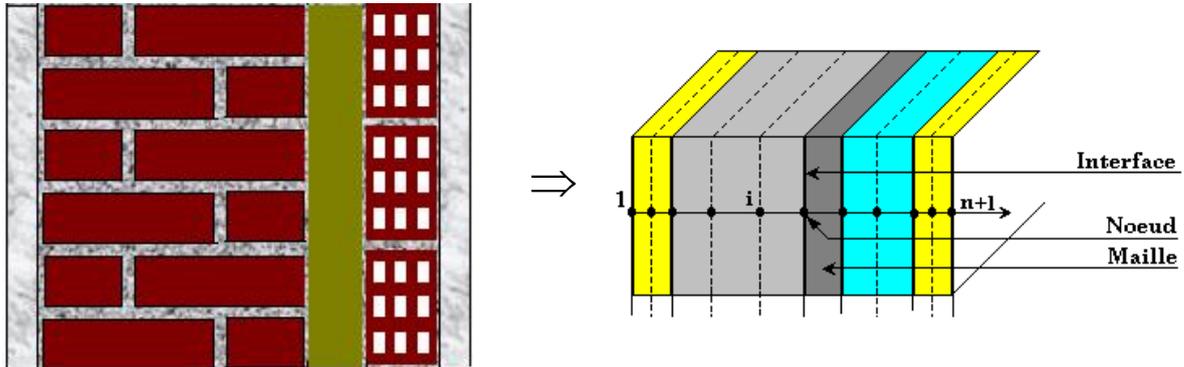
$[A]$  : Matrice d'évolution (elle regroupe les caractéristiques de la paroi (matériaux, coefficient de convection et discrétisation)

$[B]$  : Matrice d'application des conditions aux limites.

### **Discrétisation spatiale**

La discrétisation d'une paroi se fait de manière à ce que les nœuds coïncident avec les frontières des matériaux. Cette discrétisation (*Figure 7*) présente l'avantage de rendre le test du

programme plus facile (si on double le pas d'espace, les nœuds du nouveau maillage coïncideront avec ceux de l'ancien). En revanche, elle ne permet pas la conservation le même formalisme pour des modèles simplifiés (*un seul nœud par paroi*) (Dehausse, 1988).



**Figure 7 : Discretisation spatiale adoptée dans le modèle HYBCELL1.0**

Pour un matériau donné, le nombre maximum de nœuds est conditionné par l'épaisseur.

#### **Modèle conductif des vitrages**

Les gains énergétiques des rayonnements solaires ainsi que les déperditions à travers les baies vitrées ont une influence sur le bilan du volume d'air d'une part et sur le confort à l'intérieur du bâtiment d'autre part. En effet, les parois transparentes présentent la particularité de transmettre les rayonnements CLO à l'intérieur du bâtiment et favorisent l'apparition des phénomènes suivants :

- La surchauffe d'une partie ensoleillée d'une paroi conduit à la formation des panaches suite aux échanges convectifs entre la partie ensoleillée et l'air intérieur.
- La tache solaire implique des différences de température de surface entre les facettes d'une même paroi. Ceci rend le bilan des échanges radiatifs GLO plus complexe à établir sans un maillage adéquat de la paroi.
- La surchauffe locale d'une paroi fait apparaître des phénomènes de conduction bidimensionnels.

L'utilisation du modèle aux différences finies utilisé pour les parois opaques au niveau des vitrages induit un pas de temps faible, 10 s pour un vitrage de 4 mm. Pour contourner cette difficulté à l'origine d'un pas de temps calcul plus important par le modèle HYBCELL 1.0 et vue que l'inertie thermique des vitrages est négligeable devant celle des parois opaques épaisses, un modèle en régime permanent a été développé pour la modélisation des fenêtres. Le schéma de la Figure 8 montre l'analogie électrique utilisée lors de la modélisation d'un double vitrage.

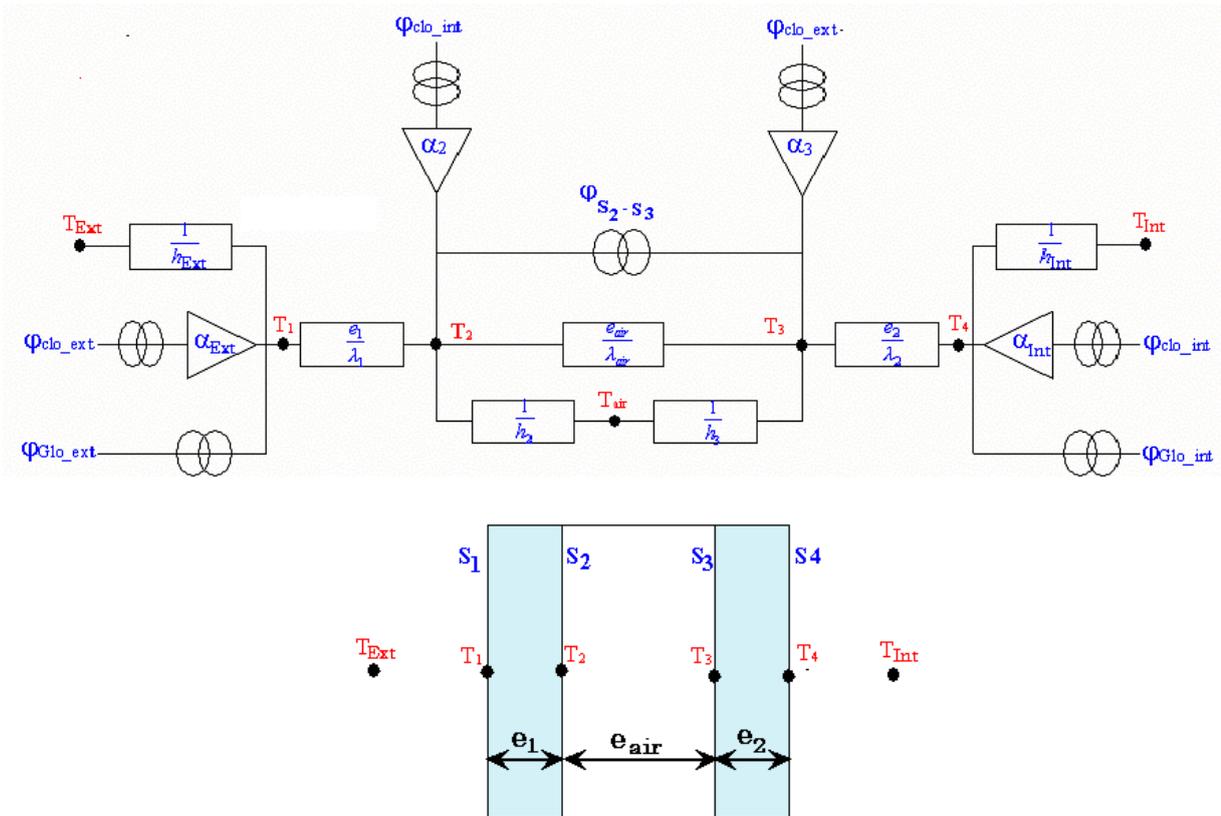
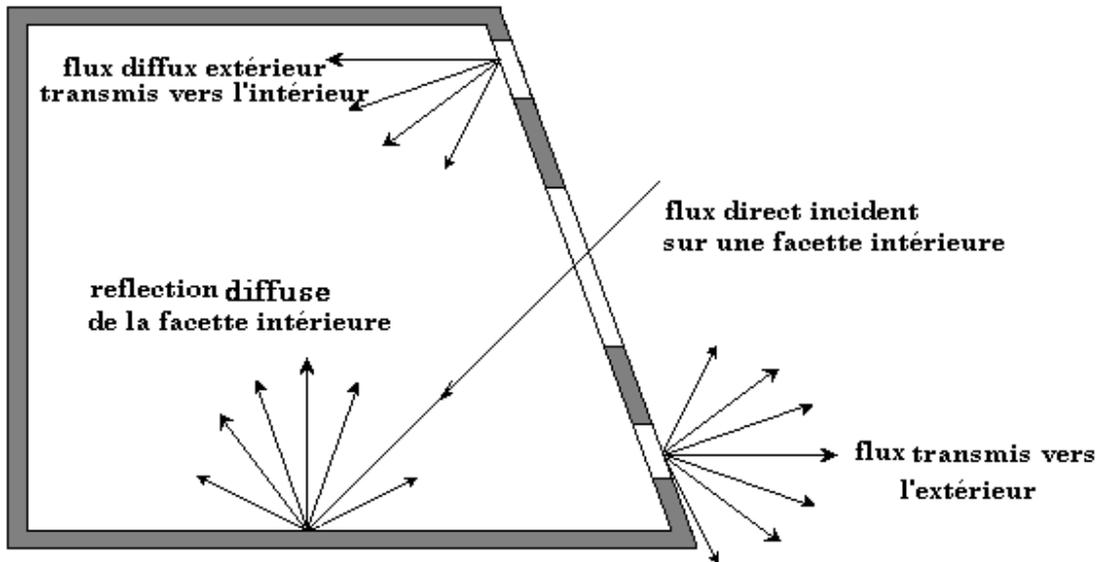


Figure 8 : Modèle du vitrage utilisé dans HYBCELL1.0

### Échanges radiatifs, courtes longueurs d'onde

Le modèle de rayonnement inclut le calcul des ombres engendrées par les différents masques, la détermination de la tache solaire à l'intérieur du local simulé ainsi que les inter-réflexions des rayonnements CLO entre l'ensemble des facettes intérieures. Pour ce faire, une autre méthode de maillage des parois intérieure différente du maillage rectangulaire classique a été utilisée (EL MANKIBI 2003). Le calcul des flux CLO absorbés par le bâtiment passe par trois étapes :

- Détermination des parties ensoleillées de la façade (*prise en compte des masques*).
- Détermination de l'évolution de la tache solaire à l'intérieur du bâtiment.
- Détermination de la répartition du flux entrant entre les facettes de chaque paroi (*inter réflexions diffuses*).



**Figure 9 : Distribution du rayonnement CLO à l'intérieur du local simulé**

Le modèle utilisé suppose que les inter réflexions sont diffuses. Ceci nous est imposé par les calculs fastidieux, et le temps de simulation que nécessiterait un modèle considérant des inter réflexions spéculaires. Plusieurs études réalisées à ce propos (Pfrommer, 1995; Dautin, 1997; Voltzel et al, 2001) ont montré en particulier, que la prise en compte des inter-réflexions non diffuses n'est pas nécessaire pour décrire le rayonnement courtes longueurs d'ondes à l'intérieur d'un bâtiment.

### ***Échanges Grandes Longueurs d'Ondes***

La modélisation des échanges par rayonnement grandes longueurs d'ondes (*GLO*) dans un bâtiment implique le traitement des comportements non linéaires et la résolution des problèmes géométriques posés par les bâtiments complexes (*définition des facteurs de forme*).

La connaissance de l'environnement entourant le bâtiment (*ciel, sol et bâtiments voisins*) est nécessaire pour la détermination des flux *GLO* qu'échangent les parois du bâtiment avec l'extérieur. Cependant, ces données sont souvent indisponibles ou leur intégration dans les calculs est trop complexe. Cette complexité dépend du modèle de ciel et des facteurs de forme avec l'environnement utilisés.

### ***Modèle aéraulique***

#### **Objectif et démarche**

L'objectif de modèle aéraulique est d'approcher le comportement aéraulique d'un bâtiment pour une configuration d'ouverture de fenêtre et / ou mise en route du ventilateur donnée.

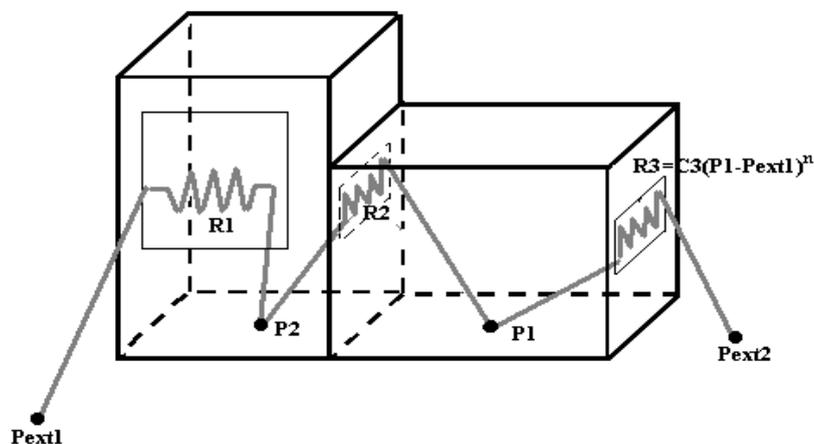
Dans un premier temps un modèle zonal existant au laboratoire (*AIRGLAZE* (Voeltzel et al, 2001)) a été étudié. L'étude a révélé que son utilisation n'est pas adaptée à ce cas pour les raisons suivantes :

- Le grand nombre d'informations fournies par le modèle existant (*distribution du champs de vitesse*) nécessite des temps de simulation élevés.
- Pour des problèmes de convergence, l'état actuel de AIRGLAZE ne permet pas de prendre en compte une distribution quelconque des ouvertures.

### Principe du modèle Aéraulique de HYBCELL1.0

Les modèles en pression permettent de calculer les débits d'air circulant entre les différentes parties d'un bâtiment ainsi que les débits d'air échangés avec l'extérieur par les ouvertures ou par infiltration en considérant que la température et la masse volumique sont uniformes dans chaque zone.

Pour calculer les débits d'air, le modèle aéraulique de HYBCELL1.0 utilise le principe de conservation de masse dans chaque zone, une seule zone dans le cas de la cellule HYBCEL. Les codes en pression représentent le comportement aéraulique d'un bâtiment par un réseau de nœuds de pression reliés par des ouvertures (*Figure 10*).



**Figure 10 : Principe du modèle aéraulique utilisé dans HYBCELL1.0**

Le principe des codes en pression repose sur une analogie électrique avec des résistances non linéaires. Dans cette analogie, les pressions représentent les potentiels et elles sont imposées dans certains nœuds (*les pressions extérieures*) tandis que les ouvertures et les fissures représentent les résistances. Calculer les débits revient donc à calculer les intensités traversant les résistances. La loi débit - pression est du type :

$$Q = C \cdot \Delta P^n$$

Où:

Q	: Débit volumique traversant l'ouverture	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
$\Delta P$	: Différence de pression au niveau de l'ouverture	[Pa]
C	: Coefficient caractérisant l'ouverture	$[m^3 \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-n}]$

$n$  : Exposant adimensionnel dépendant du type d'écoulement [-]

### Transfert des polluants

Le modèle de transfert de polluants utilisé dans HYBCELL1.0 est basé sur le modèle multizone de TRNSYS. Le module utilise le principe de conservation de masse dans chaque zone. Si l'on considère un local constitué de  $N$  zones, pour un polluant  $p$  et une zone  $i$ , l'équation générale de conservation de masse est :

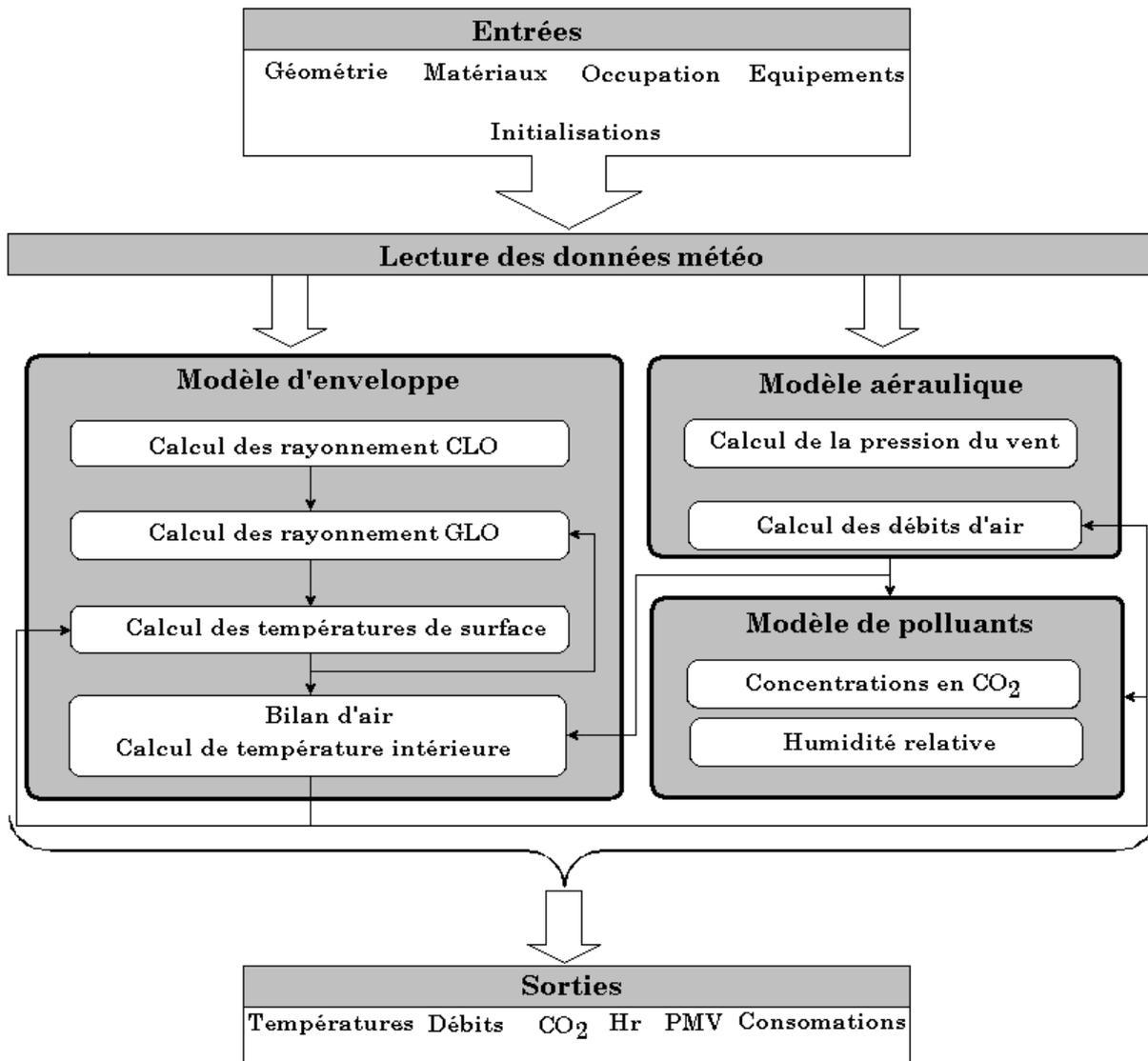
$$\frac{d(\rho_i \cdot V_i \cdot C_{i,p})}{dt} = \sum_{j=0}^N \left( \sum_{k=1}^{N_{i,j}} (m_{ijk} \cdot (1 - \eta_{ijk}) \cdot C_{i,p}) \right) - \sum_{j=0}^N \left( \sum_{k=1}^{N_{i,j}} (m_{ijk} + K_{r,i,p} \cdot C_{i,p}) \right) + S_{i,p}$$

Avec :

$\rho_i$	: Masse volumique de l'air	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$V_i$	: Volume de la zone $i$	[m <sup>3</sup> ]
$C_{i,p}$	: Concentration du polluant $p$ dans la zone $i$	[kg.kg <sup>-1</sup> air]
$N$	: Nombre total de zones	[-]
$N_{i,j}$	: Nombre de liens (ouvertures) entre les zones $i$ et $j$	[-]
$m_{ijk}$	: Le débit massique à travers le lien $k$ de la zone $j$ vers la zone $i$	[kg.s <sup>-1</sup> ]
$\eta_{ijk}$	: Efficacité du filtre du lien $k$ entre la zone $i$ et la zone $j$	[-]
$K_{r,ip}$	: Réactivité du polluant $p$ dans la zone $i$	[-]
$S_{i,p}$	: Production du polluant $p$ dans la zone $i$	[-]

### Le couplage des modèles

Le couplage utilisé est le couplage de type oignon (*Figure 11*). Ce mode de couplage donne des résultats fiables indépendamment du pas de temps de simulation. L'utilisation du couplage PING PONG est certes moins coûteuse en temps de calcul, mais cela nécessite la connaissance des constantes de temps des différents phénomènes en jeu et en l'absence de cette information, la stabilité d'un couplage PING PONG nécessitera le test de plusieurs pas de temps pour en sélectionner le plus adéquat.



**Figure 11 : Couplage du modèle aéralique avec le modèle d'enveloppe de HYBCELL1.0**

### 4.2.3 LE MODÈLE MOCASOLI

#### Introduction

Le développement du modèle numérique pour la simulation des capteurs solaires thermiques intégrés dans l'enveloppe du bâtiment est effectué par étapes. La première étant de développer les équations numériques caractérisant le fonctionnement thermique des capteurs solaires thermiques intégrés, c.à.d. en prenant en compte l'interaction entre la température du capteur et la température d'air à l'intérieur du bâtiment derrière le capteur. Ces équations sont écrites dans un code de programmation qui, une fois analysé, est incorporé dans un modèle de système solaire thermique pour la production d'eau chaude. Ce modèle de système solaire est relié par la suite à un modèle de bâtiment formant ainsi notre modèle global qui permet, d'une part de simuler l'efficacité énergétique des capteurs solaires thermiques intégrés dans l'enveloppe du

bâtiment, d'autre part d'évaluer l'impact de l'intégration solaire sur l'évolution de la température d'air à l'intérieur du bâtiment.

### **Modèle du système solaire thermique**

Le modèle du système solaire est construit à l'aide du code TRNSYS. La bibliothèque de TRNSYS possède la plupart des éléments nécessaires :

- Un composant de lien avec MATLAB pour lire le code numérique développé des capteurs solaires plans intégrés ;
- Un composant pour définir le profil d'utilisation ;
- Un ballon de stockage ;
- Des pompes, des tuyaux et des évacuations ;
- Des contrôleurs.

Ces composants (*Types*) sont choisis et interconnectés en utilisant "l'Assembly Panel". Ensuite pour chaque type nous définissons les paramètres, les entrées et les sorties.

Les autres éléments nécessaires pour le modèle peuvent être fournis sous forme d'équations via le Type Équation, par exemple la quantité de consommation journalière d'eau chaude sanitaire.

### **Capteur plan intégré**

À partir des équations développées dans la thèse de T Salem (*Salem, 2007*), un modèle numérique de capteur solaire intégré dans le bâtiment est rédigé sous le code MATLAB, en intégrant les fonctions qui servent à faire le lien avec TRNSYS (*nombre de paramètres, pas de temps...*). La liaison entre MATLAB et TRNSYS se fait par le biais du TYPE 155 de la bibliothèque de TRNSYS.

Les entrées de ce modèle sont les suivantes :

- La température ambiante extérieure, la température à l'intérieur du bâtiment et la température du ciel ;
- La vitesse du vent ;
- La température du fluide à l'entrée du capteur ;
- Le débit du fluide à l'entrée du capteur ;
- Les paramètres sont les suivants :
  - Les dimensions et le nombre de capteurs ;
  - Les caractéristiques du fluide caloporteur ;
  - Les caractéristiques thermiques et les dimensions des matériaux utilisés (*isolants, absorbeur en cuivre*).

Les sorties sont les suivantes :

- La quantité d'énergie utile produite par le système ;
- La température moyenne de l'absorbeur ;
- La température du fluide à la sortie du capteur ;
- Le débit du fluide à la sortie du capteur.

### Stockage

Le modèle de ballon utilisé est le type 4 de la bibliothèque TRNSYS. Il s'agit du modèle de ballon de stockage avec stratification. Pour un stockage stratifié, (*Beckmann et Duffie, 1980*) ont donné l'expression du bilan thermique au nœud i :

$$m_j \frac{dT_{s,j}}{d\tau} = \left( \frac{UA}{Cp} \right)_j (T_a' - T_{s,j}) + F_j^c \dot{m}_c (T_{si} - T_{s,j}) + F_j^L \dot{m}_L (T_L - T_{s,j}) \\ + \begin{cases} \dot{m}_{m,j} (T_{s,j-1} - T_{s,j}) & \text{si } \dot{m}_{m,j} > 0 \\ \dot{m}_{m,j} (T_{s,j} - T_{s,j+1}) & \text{si } \dot{m}_{m,j} < 0 \end{cases}$$

- où  $T_{sj}$  la température du fluide à l'entrée du stockage en provenance du capteur ;  
 $T_L$  la température du fluide à l'entrée du stockage en provenance du réseau urbain ;  
 $T_a'$  la température environnante ;  
 $m_j$  la masse de la tranche j ;  
 $\dot{m}_c$  le débit massique dans le circuit du capteur ;  
 $\dot{m}_c$  le débit massique dans le circuit du puisage d'eau chaude ;  
 $F_{jc}$  et  $F_{jL}$  des fonctions de contrôle de fonctionnement des pompes.

### Régulation

Le régulateur qui contrôle la pompe de circulation compare la différence de température  $\Delta T = T_{cap} - T_{bal}$  ( $T_{cap}$  étant la température du fluide arrivant dans le ballon et provenant du capteur, et  $T_{bal}$  étant la température du fluide sortant du ballon et retournant au capteur, à deux valeurs différentes pour éviter les fluctuations. La valeur limite haute  $\Delta T_1$  utilisée est prise égale à 8 °C et la valeur basse  $\Delta T_2$  à 2 °C : la pompe se met en marche si  $\Delta T > \Delta T_1$  et s'arrête si  $\Delta T < \Delta T_2$ .

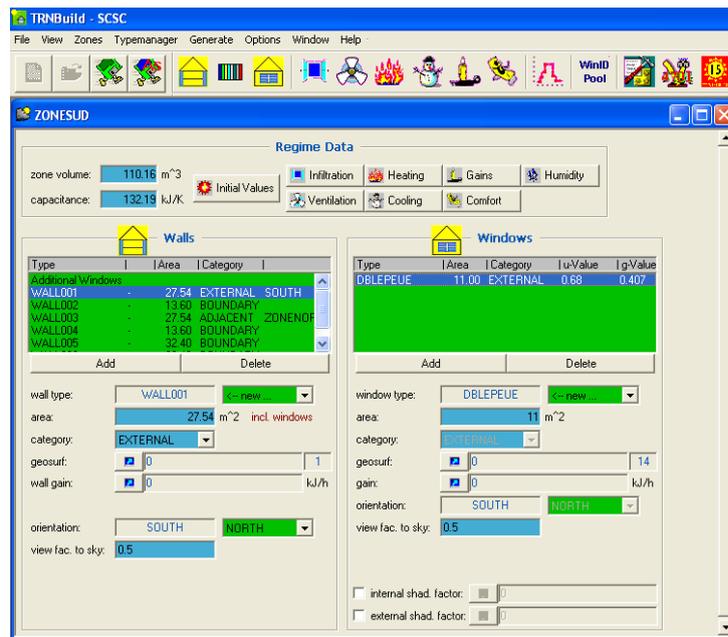
### Modèle du bâtiment

La modélisation du bâtiment est effectuée avec le logiciel TRNBuild. Elle a consisté d'abord à entrer dans le logiciel toutes les caractéristiques du bâtiment.

Pour effectuer cette opération, il est indispensable d'avoir connaissance de plans du bâtiment étudié, avec les cotations et les renseignements sur les matériaux employés. De plus, la présence d'occupants, d'activités et l'apport d'éléments externes doivent être connus.

Il est important de rappeler que le logiciel TRNBUILD est consacré à la création d'un module particulier de TRNSYS, le module de Type 56. Celui-ci apparaît dans TRNSYS avec une série d'entrées, de paramètres de sorties comme n'importe quel autre module.

Les bâtiments étudiés peuvent être décomposés en plusieurs zones distinctes. À une zone correspond une page d'interface à compléter (**Figure 12**).



**Figure 12 : Interface Windows des caractéristiques d'une zone dans TRNBUILD**

Chaque zone est délimitée par une série de murs eux-mêmes constitués de différentes couches de matériaux. La surface totale de la zone est requise ainsi que la chaleur spécifique moyenne de celle-ci afin de rendre compte de l'inertie thermique de la zone. L'existence ou non de fenêtre doit être précisée dans les caractéristiques du bâtiment. Des paramètres peuvent être ajoutés, présence d'un système de chauffage, d'un système de refroidissement, d'apports thermiques, d'infiltrations d'air à température différente de l'ambiance ou encore de ventilation. Chaque paramètre a une valeur constante ou est fonction du temps ou encore d'une entrée dans le modèle de type 56. Ainsi, dans le cas du bâtiment avec capteur intégré, l'apport thermique du capteur intégré a un impact sur le bilan énergétique du bâtiment. Les simulations numériques permettent d'évaluer l'ampleur de cet impact.

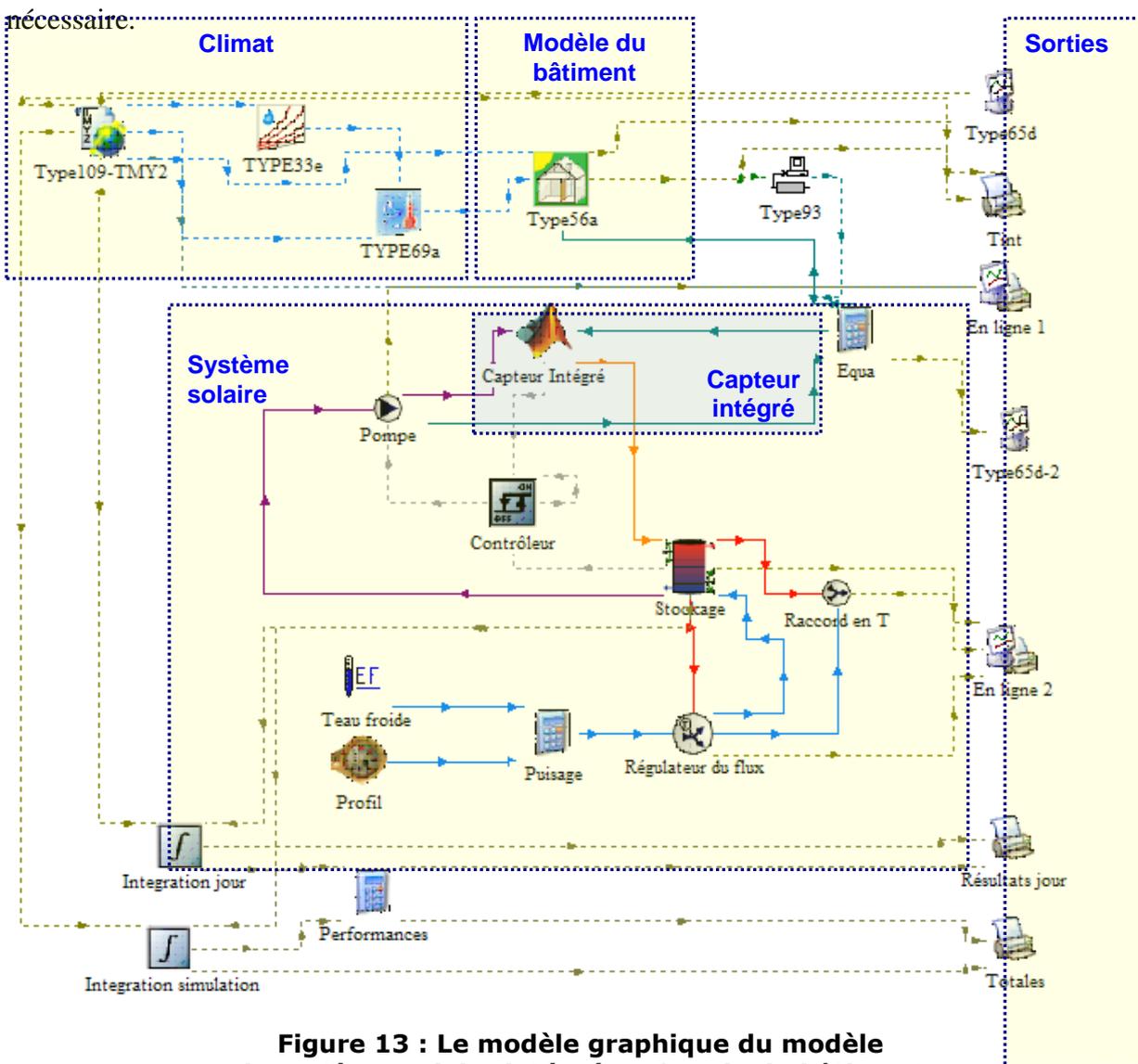
Le pas de temps par défaut du type 56, et donc de TRNBUILD, est l'heure. Cette valeur est due aux caractéristiques des algorithmes de calcul des transferts thermiques à travers les parois. En effet, la méthode mathématique de résolution est basée sur une série de calculs effectués à l'aide de la transformée en Z. Or, cette transformée est paramétrée sur un pas de temps horaire.

Dans le cas général, il est difficile de changer ce paramètre sous peine de faire diverger le modèle et empêcher la création du module 56.

### Modèle global

En considérant toutes les caractéristiques techniques du système solaire et du bâtiment, une modélisation de l'intégralité du système a été réalisée. Le modèle global de chauffe eau solaire avec des capteurs intégrés dans la façade est représenté dans TRNSYS par les composants incluant à la fois le bâtiment, le champ de capteurs solaires, le ballon de stockage, la pompe de circulation, le circuit hydraulique, les vases d'expansion, le régulateur et tous les autres modules nécessaires soit à calculer les sollicitations à partir des données météorologiques, soit à stocker et analyser les résultats.

La Figure 13 représente le modèle global, il faut souligner la complexité dans la constitution et l'agencement de tous les modules sur l'interface graphique. La maîtrise du code TRNSYS est



#### 4.2.4 LE MODÈLE ADOCC

L'outil AdOCC a été développé dans le cadre du travail de thèse B. MOUJALLED (*Moujalled, 2007*) sur le confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés. Cet outil intègre les différents mécanismes physiques, physiologiques, et comportementaux permettant de décrire la dynamique du confort thermique. Il agit comme un régulateur comportemental qui tient compte de l'état thermique de l'occupant ainsi que des opportunités et contraintes présentes dans le local.

AdOCC est composé de deux parties. La première partie détermine l'état thermique du corps humain à travers le PMV\* calculé à partir du modèle à deux nœuds de Gagge, et permet ainsi le calcul des échanges physiques et physiologiques en régime dynamique. La deuxième partie modélise le comportement adaptatif de l'individu à travers deux boucles rétroactives permettant la mise en œuvre des actions adaptatives de l'occupant. AdOCC a été intégré dans l'outil de simulation dynamique TRNSYS16. Cela permet de le coupler avec le module 'type56' de TRNSYS16, ainsi qu'avec le module AIRNODE développé pour le calcul des échanges aérauliques avec la possibilité de modifier de l'état d'un élément aéraulique (*fenêtre ou porte*) au cours d'une simulation.

Le principal apport de AdOCC, par rapport à un modèle analytique comme le PMV, réside dans sa capacité à représenter le confort thermique non seulement comme conséquence d'une exposition passive de l'occupant aux conditions physiques de son environnement, mais aussi en tenant compte des actions rétroactives de l'occupant. En effet, celui-ci peut modifier ces conditions physiques via son comportement adaptatif qui est pourtant souvent négligé.

A travers les simulations réalisées dans trois bureaux tirés de l'expérimentation, AdOCC a permis de rapprocher les valeurs simulées de la température d'air et de la sensation thermique de celles issues de l'enquête. Cela est mis en évidence à travers les simulations réalisées en mode statique sans AdOCC. Les résultats de ces simulations montrent que la sensation prévue en mode statique, par le PMV, surestime les valeurs trouvées dans l'enquête pour les bureaux naturellement ventilés en été (*deux fois en plus par rapport à AdOCC*), et les sous-estiment en hiver. AdOCC offre ainsi un outil qui, grâce au couplage avec le type 56 et AIRNODE dans TRNSYS16, permet de simuler la dynamique du comportement thermique de l'occupant et des bâtiments naturellement ventilés avec une précision satisfaisante. Ainsi, en étudiant un bureau naturellement ventilé en conditions estivales, les simulations réalisées en mode dynamique avec AdOCC montrent que le pourcentage de temps de confort peut être doublé par rapport aux simulations en mode statique. Selon l'inertie thermique, l'orientation, la protection solaire et le climat, le confort peut être obtenu en été pendant plus de 80 % du temps d'occupation en utilisant un ventilateur local ou la ventilation nocturne, sans avoir recours à la climatisation. L'utilisation du ventilateur correspond à une consommation de l'ordre de 10 W/m<sup>2</sup>/jour et la ventilation nocturne 30 W/m<sup>2</sup>/jour. Ces valeurs sont négligeables devant les consommations de climatisation qui peuvent être 10 fois plus importantes. En conditions hivernales, nous trouvons que l'ajustement vestimentaire permet de garder le même niveau de confort tout en réduisant la

consigne de 20 °C à 18 °C. Cela correspond à une économie de 35 % sur les besoins de chauffage.

### Conclusion

Actuellement, les trois modèles développés au DGCB-LASH sont utilisés notamment par les doctorants et les élèves de la voie d'approfondissement "Bâtiment" de l'ENTPE. Des plateformes expérimentales ont aussi été développées pour évaluer, valider et améliorer ces outils.

Le développement des outils présentés dans ce rapport a été fait de manière à pouvoir leur intégrer d'autres modules, notamment les composants actifs de façade.

Le tableau ci-dessus synthétise les caractéristiques et possibilités d'amélioration et d'intégration des trois modèles présentés dans ce rapport.

	Hybcell	Hadocc	MOCASOLI
Plateforme	Matlab-Simulink	Matlab	Matlab
Interface	Utilisateur + Code	Code	Utilisateur + Code
Couplages	TRNsys-labview	TRNSYS	TRNSYS
Validation	Numérique+expérimentale	Expérimentale	Expérimentale
Entrées - Sorties	Modulables	Modulables	Modulables
Flexibilité	Dépend de Matlab Simulink	Dépend de TRNSYS	Dépend de TRNSYS
Limites	Modèle monozone	Bâtiment à ventilation naturelle	-
Évolutions possibles	Multizones- migration vers labview	Bâtiment climatisé	Intégration dans la bibliothèque de TRNSYS
Portabilité	Dépend de Matlab Simulink	-	-
Modules	Thermique/Aéraulique/contrôle	Thermique/confort	Thermique/confort
Communications	Articles, conférences	-	Articles, Poster

## 5 Réalisation de Couplages "encapsulés"

### 5.1 INTRODUCTION

Le but de ce travail est la réutilisation de composants créés dans un premier environnement de simulation, sans être obligé de les réécrire dans le deuxième. Ce but peut être atteint à l'aide du concept de l'encapsulation des composants existant : on crée un composant binaire qui est utilisé par un seul nouveau composant capable de jouer le rôle « d'adaptateur » avec l'environnement partenaire.

Nous illustrons ce concept ici avec TRNSYS et SIMULINK ; le principe s'applique cependant à d'autres environnements de simulation basé sur une approche par composants. L'intérêt particulier du couplage entre TRNSYS et SIMULINK vient de la complémentarité des composants disponibles ; TRNSYS dispose d'un modèle de bâtiment multizone très détaillé, alors que SIMULINK offre des possibilités de contrôle des systèmes avancées. Réuni, les deux ensembles de modèles permettent des études très fines.

Nous montrons à la fois l'encapsulation de modèles TRNSYS pour une utilisation sous SIMULINK et l'encapsulation de sous-systèmes SIMULINK en tant que composant TRNSYS.

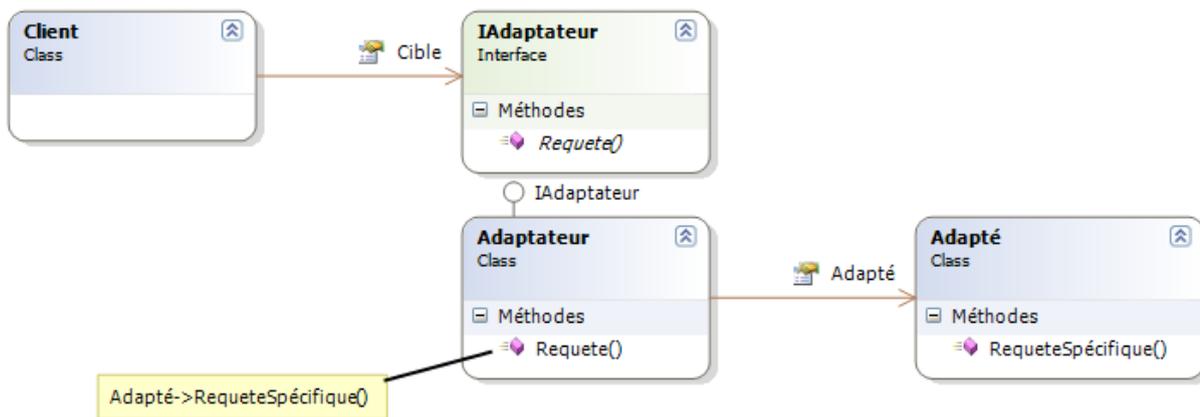
### 5.2 PRINCIPE

Notre approche s'appuie sur le fait que la plupart des environnements de simulation utilisent une architecture modulaire : chaque élément d'un système réel (pompe, capteur, bâtiment, ....) est représenté par un composant (aussi appelé module) qui implémente l'algorithme permettant de modéliser le phénomène associé à cet élément. Un composant permet de calculer un jeu de variables (dites de sortie) à partir d'un autre jeu de variables (dit d'entrée et/ou paramètres). Le composant peut gérer tout type d'équation, y inclus des états (e.g. température des couches d'eau d'un ballon). Un projet de simulation est simplement un ensemble de composants interconnectés afin de modéliser un système donné.

La structure d'un composant est typiquement rigoureusement définie par chaque environnement de simulation à l'aide d'une « interface » (*Application Programming Interface*, API). Cet API définit le mécanisme d'échange de données entre le composant et le reste de l'environnement de simulation. Chaque environnement définit son propre API, à la fois en termes de syntaxe (langage de programmation utilisé) et sémantique (nombre, structure et signification des valeurs échangées).

Au niveau binaire, quand on exécute une simulation sous un système d'exploitation donné, différents environnements utilisent cependant les mêmes concepts de « composant ». Sous Windows, le système des bibliothèques à liaison dynamiques (*Dynamic Link Library*, DLL) est un des mécanismes « standard » pour encapsuler des composants logiciels. Bien qu'il ne soit pas utilisé par tous les environnements de simulations, il est facile de créer des « ponts » vers ce type de composant, à l'aide d'un adaptateur.

L'adaptateur (aussi connu sous le nom « *wrapper* ») est un motif de conception permettant de cacher les détails d'implémentation d'un composant pour l'adapter à une convention donnée. Nous l'utilisons pour adapter l'API d'un composant (« l'Adapté ») d'un environnement à l'API d'un deuxième environnement (le client).



**Figure 1 : le motif de conception « adaptateur » (source: Wikipedia)**

Grace à l'adaptateur, deux composants issus d'environnements différents peuvent communiquer en utilisant la même interface (API). L'adaptateur traduit les appels d'un environnement (le client) en appels du deuxième environnement (l'adapté). Il se charge également d'adapter les formats de données le cas échéant (e.g. représentation binaire des chiffres). L'adaptateur est en général un composant très simple, nécessitant peu de lignes de code.

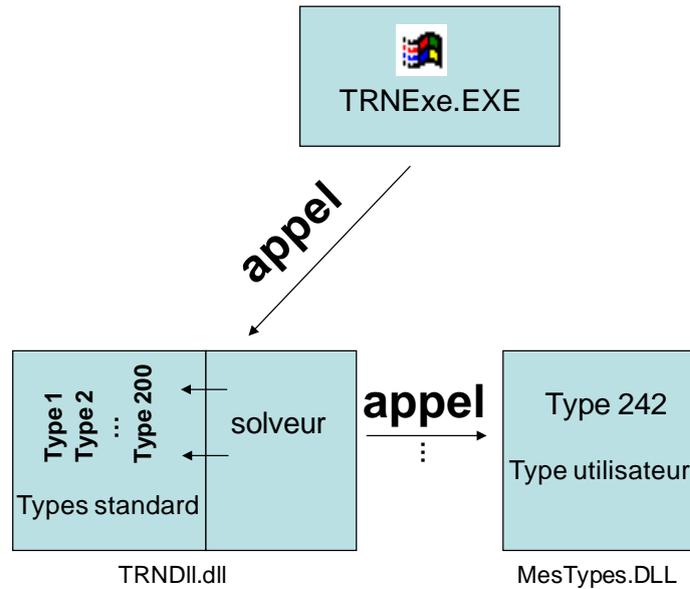
### 5.3 L'ARCHITECTURE DE TRNSYS

TRNSYS Simulation Studio est un environnement de simulation modulaire pour l'étude de systèmes dynamiques. Il est surtout utilisé par des bureaux d'études et des centres de recherche pour l'optimisation de concepts énergétiques. Ses trois parties principales sont une interface graphique, un solveur et des composants (modèles) appelés « Types » (e.g. une pompe, un tuyau, un bâtiment, ...). Un projet de simulation est défini sous forme d'un ensemble de composants interconnectés pour décrire un système donnée (e.g., un système de production d'eau chaude solaire).

Les connexions représentent des flux d'information entre les composants (e.g. la température à la sortie d'un tuyeau connecté à l'entrée d'un capteur solaire). Lors d'une simulation, le solveur lit un fichier de définition de projet (le « deck » ; celui-ci peut être créé par l'interface graphique, Simulation Studio). Il appelle ensuite successivement tous les composants en utilisant la méthode de la substitution successive afin de trouver une solution qui satisfait toutes les connexions. Le pas de temps de simulation est fixe.

Un composant TRNSYS est défini par une fonction qui calcule un ensemble de variables de sortie en fonction d'un ensemble de variables d'entrées (éventuellement calculées par d'autres composants) et de paramètres. D'un point de vue technique, ces composants sont implémentés sous forme de DLL Windows, suivant une interface (API) bien définie. L'API définit, parmi d'autres, la signature de cette fonction : nombre et type des arguments. Il devient ainsi possible d'implémenter un composant TRNSYS à partir de n'importe quel langage de programmation capable de créer une DLL (e.g. C, C++, FORTRAN, PASCAL, ...). En plus des variables d'entrées, la fonction reçoit des informations concernant l'état de la simulation (e.g., si tous les composants ont convergés dans le pas de temps actuel, le nombre d'appels itératifs, etc.).

Chaque composant est décrit à l'aide d'un fichier « Proforma » (\*.tmf). Ces fichiers contiennent les variables utilisées par le composant ainsi qu'une représentation graphique, mais pas l'algorithme. L'algorithme réside dans la DLL.



**Figure 2 : Architecture informatique de TRNSYS et ses composants**

Le noyau de TRNSYS, TRNDll (qui est lui-même une DLL) fournit le solveur et les composants (Types) standards. Il fournit également un ensemble de fonctions auxiliaires qui peuvent être utilisées pour implémenter un nouveau composant. Ces fonctions permettent, par exemple, de déterminer le début et la fin d'une simulation (tels que défini dans le projet de simulation), de vérifier la configuration du composant dans le projet par rapport à sa conception, de mémoriser des valeurs entre deux pas de temps, etc.

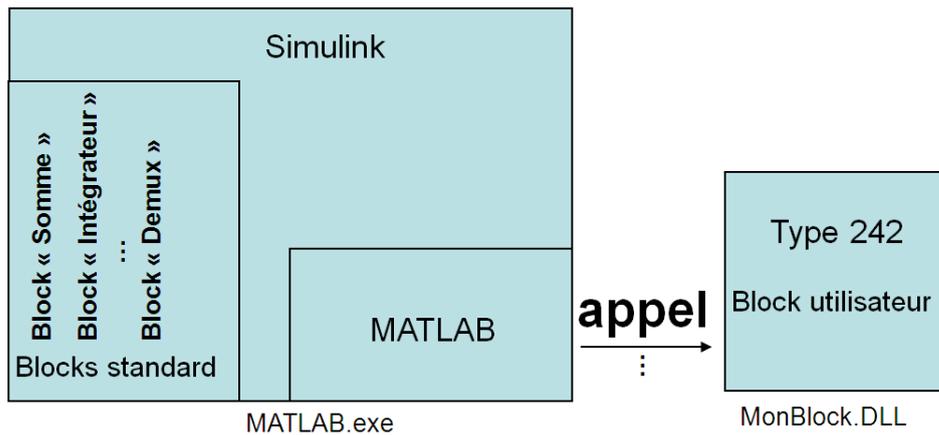
TRNSYS permet également de définir des sous-systèmes en groupant un ensemble de composants sous forme de « Macro ».

## 5.4 L'ARCHITECTURE DE MATLAB

MATLAB est un environnement de simulation généraliste, contenant un environnement interactif et un langage de programmation de haut niveau dédié. Il est largement utilisé dans différentes branches de l'industrie et la recherche, dans des domaines aussi variés que le traitement signaux et d'images, télécommunications, la conception de mécanismes de régulation, tests, mesures, études et analyses économiques, la biologie, jusqu'à la simulation de systèmes thermiques et de bâtiments.

Une des nombreuses extensions de MATLAB, Simulink®, est un environnement de simulation multi-domaine modulaire et extensible, permettant de concevoir des systèmes dynamiques. Simulink contient une interface graphique, un ensemble de composants de base (appelés « blocks » en Simulink) qui permettent de concevoir, simuler et tester des systèmes.

Comme pour TRNSYS, les connexions représentent des flux d'information entre les composants. Contrairement à TRNSYS, ces connexions ne sont pas limitées à des valeurs simples, mais peuvent transporter des vecteurs et des matrices. Des blocks peuvent être implémentés sous forme de DLL.



**Figure 3 : Architecture informatique de Matlab et ses composants**

Simulink utilise un des nombreux solveurs de MATLAB afin d'exécuter une simulation. En fonction du solveur choisi, cela peut déclencher un processus itératif, utilisant des variables continues ou discrètes. Le pas de temps peut être fixe ou variable, voire s'adapter dynamiquement au problème posé. Comme pour TRNSYS, le composant peut être compilé sous forme d'une DLL Windows.

Simulink permet de grouper des composants pour former des « subsystem ».

## 5.5 UTILISATION DE COMPOSANTS TRNSYS SOUS MATLAB

### 5.5.1 LE CONCEPT

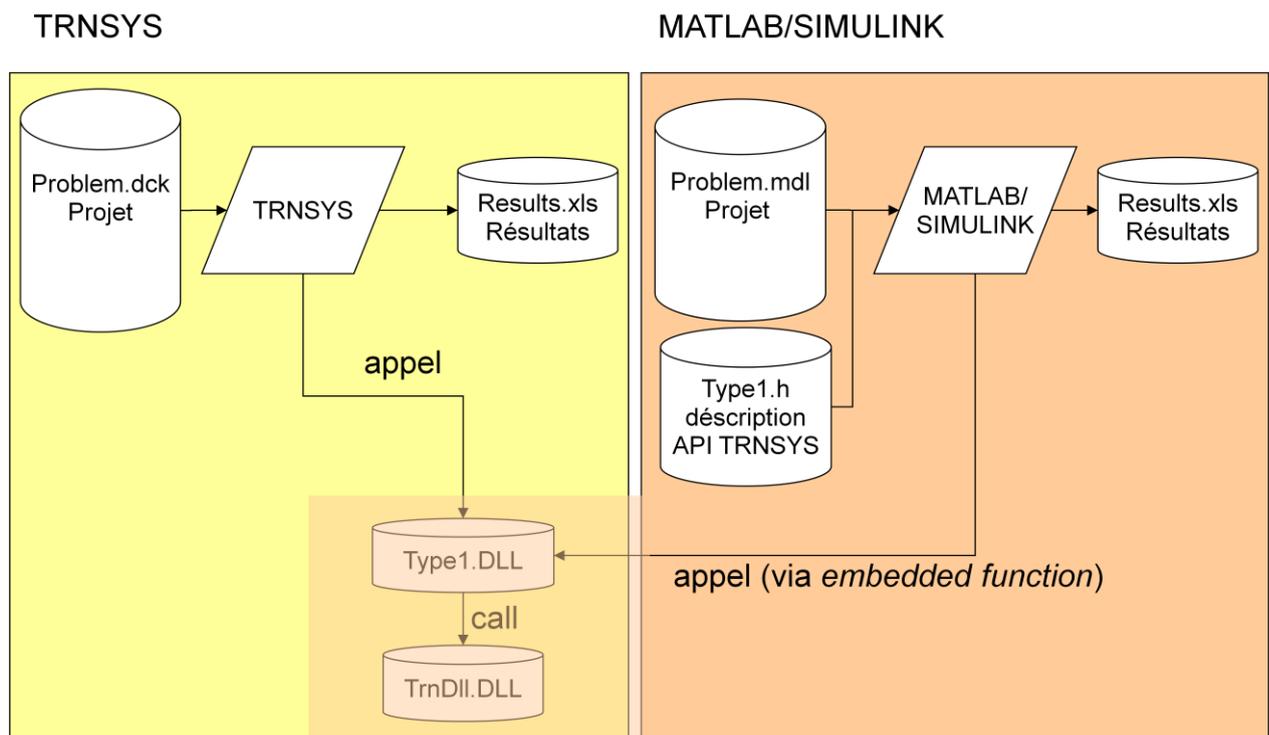
Comme à la fois TRNSYS et MATLAB permettent de créer des composants sous forme de DLL, il est possible d'adapter des composants TRNSYS existants pour une utilisation avec MATLAB et/ou Simulink : il suffit d'encapsuler le composant TRNSYS à l'aide d'un adaptateur qui implémente l'API de MATLAB. Cela peut être fait en utilisant directement le langage de script de MATLAB, ou alors sous forme d'un block « embedded function » sous Simulink. Ce block passe simplement ses valeurs d'entrée (qu'il reçoit de MATLAB en utilisant l'API de celui-ci) au composant TRNSYS (en utilisant l'API de TRNSYS ainsi que ses structures de données). Les valeurs calculées par le composant sont ensuite reconverties vers les structures de données de MATLAB.

La fonction MATLAB de l'adaptateur doit également renseigner les informations concernant l'état de la simulation pour s'assurer que le composant TRNSYS s'exécute dans le bon contexte. Pour cela, il utilise l'état actuel de la simulation MATLAB.

L'approche simple décrit ci-avant fonctionne en l'état pour des composants très simples. Des complications apparaissent si le composant s'appuie sur des fonctions du noyau de TRNSYS, ce qui est le cas de 99% des composants existants. Par exemple, la plupart des composants doivent s'initialiser au début de la simulation et donc pouvoir distinguer cet état d'un appel itératif 'normal'. Le composant obtient ce type d'information en appelant une fonction du noyau de TRNSYS. Le noyau doit donc être correctement initialisé avant qu'un composant, même isolé, ne puisse être appelé. De nouvelles fonctions, permettant d'initialiser le noyau de

TRNSYS sans démarrer une simulation, ont donc été ajoutées au noyau. Cela concerne notamment la définition du début de la simulation, la fin de la simulation et le pas de temps. Ces nouvelles fonctions ont été intégrées dans le logiciel TRNSYS depuis la version 17. Ces fonctions d'initialisation sont appelées à partir de la fonction *StartFn* du Block Adaptateur, et donc exécutées une seule fois au début de la simulation. De même que pour l'initialisation, chaque type, pendant chaque appel, peut être appelé plusieurs fois. Ce mécanisme a également du être intégré dans la méthode de couplage développée.

L'initialisation du noyau de TRNSYS concerne aussi les fichiers externes (« *external files* » ; il s'agit de fichiers de données lu par le composant, e.g. des données météo, des paramètres d'équipements, de caractéristiques du sol, ...). Malheureusement, ces fichiers sont automatiquement ouverts par le noyau de TRNSYS au lancement d'une simulation, et non par le composant lui-même. Ce choix de conception malheureux nous oblige à implémenter l'ouverture de ces fichiers pendant la phase d'initialisation de la simulation MATLAB. Cela est également réalisé à l'aide de fonctions ajoutées au noyau de TRNSYS ; elles ont également été intégrées dans Trnsys 17.



**Figure 4 : Appel de composants TRNSYS à partir de MATLAB**

Le processus qui se déroule dans l'adaptateur lors du chargement d'une DLL TRNSYS et lors de l'appel du composant qu'elle contient peut être résumé comme suit:

Phase d'initialisation:

- Génération automatique du fichier "TypeXX.h" décrivant l'API du composant
- Définition d'une liste des paramètres (sous forme de vecteurs MATLAB)
- Initialisation des entrées et sorties ainsi que des dérivées (sous forme de vecteurs MATLAB)
- Chargement de la DLL
- Définition des informations d'état (INFO array) sous forme d'un vecteur MATLAB
- Définition de la version TRNSYS, *Timestep*, *StartTime*, et *StopTime*

- Initialisation du Type (on appelle la fonction contenu dans la Dll en l'état « début de la simulation », avec  $TIME = StartTime$ , nombre d'appels = 0)

A chaque pas de temps :

- On incrémente et mémorise (via le vecteur INFO) le nombre d'appels itératifs
- On appelle la fonction contenu dans la Dll
- On enregistre l'état et les dérivatives
- On affecte les sorties calculées au vecteur MATLAB correspondant

### **5.5.2 L'IMPLEMENTATION : GÉNÉRATION AUTOMATIQUE DE CODE SIMULINK PAR TRNSYS SIMULATION STUDIO**

La génération de sous-systèmes Simulink à partir d'instances de composants TRNSYS a été directement implémentée dans l'interface graphique de TRNSYS, Simulation Studio. L'utilisateur peut simplement choisir un composant avec le bouton droit de la souris, puis choisir "File/Export to Simulink". Cela crée l'entête C Typexx.h utilisé par MATLAB afin d'exécuter le composant. En même temps, un projet Simulink est créé. Ce projet contient un *subsystem* avec l'adaptateur du composant TRNSYS. Le formulaire de cet adaptateur contient toutes les valeurs de défaut des variables du composant TRNSYS. Un vecteur d'entrée et un sélecteur de résultats sont également générés, afin de faciliter le raccordement du composant à un système existant. L'adaptateur contient tout le code nécessaire pour initialiser le noyau de TRNSYS (en appelant les fonctions appropriées, comme expliqué ci-avant). Lors qu'on lance une simulation sous Simulink, il extrait à chaque itération les informations nécessaires de l'environnement MATLAB Simulink, appelle le composant TRNSYS et remplit le vecteur des sorties avec le résultat obtenu.

Le masque de l'adaptateur automatiquement généré lors de l'export contient toutes les variables du composant avec leurs noms sous TRNSYS, leurs unités et valeurs par défaut.

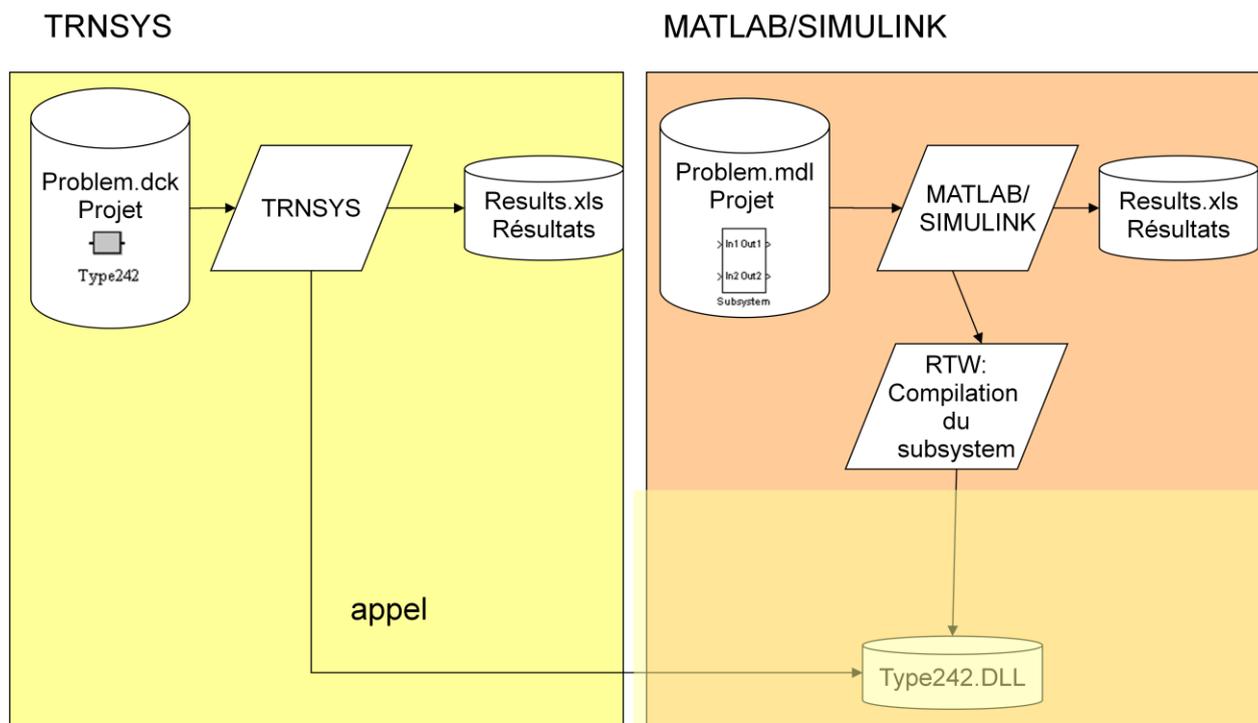
Le projet simulé s'ouvre automatiquement dans Simulink et peut être exécuté directement, sans autre intervention de l'utilisateur. Comme toutes les valeurs ont été initialisées à partir du projet TRNSYS, les résultats devraient être identiques sous Simulink, comparés à ceux du projet TRNSYS d'origine.

Pour que ce mécanisme fonctionne, Matlab/Simulink doit pouvoir accéder à la fois au noyau de TRNSYS (fichier trndll.dll) et à la Dll contenant le type. On peut inclure leur emplacement dans la variable PATH de MATLAB, ou encore copier ces fichiers dans le répertoire du projet Simulink.

## **5.6 UTILISATION DE COMPOSANTS MATLAB SOUS TRNSYS**

### **5.6.1 LE CONCEPT**

Une des extensions de MATLAB, *real-time workshop* (RTW), permet de compiler des sous-systèmes (*subsystem*) Simulink sous forme d'application autonome ou DLL. Ce mécanisme peut être utilisé afin de créer des adaptateurs permettant d'encapsuler le sous-système sous forme de composant (Type) TRNSYS.



**Figure 5 : Utilisation d'un subsystem SIMULINK sous TRNSYS**

Comme l'API généré par MATLAB n'est pas compatible avec celui de TRNSYS (e.g., le nombre et type des arguments ne correspond pas), il est nécessaire d'encapsuler la fonction MATLAB à l'aide d'un adaptateur afin de respecter les conventions requises par TRNSYS. La tâche de l'adaptateur est à nouveau d'initialiser le modèle MATLAB (le *subsystem*), puis de traduire l'information reçue de TRNSYS dans une forme utilisable par le composant MATLAB.

### 5.6.2 L'IMPLEMENTATION : UN « TEMPLATE » RTW POUR LA GÉNÉRATION DE TYPES TRNSYS

MATLAB real time workshop utilise un script en langage Pearl afin de générer, à partir d'un sous-système, un projet de compilation complet. Dans ce processus, MATLAB utilise un fichier modèle (template) afin de générer le code source en langage C ou C++. Cela nous simplifie la tâche énormément : il suffit d'utiliser une variante de ce modèle respectant les conventions de TRNSYS. L'adaptateur lui-même est simplement ajouté à ce fichier en tant que fonction supplémentaire. MATLAB n'étant pas au courant de cette fonction complémentaire, le résultat est à la fois une DLL MATLAB valide et un Type TRNSYS.

Le code source généré de l'adaptateur utilise les informations d'état habituels de TRNSYS afin d'initialiser, exécuter ou libérer le composant. Pour cela, il utilise simplement les fonctions MATLAB habituels présents dans la même DLL.

A l'aide de notre nouveau « template », un utilisateur de MATLAB/SIMULINK dispose donc simplement d'une nouvelle cible de compilation (« target ») sous *real-time workshop*. Il suffit de choisir cette cible, et le code source générée devient un Type Trnsys, tout en restant un subsystem MATLAB valide.

Une fois le code source généré, il doit être transformé en DLL. Pour cela on peut ouvrir le *Makefile* (projet de compilation, également généré automatiquement par RTW) sous Microsoft

Visual Studio pour le compiler. La DLL résultante peut être directement utilisée par TRNSYS 17.

Pour utiliser le nouveau composant dans l'interface graphique de TRNSYS, l'utilisateur doit créer son masque sous Trnsys Simulation Studio sous forme d'un fichier PROFORMA (\*.tmf).

## 5.7 COMPORTEMENT NUMÉRIQUE DES COMPOSANTS IMPORTÉS

Bien qu'on puisse s'attendre à un comportement identique des composants dans les deux environnements en régime statique, il faut s'attendre à des différences en régime dynamique, notamment lors de l'utilisation de solveurs d'ordre supérieur à un / à pas variable. Des phénomènes représentés finement dans ce type de simulation peuvent être « perdus » à cause de la contrainte du pas de temps fixe sous TRNSYS. On peut pallier ce problème en utilisant un pas de temps suffisamment petit sous TRNSYS pour obtenir le comportement souhaité (en échange d'un temps de simulation plus important).

Un autre phénomène observé concerne les boucles algébriques (cas où un modèle dépend – directement ou indirectement – d'une ou plusieurs de ses propres sorties). Là encore, le comportement des solveurs diverge, et des mesures correctives peuvent être nécessaires dans la modélisation. Le phénomène existe en principe dans les deux environnements, mais avec une sensibilité différente en fonction de la modélisation, du solveur choisi, etc.

La solution consiste, en générale, à « casser » la boucle en ajoutant des composants qui introduisent une temporisation (e.g. des tuyaux sous TRNSYS ou des « *memory block* » dans MATLAB). Cela s'avère notamment efficace lorsqu'on utilise des petits pas de temps. En revanche, lors qu'on utilise des pas de temps trop importants, cette méthode peut fausser les résultats.

Diverses validations ont été conduites dans le cadre du projet DYNASIMUL :

- Comparaison de composants isolés (contrôleurs, etc.)
- Comparaison de composants isolés avec dérivatives (ballons de stockage, etc.)
- Comparaison de composants utilisant des fichiers externes (bâtiment multi zone type 56, lecteur de fichier météo, etc.)
- Comparaison d'assemblages de modèles comportant des boucles de contrôle

Les résultats étaient identiques ou très proches dans tous les cas étudiés.

## 5.8 LIMITATIONS

Cette première version contient un certain nombre de limitations qui pourraient être levés dans des travaux futurs :

- Utilisation de vecteurs : les modèles Simulink à exporter doivent se limiter à des valeurs simples comme entrées ; il n'est pas possible d'exporter des modèles qui utilisent des vecteurs ou des matrices en entrée. Ce type de modèle doit être d'abord transformé sous Matlab en utilisant des blocks Mux et Demux. On pourrait imaginer d'automatiser cela.
- Utilisation d'autres compilateurs : la version actuelle nécessite Microsoft Visual Studio afin de compiler les composants exportés pour TRNSYS ; il pourrait être

intéressant d'adapter le mécanisme à d'autres compilateurs, notamment le compilateur livré avec Matlab, voire des outils gratuits.

## 5.9 VERSION DE SIMBAD EN COURS DE DÉVELOPPEMENT

Depuis plus d'un an, l'équipe SIMBAD travaille à une nouvelle version de la bibliothèque, développée en C++. A ce jour, une part importante des modèles de SIMBAD ont été repris, corrigés et développés en C++ :



- enveloppe de bâtiment multizone enrichie du calcul des taux de CO2 et d'humidité,
- production de chaleur :
  - pompe à chaleur,
  - chaudière
- distribution :
  - bouteille de découplage,
  - ballon d'eau chaude,
  - tuyau, pompe, tés, vannes à 2 et 3 voies en versions détaillées (dépendant de la pression) et simplifiées (indépendant de la pression)
- émission :
  - convecteurs électriques (modèles unitaire et matriciel),
  - radiateurs,
  - ventilo-convecteurs
- éclairage (modèle matriciel)
- énergies renouvelables :
  - collecteur solaire
  - panneau photovoltaïque
  - éolienne
- composants de communication avec les bancs d'essai :
  - protocole TCP,
  - acquisition de données DAQ,
  - serveurs OPC

### 5.9.1 ARCHITECTURE

La nouvelle version de SIMBAD conserve l'organisation basée sur des blocs-modèles connectables pour représenter un système complexe, et l'enrichit d'un environnement de calcul scientifique adapté : bibliothèque de constantes physiques, méthodes d'interpolation automatique de tableaux de données (abaques), types et fonctions d'algèbre linéaire optimisées, outils de diagnostic et de validation unitaire.

Cet environnement a également été doté d'un système de gestion de simulation en temps et des mêmes méthodes d'intégration numérique à pas de temps fixe que Simulink, ce qui permet de créer des outils métiers basés sur les éléments de la bibliothèque SIMBAD, et s'exécutant indépendamment de Simulink.

La Figure 6 montre un extrait du diagramme de classes de SIMBAD décrivant l'organisation logicielle pour le bloc-modèle du tuyau. L'interface (ITF\_Tube, héritant de la classe abstraite ITF\_Interface), qui est le point d'entrée pour un environnement de simulation dynamique, fournit des méthodes d'appel pour les différentes étapes de calcul :

- Initialisation
  - create : création de l'interface
  - nb\_continuous\_states : renvoie le nombre de variables intégrées dans le temps
  - set\_initial\_continuous\_state : permet de fixer la condition initiale des variables intégrées dans le temps
- Simulation d'un pas de temps
  - outputs : calcul des sorties du bloc-modèle
  - derivatives : calcul des dérivées de variables
- Terminaison
  - destroy : libération de la mémoire

Les entrées/sorties sont traitées par l'interface comme des vecteurs de réels, qui sont ensuite transcrits sous forme de vecteurs SIMBAD pour l'appel au véritable bloc de simulation (BL\_Tube), qui contient le code source du modèle. Les données lues dans l'XML sont stockées par une instance de la classe de données TubeData, et les états continus et dérivés sont gérés par les classes ContinuousStates et StateDerivatives.

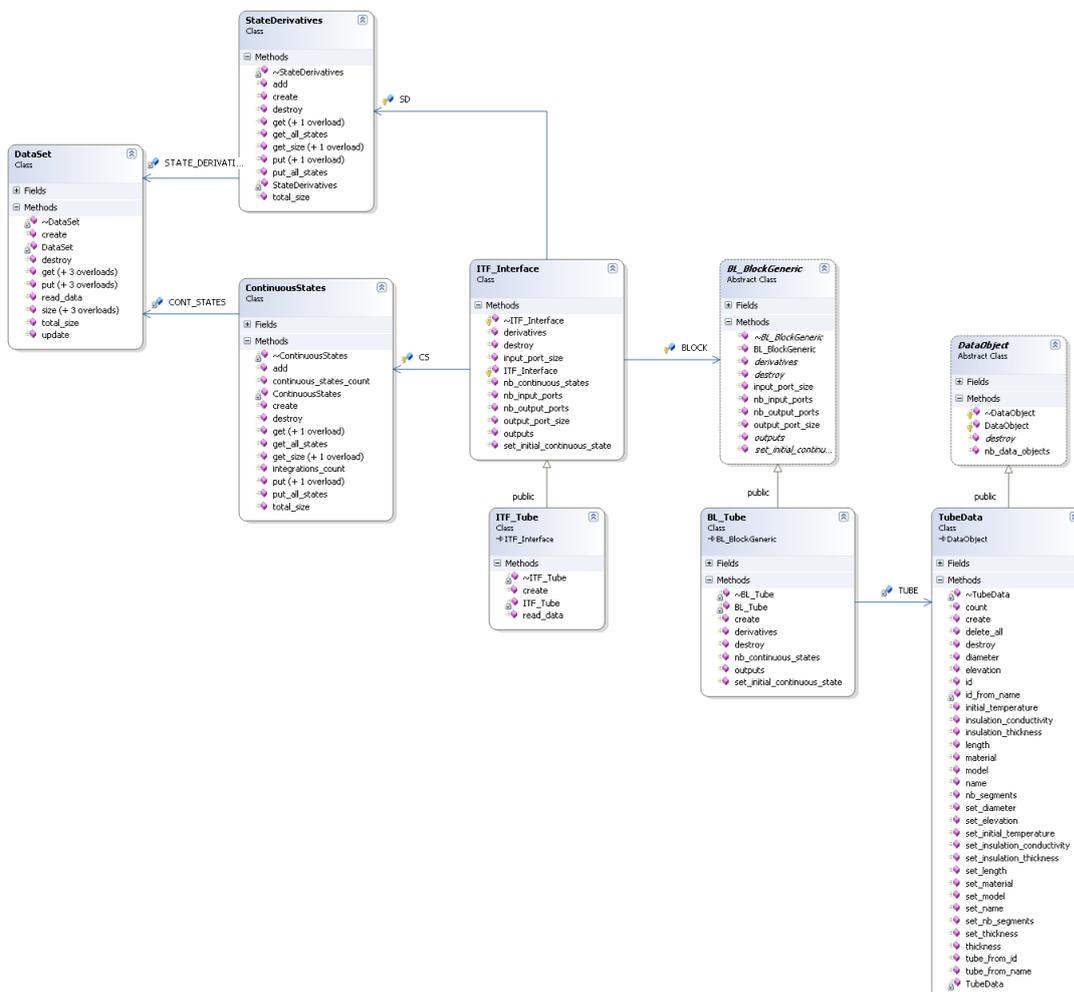


Figure 6: Diagramme de classes pour le bloc-modèle du tuyau.

Cette architecture générique basée sur le langage C++ et sur les concepts de la programmation objet permet donc d'utiliser les éléments de la bibliothèque de modèles SIMBAD dans :

- l'environnement de simulation dédié de SIMBAD (outil métier)
- tout environnement de simulation dynamique pouvant intégrer des blocs personnalisés communiquant avec une bibliothèque :
  - Simulink, de Mathworks
  - Scicos, du consortium Scilab
  - Trnsys, de l'université du Wisconsin

Cette nouvelle architecture a également permis de rassembler l'ensemble de la configuration de l'enveloppe bâtiment et des systèmes, précédemment dispersée dans le fichier texte de description du bâtiment et de nombreux masques de blocs, dans une seule structure de données hiérarchique à la sémantique unifiée.

Les développements en cours et à venir visent à renforcer encore l'aspect générique des blocs-modèles SIMBAD pour faciliter leur interopérabilité et l'inclusion de modules utilisateur provenant d'autres environnements.

### 5.9.2 MODÈLE DE DONNÉES

Le modèle de données utilisé par la nouvelle version de SIMBAD est une structure de données hiérarchique au format XML divisée à ce jour en trois sections : la description de l'enveloppe bâtiment (Building), des systèmes équipant ce bâtiment (Systems), et des fonctions de contrôle-commande (Controls), voir Figure 7.



Figure 7: Vue d'ensemble de la description XML

### 5.9.3 DESCRIPTION DE L'ENVELOPPE BÂTIMENT

La description de l'enveloppe bâtiment se compose de deux sections : les descriptions des types de composants (orientations géographiques, types de murs comme collections de couches de matériaux, types de fenêtres, types de masques), et une description hiérarchique des étages, zones, murs, fenêtres et masques qui reflète celle du bâtiment décrit, voir Figure 8.

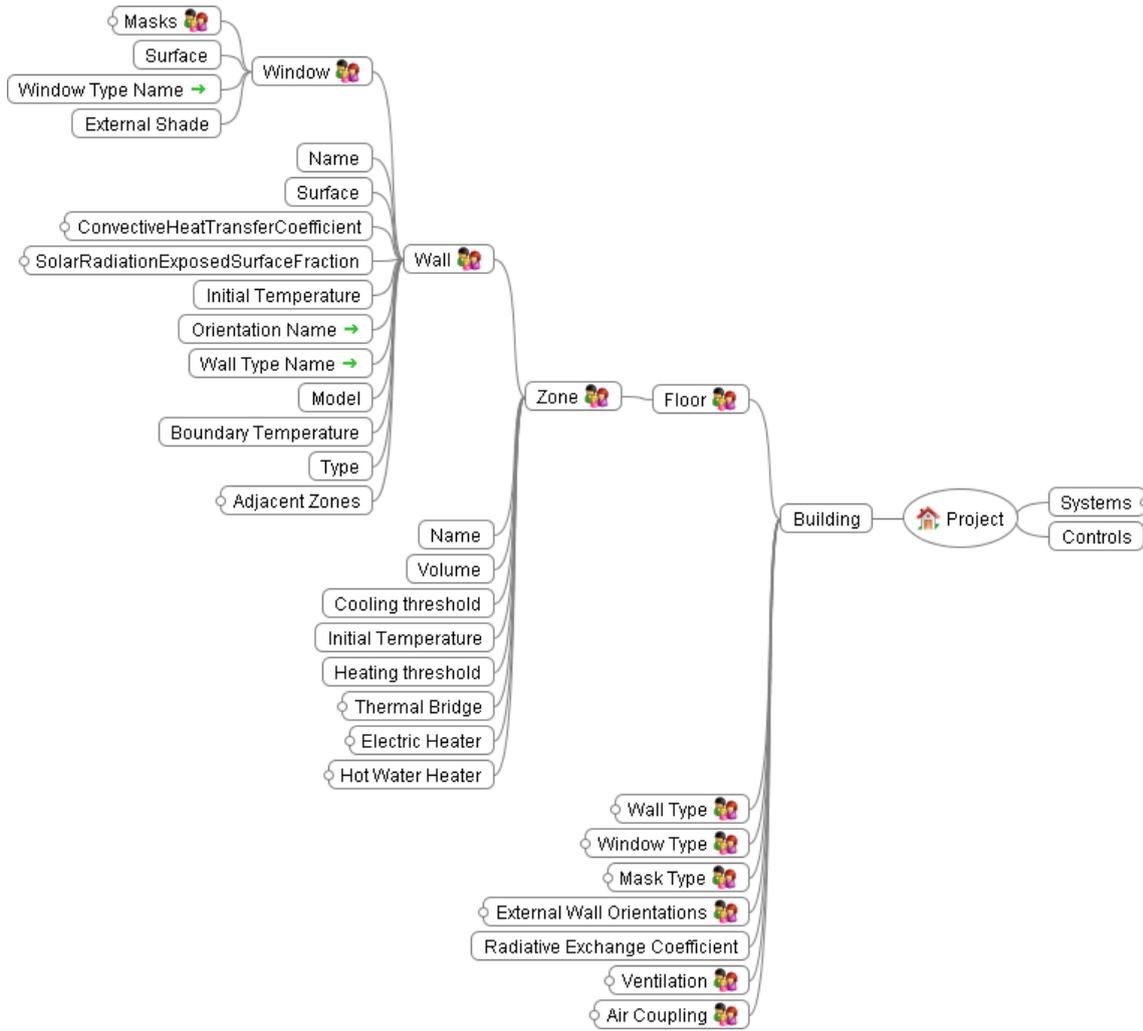


Figure 8: Vue de la section “Building” de la description XML

### 5.9.4 DESCRIPTION DES SYSTÈMES

Cette section du fichier rassemble les paramètres des différents systèmes équipant le bâtiment, voir Figure 9.

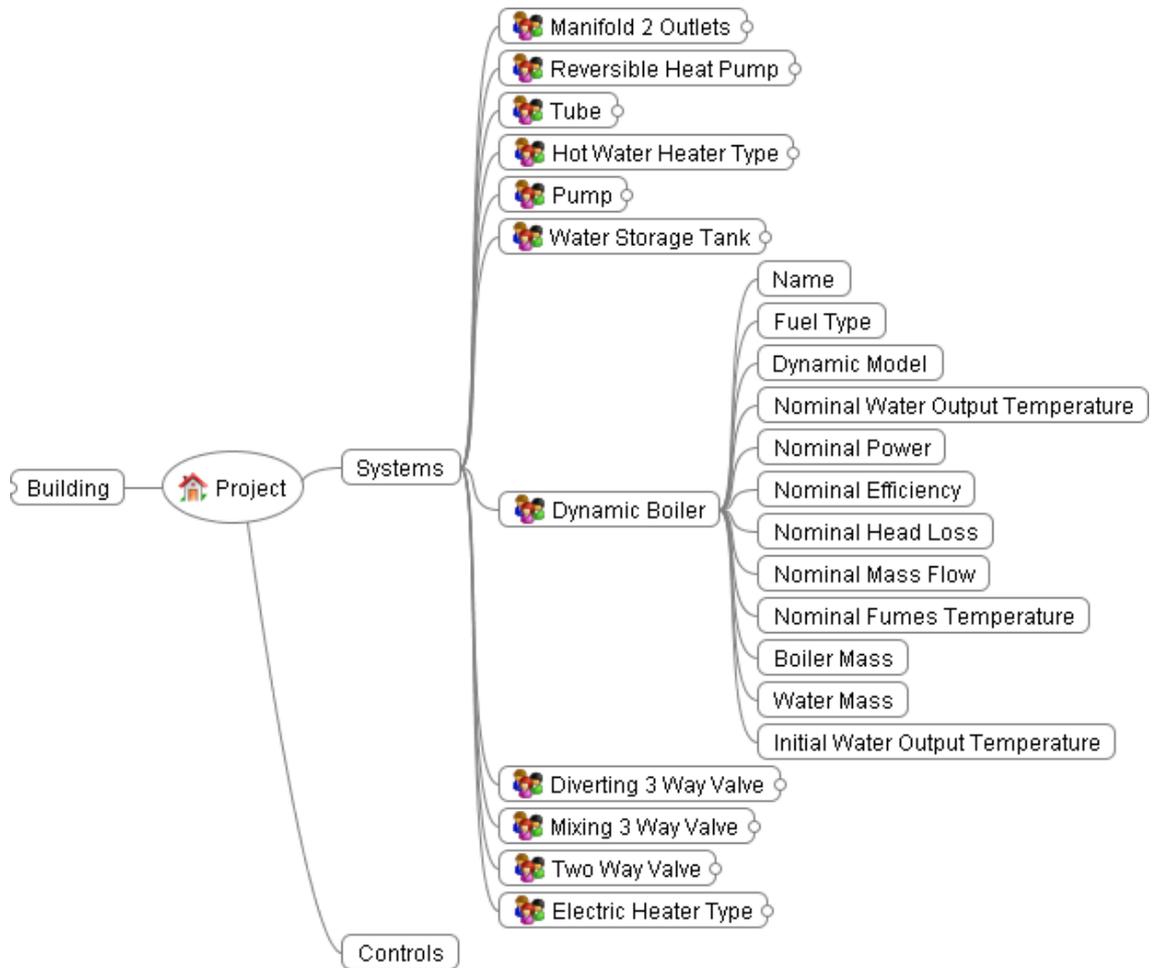


Figure 9: Vue de la section "Systems" de la description XML

### 5.9.5 VALIDATION

Un effort particulier dans le développement de la nouvelle version de SIMBAD concerne la validation des modèles, qu'elle soit unitaire ou de non-régression. Un système automatisé de tests unitaires des blocs-modèles est en cours de conception. Pour chacun des modèles, on vérifie dans Simulink que les sorties calculées par les modèles en S-fonction sont identiques à celles des modèles initiaux écrits en langage Simulink. Si un bug est trouvé, il est corrigé dans les deux versions, de manière à conserver un résultat positif au test.

### **5.9.5.1 Utilisation des nouveaux modèles SIMBAD dans TRNSYS**

#### *5.9.5.1.1 Paramétrage des modèles*

Chaque système est référencé de manière unique dans le fichier de description XML par son nom. Sous Simulink, la configuration du masque du bloc consiste donc à spécifier :

- le chemin du fichier de description XML
- le nom du système

Sous l'environnement TRNSYS, il n'est pas possible de faire passer ainsi des chaînes de caractère à la bibliothèque SIMBAD par l'intermédiaire de l'interface de type. Aussi, afin de pouvoir faire fonctionner le couplage, on dégrade la configuration classique d'un modèle SIMBAD de la manière suivante :

- On fixe le nom du fichier de description XML à 'data.xml', ce qui impose à l'utilisateur de placer le fichier de description dans le répertoire de simulation, et de l'appeler data.xml.
- On n'utilise plus comme nom de système une chaîne de caractères, mais un numéro identifiant du système.

Avec ces adaptations, il est possible de démarrer une simulation d'un modèle SIMBAD, à condition que son nombre de ports d'entrée et de sortie ne dépende pas de ses paramètres de configuration. En effet, le nombre de ports d'entrée et de sortie d'un type TRNSYS est fixé dans son proforma, ce qui empêche son dimensionnement automatique en fonction des paramètres spécifiés dans le fichier de configuration.

#### *5.9.5.1.2 Intégration temporelle*

On a pu mettre en évidence que les seuls schémas d'intégration numérique en temps sont ceux ne nécessitant pas d'évaluation du modèle à des pas de temps intermédiaires. On ne considère donc ici pour l'intégration du TRNSYS que le schéma d'Euler (ordre 1). On valide toutefois le comportement dans Simulink du modèle avec un schéma en temps de Bogacki-Shampine (ordre 3).

#### *5.9.5.1.3 Utilisation du modèle de tuyau SIMBAD dans TRNSYS*

Tout comme les blocs SIMBAD sont utilisés dans Simulink par le biais de leur interface (ITF) appelée par la S-fonction, on utilise dans TRNSYS les blocs SIMBAD par le biais de leur interface appelée par le type. Nous allons présenter le processus effectif d'importation d'un modèle SIMBAD avant d'expliquer comment un type TRNSYS générique permettant cette importation a été réalisé.

#### *5.9.5.1.4 Processus d'importation d'un modèle SIMBAD*

A ce jour, grâce à l'architecture de la nouvelle version de SIMBAD, il est possible de créer un type TRNSYS générique qui peut être utilisé, à peu de changements près, pour importer de SIMBAD tous les systèmes dont le nombre et la taille des entrées et sorties est fixe et non déterminé par un paramètre. Le proforma du type TRNSYS doit être écrit manuellement, car contrairement à Simulink, les informations du nombre de ports et de leurs tailles n'est pas uniquement importée de la bibliothèque appelée. Ajoutons qu'à ce jour, la documentation de TRNSYS ne précise pas la syntaxe des fichiers de proforma, ce qui nous empêche de les générer automatiquement en utilisant les fonctions de SIMBAD.

## 6 Bibliographie

1. Zhai, Z., Q. Chen, P. Haves, and J.H. Klems, On approaches to couple energy simulation and computational fluid dynamics programs. *Building and Environment*, 2002. 37(8-9): p. 857-864.
2. Mora, L., Prédiction des performances thermo-aérauliques des bâtiments par association de modèle de différents niveaux de finesse au sein d'un environnement orienté objet, in LEPTAB. 2003, Université de La Rochelle: La Rochelle. p. 196.
3. Chen, Q. and J. Van Der Kooi, ACCURACY - a computer program for combined problems of energy analysis, indoor airflow and air quality. *ASHRAE Transactions*, 1988. 94 (2): p. 196-214.
4. Clarke, J.A., W.M. Dempster, and C.O.R. Negrao. The implementation of a computational fluid dynamics algorithm within the ESP-r system. in *Building Simulation'95*. 1995. Madison, USA: International Building Performance Simulation Association.
5. Negrao, C.O.R., Conflation of computational fluid dynamics and building thermal simulation. 1995, Strathclyde: Glasgow, UK.
6. Nielsen, P.V. and T. Tryggvason. Computational fluid dynamics and building energy performance simulation. in *Room-vent'98*. 1998. Stockholm, Sweden.
7. Srebic, J., Q. Chen, and L.G. Glicksman, A coupled airflow-and-energy simulation program for indoor thermal environmental studies. *ASHRAE Transactions*, 2000. 106(1): p. 465-476.
8. Beausoleil-Morrison, I., The adaptive coupling of heat and air flow modelling within dynamic whole-building simulation. 2000, Strathclyde: Glasgow UK. p. 229.
9. Zhai, Z. and Q.Y. Chen, Solution characters of iterative coupling between energy simulation and CFD programs. *Energy and Buildings*, 2003. 35(5): p. 493-505.

ANSI/ASHRAE Standard 140-2001, Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA. See Annex B5.

Brasselet J.-P., Domblides J.-P. et Marchio D. (1993), Banc d'essais comparatif de progiciels de calculs de charges hygrothermiques, rapport d'étude AICVF-AITF-ARMINES pour l'AFME et EDF

CEN (2003) prEN-ISO 13791, Performance thermique des bâtiments –Calcul des températures intérieures en été d'un local sans dispositif de refroidissement – critères généraux et méthodes de validation

CEN (2003) prEN-ISO 13792, Performance thermique des bâtiments – Températures intérieures en été d'un local non climatisé – Méthodes de calcul simplifiées

Judkoff, R. and Neymark, J.(1995), International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method, NREL/TP-472-6231, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO. Download address: <http://www.nrel.gov/docs/legosti/old/6231.pdf> (PDF 13.8 MB)

Peuportier B. (1993) « COMFIE, Logiciel pour l'architecture bioclimatique, quelques applications concernant les vérandas », Journée technique GENEC (CEA), Cadarache

Wald L. et al (2002), SoDa: a project for the integration and exploitation of networked solar radiation databases, Environmental Communication in the Information Society, International Society for Environmental Protection, Vienna, Austria.

Allard F(Ed) (1998). Natural ventilation in building, James & James Ltd, London, 356 p.

Dautin S. (1997), Réduction de modèles thermiques de bâtiments : Amélioration des techniques par modélisation des sollicitations météorologiques, Thèse de doctorat : Université de Poitiers, 147 p.

Dehaese R,(1988). Energétique des bâtiments. Tome 2 : Calcul des enveloppes, Paris : puc édition, 353 p,

Duffie J. and Beckman W.A (1980). Solar engineering of thermal processes. New-York: John Wiley & Sons, Inc., 762 p.

El Mankibi, M (2003), Développement et évaluation de stratégies de gestion de la ventilation hybride", Thèse de doctorat , Institut National des Sciences Appliquées, Lyon

El Mankibi M., Michel,P. and Guarracino, G. (2001). Control Strategies for hybrid ventilation development of an experimental device. Proceedings of the 22nd Annual AIVC Conference, Bath (UK), 11-14 September 2001.

Moujalled B (2007). Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés. Thèse de doctorat , Institut National des Sciences Appliquées, Lyon, 330 p.

Pformmer P. (1995), Thermal modelling of highly glazed spaces. Ph-D: De Montfort University, Leicester, 229 p.

Salem T (2007). Intégration des composants solaires thermiques actifs dans la structure bâtie. Thèse de doctorat . : Ecole Nationale des Travaux Public de l'Etat, 397 p.

Voeltzel A., Carrié F.R. et Guarracino G. (2001), Thermal and ventilation modelling of large highly-glazed spaces, Energy and Buildings, Vol 33, n° 2, p 121-132.



## **DYNASIMUL**

### **Contribution au Rapport Final**

#### **-Volet 2-**

Coordinateur : LOCIE INES-CNRS

Rédacteurs : M. ALBARIC (CEA)

A. GUIAVARCH (CEP)

G. RUSAOUEN (CETHIL)

Juillet 2010

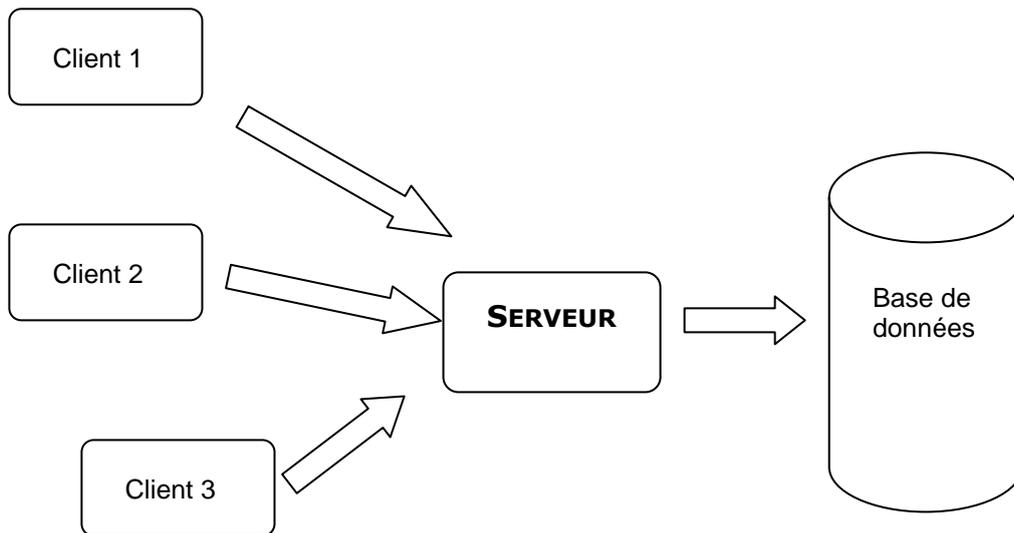
# Volet 2 : Contenu de la base de données pour les parties propriétés thermo-physiques et caractérisation des modèles

## 1 Sommaire du volet 2

<i>Volet 2 : Contenu de la base de données pour les parties propriétés thermo-physiques et caractérisation des modèles</i> .....	<b>76</b>
<b>1 Sommaire du volet 2</b> .....	<b>76</b>
<b>2 Introduction</b> .....	<b>76</b>
Serveur .....	77
<b>3 Propriétés thermo-physiques</b> .....	<b>77</b>
3.1 Définition-Méthodologie .....	77
3.2 Organisation .....	78
3.3 Visualisation des liaisons .....	82
<b>4 Caractérisation des modèles de composants de bâtiments</b> .....	<b>84</b>
4.1 Définition-Méthodologie .....	84
4.2 Organisation .....	84
4.3 Visualisation des liaisons .....	93
<b>5 Intégration de l'approche environnementale</b> .....	<b>96</b>
5.1 Types d'indicateurs environnementaux .....	96
5.2 Impacts environnementaux d'un élément de l'analyse du cycle de vie du bâtiment .....	99
<b>6 Utilisation de la base de données</b> .....	<b>101</b>
6.1 Présentation générale .....	101
6.2 Ajouter un modèle dans la base de données .....	102
6.3 modification d'un modèle existant .....	108
6.4 recherche d'un modèle .....	110
<b>7 Perspective et avenir</b> .....	<b>114</b>

## 2 Introduction

Pour pouvoir réaliser un stockage cohérent des informations du projet Dynasimul, nous avons décidé de mettre en place une base de données décrivant l'ensemble des données requises par le projet. Le modèle général de fonctionnement est du type client-serveur :



**Figure 10 : Modèle général de fonctionnement de la base de données**

Pour cela il faut concevoir un modèle de ces données. Plusieurs champs, relativement autonomes au sens de l'organisation des données, ont été identifiés :

- Données correspondant aux propriétés thermo-physiques
- Données correspondant à la caractérisation des modèles de composants de bâtiments
- Données environnementales du bâtiment
- Données décrivant la géométrie du bâtiment
- Données décrivant les simulations et leurs résultats ou encore des données expérimentales de références

Nous allons donc traiter progressivement ces différents points en ayant en tête que l'objectif est d'organiser les données pour éviter les redondances et de garantir que le système pourra répondre à des questions générales non déterminées à l'avance (par exemple : quels sont les modèles qui sont incompatibles entre eux ? ou encore quelles sont les valeurs de conductivité des bétons disponibles ?)

## **3 Propriétés thermo-physiques**

### **3.1 DÉFINITION-MÉTHODOLOGIE**

Par propriétés thermo-physiques nous entendons les propriétés nécessaires à la description des matériaux et de leur comportement.

Les idées retenues sont les suivantes :

Un matériau a un nom (béton, plâtre...) et des modèles de comportement (solide, liquide, gaz parfait, conducteur électrique...). Un modèle de comportement a un nom et comprend des propriétés physiques (masse volumique, conductivité thermique, température...) à prendre en compte. Il peut être composé à l'aide d'autres modèles de comportement (par exemple gaz

Volet 2 : Contenu de la base de données pour les parties propriétés thermo-physiques et caractérisation des modèles

laminaire ou gaz turbulent). Certains modèles de comportements sont incompatibles entre eux. Une propriété physique a un nom et peut avoir plusieurs unités (par exemple °C, K ou encore °F pour la température). Il existe une formule de transformation des valeurs d'une unité dans une autre pour une propriété physique (par exemple pour passer de °C à K on fait  $Valeur^{\circ C} = Valeur^K - 273,15$ ). Les unités sont regroupées en système d'unités (par exemple le Système International ou le système d'unités anglo-saxon).

Ces premières idées concernent les propriétés physiques des matériaux dans leur généralité. Elles font apparaître la nécessité de gérer les unités et les systèmes d'unités. Cet aspect apparaîtra bien sûr dans d'autres parties du modèle général, par exemple dans la description de la caractérisation des modèles de composants de bâtiments.

Un problème plus délicat est la description des valeurs possibles de ces propriétés thermo-physiques. En effet, cette description doit être satisfaisante pour l'ensemble des acteurs du projet Dynasimul. Après réunion avec les acteurs du volet 3 il est apparu qu'il faudra inclure 3 approches majeures : Déterministe, Polytopique, Probabiliste

A ce jour, seule la partie déterministe a été traitée. Les autres parties nécessiteront une concertation approfondie avec les acteurs du volet 3 du projet.

Pour ce qui est de l'approche déterministe nous avons pris en compte les idées suivantes :

Il existe des valeurs particulières de certaines propriétés physiques éventuellement pour certains modèles et certains matériaux. Ces valeurs peuvent être fonction des valeurs d'autres propriétés physiques (par exemple la conductivité thermique du cuivre solide dépend de sa température). Ces valeurs sont associées à une origine (auteur des mesures, date ou encore référence d'une publication ou livre). Si des valeurs sont données pour une propriété physique elles le sont obligatoirement avec une unité.

### 3.2 ORGANISATION

Le processus d'organisation a fait apparaître les données suivantes sous forme de table :

#### TABLE COMPORTS

Objet : Description des Comportements des Matériaux

Données :

Nom	Identifiant	Type	Fonction
code	*	entier 64 bits auto-incrément non nul	Sert à identifier le comportement
comportement		chaîne de caractères(150) non nul	Son nom

#### TABLE DEPENDANCES\_VP

Objet : Description des Dépendances entre Valeurs Particulières

Données :

Nom	Identifiant	Type	Fonction
code	*	entier 64 bits auto-incrément non nul	Sert à identifier la valeur
code_source	*	entier 64 bits auto-incrément non nul	Sert à identifier la valeur dont dépend la précédente

### TABLE MATERIAUX

Objet : Description des Matériaux

Données :

Nom	Identifiant	Type	Fonction
code	*	entier 64 bits auto-incrément non nul	Sert à identifier le matériau
matériau		chaîne de caractères(150) non nul	Son nom

### TABLE PROPRIETES

Objet : Description des Propriétés Physiques

Données :

Nom	Identifiant	Type	Fonction
code	*	entier 64 bits auto-incrément non nul	Sert à identifier la propriété
propriété		chaîne de caractères(150) non nul	Son nom
descriptif		chaîne de caractères(255)	Description détaillée de la propriété

### TABLE PROPRIETES\_VP

Objet : Description des Valeurs particulières de certaines Propriétés.

Données :

Nom	Identifiant	Type	Fonction
code	*	entier 64 bits auto-incrément non nul	Sert à identifier le matériau
code_unite		entier 64 bits non nul	Le code de son unité
code_mater		entier 64 bits non nul	Le code de son matériau

Volet 2 : Contenu de la base de données pour les parties propriétés thermo-physiques et caractérisation des modèles

code_propri		entier 64 bits non nul	Le code de la propriété concernée
descriptif		chaîne de caractères(250)	Description de son origine
valeur		sql_variant non nul	Sa valeur sous une forme générique qui permet d'avoir aussi bien des entiers que des réels.
genre		chaîne de caractères(20) non nul	Une caractérisation de son type informatique classique : entier, réel
précis		chaîne de caractères(10) non nul	Une caractérisation de sa précision informatique classique

### TABLE SYSTEMES

Objet : description des Systèmes d'Unités.

Données :

Nom	Identifiant	Type	Fonction
code	*	entier 64 bits auto-incrément non nul	Sert à identifier le système
systeme		chaîne de caractères(150) non nul	Son nom

### TABLE UNITES

Objet : description des Unités des données.

Données :

Nom	Identifiant	Type	Fonction
code	*	entier 64 bits auto-incrément non nul	Sert à identifier l'unité
unite		chaîne de caractères(150) non nul	Son nom
abreviation		chaîne de caractères(20)	Son abréviation

### TABLE CATEGORIES

Objet : description des Catégories des Modèles

Données :

Nom	Identifiant	Type	Fonction
-----	-------------	------	----------

code	*	entier 64 bits auto-incrément non nul	Sert à identifier les catégories de matériau
categorie		chaîne de caractères(150) non nul	Son nom

A partir d'ici nous trouvons les tables qui assurent les liaisons entre les tables précédentes.

#### **TABLE UNITES\_PROPRIETES**

Objet : description des liaisons entre les Unites et les Propriétés physiques.

Données :

Nom	Identifiant	Type	Fonction
code_propri	*	entier 64 bits non nul	Sert à identifier la propriété
code_unite	*	entier 64 bits non nul	Sert à identifier l'unité

#### **TABLE UNITES\_SYSTEMES**

Objet : description des liaisons entre les Unités et les Systèmes d'unités.

Données :

Nom	Identifiant	Type	Fonction
code_unite	*	entier 64 bits non nul	Sert à identifier l'unité
code_systeme	*	entier 64 bits non nul	Sert à identifier le système d'unité

#### **TABLE CATEGORIES\_MATERIAUX**

Objet : description des liaisons entre les Catégories de matériaux et les Matériaux.

Données :

Nom	Identifiant	Type	Fonction
code_mate	*	entier 64 bits non nul	Sert à identifier le matériau
code_categ	*	entier 64 bits non nul	Sert à identifier la catégorie

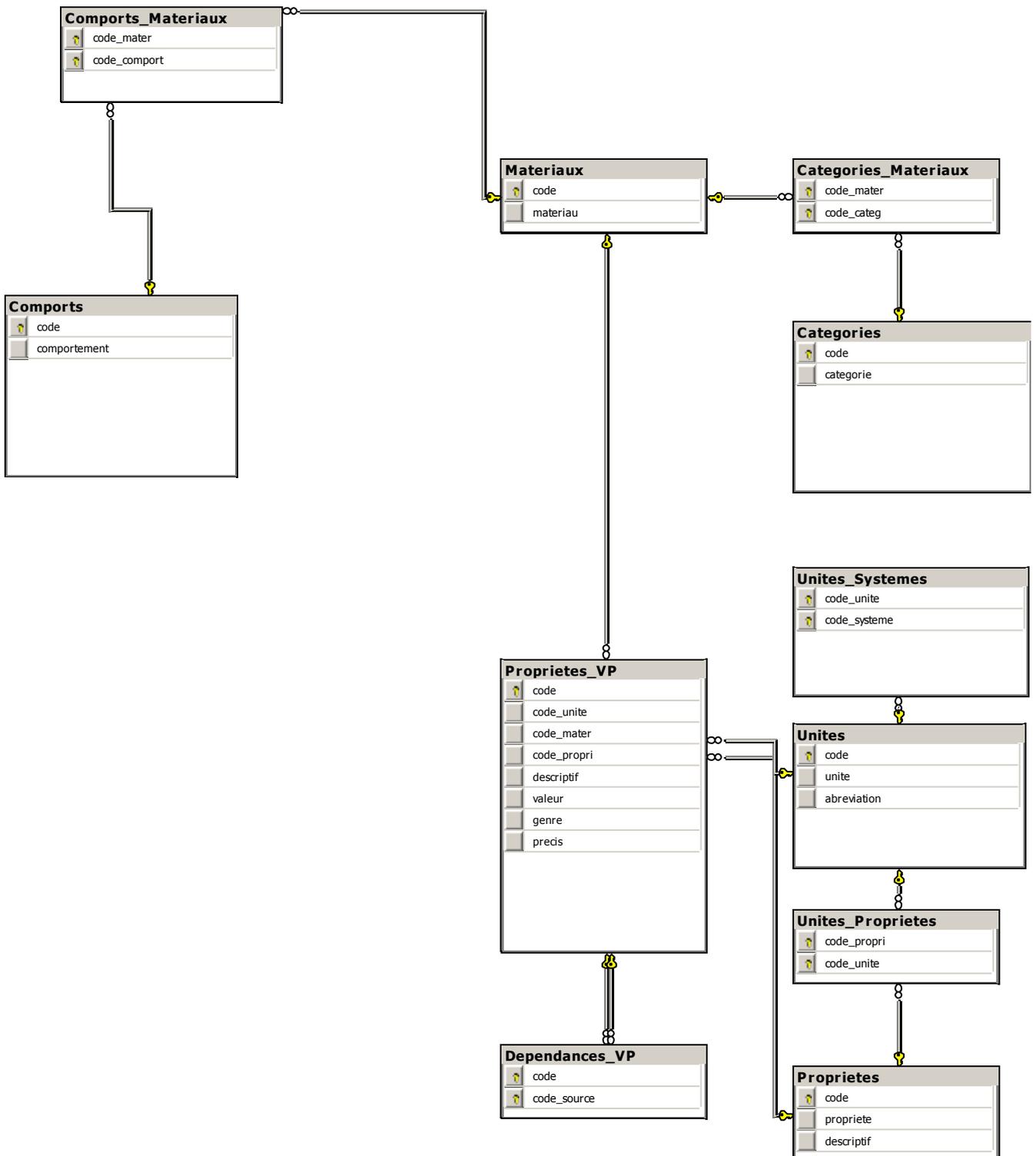
#### **TABLE COMPORTS\_MATERIAUX**

Objet : description des Comportements des Matériaux

Données :

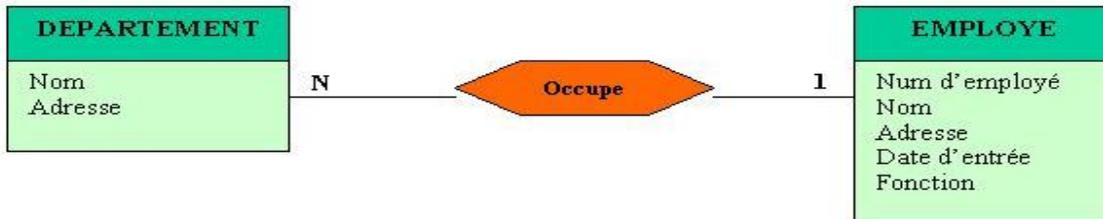
Nom	Identifiant	Type	Fonction
code_mate	*	entier 64 bits non nul	Sert à identifier le matériau
code_comport	*	entier 64 bits non nul	Sert à identifier le comportement

### 3.3 VISUALISATION DES LIAISONS



La description complète des liens entre les relations nécessite la définition précise de la participation des occurrences à ces liens. Plus précisément, la cardinalité est le *nombre de participation d'une occurrence de relation à un lien*.

*Les cardinalités les plus classiques sont du type ‘ un à plusieurs’ notée 1-N ou 1-∞. Par exemple, un département peut avoir plusieurs employés qui réalisent différentes fonctions mais chaque employé ne fait partie que d’un seul département.*



## 4 Caractérisation des modèles de composants de bâtiments

### 4.1 DÉFINITION-MÉTHODOLOGIE

La description des modèles permet d'intégrer des modèles « existants » comme de nouveaux modèles. D'autre part, il s'agit uniquement de décrire les modèles, leur mise en place informatique sera traitée ultérieurement.

L'approche utilisée ici consiste à partir des fiches pro-forma utilisées dans les logiciels existants pour décrire les modèles. Après concertation, une fiche type a été retenue qui couvre les formulations des fiches des divers logiciels. Un exemple de ces fiches se trouve en Annexe du document.

Cette fiche a ensuite été analysée et décomposée pour permettre de lui donner une organisation informatique satisfaisante. Des simplifications ont également été intégrées. Elles correspondent à des constatations faites lors de l'utilisation de ces fiches. Ces simplifications ont été approuvées par les divers intervenants à 2 réunions.

Après analyse de la mise en place informatique, il a également été décidé d'intégrer des liaisons « url » vers des pages « html » externes pour décrire de façon souple les variables ou encore les validations des modèles.

### 4.2 ORGANISATION

Le processus d'organisation a fait apparaître les données suivantes sous forme de table :

#### TABLE ACRONYMES

Objet : Description des acronymes des Laboratoires

Données :

Nom	Identifiant	Type	Fonction
code	*	entier 64 bits auto-incrément non nul	Sert à identifier le laboratoire
acronyme		chaîne de caractères(50) non nul	L'acronyme lui-même

#### TABLE CATEGORIES

Objet : Description des catégories des Modèles

Données :

Nom	Identifiant	Type	Fonction
code	*	entier 64 bits auto-incrément non nul	Sert à identifier la catégorie
categorie		chaîne de caractères(150) non nul	Le nom de la catégorie

### TABLE FAMILLES

Objet : description des Familles des Modèles

Données :

Nom	Identifiant	Type	Fonction
code	*	entier 64 bits auto-incrément non nul	Sert à identifier la famille
famille		chaîne de caractères(150) non nul	Le nom de la famille

Contrainte : chaque modèle fera partie d'au moins une famille (qui se limitera éventuellement à lui seul) de façon à pouvoir imposer simplement des règles de compatibilité entre famille

### TABLE HYPOTHESES

Objet : description des liaisons entre les Hypothèses et des Modèles.

Données :

Nom	Identifiant	Type	Fonction
code	*	entier 64 bits auto-incrément non nul	Sert à identifier l'hypothèse
hypothese		chaîne de caractères(255) non nul	Description de l'hypothèse
code_mode	*	entier 64 bits non nul	Sert à identifier le modèle concerné

### TABLE INTERVALLES

Objet : description des Intervalles des valeurs

Données :

Nom	Identifiant	Type	Fonction
code	*	entier 64 bits auto-incrément non nul	Sert à identifier l'intervalle
intervalle		chaîne de caractères(50) non nul	Description de l'intervalle
valeur1		sql_variant non nul	1 <sup>ière</sup> borne sous un type générique
valeur2		sql_variant non nul	2 <sup>ième</sup> borne sous un type générique
bord1		binary(1) non nul	1 <sup>ière</sup> borne incluse ou non
bord2		binary(1) non nul	2 <sup>ième</sup> borne incluse ou non
zone_oblig		chaîne de caractères(50)	Indique si la zone est indicative ou obligatoire
genre		chaîne de caractères(10) non nul	Une caractérisation de son type informatique classique : entier, réel
precis		chaîne de caractères(10) non nul	Une caractérisation de sa précision informatique classique

### TABLE LABORATOIRES

Objet : description des Laboratoires

Données :

Nom	Identifiant	Type	Fonction
code	*	entier 64 bits auto-incrément non nul	Sert à identifier le laboratoire
Laboratoire		chaîne de caractères(150) non nul	Nom du laboratoire
adresse		chaîne de caractères(150)	Son adresse
cp		chaîne de caractères(5)	Code postal
ville		chaîne de caractères(100)	Ville
pays		chaîne de caractères(50)	Le pays

### TABLE MODELES

Objet : description des Modèles

Données :

Nom	Identifiant	Type	Fonction
code	*	entier 64 bits auto-incrément non nul	Sert à identifier le modèle
modele		chaîne de caractères(50) non nul	Nom du modèle
url_def		chaîne de caractères(500) non nul	Adresse de la page html le décrivant de façon générale
date_creat		chaîne de caractères(5)	Code postal
date_modif		chaîne de caractères(100)	Ville
pays		chaîne de caractères(50)	Le pays
url_form		chaîne de caractères(500) non nul	Adresse de la page html décrivant sa formulation
url_desc		chaîne de caractères(500) non nul	Adresse de la page html le décrivant de façon détaillée

### TABLE PERSONNES

Objet : description des Personnes

Données :

Nom	Identifiant	Type	Fonction
code	*	entier 64 bits auto-incrément non nul	Sert à identifier la personne
nom		chaîne de caractères(100) non nul	Nom de la personne
prenom		chaîne de caractères(100)	Prénom

### TABLE PHENOMENES

Objet : description des Phénomènes Physiques pris en compte

Données :

Nom	Identifiant	Type	Fonction
code	*	entier 64 bits auto-incrément non nul	Sert à identifier le phénomène
phenomene		chaîne de caractères(255) non nul	Description du phénomène

Volet 2 : Contenu de la base de données pour les parties propriétés thermo-physiques et caractérisation des modèles

### TABLE PUBLIS

Objet : description des Publications.

Données :

Nom	Identifiant	Type	Fonction
code	*	entier 64 bits auto-incrément non nul	Sert à identifier la publication
titre		chaîne de caractères(255) non nul	Son titre
ref		chaîne de caractères(50) non nul	La référence : Numerical Heat Transfer,.....
volume		chaîne de caractères(50) non nul	Le volume
annee		chaîne de caractères(4) non nul	L'année
genre		chaîne de caractères(50) non nul	Son genre : journal, colloque...

### TABLE REGLES

Objet : description des Règles de cohérence entre les Modèles

Données :

Nom	Identifiant	Type	Fonction
code	*	entier 64 bits auto-incrément non nul	Sert à identifier la règle
regle		chaîne de caractères(50) non nul	Description de la règle de cohérence

### TABLE VALIDATIONS

Objet : description des Validations des Modèles

Données :

Nom	Identifiant	Type	Fonction
code	*	entier 64 bits auto-incrément non nul	Sert à identifier la validation
code_mode		entier 64 bits non nul	Sert à identifier le modèle concerné
url		chaîne de caractères(500)	Adresse de la page html décrivant la validation

### TABLE VARIABLES

Objet : description des Variables des Modèles.

Données :

Nom	Identifiant	Type	Fonction
code	*	entier 64 bits auto-incrément non nul	Sert à identifier une variable de modèle
nom		chaîne de caractères(50) non nul	Son nom
url_def		chaîne de caractères(500) non nul	Adresse de la page html décrivant la variable
genre		chaîne de caractères(20)	Une caractérisation de son type informatique classique : entier, réel
precis		chaîne de caractères(10)	Une caractérisation de sa précision informatique classique
Valeur_def		sql_variant	Valeur par défaut sous une forme générique
style		chaîne de caractères(1)	Indique son utilisation pour le modèle : <i>entrée, sortie...</i>
code_unite		entier 64 bits non nul	L'unité associée à cette variable

*A partir d'ici nous trouvons les tables qui assurent les liaisons entre les tables précédentes.*

### TABLE MODELES\_UTILISES

Objet : description des Modèles utilisés par d'autres Modèles

Données :

Nom	Identifiant	Type	Fonction
code_mode	*	entier 64 bits non nul	Sert à identifier le modèle qui utilise
code_mode_ut	*	entier 64 bits non nul	Sert à identifier le modèle qui est utilisé

Volet 2 : Contenu de la base de données pour les parties propriétés thermo-physiques et caractérisation des modèles

### TABLE AUTEURS\_MODELES

Objet : description des Auteurs des Modèles

Données :

Nom	Identifiant	Type	Fonction
code_mode	*	entier 64 bits non nul	Sert à identifier le modèle
code_pers	*	entier 64 bits non nul	Sert à identifier l'auteur

### TABLE AUTEURS\_PUBLIS

Objet : description des Auteurs des Publications

Données :

Nom	Identifiant	Type	Fonction
code_pers	*	entier 64 bits non nul	Sert à identifier la personne
code_publi	*	entier 64 bits non nul	Sert à identifier la publication
rang		entier 64 bits non nul	Rang de la personne pour cette publication

### TABLE HISTORIQUES\_MODELES

Objet : description des Historiques des Modèles

Données :

Nom	Identifiant	Type	Fonction
code_vpr	*	entier 64 bits non nul	Sert à identifier la version précédente
code_vps	*	entier 64 bits non nul	Sert à identifier la version suivante
date_crea		datetime non nul	Date de génération de la nouvelle version

### TABLE FAMILLES\_MODELES

Objet : description des liens entre Familles et Modèles

Données :

Nom	Identifiant	Type	Fonction
code_fam	*	entier 64 bits non nul	Sert à identifier la famille
code_mode	*	entier 64 bits non nul	Sert à identifier le modèle

### TABLE LABOS\_ACROS

Objet : description des Acronymes des Laboratoires.

Données :

Nom	Identifiant	Type	Fonction
code_labo	*	entier 64 bits non nul	Sert à identifier le laboratoire
code_acro	*	entier 64 bits non nul	Sert à identifier l'acronyme

### TABLE LABOS\_PERSONNES

Objet : description des liaisons entre les Laboratoires et les Personnes.

Données :

Nom	Identifiant	Type	Fonction
code_labo	*	entier 64 bits non nul	Sert à identifier le laboratoire
code_pers	*	entier 64 bits non nul	Sert à identifier la personne

### TABLE REDACTEURS\_MODELES

Objet : description des liaisons entre les Rédacteurs et les Modèles.

Données :

Nom	Identifiant	Type	Fonction
code_mode	*	entier 64 bits non nul	Sert à identifier le modèle
code_pers	*	entier 64 bits non nul	Sert à identifier la personne

### TABLE REGLES\_FAMILLES

Objet : description des liaisons entre les Règles et les Familles des Modèles.

Données :

Nom	Identifiant	Type	Fonction
code_reg	*	entier 64 bits non nul	Sert à identifier la règle
code_fam	*	entier 64 bits non nul	Sert à identifier la famille

**TABLE MODELES\_PHENOMENES**

Objet : description des liaisons entre les Modèles et les Phénomènes.

Données :

Nom	Identifiant	Type	Fonction
code_mode	*	entier 64 bits non nul	Sert à identifier le modèle
code_pheno	*	entier 64 bits non nul	Sert à identifier le phénomène pris en compte

**TABLE MODELES\_INTERVALLES\_VARIABLES**

Objet : description des liaisons entre les Modèles, les Intervalles et les Variables.

Données :

Nom	Identifiant	Type	Fonction
code_mode	*	entier 64 bits non nul	Sert à identifier le modèle
code_inter	*	entier 64 bits non nul	Sert à identifier l'intervalle
code_varia	*	entier 64 bits non nul	Sert à identifier la variable

**TABLE VARIABLES\_MODELES**

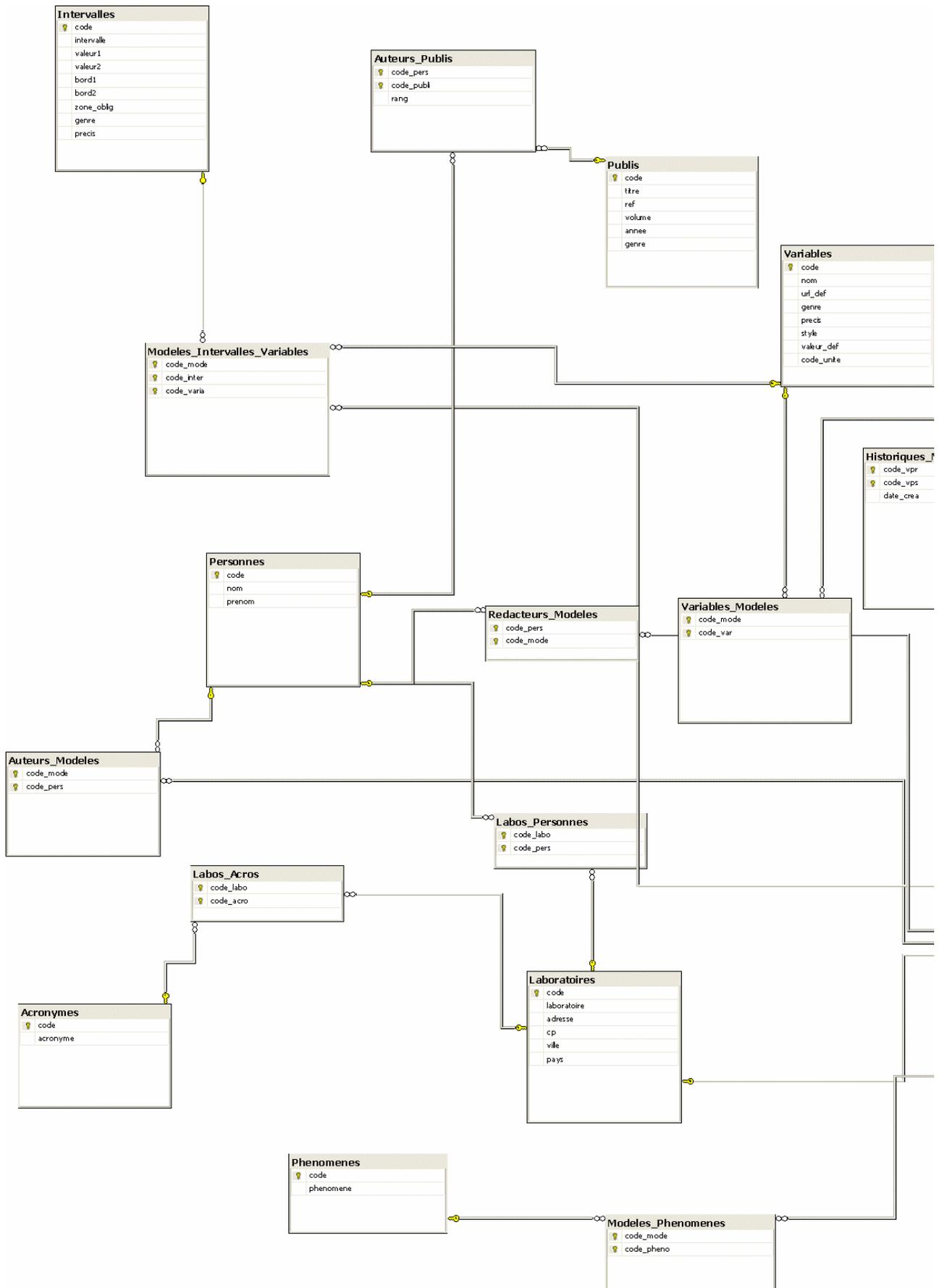
Objet : description des Variables d'un Modèle

Données :

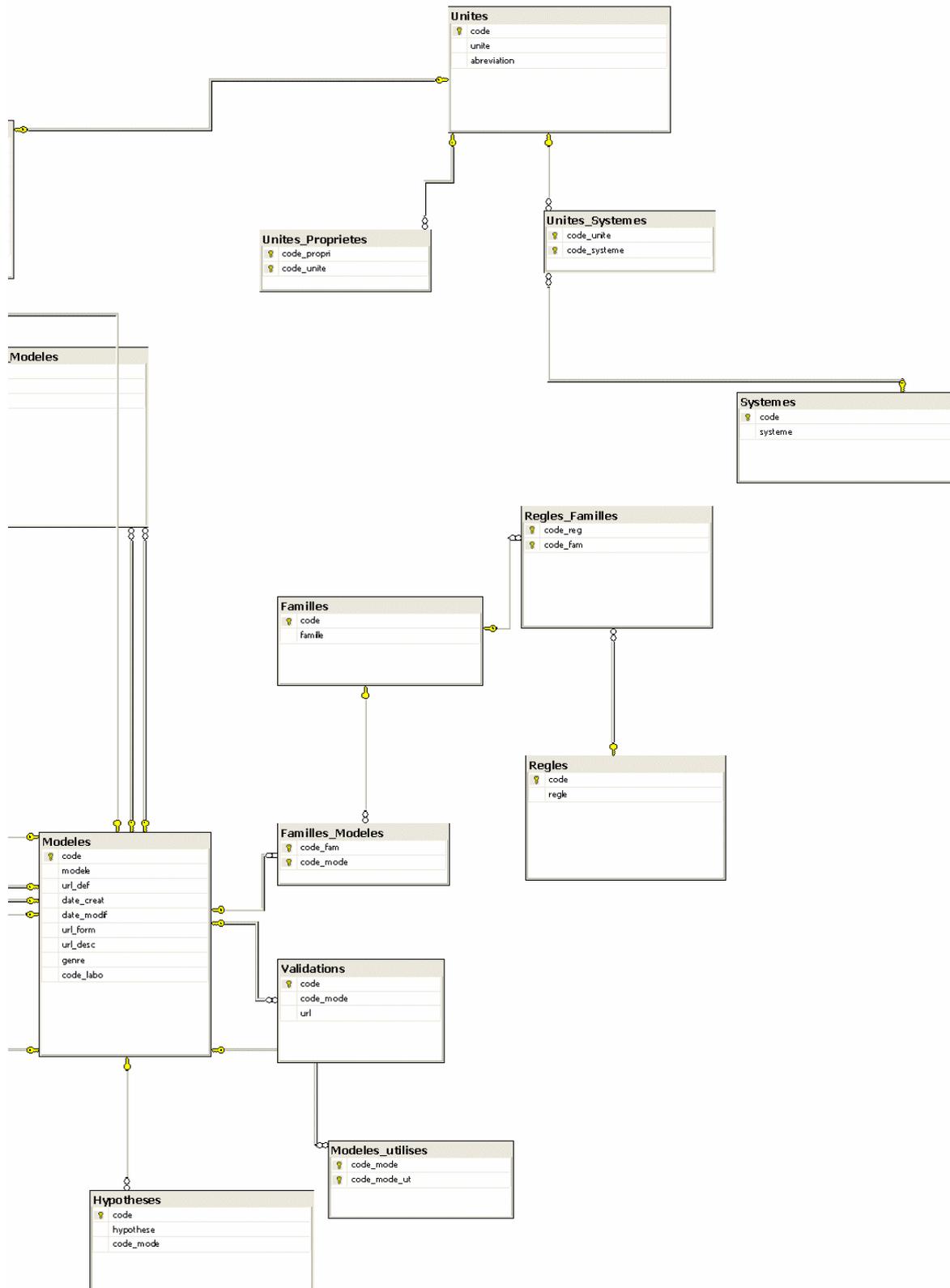
Nom	Identifiant	Type	Fonction
code_mode	*	entier 64 bits non nul	Sert à identifier le modèle
code_varia	*	entier 64 bits non nul	Sert à identifier la variable

### **4.3 VISUALISATION DES LIAISONS**

Volet 2 : Contenu de la base de données pour les parties propriétés thermo-physiques et caractérisation des modèles



4 Caractérisation des modèles de composants de bâtiments  
4.3 Visualisation des liaisons



## 5 Intégration de l'approche environnementale

L'approche adoptée consiste à intégrer dans la structure de classes d'objet constituant la base de données la possibilité de relier la structure du bâtiment et les résultats de simulation énergétiques à des impacts environnementaux établis par analyse de cycle de vie. Ce complément à la base de données peut s'effectuer par l'intermédiaire de deux classes d'objet :

- indicateurs environnementaux
- impacts environnementaux d'un élément du bâtiment

Comme mentionné dans le premier rapport, nous limitons la frontière étudiée à l'enveloppe du bâtiment, ainsi qu'aux calculs de consommation d'énergie (chauffage, eau chaude, électricité spécifique).

La structure de données se base sur les travaux d'Analyse de Cycle de vie développés par [Polster et al, 1996] [Popovici, 2006]. Les inventaires de cycle de vie sont le plus souvent tirés de la base de données Ecoinvent, les indicateurs étant calculés le plus souvent à partir de méthodes définies par la CML (Guinée et al., 2001). La comparaison de la méthodologie employée avec celle utilisée pour remplir les fiches FDES (base INIES) est actuellement en cours dans d'autres projets. Cependant, la structure de données proposée ci-dessous est suffisamment généralisable pour être adaptée ce type de données.

### 5.1 TYPES D'INDICATEURS ENVIRONNEMENTAUX

Les indicateurs contiennent les informations suivantes :

- un intitulé ;
- une unité. Il ne s'agit pas d'unités génériques telles que déjà définies dans la base de données DYNASIMUL mais en général spécifiques à l'indicateur concerné (kg éq. CO<sub>2</sub> par exemple). Il est donc difficile de relier cette donnée aux unités génériques définies dans la base de données ;
- une référence : cette référence sert à connaître la méthode de calcul de l'indicateur.

Nom	Identifiant	Type	Fonction
code	*	entier 64 bits auto-incrément non nul	Sert à identifier l'indicateur
Nom		chaîne de caractères(255) non nul	Description de l'indicateur
Unité		chaîne de caractères(150) non nul	Sert à identifier l'unité

Référence		chaîne de caractères(255) non nul	Source utilisée : nom de la méthode de calcul ou à défaut la base de données utilisée
-----------	--	--------------------------------------	---

Exemple de liste d'indicateurs utilisés par [Popovici, 2006]

code	1
Nom	Effet de serre
Unité	kg CO <sub>2</sub> éq.
Référence	IPCC <sup>1</sup> 2001

code	2
Nom	Acidification
Unité	kg SO <sub>2</sub> éq.
Référence	CML 2001 [Guinée, 2001]

code	3
Nom	Demande cumulative d'énergie
Unité	MJ
Référence	Ecoinvent 2004 <sup>2</sup>

code	4
Nom	Eau consommée
Unité	litres
Référence	Valeur issue des inventaires

code	5
Nom	Déchets inertes produits
Unité	kg éq.
Référence	Valeur issue des inventaires

<sup>1</sup> IPCC, Houghton J. T., Ding Y., Griggs D. J., Noguer M., van der Linden P. J. and Xiaosu D. : *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, The Edinburgh Building Shaftesbury Road, Cambridge, UK, ISBN-13: 9780521014953, July 2001, 892 p.

<sup>2</sup> Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.-J., Doka G., Heck T., Hellweg S., Hirschier R., Nemecek T., Rebitzer G., Spielmann M., "Overview and Methodology", ecoinvent report No. 1, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Suisse, 2004

Volet 2 : Contenu de la base de données pour les parties propriétés thermo-physiques et caractérisation des modèles

code	6
Nom	Epuisement des ressources abiotiques
Unité	Kg éq. Sb
Référence	CML 2001 [Guinée, 2001]

code	7
Nom	Eutrophisation
Unité	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> éq.
Référence	CML 2001 [Guinée, 2001]

code	8
Nom	Ozone photochimique
Unité	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> éq.
Référence	CML 2001 [Guinée, 2001]

code	9
Nom	Ecotoxicité
Unité	PDF
Référence	Eco-indicateur <sup>3</sup>

code	10
Nom	Déchets radioactifs
Unité	dm <sup>3</sup>
Référence	Valeur issue des inventaires

code	11
Nom	Toxicité humaine
Unité	DALY
Référence	Eco-indicateur <sup>4</sup>

<sup>3</sup> Köllner, T. : Species-pool Effect Potentials (SPEP) as a yardstick to evaluate land-use impacts on biodiversity. Submitted to and accepted by the Journal of Cleaner Production, August 1999.

<sup>4</sup> M.J. Goedkoop et R. Spriemsma, *The Eco-Indicator 99, A damage oriented method for life cycle impact assessment, methodology report, methodology annex, manual for designers*, avril 2000

code	12
Nom	Odeurs
Unité	m <sup>3</sup> air
Référence	CML 2001 [Guinée, 2001]

## 5.2 IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX D'UN ÉLÉMENT DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE DU BÂTIMENT

Un élément du cycle de vie du bâtiment peut être un matériau utilisé (béton, bois), soit un composant fabriqué en usine ou sur site, ou bien encore un procédé (énergie, transport) intervenant dans le cycle de vie du bâtiment.

Nom	Identifiant	Type	Fonction
code	*	entier 64 bits auto-incrément non nul	Sert à identifier l'élément considéré
Nom		chaîne de caractères(255) non nul	Description de l'élément
Unité fonctionnelle		chaîne de caractères(500) non nul	Définition complète de l'unité fonctionnelle (comprenant, entre autre, une unité physique : kg, m <sup>2</sup> , TJ, t.km...)
Durée de vie		entier 64 bits non nul	Durée de vie de l'élément
Catégorie		chaîne de caractères(150) non nul	Type d'élément considéré : matériau ou composant pour la construction, et procédés (énergie, transport...)
Etape		chaîne de caractères(150) non nul	Etape(s) considéré pour le calcul des impacts : fabrication, utilisation ou élimination
Procédé		chaîne de caractères(150) non nul	Neuf, recyclage, ou Procédé utilisé en fin de vie (mise en décharge de classe I, II ou III, incinération, recyclage...)
Sources		chaîne de caractères(500) non nul	Sources utilisées (Ecoinvent, INIES...)
Liste d'indicateur		Tableau d'entier 64 bits non nul	Sert à identifier les indicateurs utilisés
Liste de valeur des indicateurs		Tableau de réels	Valeurs correspondantes pour chaque indicateur

Volet 2 : Contenu de la base de données pour les parties propriétés thermo-physiques et caractérisation des modèles

Exemples d'impacts environnementaux établis à partir de la base de données ECOINVENT.

code	1
Nom	Bois double vitrage
Unité fonctionnelle	1m <sup>2</sup> de menuiserie
Durée de vie	30 ans
Catégorie	Composant de façade
Etape	Fabrication
Procédé	Neuf
Sources	Ecoinvent
Liste d'indicateur	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12
Liste de valeur des indicateurs	4.78,0.165,411,473,3.71,0.132,0.018,0.006130,1.71,0.000147,0.000062,163000

code	2
Nom	Chauffage gaz
Unité fonctionnelle	TJ
Durée de vie	-
Catégorie	Energie
Etape	Utilisation
Procédé	-
Sources	Ecoinvent
Liste d'indicateur	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12
Liste de valeur des indicateurs	71000,64.7,1280000,62800,2040,588,5.76,7.67,154,0.0825,0.0314,1900000000

Guinée J. B., (final editor), Gorrée M., Heijungs R., Huppés G., Kleijn R., de Koning A., van Oers L., Wegener Sleeswijk A., Suh S., Udo de Haes H. A., de Bruijn H., van Duin R., Huijbregts M. A. J., Lindeijer E., Roorda A. A. H., Weidema B. P. : Life cycle assessment; An operational guide to the ISO standards; Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM) and Centre of Environmental Science (CML), Den Haag and Leiden, Pays Bas, 2001, 704 p

Peuportier B. : « Eco-conception des bâtiments et des quartiers », Presse des Mines ParisTech, 2008.

Polster B., Peuportier B., Blanc Sommereux I., Diaz Pedegral P., Gobin C., Durand E. (1996), "Evaluation of the environmental quality of buildings – a step towards a more environmentally, conscious design", Solar Energy, vol. 57 n°3, pp 219-230

Popovici E. (2006), Contribution à l'analyse de cycle de vie des quartiers, thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 209 p

## 6 Utilisation de la base de données

### 6.1 PRÉSENTATION GÉNÉRALE

L'accès à la base de données se fait à partir de l'adresse suivante :

<http://134.214.140.82/Index.aspx>

Le site est à accès contrôlé par login et mot de passe.

Saisir votre login en cliquant sur le bouton

**Dynasimul - Bienvenue !**

Entrez votre nom :

Entrez le mot de passe :

Valider

Pour nous contacter : [Contact](#)

DynaSimul - Gestion des modèles 1.1    **Veuillez vous identifier en premier lieu**

Figure 11 : Accès à la base par identification

Volet 2 : Contenu de la base de données pour les parties propriétés thermo-physiques et caractérisation des modèles

Une interface graphique permet une utilisation aisée de cette base.

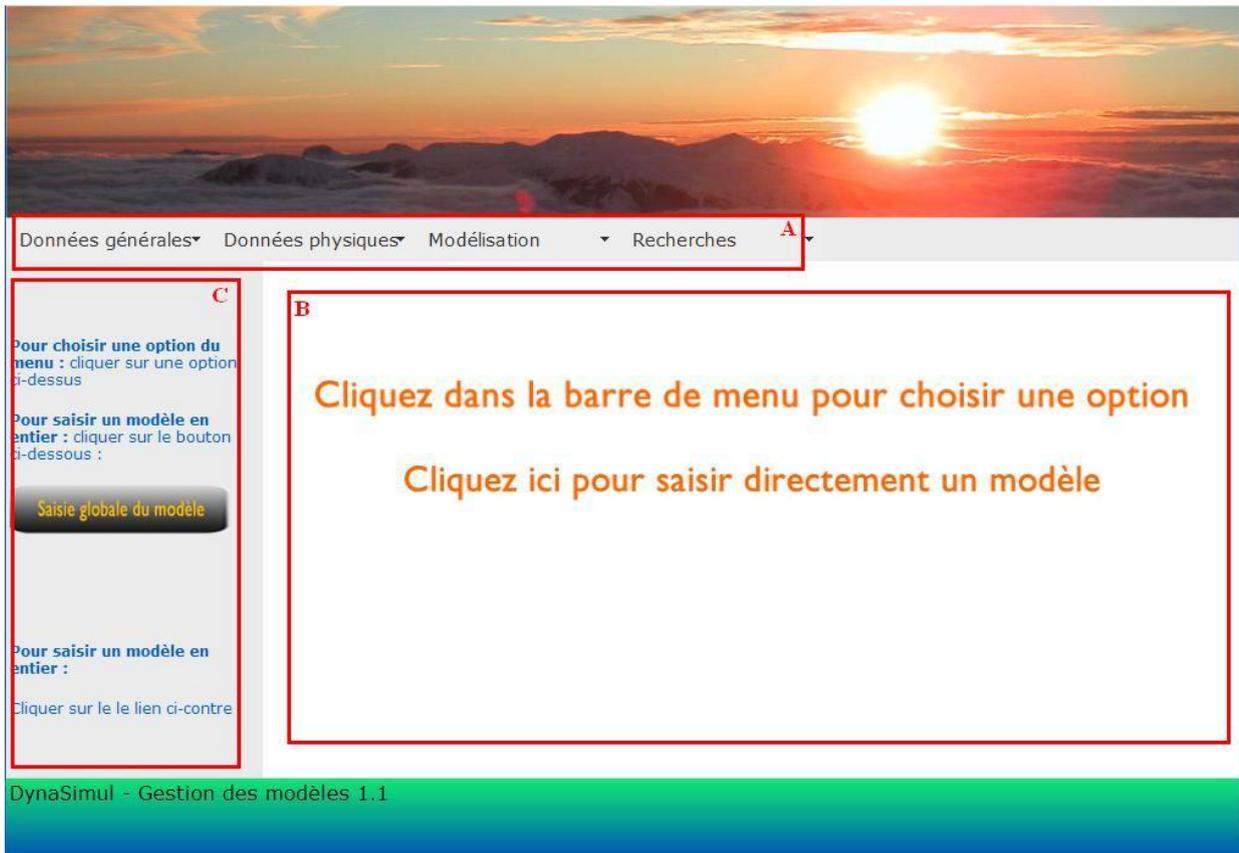


Figure 12 : Page d'accueil de la base de données

La base de données est composée de trois zones distinctes :

1. La zone « A », est composée de menus déroulants permettant d'accéder à l'ensemble des fonctionnalités de la base,
2. la zone « B » est une zone de travail. L'ensemble des fenêtres, nécessaires à la consultation et à l'enregistrement des modèles, s'affiche dans cette zone,
3. la zone « C » est une zone d'aide qui guide l'utilisateur et facilite l'utilisation de la base de données.

Les prochains paragraphes seront consacrés à la présentation :

1. de la procédure à suivre pour ajouter un modèle dans la base de données
2. de la procédure à suivre pour consulter la base de données

## 6.2 AJOUTER UN MODÈLE DANS LA BASE DE DONNÉES

Pour accéder à la page permettant d'ajouter un modèle dans la base de données il est possible d'utiliser :

- les menus déroulant de la zone « A » : **Modélisation / Modèles / Modèles / Saisie globale**,

- la ligne de commande « *Cliquer ici pour saisir directement un modèle* » dans la zone « B »,
- ou bien la touche raccourcie « *Saisie globale du modèle* » de la zone « C ».

Figure 13 : ajouter un modèle – généralités.

L'enregistrement d'un modèle se fait en complétant chacun des 6 onglets de la zone « D » :

- **Généralités**
- **Familles**
- **Auteurs / Rédacteurs**
- **Variables**
- **Description**
- **Autre**

Pour l'ensemble des onglets précédemment cités le bouton « + » (cf. zone E) permet d'ajouter une donnée dans la base de données.

La sélection d'une donnée se fait en activant les cases de la zone « F ».

Les flèches de la zone « G » permettent de faire défiler les données du champ considéré.

Volet 2 : Contenu de la base de données pour les parties propriétés thermo-physiques et caractérisation des modèles

L'onglet « *généralités* » permet de renseigner des informations générales sur le modèle :

1. le nom du modèle,
2. le type de modèle,
3. une courte description du modèle,
4. le laboratoire qui a élaboré le modèle,
5. la méthode de résolution utilisée,
6. les phénomènes mis en jeu dans le modèle.

Une fois les champs complétés il est nécessaire de valider la page avant de passer à la suivante.

Données générales ▾ Données physiques ▾ Modélisation ▾ Recherches ▾

Comment remplir le formulaire ?

Remplissez les onglets un après l'autre, en validant à la fin de la saisie.

Pour modifier, sélectionnez l'onglet concerné et modifiez directement les données.

Les flèches servent à faire défiler les données. Pour rajouter une donnée, cliquer sur le bouton + à droite de l'écran

**Généralités** Familles Auteurs/Rédacteurs Variables Description Autre

Familles :

- Aéraulique  +
- Composant
- Composants d'enveloppe
- Contrôle commande
- Energie renouvelable
- Environnement

Hypothèse :

- coefficient de transmission diffus  +
- Echange monodirectionnel
- échanges latents négligés
- facteur solaire dépend du type de vitrage et de l'angle d'in
- flux diffus isotrope
- l'effet du masque est calculé pour le milieu de la paroi et :

Valider

Figure 14 : ajouter un modèle – familles

La deuxième étape concerne la sélection des « familles » d'appartenance et les « hypothèses » mis en jeu dans la modélisation. Pour chaque champ :

- plusieurs informations peuvent être sélectionnées
- les informations peuvent être complétées en cliquant sur le bouton « + »

Une fois cette étape terminée, il est nécessaire de valider la page.

Données générales ▾ Données physiques ▾ Modélisation ▾ Recherches ▾

Comment remplir le formulaire ?

Remplissez les onglets un après l'autre, en validant à la fin de la saisie.

Pour modifier, sélectionnez l'onglet concerné et modifiez directement les données.

Les flèches servent à faire défiler les données. Pour rajouter une donnée, cliquer sur le bouton + à droite de l'écran

Généralités Familles **Auteurs/Rédacteurs** Variables Description Autre

Auteur(s) nom, prénom :

ALBARIC	Mickaël	<input type="checkbox"/>	+
BECKMANN	W.A.	<input type="checkbox"/>	
BLANC	Isabelle	<input type="checkbox"/>	
BOUDEHENN	François	<input type="checkbox"/>	
BRINKWORTH	B.J.	<input type="checkbox"/>	
BULLOCK	C. E.	<input type="checkbox"/>	

Rédacteur(s) nom, prénom :

ALBARIC	Mickaël	<input type="checkbox"/>	+
BECKMANN	W.A.	<input type="checkbox"/>	
BLANC	Isabelle	<input type="checkbox"/>	
BOUDEHENN	François	<input type="checkbox"/>	
BRINKWORTH	B.J.	<input type="checkbox"/>	
BULLOCK	C. E.	<input type="checkbox"/>	

Valider

**Figure 15 : ajouter un modèle – auteur/rédacteur**

La troisième étape concerne le renseignement des « auteurs » et « rédacteurs » du modèle. Pour chaque champ :

- plusieurs informations peuvent être sélectionnées
- les informations peuvent être complétées en cliquant sur le bouton « + »

Une fois cette étape terminée, il est nécessaire de valider la page.

## Volet 2 : Contenu de la base de données pour les parties propriétés thermo-physiques et caractérisation des modèles

Données générales ▾ Données physiques ▾ Modélisation ▾ Recherches ▾

Comment remplir le formulaire ?

Remplissez les onglets un après l'autre, en validant à la fin de la saisie.

Pour modifier, sélectionnez l'onglet concerné et modifiez directement les données.

Les flèches servent à faire défiler les données. Pour rajouter une donnée, cliquer sur le bouton + à droite de l'écran

Généralités Familles Auteurs/Rédacteurs Variables Description Autre

Données du modèle :

Variable :	Description	Type
1	indice relatif à la 1ère couche d'adsorbant	<input type="checkbox"/> Entree
2	indice relatif à la 2nde couche d'adsorbant	<input type="checkbox"/> Entree
a	variable intermédiaire	<input type="checkbox"/> Entree
A	matrice équivalente à matA	<input type="checkbox"/> Entree
A1 à E10	coefficients matriciels des équations	<input type="checkbox"/> Entree
AH	Angle horaire du soleil Azimut	<input type="checkbox"/> Entree

Valider

**Figure 16 : ajouter un modèle – variables**

La quatrième étape concerne le renseignement et la sélection des « variables » du modèle. Cette page fait apparaître l'ensemble des variables utilisées dans la base de données.

Les variables peuvent être de différents types :

- Entrée
- Sortie
- Entrée/Sortie

Les variables sont présentées par un nom et une courte description. La sélection de la variable se fait en activant la cellule correspondante.

Pour ajouter une variable dans la base, il faut activer la case « + ». A ce moment une fenêtre spécifique apparaît. Pour chaque champ :

- plusieurs informations peuvent être sélectionnées
- les informations peuvent être complétées en cliquant sur le bouton « + »

Une fois cette étape terminée, il est nécessaire de valider la page.

Publications :			
A validated model of natur		2000	<input type="checkbox"/>
Comparative analysis of a	Solar Energy	1995	<input type="checkbox"/>
Etude de l'amélioration de		2003	<input type="checkbox"/>
Evaluation of predictive mc	pp 23-31	2001	<input type="checkbox"/>
IEA BESTEST Multi-Zone		2005	<input type="checkbox"/>
Manuel d'utilisation COMF		1994	<input type="checkbox"/>

Définition :  Parcourir...

Formulation :  Parcourir...

Description :  Parcourir...

**Fichier sources**

Type de source :

Nom du fichier :  Parcourir...

Valider

Figure 17 : ajouter un modèle – description

La cinquième étape concerne la *description* du modèle. Dans cette page il est possible de renseigner :

- les références utilisées pour la modélisation
- de charger les fichiers de « Définition », « Formulation » et « Description »
- de charger les fichiers sources du modèle considéré

Les fichiers de « Définition », « formulation » et « Description » sont issus de la fiche « proforma » présentée en annexe. Pour un bon fonctionnement de la base de données ces fichiers doivent être enregistrés au format « .mht ».

Les fichiers sources restent dans leur format d'origine. C'est un plus qui permet au utilisateur de la base de disposer rapidement des modèles disponible dans la base de données.

Une fois cette étape terminée, il est nécessaire de valider la page.

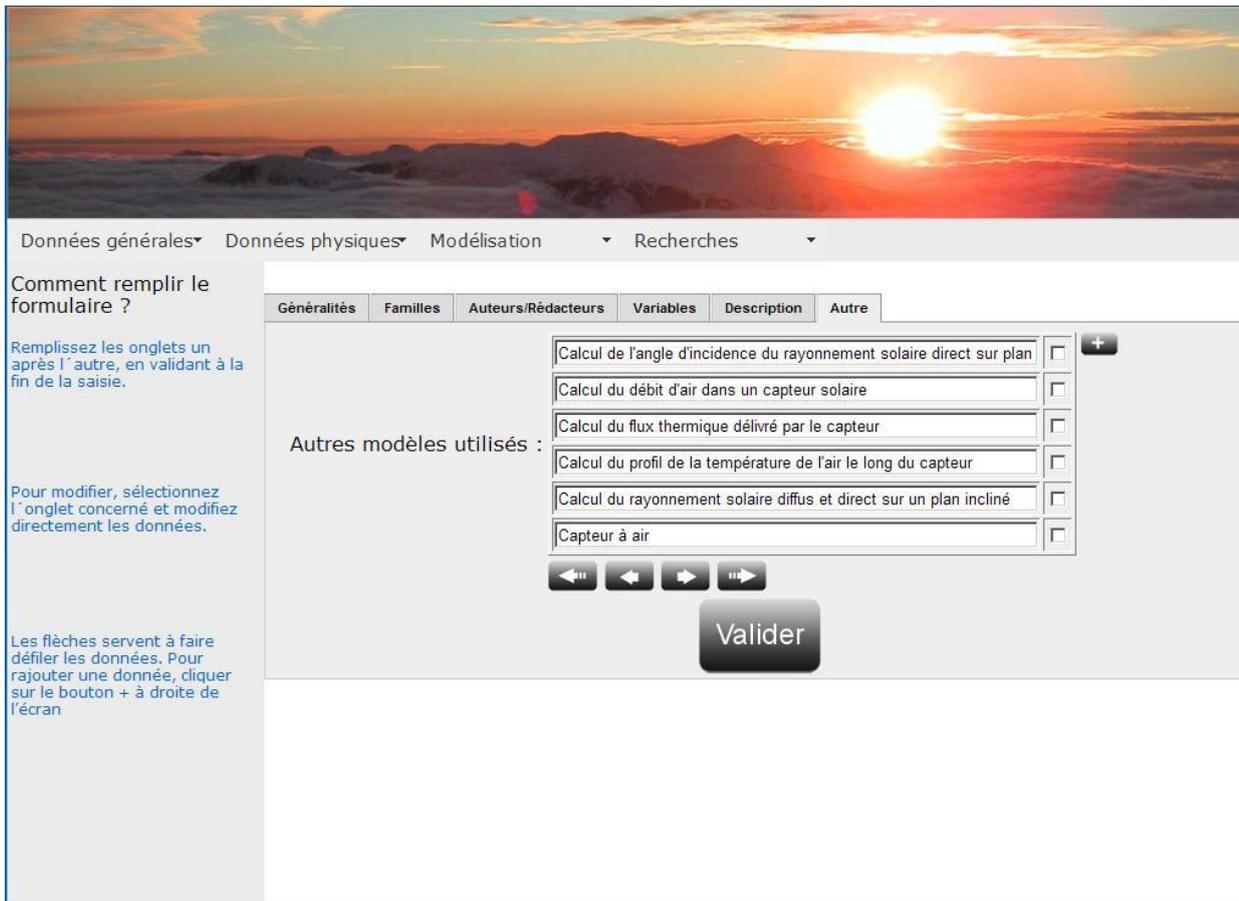


Figure 18 : ajouter un modèle – autre

La sixième étape concerne le lien avec d'autres modèles de la base. Ces liens permettent de tracer l'impact de la modification d'un modèle sur le reste de la base.

Une fois cette étape terminée, il est nécessaire de valider la page.

Le processus d'enregistrement d'un nouveau modèle est terminé.

**REMARQUE :** il n'est pas obligatoire de renseigner la base en une seule fois, le processus d'enregistrement d'un modèle peut se faire en plusieurs fois. La validation en fin de chaque étape permet de reprendre le processus ultérieurement.

### 6.3 MODIFICATION D'UN MODÈLE EXISTANT

Il est possible de modifier un modèle renseigné dans la base de données. Ce choix se fait :

1. à partir des menus déroulant : **Modélisation / Modèles / Modèles / Modifier**,
2. à partir la ligne de commande « **Cliquer ici pour saisir directement un modèle** » et en sélectionnant le modèle dans la liste déroulante.

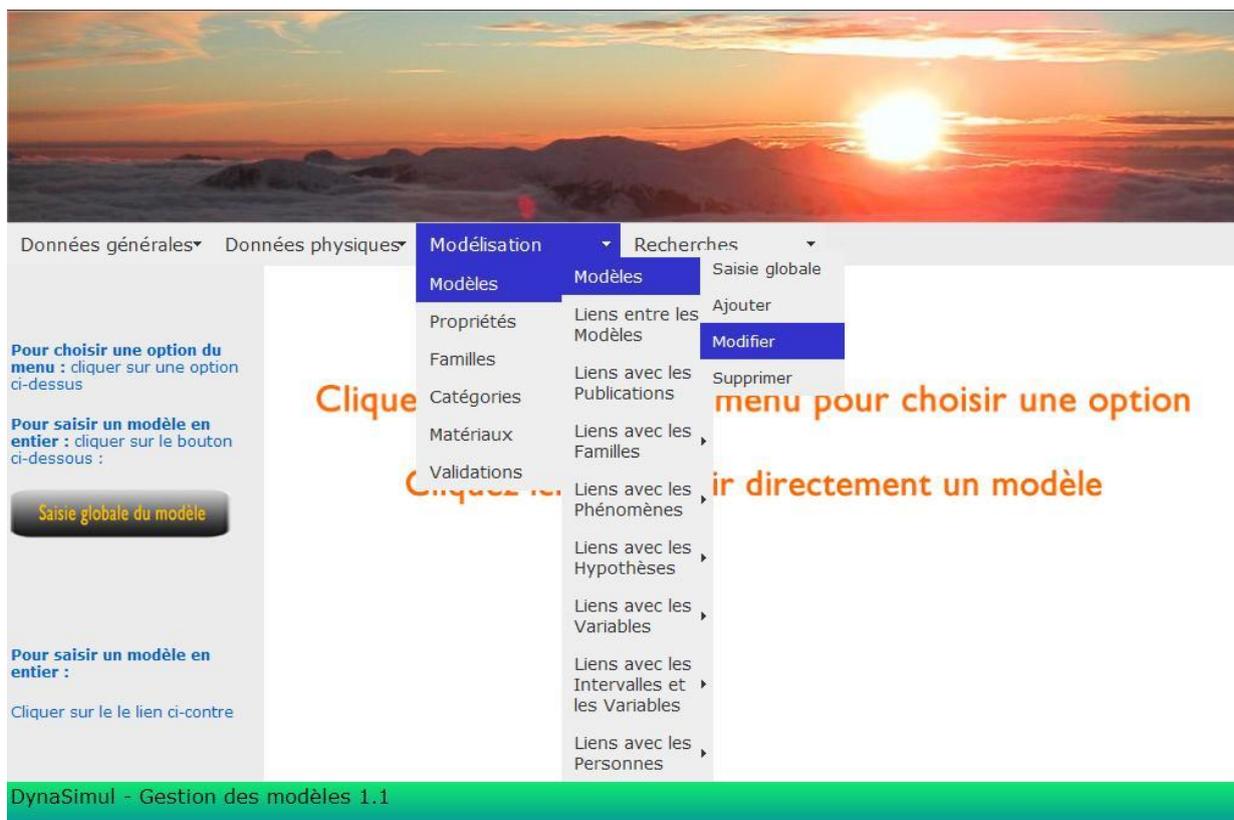


Figure 19 : modification d'un modèle de la base de données – chemin d'accès

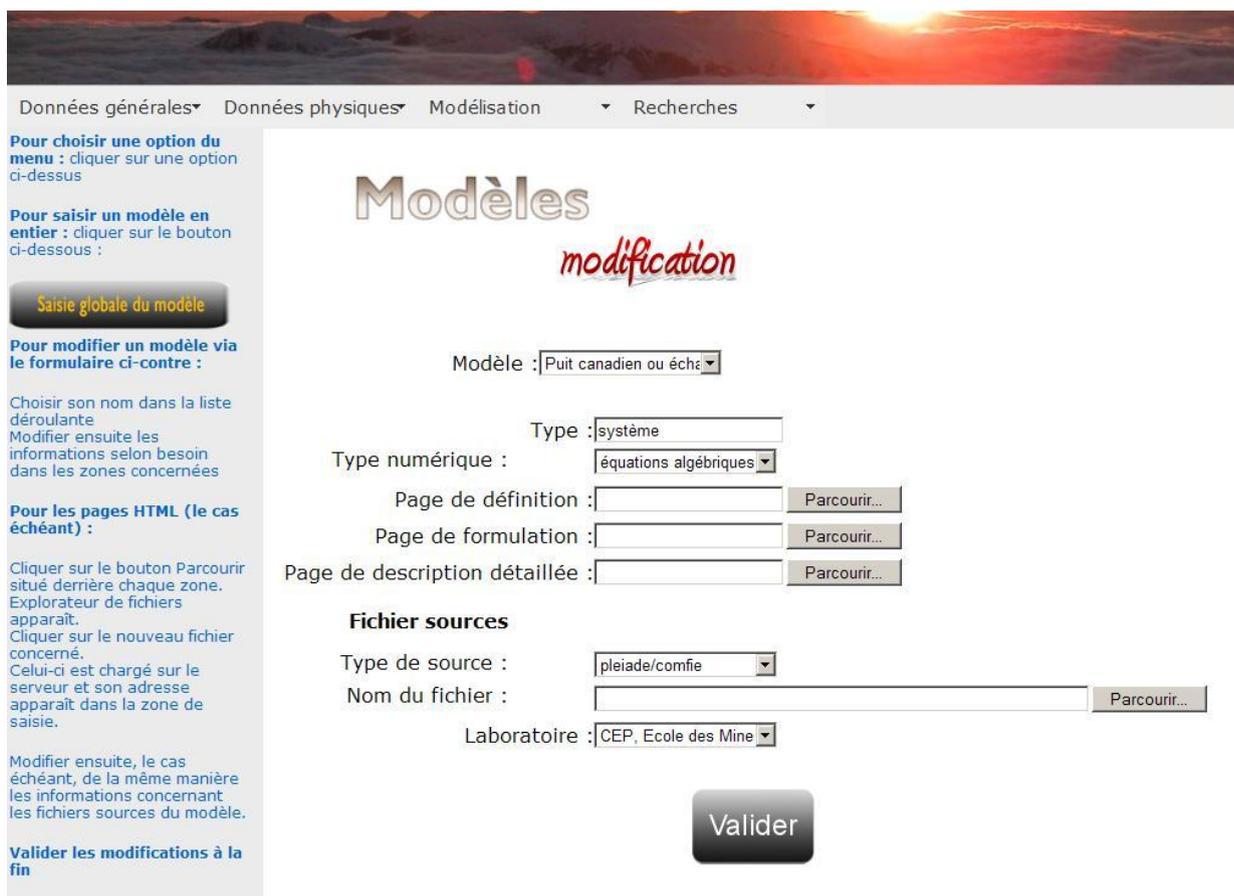


Figure 20 : modification d'un modèle de la base de données

Volet 2 : Contenu de la base de données pour les parties propriétés thermo-physiques et caractérisation des modèles

## 6.4 RECHERCHE D'UN MODELE

La recherche des informations disponibles dans la base de données se fait à partir des menus déroulants (Figure 21).

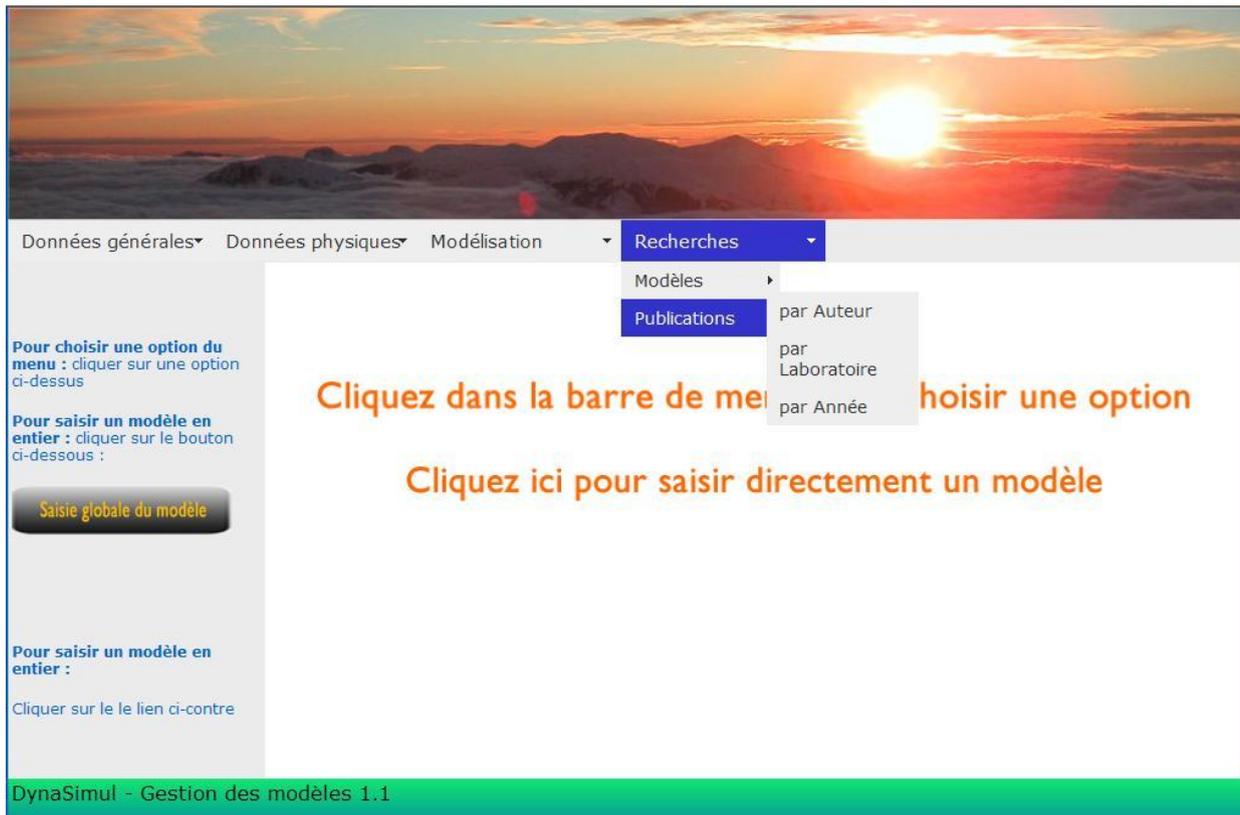


Figure 21 : consultation de la base de données

La base de données permet de consulter :

1. les modèles disponibles
2. les publications attachées aux modèles

Concernant les publications les recherches peuvent se faire :

- par auteur,
- par laboratoire,
- par année.

Au niveau des modèles une recherche multi critère est possible. Les champs de sélection sont :

- le phénomène
- les variables
- les modèles
- les auteurs
- les publications

La 1<sup>ère</sup> étape consiste à choisir les champs qui seront utilisés par la recherche.

Données générales ▾ Données physiques ▾ Modélisation ▾ Recherches ▾

## Recherches

*Sélectionnez d'abord les champs dont vous avez besoin  
Appuyez ensuite sur la flèche verticale pour les valider*

Phénomènes	Variables	Modèles	Auteurs de modèles	Publications
nom	nom abrev genre precis style valeur_def descriptif	nom date_creat date_modif genre objet	nom prenom	nom ref volume annee genre

**Critères de sélection**

↓

*Une fois les champs validés, vous devez encore indiquer des critères de sélection derrière chaque champ*

*1. un opérateur de comparaison (=, <=, >=, <, >, et != pour différent de)*

*Ceux-ci sont de la forme SQL : 2. une valeur de comparaison (un nombre si c'est un nombre ; un texte entre apostrophes ' ' si c'est un texte)*

*Par exemple : = 'Capteur à air'*

*=36 (si c'est un nombre)*

*3. un opérateur permet une recherche incomplète sur les textes :*

*like en association avec des caractères joker % (pour un nombre quelconque de caractères)*

*ou \_ (pour 1 seul caractère)*

*Par exemple : like 'Cap%'*

*Cette dernière requête trouvera tout champ commençant par Cap*

**Chercher**

*Attention : cette page requiert le langage javascript actif dans le navigateur. Dans le cas contraire il n'y aura aucun traitement possible*

DynaSimul v1.0.0

Figure 22 : Recherche multi critère des modèles

On obtient alors une liste de champs à utiliser : par exemple le nom du modèle.

Volet 2 : Contenu de la base de données pour les parties propriétés thermo-physiques et caractérisation des modèles

Données générales ▾ Données physiques ▾ Modélisation ▾ Recherches ▾

## Recherches

*Sélectionnez d'abord les champs dont vous avez besoin  
Appuyez ensuite sur la flèche verticale pour les valider*

Phénomènes	Variables	Modèles	Auteurs de modèles	Publications
nom	nom abbrev genre precis style valeur_def descriptif	nom date_creat date_modif genre objet	nom prenom	nom ref volume annee genre

**Critères de sélection**

↓

*Une fois les champs validés, vous devez encore indiquer des critères de sélection derrière chaque champ*

*1. un opérateur de comparaison (=; <=; >=; <; >; et != pour différent de)*

*Ceux-ci sont de la forme SQL : 2. une valeur de comparaison (un nombre si c'est un nombre ; un texte entre apostrophes ' ' si c'est un texte)*

*Par exemple : = 'Capteur à air'*

*=36 (si c'est un nombre)*

*3. un opérateur permet une recherche incomplète sur les textes :*

*like en association avec des caractères joker % (pour un nombre quelconque de caractères)*

*ou \_ (pour 1 seul caractère)*

*Par exemple : like 'Cap%'*

*Cette dernière requête trouvera tout champ commençant par Cap*

Modnom

Chercher

*Attention : cette page requiert le langage javascript actif dans le navigateur. Dans le cas contraire il n'y aura aucun traitement possible*

DynaSimul v1.0.0

Figure 23 : Liste des champs à utiliser

Il reste alors à ajouter un critère de sélection, par exemple une recherche incomplète basée sur un prototype : ici une recherche des modèles dont le nom commence par C est réalisée.

Données générales | Données physiques | Modélisation | Recherches

## Recherches

Sélectionnez d'abord les champs dont vous avez besoin  
Appuyez ensuite sur la flèche verticale pour les valider

Phénomènes	Variables	Modèles	Auteurs de modèles	Publications
nom	nom abrev genre precis style valeur_def descriptif	nom date_creat date_modif genre objet	nom prenom	nom ref volume annee genre

### Critères de sélection

Une fois les champs validés, vous devez encore indiquer des critères de sélection derrière chaque champ

- un opérateur de comparaison (=; <=; >=; <; >; et != pour différent de)
- une valeur de comparaison (un nombre si c'est un nombre ; un texte entre apostrophes ' ' si c'est un texte)
- un opérateur permet une recherche incomplète sur les textes :  
like en association avec des caractères joker % (pour un nombre quelconque de caractères)  
ou \_ (pour 1 seul caractère)

Par exemple : = 'Capteur à air'  
= 36 (si c'est un nombre)

Par exemple : like 'Cap%'

Cette dernière requête trouvera tout champ commençant par Cap

Mod:nom    like 'C%'

Chercher

Attention : cette page requiert le langage javascript actif dans le navigateur. Dans le cas contraire il n'y aura aucun traitement possible.

DynaSimul v1.0.0

Figure 24 : exemple de recherche : nom commençant par « C »

En retour, en appuyant sur le bouton *chercher*, on obtient une liste de modèles satisfaisants les critères :

Choisissez parmi les modèles satisfaisants

modèles : Calcul du rayonnement solaire diffus et direct sur un plan incliné

Valider    Fermer

DynaSimul - Gestion des modèles 1.1

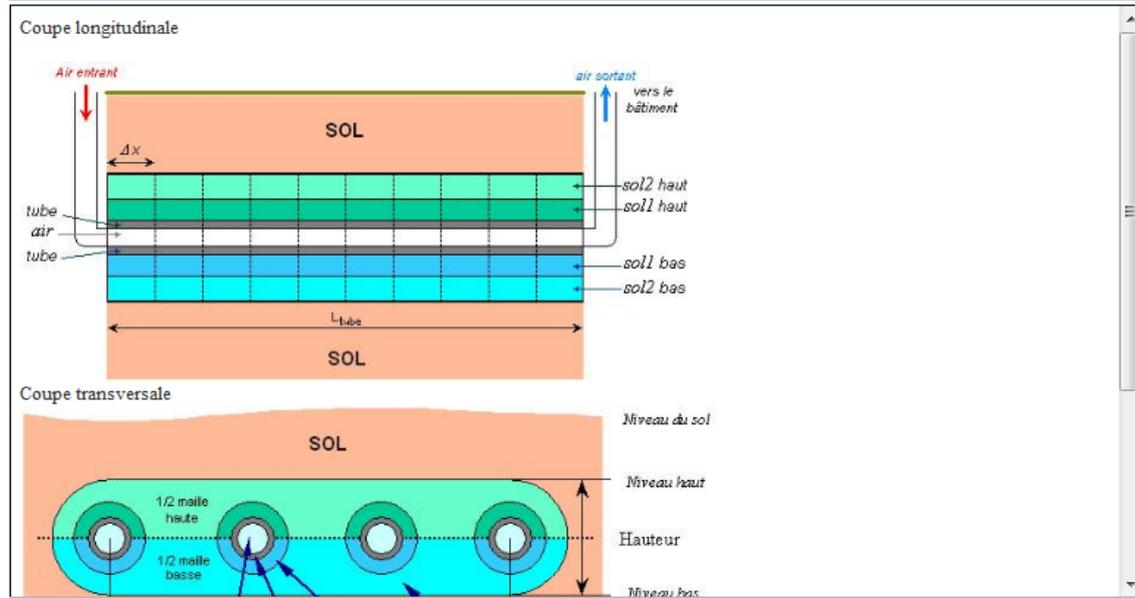
Figure 25 : liste des modèles satisfaisant la demande

La visualisation des informations disponibles sur le modèle considéré est présentée dans la figure suivante :

Laboratoire : Lawrence Berkeley National Laboratory University of California Los Angeles USA

Publications :

**Définition générale :**



**Formulation :**

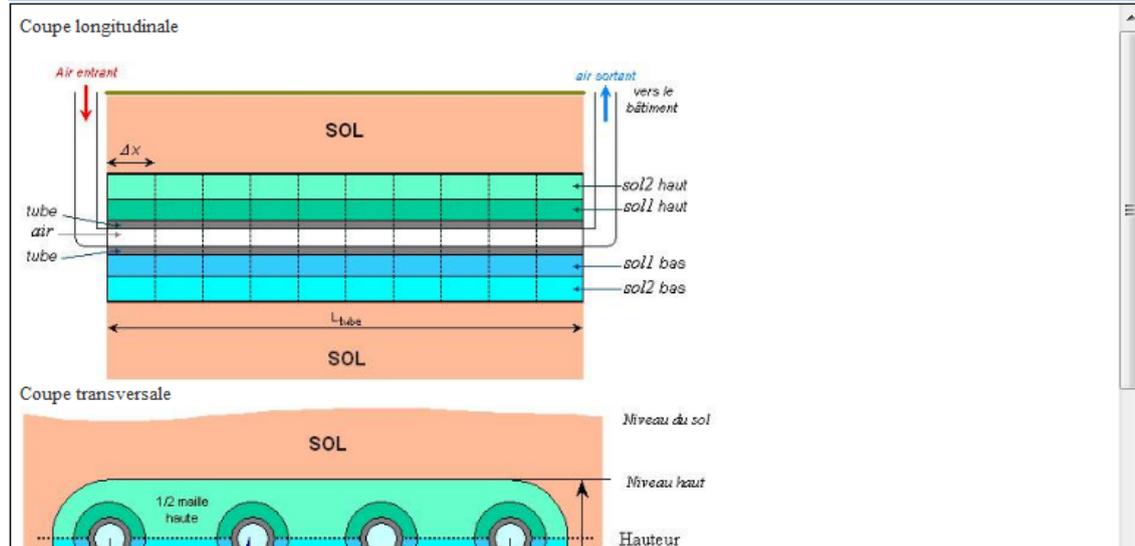


Figure 26 : exemple de visualisation d'une recherche

## 7 Perspective et avenir

Un prototype de base de données permettant la mutualisation des modèles au niveau de l'ensemble des acteurs nationaux dans le domaine de l'énergétique du bâtiment a été construit au cours de ce projet.

L'architecture évolutive permet une utilisation variée de cette base. La fonction principale consiste à recenser pour une thématique donnée les modèles existants, les acteurs principaux et

mettre à disposition aux utilisateurs de cette base l'essentiel de l'architecture informatique nécessaire à l'implémentation de ces modèles, avec éventuellement les codes sources.

Pour pérenniser le travail effectué et continuer à faire vivre cette base, un support doit être mis en place. Le coût moyen de la maintenance est de 10 à 15 k€ par an. A ce jour différentes évolutions sont déjà identifiées et pourraient être par ordre de priorité

1. le remplissage automatique de la base de données à partir du téléchargement des fiches proforma,
2. une migration de la base de données vers un serveur plus important pour pouvoir assurer une gestion centralisée,
3. la génération automatique de code de calcul à partir des modèles disponibles dans la base de données, ce qui pourra se faire lorsqu'une plateforme comme celle prévue dans le projet ANR PLUME sera disponible.
4. la création d'un forum pour faciliter l'échange d'informations entre les différents utilisateurs de cette base. Une possibilité est de rapprocher cette base de données de Dymocode de façon à bénéficier de la gestion de l'interaction créateur de modèles – utilisateurs prévue dans cet environnement.

Volet 2 : Contenu de la base de données pour les parties propriétés thermo-physiques et caractérisation des modèles

## **DYNASIMUL**

### **Contribution au Rapport Final**

#### **-Volet 3-**

Coordinateur : TREFLE

Laboratoires participants

CETHIL, LEPTIAB, LIMSI, LOCIE, LPBS, TREFLE

août 2010

# Volet 3: Développement d'une nouvelle approche de modélisation

## 1 Sommaire du volet 3

<b>Volet 3: Développement d'une nouvelle approche de modélisation.....</b>	<b>118</b>
<b>1 Sommaire du volet 3.....</b>	<b>118</b>
<b>2 Présentation générale.....</b>	<b>120</b>
<b>3 Réduction de problèmes linéaires de conduction par application de la méthode des facteurs de réponse.....</b>	<b>123</b>
<b>4 Réduction de problèmes de diffusion non linéaires.....</b>	<b>124</b>
4.1 Problématique et objectif général.....	125
4.2 Intérêt des problèmes choisis et modèles de transfert.....	127
4.2.1 Modèles de conduction avec changement de phase.....	128
4.2.2 Modèles de transferts couples de chaleur et d'humidité.....	129
4.3 Méthodes de réduction proposées.....	130
4.3.1 Principe des méthodes spectrales de réduction.....	130
4.3.2 Spécificités des méthodes développées.....	131
4.4 Exemple de résultats.....	132
4.4.1 Changement de phase.....	132
4.4.2 Transfert couplé de chaleur et d'humidité.....	135
<b>5 Application de la méthode P.O.D à l'équation de conservation de l'énergie dans l'air.....</b>	<b>137</b>
5.1 Objectifs et intérêt.....	137
5.2 Local expérimental.....	138
5.3 Démarche générale et synthèse des résultats.....	139
5.3.1 Construction d'un modèle d'ordre élevé, noté MOE.....	139
5.3.2 Construction d'un modèle d'ordre réduit, noté MOR.....	140
5.4 Conclusion.....	140
<b>6 Modèles LES pénalisés.....</b>	<b>141</b>
6.1 L'Objectif.....	141
6.2 Présentation de la démarche générale.....	142
6.3 Le cas test et la modélisation LES pour la génération de données de référence.....	143
6.3.1 Le cas test.....	143
6.3.2 Génération des données de référence.....	144
6.4 Les modèles pénalisés.....	145
6.4.1 Le terme de pénalisation.....	145
6.4.2 Tests des modèles pénalisés.....	146
6.5 Conclusion et perspectives.....	149
<b>7 Expérimentation d'une méthode multi-niveaux pour la résolution d'équations aux dérivées partielles avec couplage multi-échelles.....</b>	<b>150</b>
7.1 Principe et buts.....	150
7.1.1 Quelques constats.....	150
7.1.2 Solution proposée.....	151
7.2 Mise en place du cadre théorique.....	152
7.2.1 Définition des deux échelles.....	152
7.2.2 Problème global sur le maillage « grossier ».....	152
7.2.3 Problème local sur le maillage « fin ».....	153
7.2.4 Conclusion.....	153
7.3 Test de la méthode.....	153
7.3.1 Un problème simplifié.....	153
7.3.2 Adimensionnement.....	154

7.3.3	Algorithme des itérations .....	154
7.3.4	Résultats .....	155
7.3.5	Perspectives.....	155
<b>8</b>	<b>Modeleur-mailleur bâtiment .....</b>	<b>156</b>
8.1	Introduction.....	156
8.2	Méthodologie .....	156
8.3	Approche « constructive » des bâtiments.....	157
8.4	Approche « volumique » des bâtiments .....	159
8.5	Lien avec les environnements existants .....	161
8.6	Lien avec le SIG.....	162
<b>9</b>	<b>Conclusion et perspectives .....</b>	<b>162</b>
9.1	Les principaux résultats du volet 3.....	162
9.2	Perspectives .....	164

Cette partie du document présente les objectifs, les grands axes de recherche/développement et les résultats majeurs du volet 3 du projet DYNASIMUL. Il comporte une présentation générale suivie d'une description du travail effectué. Les parties de celui-ci qui ont été déjà rapportées ou qui ont fait l'objet de publications dans des revues scientifiques, ne seront présentées que très brièvement. Les laboratoires et les membres des laboratoires impliqués dans ce volet sont :

CETHIL (Lyon)	Jean-Jaques ROUX, Gilles RUSAOUEN
LEPTIAB (La Rochelle)	Emmanuel BOZONNET, Christian INARD, Alain SEMPEY
LIMSI (Paris) *	Michel PONS, Irina MARX CHHAY
LOCIE (Chambéry)	Pierre TITTELEIN, Etienne WURTZ
LPBS (La Réunion)	Alain BASTIDE
TREFLE (Bordeaux)	Jean-Luc DAUVERGNE, Stéphane GINESTET, Li JIANFENG, Alain SEMPEY, Elena PALOMO DEL BARRIO

\* Le LIMSI (UPR 3251), laboratoire non-partenaire du projet Dynasimul mais concerné par la problématique du projet, a contribué aux travaux du volet 3 par l'intermédiaire de Michel Pons (CR2 CNRS) et de Irina Marx Chhay (« post-doc » CDD CNRS financé moitié-moitié par Dynasimul et par le LIMSI).

## 2 Présentation générale

Le **volet 3** part et se structure à partir d'un double constat :

- a) Les évolutions prévues dans le secteur (bâtiments à très basse consommation et intégration de nouvelles technologies, avec des lieux de stockage à l'appui), poussent à enrichir les modèles en termes de phénomènes physiques représentés, à basculer vers des géométries 2D/3D, à chercher une précision accrue ... De ce fait, on s'attend à un accroissement exponentiel de la complexité et du nombre de degrés de liberté des problèmes mathématiques à résoudre et, par conséquent, des coûts de calcul.
- b) L'exigence de répondre à des nouveaux besoins tel que celui de l'optimisation de la gestion énergétique (anticipée ou en temps réelle) ou celui du suivi, de l'évaluation in situ et du diagnostic énergétique pour citer quelques uns. Contrairement aux évolutions prévues citées ci-dessus, ces nouveaux besoins vont exiger une parcimonie extrême en termes de modélisation/simulation.

**L'objectif principal du volet 3** est alors de développer des méthodes permettant de concilier les exigences de complexification et de précision relatives aux modèles physiques avec la parcimonie requise par les nouvelles applications de la modélisation, jusqu'à aujourd'hui centrée sur la conception.

La parcimonie souhaitée pourrait être cherchée à différents niveaux du processus de modélisation :

- au niveau technologique et/ou physique, en faisant des simplifications adéquates de la géométrie où des phénomènes de transport/transfert mis en jeu ;
- au niveau mathématique/numérique, en réduisant les degrés de liberté du problème sans pour autant dégrader la physique ;
- au niveau numérique/algorithmique, en cherchant des stratégies de résolution et/ou des méthodes d'intégration performants.

Dans le cadre du volet 3 du projet DYNASIMUL, l'effort de recherche/développement se situe pour l'essentiel au niveau mathématique/numérique. Ainsi, on a décidé d'organiser le travail en structurant le volet en **trois tâches** :

1. Développement de méthodes efficaces de réduction de **problèmes de diffusion** de très grande dimension. Le TREFLE a travaillé sur le développement de nouvelles approches spectrales visant la réduction de problèmes non linéaires, tandis que le LOCIE a centré son activité sur l'utilisation de la méthode des facteurs de réponse pour la réduction de problèmes de conduction linéaire à très forte inertie.
2. Développement de méthodes efficaces de réduction et/ou de résolution accélérée de **problèmes de convection**. Le LEPTIAB a travaillé sur l'application de la méthode POD à l'obtention de modèles thermo-convectifs de très faible dimension pour des applications de type régulation/commande. Le LPBS a centré ses recherches sur le développement de modèles LES pénalisés pour la description des écoulements dans des bâtiments ouverts. Enfin, la contribution du LIMSI a porté sur l'expérimentation d'une méthode multi-niveaux pour la résolution d'équations aux dérivées partielles avec couplage multi-échelles.
3. Analyse des besoins pour bâtir une **plate-forme numérique de recherche** dans le domaine de l'énergie et de la qualité de l'air dans l'habitat. Elle doit permettre a terme de capitaliser et de mieux partager/échanger les développements des chercheurs du domaine. Nous avons exploré les deux bouts de la chaîne de modélisation/simulation : les modélisateurs-maillages (CETHIL) et les solveurs d'équations (TREFLE, LPBS).

Nous présentons dans les sections suivantes l'essentiel des développements accomplis. La plupart des résultats scientifiques du volet ont été déjà rapportés ou ont fait l'objet de publications dans des revues scientifiques. De ce fait, nous avons décidée d'effectuer des présentations abrégées mettant l'accent sur les enjeux, les buts, les aspects méthodologiques et la qualité des résultats. En renvoyant aux publications associées, nous évitons la description

détaillée des développements mathématiques effectués. Ce faisant, nous espérons offrir au lecteur un texte agréable à lire et lui aidant à la compréhension de la logique d'ensemble qui a inspirée les travaux du volet 3.

Le contenu par sections est :

<p style="text-align: center;"><b>TACHE 1</b></p> <p>Développement de méthodes efficaces de réduction de <b>problèmes de diffusion</b> de très grande dimension</p>	<p><b>Section 2.</b> Réduction de problèmes de conduction linéaire par application de la méthode de facteurs de réponse. Décrit l'essentiel des travaux du LOCIE. Renvoi à une publication scientifique.</p>
	<p><b>Section 3.</b> Réduction de problèmes de diffusion non linéaires. Décrit l'essentiel de la contribution du TREFLE au volet. Renvoi à sept publications scientifiques et aux rapports précédents du projet.</p>
<p style="text-align: center;"><b>TACHE 2</b></p> <p>Développement de méthodes efficaces de réduction et/ou de résolution accélérée de <b>problèmes de convection</b></p>	<p><b>Section 4.</b> Application de la méthode POD à l'équation de conservation de l'énergie dans l'air. Décrit les travaux du LEPTIAB. Renvoi aux rapports précédents du projet et à une publication scientifique.</p>
	<p><b>Section 5.</b> Modèles LES pénalisés. Décrit la contribution majeure du LPBS au volet. Renvoi aux rapports précédents et à 2 publications scientifiques.</p>
	<p><b>Section 6.</b> Expérimentation d'une méthode multi-niveaux pour la résolution d'équations aux dérivées partielles avec couplage multi-échelles. Décrit la contribution du LIMSI au volet 3 du projet.</p>
<p style="text-align: center;"><b>TACHE 3</b></p> <p>Analyse des besoins pour bâtir une <b>plate-forme numérique de recherche</b> dans le domaine de l'énergie et de la qualité de l'air dans l'habitat</p>	<p><b>Section 7.</b> Modeleur-Mailleur Bâtiment. Décrit la contribution du CETHIL. La partie concernant l'analyse des solveurs a été déjà rapportée (2<sup>ème</sup> rapport annuel) et nous ne feront que rappeler les conclusions majeures de l'étude en conclusion.</p>
<p style="text-align: center;"><b>TACHES 1, 2 &amp; 3</b></p>	<p><b>Section 8.</b> Conclusion et perspectives.</p>

### 3 Réduction de problèmes linéaires de conduction par application de la méthode des facteurs de réponse

*LOCIE : Pierre TITTELEIN, Gilbert ACHARD, Etienne WURTZ*

Ce travail porte sur l'utilisation de la méthode des facteurs de réponse pour simuler les transferts conductifs dans un milieu à très forte inertie. Cette méthode, utilisée couramment pour simuler la conduction dans les parois de bâtiment peut, en effet, poser des problèmes pour des parois trop inertes et *a fortiori* pour la conduction dans le sol.

Le cas étudié ici est celui d'un échangeur air-sol (aussi appelé puits canadien ou puits provençal). Deux grandes familles de modélisation sont utilisées habituellement pour simuler la conduction dans le sol dans ce cas :

- Les modèles analytiques qui se décomposent en deux sous famille :
  - Les **modèles basiques** ne prenant pas en compte l'influence de la présence du tube sur la température du sol qui est calculée à partir de la résolution de l'équation de la chaleur dans un milieu semi infini soumis à une sollicitation sinusoïdale
  - Les **modèles élaborés** prenant en compte l'effet de la présence du tube dans une partie du sol (couronne ou géométrie rectangulaire)

Ces modèles analytiques ont pour principal inconvénient de ne pas pouvoir prendre en compte une géométrie et des caractéristiques thermophysiques de sol et de tube quelconques et de se baser sur des hypothèses discutables dans certains cas.

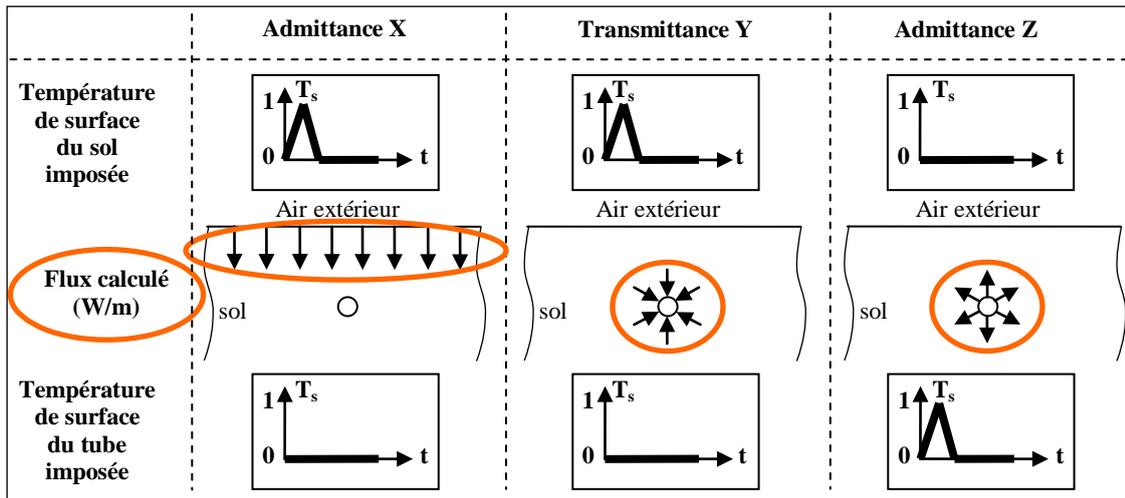
- Les modèles numériques qui, eux aussi, se décomposent en deux sous-familles :
  - Les modèles qui considèrent que seule une partie du sol est perturbée par la présence du tube (modèle à mailles grossières cylindriques)
  - Les modèles qui considèrent la géométrie complète en 2D ou 3D (éléments finis, volumes finis, différences finies)

Dans la première sous-famille, on retrouve les mêmes critiques que pour les modèles analytiques et le problème de la seconde réside dans les temps de calculs qui peuvent être importants.

Notre étude se situe dans la deuxième catégorie des modèles numériques. On essaye de palier le souci des temps de calculs importants en appliquant une méthode de réduction de modèle (la méthode des facteurs de réponse). On se place en 2D en discrétisant le sol en  $n$  tranches d'épaisseur  $D_x$  perpendiculaires au tube sur lesquels on réalise les bilans.

On utilise un logiciel qui résout le problème de conduction dynamique 2D par la méthode des éléments finis pour faire le calcul des différents facteurs de réponse et on reconstitue la réponse

complète du système (flux entrant dans le tube) par superposition des réponses dus aux sollicitations des pas de temps précédents.



*Sollicitations et réponses à considérer pour les calculs de facteurs de réponse*

Habituellement, on peut calculer les premiers termes des facteurs de réponse et générer les suivants en considérant qu'ils suivent une progression géométrique. Dans le cas de très forte inertie, cette approximation n'est plus possible et il faut donc pouvoir estimer l'effet des termes des facteurs de réponse qui n'ont pas été utilisés. C'est là que se situe la spécificité de l'étude.

Le modèle a été implémenté dans la plateforme SimSpark. Il a ensuite été comparé numériquement à deux autres modèles (un modèle analytique et un modèle numérique 3D éléments finis). Cette comparaison montre une concordance très satisfaisante.

Le modèle a ensuite été couplé à un modèle de bâtiment pour étudier l'influence de la présence de l'échangeur air-sol sur le comportement thermique du bâtiment.

Pour plus de détails sur cette étude, se reporter à :

P. TITTELEIN, Environnements de simulation adaptés à l'étude du comportement énergétique des bâtiments basse consommation, Ph.D. Thesis, Université de Savoie, Chambéry, France, 2008.

P. TITTELEIN, G. ACHARD, E. WURTZ, Modelling earth-to-air heat exchanger behaviour with the convolutive response factors method, Applied Energy 86, pp. 1683-1691, 2009.

## 4 Réduction de problèmes de diffusion non linéaires

*TREFLE : Elena PALOMO DEL BARRIO, Jean-Luc DAUVERGNE, Stéphane GINESTEST, Alain SEMPEY, Li JIANFENG*

La contribution majeure du TREFLE au volet 3 du projet est centrée sur le développement de nouvelles méthodes de réduction pour des problèmes de diffusion non linéaires. Les méthodes

proposées reposent sur des approximations spectrales de type POD (Proper Orthogonal Decomposition). L'originalité de nos développements se trouve dans le calcul des bases de projection. Contrairement aux méthodes POD « standard », ce calcul se fait directement à partir des opérateurs de transferts, évitant ainsi d'avoir recours à des simulations onéreuses en temps de calcul. Les méthodes de réduction proposées ont été appliquées avec succès à des problèmes de conduction avec changement de phase et à des problèmes de transferts couplés de chaleur et d'humidité. Nous présentons ici brièvement l'essentiel de nos travaux. Pour obtenir plus de détail, le lecteur pourra se reporter aux 1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> rapports annuels du projet ainsi qu'aux publications suivantes :

**P1:** J. L. DAUVERGE, E. PALOMO, A spectral method for low-dimensional description of melting/solidification within shape-stabilized phase-change materials, *Numerical Heat Transfer Part B – Fundamentals*, vol. 56 (2), pp. 142-166, 2009.

**P2:** J. L. DAUVERGE, E. PALOMO, Toward a simulation-free P.O.D. approach for low-dimensional description of phase change problems, *Int. J. of Thermal Sciences*, vol. 49 (8), pp. 1369-1382, 2010.

**P3:** E. PALOMO, A. SEMPEY, A method for accurate low-dimensional approximation of Liukov equations, *Applied Mathematical Modelling*, 2010 (soumis en septembre).

**P4:** E. PALOMO, S. RAJI, S. GINESTET, A. SEMPEY, Reduced models for coupled heat and moisture transfer simulation in wood walls, *Applied Thermal Engineering*, 2010 (soumis en septembre).

**P5:** E. PALOMO, A. SEMPEY, A. BASTIDE, A model reduction technique for accurate description of heat and mass transfer in capillary porous media, *Numerical Heat Transfer Part B – Fundamentals* (soumission prévue dans les prochains mois).

**P6:** J. L. DAUVERGE, E. PALOMO, P.O.D. approaches for melting/solidification problems reduction, *Applied Mathematical Modelling* (soumission prévue dans les prochains mois).

**P7:** A. SEMPEY, A. BASTIDE, L. JIANFENG, E. PALOMO, Reduced state models for heat and moisture transfer simulation through buildings envelopes, *Energy and Buildings* (soumission prévue dans les prochains mois).

#### 4.1 PROBLEMATIQUE ET OBJECTIF GÉNÉRAL

Les problèmes visés sont des problèmes de diffusion couplés (chaleur, humidité, espèces) pouvant comporter des réactions chimiques (homogènes et/ou hétérogènes) et des transitions d'état. Les applications envisagées concernent aussi bien les modèles d'enveloppe (ex. : transferts de chaleur, humidité et polluants ; matériaux à change phase ...), que les modèles de systèmes (ex. : puit canadien, roue dessiccante..) et ceux des lieux de stockage (sensible, latente, thermochimique).

Il s'agit de problèmes dont les équations de conservation associées prennent la forme générale :

$$\underbrace{\mathbf{M}(u_1, u_2, \dots, u_p)}_{\text{Terme d'accumulation}} \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_p \end{bmatrix} = \underbrace{\bar{\mathbf{V}} \mathbf{D}(u_1, u_2, \dots, u_p) \bar{\mathbf{V}}}_{\text{Terme de diffusion}} \begin{bmatrix} f_1(u_1, u_2, \dots, u_p) \\ f_2(u_1, u_2, \dots, u_p) \\ \vdots \\ f_n(u_1, u_2, \dots, u_p) \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \varphi_1(u_1, u_2, \dots, u_p) \\ \varphi_2(u_1, u_2, \dots, u_p) \\ \vdots \\ \varphi_n(u_1, u_2, \dots, u_p) \end{bmatrix}}_{\text{Termes sources}}$$

les champs  $u_i(\mathbf{x}, t)$  (i.e. champs de température, de teneur en eau, de concentration, etc.) décrivant l'état du système à l'instant  $t$ . Les équations ci-dessus, complétés par celles des conditions aux limites, ainsi que celles de fermeture quand nécessaires (i.e. équations d'état), définissent le problème mathématique à résoudre. La résolution de celui-ci fait appel à des méthodes numériques (i.e. différences finies, éléments finis, volumes finis, etc) qui permettent de remplacer le modèle de départ en dérivées partielles (dimension infinie) par un modèle de dimension finie (modèle d'état) comportant :

- Un système d'équations différentielles ordinaires de dimension  $n$  (équations d'état):

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \\ \vdots \\ z_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_1(z_1, z_2, \dots, z_n, \text{sollicitations}) \\ g_2(z_1, z_2, \dots, z_n, \text{sollicitations}) \\ \vdots \\ g_n(z_1, z_2, \dots, z_n, \text{sollicitations}) \end{bmatrix}$$

- Des équations algébriques (équations de sortie) établissant les rapports fonctionnels reliant les valeurs des variables de champ  $u_i(\mathbf{x}, t)$  aux points  $\mathbf{x}_k$  ( $k=1, \dots, n$ ) de la maille de discrétisation choisie aux états  $z_1(t), z_2(t), \dots, z_n(t)$  et aux sollicitations. A chaque  $u_i(\mathbf{x}, t)$ , on associe alors un système d'équations de la forme générale:

$$\begin{bmatrix} u_i(\mathbf{x}_1, t) \\ u_i(\mathbf{x}_2, t) \\ \vdots \\ u_i(\mathbf{x}_n, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(z_1, z_2, \dots, z_n, \text{sollicitations}) \\ h_2(z_1, z_2, \dots, z_n, \text{sollicitations}) \\ \vdots \\ h_n(z_1, z_2, \dots, z_n, \text{sollicitations}) \end{bmatrix}$$

La dimension (voire nombre de degrés de liberté) du modèle d'état est égale au nombre  $n$  de variables d'état  $z_1(t), z_2(t), \dots, z_n(t)$ . La dimension augmente avec :

- l'étendu du système étudié et la complexité de sa géométrie,
- le nombre d'équations en dérivées partielles décrivant les transferts,
- la raideur des non linéarités,
- la précision recherchée

On comprend bien que la dimension puisse devenir vite importante et entraîner des temps de calcul excessifs lors des simulations et/ou des besoins en ressources mémoire significatifs. Il s'agit d'un facteur souvent rédhibitoire pour des applications dans le domaine du bâtiment. Ceci

explique en partie un certain nombre d'omissions et de simplifications qui se pratiquent à l'ordinaire. Par exemple, les modèles d'enveloppe sont souvent linéaires, 1D et ne décrivent que des transferts thermiques par conduction.

Dans ce contexte, les méthodes de réduction pourraient devenir un outil d'intérêt pour enrichir les modèles en termes de phénomènes physiques représentés, pour intégrer la nature non linéaire de certains de ces phénomènes, et pour passer des géométries 1D aux géométries 2D/3D. L'objectif des méthodes de réduction est de remplacer un modèle d'état de dimension  $n$  (voire un modèle définie par des équations en dérivées partielles) par un modèle d'état de dimension  $r \ll n$  permettant d'émuler avec précision le comportement dynamique du système étudié. Autrement dit, on cherche à construire un modèle de la forme :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \vdots \\ s_r(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(s_1, s_2, \dots, s_r, \text{sollicitations}) \\ f_2(s_1, s_2, \dots, s_n, \text{sollicitations}) \\ \vdots \\ f_r(s_1, s_2, \dots, s_r, \text{sollicitations}) \end{bmatrix} \quad r \ll n$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{u}_i(\mathbf{x}_1, t) \\ \tilde{u}_i(\mathbf{x}_2, t) \\ \vdots \\ \tilde{u}_i(\mathbf{x}_n, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{h}_1(s_1, s_2, \dots, s_r, \text{sollicitations}) \\ \tilde{h}_2(s_1, s_2, \dots, s_n, \text{sollicitations}) \\ \vdots \\ \tilde{h}_n(s_1, s_2, \dots, s_r, \text{sollicitations}) \end{bmatrix}$$

tel que la distance entre les sorties  $\tilde{u}_i(\mathbf{x}_k, t)$  et  $u_i(\mathbf{x}_k, t)$  soit minimale et/ou acceptable.

La réduction de modèles a été un sujet de recherche majeur pendant les 50 dernières années, comme ainsi l'atteste l'énorme quantité d'articles publiés. La théorie pour la réduction de modèles linéaires est aujourd'hui bien établie, avec des nombreuses techniques efficaces qui sont utilisées avec succès dans des domaines d'application diverses et variés. Par contre, la réduction de modèles non linéaires est un sujet de recherche ouvert qui excité les communautés des mécaniciens et des thermiciens aujourd'hui.

L'objectif de ce travail est de développer des méthodes efficaces pour la réduction des problèmes de transfert ci-dessus évoqués (diffusion non linéaire). Dans le cadre de Dynasimul, nos effort de recherche se sont centré sur deux problèmes particuliers : la conduction avec changement de phase et le transfert couplé de chaleur et d'humidité dans des milieux poreux capillaires.

## 4.2 INTERÊT DES PROBLEMES CHOISIS ET MODÈLES DE TRANSFERT

L'intérêt des problèmes choisis est en premier lieu d'ordre pratique et répond à des besoins de modélisation du secteur. Par exemple :

- L'intégration de matériaux à changement de phase (MCP) dans l'enveloppe des bâtiments à faible inertie est aujourd'hui envisagée comme étant une solution appropriée pour améliorer le confort d'été et réduire ainsi la demande en

climatisation. Par ailleurs, l'appel croissant à des sources intermittentes d'énergie, tel que l'énergie solaire, attendu et encouragé dans le secteur, porte à s'intéresser aux MCP en tant que support matériel pour le stockage de l'énergie thermique.

- Dans les bâtiments basse consommation, avec des niveaux d'étanchéité élevés, les questions de confort et de qualité de l'air intérieur deviennent prépondérantes. La modélisation des transferts couplés de chaleur et d'humidité à travers l'enveloppe, rarement pratiquée, s'avère alors incontournable.

Bien que pour des raisons différentes, l'intégration de ces types de modèles dans des codes de simulation thermique de bâtiments va entraîner un surplus non négligeable d'équations différentielles ordinaires à intégrer. Dans les cas des MCP (conduction avec changement de phase), parce que le modèle de transfert comporte de non linéarité assez raides (souvent non dérivables), qui obligent à mailler fortement le domaine de définition du problème. Dans le cas de transferts couplés de chaleur et d'humidité, parce qu'on a besoin d'autant de degrés de liberté pour décrire le champ de température que pour décrire celui de teneur en eau.

Le deuxième intérêt des problèmes choisis est d'ordre méthodologique, chacun ayant une particularité quant aux difficultés à surmonter. Pour les problèmes de conduction avec changement de phase, la difficulté est liée à la raideur déjà évoquée des non linéarités (saut de la fonction enthalpie - température à la transition). Dans les problèmes de transferts couplés de chaleur et d'humidité, les non linéarités sont dérivables et souvent bien plus faibles. Par contre, ce problème est défini par deux équations aux dérivées partielles couplées au lieu d'une seule.

#### 4.2.1 MODÈLES DE CONDUCTION AVEC CHANGEMENT DE PHASE

Les MCP considérés sont des matériaux dit à forme stabilisée, souvent des hybrides comportant un matériau hôte poreux, qui donne la stabilité d'ensemble, remplis d'une substance active qui subit des transitions d'état solide-liquide. L'équation de conservation qui gouverne les transferts peut s'écrire (voir **P1-P2** pour les détails) :

$$\frac{\partial H(\mathbf{x},t)}{\partial t} = \nabla [k\nabla T(\mathbf{x},t)]$$

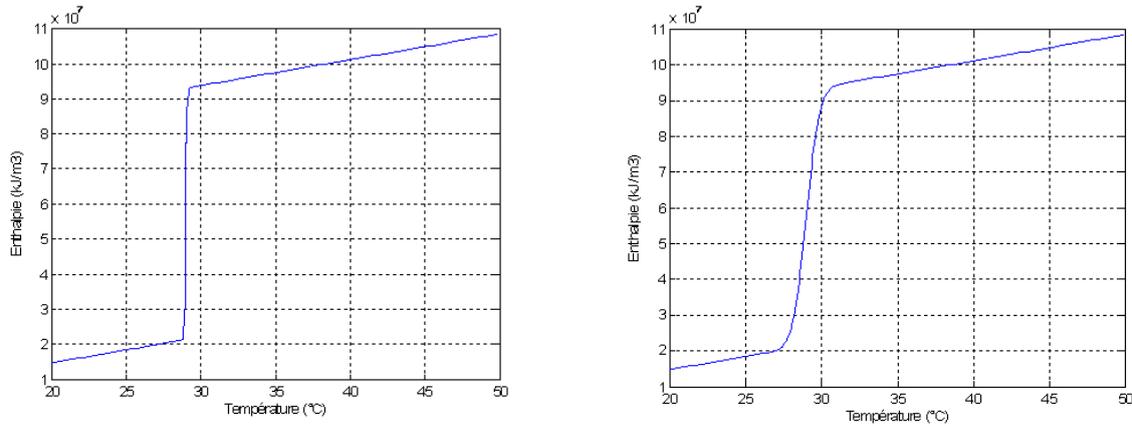
$H(\mathbf{x},t)$  et  $T(\mathbf{x},t)$  représentent, respectivement, l'enthalpie et la température au point  $\mathbf{x}$  à l'instant  $t$ .  $k$  est la conductivité thermique du milieu, qui dépend de l'état (solide/liquide) et donc de la température. A pression constante, la température et l'enthalpie sont reliées par :

$$H = [\rho c_s(1-f) + \rho c_l f]T + \rho L_f f$$

$f$  et  $\rho$  représentent, respectivement, la fraction liquide et la masse volumique.  $c_x$  est la chaleur spécifique, en phase liquide ( $x=l$ ) ou en phase solide ( $x=s$ ), et  $L_f$  représente la chaleur latente de fusion. Pour des transformation monovariantes (changement de phase à température constante), la fraction liquide est donnée par :  $f = \mathcal{H}(T - T_f)$ , où  $\mathcal{H}$  représente la

fonction de Heaviside et  $T_f$  la température de transition (fusion/solidification). Pour des produits subissant une fusion étalée, la fonction  $f = f(T)$  doit se déterminer expérimentalement.

On notera que les non linéarités introduites par le changement de phase se trouvent dans la fonction reliant la fraction liquide à la température, d'une part ; et dans les paramètres thermophysiques caractérisant la diffusion de la chaleur dans le milieu, d'une autre. La figure ci-dessous, montre deux fonctions enthalpie-température et illustre la raideur des non linéarités.



**Figure 1.** Exemples de courbes enthalpie – température pour des MCP à changement de phase monovariant (à gauche) et pour des alliages à fusion étalée (à droite).

#### 4.2.2 MODÈLES DE TRANSFERTS COUPLES DE CHALEUR ET D'HUMIDITÉ

La modélisation des transferts couplés de chaleur et d'humidité dans des milieux poreux capillaires non saturés se fait fréquemment en utilisant la célèbre formulation mathématique proposée par Luikov en 1975. Il s'agit d'un couple d'équations aux dérivées partielles qui tient compte des effets des gradients de température sur la migration d'eau, ainsi que les effets de la migration d'eau sur la température (voir i.e. **P4** pour plus de détail) :

$$\rho_o c \frac{\partial T(\mathbf{x}, t)}{\partial t} = \nabla (\lambda_e \nabla T(\mathbf{x}, t)) + \rho_o L_v \frac{\partial w(\mathbf{x}, t)}{\partial t}$$

$$\rho_o \frac{\partial w(\mathbf{x}, t)}{\partial t} = \nabla (\rho_l D_{Tv} \nabla T(\mathbf{x}, t)) + \nabla (\rho_l D_{wv} \nabla w(\mathbf{x}, t))$$

$T(\mathbf{x}, t)$  et  $w(\mathbf{x}, t)$  sont, respectivement, la température et la teneur pondérale en eau au point  $\mathbf{x}$  à l'instant  $t$ .  $\rho$  représente des masses volumiques ( $o =$  milieu sec ;  $l =$  eau liquide).  $\rho$  et  $\lambda_e$  sont, respectivement, la chaleur spécifique et la conductivité effectives du milieu, et  $L_v$  représente la chaleur de vaporisation de l'eau.  $D_{Tv}$  et  $D_{wv}$  sont des coefficients de diffusion.

L'ensemble des paramètres thermophysiques/thermodynamiques ci-dessus dépendent à la fois de la température et de la teneur en eau, d'où le caractère non linéaire du problème. Néanmoins,

cette fois-ci les non linéarités sont dérivables par tout et souvent bien plus faibles que celles qu'apparaissent dans les problèmes de conduction avec changement de phase.

### 4.3 MÉTHODES DE RÉDUCTION PROPOSÉES

Comme nous l'avons déjà signalé, les méthodes de réduction proposées font partie des méthodes dites spectrales. Le principe de ces méthodes consiste à projeter la solution des équations différentielles partielles régissant les transferts sur les quelques fonctions propres dominantes d'une base appropriée définie sur l'espace de Hilbert associé au domaine de définition du problème.

#### 4.3.1 PRINCIPE DES MÉTHODES SPECTRALES DE RÉDUCTION

Pour mieux illustrer le principe de réduction des méthodes spectrales, laissons nous considérer le modèle d'état de dimension  $n$  suivant :

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{Z}(t)}{dt} &= \mathbf{F}(\mathbf{Z}(t), \mathbf{U}(t)) \\ \mathbf{Y}(t) &= \mathbf{G}(\mathbf{Z}(t), \mathbf{U}(t)) \end{aligned}$$

$\mathbf{Z}(t)$  ( $n \times 1$ ) est le vecteur d'état dont les éléments sont  $z_1(t), z_2(t), \dots, z_n(t)$ .  $\mathbf{Y}(t)$  ( $p \times 1$ ) est le vecteur des sorties. Il contient, par exemple, les valeurs de température et de teneur en eau sur l'ensemble des points de maille de discrétisation.  $\mathbf{U}(t)$  ( $q \times 1$ ) est le vecteur des sollicitations, qui décrit l'évolution en temps de l'ensemble de variables agissant sur la frontière du domaine.  $\mathbf{F}$  et  $\mathbf{G}$  sont des vecteurs de dimension  $n \times 1$  dont les éléments sont de fonctions de la forme  $f_i(z_1, z_2, \dots, z_n, \text{sollicitations})$  et  $g_i(z_1, z_2, \dots, z_n, \text{sollicitations})$ , respectivement.

Soit  $\mathbf{P} = [\mathbf{p}_1 \ \mathbf{p}_2 \ \dots \ \mathbf{p}_n]$  une matrice ( $n \times n$ ) contenant des vecteur  $\mathbf{p}_i$  linéairement indépendants constituant un repère (base complète) sur lequel on peut projeter de manière unique le vecteur d'état  $\mathbf{Z}(t)$ . Souvent on définit  $\mathbf{P}$  de façon à ce quelle vérifie  $\mathbf{P}^t \mathbf{P} = \mathbf{I}$  (vecteurs orthonormaux) ou  $\mathbf{P}^t \mathbf{P} = \text{matrice diagonale}$  (vecteurs orthogonaux).

Considérons maintenant le sous-espace de dimension  $r \ll n$  engendré par  $\mathbf{P}_r = [\mathbf{p}_1 \ \mathbf{p}_2 \ \dots \ \mathbf{p}_r]$ . Le résultat de projeter le modèle d'état ci-dessus (dimension  $n$ ) sur  $\mathbf{P}_r$  est un modèle d'état de dimension  $r \ll n$  de la forme :

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{S}(t)}{dt} &= \tilde{\mathbf{F}}(\mathbf{S}(t), \mathbf{U}(t)) \\ \tilde{\mathbf{Y}}(t) &= \tilde{\mathbf{G}}(\mathbf{S}(t), \mathbf{U}(t)) \end{aligned}$$

avec  $\mathbf{Z}(t) = \mathbf{P}_r \mathbf{S}(t)$ ,  $\tilde{\mathbf{F}}(\mathbf{S}(t), \mathbf{U}(t)) = \mathbf{P}_r^t \mathbf{F}(\mathbf{P}_r \mathbf{S}(t), \mathbf{U}(t))$  et  $\tilde{\mathbf{G}}(\mathbf{S}(t), \mathbf{U}(t)) = \mathbf{P}_r^t \mathbf{G}(\mathbf{P}_r \mathbf{S}(t), \mathbf{U}(t))$ .

En supposant que le choix de  $\mathbf{P}$  et de  $\mathbf{P}_r$  est pertinent, on pourra utiliser le modèle d'état ci-dessus pour effectuer des simulations tout en garantissant des erreurs d'approximation acceptables ( $\|\mathbf{Y}(t) - \tilde{\mathbf{Y}}(t)\| < \varepsilon$ ).

### 4.3.2 SPÉCIFICITÉS DES MÉTHODES DÉVELOPPÉES

Les méthodes développées se sont inspirées de la méthode dite POD (Proper Orthogonal Decomposition, voir section 4), largement utilisée dans le domaine de la mécanique des fluides. Il s'agit d'une méthode spectrale dont la base de projection (matrice  $\mathbf{P}$ ) est construite comme suit :

- Avec des choix pertinents de sollicitations, le modèle d'état complet (dimension  $n$ ) est utilisé pour simuler la réponse  $\mathbf{Y}(t)$  du système.
- On calcule ensuite la matrice d'énergie de  $\mathbf{Y}(t)$  :  $\mathbf{W} = \int_{t=0}^{t_{fin}} \mathbf{Y}(t)\mathbf{Y}^t(t)dt$ . Il s'agit d'une matrice symétrique, définie positive.
- Enfin, on fait la décomposition spectrale de la matrice d'énergie :  $\mathbf{W} = \mathbf{P}\mathbf{\Sigma}\mathbf{P}^t$ . Les vecteurs propres de  $\mathbf{W}$  se retrouvent dans la matrice  $\mathbf{P}$ , qui vérifie  $\mathbf{P}^t\mathbf{P} = \mathbf{I}$ . La matrice  $\mathbf{\Sigma} = \text{diag}[\sigma_1^2 \ \sigma_2^2 \ \dots \ \sigma_n^2]$  contient les valeurs propres associées. Ils vérifient :  $\sigma_1^2 \geq \sigma_2^2 \geq \dots \geq \sigma_n^2 \geq 0$ .

La force de la méthode réside dans la capacité qu'elle a de produire des approximations de grande qualité à très faible dimension. En fait, on peut démontrer que l'approximation de  $\mathbf{Y}(t)$  obtenue en projetant  $\mathbf{Y}(t)$  sur  $\mathbf{P}_r$  :  $\mathbf{Y}_r(t) = \mathbf{P}_r\mathbf{Z}(t)$ , est une approximation (dimension  $r$ ) optimale au sens de toute norme unitaire de l'erreur d'approximation. Elle vérifie  $\|\mathbf{Y}(t) - \mathbf{Y}_r(t)\| = \|\sigma_1^2 \ \sigma_2^2 \ \dots \ \sigma_n^2\|$  et représente une limite théorique à la réduction. En pratique on constate que les simulations produites avec les modèles réduits issus de la POD convergent rapidement vers cette limite théorique au fur et à mesure que la dimension du modèle augmente ( $\tilde{\mathbf{Y}}(t) \rightarrow \mathbf{Y}_r(t)$ ).

L'inconvénient majeur de la méthode POD est le temps de calcul nécessaire pour construire la matrice  $\mathbf{P}$ , qui exige d'effectuer au préalable des simulations avec le modèle d'état complet. A peu que la dimension de celui-ci soit élevée, la procédure de réduction devient assez lourde et ne se justifie que si l'on prévoit un usage intensif ultérieur du modèle réduit.

Pour nous affranchir de ce problème, nous avons développé des méthodes que l'on pourrait présenter comme étant des « méthodes POD sans simulation ». La matrice d'énergie  $\mathbf{W}$  est obtenue (approchée) à partir d'une équation de Lyapunov faisant intervenir les opérateurs de transfert du problème. On peut montrer que les modèles d'état associés aux problèmes étudiés sont de la forme :

$$\begin{aligned}\frac{d\mathbf{Z}(t)}{dt} &= \mathbf{A} \mathbf{Z}(t) + \mathbf{B} \mathbf{U}(t) \\ \mathbf{Y}(t) &= \mathbf{C} \mathbf{Z}(t)\end{aligned}$$

les matrices  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$  et  $\mathbf{C}$  étant fonction des états. La matrice d'énergie de  $\mathbf{Y}(t)$  est  $\mathbf{W} = \mathbf{C} \mathbf{W}_z \mathbf{C}'$ , où  $\mathbf{W}_z$  représente la matrice d'énergie de  $\mathbf{Z}(t)$ . On a montré que l'équation de Lyapunov :

$$\mathbf{A}_o \mathbf{W}_z + \mathbf{W}_z \mathbf{A}_o' + \mathbf{B}_o \mathbf{Q} \mathbf{B}_o' = \mathbf{0}$$

procure une approximation adéquate de  $\mathbf{W}_z$ . Les matrices  $\mathbf{A}_o$  et  $\mathbf{B}_o$  sont des matrices constantes que l'on peut dériver aisément des matrices  $\mathbf{A}$  et  $\mathbf{B}$  (voir publications). La matrice  $\mathbf{Q}$  sert à tenir compte du contenu spectral des sollicitations ainsi que de leurs corrélations croisées.

Le passage des matrices  $\mathbf{A}$  et  $\mathbf{B}$  aux matrices  $\mathbf{A}_o$  et  $\mathbf{B}_o$  exige d'un certain nombre de manipulations des équations aux dérivées partielles de départ.

Par exemple, les problèmes de conduction avec changement de phase vont être réécrits sous la forme d'un problème de conduction à conductivité et capacité thermiques constantes avec un terme source dépendant de la température et qui regroupe l'ensemble de termes décrivant le changement de phase. Le détail de ceci peut se trouver dans les articles **P1** (1D, conductivité thermique constante), **P2** (2D/3D, conductivité thermique constante) et **P6** (2D/3D, conductivité thermique dépendant de l'état).

Pour les problèmes de transferts couplés de chaleur et d'humidité,  $\mathbf{A}_o$  et  $\mathbf{B}_o$  découlent d'un processus à deux étapes où les équations aux dérivées partielles de départ sont d'abord linéarisées et ensuite découplées. L'intérêt du découplage se mesure en termes de temps de calcul. En effet, on montre que ce faisant on divise par deux la dimension de l'équation de Lyapunov à résoudre. Le détail de cette partie peut se trouver dans les articles **P4** (1D, réduction du modèle linéaire de Luikov), **P3** (2D/3D, réduction du modèle linéaire de Luikov) et **P5** (2D/3D, réduction du modèle non linéaire).

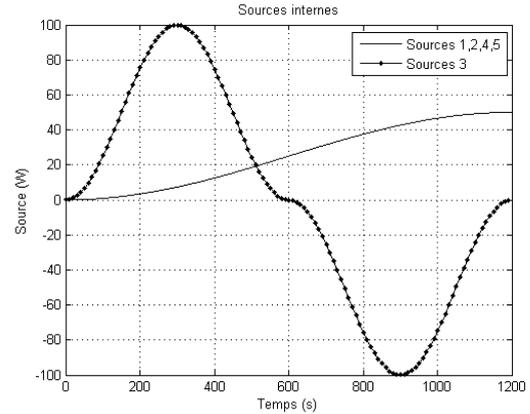
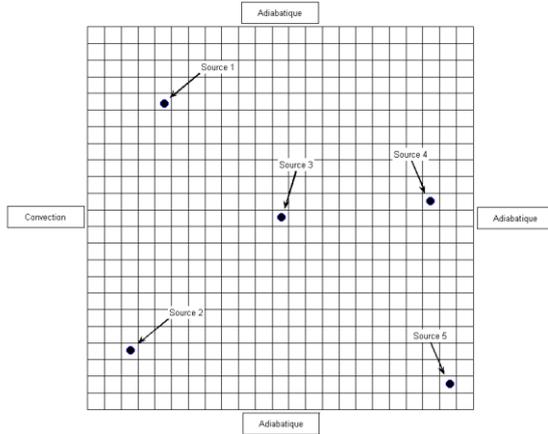
## 4.4 EXEMPLE DE RESULTATS

Les méthodes de réduction proposées ont été largement testées. Nous présentons ici brièvement deux exemples qui permettent d'apprécier leurs performances. L'ensemble de tests numériques réalisés peut se trouver dans les rapports Dynasimul précédents et dans les publications déjà citées.

### 4.4.1 CHANGEMENT DE PHASE

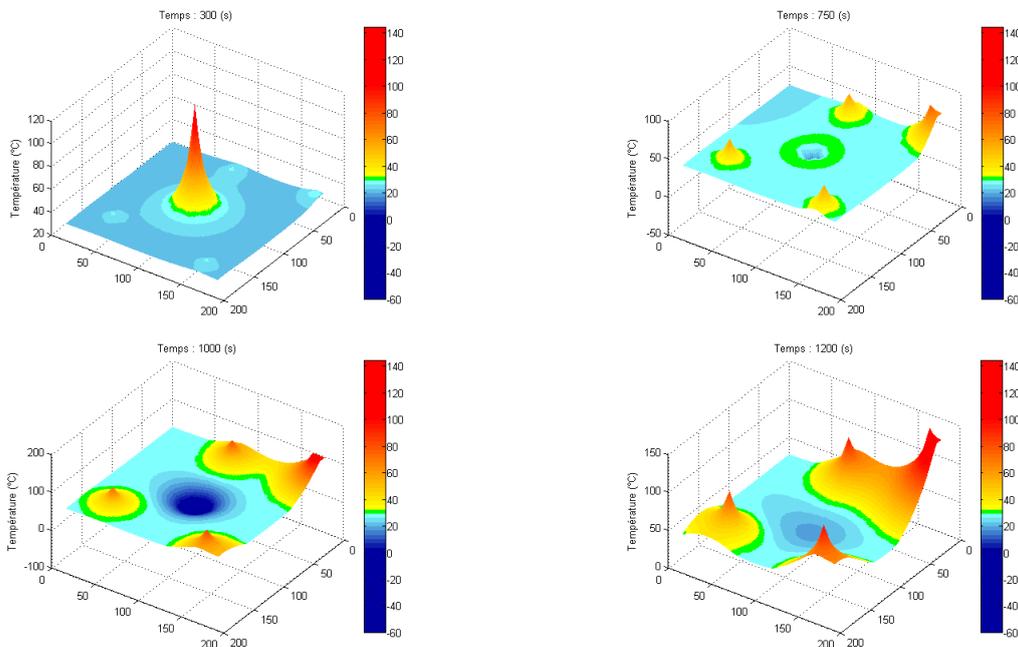
Nous présentons ici les résultats correspondant à un problème de fusion/solidification d'une plaque ( $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ ). Comme montré dans la Fig. 2, la plaque est soumise à des conditions aux limites convectives coté gauche et elle est parfaitement isolée par ailleurs. Elle comporte cinq sources de chaleur dont l'évolution des intensités respectives est représentée dans la Fig. 3. On

notera que l'intensité de la source au centre est tantôt positive (chauffage) tantôt négative (refroidissement), ce qui provoquera la fusion puis la solidification du matériaux à certains endroits. Les propriétés physiques du matériau à changement de phase sont celles d'une paraffine (voir **P1**).



**Figure 2.** Problème de conduction avec sources et changement de phase étudiée. **Figure 3.** Evolution en temps de l'intensité des sources de chaleur.

La méthode de volumes finis a été utilisée pour discrétiser les équations de conservation de l'énergie du problème sur une maille de  $23 \times 23$  volumes de contrôle. Le modèle d'état de référence comporte alors 529 e.d.o. Il a été utilisé pour simuler l'évolution thermique de la plaque sur l'intervalle de temps  $0 \leq t \leq 1200 \text{ s}$ , en supposant la plaque initialement à température uniforme égale à  $20^\circ\text{C}$ . La température de l'air en contact avec la plaque est maintenue à  $20^\circ\text{C}$  tout au long de l'expérience.



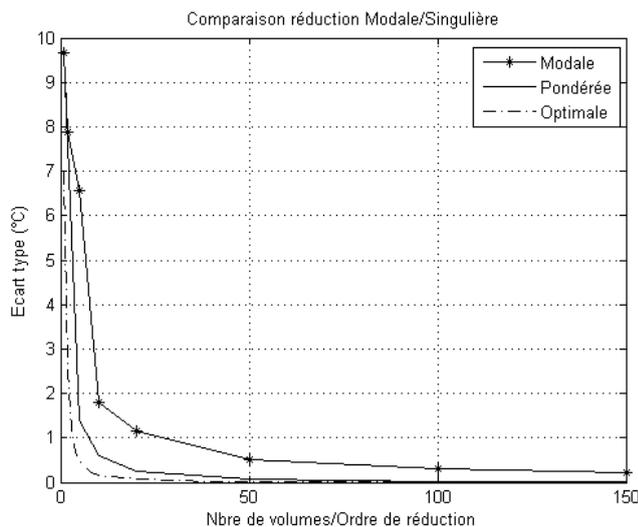
**Figure 4.** Champ thermique dans la plaque aux instants  $t = 300 \text{ s}$  (en haut, à gauche),  $t = 750 \text{ s}$  (en haut, à droite),  $t = 1000 \text{ s}$  (en bas, à gauche) et  $t = 1200 \text{ s}$  (en bas, à droite).

La Fig. 4 montre le champ thermique dans la plaque à différents temps. On y constate la richesse du problème choisi, avec plusieurs fronts de fusion (voir solidification) avançant (voire reculant) simultanément depuis les points d'emplacement des sources.

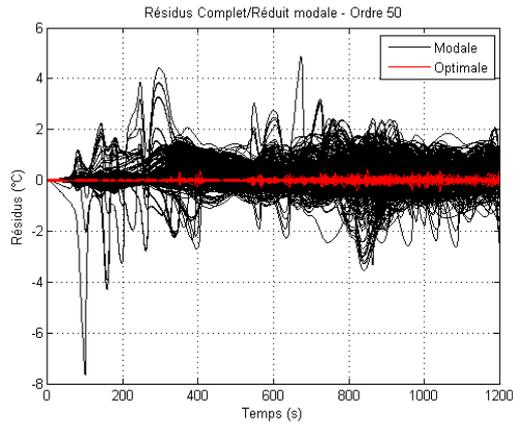
Des modèles réduits de dimensions  $r=1,2,\dots,150$  ont été calculés par deux méthodes différentes :

- Par projection du modèle de référence sur la base modale tronquée aux  $r$  vecteurs propres associés aux constantes de temps les plus longues (modèles modaux réduits par la suite)
- Par la méthode proposée dans ce travail ; c'est-à-dire, par projection du modèle de référence sur la base singulière pondérée et tronquée à ses  $r$  premiers vecteurs propres (modèles singuliers réduits par la suite).

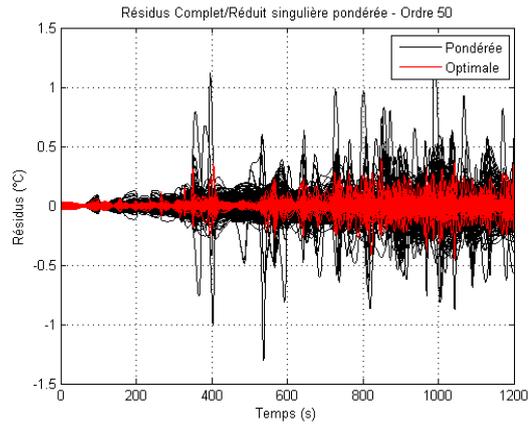
La qualité des modèles réduits ainsi obtenus est jugée dans un premier temps à travers les écarts types observés entre les simulations issues du modèle de référence et celles des modèles réduits. Les résultats obtenus, pour des ordres de réduction allant de 1 à 150, sont reportés dans la Fig. 5. On y représente les écarts type correspondants aux modèles modaux réduits (symboles) et aux modèles singuliers réduits (ligne continue), ainsi que la limite théorique de réduction du problème. Ce graphique met en évidence les avantages de la méthode de réduction proposée face à une réduction par troncature de la base modale. En effet, la vitesse de convergence des modèles réduits issus de la base singulière permet d'approcher rapidement la solution optimale.



**Figure 5.** Ecart type observés entre les simulations du modèle de référence et celles des modèles réduits aux ordres  $r=1,2,\dots,150$ .



**Figure 6.** Evolution thermique de la plaque : modèle de référence (lignes en continue) et modèle réduit à l'ordre 4 par troncature de la base modale.

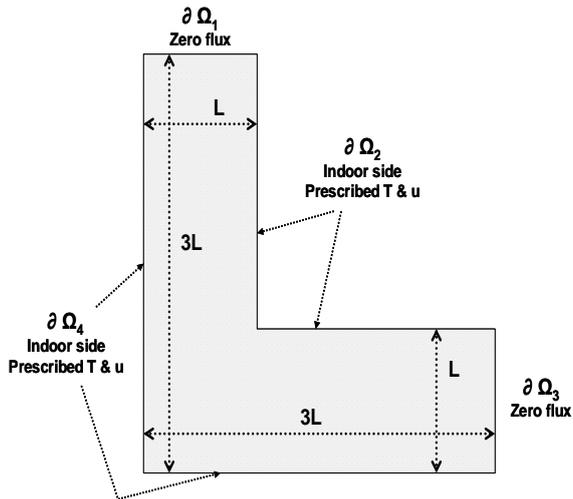


**Figure 7.** Evolution thermique de la plaque : modèle de référence (lignes en continue) et modèle réduit à l'ordre 4 par troncature de la base singulière.

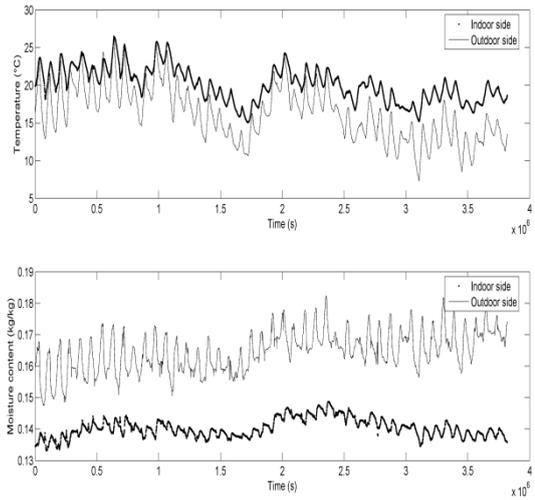
La figures 6 et 7 montrent en rouge les écarts (résidus) observées entre  $T(t)$  et  $\tilde{T}_{optimal}(t)$  avec  $r = 50$ . En noir, nous retrouvons les résidus correspondants au modèle modal réduit à l'ordre 50 (Fig. 6) et au modèle de dimension 50 issu de notre méthode (Fig. 7). On constate que le modèle modal induit des écarts qui sont la plus part du temps dans l'intervalle  $[-4^{\circ}\text{C} +4^{\circ}\text{C}]$ , avec des valeurs maximales dépassant  $7^{\circ}\text{C}$  ; tandis que les écarts du notre modèle se placent dans l'intervalle  $[-1^{\circ}\text{C} +1^{\circ}\text{C}]$  et sont proches des écarts correspondant à  $\tilde{T}_{optimal}(t)$ .

#### 4.4.2 TRANSFERT COUPLÉ DE CHALEUR ET D'HUMIDITÉ

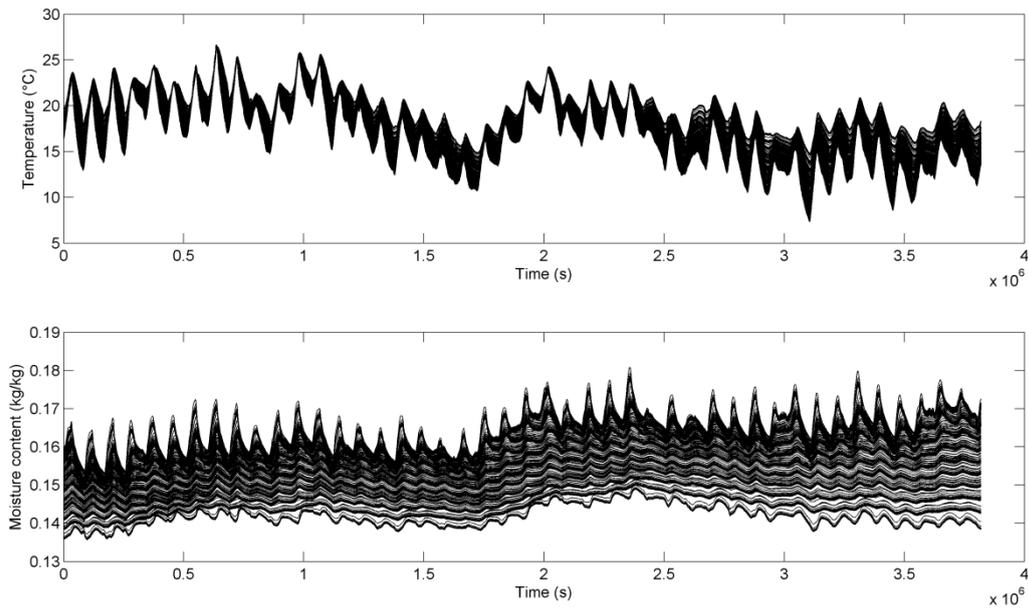
Nous présentons ici les résultats obtenus pour un problème bidimensionnel de transfert couplé de chaleur et d'humidité. La géométrie du problème est représentée dans le Fig. 8, tandis que l'évolution en temps des sollicitations associées est décrite dans la Fig. 9. Les propriétés thermophysiques du milieu sont celles d'un bois massif (voir **P3**). La Fig. 10 montre la réponse en température et en teneur en eau simulée à l'aide d'un modèle de référence comportant 4000 équations différentielles ordinaires. La méthode de réduction développée a été utilisée pour générer des modèles de très faible dimension ( $r=4,6,8,10$ ). La Fig. 11 montre les écarts en température ( $T(x, y, t) - \tilde{T}(x, y, t)$ ) et les écarts en teneur en eau ( $u(x, y, t) - \tilde{u}(x, y, t)$ ) observées entre les simulations issues du modèle de référence (ordre 4000) et celles du modèle réduit d'ordre 10.



**Figure 8.** Domaine de définition du problème.



**Figure 9.** Evolution en temps de la température et de la teneur en eau imposées de part et d'autre de la paroi.



**Figure 10.** Réponse du système simulée avec le modèle de référence (4000 edo) : Températures en haut ; Teneurs en eau en bas. Une courbe par nœud de la maille de discrétisation.

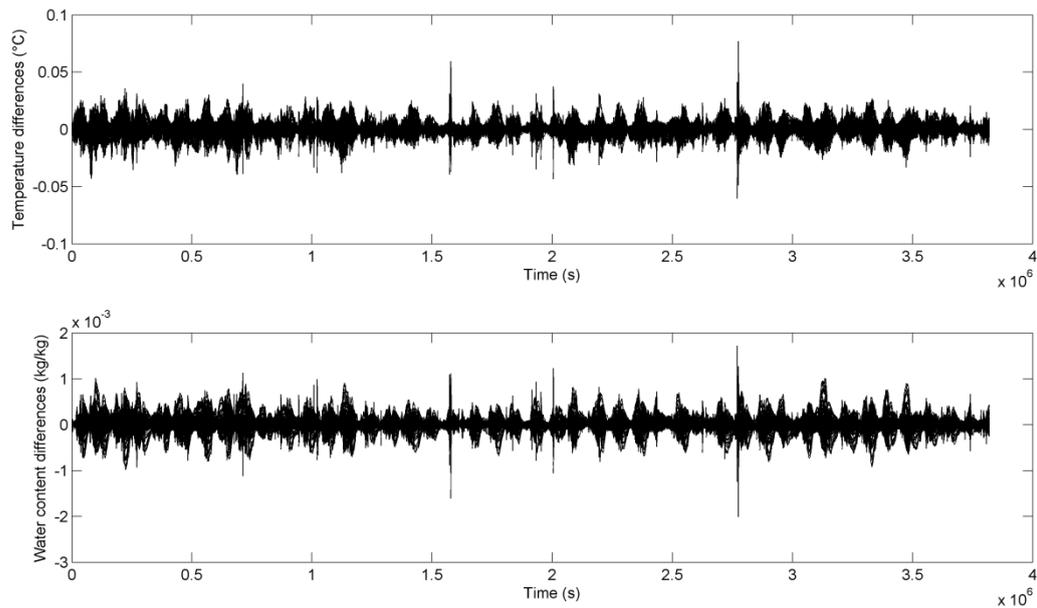


Figure 11. Ecarts en température (en haut) et les écarts en teneur en eau (en bas) observées entre les simulations issues du modèle de référence (ordre 4000) et celles du modèle réduit d'ordre 10

## 5 Application de la méthode P.O.D à l'équation de conservation de l'énergie dans l'air

*LEPTIAB: Alain SEMPEY, Emmanuel BOZONNET, Christian INARD*

Dans cette synthèse, nous présentons rapidement le travail réalisé dans le cadre du volet 3 par le LEPTIAB. Pour obtenir des résultats et une analyse plus détaillés, le lecteur pourra se reporter aux rapports précédents du projet, à la publication ci-dessus (vas 2D) et au complément d'information fourni en annexe.

A. SEMPEY, C. INARD, C. GHIAUS and C. ALLERY (2008). Fast simulation of temperature distribution in air conditioned rooms by using proper orthogonal decomposition, *Building and Environment* (doi:10.1016/j.buildenv.2008.03.004)

### 5.1 OBJECTIFS ET INTÉRÊT

Les modèles utilisés actuellement en thermique du bâtiment, qu'ils soient nodaux (température homogène) ou zonaux, sont basés sur une simplification géométrique ou sur une dégradation des équations décrivant les phénomènes physiques : les équations de Navier Stokes et l'équation de conservation de l'énergie. Leur précision et d'ores et déjà mise en défaut par certaines applications (simulation énergétique d'un bâtiment, contrôle en temps réel de la température d'un local,...). D'autre part, nous pouvons légitimement nous interroger sur leur

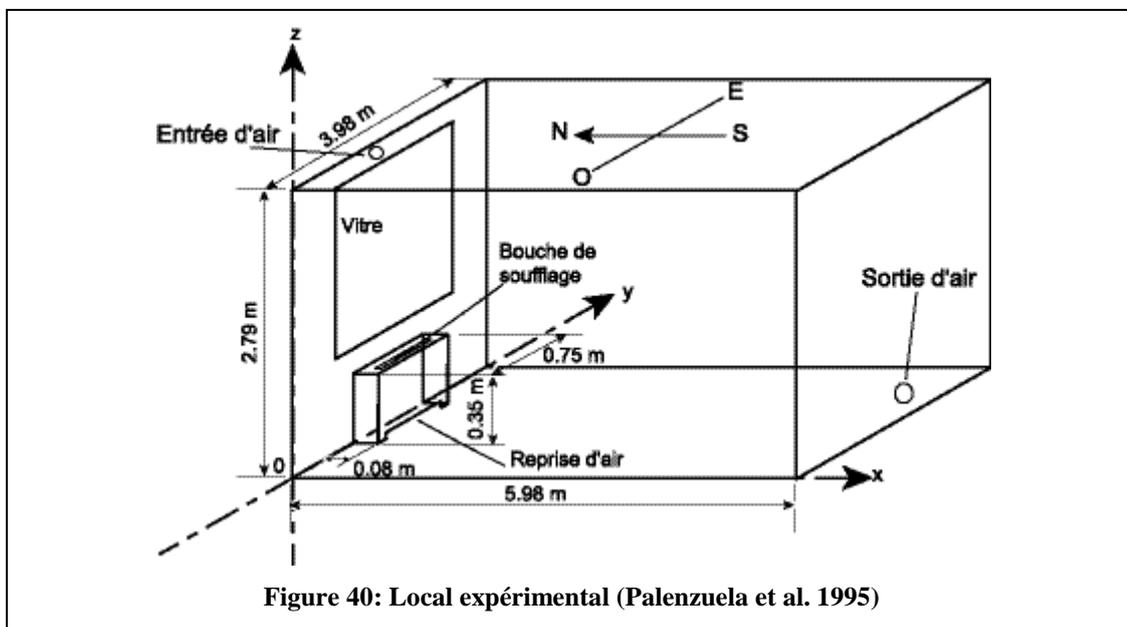
capacité à répondre aux exigences accrues tant en terme de consommation énergétique que de confort.

A l'opposé, l'augmentation de la puissance et de la rapidité des machines de calcul a permis, ces dernières années, un fort développement des logiciels de CFD (Computational Fluid Dynamic). Associés à des résultats expérimentaux pour leur validation, il est possible d'obtenir des résultats relativement précis dans un certain nombre de cas. Seulement, les modèles CFD exigent des discrétisations spatiale et temporelle très fines qui conduisent à des modèles d'ordre très élevés et à des temps de calculs prohibitifs. Ces modèles sont donc peu adaptés d'une part à des applications de type ingénierie (conception) et d'autre part à de nouveaux besoins tels que le diagnostic énergétique.

Partant d'un modèle détaillé de type CFD, notre objectif consiste à obtenir un modèle d'ordre faible de la distribution de température, c'est-à-dire un modèle décrivant précisant la physique tout en étant résolvable en un temps relativement court. Nous nous appuyons d'une part sur l'utilisation de la décomposition orthogonale aux valeurs propres (ou POD pour Proper Orthogonal Decomposition) qui est une méthode mathématique de réduction de modèles, et d'autre part sur l'écriture des modèles dans l'espace d'état pour leur exploitation. Dans nos travaux antérieurs (Sempey 2007), nous avons déjà montré la faisabilité d'une telle démarche pour un cas bidimensionnel. A présent, nous nous proposons d'appliquer cette méthodologie au cas d'un local expérimental pour lequel nous disposons de données pertinentes.

## 5.2 LOCAL EXPÉRIMENTAL

Nous nous proposons de comparer les résultats numériques à des résultats expérimentaux obtenus dans une cellule expérimentale du COSTIC (Figure 40), équipée d'un convecteur électrique et de chambres de garde permettant de contrôler la température extérieure des parois.



### 5.3 DÉMARCHE GÉNÉRALE ET SYNTHÈSE DES RÉSULTATS

La distribution de température dans un local peut être obtenue en résolvant l'équation de conservation de l'énergie, ici sans terme source :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \mathbf{grad} \theta = \text{div}(a_{\text{eff}} \mathbf{grad} \theta), \quad \text{Équation 1}$$

Notre démarche s'appuie alors sur 3 étapes décrites dans les sous sections suivantes.

#### 5.3.1 CONSTRUCTION D'UN MODÈLE D'ORDRE ÉLEVÉ, NOTÉ MOE

Pour résoudre l'équation 1, il est nécessaire d'obtenir un champ de vitesse  $\mathbf{v}$ , la diffusivité effective  $a_{\text{eff}}$  et les coefficients d'échange superficiel aux parois  $h$  en résolvant les équations de Navier Stokes, l'équation de conservation de l'énergie et un modèle de turbulence avec un logiciel CFD.

L'équation 1 est ensuite discrétisée spatialement en utilisant le maillage retenu pour les simulations CFD. Mis sous la forme d'un système d'état, le modèle devient (Ghiaus et al. 1999) :

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{A}\boldsymbol{\theta} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\boldsymbol{\theta} + \mathbf{D}\mathbf{u} \end{cases} \text{ avec } \dot{\boldsymbol{\theta}} = \frac{d\boldsymbol{\theta}}{dt}, \quad \text{Équation 2}$$

où :

- $\boldsymbol{\theta}$  est un vecteur contenant les températures de toutes les cellules du maillage,
- $\mathbf{u}$  le vecteur des entrées contenant les températures de paroi et la température de soufflage de l'émetteur,
- $\mathbf{y}$  le vecteur d'observation contenant les seules températures observées,
- $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$  et  $\mathbf{D}$  les matrices d'état. Dans ce cas, la matrice  $\mathbf{D}$  est nulle.

L'ordre de ce modèle correspond à la taille du maillage, c'est donc un modèle d'ordre élevé. Sa résolution est particulièrement difficile voir impossible en raison de la taille du maillage (environ 500000 mailles). Il a donc été nécessaire de construire un cas d'étude simple en 3D afin de valider ce modèle. Il s'agit d'un cube de 10cm de côté, avec un maillage composé de 10 mailles dans chaque direction, un champ de vitesse et des conditions aux limites imposées.

Enfin, il a été considéré que la température de soufflage du convecteur pouvait varier de 20 à 52°C provoquant des variations non négligeables du champ de vitesse et de la diffusivité effective. Un MOE a donc été créé pour 9 températures de soufflage (20°C, 24°C, ..., 52°C).

### 5.3.2 CONSTRUCTION D'UN MODÈLE D'ORDRE RÉDUIT, NOTÉ MOR

La décomposition orthogonale est utilisée pour réduire l'ordre du MOE. Elle permet d'obtenir à partir d'un échantillonnage temporel de la température, une expression de la forme :

$$\theta(\mathbf{x}, t) \approx \theta_m(\mathbf{x}) + \sum_{n=1}^m b_n(t) \varphi_n(\mathbf{x}), \quad \text{Équation 3}$$

où  $m$  est l'indice de troncature. Les modes propres  $\varphi_n(\mathbf{x})$  forment une base orthogonale. En substituant l'expression (3) au sein de la première équation du MOE, puis en projetant l'expression ainsi obtenue sur la base, on obtient une équation d'état. L'écriture de l'équation 3 sous forme matricielle permet de former un système d'état en rajoutant l'équation d'observation.

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{b}} = \mathbf{A}_r \mathbf{b} + \mathbf{B}_r \mathbf{u} \\ \boldsymbol{\theta} = \mathbf{C}_r \mathbf{b} + \mathbf{D}_r \mathbf{u} + \boldsymbol{\theta}_m \end{cases}, \quad \text{Équation 4}$$

où :

- $\mathbf{b}$  est un vecteur contenant les coefficients temporels de la décomposition POD,
- $\mathbf{A}_r$  et  $\mathbf{B}_r$  les matrices d'état issues de la projection des matrices  $\mathbf{A}$  et  $\mathbf{B}$ .

Ce modèle d'ordre  $m$  est constitué d'une équation différentielle permettant de calculer les coefficients temporels  $\mathbf{b}$  en fonction des entrées  $\mathbf{u}$ , et d'une équation permettant de reconstruire les températures. Dans notre cas, seulement 4 modes sont pour reconstruire la distribution de température. Le modèle obtenu est donc d'ordre 4, soit un ordre très faible, tout en conservant une description détaillée de la distribution des températures. Pour tenir compte de la variation des conditions de soufflage et donc du champ de vitesse, une interpolation est réalisée à chaque pas de temps sur les matrices d'état réduites ( $\mathbf{A}_r$  et  $\mathbf{B}_r$ ). Malheureusement, cette interpolation n'a pas permis d'obtenir des résultats concluants puisque la résolution de l'équation 4 montre une instabilité.

Ce comportement peut s'expliquer par la non représentativité du champ de vitesse en régime permanent avec son évolution en régime transitoire. En effet, il y a sans doute une trop grande différence entre le champ de vitesse réel à un instant, c'est-à-dire non établi, et le régime permanent obtenu pour les mêmes conditions de soufflage.

## 5.4 CONCLUSION

En raison de l'instabilité du modèle d'ordre réduit, il n'a pas été possible de comparer sa réponse à celle mesurée du local réel. Néanmoins les mesures ont permis de caler les simulations CFD afin de s'assurer que les résultats des simulations CFD étaient réalistes. A partir de ces résultats, il a alors été possible de démontrer qu'un faible nombre de modes étaient nécessaires pour représenter une distribution de température en 3D, ce qui nous a conduits à un système dynamique d'ordre 4. C'est un ordre extrêmement faible qui pourra permettre la

résolution en temps réel si le problème d'instabilité est résolu. Une solution à ce problème a déjà été mise en œuvre dans des travaux précédents. Elle nous obligeait à distinguer plusieurs configurations de la distribution de températures et demandait donc une certaine expertise de l'utilisateur. Une nouvelle approche est maintenant testée au LEPTIAB dans le cadre d'une thèse. Il s'agit de résoudre en temps réel l'équation de conservation de l'énergie mais également les équations de Navier Stokes, supprimant ainsi toute approximation du champ de vitesse par des images en régime permanent. Enfin, il reste une dernière difficulté à surmonter. C'est celle qui consiste à obtenir à partir de simulations dynamique des résultats réalistes et suffisamment convergés pour pouvoir appliquer la POD. Depuis le début du projet DYNASIMUL, plusieurs équipes se sont emparées de cette problématique à travers des thèses ou encore un projet exploratoire du CNRS (ADNBati).

## 6 Modèles LES pénalisés

*LPBS : Alain BASTIDE*

Les travaux du LPBS au sein du volet 3 du projet portent sur la modélisation aéraulique. Le but est de proposer de modèles ou des méthodes permettant d'émuler convenablement et avec de coûts de calcul raisonnables le mouvement de l'air à l'intérieur et aux alentours d'un bâtiment ouvert. Lors de la première année du projet, un travail d'analyse de l'existant et d'exploration de pistes nouvelles a été effectué (voir 1<sup>er</sup> rapport annuel du projet Dynasimul). Ensuite, nos recherches ont pris une direction précise et se sont concrétisés dans ce que nous appelons aujourd'hui *modèles pénalisés de quantité de mouvement*. Nous présentons ici brièvement l'essentiel de nos travaux. Pour le détail, on peut se reporter aux publications suivantes :

A. BASTIDE, L. STEPHAN, E. WURTZ, E. PALOMO, Design of penalized models for buildings : the differentially heated cubical enclosure, *Int. J. of Heat and Mass Transfer* (soumission prévue dans les prochains mois).

A. BASTIDE, L. STEPHAN, E. PALOMO, E. WURTZ, Design of penalized models for buildings : an isotherm building model, *IndoorAir* (soumission prévue dans les prochains mois).

### 6.1 L'OBJECTIF

La modélisation du transport de l'énergie, de la masse et de la quantité de mouvement dans l'air est un des problèmes majeurs liés à la simulation thermique/énergétique des bâtiments. La quête de modèles appropriés, offrant un compromis raisonnable entre justesse et temps de calcul, se poursuit depuis des années. Ce travail porte sur la modélisation d'écoulements isothermes dans des bâtiments ouverts soumis au vent. Par conséquent, seul l'équation de transport de la quantité de mouvement est prise en considération.

Il est évident que l'écoulement d'air est lié aux conditions aux limites et initiales du problème, ainsi qu'à la forme du bâtiment. La qualité de la solution proposée via la

modélisation/simulation sera, quant à elle, fortement liée à la dégradation que l'on a fait subir aux équations de Navier-Stokes. Parmi les approches les plus usitées dans le domaine du bâtiment, on peut citer (de plus à moins dégradés) :

- Les modèles nodaux en pression ;
- Les modèles zonaux en pression ;
- Les modèles zonaux à quantité de mouvement ;
- Les modèles LES (Large Eddy Simulation)

L'expérience acquise au cours des années montre que :

- Les modèles nodaux et zonaux, dès part leur simplicité, ne sont pas toujours d'application. En général, le transport de l'énergie cinétique pose de problèmes. Par ailleurs, ils comportent un certain nombre de paramètres dont le sens physique est discutable et dont la valeur doit être déterminée par calage sur des simulations de référence obtenues par des modèles bien plus complexes.
- Les modèles LES, bien plus sophistiqués et proches des équations de Navier-Stokes, sont quant à eux trop longs et coûteux en temps de calcul. Leur utilisation est cantonnée à la recherche. Il est inimaginable qu'on puisse les intégrer dans des outils métier.

L'objectif de ce travail est de proposer de modèles de transport de quantité de mouvement qui soient d'exécution rapide, qui ne comportent pas des paramètres ajustables et qui incluent suffisamment de connaissance pour que leur champ d'application soit large.

L'idée centrale qui a guidé nos développements est similaire à celle utilisée par le passé pour développer les modèles LES. Il s'agit de dégrader le modèle de Navier-Stokes en y rajoutant des termes nouveaux (termes de pénalisation) dans le but de pouvoir grossir significativement la taille des mailles de discrétisation sans induire pour autant une dégradation excessive de la solution.

## **6.2 PRÉSENTATION DE LA DÉMARCHE GÉNÉRALE**

Les grandes lignes de la démarche de développement suivie, peuvent être résumée de la sorte :

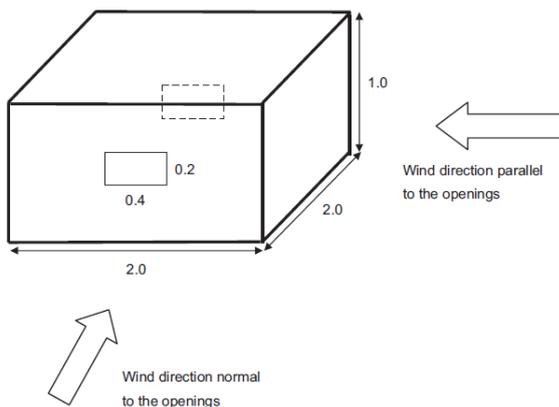
1. Sélection d'un cas test d'intérêt et utilisation de la modélisation LES pour la génération de données de référence. (voir section 5.3).
2. Proposition de modèles pénalisés en partant du modèle de Navier-Stokes. Pour ce faire, les équations de Navier-Stokes sont résolues sur un maillage « grossier » et les données produites sont comparées aux données de référence dans le but d'identifier des termes de pénalisation potentiellement utilisables (voir section 5.4.1).

3. Confrontation des modèles pénalisés aux données de référence et choix du modèle ayant les performances meilleures (voir section 5.4.2).

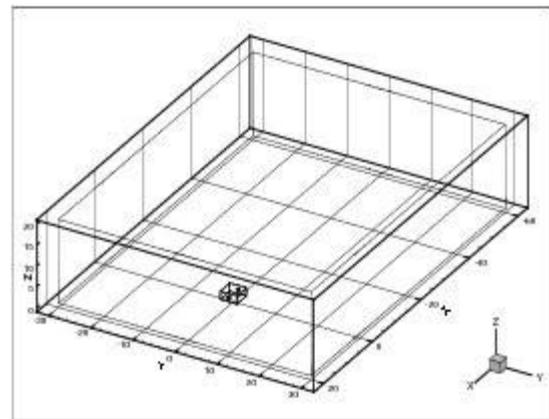
## 6.3 LE CAS TEST ET LA MODÉLISATION LES POUR LA GÉNÉRATION DE DONNÉES DE RÉFÉRENCE

### 6.3.1 LE CAS TEST

On a choisi comme cas test le cas d'un bâtiment ouvert qui a fait l'objet d'un benchmark international. Le vent est le seul moteur des écoulements. La Fig. 1 esquisse la géométrie du bâtiment, tandis que la Fig. 2 montre le domaine de simulation adopté.



**Figure 1.** Géométrie du bâtiment.



**Figure 2.** Domaine de simulation.

L'intérêt d'un tel cas d'étude est multiple :

- L'écoulement est largement complexe, comportant des zones cisailées, des zones rotationnelles et des zones irrotationnelles (voir Fig. 3).
- Il s'agit d'un cas représentatif et important pour les régions intertropicales où vivent 2.5 G personnes.
- Ce type de cas préfigure à des simulations de quartiers et de villes.

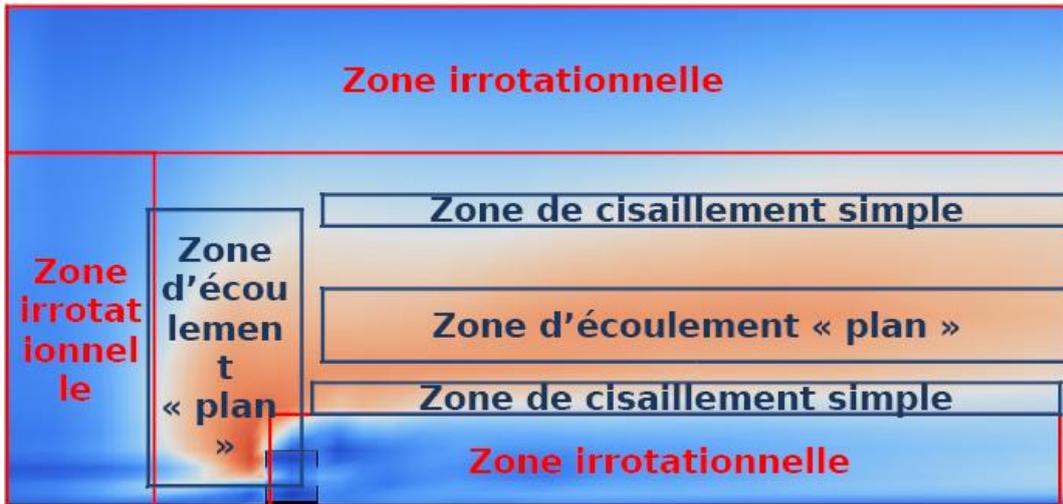


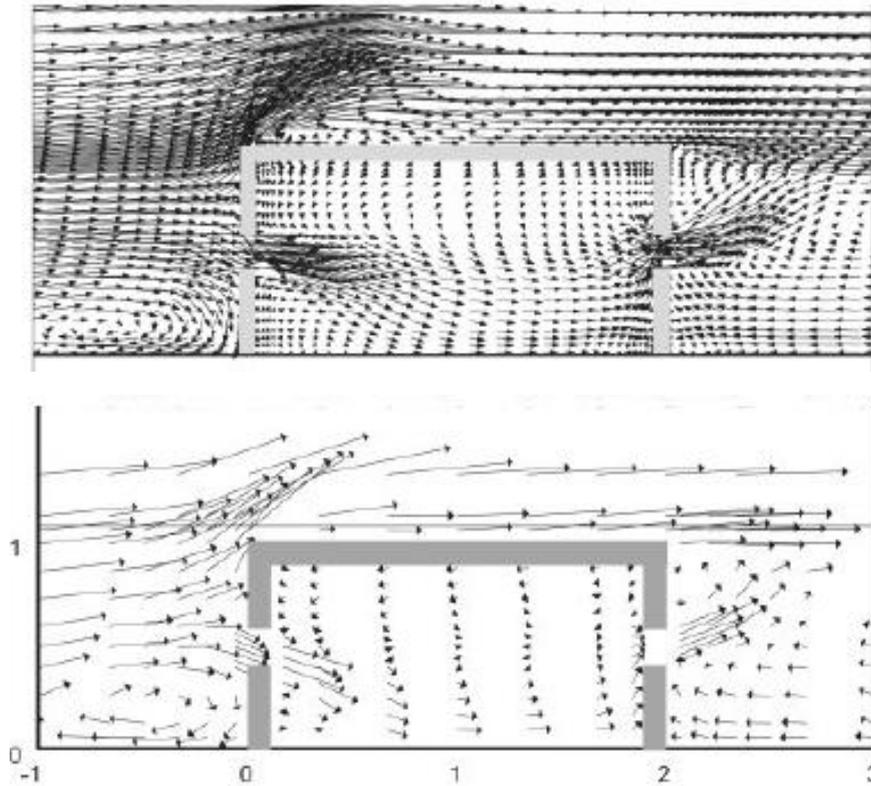
Figure 3. Zonage sur maillage MZQM.

### 6.3.2 GÉNÉRATION DES DONNÉES DE RÉFÉRENCE

La modélisation LES a été utilisée pour générer les données de référence. Nous résumons ci-dessous l'essentiel du maillage et du modèle LES-D utilisés, ainsi que des schémas numériques employés :

- Un maillage adapté aux échelles caractéristiques de l'écoulement a été défini à l'aide d'une simulation (RNG-k-e). Le maillage comporte 6.5 millions de cellules.
- Le modèle LES utilisé est le modèle de Smagorinsky. Cependant, la constante du modèle de Smagorinsky est évaluée localement par la méthode dynamique Germano-Lilly. Ce modèle, que l'on note LES-D, permet de mieux tenir compte des variations importantes de la viscosité bien qu'il nécessite un temps de calcul bien plus important que la LES-S (Smagorinsky).
- Le terme de diffusion du modèle est approché par un schéma numérique différence centrée d'ordre 2.
- Un schéma centré d'ordre 2 avec limiteur de flux sur les trois axes est utilisé pour approcher le terme de convection du modèle.
- Le solveur utilisé est le solveur PISO de Rhie&Chow. Le schéma d'Adams Bashforth est utilisé pour l'intégration temporelle.

13 jours de calcul ont été nécessaires pour obtenir une solution moyenne stable « permanente » (voir Fig. 4).



**Figure 4.** Résultats LES-D (en haut) – Résultats LDA (en bas).

## 6.4 LES MODÈLES PÉNALISÉS

Comme nous l'avons déjà signalé, l'objectif des modèles pénalisés est de diminuer significativement le temps de calcul et le rendre compatible avec les outils de simulation de bâtiment.

La première idée qui vient à l'esprit est de grossir le maillage, réduisant ainsi le nombre de cellules. Pour ce faire sans trop dégrader la solution, la réduction du nombre de cellules doit venir accompagnée d'une augmentation du nombre de degrés de liberté par cellule. Il faudra donc dégrader l'équation de Navier-Stokes en y rajoutant un terme source ou de pénalisation :

<i>Equation de Navier-Stokes</i>	<i>Equation de Navier-Stokes avec terme source</i>
$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$	$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + S_i$

### 6.4.1 LE TERME DE PÉNALISATION

$S_i$  pourrait être une source vectorielle isotrope, une source vectorielle anisotrope, un gradient d'une quantité scalaire ou la divergence d'un tenseur. Pour la recherche de ce terme, nous nous sommes appuyé sur :

1. Des travaux précédents le notre, tel que celui de Xu and Chen, qui proposent de remplacer la viscosité  $\nu$  dans l'équation de Navier-Stokes par une viscosité effective  $\nu_{Eff} = \nu + \nu_t$  où  $\nu_t$  représente une viscosité turbulente. Dans la formulation « terme de pénalisation » que nous avons adopté, ceci revient à dire que :

$$S_i \rightarrow \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \nu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + S_i$$

Le modèle pénalisé s'écrit alors :

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \nu_{Eff} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + S_i \quad \text{En régime transitoire}$$

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \nu_{Eff} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + S_i \quad \text{En régime permanent}$$

2. Les équations de Navier-Stokes résolues sur un maillage « grossier » (60 k cellules au lieu de 6.5 millions, voir Fig. 5) et la comparaison des données produites avec les données de référence (modèle LES). Cette comparaison (voir les détails dans les publications citées en introduction) montre que les plus forts résidus apparaissent dans les zones de cisaillement et dans celles à plus fort gradient de pression. Ceci nous a conduit à proposer un modèle pénalisé de la forme :

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \nu_{Eff} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\nu_{Eff} S_{ij}) + \frac{1}{\rho_{Eff}} \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad \text{En régime permanent}$$

A l'équation ci-dessus on a adjoint le modèle de van Driest pour faire le couplage à la paroi, d'une part, et le modèle de viscosité turbulente suivant, d'une autre :

$$\nu_t = C_v 2 \kappa^2 y^2 \left| \frac{\partial U}{\partial y} \right| \text{et } \nu_t^{k+1} = 0.7 \nu_t + 0.3 \nu_t^k$$

avec :

$$y = l = \sqrt[3]{\Delta} \quad \Delta = \text{Volume d'une cellule} \quad \kappa = \text{constante de Von Karmann}$$

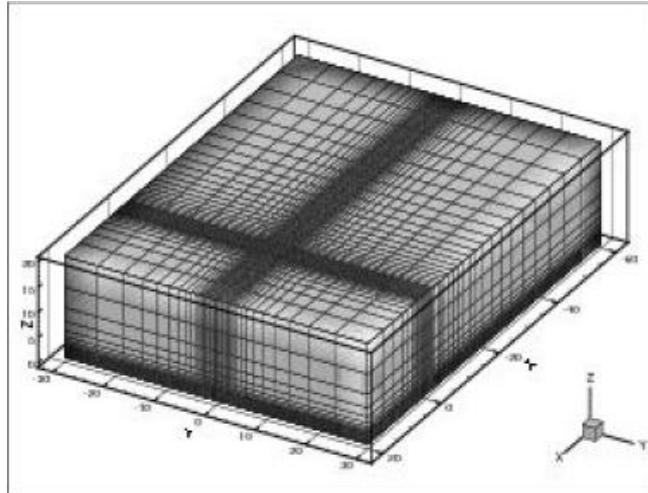
#### 6.4.2 TESTS DES MODÈLES PÉNALISÉS

Plusieurs modèles pénalisés (MP) ont été testés (5 au total). Ils résultent de combiner les deux équations ci-dessous avec différents modèles de viscosité turbulente :

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \nu_{Eff} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad \text{Modèle Xu and Chen}$$

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \nu_{\text{Eff}} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu_{\text{Eff}} S_{ij} \right) + \frac{1}{\rho_{\text{Eff}}} \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad \text{Modèle Dynasimul}$$

Le test consiste à simuler l'écoulement du cas test sur le maillage de la Fig. 5 (60 k cellules), puis à comparer les résultats avec les données de référence (modèle LES sur un maillage à 6.5 millions de cellules).



**Figure 5.** Maillage grossier (60 k cellules) utilisé pour les simulations avec les modèles pénalisés.

Les meilleurs résultats obtenus correspondent aux modèles suivants:

- MP à viscosité constante

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \nu_{\text{Eff}} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad \nu_t = 100 \nu$$

- MP à viscosité variable

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \nu_{\text{Eff}} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad \nu_t = 0.03874 |U_D| l$$

- MP à viscosité variable relaxée (MP Dynasimul)

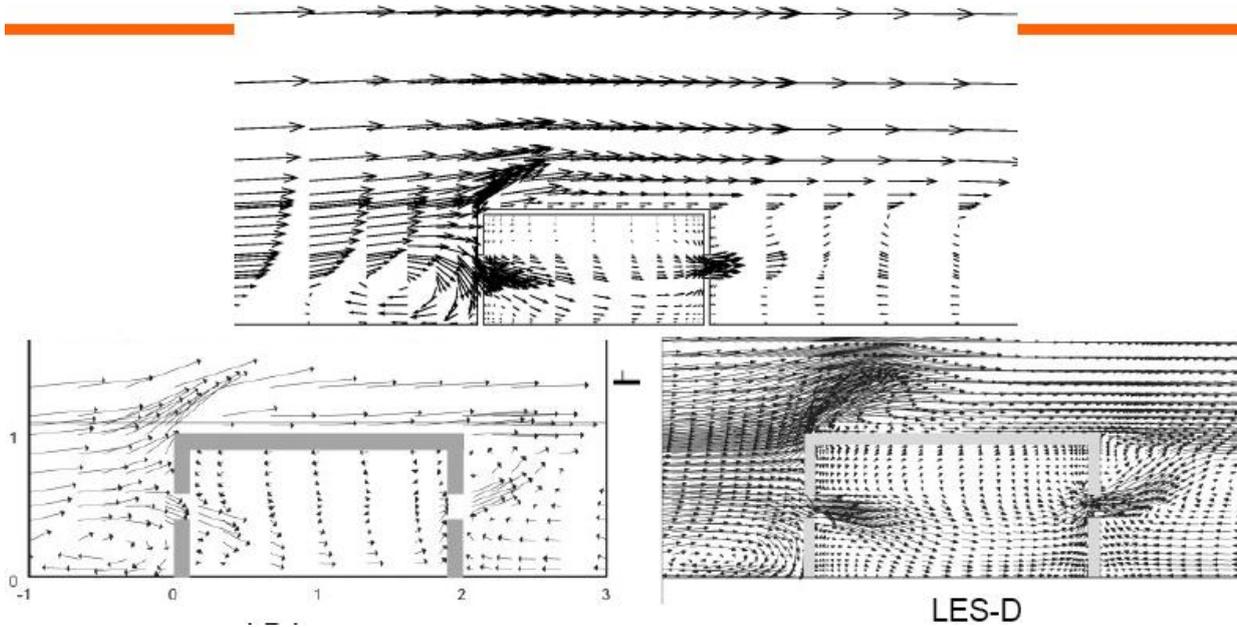
$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \nu_{\text{Eff}} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu_{\text{Eff}} S_{ij} \right) + \frac{1}{\rho_{\text{Eff}}} \frac{\partial p}{\partial x_i}$$

$$\nu_t = C_\nu \kappa^2 y^2 \left| \frac{\partial U}{\partial y} \right| \text{ et } \nu_t^{k+1} = 0.7 \nu_t + 0.3 \nu_t^k$$

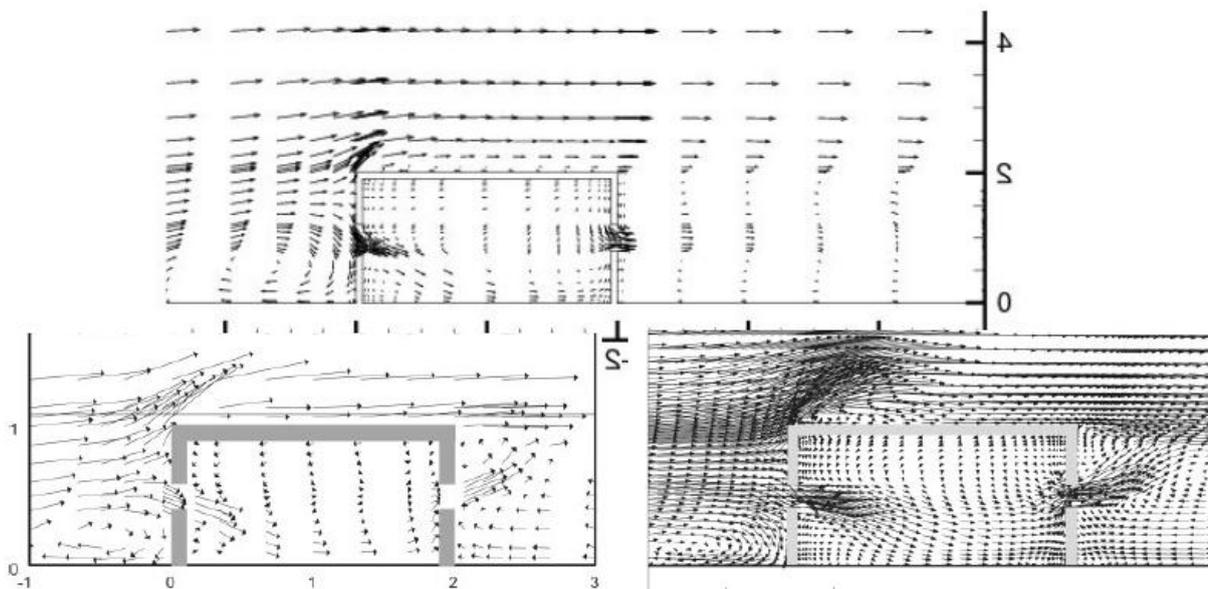
Les résultats obtenus sont montrés dans les figures 6 à 8. On remarquera que les meilleurs résultats sont obtenus avec le MP à viscosité variable relaxée (MP Dynasimul). En termes de temps de calcul, on note que :

- Le modèle LES a nécessité de 13 jours de calcul pour obtenir une solution stable « permanente ».

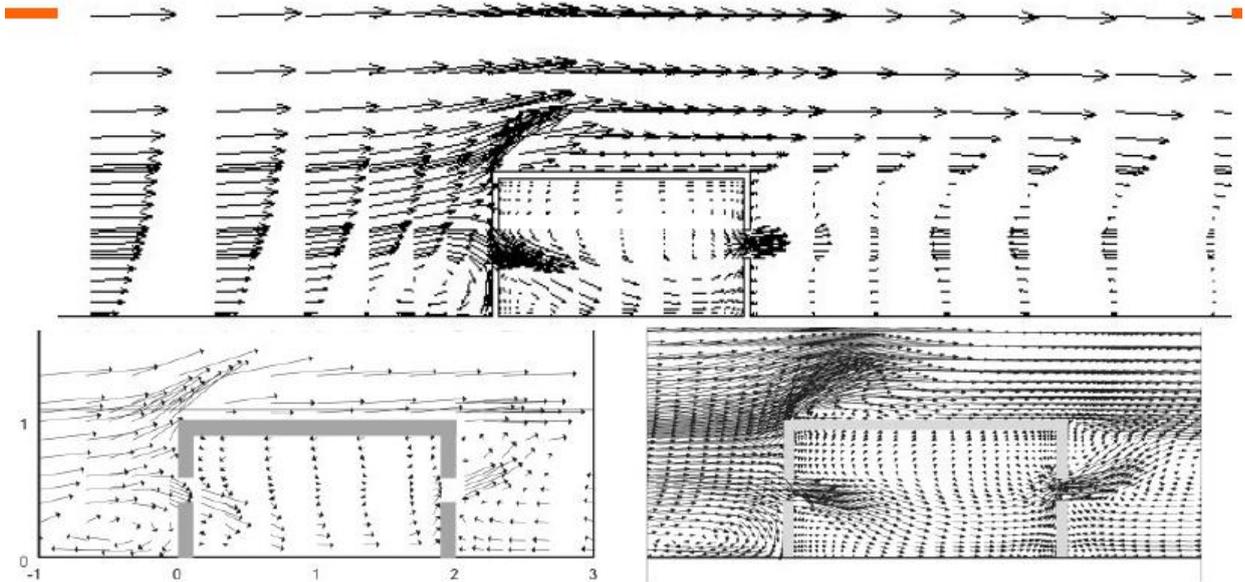
- Le MP à viscosité constante comporte 120 secondes de simulation
- Le MP à viscosité variable et relaxée implique 243 secondes de temps de calcul.



**Figure 6.** En haut : Résultat du MP à viscosité constante ; En bas à gauche : LDA ; En bas à droite : LES-D



**Figure 6.** En haut : Résultat du MP à viscosité variable ; En bas à gauche : LDA ; En bas à droite : LES-D



**Figure 7.** En haut : Résultat du MP à viscosité variable et relaxée ; En bas à gauche : LDA ; En bas à droite : LES-D

## 6.5 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le modèle pénalisé proposé dans ce travail (MP à viscosité variable et relaxée) semble satisfaire l'objectif de s'affranchir des temps de calcul exorbitants des modèles LES tout en dépassant les limites des approches de type nodal ou zonal. Il a été capable de reproduire très correctement l'écoulement dans le bâtiment test avec des temps de calcul très inférieurs à ceux du modèle LES (243 secondes face à 13 jours). Il entraîne des temps de calcul un peu supérieurs à ceux du MP à viscosité constante, mais conduit à des résultats bien meilleurs.

Des améliorations de l'implémentation numérique du modèle pénalisé (i.e. maillages adaptatifs, solveurs plus rapides) pour réduire d'avantage le temps de calcul, ont été prévues. Leur intégration à des outils de simulation de bâtiment semble envisageable.

La qualité des résultats obtenus nous encourage à poursuivre cette voie de recherche en élargissant les champs d'application. Il est prévu de intégrer progressivement l'équation de l'énergie et la modélisation du transport de polluants. Aussi le passage à des simulations de quartiers et des villes nous semble envisageable.

## 7 Expérimentation d'une méthode multi-niveaux pour la résolution d'équations aux dérivées partielles avec couplage multi-échelles.

*LIMSI : Michel PONS, Irina MARX CHHAY*

Cette étude a été réalisée au CNRS-LIMSI (UPR 3251), laboratoire non-partenaire du projet Dynasimul mais concerné par la problématique du projet, par Michel Pons (CR2 CNRS) et Irina Marx Chhay (« post-doc » CDD CNRS financé moitié-moitié par Dynasimul et par le LIMSI).

### 7.1 PRINCIPE ET BUTS

#### 7.1.1 QUELQUES CONSTATS

La Figure 28 ci-dessous présente des champs de température dans une cavité différentiellement chauffée calculés pour  $Ra=10^6$ . Elle démontre qu'une grande partie de l'information contenue dans le problème complètement résolu à gauche (ici  $512 \times 512$ ) peut être captée par un calcul sur un maillage très sous-résolu à droite ( $10 \times 10$ ).



Figure 28 : Champs de température dans une cavité différentiellement chauffée pour  $Ra=10^6$ , avec deux discrétisations différentes :  $512 \times 512$  et  $10 \times 10$ .

L'informatique distribuée, comme la généralisation des calculs sur GPU, conduit à envisager de résoudre des « gros » problèmes numériques par des calculs massivement parallèles.

La résolution parallélisée des équations aux dérivées partielles implique la décomposition du domaine global en sous-domaines. Ces sous-domaines sont donc résolus en parallèle. La décomposition de domaine est une nécessité absolue lorsque le nombre de degrés de liberté du problème discrétisé dépasse la taille mémoire qui peut être affectée à un seul processeur.

Or la résolution en parallèle des sous-domaines (en particulier par différences finies avec un schéma implicite) nécessite un processus itératif, souvent dénommé « itérations de Schwarz », qui permet « d'accorder » tous les champs calculés séparément afin que les équations du problème soient bien satisfaites partout dans le champ global reconstitué.

Ce processus itératif s'avère particulièrement long, et donc onéreux en temps CPU, lorsque le problème à résoudre couple des interactions directes à différentes échelles, à savoir des interactions « globales » sur des distances comparables à la taille du domaine de calcul et des

interactions « locales » sur des distances beaucoup plus courtes, typiquement l'épaisseur d'une couche limite.

Ce type de couplage se rencontre dans, au moins, deux types de problèmes assez généralement répandus :

- les problèmes de transfert thermique couplant convection-diffusion (interaction locale) et rayonnement pariétal (interaction globale) ;
- les écoulements de fluide incompressible

Ces deux types de problème font largement partie de la problématique de la thermique de l'habitat.

### **7.1.2 SOLUTION PROPOSÉE**

Résoudre le problème (typiquement des équations aux dérivées partielles) sur deux maillages du même domaine de calcul. Le premier maillage est très nettement sous-résolu (p.ex. le maillage 10×10 de la figure ci-dessus), que l'on pourrait dire « grossier » mais qui définit une décomposition en sous-domaines. Cette résolution « grossière » doit tout de même rendre compte d'une réalité du phénomène simulé, du moins à la précision du maillage près. Le second maillage est raffiné autant que souhaité par le concepteur de la simulation à l'intérieur de chacune des mailles « grossières » (p.ex. un maillage 500×500 de la figure ci-dessus). La résolution sur ce maillage « fin » utilise donc les techniques issues de la décomposition de domaine.

La différence réside en cela que c'est le calcul sur le maillage « grossier », et non le processus itératif de Schwarz, qui résout les interactions globales à grandes distances. Les itérations de Schwarz n'ont plus alors qu'à résoudre la composante « locale » des interactions entre sous-domaines, ce qui doit diminuer sensiblement le nombre d'itérations « de Schwarz ».

En plus de la diminution du temps apparent de calcul par la parallélisation, cette méthode présente les avantages suivants :

- toute autre technique d'accélération peut aussi être utilisée, le raffinement adaptatif par exemple ;
- le calcul s'adapte immédiatement à toute modification du domaine de calcul, sans nécessiter le recalcul préalable de modes dominants, modes POD par exemple (versatilité immédiate) ;
- toute autre modélisation à échelle plus fine que le maillage dit « fin » (par exemple type LES) peut être intégrée,

## 7.2 MISE EN PLACE DU CADRE THÉORIQUE

### 7.2.1 DÉFINITION DES DEUX ÉCHELLES

Soit une équation de transport générale, continue sur le domaine  $D$  :

$$\partial_t(\rho X) = -\nabla \mathbf{J}_X - \nabla(\rho \mathbf{u} \cdot X) + \rho \sigma_X \quad (1)$$

où  $X$  est une grandeur quelconque (vitesse, température, concentration),  $\rho$  la densité,  $\mathbf{u}$  est le vecteur vitesse,  $\mathbf{J}_X$  est la densité de flux de la quantité  $X$ , et  $\rho \sigma_X$  le terme source correspondant.

Cette équation doit être résolue numériquement sur une discrétisation « fine » de  $D$ ,  $D_f$ . La méthode consiste à obtenir cette discrétisation en décomposant le domaine  $D$  d'abord en  $d$  mailles « grossières »  $\Omega_i$  (ce qui engendre le domaine discret  $D_\Omega$ ), puis en discrétisant « finement » chaque sous-domaine  $\Omega_i$  de telle sorte que  $D_f$  soit l'union exacte des sous-domaines discrétisés ( $D_f = \bigcup_i \Omega_i$ ).

Le problème global revient donc à résoudre l'équation (1) sur les différents sous-domaines  $\Omega_i$  qui forment une décomposition du domaine  $D$ . Cette résolution est parallélisable, moyennant l'application de l'algorithme de Schwarz qui permet d'assurer la continuité de la fonction  $X$  et de son gradient aux interfaces entre sous-domaines. Cet algorithme itératif peut s'avérer coûteux en temps de calcul, surtout si le problème implique des interactions à grande distance.

La méthode consiste multi-niveaux à décomposer le champ  $X$  solution de (1) en une composante « grossière » (globale)  $\bar{X}$  construite sur le maillage  $D_\Omega$  (*i.e.* avec une valeur unique pour chaque maille  $\Omega_i$ ) et une composante « fine » (locale),  $X_i$ , construite sur le maillage fin de  $\Omega_i$ , de telle sorte que  $X = \bar{X} + X_i$ .

### 7.2.2 PROBLÈME GLOBAL SUR LE MAILLAGE « GROSSIER »

Pour faciliter la convergence de l'algorithme de Schwarz, le champ  $\bar{X}$  doit être solution sous-résolue du problème (1) sur le maillage  $D_\Omega$ , ce qui introduit l'équation :

$$\partial_t(\bar{\rho} \bar{X}) = -\bar{\nabla} \bar{\mathbf{J}}_{\bar{X}} - \bar{\nabla}(\bar{\rho} \bar{\mathbf{u}} \cdot \bar{X}) + \bar{\rho} \bar{\sigma}_X \quad (2)$$

où l'opérateur  $\bar{\nabla}$  est construit sur le maillage  $D_\Omega$  (*i.e.* avec un pas d'espace égal à la distance entre les mailles  $\Omega_i$ ). Si le terme source  $\bar{\sigma}_X$  est défini par :

$$\bar{\rho} \bar{\sigma}_X = \frac{1}{|\Omega_i|} \left\{ \int_{\Omega_i} \rho \sigma_X + \int_{\partial \Omega_i} [\bar{\mathbf{J}}_{\bar{X}} + (\bar{\rho} \bar{\mathbf{u}} \cdot \bar{X}) - \mathbf{J}_X - (\rho \mathbf{u} \cdot X)] \cdot \mathbf{n} \right\} \quad (3)$$

alors  $\bar{\rho} \bar{X}$  est la moyenne de  $\rho X$  sur  $\Omega_i$  :  $|\Omega_i| \cdot \partial_t(\bar{\rho} \bar{X}) = \int_{\Omega_i} \partial_t(\rho X)$ .

Le niveau fin fait donc « remonter » vers le niveau grossier une information,  $\overline{\sigma_X}$ , qui inclut un terme que l'on peut dire « de sous-maille » comme dans la Simulation aux Grosses Structures (*Large Eddy Simulation*).

### 7.2.3 PROBLÈME LOCAL SUR LE MAILLAGE « FIN »

À l'intérieur de  $\Omega_i$ , la décomposition  $X = \bar{X} + X_i$  conduit à récrire le problème (1) comme :

$$\partial_t(\rho X_i) = -\nabla \mathbf{J}_{X_i} - \nabla(\rho \mathbf{u} \cdot X_i) + \rho \sigma_X - \partial_t(\rho \bar{X}) - \nabla(\rho \mathbf{u} \cdot \bar{X}) \quad (4)$$

Dans cette équation (4), l'inconnu est le champ  $X_i$  alors que le champ de vitesse  $\mathbf{u}$  est supposé connu. Le terme source  $[\rho \sigma_X - \partial_t(\rho \bar{X}) - \nabla(\rho \mathbf{u} \cdot \bar{X})]$  contient de l'information venant de l'échelle globale. Par ailleurs, la connaissance de l'évolution à l'échelle globale permet de donner des conditions pertinentes aux frontières des sous-domaines  $\Omega_i$ .

### 7.2.4 CONCLUSION

En conclusion, cette méthode sépare bien les échelles (c.à.d. que  $\bar{X}$  est par construction la moyenne de  $X$  sur  $\Omega_i$  et que le champ  $X_i$  a en principe une moyenne nulle). Numériquement, ceci requière ...

- qu'une bonne évaluation de  $\overline{\sigma_X}$  soit injectée dans le calcul *global*,
- que de bonnes conditions aux limites aux frontières entre les  $\Omega_i$  soient injectées dans les calculs *locaux*.

Dans la suite, il est posé que la densité du milieu est constante et uniforme, et que le coefficient de diffusion de la quantité  $X$  est  $D_X$ , autant à l'échelle locale qu'à l'échelle globale. Les équations (2) et (4) se récrivent :

$$\partial_t \bar{X} = \bar{\nabla}(D_X \cdot \bar{\nabla} \bar{X}) - \bar{\mathbf{u}} \cdot \bar{\nabla} \bar{X} + \overline{\sigma_X} \quad (5)$$

$$\partial_t X_i = \nabla(D_X \cdot \nabla X_i) - \mathbf{u} \cdot \nabla X_i + \sigma_X - \partial_t \bar{X} - \mathbf{u} \cdot \nabla \bar{X} \quad (6)$$

## 7.3 TEST DE LA MÉTHODE

### 7.3.1 UN PROBLÈME SIMPLIFIÉ

La résolution de l'équation de Navier-Stokes par une méthode aux éléments finis avec décomposition de domaine est un problème ardu. Il est donc raisonnable de tester la méthode multi-niveaux sur un problème numériquement simple, l'équation de la chaleur en 1D. Convection et diffusion sont des phénomènes locaux (propagation de proche en proche). Une composante globale est donc introduite via un transfert direct entre les deux frontières du domaine  $D$ . Cette introduction n'est pas artificielle dans le domaine du bâtiment, car le

couplage entre conduction-diffusion et radiation  $y$  est une constante. Les flux radiatifs entre limites du domaine sont linéarisés, ce qui simplifie la problème sans rien retirer à sa généralité, puisqu'il associe bien une composante globale (transfert radiatif direct d'une frontière à l'autre) à une composante globale (la convection-diffusion).

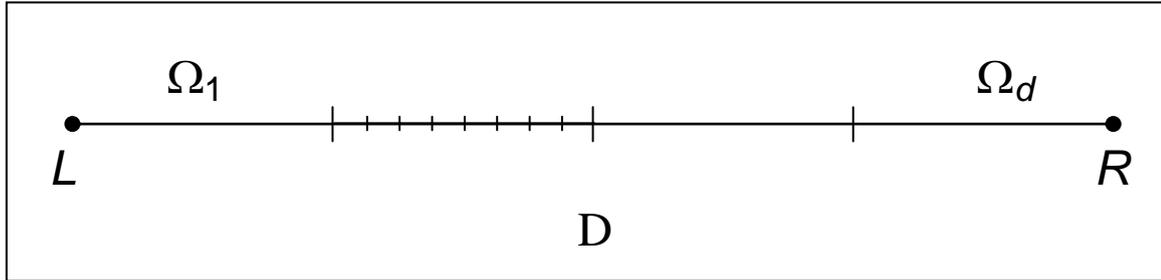


Figure 29 : Schéma d'un domaine mono-dimensionnel  $D$  compris entre les frontières  $L$  et  $R$ , décomposé en  $d$  sous-domaines  $\Omega_i$ , eux-mêmes discrétisés finement (la discrétisation fine n'est représentée que pour un sous-domaine).

La variable  $X$  est la température  $T$ ; la vitesse  $u$  et la diffusivité  $D_T$  sont posées uniformes et constantes. Les conditions aux limites en  $F$  ( $F=L$  ou  $R$ ) expriment qu'un flux total imposé (variant sinusoidalement dans le temps) se répartit entre transfert conductif local et transfert radiatif avec l'autre frontière :

$$-k \cdot \partial_x T \Big|_{x=x_F} + E \cdot (T_L - T_R) = q_F \cdot \sin(\omega_F \cdot t) \quad (7)$$

La conductivité du milieu,  $k$ , est supposée constante et uniforme. Le coefficient  $E$  vient pour la quantité  $4\varepsilon\sigma \langle T_{LR} \rangle^3$ ,  $\langle T_{LR} \rangle$  est la température radiative moyenne entre  $T_L$  et  $T_R$ ,  $\varepsilon$  est le coefficient d'absorption effectif entre les deux parois, et  $\sigma$  la constante de Stefan-Boltzmann. Prendre  $E$  constant simplifie les calculs sans rien enlever au couplage entre le transfert conductif-convectif et le transfert radiatif. Les coefficients sont choisis de telle sorte que, si un état stationnaire était imposé, avec un profil de température linéaire donc, le flux radiatif serait 5 fois plus important que le flux conductif.

Il n'y a pas de source de chaleur locale ( $\sigma_T = 0$ )

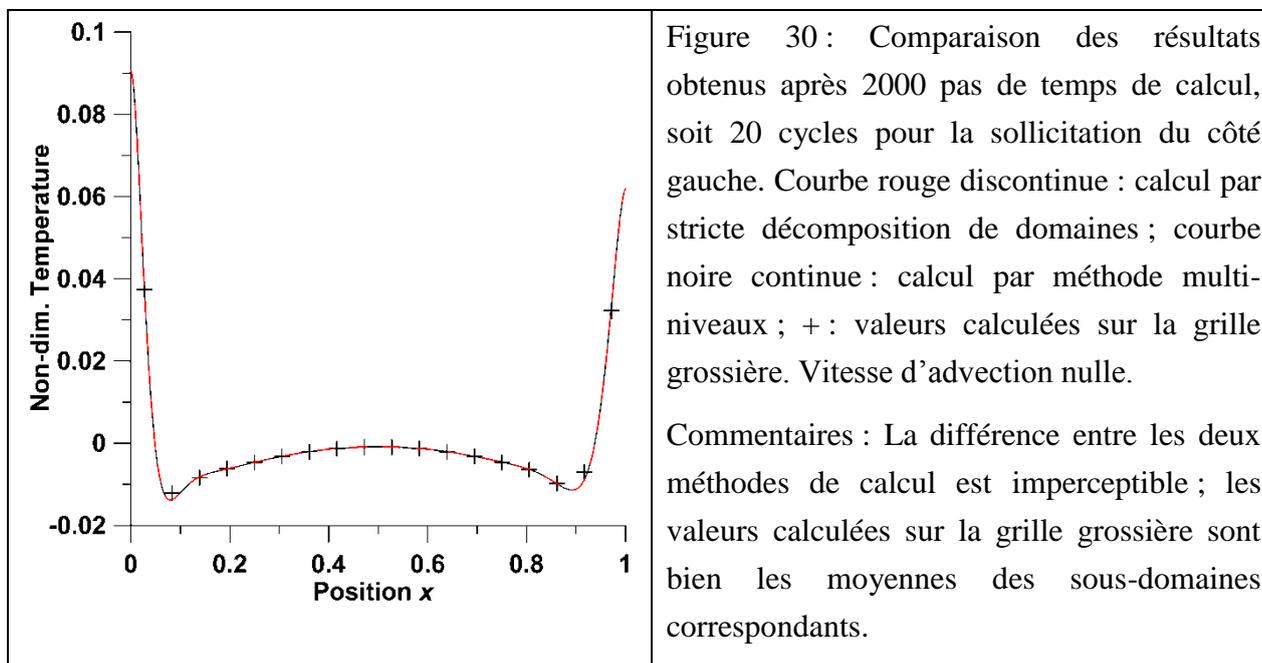
### 7.3.2 ADIMENSIONNEMENT

Le problème est adimensionné par (i) la longueur  $L$  du domaine pour les distances, (ii) le rapport  $L^2/D_T$  pour le temps, (iii) le rapport  $(q_L + q_R)/(k/L + E)$  pour les températures. Sur la frontière gauche du domaine ( $F=L$ ) la période adimensionnée de la sollicitation est l'unité, et la période est double du côté droit ( $F=R$ ). Il est aussi posé que  $q_L/(q_L + q_R) = 0.4$ .

### 7.3.3 ALGORITHME DES ITÉRATIONS

Dans tous les cas, l'algorithme de Schwarz utilise des conditions de Robin du deuxième type entre sous-domaines.

Pour assurer la cohérence thermodynamique, chaque calcul est exécuté en s'assurant que le flux radiatif échangé entre parois est bien le même pour les deux parois.



Pour la stricte décomposition de domaine, ce flux radiatif est recalculé à chaque itération de Schwarz en fonction des dernières valeurs calculées pour les températures de paroi. Les températures sont donc calculées avec des conditions de Neumann aux limites du domaine.

Pour la méthode multi-niveau, le calcul se fait en deux temps. D'abord, le calcul global se fait en imposant des conditions du troisième type déduites de l'équation (7) linéarisée. Le flux radiatif en est ensuite déduit, si bien que le calcul local est exécuté avec des conditions de Neumann. L'information obtenue par le calcul global est utilisé pour initialiser le processus itératif de Schwarz, ce qui réduit le nombre d'itérations requises pour ce processus.

#### 7.3.4 RÉSULTATS

Le premier point à vérifier est que les deux calculs, par stricte décomposition de domaines et par méthode multi-niveaux, donnent les mêmes résultats. C'est bien ce qu'indique la Figure 30 ci-dessus.

Pour les premiers tests, la méthode multi-niveau permet d'économiser environ 25 % des itérations de Schwarz.

#### 7.3.5 PERSPECTIVES

Ces premiers résultats sont à confirmer et généraliser, en particulier en faisant intervenir l'advection. S'ils se confirment, une configuration plus complexe pourra être étudiée, par exemple avec un écran anti-rayonnement au centre du domaine.

L'étape suivante sera d'implémenter la méthode dans un code parallélisé 2D, voire 3D.

## **8 Modeleur-mailleur bâtiment**

### **8.1 INTRODUCTION**

Le but de cette partie est la détermination des caractéristiques requises pour un modèleur de bâtiment adapté aux besoins de la modélisation en thermo-hygro-aéraulique des bâtiments.

Les activités de modélisation thermo-hygro-aéraulique des bâtiments sont très variées. On y trouve aussi bien des modélisations « globales » de bâtiments de type bilan enveloppe que des modélisations « fines » de type mécanique des fluides numériques. Ces modélisations requièrent le plus souvent une connaissance de la géométrie 3D des bâtiments, même si cela se limite parfois à des informations simples comme l'orientation générale et les quantités de surfaces de divers types dans diverses orientations.

Nous retiendrons un classement en 4 niveaux :

- Bâtiment vu globalement comme une enveloppe et un intérieur
- Bâtiment vu par pièce au sens de la construction ou en groupement de pièces au sens de la thermique
- Bâtiment vu par zones phénoménologiques (panache sur convecteur, écoulement de plafond...)
- Bâtiment vu de façon détaillée avec mise en place de simulations par EDP

D'autre part se pose la question des systèmes techniques comme les bouches de soufflages, convecteurs... qui eux aussi nécessitent le plus souvent un positionnement 3D

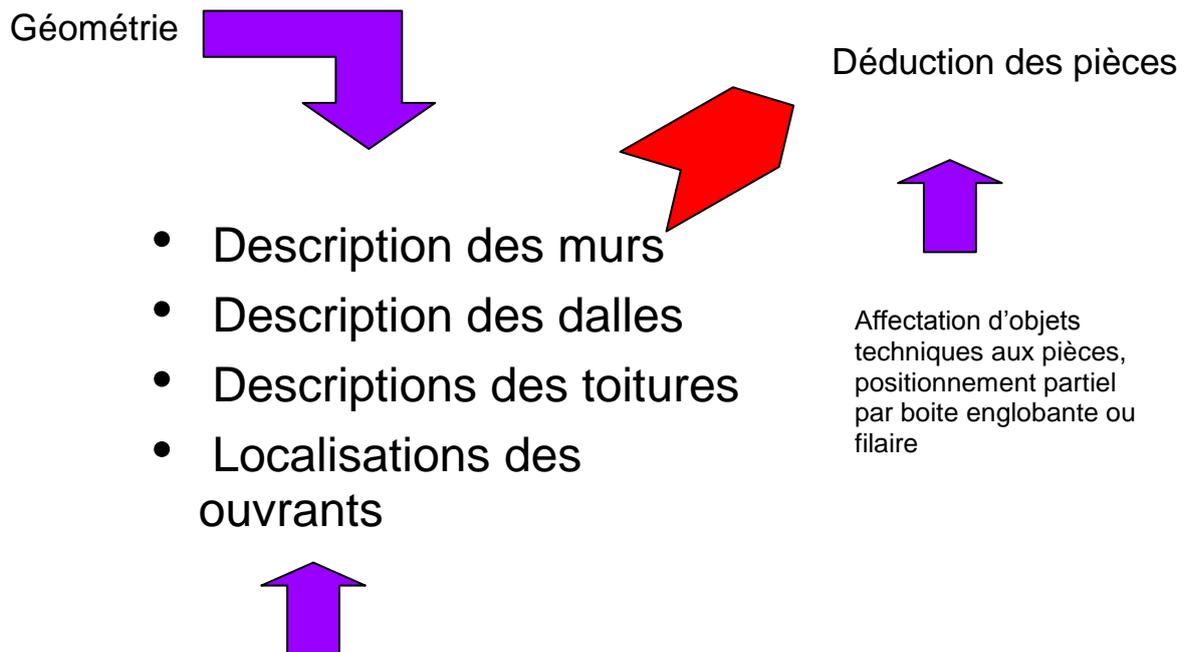
### **8.2 MÉTHODOLOGIE**

Pour traiter ce problème nous avons décidé de procéder en créant des prototypes pour évaluer les diverses méthodes de saisies 3D. Deux directions sont apparues intéressantes :

- Saisie constructive où l'on approche la définition du bâtiment par la mise en place de murs et de dalles.
- Saisie volumique où l'on approche la définition du bâtiment par la saisie des volumes des pièces ou des zones

### 8.3 APPROCHE « CONSTRUCTIVE » DES BÂTIMENTS

Schématiquement la saisie constructive peut être décrite de la façon suivante :



Affectation d'une technologie à chaque élément : sandwich pour un mur, fenêtre pour un ouvrant...

On commence par la construction en 3D des murs et des dalles. Les fenêtres et portes sont réalisées en plaçant d'abord des trous (les ouvrants). La toiture est également définie.

On affecte ensuite une technologie à chaque élément en fonction de sa nature.

Les pièces sont ensuite déduites des éléments précédents.

On peut ensuite grouper ou découper des pièces pour répondre aux divers niveaux de modélisation.

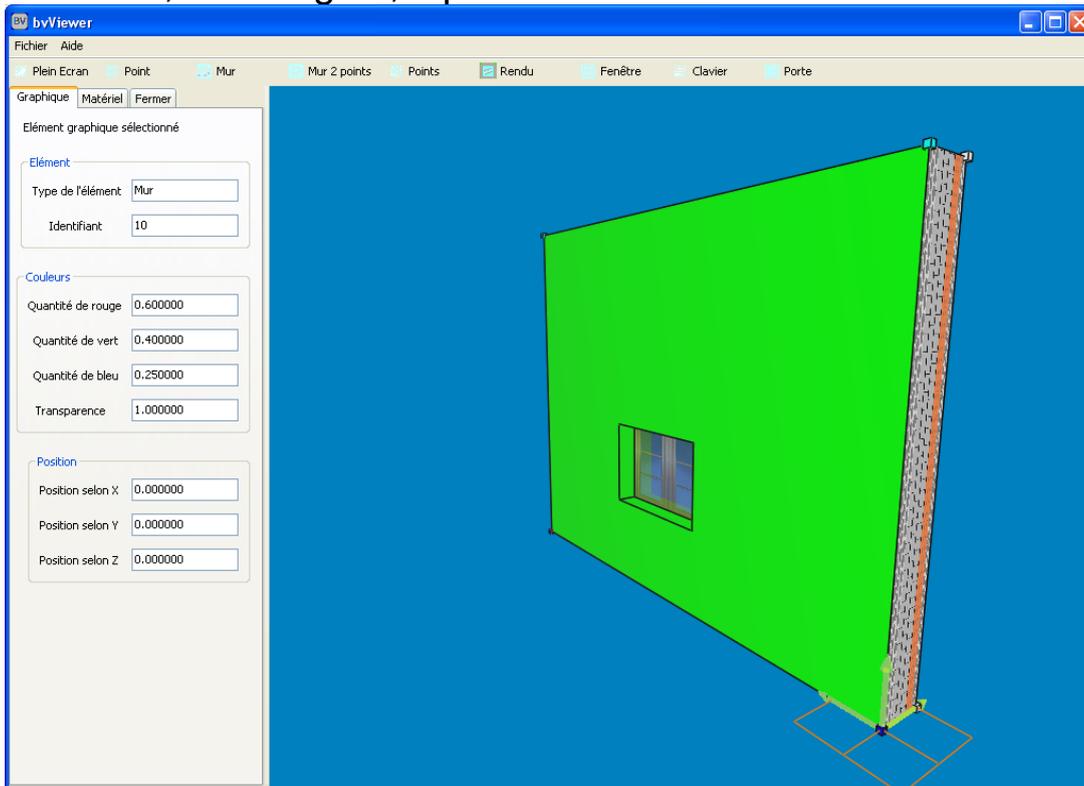
Les systèmes techniques sont enfin positionnés dans les pièces à l'aide d'une boîte englobante.

La difficulté réside dans le suivi des connexions entre les éléments de murs, dalles... En effet, ces connexions sont le support d'éventuels ponts thermiques et doivent donc impérativement être conservés pour permettre une bonne modélisation thermo-hygro-aéraulique.

### Volet 3: Développement d'une nouvelle approche de modélisation

Un prototype de saisie a été réalisé en se basant sur des technologies libres de droits :

## Windows, WxWidgets, OpenGL

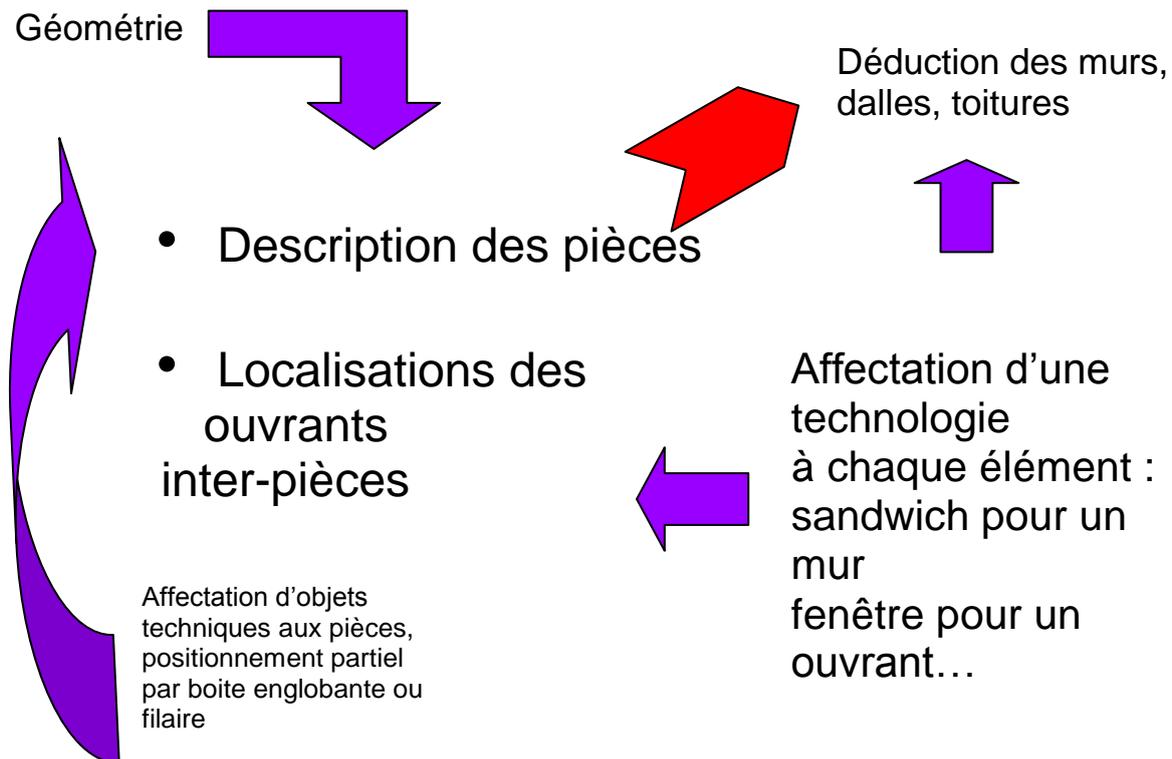


Le retour d'analyse du prototype est le suivant :

- Saisie rapide
- Localisation des ponts thermiques faciles si l'assemblage se fait en accroche sur les objets existants, on dispose donc de tous les lieux d'accroche inter-objets
- Pas de problèmes avec les environnements de développement
- Accès à la représentation des frontières des objets facile → Mise en place des maillages facile
- ✗ Difficulté avec les murs « complexes »
- ✗ Difficulté avec les toitures

## 8.4 APPROCHE « VOLUMIQUE » DES BÂTIMENTS

Schématiquement la saisie volumique peut être décrite de la façon suivante :



On commence cette fois par la construction en 3D des volumes des pièces et en les liant entre eux. Les fenêtres et portes sont réalisées en plaçant d'abord des trous (les ouvrants).

Les murs, toitures, dalles sont ensuite déduits des éléments précédents.

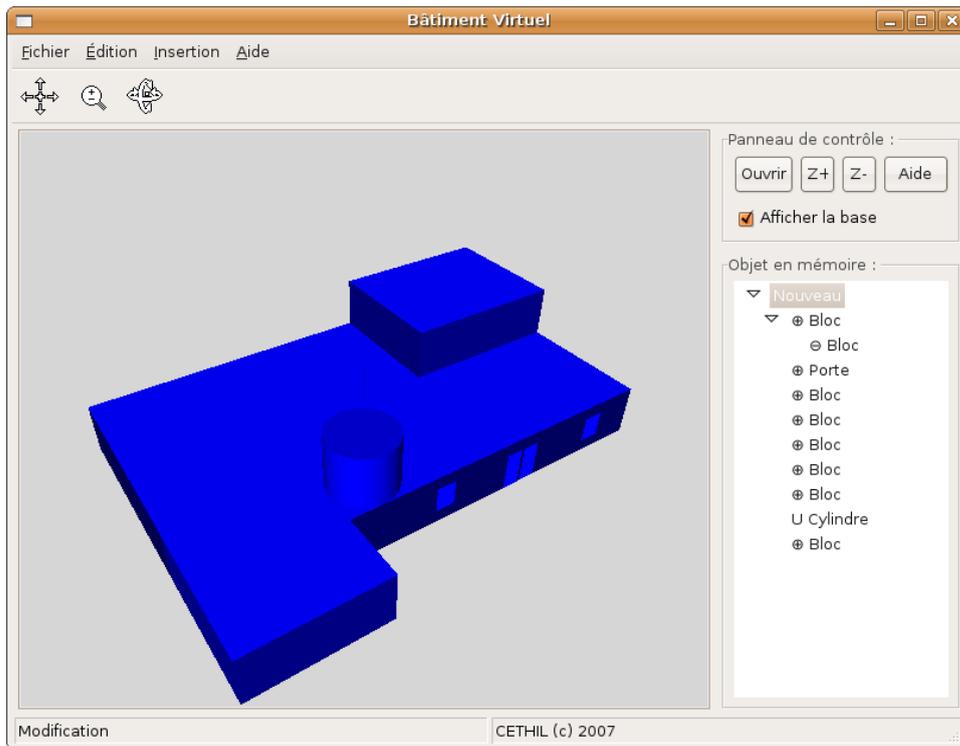
On peut ensuite grouper ou découper des pièces pour répondre aux divers niveaux de modélisation.

Les systèmes techniques sont enfin positionnés dans les pièces à l'aide d'une boîte englobante.

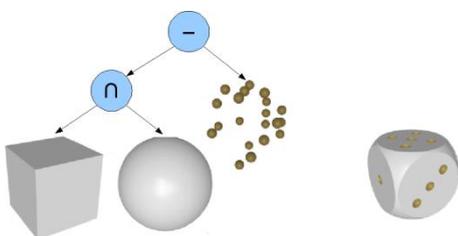
La difficulté réside dans le suivi des connexions entre les pièces. Ces connexions permettront de localiser d'éventuels ponts thermiques et doivent donc impérativement être conservés pour permettre une bonne modélisation thermo-hygro-aéraulique.

Un prototype de saisie a été réalisé en se basant sur des technologies libres de droits :

Linux, WxWidget, OpenGL, OpenCSG



La bibliothèque OpenCsg (CSG pour Constructive Solid Geometry) est la pour permettre de gérer les volumes en se basant sur une approche à base de primitives 3D (cônes, sphères, cylindres, blocks...) et d'opérations booléennes (Union, différence, intersections des volumes...) selon le principe suivant :



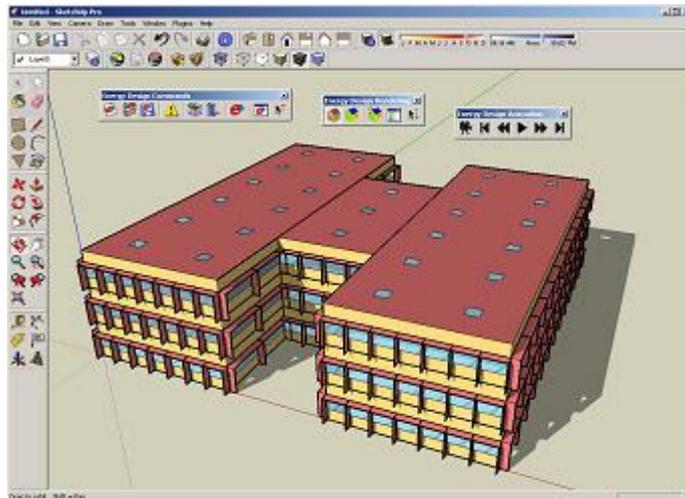
Le retour d'analyse du prototype est le suivant :

- Saisie rapide
- Géométrie complexe facile par opérations booléennes (CSG)
- Localisation des ponts thermiques faciles car l'assemblage se fait en accroche sur les objets existants, on dispose donc de tous les lieux d'accroche inter-objets
- ✗ Difficulté avec les produits « open source » pour les opérations booléennes
- ✗ Impossibilité sur les produits d'accéder à la représentation des frontières des objets → Mise en place des maillages difficile

### 8.5 Lien avec les environnements existants

Comme indiqué précédemment, la recours à des plateformes « open source » paraît difficile. L'analyse a donc été poursuivie en regardant les divers produits disponibles. 2 familles de produits se sont dégagées :

- Les CAO comprenant un ensemble 3D booléen. Le produit phare dans le domaine est bien sûr CATIA de Dassault Systèmes. Ce produit répond complètement aux besoins identifiés et peut de plus être configuré pour faciliter les saisies de type constructive ou volumique.
- Les plateformes de type Google SketchUp qui fournissent une possibilité de type CAO plus simple mais avec un pont IFC facilement utilisable par exemple avec des logiciels de thermique comme Energy+. Il faut alors disposer d'un logiciel de conversion. Dans le cas d'energy+ il s'agit d'OpenStudio :



Cette dernière approche pose cependant quelques problèmes d'exportation des informations 3D. En effet, les données de SketchUp ne comprennent pas tous les éléments 3D. Par exemple, un mur multicouches est exporté comme 2 surfaces avec les paramètres des couches. Les ponts thermiques sont donc à calculer à part en modifiant les surfaces en question pour soustraire les zones d'influence du pont thermique. Cette approche suppose donc que les ponts thermiques sont des objets bien identifiés, ce qui n'est pas toujours le cas dans les bâtiments (recouvrement des zones d'influences de plusieurs ponts thermiques).

Dans tous les cas où il faudra avoir une géométrie 3D précise il conviendra donc de compléter l'approche IFC en lui adjoignant un stockage direct de la géométrie 3D selon un format CAO.

Pour ces diverses raisons il semble donc plus intéressant de s'appuyer sur une approche CAO complète. La plateforme CATIA semble d'autant plus intéressante qu'elle s'est vue complétée au printemps 2010 par un maillleur 3D intégré. Ceci ouvre la voie au développement d'une plateforme CAO adaptée à la thermique du bâtiment, y compris pour des problèmes complexes comme les problèmes de réduction de modèles qui nécessitent la construction des matrices de

représentation du problème discret. Ces matrices ne sont en effet accessibles qu'à partir du maillage issu de la représentation 3D.

## 8.6 Lien avec le SIG

Enfin, les liens avec les Système d'Informations Géographiques (SIG) doivent être pris en compte dans les choix de produit support. Les systèmes d'informations géographiques pouvant fournir des données d'environnement intéressantes pour la simulation thermique dans de nombreux endroits.

La plateforme Google SketchUp est bien adaptée à ce genre de manipulation et a été testée en combinaison avec openstudio et Qgis pour produire des données pour Energy+ dans le cadre d'un master. Les données utilisées provenaient de la commune de Pelussin située non loin de Lyon. Il a été possible d'importer les données (emprise au sol, hauteur) correspondant aux bâtiments voisins du bâtiment à étudier et de les inclure dans les masques lors du calcul de consommation énergétique du bâtiment.

Bien que n'ayant pas été testée, la plateforme CATIA possède également de genre de pont permettant l'importation de données SIG.

Il semble donc possible pour ces 2 familles de produits supports d'importer les données d'environnement utiles aux simulations thermiques depuis des SIG.

## 9 Conclusion et perspectives

Les avancées scientifiques concernant le travail du volet 3 sont importants et de qualité. Ils concernent à la fois la réduction des problèmes de diffusion non linéaire, la réduction des problèmes thermo-convectifs, la modélisation/simulation d'écoulements fluides avec des frais de calcul raisonnables et l'analyse des besoins en termes de modeleurs-maillieurs et de solveurs d'équations. Ils ouvrent également des perspectives alléchantes quant à l'objectif de disposer à terme d'outils numériques conciliant le besoin de parcimonie avec le soucis de précision.

### 9.1 LES PRINCIPAUX RÉSULTATS DU VOLET 3

Concernant la réduction des problèmes de diffusion non linéaire, des méthodes hautement efficaces reposant sur des approximations spectrales de type POD ont été développées. Contrairement aux méthodes POD « standard », le calcul des bases de projection se fait directement à partir des opérateurs de transferts, évitant ainsi d'avoir recours à des simulations onéreuses en temps de calcul. Ces méthodes ont été appliquées avec succès à des problèmes de conduction avec changement de phase et à des problèmes de transferts couplés de chaleur et d'humidité. Pour la réduction de problèmes linéaires de très grandes dimensions, la méthode convolutive des facteurs de réponse a été utilisée et a montré ses limites.

Pour les problèmes convectifs, trois contributions majeures sont à signaler :

- La première vise l'obtention de modèles de faible dimension orientés vers des applications de type régulation/commande. On a montré que l'utilisation de la POD à l'équation de l'énergie dans l'air abouti à des modèles de très faible dimension permettant de décrire convenablement les champs 3D de température et de vitesse dans l'air en partant d'une série d'expériences numériques « ad hoc » (snapshots) issues aujourd'hui des calculs CFD. La cellule expérimentale de COSTIC, équipée d'un convecteur électrique et de chambres de garde permettant de contrôler la température extérieure des parois, a été utilisée comme cas test.
- La deuxième contribution, axée sur la description des écoulements aérauliques, est bien plus ambitieuse. L'objectif est de s'affranchir des temps de calcul exorbitants des modèles CFD tout en dépassant les limites des approches de type nodal ou zonal. Des modèles de Navier-Stokes (NS) dégradés, incluant suffisamment de connaissance physique, ont été proposés. Il s'agit de modèles NS pénalisés, le rôle du terme de pénalisation étant de permettre un grossissement considérable de la maille de discrétisation par rapport à des approches LES (i.e. Smagorinskiy). Les tests numériques effectués (ventilation croisée dans un bâtiment ouvert) montrent la pertinence et l'efficacité de ces développements. Les temps de calculs observés pour la description précise des écoulements sont très faibles.
- La troisième contribution, plus tardive dans le temps, porte sur l'expérimentation d'une méthode multi-niveaux pour la résolution d'équations aux dérivées partielles avec couplage multi-échelles. Ce type de couplage se rencontre dans, au moins, deux types de problèmes propres à la thermique de l'habitat : les problèmes de transfert thermique couplant convection-diffusion (interaction locale) et rayonnement pariétal (interaction globale) ; les écoulement de fluides incompressibles. La méthode explorée vise l'accélération des calculs par rapport à une résolution parallélisée des équations impliquant la décomposition du domaine global en sous-domaines.

Par rapport aux outils d'expérimentation numériques, nous avons exploré les deux bouts de la chaîne de modélisation/simulation : les modeleurs-maillleurs et les solveurs d'équations.

- Une étude des besoins en terme de modeleurs-maillleurs a été réalisée, avec la mise en place de deux maquettes numériques basées sur des technologies libres de droit. A l'issue de cet étude, CATIA a été identifié comme étant le modeleur s'adaptant au mieux à nos besoins.
- L'étude portant sur les solveurs numériques s'est effectuée en deux temps. D'abord, nous avons analysé les méthodes existantes pour la résolution de systèmes d'équations algébro-différentielles raides de grande dimension. Les méthodes de type JFNK (Jacobian-Free Newton-Krylov) ont été identifiées comme étant un choix pertinent pour une future plate-forme recherche bâtiment. Ensuite et en accord avec cette conclusion, plusieurs suites logicielles ont été identifiées comme étant des

candidates potentielles pour être à la base de la création d'un environnement de travail R&D collaboratif dans notre domaine.

## 9.2 PERSPECTIVES

Comme déjà signalé, les travaux réalisés ouvrent des perspectives alléchantes quant à l'objectif de disposer à terme d'outils numériques conciliant le besoin de parcimonie avec le souci de précision. Pour œuvrer dans ce sens, il conviendrait :

- Poursuivre les développements recherche relatifs aux méthodes de réduction et d'accélération des calculs. On envisage notamment :
  - L'extension des méthodes de réduction proposées pour des problèmes de conduction avec changement de phase et des problèmes de transferts couplés de chaleur et d'humidité à des problèmes comportant la diffusion d'espèces avec des réactions chimiques homogènes et/ou hétérogènes. Ces problèmes font largement partie de la problématique énergie et qualité de l'air de l'habitat.
  - Améliorer l'implémentation numérique des modèles pénalisés de quantité de mouvement (i.e. maillages adaptatifs, solveurs plus rapides) et les appliquer à la simulation sur des quartiers et des villes.
  - Elargir l'approche de modélisation par des modèles pénalisés à des problèmes thermo-convectifs, en couplant l'équation de conservation de l'énergie à celle de quantité de mouvement.
  - Poursuivre l'exploration/développement des méthodes multi-niveaux pour la résolution de problèmes avec couplage multi-échelles, avec des interactions « globales » sur des distances comparables à la taille du domaine de calcul et des interactions « locales » sur des distances beaucoup plus courtes, typiquement l'épaisseur d'une couche limite
- Décider au sein de la communauté sur l'environnement commun R&D (plate-forme numérique) à mettre en place pour capitaliser et pour partager/échanger au mieux nos développements. Trouver un consensus suffisant sur des points critiques et mettre en place une première plate-forme.

## CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Le premier volet qui concernait le couplage entre environnements par le biais d'objets informatiques de type dll a permis de démontrer qu'il n'était pas nécessaire de converger vers une utilisation du même code de calcul pour tous les utilisateurs mais que des outils informatiques peuvent permettre leur couplage, ce qui a été notamment démontré en couplant l'environnement MATLAB-SIMULINK et l'environnement TRNSYS.

Ce premier résultat nous a également montré les limites de ce type de modélisation et nous a conduit à faire évoluer notre démarche à l'occasion du projet SIMENTHEC où le couplage se fait désormais par l'intermédiaire d'une plateforme jouant le rôle d'interface entre logiciels ce qui permet alors non pas de les faire co-simuler 2 à 2 mais de profiter simultanément des possibilités de plusieurs types d'outil de simulation.

Le deuxième volet consistait à développer une bibliothèque de modèles appelée DYNASIMUL permettant d'intégrer un grand nombre de modèles pour en assurer la diffusion et la pérennité. La mise en place de cette base est effective et sa maintenance se poursuit également au-delà du projet DYNASIMUL au sein du laboratoire CETHIL de l'INSA de Lyon grâce au soutien reçu dans le cadre d'un autre projet financé par le ministère de la recherche et nommé CLIMB qui permettra de poursuivre son développements au sein d'un serveur situé à l'INSA de Lyon.

Le dernier axe du projet DYNASIMUL concernait une réflexion sur l'évolution de la modélisation dans différents domaines en regard de la spécificité du contexte du bâtiment et de sa modélisation complexe, de la nécessité de réduction de modèles, de solveurs robustes face à des équations non linéaires... Différentes approches de modélisation ont été développées tant pour la résolution d'écoulements aérauliques tridimensionnels et dynamiques ou encore au niveau du sol pour de longues périodes de temps. Ces réflexions ont conduit à la proposition de nouveaux projets notamment au sein de l'ANR HABISOL intitulés SUPERBAT, PLUMES ou encore FIABILITE qui vont permettre de concrétiser les propositions réalisées jusqu'à présent dans le cadre de DYNASIMUL sachant que désormais un nombre d'équipes relativement nombreuses s'est engagé à développer des activités concernant la modélisation thermique du bâtiment.

Pour conclure, le projet DYNASIMUL aura été un véritable tournant dans le domaine de la simulation en France en partant d'une offre dispersée et peu développée pour aller vers une offre de différents logiciels fédérée autour d'une plateforme unique avec des capacités toujours plus ambitieuses pour résoudre tout types de problèmes énergétiques dans le bâtiment.





**DYNASIMUL**

**-Annexes-**

# ANNEXES

## Sommaire des annexes

<i>Annexes</i> .....	168
<i>Sommaire des annexes</i> .....	168
<i>Annexes volet 1</i> .....	171
<b>1 État de l'art en termes de modèles et d'outils de simulation</b> .....	<b>171</b>
1.1 Résumé .....	171
1.2 Introduction.....	172
1.3 Un état de l'art significatif en 2005 .....	172
1.4 Les outils sélectionnés .....	174
1.5 Informations discriminantes pour les outils .....	174
1.5.1 Informations générales et usage des outils.....	174
1.5.2 L'étendue des modèles :.....	174
1.5.3 Architecture de l'environnement de simulation : .....	175
1.6 Résultats de l'enquête .....	176
1.6.1 Informations générales.....	176
1.6.2 L'étendue des modèles.....	183
1.6.3 Architecture de l'environnement de simulation .....	188
1.7 Synthèse et Conclusions .....	190
1.8 Remerciements.....	192
<b>2 Enquête utilisateurs de logiciels de simulation</b> .....	<b>193</b>
2.1 Profil des sondés .....	193
2.2 Utilisation de logiciels de simulation thermique dynamique .....	193
2.3 Bâtiments simulés .....	194
2.4 Logiciels utilisés .....	194
2.5 Satisfaction support.....	196
2.6 Prix.....	196
2.7 Résultats qui intéressent les utilisateurs .....	196
2.8 Saisie du bâtiment.....	197
2.9 Scénarios de simulation .....	198
2.10 Logiciels en couplage .....	199
2.11 Améliorations souhaitées .....	200
2.12 Participation au groupe utilisateur .....	201
<b>3 Rapport sur les tests de l'exportation des types TRNSYS vers Simulink</b> .....	<b>202</b>
3.1 Introduction.....	202
3.2 Exportation des modèles seuls .....	204
3.2.1 Capteur solaire – type1 .....	204
3.2.2 Ballon de stockage – type 4a.....	207
3.2.3 Ballon de stockage – type 60d .....	211
3.2.4 Pipe – type 31 .....	215
3.2.5 Bâtiment multizone – type 56 .....	220
3.2.6 Régulateur – differential controller 2d .....	222
3.2.7 Régulateur PID – type 23.....	223
3.3 Exportation du modèle couplé .....	225
3.3.1 TRNSYS16/Exemples/begin .....	225
3.3.2 Problèmes rencontrés dans Simulink .....	228
3.4 Conclusion .....	228
<i>Annexes volet 2</i> .....	<b>231</b>
<b>1 Exemple de fiche Proforma</b> .....	<b>231</b>
Nom générique.....	231
Objet .....	231

Phénomène.....	231
Hypothèses.....	232
Méthode.....	233
Caractère.....	233
Résumé.....	233
Mode d'approche.....	233
Type.....	234
Validation.....	234
Informations générales.....	234
Auteur.....	234
Date de la fiche.....	234
Rédacteur.....	234
Nomenclature.....	234
Paramètres.....	234
Entrées.....	234
Sorties.....	234
Variables internes.....	235
Schéma fonctionnel.....	236
Schéma bloc.....	237
Formulation.....	237
Hypothèses détaillées.....	237
Conditions de validité.....	237
Listes des applications.....	238
Proforma équivalent.....	238
Modèles amont utilisés.....	238
Règles de cohérences pour assemblage.....	238
Difficultés.....	238

**Annexes volet 3..... 241**

<b>1 Complément d'information sur l'application de la méthode P.O.D. à l'équation de conservation de l'énergie dans l'air pour un cas 3D.....</b>	<b>241</b>
1.1 Objectifs et intérêt.....	241
1.2 Présentation du local étudié.....	241
1.3 La décomposition orthogonale aux valeurs propres (POD).....	243
1.3.1 Principe.....	243
1.3.2 Facteurs limitant de la POD.....	246
1.4 Méthode de calcul de la distribution de température.....	247
1.4.1 Choix du champ de vitesse et construction du modèle d'ordre élevé.....	247
1.4.2 Construction du modèle d'ordre réduit.....	248
1.5 Résultats.....	249
1.5.1 Simulations CFD.....	249
1.5.2 Modèle d'ordre élevé.....	253
1.5.3 Bases POD.....	254
1.5.4 Modèle d'ordre réduit.....	256
1.6 Conclusion et suite des travaux.....	258
1.7 NOMENCLATURE.....	259
1.8 REFERENCES.....	259



# Annexes volet 1

## 1 État de l'art en termes de modèles et d'outils de simulation

**Auteur :** Laurent Mora

### 1.1 RÉSUMÉ

De nombreux outils d'énergétique du bâtiment ont été développés par le passé. L'objet de ce document est de présenter les caractéristiques des outils suivants : EnergyPlus, ESP-r, TRNSYS, Comfie, Codyba, Th-C-E et SimSPARK. Un questionnaire, élaboré pour mettre en avant les aspects discriminants d'un point de vue des modèles mis en œuvre et de l'architecture des logiciels, a été transmis aux développeurs ou utilisateurs experts.

Les résultats de l'enquête mettent en avant deux catégories d'outils. Les premiers se limitent à évaluer le comportement thermique (et parfois aéraulique) du bâtiment seul (enveloppe et zones thermiques) alors que les seconds permettent de plus de prévoir les performances des équipements et de leur système de gestion.

Si tous les outils sont en mesure de traiter les transferts de chaleur (avec une limitation pour Th-C-E qui ne prend pas en compte les échanges entre zones dus à la ventilation) dans le bâtiment, seuls EnergyPlus, TRNSYS (associé à Comis/TRNFlow) et SimSPARK sont en mesure de traiter les transferts thermo-aérauliques couplés (et par voie de conséquence les problèmes qualité de l'air ou de ventilation naturelle).

Concernant l'architecture des outils, seuls TRNSYS, SimSPARK et dans une certaine mesure EnergyPlus permettent à l'utilisateur d'ajouter ses propres modèles. Si certains codes sources sont disponibles (sous licence GPL ou payante) la mise en œuvre de nouveaux modèles requiert un effort important pour identifier les hypothèses et structures nécessaires à la formulation et la résolution du problème. Pour les autres outils il faudra s'en remettre aux développeurs ou éditeurs pour l'intégration de nouveaux modèles. Ceci peut être un frein à l'usage d'un outil dans le cadre de la recherche.

Enfin, les nouveaux besoins identifiés concernent à la fois la modélisation physique dans le cadre de bâtiments très performants et l'usage de méthodes pour améliorer et fiabiliser les processus de diagnostic et de conception. A ce stade de l'étude il n'est pas possible de préciser les besoins concernant les méthodes. En revanche, la capacité des outils à intégrer de nouveaux modèles dans un cadre de résolution numérique robuste est un atout indéniable pour palier les faiblesses actuelles des outils dans l'analyse de la qualité de l'air, de l'impact du micro-climat urbain, de systèmes énergétiques innovants et de leur gestion intégrée.

## 1.2 INTRODUCTION

Ces dernières décennies, plusieurs centaines d'outils de simulation du comportement énergétique des bâtiments ont été développés à travers le monde. Le répertoire des outils élaboré par le Ministère de l'Énergie<sup>1</sup> (Department of Energy) des États-Unis est là pour l'attester : 345 outils liés à l'évaluation de l'efficacité énergétique, aux énergies renouvelables ou au développement durable des bâtiments y sont recensés. Ces outils peuvent prendre des formes diverses : bases de données, feuilles de calcul, outils d'analyse de composants ou de systèmes et logiciels de simulation des performances énergétiques de bâtiments dans leur ensemble.

L'objet de cet état de l'art est de fournir un état des capacités et des fonctionnalités des outils existants de simulation dynamique des performances énergétiques des bâtiments les plus significatifs pour le marché français. Il s'agira donc dans un premier temps de procéder au choix des outils les plus pertinents pour cette étude.

Enfin la description des outils devra permettre d'évaluer par la suite les possibilités de développement et d'évolution des environnements étudiés pour répondre aux nouveaux besoins qui seraient identifiés dans le projet, tant en termes de modèles (bâtiment, équipements, etc.) qu'en nouvelles possibilités d'exploitation de ces derniers (conception, diagnostic, gestion, etc.). La description des outils devra donc intégrer un volet suffisamment détaillé sur l'architecture de l'environnement de simulation.

## 1.3 UN ÉTAT DE L'ART SIGNIFICATIF EN 2005

En 2005, un rapport commandé et diffusé par ce même Ministère établissait une comparaison détaillée des capacités et fonctionnalités des 20 outils les plus significatifs du domaine de la simulation des performances énergétiques des bâtiments<sup>2</sup> (Le choix des outils n'est pas argumenté). Cette comparaison a été réalisée sur la base d'informations fournies par les développeurs eux-mêmes et selon une décomposition en catégories comme suit :

- Fonctionnalités générales de simulation
- Charges thermiques d'une zone
- Enveloppe du bâtiment, Eclairage et Ensoleillement
- Infiltrations, ventilation, modélisation multizone des écoulements
- Systèmes à énergie renouvelable

---

1 [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools\\_directory/](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/)

2 D.B. Crawley, J.W. Hand, M. Kummert and B.T. Griffith. Contrasting the Capabilities of Building Energy Performance Simulation Programs, [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools\\_directory/pdfs/contrasting\\_the\\_capabilities\\_of\\_building\\_energy\\_performance\\_simulation\\_programs\\_v1.0.pdf](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/pdfs/contrasting_the_capabilities_of_building_energy_performance_simulation_programs_v1.0.pdf), DOE, July 2005.

- Equipements et systèmes électriques
- Systèmes de chauffage, ventilation et climatisation (HVAC)
- Equipements (composants) de chauffage, ventilation et climatisation
- Emissions environnementales
- Disponibilité des données climatiques
- Evaluation économique
- Format de restitution des résultats
- Validation
- Interface utilisateur, Lien avec d'autres logiciels et disponibilité

Les résultats de cette enquête sont présentés sous la forme de 14 tableaux, faisant apparaître pour chacun des outils les fonctionnalités prises en charges associées à une appréciation qualitative (fonctionnalité opérationnelle, partiellement mise en œuvre, optionnelle, pour un usage recherche, usage réservé aux experts, difficultés à obtenir des données pour ce modèle). Les auteurs ont également relevé les difficultés suivantes :

Le grand nombre d'outils (20 dans ce cas) et le mode de recueil des informations (renseignements fournis essentiellement par les développeurs ou éditeurs des logiciels) n'a pas permis une relecture pertinente sur tous les outils par les seuls quatre auteurs.

Le manque d'homogénéité dans les concepts employés pour décrire les fonctionnalités des logiciels par les personnes ayant renseigné ces tableaux nuit à la clarté de la comparaison. En effet il est parfois nécessaire d'apporter des nuances dans la capacité d'un outil à mettre en œuvre telle ou telle fonctionnalité.

Une première analyse des tableaux comparatifs suscite les commentaires suivants :

Les fonctionnalités générales des outils telles que l'interface utilisateur (définition du problème : géométrie, modèles à utiliser, paramètres de la simulation), la formulation du problème (définition et assemblage des modèles) et la résolution du problème (le simulateur) devraient être plus précisément décrites de manière à mettre en évidence les évolutions possibles en termes d'exploitation des modèles.

La description des modèles disponibles fait apparaître une longue liste et une grande hétérogénéité entre les outils. Il serait souhaitable d'identifier au moins deux catégories d'outils : les premiers se spécialisant dans l'optimisation de l'enveloppe, les seconds apportant la capacité supplémentaire de modéliser les systèmes énergétiques et leurs organes de contrôle. Il demeure cependant difficile d'être exhaustif et précis sur les modèles de composants énergétiques. Les développements dans ce domaine sont très variés, souvent au grès des besoins en recherche et développement, ce domaine mériterait une plus grande harmonisation au regard de l'utilisation pratique des outils par les utilisateurs finaux.

Enfin, les modèles sont décrits sans aucune réelle hiérarchisation. Il doit être possible de structurer cette présentation autour des composants principaux du bâtiment et des grandes familles de phénomènes physiques pris en compte.

## **1.4 LES OUTILS SÉLECTIONNÉS**

La liste des outils sélectionnés dans cette étude a été établie selon trois catégories :

- Les outils s'imposant au niveau international : ENERGYPLUS, ESP-R, TRNSYS
- Les outils s'imposant au niveau national : SIMBAD, COMFIE+PLEIADES, TH-C-E/TH-C-E-X
- Les outils des laboratoires en France : CODYBA/CODYRUN, SIMSPARK

## **1.5 INFORMATIONS DISCRIMINANTES POUR LES OUTILS**

Pour chacun des outils sélectionnés il s'agira de décrire succinctement leurs capacités et fonctionnalités dans chacune des rubriques suivantes. Ces informations seront collectées auprès des développeurs eux-mêmes, auprès d'utilisateurs expérimentés ou à défaut dans la littérature.

### **1.5.1 INFORMATIONS GÉNÉRALES ET USAGE DES OUTILS**

- Audience/Etape du projet de construction
- Optimisation de l'enveloppe/Maîtrise de la consommation par l'efficacité des équipements et de la gestion
- Nombre d'utilisateurs
- Disponibilité
- Plateforme
- Coût
- Contact
- Validation/Comparaison (BESTEST, etc.)

### **1.5.2 L'ÉTENDUE DES MODÈLES :**

Description succincte des capacités des outils

L'environnement du bâtiment

- Effets du vent
- Apports solaires et protections solaires
- Convection extérieure
- Rayonnement IR (modèle de ciel, etc.)

L'enveloppe du bâtiment

- Propriétés thermo-physiques des matériaux
- Transferts au travers des éléments opaques
- Transferts de chaleur par conduction (différences finies, fonctions de transfert, méthodes de réduction, etc.)

- Transferts couplés masse+chaleur (humidité, polluants)
- Transferts au travers des éléments transparents
- Perméabilité à l'air, infiltrations
- Composants complexes (Double façades, Serre)

L'ambiance intérieure

- Echanges radiatifs courte et grande longueur d'onde
- Suivi de la tache solaire
- Echanges convectifs intérieurs
- Qualité de l'air : filtration, réactions chimiques, sources
- Scénarios d'usage et des charges internes

Systèmes énergétiques et contrôle

- Les systèmes intégrés
- Les composants (par énergie ?)
- Production
- Distribution
- Emission
- Le contrôle

### **1.5.3 ARCHITECTURE DE L'ENVIRONNEMENT DE SIMULATION :**

Il est d'usage de distinguer trois étapes dans la mise en œuvre d'une simulation dynamique : la description du problème à résoudre (géométrie, matériaux, scénarios, choix des modèles, etc.), la formulation du problème (mise en œuvre du problème numérique à résoudre : système d'équations à plat, couplage algorithmique, etc.) et enfin la résolution du problème.

**Décomposition des trois étapes ou intégration algorithmique, degré de liberté laissée à l'utilisateur sur ces 3 aspects**

**Description du problème (interopérabilité)**

- Format des données d'entrées
- Interface utilisateur

**Formulation (réutilisation des modèles)**

- Nature informatique des modèles
- Sémantique

**Résolution (robustesse, précision)**

- Méthode(s) de résolution : systèmes couplés (solveurs non-linéaire, linéaire), résolution séquentielle, etc.
- Pas de temps (fixe, variable, contrôle d'erreur d'intégration, etc.)
- Gestion des événements discrets

## 1.6 RÉSULTATS DE L'ENQUÊTE

A ce stade de l'étude, l'enquête auprès des développeurs ou utilisateurs experts a permis de recenser les caractéristiques d'une majorité des outils sélectionnés, seuls SIMBAD et CODYRUN n'ont pu être examinés avec précision. Une présentation succincte sera faite néanmoins.

Après un exposé rapide des outils au travers d'informations générales, l'état de développement des modèles est présenté sous les différentes catégories décrites dans la partie précédente. Enfin, une synthèse tente de mettre en avant les différences entre ces outils et introduit les questions relatives à l'analyse des évolutions possibles pour traiter les nouveaux besoins qui sont identifiés dans le projet SIMBIO.

Légende des tableaux :

- X Fonctionnalité opérationnelle et documentée
- P Fonctionnalité partiellement mise en œuvre ou en cours de développement
- O Fonctionnalité optionnelle (nécessite l'achat de licence additionnelle)
- R Fonctionnalité optionnelle à usage recherche
- E Fonctionnalité qui demande une grande expertise (ex. usage CFD, conduction 2D/3D)

### 1.6.1 INFORMATIONS GÉNÉRALES

	EnergyPlus
Audience	mécanicien, thermicien, architecte travaillant dans la conception et l'optimisation des bâtiments, bureau d'étude, centre de recherche, universitaire/laboratoire
Etape du projet de construction	esquisse - APS - APD
Optimisation de l'enveloppe	X
Efficacité des équipements et de la gestion	X
Nombre d'utilisateurs	46 000 téléchargements depuis Avril 2001
Disponibilité	
code source sous licence	Fortran 90
version évaluation	
Plateforme	
windows	Window 2000/XP/Vista
linux	X
autre	Macintosh
Coût	libre, possibilité d'acheter le code source 2500\$
Contact	<a href="http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/">http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/</a>
Validation/Comparaison (BESTEST, etc.)	testé pendant le IEA_BES et Test building load et HVAC. Résultat disponible sur <a href="http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/">http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/</a> manuel d'utilisateur très développé



	ESP-r
Audience	architecte, bureaux d'étude, centres de recherche
Etape du projet de construction	esquisse - APS - APD
Optimisation de l'enveloppe	X
Efficacité des équipements et de la gestion	X
Nombre d'utilisateurs	900
Disponibilité	
code source sous licence	Licence GPL
version évaluation	
Plateforme	
windows	X (emulation CygWin+Xwindow ou natif)
linux	X
autre	UNIX, SOLARIS, MAC OS X
Coût	Gratuit (GPL)
Contact	ESRU Department of Mechanical Engineering University of Strathclyde James Weir Building 75 Montrose Street Glasgow, Scotland G1 1XJ United Kingdom telephone +44 (141) 548 3986 facsimile +44 (141) 552 5105 e-mail <a href="mailto:esru@esru.strath.ac.uk">esru@esru.strath.ac.uk</a> web <a href="http://www.esru.strath.ac.uk/">http://www.esru.strath.ac.uk/</a>
Validation/Comparaison (BESTEST, etc.)	Nombreux Bestest

	TRNSYS
Audience	BET, universités, architectes
Etape du projet de construction	esquisse - APS - APD
Optimisation de l'enveloppe	X
Efficacité des équipements et de la gestion	X
Nombre d'utilisateurs	958 (Juin 2008)
Disponibilité	
code source sous licence	code source disponible
version évaluation	oui
Plateforme	
windows	X
linux	
autre	
Coût	4200 € HT version commerciale 2100 € HT version éducation 10 postes
Contact	<a href="http://software.cstb.fr">http://software.cstb.fr</a> <a href="mailto:software@cstb.fr">software@cstb.fr</a>
Validation/Comparaison (BESTEST, etc.)	BESTEST et autres travaux

	Comfie Pleiades
Audience	2000 licences commercialisées, essentiellement en France
Etape du projet de construction	esquisse - APS - APD
Optimisation de l'enveloppe	variations paramétriques
Efficacité des équipements et de la gestion	rendements nominaux et charge partielle, emplacement du thermostat, scénarios de consignes
Nombre d'utilisateurs	700
Disponibilité	
code source sous licence	au cas par cas
version évaluation	www.izuba.fr
Plateforme	
windows	x
linux	
autre	
Coût	900 € HT
Contact	www.izuba.fr
Validation/Comparaison (BESTEST, etc.)	BESTEST, IEA T34, PASSYS, AICVF

	Moteurs réglementaires Th-C-E , Th-C-E-x
Audience	
Etape du projet de construction	APD
Optimisation de l'enveloppe	Oui
Efficacité des équipements et de la gestion	Oui
Nombre d'utilisateurs	
Disponibilité	
code source sous licence	code source fourni après acceptation du contrat de licence GNU LGPL
version évaluation	
Plateforme	
windows	x
linux	
autre	
Coût	Gratuit
Contact	Fadi CHLELA Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) 84, avenue Jean-Jaurès – Champs-sur-Marne 77447 Marne-la-Vallée Cedex 2, France Tel : +33 (0)1 64 68 84 98 Fax : +33 (0)1 64 68 83 50 E-mail: fadi.chlela@cstb.fr
Validation/Comparaison (BESTEST, etc.)	Validation dans le cadre de normes européennes + BESTEST

	Codyba
Audience	bureaux d'études, pédagogie
Etape du projet de construction	esquisse - APS - APD
Optimisation de l'enveloppe	X
Efficacité des équipements et de la gestion	
Nombre d'utilisateurs	50 licences + clients globaux
Disponibilité	
code source sous licence	
version évaluation	X
Plateforme	
windows	X
linux	
autre	
Coût	1000 euros
Contact	Jean NOEL 15 Place Carnot 69002 Lyon contact@jnlog.com 0478376003 0607608842
Validation/Comparaison (BESTEST, etc.)	X

	SimSPARK
Audience	Laboratoires de recherche
Etape du projet de construction	esquisse - APS - APD
Optimisation de l'enveloppe	x
Efficacité des équipements et de la gestion	x
Nombre d'utilisateurs	-
Disponibilité	
code source sous licence	Solver gratuit, Modèles disponibles
version évaluation	X
Plateforme	
windows	x
linux	x
autre	
Coût	
Contact	SPARK : Simulation Simulation Group Bldg. 90, Room 3147 Lawrence Berkeley National Laboratory One Cyclotron Road Berkeley, CA 94720 USA <a href="http://gundog.lbl.gov/">http://gundog.lbl.gov/</a> SimSPARK (bibliothèque de modèles) LEPTIAB, INES/LOCIE, auteurs
Validation/Comparaison (BESTEST, etc.)	Validation de modèles en particulier, inter-comparaison sur les maisons INCAS

### **Présentation succincte de CODYRUN et SIMBAD :**

**CODYRUN** est très semblable à **CODYBA**, dans la mesure où ces deux outils ont eu une histoire commune de développement. Cependant, **CODYRUN**, développé par le LPBS (Université de la Réunion), est plutôt destiné à l'étude du confort d'été. Il dispose d'une interface utilisateur simple et d'outils de post-traitement. En termes de modèles, il est très semblable à **CODYBA** avec quelques éléments complémentaires concernant la prise en compte de l'humidité pour le transfert dans les parois et la possibilité de modéliser des équipements de climatisation tels que des systèmes thermodynamiques à détente directe (**SPLIT**).

**SIMBAD** n'est pas véritablement un outil d'évaluation des performances énergétiques des bâtiments. Il s'agit plutôt d'une bibliothèque de modèles de composants et de systèmes énergétiques permettant de prévoir le comportement des équipements techniques et de leur régulation. **SIMBAD** est bâti dans l'environnement **MATLAB/SIMULINK** et dispose donc des capacités graphiques et de calcul de celui-ci. La bibliothèque dispose de modèles simplifiés de bâtiments (monozone) ou de pièces (simplifié, zonal) qui peuvent être connectés aux modèles d'équipements techniques tels que des éléments de production ou de stockage (pompe à chaleur, capteur solaire, ballon d'eau chaude avec stratification, etc.), des éléments de distribution hydraulique ou aéraulique (tubes, gaines, centrale de traitement d'air, pompes, ventilateurs, etc.), des systèmes d'émission de la chaleur ou du froid (radiateurs, plancher chauffant/rafraîchissant, etc.) et des organes de contrôle.

### **Commentaires :**

D'après ces premiers renseignements, nous sommes en mesure de classer les outils étudiés en deux catégories en fonction de leur capacité à représenter les phénomènes de transfert dans le bâtiment seul (Enveloppe et zones) ou dans le bâtiment et ses équipements techniques (Systèmes et Contrôle). La deuxième catégorie permet donc d'une part de travailler à l'optimisation des performances énergétiques et d'autre part à limiter la consommation d'énergie via le dimensionnement et la gestion d'équipements performants.

- Performance de l'enveloppe et des équipements : **EnergyPlus**, **ESP-r**, **TRNSYS** et **SimSPARK**.
- Performance de l'enveloppe uniquement : **Comfie**, **Codyba** et **Th-C-E**.

Concernant la disponibilité du code source, certains outils offrent un accès sous licence open source (**ESP**, **Th-C-E**) ou moyennant le paiement d'une licence « développeur » (**EnergyPlus**). Enfin, **SimSPARK** donne accès au code source des modèles.

Les outils présentant le plus grand nombre d'utilisateurs sont **EnergyPlus**, **ESP-r** et **TRNSYS** au niveau international et **Comfie** au niveau national (c'était un des critères de sélection des outils).

Les outils sont essentiellement disponibles pour le système d'exploitation Windows, sauf EnergyPlus, Esp-r et SPARK qui offrent des possibilités supplémentaires (linux et parfois Mac OS).

Enfin, tous ont été soumis à validation ou inter-comparaisons dans le cadre de projets de recherche nationaux ou internationaux.

## 1.6.2 L'ÉTENDUE DES MODÈLES

### 1.6.2.1 L'environnement du bâtiment

Fonctionnalités	EnergyPlus	ESP-r	TRNSYS	Comfie Pleiades	Codyba	Th-C-E, Th-C-E-X	SimSPARK
<b>Effets du vent</b>							
calcul automatique des coefficients de pression	X	X	O <sup>3</sup>	P		X	P
<b>Apports solaires et protections solaires</b>							
<b>Solaire direct et diffus</b>							
calcul des apports à chaque heure	X	X	X	X	X	X	X
calcul des apports à chaque pas de temps	X		X	X	X	X	X
masque solaire horizontal	X	X	X	X	X	X	X
masque solaire vertical	X	X	X	X	X	X	X
apports solaires au travers de stores tenant compte de la réflexion du sol	X			X	X	X	
inter-réflexions avec bâtiments voisins ou élément externe du bâtiment	X	X	P				
protections solaires transparentes	X		X	X <sup>4</sup>	X	X	
scénarios d'ouverture/fermeture protections solaires	X	X	X	X <sup>6</sup>	X	X	
apports solaires directs transmis par les vitrages intérieurs (double façade, serre, etc.)	X		P	X <sup>5</sup>			
<b>Eclairage naturel</b>	X <sup>6</sup>	X		R,P			
calcul éclairage (avec masques)	X	X		R,P			
calcul éclairage en tenant compte des inter-réflexions avec bâtiments voisins et éléments du bâtiment	X	X					
<b>contrôle des équipements de protection</b>	X	X	X			X	
<b>Rayonnement IR : modèle de ciel</b>							
isotrope		X	X	X	X	X	X
anisotrope	X	X	X				
sélection par l'utilisateur		X	X				
<b>Convection extérieure</b>							
coef. d'échanges fixes	X	X	X			X	
valeurs fixées par l'utilisateur	X	X	X		X		X
dépendants de la température de l'air	X	X	X				
dépendants de la vitesse de l'air	X	X		X <sup>7</sup>			X
corrélations définies par l'utilisateur	X	E	X				X
<b>Conduction dans le sol</b>							
modèle simplifié			X	X	X	X	X
1D	X	X	O	X <sup>8</sup>		X	
2D/3D	E	E	O				

<sup>3</sup> Avec l'association de Comis ou TRNFlow

<sup>4</sup> In % d'occultation est donné dans un scénario horo-journalier x 52 semaines, ou mensuel (végétation à feuilles caduques)

<sup>5</sup> L'utilisateur doit définir un vitrage externe équivalent (facteur solaire = produit des facteurs solaires des 2 façades, U = 0, masques éventuels à décrire)

<sup>6</sup> Lien avec Radiance

<sup>7</sup> Trois niveaux d'exposition au vent

<sup>8</sup> Autour des "puits canadiens"

**Commentaires :**

Les différences les plus marquantes apparaissent sur la prise en compte :

- des effets du vent (et du problème aéralique en général, on retrouvera cette caractéristique au niveau de l'ambiance)
- d'éléments de protection solaire et de leur contrôle
- de l'éclairage naturel
- du couplage conductif avec le sol

D'une manière générale, EnergyPlus, ESP-r, TRNSYS et Comfie caractérisent avec plus de détails les sollicitations solaires en présence de protections. Seuls EnergyPlus et ESP-r sont en mesure d'effectuer des calculs d'éclairage naturel pour le contrôle de l'éclairage artificiel. Enfin, seuls EnergyPlus, ESP-r et TRNSYS mettent en oeuvre des calculs 2D/3D pour les transferts par conduction avec le sol.

**1.6.2.2 L'enveloppe du bâtiment**

Fonctionnalités	EnergyPlus	ESP-r	TRNSYS	Comfie Pleiades	Codyba	Th-C-E, Th-C-E-x	SimSPARK
<b>Propriétés thermo-physiques des matériaux</b>							
constantes	X	X	X	X	X	X	X
variables	X	X					X
matériaux à changement de phase	X	X		P	X		X
<b>Transferts au travers des éléments opaques</b>							
<b>Transferts de chaleur par conduction</b>							
différences finies	X	X		X	X	X	X
fonctions de transfert	X		X				
méthodes de réduction				X			
<b>Transferts couplés masse+chaleur</b>							
modèle simplifié (buffer, etc.)	X		X		X		X
isothermes de sorption	X	X	X	P			X
<b>Transferts au travers des éléments transparents</b>							
réflexion interne et externe des vitrages	X		X	X <sup>9</sup>	X		X
stores intégrés aux vitrages (entre les vitres)	X	X		X <sup>4</sup>	X		
vitrages électrochromes	X	X		X <sup>4</sup>			
vitrages thermochromes		X					
utilisation données outil Window	X <sup>10</sup>	X <sup>10</sup>	X <sup>10</sup>				
<b>Perméabilité à l'air, infiltrations</b>							
infiltration par ouverture (fenêtre, portes, ...)	X	X	X	P			X
infiltration répartie	X	X	X	P	X	X	X
<b>Composants complexes (Double façades, Serre, Mur Trombe)</b>	X	X	X	X <sup>11</sup>			X <sup>11</sup>

<sup>9</sup> Le facteur solaire dépend de l'angle d'incidence et du nombre de vitres

<sup>10</sup> Window version 5 et plus récentes

<sup>11</sup> Représentation au moyen de zones supplémentaires

## Commentaires :

Seul Comfie implémente une méthode de réduction pour les transferts par conduction dans les parois. Tous les outils traitent la présence d'humidité dans la paroi sauf Th-C-E. Ce dernier traite également les vitrages de manière simplifiée. Enfin, Codyba et Th-C-E ne permettent pas de représenter des composants complexes tels que double-façade, serre ou mu Trombe.

### 1.6.2.3 L'ambiance intérieure

Fonctionnalités	EnergyPlus	ESP-r	TRNSYS	Comfie Pleiades	Codyba	Th-C-E , Th-C-E-x	SimSPARK
<b>Rayonnement</b>							
IR : facteurs de forme	X	X	P	X <sup>12</sup>	P		
IR : température radiante moyenne	X	X	P		X	X	X
Visible : Suivi de la tache solaire	X	X	P				X
Visible : Suivi des pertes vers l'extérieur ou d'autres zones	X	X	X	X <sup>13</sup>			X
Visible : Affectation du flux transmis par les vitrages au plancher	X	X	X		X		
Visible : Répartition du flux transmis par les vitrages entre les surfaces de la zone	X	X	X	X			X
<b>Echanges convectifs intérieurs</b>							
coef. d'échanges fixes	X	X	X	X		X	
valeurs fixées par l'utilisateur	X	E	X		X		X
dépendants de la température de l'air	X	X	X				X
corrélations définies par l'utilisateur		X	X				X
dépendants de résultats de calculs CFD	P <sup>14</sup>	X					
<b>Confort thermique</b>							
Fanger	X	X	X		X		X
Autre	X <sup>15</sup>	X <sup>16</sup>		X <sup>17</sup>		X	X
<b>Ventilation</b>							
ventilation externe par zone	X	X	X	X	X	X	X
echanges entre zones	X	X	X	X	O		X
bilan de masse automatique sans modèle en réseau			O	X			
modèle multi-zone en réseau	X	X	O	P	R		X
ventilation naturelle/hybride	X	X	X	P			X

<sup>12</sup> Facteurs de forme simplifiés permettant d'évaluer le rayonnement net transmis par les vitrages, adapté à la présence de mobilier

<sup>13</sup> Pertes vers l'extérieur seulement

<sup>14</sup> Prochainement possible avec design builder

<sup>15</sup> Pierce, KSU

<sup>16</sup> TRM, CFD

<sup>17</sup> Histogrammes, degrés jours d'inconfort

Fonctionnalités (suite)	EnergyPlus	ESP-r	TRNSYS	Comfie Pleiades	Codyba	Th-C-E , Th-C-E-x	SimSPARK
<b>Qualité de l'air</b>							
sources	X	X	O				X
filtration	X	X	O				
réactions chimiques	X		O				
<b>Inertie thermique des cloisons intérieures</b>	X	X	X	X	X	X	X
<b>Méthode automatique de calcul de charges pour une journée type (dimensionnement)</b>	X	X	X				
<b>Eclairage</b>							
Eclairage intérieur à partir des fenêtres	X	X		P			
contrôle de l'éclairage artificiel (prise en compte des charges)	X	X	X	P		X	
cartes d'éclairage dans la zone (hétérogénéité)	X	X					
Scénarios d'usage et des charges internes (voir description du problème dans Architecture)	X	X	X	X	X	X	X

### Commentaires :

La modélisation de l'ambiance est assez homogène entre EnergyPlus, ESP-r, TRNSYS et SimSPARK. Comfie présente quelques lacunes concernant la convection interne, le suivi de la tâche solaire ou enfin l'évaluation de la qualité de l'air. Codyba et Th-C-E offrent une modélisation simple des transferts dans la zone. Enfin, Th-C-E ne permet pas de prendre en compte les échanges aérauliques entre zones.

### 1.6.2.4 Systèmes énergétiques et contrôle

Fonctionnalités	EnergyPlus	ESP-r	TRNSYS	Comfie Pleiades	Codyba	Th-C-E , Th-C-E-x	SimSPARK
<b>Modèle de bâtiment simplifié</b>	X	X	X				
<b>Systèmes idéaux (puissance pour assurer une consigne)</b>							
Chauffage	X	X	X	X	X	X	X
Climatisation	X	X	X	X	X	X	X
<b>Les systèmes intégrés</b>							
ECS solaire	X	X	X	X		X	X
Système PV	X	X	X	X			
Micro-cogénération bois				X			
Puits canadien	X	X	O	X			X
<b>Les composants</b>							
<b>Production et stockage</b>							
Capteurs solaires thermiques	X	X	X				X
Capteurs solaires photovoltaïques	X	X	X				
Centrale de traitement d'air	X	X	X				X
Chaudières	X	X	X				X
Pompes à chaleur	X	X	X				X
Groupe frigorifique à compression de vapeur	X	X	X				X
Ballon de stockage d'eau chaude (avec stratification)	X	X	X				X
Batteries pour le stockage d'électricité	X	X	X				
<b>Distribution</b>							
Echangeurs	X	X	X				X
Humidificateurs	X	X	X				X
Pompes	X	X	X				X
Systèmes VAV (volume d'air variable)	X	X	X				X
Ventilateurs	X	X	X				X
Organes électriques: onduleurs, etc.	X	X	X				
<b>Emission</b>							
Ventilo-convecteur	X	X	X				X
radiateur	X	X	X				X
plancher chauffant	X	X	X				X
<b>Le contrôle</b>							
Capteur de température	X	X	X				X
Capteur d'humidité	X	X	X				X
Commande proportionnelle	X	X	X				X
Commande proportionnelle, intégrale	X	X	X				X
Commande proportionnelle, intégrale, dérivée	X	X	X				X

#### Commentaires :

Ce tableau ne présente que les grandes familles de composants et systèmes énergétiques du bâtiment. Il met en évidence les deux catégories d'outils mentionnées précédemment (outils pour l'évaluation des performances de l'enveloppe et des équipements ou enveloppe seulement). Cependant, on observe que les outils spécialisés dans l'enveloppe permettent

d'évaluer quelques systèmes intégrés tels que la production d'eau chaude sanitaire solaire, la production d'électricité photovoltaïque, la présence de puits canadiens ou d'une micro-cogénération bois pour Comfie seulement. Ces évolutions permettent d'affiner l'étude de projets d'architecture bioclimatique de plus en plus nombreux.

Concernant les composants de production/stockage, distribution et émission et enfin de contrôle, il conviendra de se référer notamment au rapport du DOE<sup>2</sup> et aux documentations des différents outils (EnergyPlus, ESP-r, TRNSYS et SimSPARK) pour obtenir de plus amples détails sur les modèles disponibles.

### 1.6.3 ARCHITECTURE DE L'ENVIRONNEMENT DE SIMULATION

Fonctionnalités	EnergyPlus	ESP-r	TRNSYS	Comfie Pleiades	Codyba	Th-C-E, Th-C-E-x	SimSPARK
<b>Architecture générale</b>							
Décomposition : Description, Formulation, Résolution			X				X
Intégration algorithmique	X	X	X	X	X	X	
<b>Description du problème</b>							
Interface utilisateur		X	X	X	X	X	
<b>Géométrie</b>				X			
parois verticales, toiture, planchers	X	X	X	X	X	X	X
portes, fenêtres, fenêtres de toit	X	X	X	X	X	X	X
protections solaires	X	X	X	X	X	X	
importation fond de calque à partir outils DAO	O <sup>18</sup>	X	P	X			
importation géométrie à partir d'outils DAO	O <sup>18</sup>	X	X		P		
<b>Composants</b>							
bibliothèque matériaux	X	X	X	X	X		
bibliothèque de parois	X	X	X	X			X
<b>Charges internes</b>							
scénarios journaliers	X	X	X				X
scénarios hebdomadaires	X	X	X	X	X	X	X
scénarios annuels (vacances, etc.)	X		X	X		X	X
<b>Interopérabilité</b>							
Echange description avec d'autres outils	X	X	X	X	P		
<b>Equipements</b>	X	X	X				X
<b>Formulation (modèles)</b>							
intégrés à l'outils	X	X	X	X <sup>19</sup>	X	X	
dll	X		X				X
langage de définition			X				X
format neutre (réutilisable)					X		X
module algorithmique			X				X
système d'équations							X

<sup>18</sup> Google Sketchup

<sup>19</sup> Sous forme d'objets informatiques

Fonctionnalités (suite)	EnergyPlus	ESP-r	TRNSYS	Comfie Pleiades	Codyba	Th-C-E , Th-C-E-x	SimSPARK
<b>Résolution</b>							
<b>méthodes de résolution</b>							
résolution séquentielle (convection, rayonnement, bilans, systèmes)						X	
résolution couplée (itérations pour chaque pas de temps)	X	X	X	X <sup>19</sup>	X		X
résolution itérative de systèmes non linéaires (Newton)		X		X <sup>20</sup>			X
autres méthodes (systèmes non linéaires)			X				X
méthodes spécifiques systèmes linéaires					X		X
<b>Intégration (pas de temps)</b>							
spécifié par l'utilisateur pour l'interaction environnement/zone thermique	X	X	X	X	X		X
différent pour la zone thermique et les systèmes	X	X					X
défini par l'utilisateur à la fois pour la zone et les systèmes	X <sup>21</sup>	X	X				X
dynamique (stabilité convergence)	X	X			X		X
dynamique (contrôle de l'erreur d'intégration)							X
<b>Gestion des événements discrets</b>							
(une variable peut prendre deux états bien définis entre 2 itérations, 2 pas de temps)	X	X	X				X

### Commentaires :

Concernant l'architecture générale des outils présentés, peu d'entre eux (SimSPARK et TRNSYS en partie) mettent en œuvre la simulation par des processus permettant de dissocier les étapes de description (géométrie, matériaux, etc.), formulation (modèles physiques) et résolution du problème. TRNSYS profite ici de la stratégie de modularité. Le problème à résoudre est décrit par l'assemblage de modules implantant chacun un modèle plus ou moins complexe. Dans ce cas, pour une même description, les modèles restent interchangeables sous réserve de respecter les mêmes connexions avec le reste du problème (mêmes variables à connecter). La résolution est traitée *a posteriori*. Néanmoins pour TRNSYS, chaque module (appelé Type) possède son propre algorithme de résolution permettant d'évaluer les résultats à propager vers les modules suivant étant connues les données et les paramètres. De plus, TRNSYS autorise l'utilisateur à implanter ses propres modèles via le langage Fortran. Avec SimSPARK, les modèles sont formulés en termes d'équations symboliques au moyen d'un langage neutre. L'assemblage des modèles se formalise alors par une mise à plat d'un système d'équations algèbro-différentielles à résoudre. Ici, les modèles sont interchangeables à l'échelle de l'équation et les modèles sont indépendants de l'algorithmique de résolution, ils sont donc beaucoup plus lisibles pour le modélisateur. Enfin, il faut noter que EnergyPlus est en mesure de coupler des modèles de systèmes énergétiques décrit avec SPARK au sein d'une simulation classique. C'est la possibilité laissée à l'utilisateur d'ajouter des modèles sans accéder au code.

<sup>20</sup> Résolution par itération de modèles non linéaires couplés au modèle linéaire de base (matériau à changement de phase par exemple)

<sup>21</sup> Seulement pour la zone

Seul SPARK possède un solveur non linéaire permettant de mettre en œuvre une intégration en temps avec contrôle de l'erreur d'intégration. Ceci est particulièrement important pour traiter correctement des singularités liées à la dynamique de problèmes impliquant des composants aux constantes de temps d'ordre de grandeur différents (notamment pour les équipements et le contrôle).

Enfin, seuls EnergyPlus, ESP-r, TRNSYS et SPARK sont en mesure de résoudre des systèmes à événements discret. Ceci est essentiel pour une représentation correcte des organes de contrôle et des équipements.

## 1.7 SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

Cette étude basée sur une enquête auprès des développeurs et des d'utilisateurs experts a permis de mettre en lumière les caractéristiques des outils sélectionnés notamment en termes de modèles disponibles.

Nous avons pu identifier deux catégories d'outils qui sont soit dédiés à l'évaluation des performances énergétiques de l'enveloppe, soit qu'ils permettent de plus d'évaluer les performances des équipements techniques associés. Aussi, seuls quelques outils sont en mesure de proposer une modélisation couplée des phénomènes thermiques et aérauliques et seuls ESP-r et SimSPARK proposent une formulation couplée du problème, EnergyPlus et TRNSYS (associé à COMIS/ ou TRNFLOW) réalisent des itérations entre un modèle thermique et un modèle aéraulique. Enfin, concernant les caractéristiques générales, on peut noter que le fait de disposer du code source peut être un atout pour le chercheur.

Concernant la modélisation de l'environnement du bâtiment et l'ambiance intérieure, de grandes différences apparaissent dans leur capacité à traiter les effets du vent et la ventilation (et forcément la qualité de l'air), l'éclairage naturel, le couplage avec le sol, le calcul des apports solaire avec protections de géométrie complexe et enfin le suivi de la tâche solaire.

Certains outils affichent le choix de représenter un nombre limité d'équipements énergétiques de manière simple et intégrée (un modèle pour tout le système et son contrôle). Il s'agit de systèmes participant à l'architecture bioclimatique (Puits canadien, CESI, PV et micro-génération bois). Les autres permettent de détailler tous les composants.

L'analyse de l'architecture des environnements révèle que seuls SimSPARK, TRNSYS et dans une moindre mesure EnergyPlus, permettent à l'utilisateur d'ajouter ses propres modèles. On peut noter que cette caractéristique a eu un fort impact sur l'utilisation de TRNSYS dans les laboratoires de recherche. Cependant, l'utilisateur peut parfois se sentir à l'étroit du fait des hypothèses qui ont été faites sur les autres modèles (pas de temps, modélisation physique). La cohérence nécessaire aux modèles (hypothèses, échelles, etc.) et à la résolution (notamment en

temps) peut s'avérer impossible. Pour les autres outils, l'utilisateur doit accéder au code source ou s'en remettre aux développeurs ou éditeurs. L'évolution de ces outils (y compris EnergyPlus pour la majeure partie) requiert une connaissance importante du code et des hypothèses qui sont faites en termes de formulation et de résolution. Ces deux points étant généralement intimement liés. Donc, si certains codes sources sont disponibles, il faut admettre qu'un effort très important sera nécessaire avant d'être en mesure d'ajouter ses propres modèles. Ce point mériterait que la description des codes soit approfondie (sous la forme d'algorithmes) afin de préciser les procédures mises en œuvre pour la formulation et la résolution.

Les besoins identifiés à ce jour concernent la **modélisation physique** (notamment l'évaluation de la qualité de l'air, l'impact du micro-climat urbain, les systèmes innovants, les transferts couplés chaleur/humidité), le couplage avec une **gestion énergétique intégrée** dans un contexte de production locale d'énergies (modèles composants, algorithmique des contrôleurs, etc.) et enfin de **nouvelles méthodes pour fiabiliser et optimiser les processus de diagnostic et de conception énergétique des bâtiments** qui ont trait à :

- l'évaluation des incertitudes,
- la sensibilité des modèles,
- l'inversion de modèles,
- des méthodes d'optimisation globale.

Les outils et techniques à mettre en œuvre pour traiter ces derniers points ne sont pas précisés aujourd'hui. On peut néanmoins noter qu'ESP-r possède diverses méthodes (internes et externes) pour l'analyse des incertitudes et que notamment ESP-r, EnergyPlus, TRNSYS ou SimSPARK ont pu être associés à des outils d'optimisation.

En revanche, les outils de simulation pour la recherche doivent permettre de mettre en œuvre :

les modèles physiques liés aux phénomènes ne pouvant plus être négligés dans le contexte de bâtiments à hautes performances,

les modèles de composants ou systèmes et l'algorithmique des contrôleurs associés pour une gestion énergétique intégrée des bâtiments.

Dans les deux cas, il est souhaitable de disposer d'outils permettant de mettre en œuvre de nouveaux modèles rapidement, de faciliter le couplage avec l'existant et assurant une résolution fiable et robuste.

## **1.8 REMERCIEMENTS**

Nous tenons à remercier chaleureusement les développeurs et experts ayant accepté de répondre à notre enquête pour la réalisation de cette étude à savoir : P. BOURDOUKAN (INES, CNRS), F. CHLELA (CSTB), A. GUIAVARCH (CEP, Ecole des Mines), W. KEIHOLTZ (CSTB), J. NOËL (JNLOG), B. PEUPORTIER (CEP, Ecole des Mines), C. SPITZ (INES, CNRS) et P. TITTELEIN (INES, CNRS).

## 2 Enquête utilisateurs de logiciels de simulation

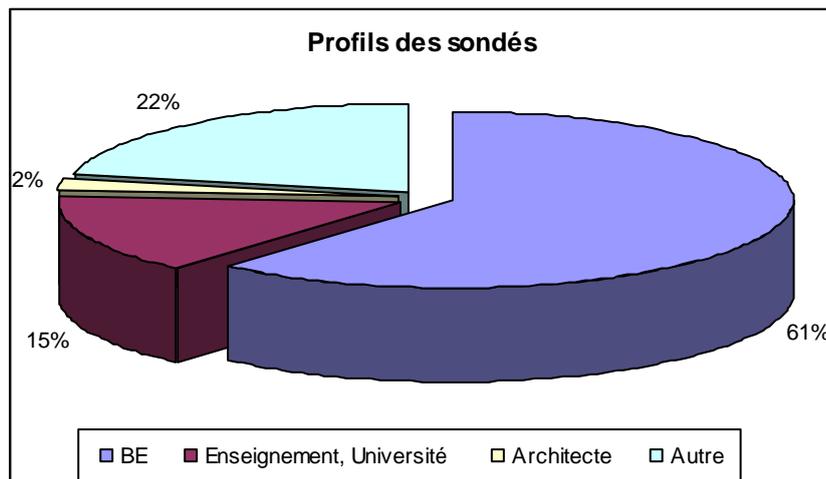
Auteur : Cythelia

Afin de mieux cerner les besoins et attentes des utilisateurs finaux, le questionnaire figurant dans le rapport précédent a été envoyé à un nombre important d'utilisateurs potentiels, provenant d'une base CSTB.

Un envoi massif (environ 1 600 personnes) a donc été effectué en octobre 2008, et les réponses ont été rassemblées puis traitées à partir de janvier 2009.

**84 questionnaires remplis ont été retournés, ce qui constitue un taux de réponse faible, de 5% environ.**

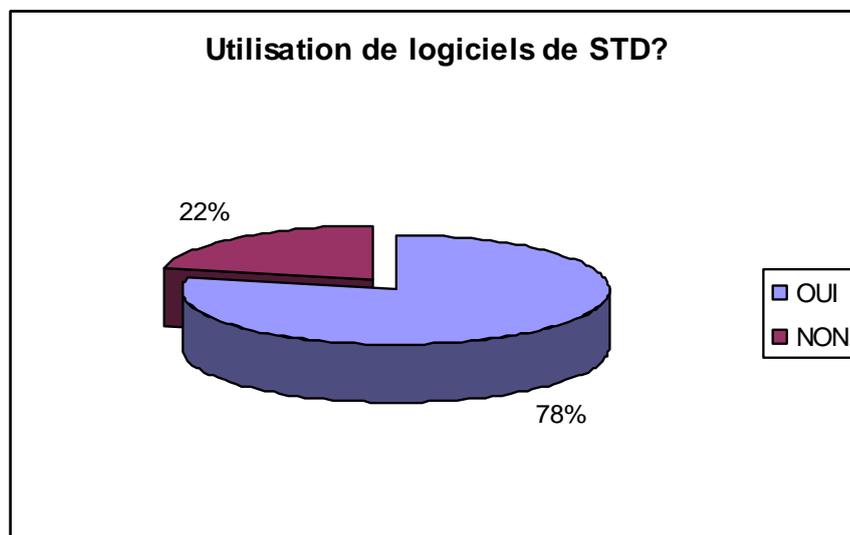
### 2.1 PROFIL DES SONDÉS



La majorité des sondés est constituée de bureaux d'études.

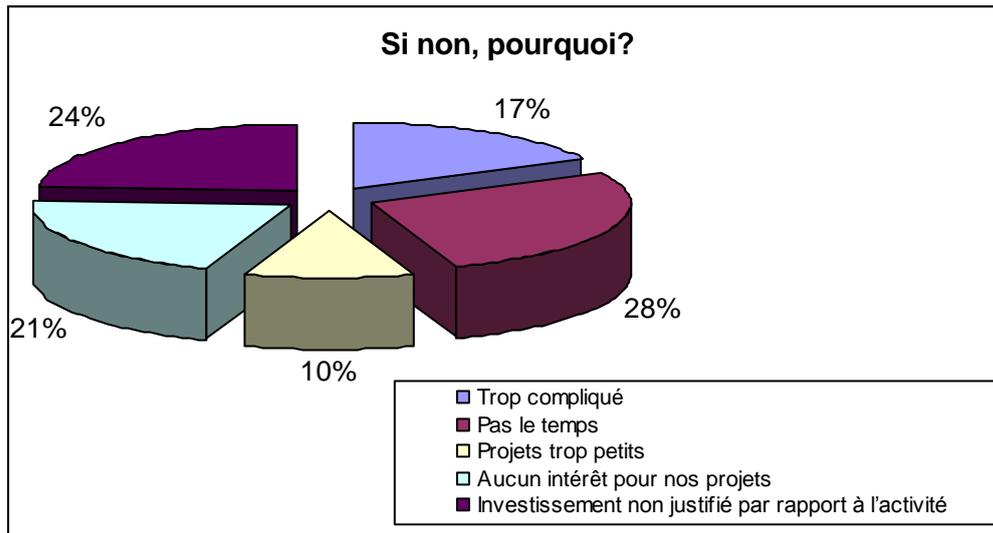
Dans la catégorie « Autres », on trouve notamment deux collectivités, un espace info-énergie

### 2.2 UTILISATION DE LOGICIELS DE SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE



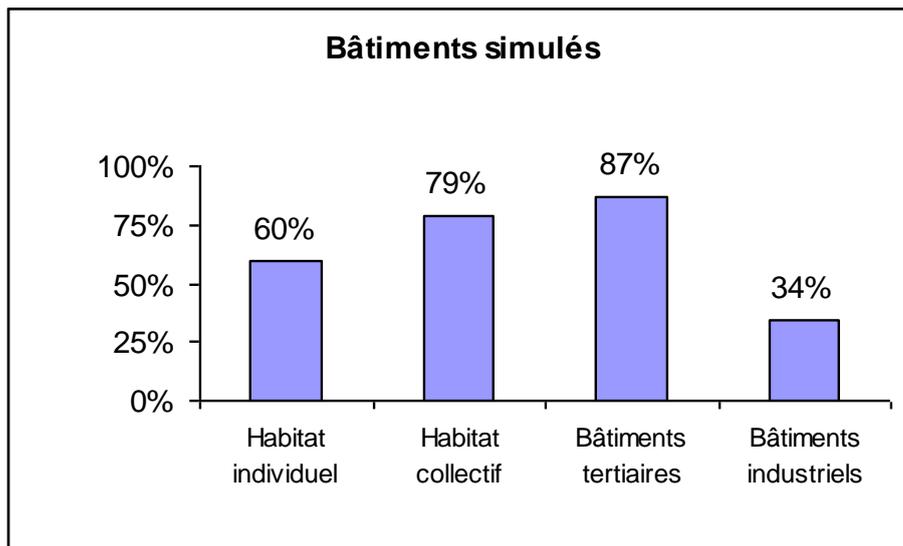
Tous les répondants n'utilisent pas un ou plusieurs logiciels de STD.

La raison est que pour 31% d'entre eux, les projets traités ne nécessitent pas de tels logiciels. Pour 24%, l'investissement ne se justifie pas car le nombre de projets pouvant être traités par ces logiciels est trop faible. Une part non négligeable (17%) trouve leur utilisation trop complexe.



### 2.3 BÂTIMENTS SIMULÉS

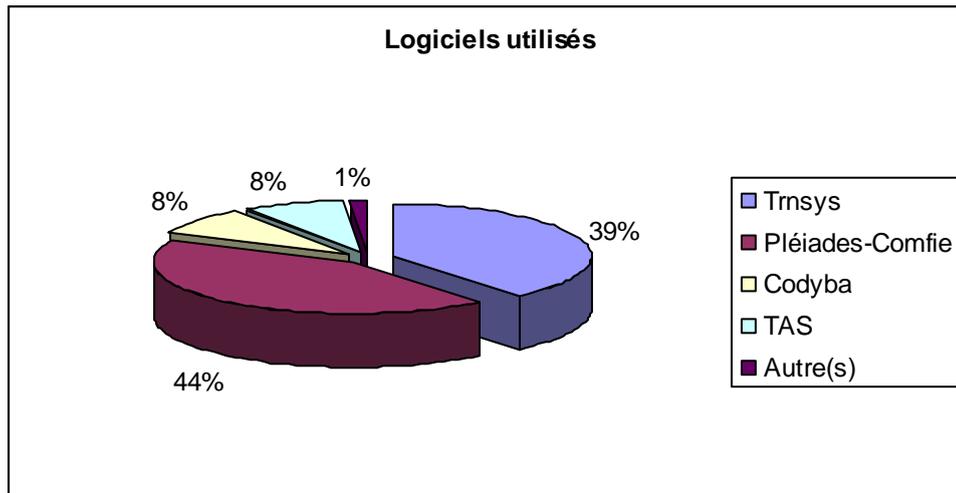
Les « petits » projets (habitat individuel) ne sont en effet traités que par 60% des utilisateurs, la grosse majorité traitant des projets tertiaires ou du logement collectif.



Il aurait été intéressant de connaître pour chaque utilisateur la part de chaque type de projet dans l'activité « Simulation », mais on peut penser que les maîtres d'ouvrage pour l'habitat individuel ne sont pas encore prêts à payer pour une étude thermique. Même pour l'acquisition de labels de performance énergétique, les études sont réalisées avec des outils réglementaires.

### 2.4 LOGICIELS UTILISÉS

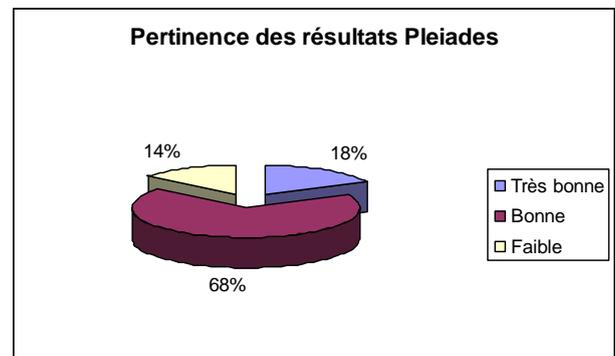
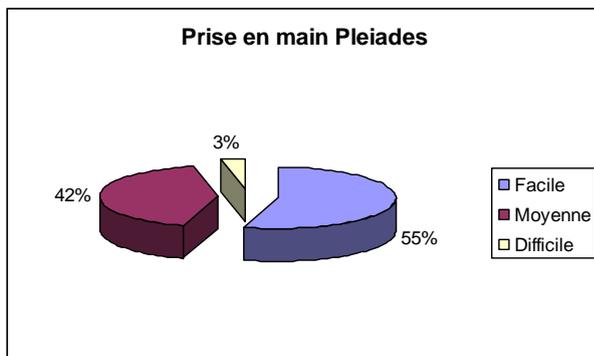
Pléiades-Comfie et Trnsys sont très largement en tête des logiciels de simulation et sont utilisés par plus de 80% des sondés.



Les autres logiciels cités par les sondés sont : Design Builder, Energy Plus, Lesosai, HAP (Carrier), IES, PowerDomus, Ecotect

Nous avons demandé aux utilisateurs d'évaluer les logiciels utilisés ; les réponses ont été plus nombreuses pour Pleiades et Trnsys.

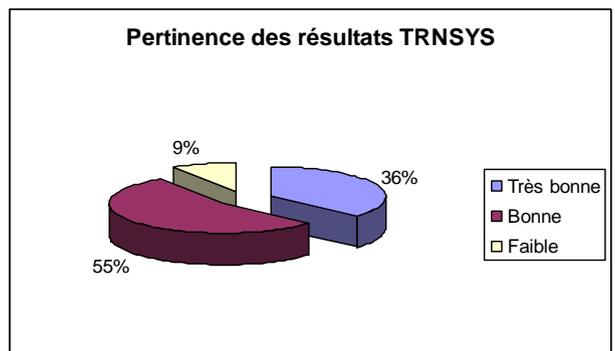
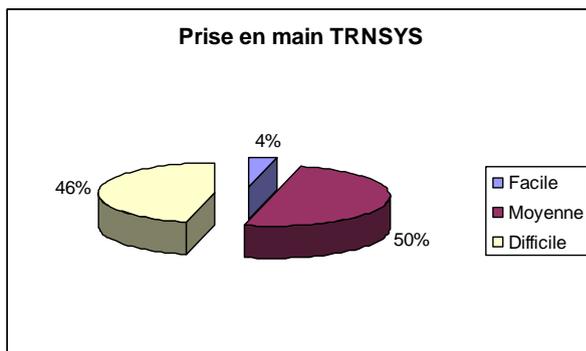
### Evaluation Pleiades



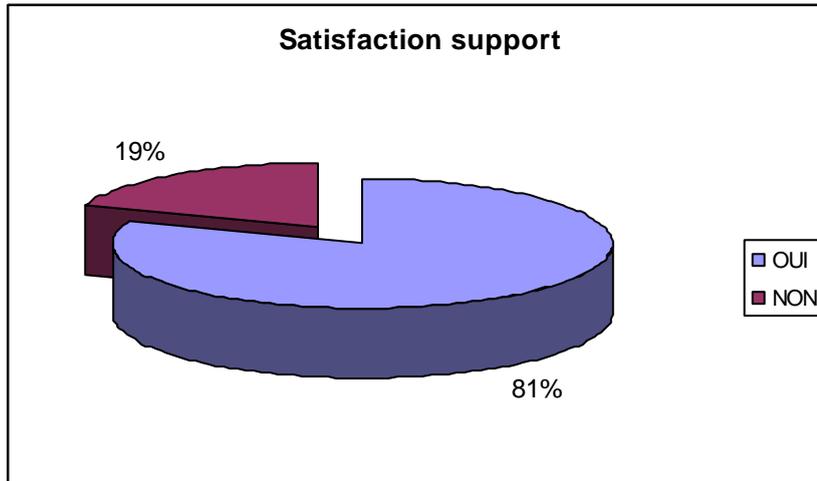
Les retours utilisateurs sur la prise en main du logiciel Pleiades sont plutôt positifs, seuls 3% des utilisateurs la juge difficile. La pertinence et la fiabilité des résultats sont jugés bons pour une grosse majorité des sondés.

### Evaluation Trnsys

La prise en main de Trnsys est jugé plus difficile que pour Pleiades, mais les résultats sont jugés un peu plus fiables et pertinents.

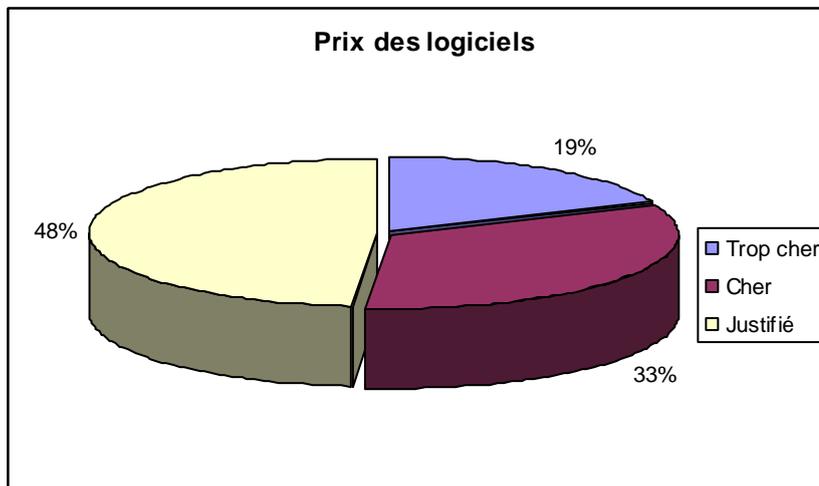


## 2.5 SATISFACTION SUPPORT



La grande majorité des utilisateurs sont satisfaits du support.

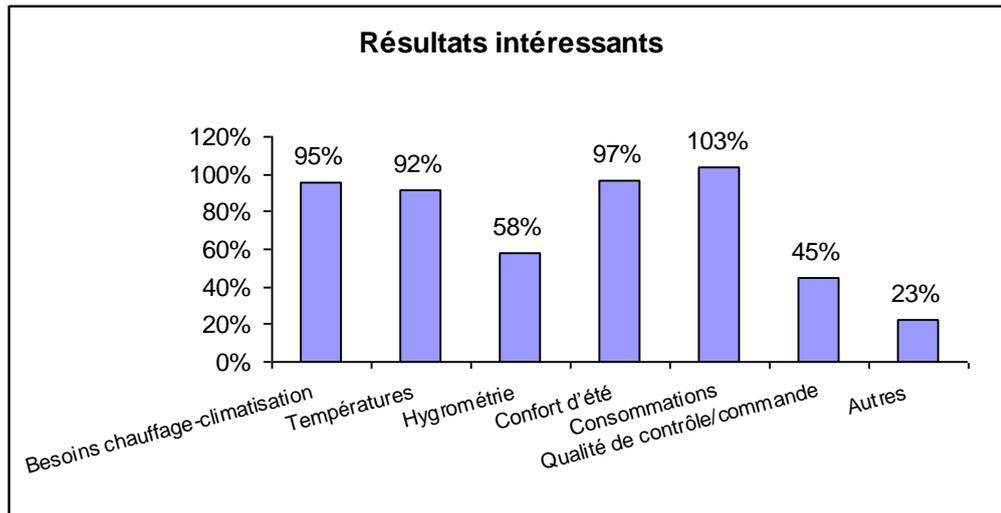
## 2.6 PRIX



Même si la majorité des utilisateurs pense que le prix des logiciels devrait être plus bas, seule une minorité estime que les prix des logiciels de simulation sont trop élevés.

## 2.7 RÉSULTATS QUI INTÉRESSENT LES UTILISATEURS

Les utilisateurs sont principalement intéressés par les résultats suivants : Besoins et consommations de chauffage-climatisation, l'évaluation du confort d'été, et la prévision des températures. Viennent ensuite l'hygrométrie et la qualité de contrôle/commande.

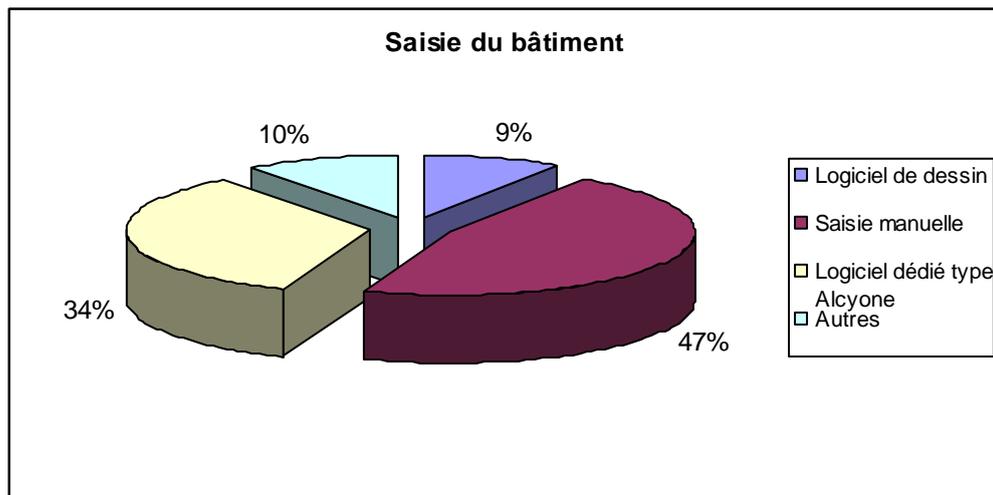


Parmi les autres résultats qui intéressent les utilisateurs : les apports solaires et internes, une distinction entre température d'ambiance et température opérative, les impacts sur l'environnement (émissions de CO<sub>2</sub>, énergie grise).

**Attention**, on remarque que le questionnaire a parfois été mal rempli : les personnes affirmant ne pas utiliser de logiciels de simulation ont quand même répondu au reste du questionnaire, d'où certaines erreurs (103%...)

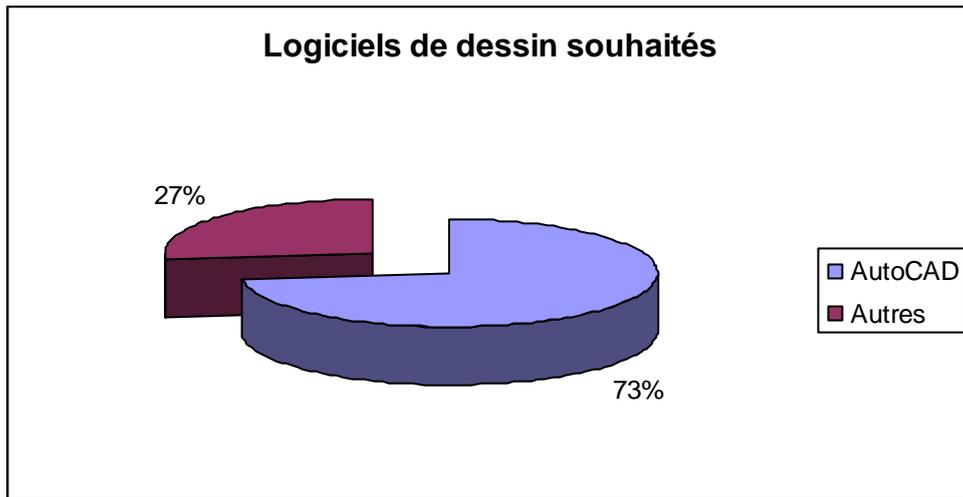
## 2.8 SAISIE DU BÂTIMENT

La saisie des bâtiments se fait encore principalement de manière « manuelle », mais une grande partie des utilisateurs a recours à un logiciel de dessin dédié ou non. La catégorie « Autres » concerne principalement ceux qui ont recours à un logiciel de dessin en complément (importation dessin AutoCAD dans Alcyone par exemple).



### Logiciels de dessin

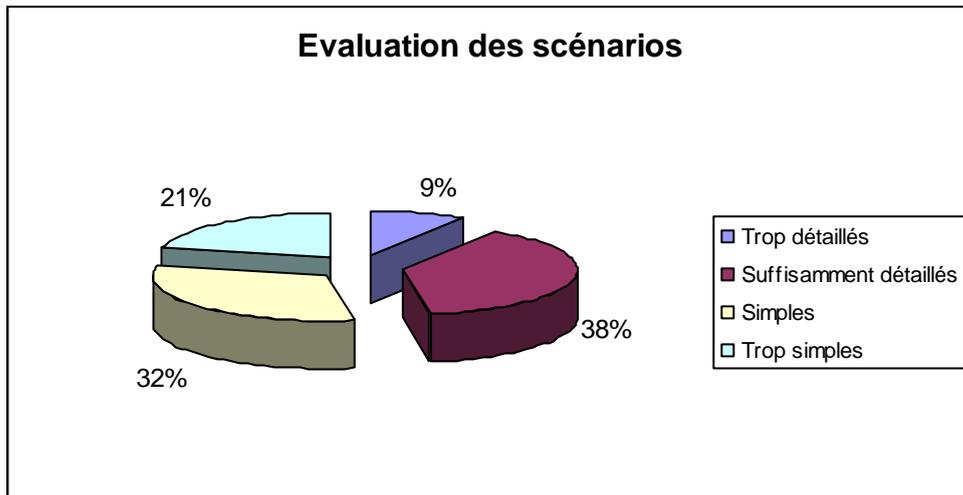
La demande de compatibilité porte principalement sur AutoCAD (c'était d'ailleurs le seul logiciel proposé).



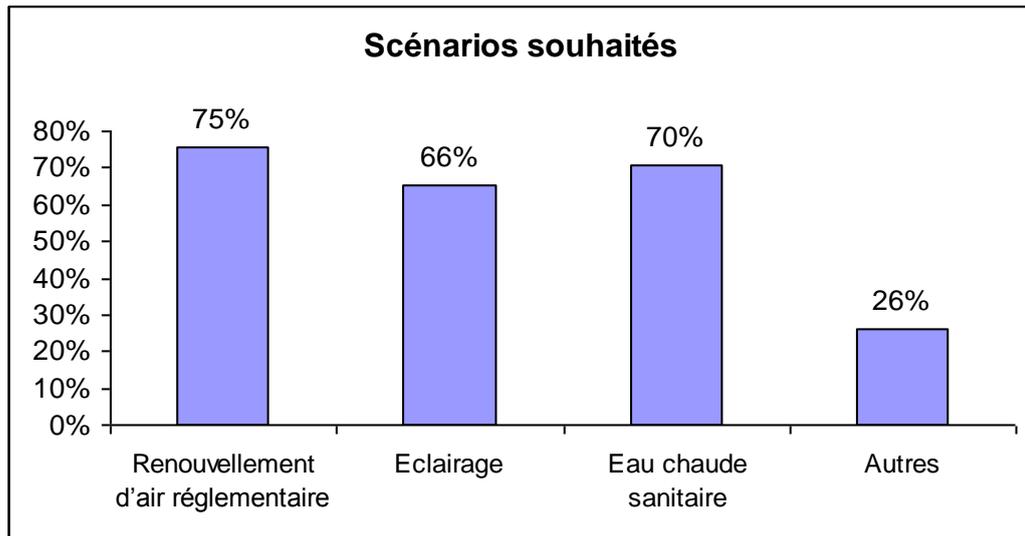
Parmi les autres logiciels de dessin souhaités, on notera une demande pour Google Sketchup, et dans une moindre mesure ArchiCAD. D'autres utilisateurs souhaitent que certains formats spécifiques soient compatibles comme gbXML et IFC

## 2.9 SCÉNARIOS DE SIMULATION

**Une majorité des utilisateurs semble insatisfaite du niveau de détail des scénarios intégrés aux logiciels de simulation.**

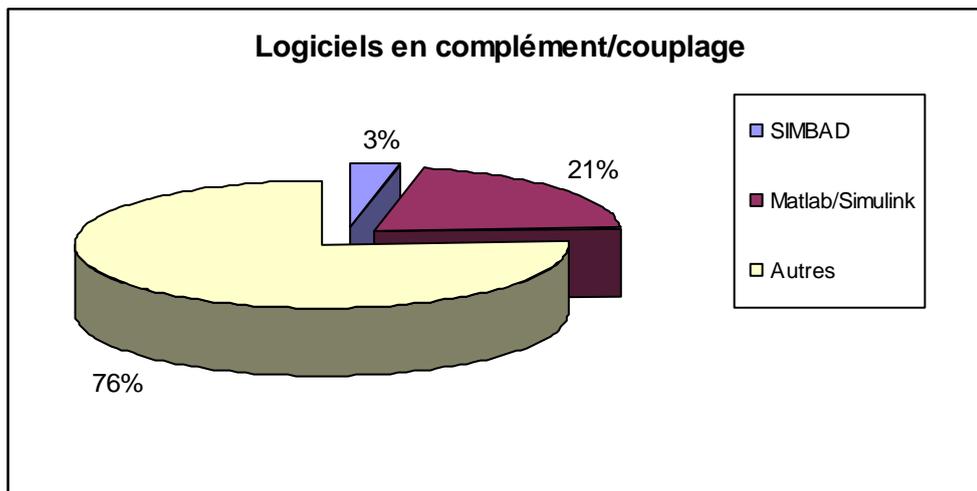


Les scénarios proposés dans le questionnaire recueillent l'accord des sondés, dont certains ont suggéré : l'étanchéité de l'enveloppe, les apports internes électrodomestiques, l'hygrométrie.



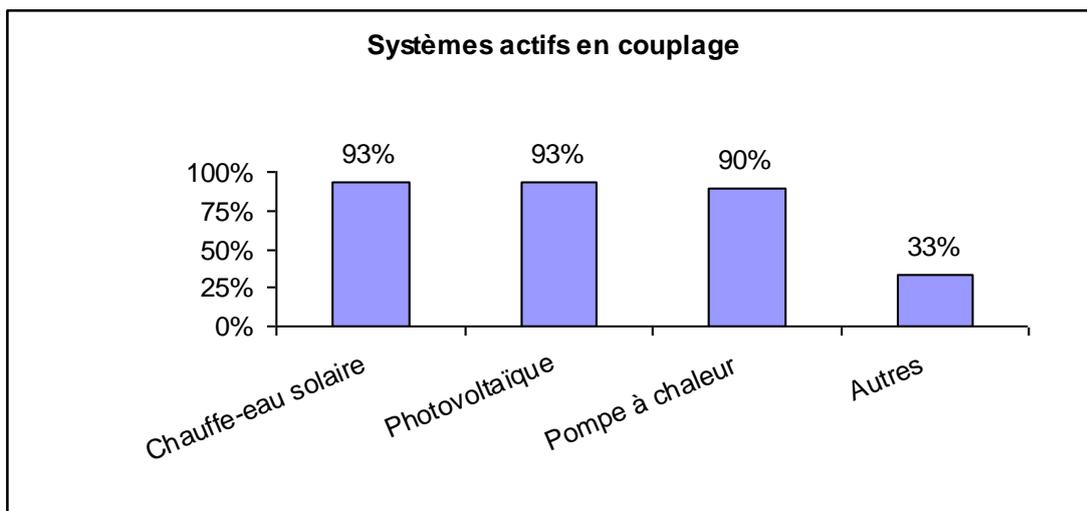
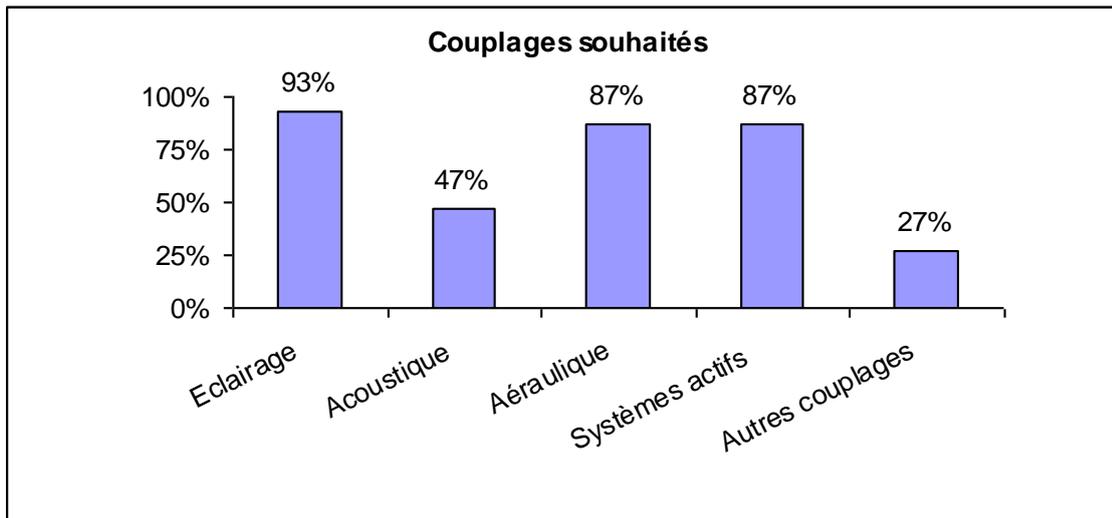
## 2.10 LOGICIELS EN COUPLAGE

La moitié des sondés utilise des logiciels en complément ou en couplage et une minorité utilise ceux suggérés par le questionnaire (Simbad et Matlab/Simulink)



Les logiciels utilisés en complément sont vraiment très divers et on retrouve dans la catégorie « Autres », des logiciels de calcul d'éclairage, de calcul réglementaire et de dimensionnement de systèmes solaires.

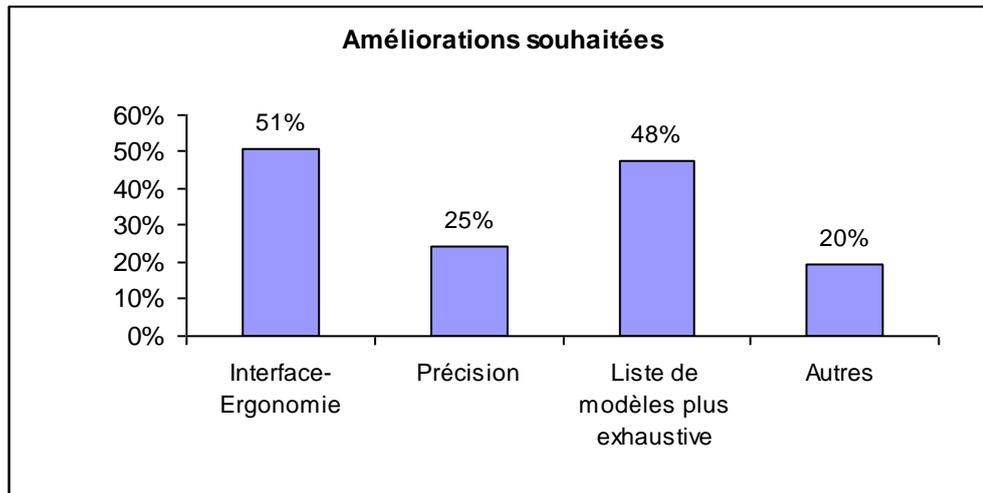
Les couplages ou compléments souhaités portent principalement sur l'éclairage, l'aéroulque et les systèmes actifs, l'acoustique ne faisant pas partie des priorités premières des utilisateurs.



Parmi les autres couplages souhaités par les utilisateurs, on notera le puits canadien, le PSD, la géothermie ou encore l'éolien.

Il semblerait que, d'après les réponses ouvertes des sondés, la notion de couplage n'ait pas été totalement comprise (elle a été plutôt ressentie comme l'utilisation de logiciels complémentaires, sans qu'aucun lien ne soit fait entre les logiciels, permettant d'obtenir d'autres résultats), ce qui peut laisser penser que cette pratique n'est pas très répandue.

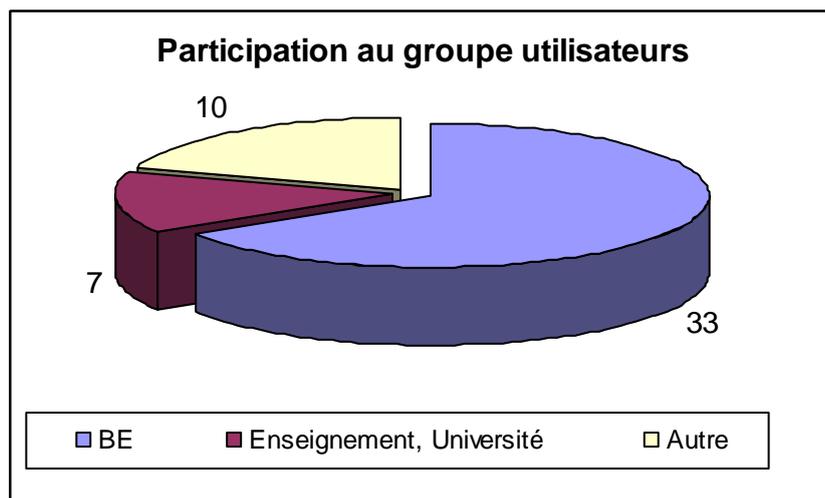
## 2.11 AMÉLIORATIONS SOUHAITÉES



Les sondés ont proposé les améliorations suivantes :  
Passerelle entre calcul réglementaire et la simulation, estimation de l'incertitude sur les résultats en fonction des incertitudes sur la saisie (géométrie des parois, scénarios, etc...), la facilitation des évolutions dans le projet.

## 2.12 PARTICIPATION AU GROUPE UTILISATEUR

Parmi ceux qui ont répondu, 50 se déclarent intéressés pour une participation au groupe utilisateurs.  
Les profils se répartissent de la manière suivante :



Cette répartition est proche de celle du profil des sondés.

### **3 Rapport sur les tests de l'exportation des types TRNSYS vers Simulink**

Date : 18/03/2009

Auteurs :

Bassam MOUJALLED, Mohamed EL-MANKIBI, Gérard GUARRACINO

Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Département Génie Civil et bâtiment URA  
CNRS 1652, 3 rue Maurice AUDIN, 69518 Vaulx-en-Velin Cedex

#### **3.1 INTRODUCTION**

Ce rapport présente les tests de l'exportation de types TRNSYS vers Simulink selon la liste des tests proposés par le CSTB.

Les tests réalisés dans Simulink sont les suivants :

1. Modèles seuls
  - a. Capteur solaire - type 1
    - i. Paramètres et entrées par défaut
    - ii. Comme 1 mais avec surface doublée
    - iii. Comme 1 avec paliers sur la température d'entrée (20-40-60°C)
    - iv. Comme 1 avec paliers sur le débit d'entrée (20-50-75 litres par heure)
  - b. Ballon de stockage – type 4a
    - i. Paramètres et entrées par défaut
    - ii. Comme 1 mais avec volume doublée
    - iii. Comme 1 avec paliers sur la température d'entrée (20-40-60°C)
    - iv. Comme 1 avec paliers sur le débit d'entrée (100-250-500 litres par heure)
  - c. Ballon de stockage – type 60d
    - i. Paramètres et entrées par défaut
    - ii. Comme 1 mais avec volume doublée
    - iii. Comme 1 avec paliers sur la température d'entrée (20-40-60°C)
    - iv. Comme 1 avec paliers sur le débit d'entrée (100-250-500 litres par heure)
  - d. Pipe – type 31
    - i. Paramètres et entrées par défaut (sauf longueur = 10 m et diamètre = 0.03)
    - ii. Comme 1 mais avec longueur doublée
    - iii. Comme 1 avec paliers sur la température d'entrée (20-40-60°C)
    - iv. Comme 1 avec paliers sur le débit d'entrée (100-250-500 litres par heure)
  - e. Bâtiment multizone – type 56
    - i. Bâtiment de trnsys16/exemples/building.tpf
    - ii. Modèles sans entrées (effacer tous les autres composants)

- iii. Comme 2 mais avec un palier sur la température extérieure (-10-0-10°C)
- f. Régulateur – differential controller 2d
  - i. Tester le régulateur pour la régulation de la température d'entrée d'un tuyau pour obtenir une température de sortie constante
- g. Régulateur – differential controller 2d
  - i. Tester le régulateur pour la régulation de la température d'entrée d'un tuyau pour obtenir une température de sortie constante
- 2. Modèles couplés (assemblage de modèles)
  - a. Le projet « begin » du dossier d'exemples de TRNSYS : trnsys16/Exemples/begin.tpf

## 3.2 EXPORTATION DES MODÈLES SEULS

### 3.2.1 CAPTEUR SOLAIRE – TYPE1

#### 3.2.1.1 Paramètres et entrées par défaut

Les valeurs des paramètres et des entrées sont données dans le tableau suivant. Ces valeurs sont celles proposées par défaut dans TRNSYS.

Paramètres		Entrées	
1-Number in series	1	1-Inlet temperature	20
2-Collector area	2	2-Inlet flowrate	100
3-Fluid specific heat	4.19	3-Ambient temperature	10
4-Efficiency mode	1	4-Incident radiation	0
5-Tested flow rate	50		
6-Intercept efficiency	0.7		
7-Efficiency slope	15		
8-Efficiency curvature	0		
9-Optical Mode 1	1		

Les simulations sont effectuées avec le type 1a dans TRNSYS et le modèle exporté du type 1a dans SIMULINK sur une période de 1000 heures avec un pas de temps d'une heure (**Start = 0, Stop =1000 heures, Step = 1 heure**).

Les résultats des simulations sont montrés sur la figure 1. Les valeurs obtenues avec TRNSYS et SIMULINK sont exactement les mêmes.

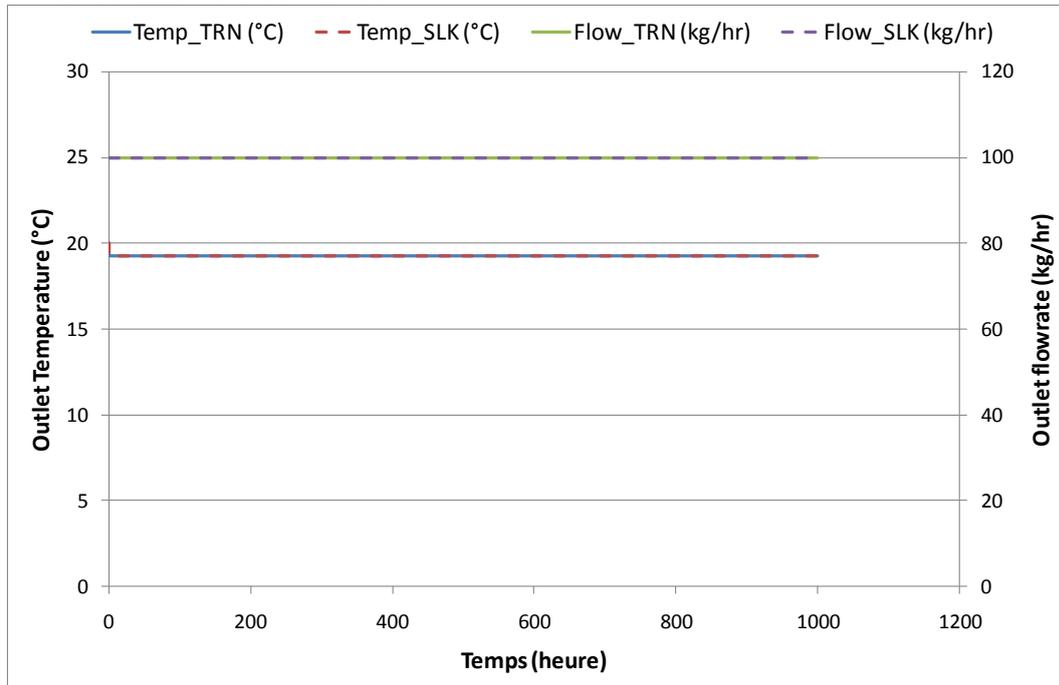


Figure 1 – comparaison des simulations du type 1 avec TRNSYS et Simulink (paramètres et entrées par défaut)

#### 3.2.1.2 Surface doublée

Les valeurs des paramètres et des entrées sont données dans le tableau suivant. Ces valeurs sont celles proposées par défaut par TRNSYS en doublant la surface du capteur.

Paramètres		Entrées	
1-Number in series	1	1-Inlet temperature	20
<b>2-Collector area</b>	<b>4</b>	2-Inlet flowrate	100

3-Fluid specific heat	4.19	3-Ambient temperature	10
4-Efficiency mode	1	4-Incident radiation	0
5-Tested flow rate	50		
6-Intercept efficiency	0.7		
7-Efficiency slope	15		
8-Efficiency curvature	0		
9-Optical Mode 1	1		

Les simulations sont effectuées avec le type 1a dans TRNSYS et le modèle exporté du type 1a dans SIMULINK sur une période de 1000 heures avec un pas de temps d'une heure (**Start = 0, Stop =1000 heures, Step = 1 heure**).

Les résultats des simulations sont montrés sur la figure 2. Les valeurs obtenues avec TRNSYS et SIMULINK sont exactement les mêmes.

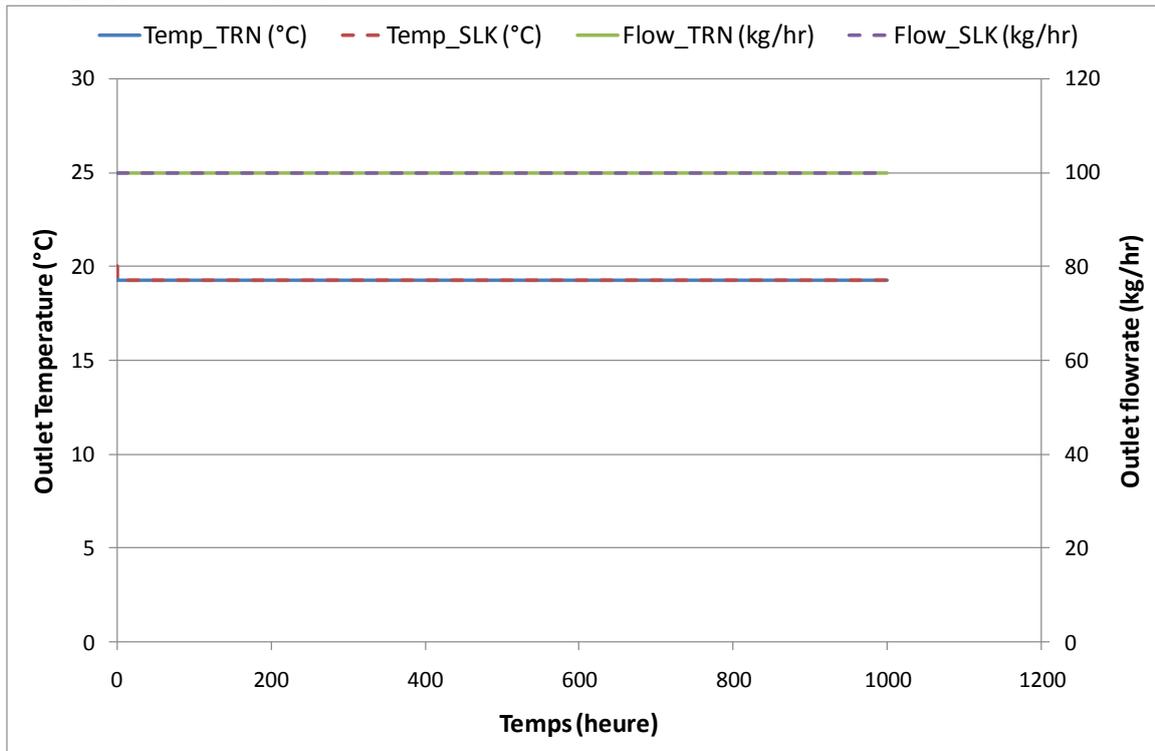


Figure 2 – comparaison des simulations du type 1 avec TRNSYS et Simulink (surface doublée)

### 3.2.1.3 Température d'entrée en paliers

Les valeurs des paramètres et des entrées sont données dans le tableau suivant. Ces valeurs sont celles proposées par défaut par TRNSYS en faisant varier la température d'entrée selon des paliers de 20-40-60°C.

Paramètres		Entrées	
1-Number in series	1	1-Inlet temperature	20°C, 40°C et 60°C selon des paliers de 300h chacun
2-Collector area	2	2-Inlet flowrate	100
3-Fluid specific heat	4.19	3-Ambient temperature	10
4-Efficiency mode	1	4-Incident radiation	0
5-Tested flow rate	50		
6-Intercept efficiency	0.7		
7-Efficiency slope	15		
8-Efficiency curvature	0		

9-Optical Mode 1	1		
------------------	---	--	--

Les simulations sont effectuées avec le type 1a dans TRNSYS et le modèle exporté du type 1a dans SIMULINK sur une période de 1000 heures avec un pas de temps d'une heure (**Start = 0, Stop =900 heures, Step = 1 heure**).

Les résultats des simulations sont montrés sur la figure 3. Les valeurs obtenues avec TRNSYS et SIMULINK sont exactement les mêmes.

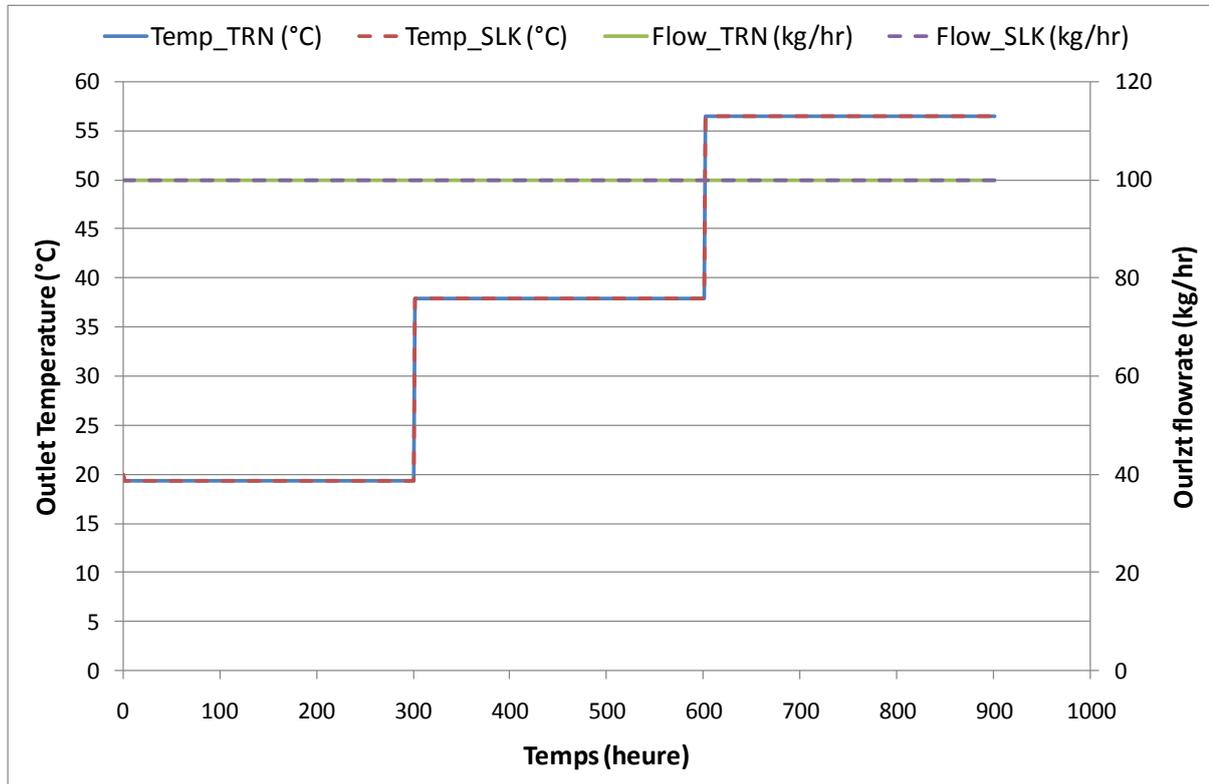


Figure 3 – comparaison des simulations du type 1 avec TRNSYS et Simulink (Température avec palier)

### 3.2.1.4 Débit d'entrée en paliers

Les valeurs des paramètres et des entrées sont données dans le tableau suivant. Ces valeurs sont celles proposées par défaut par TRNSYS en faisant varier le débit d'entrée selon des paliers de 25-50-75 kg/heure.

Paramètres		Entrées	
1-Number in series	1	1-Inlet temperature	20
2-Collector area	4	2-Inlet flowrate	25, 50 et 75 kg/h selon des paliers de 300h chacun
3-Fluid specific heat	4.19	3-Ambient temperature	10
4-Efficiency mode	1	4-Incident radiation	0
5-Tested flow rate	50		
6-Intercept efficiency	0.7		
7-Efficiency slope	15		
8-Efficiency curvature	0		
9-Optical Mode 1	1		

Les simulations sont effectuées avec le type 1a dans TRNSYS et le modèle exporté du type 1a dans SIMULINK sur une période de 1000 heures avec un pas de temps d'une heure (**Start = 0, Stop =900 heures, Step = 1 heure**).

Les résultats des simulations sont montrés sur la figure 4. Les valeurs obtenues avec TRNSYS et SIMULINK sont exactement les mêmes.

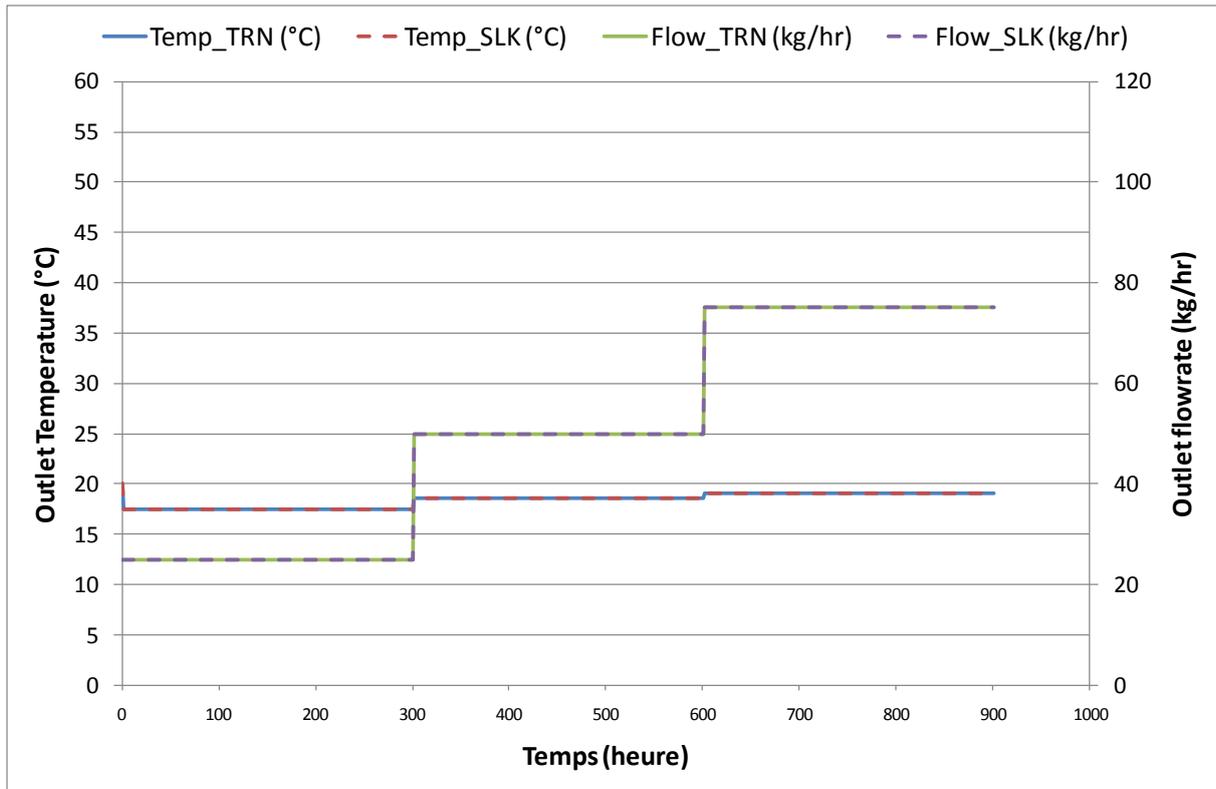


Figure 4 – comparaison des simulations du type 1 avec TRNSYS et Simulink (débit avec palier)

### 3.2.2 BALLON DE STOCKAGE – TYPE 4A

#### 3.2.2.1 Paramètres et entrées par défaut

Les valeurs des paramètres et des entrées sont données dans le tableau suivant. Ces valeurs sont celles proposées par défaut par TRNSYS.

Paramètres		Entrées	
1-Fixed inlet positions	1	1-Hot-side temperature	45
2-Tank volume	0.35	2-Hot-side flowrate	100
3-Fluid specific heat	4.19	3-Cold-side temperature	20
4-Fluid density	1000	4-Cold-side flowrate	100
5-Tank loss coefficient	3	5-Environment temperature	22
...		6-Control signal for element-1	0
20-Boiling point	100	7-Control signal for element-2	0

Les simulations sont effectuées avec le type 4a dans TRNSYS et le modèle exporté du type 4a dans SIMULINK sur une période de 1000 heures avec un pas de temps d'une heure (**Start = 0, Stop =900 heures, Step = 1 heure**).

Les résultats des simulations sont montrés sur la figure 5. Les valeurs obtenues avec TRNSYS et SIMULINK sont exactement les mêmes pour toutes les sorties.

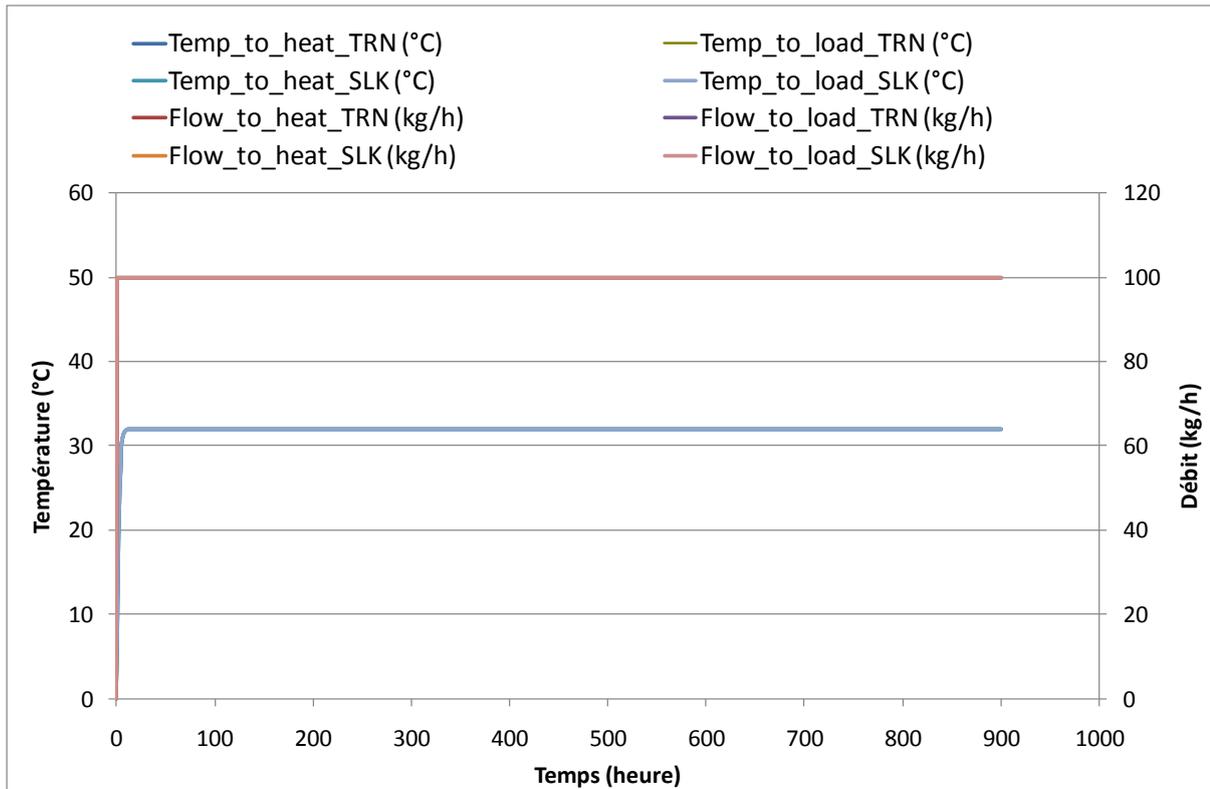


Figure 5 – comparaison des simulations du type 4a avec TRNSYS et Simulink (paramètres et entrées par défaut)

**3.2.2.2 Volume doublé**

Les valeurs des paramètres et des entrées sont données dans le tableau suivant. Ces valeurs sont celles proposées par défaut par TRNSYS en doublant le volume du ballon.

Paramètres		Entrées	
1-Fixed inlet positions	1	1-Hot-side temperature	45
<b>2-Tank volume</b>	<b>0.70</b>	2-Hot-side flowrate	100
3-Fluid specific heat	4.19	3-Cold-side temperature	20
4-Fluid density	1000	4-Cold-side flowrate	100
5-Tank loss coefficient	3	5-Environment temperature	22
...	0.05	6-Control signal for element-1	0
20-Boiling point	100	7-Control signal for element-2	0

Les simulations sont effectuées avec le type 4a dans TRNSYS et le modèle exporté du type 4a dans SIMULINK sur une période de 1000 heures avec un pas de temps d'une heure (**Start = 0, Stop = 900 heures, Step = 1 heure**).

Les résultats des simulations sont montrés sur la figure 6. Les valeurs obtenues avec TRNSYS et SIMULINK sont exactement les mêmes.

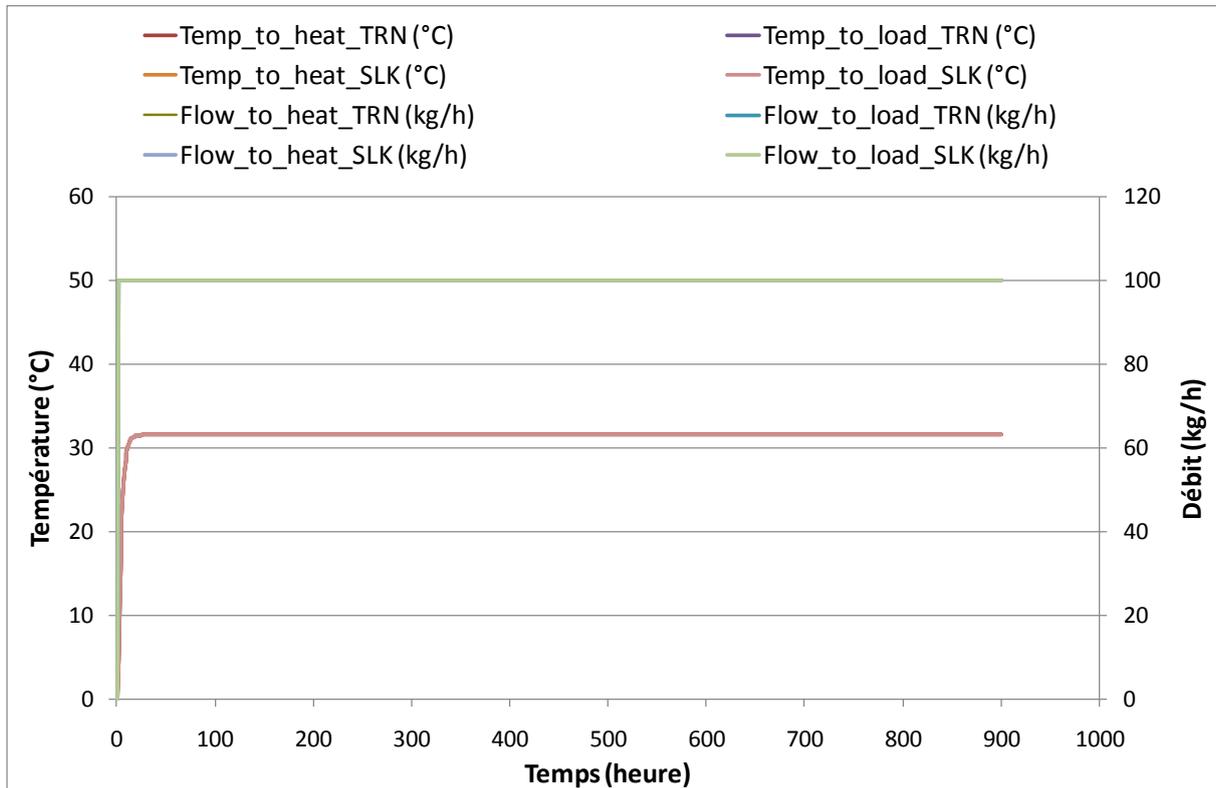


Figure 6 – comparaison des simulations du type 4a avec TRNSYS et Simulink (volume doublé)

### 3.2.2.3 Températures d'entrée par paliers

Les valeurs des paramètres et des entrées sont données dans le tableau suivant. Ces valeurs sont celles proposées par défaut par TRNSYS en faisant varier la température d'entrée selon des paliers de 20-40-60°C.

Paramètres		Entrées	
1-Fixed inlet positions	1	1-Hot-side temperature	20°C, 40°C et 60°C selon des paliers de 300h chacun
2-Tank volume	0.35	2-Hot-side flowrate	100
3-Fluid specific heat	4.19	3-Cold-side temperature	20
4-Fluid density	1000	4-Cold-side flowrate	100
5-Tank loss coefficient	3	5-Environment temperature	22
...	0.05	6-Control signal for element-1	0
20-Boiling point	100	7-Control signal for element-2	0

Les simulations sont effectuées avec le type 4a dans TRNSYS et le modèle exporté du type 4a dans SIMULINK sur une période de 1000 heures avec un pas de temps d'une heure (**Start = 0, Stop =900 heures, Step = 1 heure**).

Les résultats des simulations sont montrés sur la figure 7. Les valeurs obtenues avec TRNSYS et SIMULINK sont exactement les mêmes pour toutes les sorties.

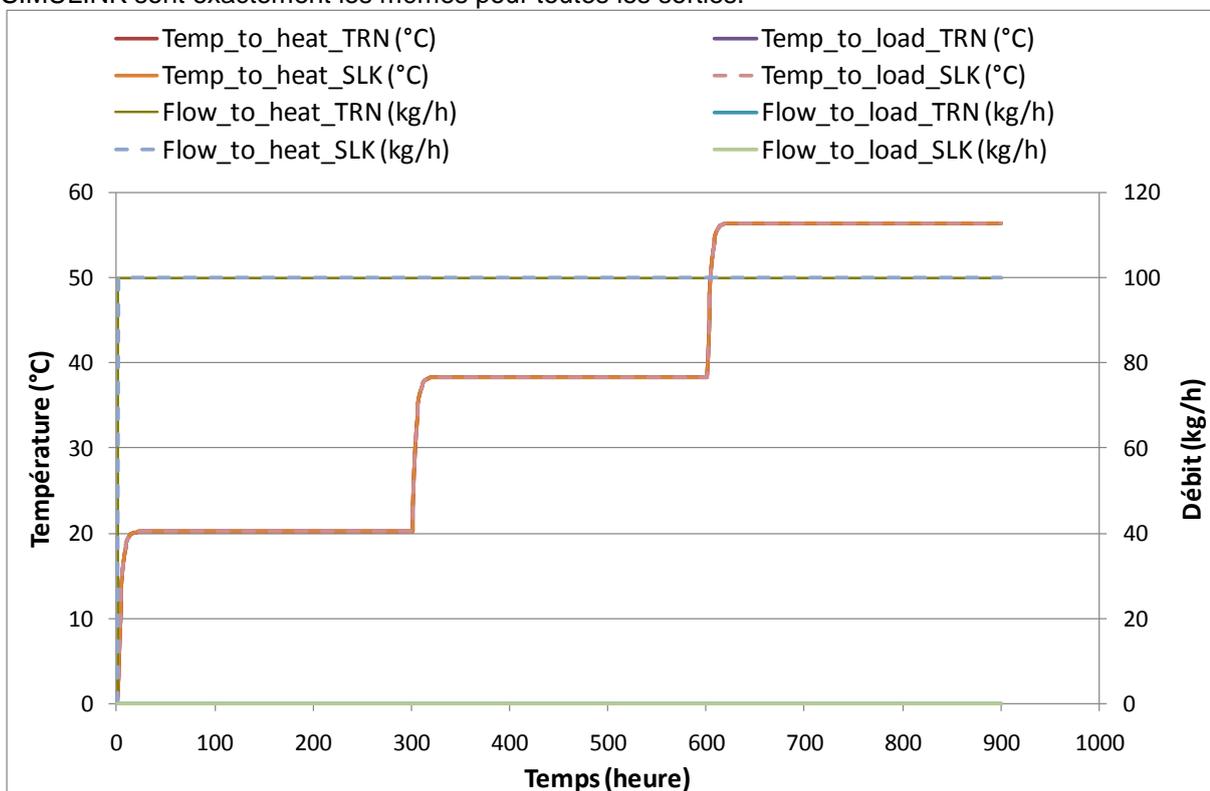


Figure 7– comparaison des simulations du type 4a avec TRNSYS et Simulink (Température avec palier)

### 3.2.2.4 Débit d'entrée par paliers

Les valeurs des paramètres et des entrées sont données dans le tableau suivant. Ces valeurs sont celles proposées par défaut par TRNSYS en faisant varier le débit d'entrée selon des paliers de 100-250-500 kg/heure.

Paramètres		Entrées	
1-Fixed inlet positions	1	1-Hot-side temperature	45
2-Tank volume	0.35	<b>2-Hot-side flowrate</b>	<b>100, 250 et 500 kg/h selon des paliers de 300h chacun</b>
3-Fluid specific heat	4.19	3-Cold-side temperature	20
4-Fluid density	1000	4-Cold-side flowrate	100
5-Tank loss coefficient	3	5-Environment temperature	22
...	0.05	6-Control signal for element-1	0
20-Boiling point	100	7-Control signal for element-2	0

Les simulations sont effectuées avec le type 4a dans TRNSYS et le modèle exporté du type 4a dans SIMULINK sur une période de 1000 heures avec un pas de temps d'une heure (**Start = 0, Stop =900 heures, Step = 1 heure**).

Les résultats des simulations sont montrés sur la figure suivante. Les valeurs obtenues avec TRNSYS et SIMULINK sont exactement les mêmes.

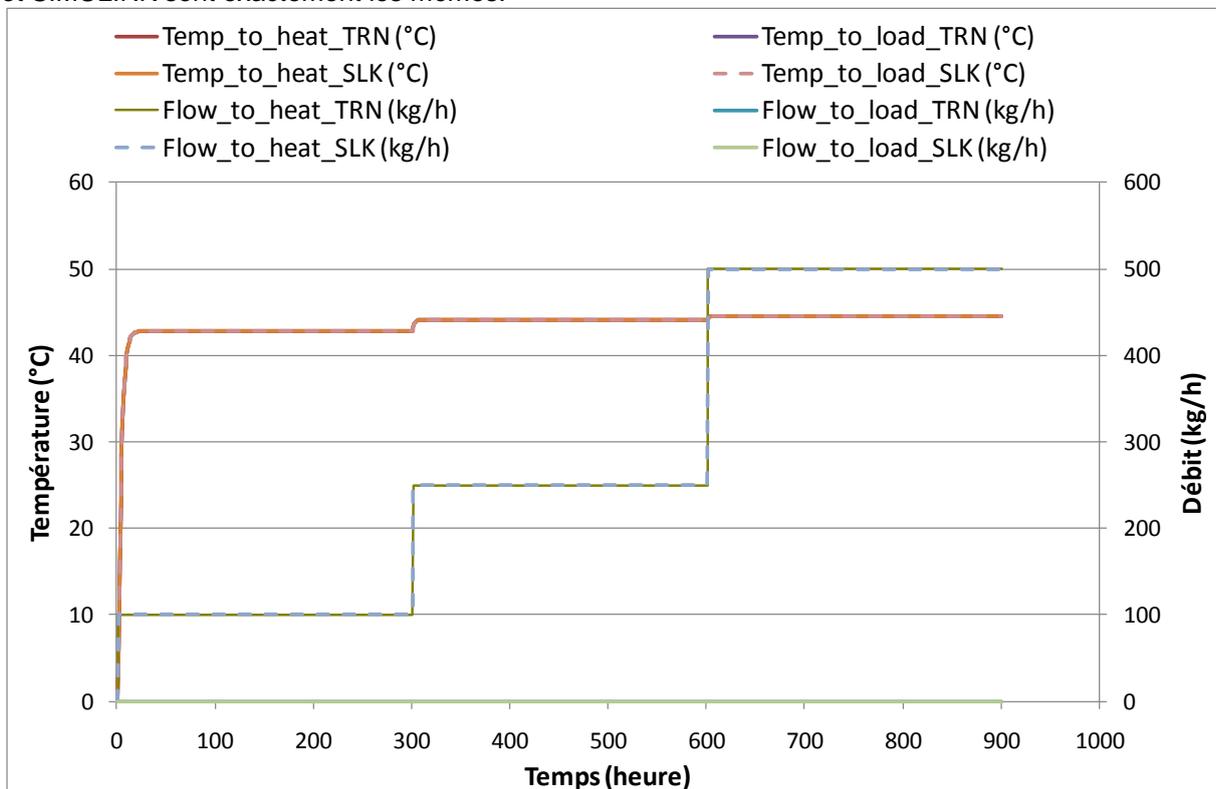


Figure 8– comparaison des simulations du type 4a avec TRNSYS et Simulink (débit avec palier)

### 3.2.3 BALLON DE STOCKAGE – TYPE 60D

#### 3.2.3.1 Paramètres et entrées par défaut

Les valeurs des paramètres et des entrées sont données dans le tableau suivant. Ces valeurs sont celles proposées par défaut par TRNSYS.

Paramètres	Entrées
------------	---------

1-User-specified inlet positions	2	1-Flow rate at inlet 1	0
2-Tank volume	0.35	2-Flow rate at outlet 1	-2
3-Tank height	1.25	3-Not used (flow inlet 2)	-1
4-Tank perimeter	-1	4-Not used (flow outlet 2)	-1
5-Height of flow inlet 1	1.25	5-Temperature at inlet 1	20
6-Height of flow outlet 1	0	6-Not used (temp inlet 2)	20
7-Not used (inlet 2)	-1	7-Environment temperature	22
8-Not used (outlet 2)	-1	8-Control signal for element 1	1
9-Fluid specific heat	4.19	9-Control signal for element 2	1
10-Fluid density	1000	10-Flow rate for heat exchanger	1
11-Tank loss coefficient	3	11-Inlet temperature for heat exchanger	20
...		12-Nusselt constant for heat exchanger	0.5
44-Height of heat exchanger outlet	1.25	13-Nusselt exponent for heat exchanger	0.25

Les simulations sont effectuées avec le type 60d dans TRNSYS et le modèle exporté du type 60d dans SIMULINK sur une période de 900 heures avec un pas de temps d'une heure (**Start = 0, Stop =900 heures, Step = 1 heure**). Les résultats des simulations montrent que les valeurs obtenues avec TRNSYS et SIMULINK sont exactement les mêmes pour toutes les sorties. La Figure 9 montre la température de sortie 1 du ballon avec TRNSYS et SIMULINK, les 2 courbes étant superposées.

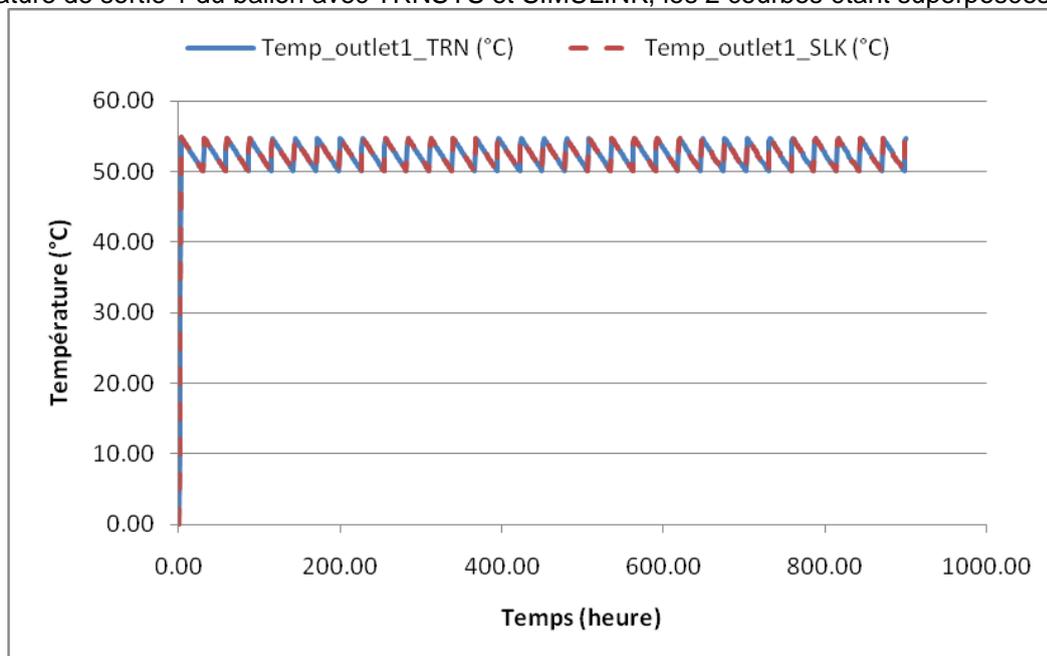


Figure 9 – comparaison des simulations du type 60d avec TRNSYS et Simulink (paramètres et entrées par défaut)

### 3.2.3.2 Volume doublé

Les valeurs des paramètres et des entrées sont données dans le tableau suivant. Ces valeurs sont celles proposées par défaut par TRNSYS en doublant le volume du ballon.

Paramètres		Entrées	
1-User-specified inlet positions	2	1-Flow rate at inlet 1	0
2-Tank volume	<b>0.7</b>	2-Flow rate at outlet 1	-2
3-Tank height	1.25	3-Not used (flow inlet 2)	-1
4-Tank perimeter	-1	4-Not used (flow outlet 2)	-1
5-Height of flow inlet 1	1.25	5-Temperature at inlet 1	20
6-Height of flow outlet 1	0	6-Not used (temp inlet 2)	20

7-Not used (inlet 2)	-1	7-Environment temperature	22
8-Not used (outlet 2)	-1	8-Control signal for element 1	1
9-Fluid specific heat	4.19	9-Control signal for element 2	1
10-Fluid density	1000	10-Flow rate for heat exchanger	1
11-Tank loss coefficient	3	11-Inlet temperature for heat exchanger	20
...		12-Nusselt constant for heat exchanger	0.5
44-Height of heat exchanger outlet	1.25	13-Nusselt exponent for heat exchanger	0.25

Les simulations sont effectuées avec le type 60d dans TRNSYS et le modèle exporté du type 60d dans SIMULINK sur une période de 900 heures avec un pas de temps d'une heure (**Start = 0, Stop =900 heures, Step = 1 heure**). Les résultats des simulations montrent que les valeurs obtenues avec TRNSYS et SIMULINK sont exactement les mêmes pour toutes les sorties. La Figure 10 montre la température de sortie 1 du ballon avec TRNSYS et SIMULINK, les 2 courbes étant superposées.

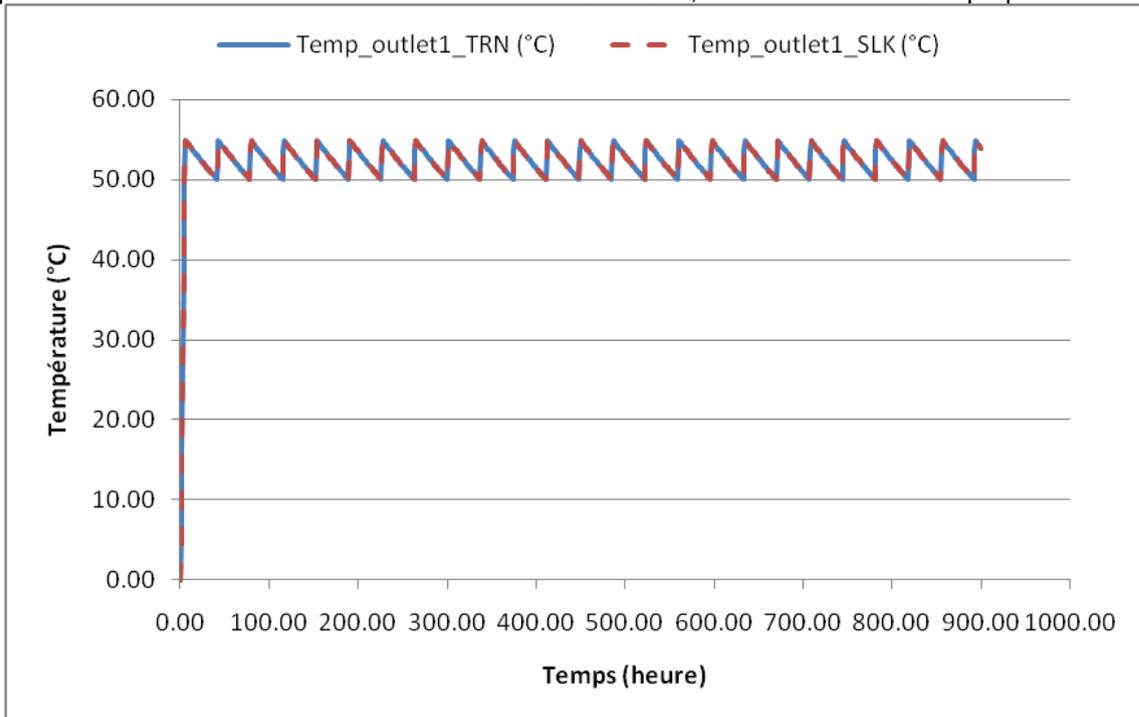


Figure 10 – comparaison des simulations du type 60d avec TRNSYS et Simulink (volume doublé)

### 3.2.3.3 Températures d'entrée par paliers

Les valeurs des paramètres et des entrées sont données dans le tableau suivant. Ces valeurs sont celles proposées par défaut par TRNSYS en faisant varier la température d'entrée selon des paliers de 20-40-60°C de 300 heures chacun.

Paramètres		Entrées	
1-User-specified inlet positions	2	1-Flow rate at inlet 1	0
2-Tank volume	0.35	2-Flow rate at outlet 1	-2
3-Tank height	1.25	3-Not used (flow inlet 2)	-1
4-Tank perimeter	-1	4-Not used (flow outlet 2)	-1
5-Height of flow inlet 1	1.25	5-Temperature at inlet 1	20
6-Height of flow outlet 1	0	6-Not used (temp inlet 2)	20
7-Not used (inlet 2)	-1	7-Environment temperature	22
8-Not used (outlet 2)	-1	8-Control signal for element 1	1
9-Fluid specific heat	4.19	9-Control signal for element 2	1
10-Fluid density	1000	10-Flow rate for heat exchanger	1
11-Tank loss coefficient	3	<b>11-Inlet temperature for heat exchanger</b>	<b>20-40-60</b>
...		12-Nusselt constant for heat exchanger	0.5
44-Height of heat exchanger outlet	1.25	13-Nusselt exponent for heat exchanger	0.25

Les simulations sont effectuées avec le type 60d dans TRNSYS et le modèle exporté du type 60d dans SIMULINK sur une période de 900 heures avec un pas de temps d'une heure (**Start = 0, Stop = 900 heures, Step = 1 heure**). Les résultats des simulations montrent que les valeurs obtenues avec TRNSYS et SIMULINK sont exactement les mêmes pour toutes les sorties. La Figure 11 montre la température de sortie 1 du ballon avec TRNSYS et SIMULINK, les 2 courbes étant superposées.

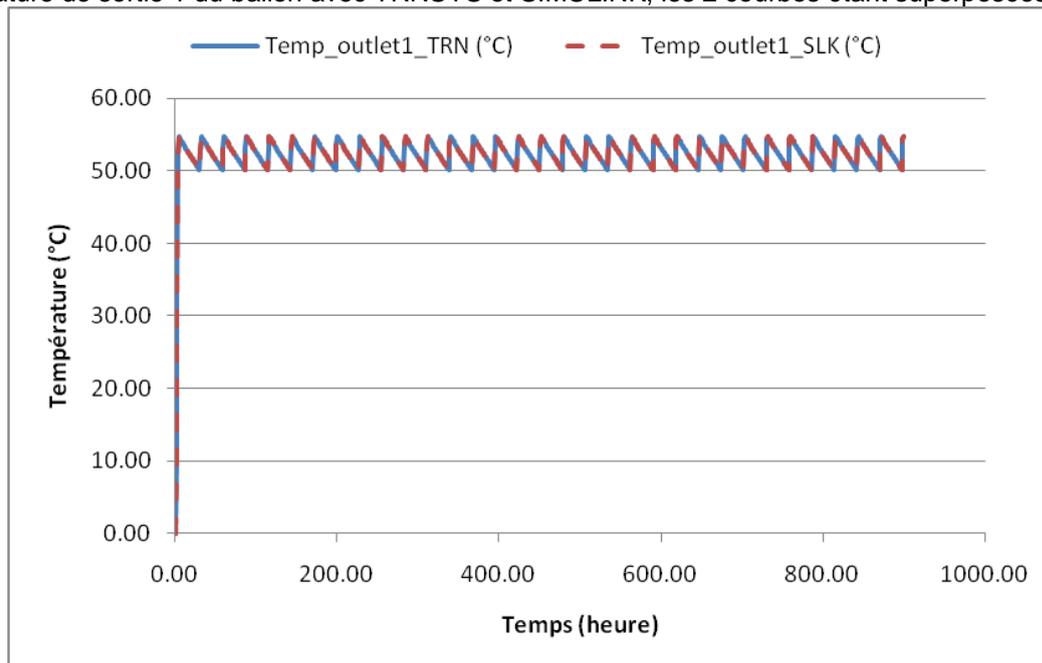


Figure 11– comparaison des simulations du type 60d avec TRNSYS et Simulink (Température avec palier)

### 3.2.3.4 Débit d'entrée par paliers

Les valeurs des paramètres et des entrées sont données dans le tableau suivant. Ces valeurs sont celles proposées par défaut par TRNSYS en faisant varier le débit d'entrée selon des paliers de 100-250-500 kg/heure.

Paramètres		Entrées	
1-User-specified inlet positions	2	1-Flow rate at inlet 1	0
2-Tank volume	0.35	2-Flow rate at outlet 1	-2
3-Tank height	1.25	3-Not used (flow inlet 2)	-1
4-Tank perimeter	-1	4-Not used (flow outlet 2)	-1
5-Height of flow inlet 1	1.25	5-Temperature at inlet 1	20
6-Height of flow outlet 1	0	6-Not used (temp inlet 2)	20
7-Not used (inlet 2)	-1	7-Environment temperature	22
8-Not used (outlet 2)	-1	8-Control signal for element 1	1
9-Fluid specific heat	4.19	9-Control signal for element 2	1
10-Fluid density	1000	<b>10-Flow rate for heat exchanger</b>	<b>100-250-500</b>
11-Tank loss coefficient	3	11-Inlet temperature for heat exchanger	20
...		12-Nusselt constant for heat exchanger	0.5
44-Height of heat exchanger outlet	1.25	13-Nusselt exponent for heat exchanger	0.25

Les simulations sont effectuées avec le type 60d dans TRNSYS et le modèle exporté du type 60d dans SIMULINK sur une période de 900 heures avec un pas de temps d'une heure (**Start = 0, Stop =900 heures, Step = 1 heure**). Les résultats des simulations montrent que les valeurs obtenues avec TRNSYS et SIMULINK sont exactement les mêmes pour toutes les sorties. La Figure 12 montre la température de sortie 1 du ballon avec TRNSYS et SIMULINK, les 2 courbes étant superposées.

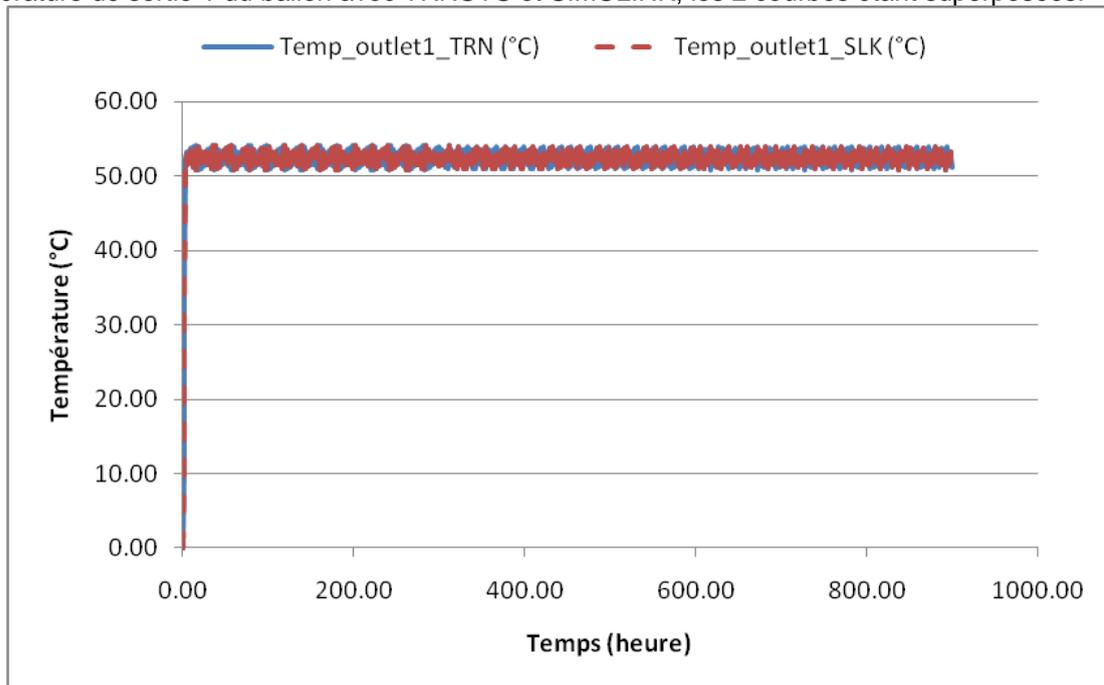


Figure 12– Comparaison des simulations du type 60d avec TRNSYS et Simulink (débit avec palier)

### 3.2.4 PIPE – TYPE 31

#### 3.2.4.1 Paramètres et entrées par défaut

Les valeurs des paramètres et des entrées sont données dans le tableau suivant. Ces valeurs sont celles proposées par défaut par TRNSYS.

Paramètres		Entrées	
1-Inside diameter	0.03	1-Inlet temperature	10
2-Pipe length	10	2-Inlet flow rate	100
3-Loss coefficient	3	3-Environment temperature	10
4-Fluid density	1000		
5-Fluid specific heat	4.19		
6-Initial fluid temperature	10		

Les simulations sont effectuées avec le type 31 dans TRNSYS et le modèle exporté du type 31 dans SIMULINK sur une période de 900 heures avec un pas de temps d'une heure (**Start = 0, Stop = 900 heures, Step = 1 heure**). Les résultats des simulations montrent que les valeurs obtenues avec TRNSYS et SIMULINK sont exactement les mêmes pour toutes les sorties. La Figure 13 montre la température et le débit de sortie de la pipe avec TRNSYS et SIMULINK, les courbes étant superposées.

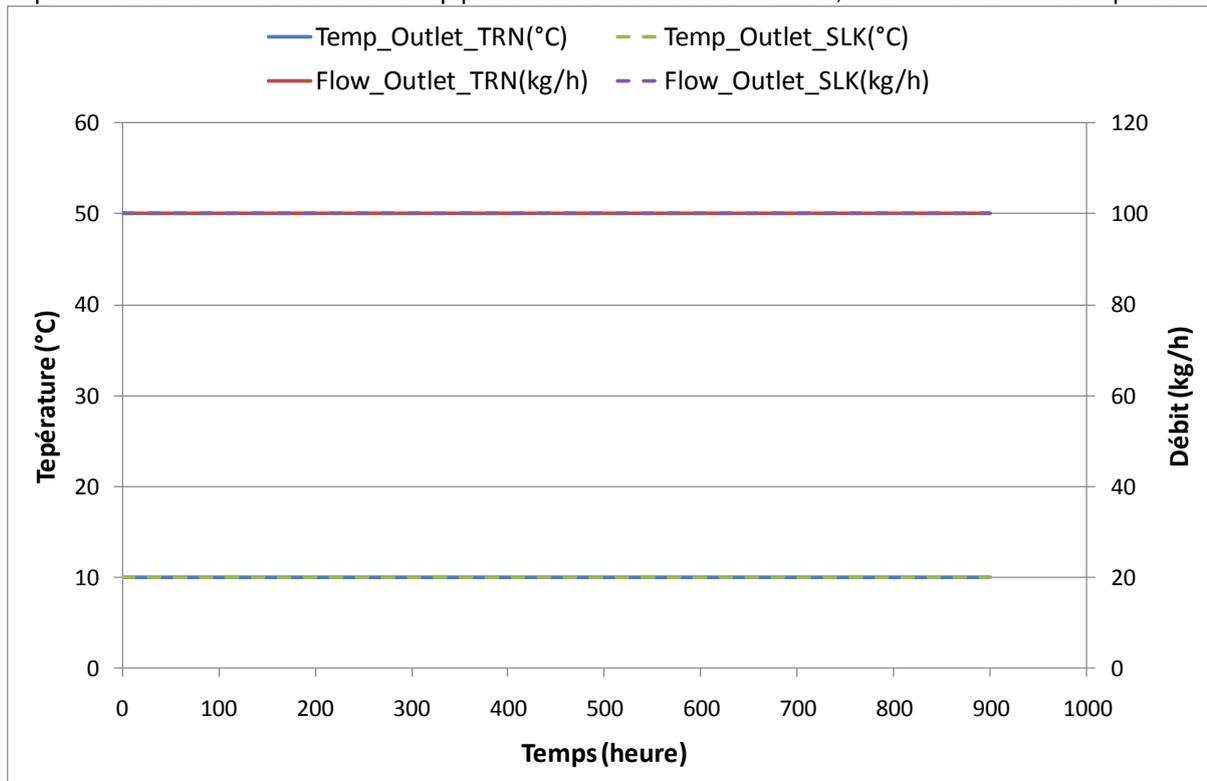


Figure 13 – comparaison des simulations du type 31 avec TRNSYS et Simulink (paramètres et entrées par défaut)

### 3.2.4.2 Longueur doublée

Les valeurs des paramètres et des entrées sont données dans le tableau suivant. Ces valeurs sont celles proposées par défaut par TRNSYS en doublant la longueur.

Paramètres		Entrées	
1-Inside diameter	0.03	1-Inlet temperature	10
<b>2-Pipe length</b>	<b>20</b>	2-Inlet flow rate	100
3-Loss coefficient	3	3-Environment temperature	10
4-Fluid density	1000		
5-Fluid specific heat	4.19		
6-Initial fluid temperature	10		

Les simulations sont effectuées avec le type 31 dans TRNSYS et le modèle exporté du type 31 dans SIMULINK sur une période de 900 heures avec un pas de temps d'une heure (**Start = 0, Stop =900 heures, Step = 1 heure**). Les résultats des simulations montrent que les valeurs obtenues avec TRNSYS et SIMULINK sont exactement les mêmes pour toutes les sorties. La Figure 14 montre la température et le débit de sortie de la pipe avec TRNSYS et SIMULINK, les courbes étant superposées.

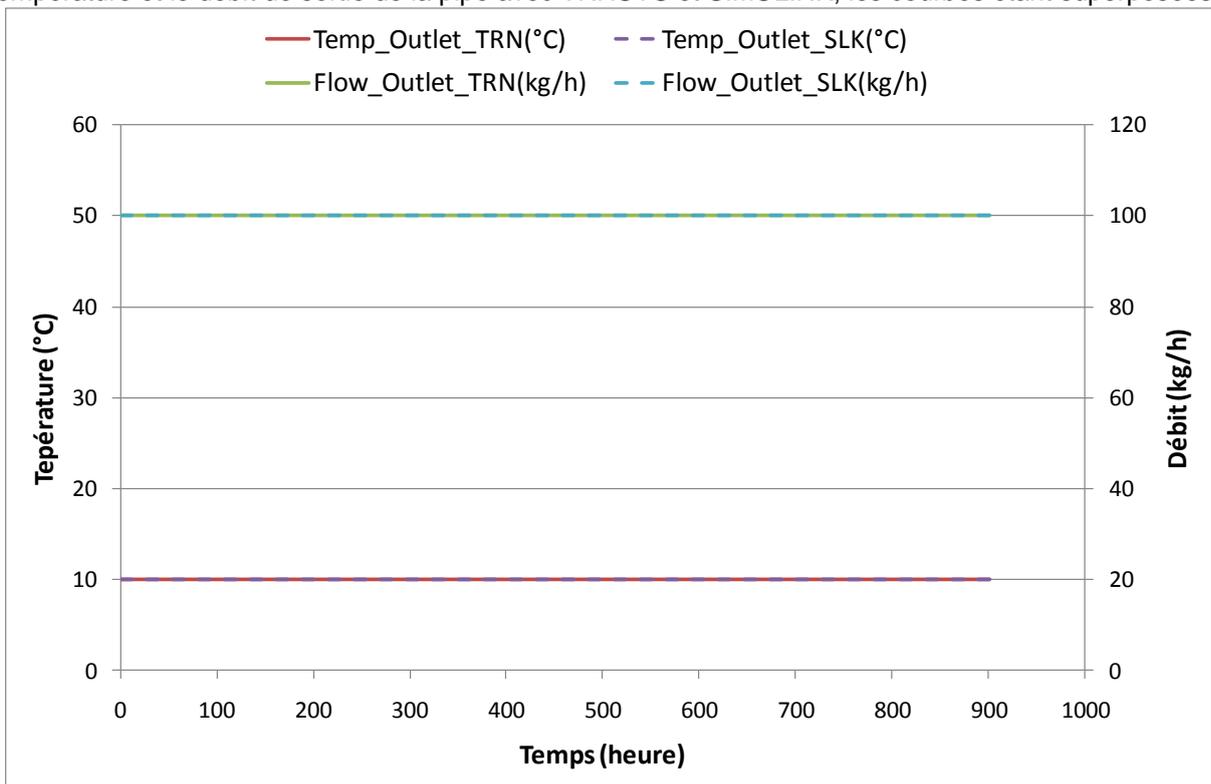


Figure 14 – comparaison des simulations du type 31 avec TRNSYS et Simulink (longueur doublée)

### 3.2.4.3 Températures d'entrée par paliers

Les valeurs des paramètres et des entrées sont données dans le tableau suivant. Ces valeurs sont celles proposées par défaut par TRNSYS en faisant varier la température d'entrée selon des paliers de 20-40-60°C de 300 heures chacun.

Paramètres		Entrées	
1-Inside diameter	0.03	1-Inlet temperature	20-40-60
2-Pipe length	10	2-Inlet flow rate	100
3-Loss coefficient	3	3-Environment temperature	10
4-Fluid density	1000		
5-Fluid specific heat	4.19		
6-Initial fluid temperature	10		

Les simulations sont effectuées avec le type 31 dans TRNSYS et le modèle exporté du type 31 dans SIMULINK sur une période de 900 heures avec un pas de temps d'une heure (**Start = 0, Stop = 900 heures, Step = 1 heure**). Les résultats des simulations montrent que les valeurs obtenues avec TRNSYS et SIMULINK sont exactement les mêmes pour toutes les sorties. La Figure 31 montre la température et le débit de sortie de la pipe avec TRNSYS et SIMULINK, les courbes étant superposées.

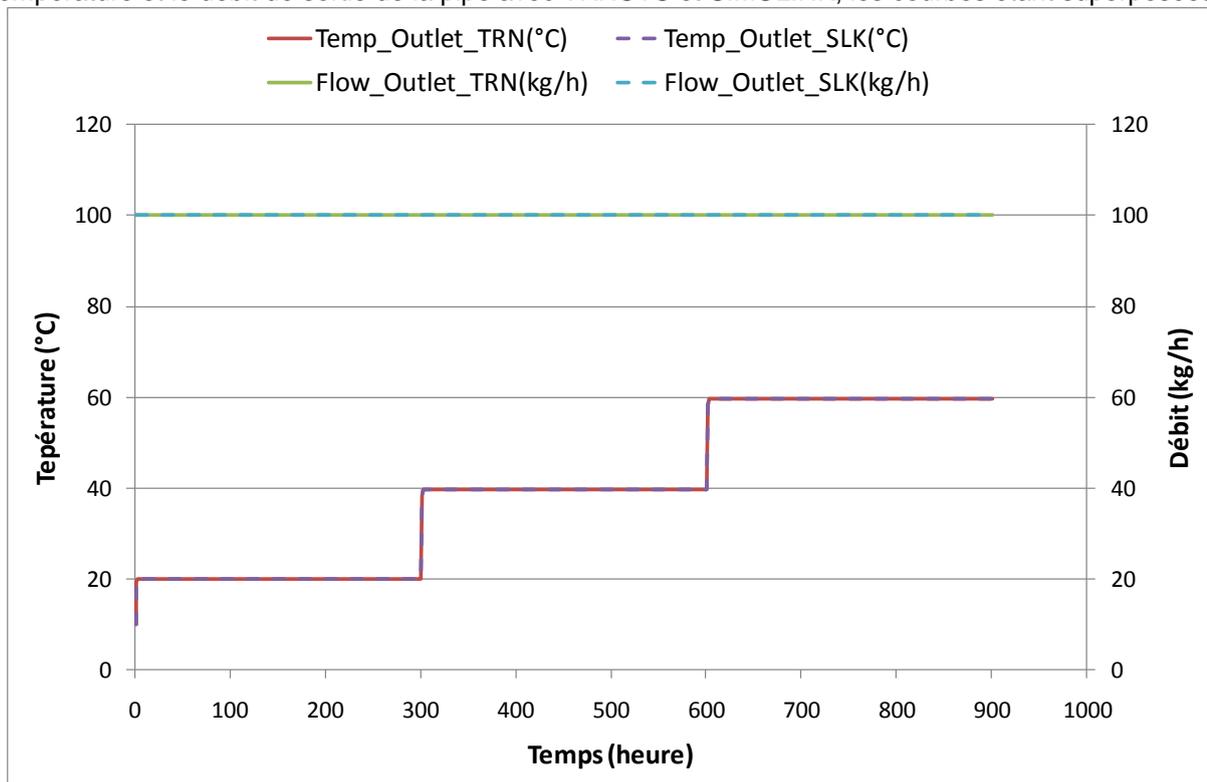


Figure 15– comparaison des simulations du type 31 avec TRNSYS et Simulink (Température avec palier)

### 3.2.4.4 Débit d'entrée par paliers

Les valeurs des paramètres et des entrées sont données dans le tableau suivant. Ces valeurs sont celles proposées par défaut par TRNSYS en faisant varier le débit d'entrée selon des paliers de 100-250-500 kg/heure.

Paramètres		Entrées	
1-Inside diameter	0.03	1-Inlet temperature	10
2-Pipe length	10	<b>2-Inlet flow rate</b>	<b>100-250-500</b>
3-Loss coefficient	3	3-Environment temperature	10
4-Fluid density	1000		
5-Fluid specific heat	4.19		
6-Initial fluid temperature	10		

Les simulations sont effectuées avec le type 31 dans TRNSYS et le modèle exporté du type 31 dans SIMULINK sur une période de 900 heures avec un pas de temps d'une heure (**Start = 0, Stop =900 heures, Step = 1 heure**). Les résultats des simulations montrent que les valeurs obtenues avec TRNSYS et SIMULINK sont exactement les mêmes pour toutes les sorties. La Figure suivante montre la température et le débit de sortie de la pipe avec TRNSYS et SIMULINK, les courbes étant superposées.

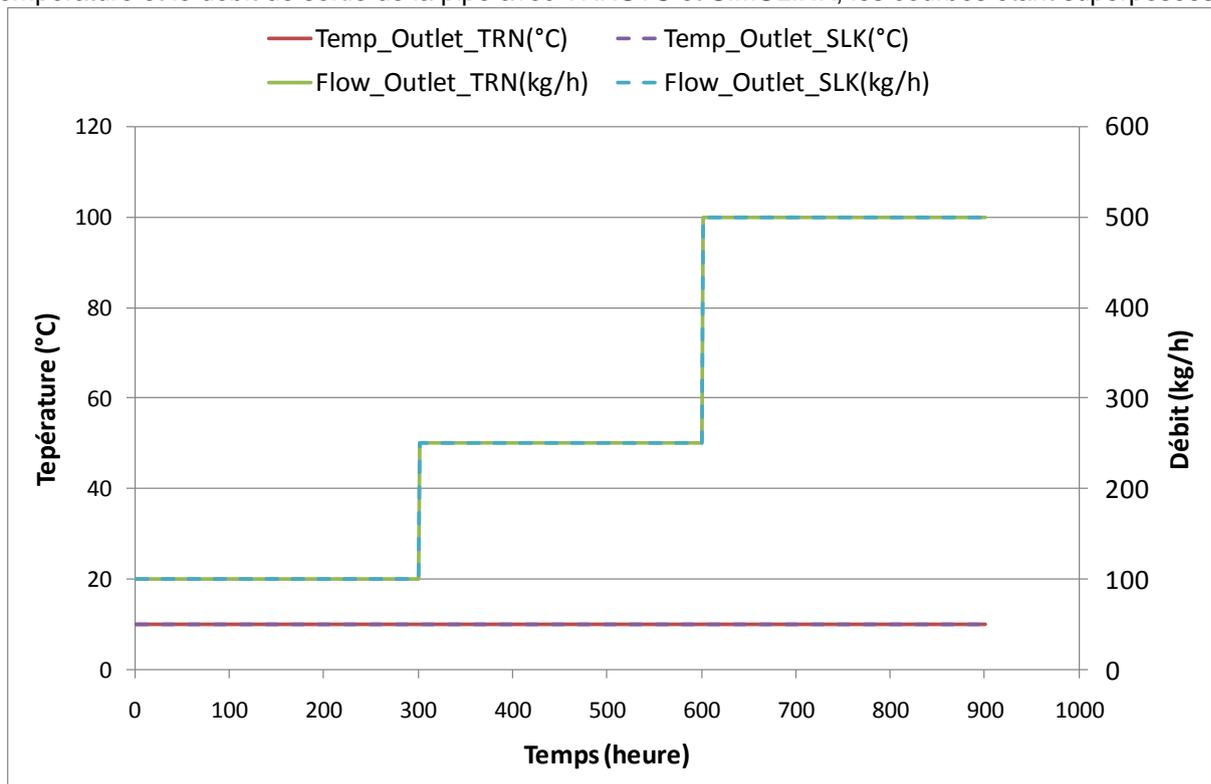


Figure 16– Comparaison des simulations du type 31 avec TRNSYS et Simulink (débit avec palier)

### 3.2.5 BÂTIMENT MULTIZONE – TYPE 56

#### 3.2.5.1 Trnsys16/Exemples/building : Modèles sans entrées

Les valeurs des paramètres et des entrées sont données dans le tableau suivant. Ces valeurs sont celles proposées par défaut par TRNSYS. Le fichier building.bui est utilisé pour la description du bâtiment. Il s'agit d'un projet comportant 3 zones chauffées à 20°C en occupation et 15°C en inoccupation.

Paramètres		Entrées	
1-Logical unit for building description file (.bui)	34	1- TAMB	0
2-Star network calculation switch	0	2- RELHUMAMB	0
3-Weighting factor for operative temperature	0.5	3- TSKY	0
		4- IT_NORTH	0
		5- IT_SOUTH	0
		...	
		27- TLAGER	10

Les simulations sont effectuées avec le type 56 dans TRNSYS et le modèle exporté du type 56 dans SIMULINK sur une période de 900 heures avec un pas de temps d'une heure (**Start = 0, Stop =900 heures, Step = 1 heure**). Les résultats des simulations montrent que les valeurs obtenues avec TRNSYS et SIMULINK sont exactement les mêmes pour toutes les sorties. La Figure 17 montre la température dans les 3 zones avec TRNSYS et SIMULINK. Les courbes sont superposées.

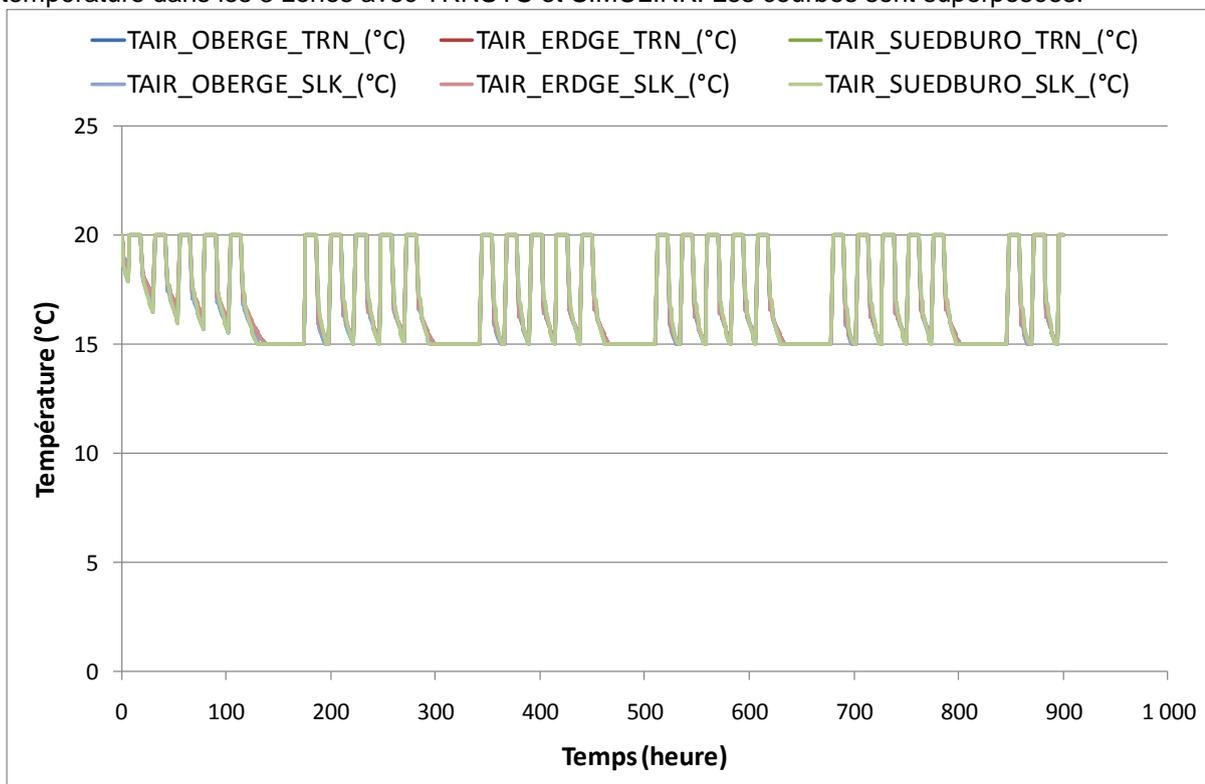


Figure 17– Comparaison des simulations du type 56 avec TRNSYS et Simulink (modèle sans entrées)

**3.2.5.2 Trnsys16/Exemple/Building : Températures d'entrée par paliers**

Les valeurs des paramètres et des entrées sont données dans le tableau suivant. Ces valeurs sont celles proposées par défaut par TRNSYS. Le fichier building.bui est utilisé pour la description du bâtiment. Il s'agit d'un projet comportant 3 zones chauffées à 20°C en occupation et 15°C en inoccupation. La température extérieure varie selon des paliers de -10-0-10°C de 300 heures chacun.

Paramètres		Entrées	
1-Logical unit for building description file (.bui)	34	1- TAMB	-10-0-10
2-Star network calculation switch	0	2- RELHUMAMB	0
3-Weighting factor for operative temperature	0.5	3- TSKY	0
		4- IT_NORTH	0
		5- IT_SOUTH	0
		...	
		27- TLAGER	10

Les simulations sont effectuées avec le type 56 dans TRNSYS et le modèle exporté du type 56 dans SIMULINK sur une période de 900 heures avec un pas de temps d'une heure (**Start = 0, Stop =900 heures, Step = 1 heure**). Les résultats des simulations montrent que les valeurs obtenues avec TRNSYS et SIMULINK sont exactement les mêmes pour toutes les sorties. La Figure 18 montre la température dans les 3 zones avec TRNSYS et SIMULINK. Les courbes sont superposées.

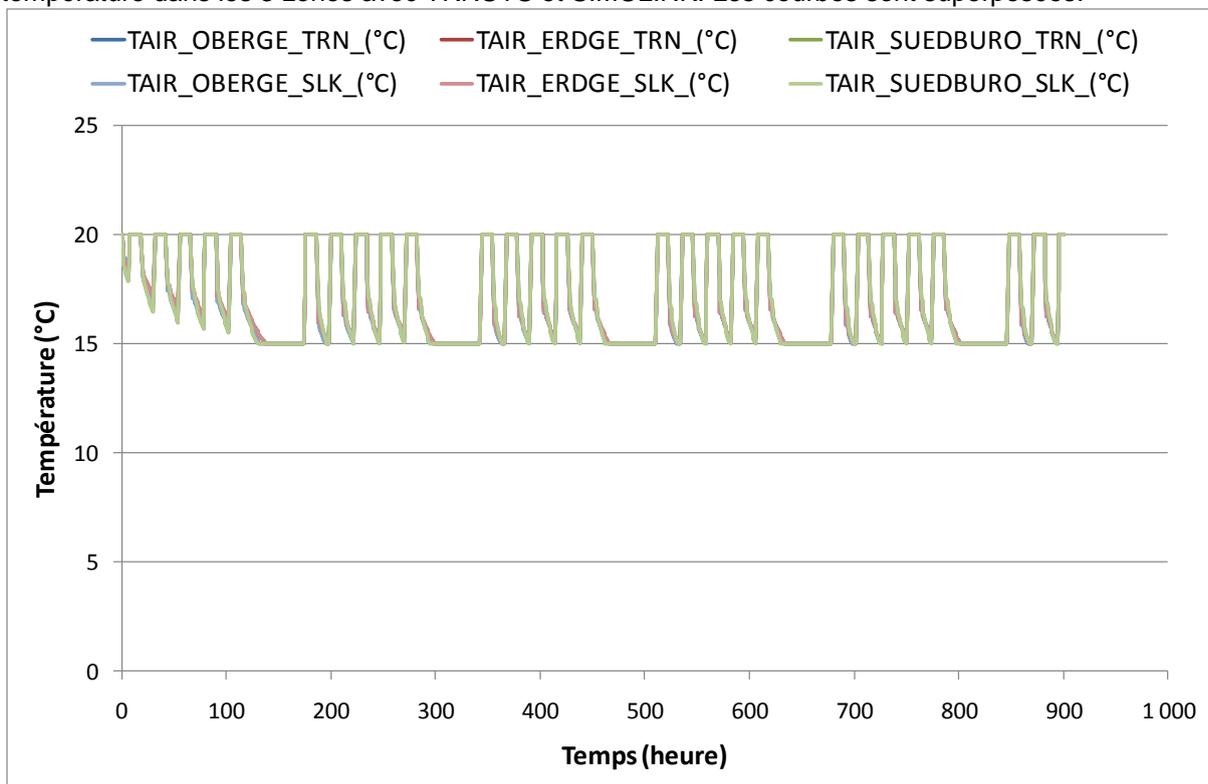


Figure 18– Comparaison des simulations du type 56 avec TRNSYS et Simulink (température avec paliers)

### 3.2.6 RÉGULATEUR – DIFFERENTIAL CONTROLLER 2D

Les valeurs des paramètres et des entrées sont données dans le tableau suivant. Ces valeurs sont celles correspondant à la régulation de la température d'entrée d'un tuyau pour obtenir une température de sortie de 50°C. La température d'entrée varie selon des paliers de 20-40-60°C de 300 heures chacun.

Paramètres		Entrées	
1-No. of oscillations	5	1-Upper input value	50
2-High limit cut-out	100	2-Lower input value	20-40-60
		3-Monitoring value	20
		4-Input control function	0
		5-Upper dead band	0
		6-Lower dead band	0

Les simulations sont effectuées avec le type 2d dans TRNSYS et le modèle exporté du type 56 dans SIMULINK sur une période de 900 heures avec un pas de temps d'une heure (**Start = 0, Stop = 900 heures, Step = 1 heure**). Les résultats des simulations montrent que les valeurs obtenues avec TRNSYS et SIMULINK sont exactement les mêmes pour toutes les sorties. La Figure 19 montre les valeurs de la fonction de contrôle avec TRNSYS et SIMULINK. Les courbes sont superposées.

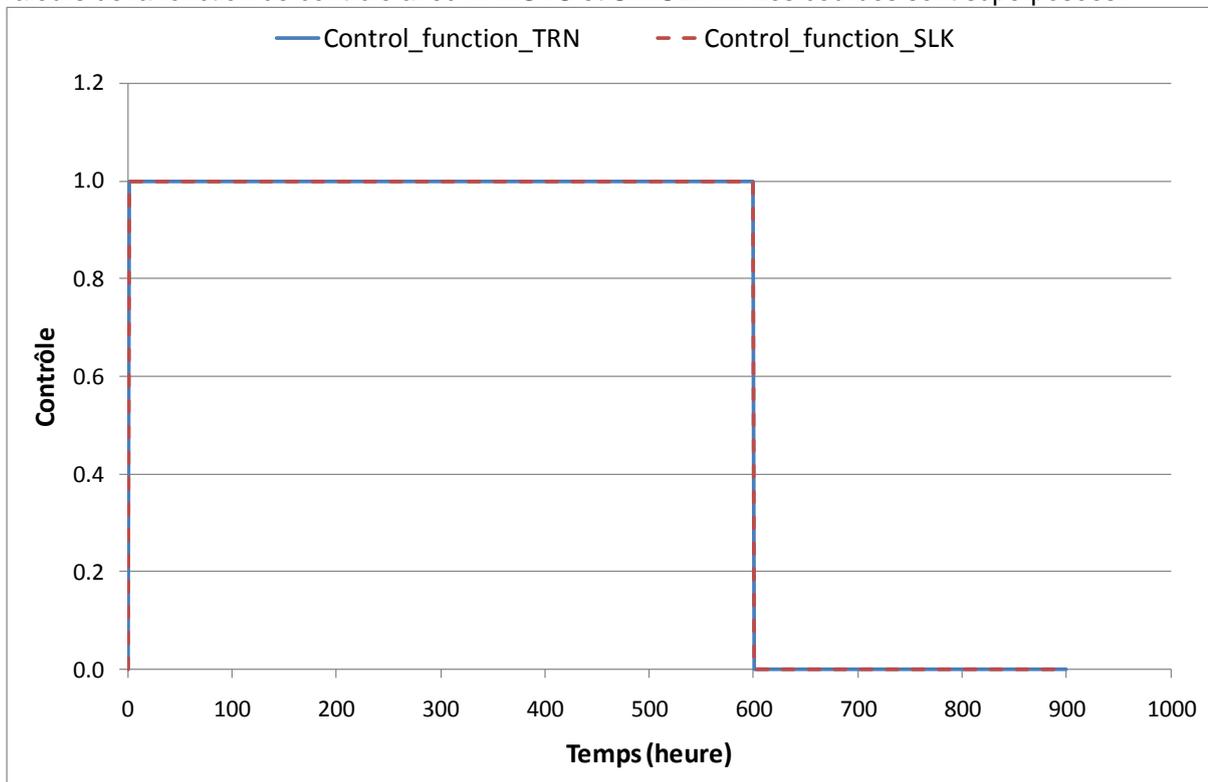


Figure 19– Comparaison des simulations du type 2d avec TRNSYS et Simulink (température avec paliers)

### 3.2.7 RÉGULATEUR PID – TYPE 23

Les valeurs des paramètres et des entrées sont données dans le tableau suivant. Ces valeurs sont celles correspondant à la régulation de la température d'entrée d'un tuyau pour obtenir une température de sortie de 50°C. La température d'entrée varie selon des paliers de 20-40-60°C de 300 heures chacun.

Paramètres		Entrées	
1-mode	0	1-Setpoint	50
2-Maximum number of oscillations	0	2-Controlled variable	20-40-60
		3-On / Off signal	1
		4-Minimum control signal	0
		5-Maximum control signal	100
		6-Threshold for non-zero output	0
		7-Gain constant	1
		8-Integral time	1
		9-Derivative time	1
		10-Tracking time for anti-windup	-1
		11-Fraction of ySet for proportional effect	1
		12-Fraction of ySet for derivative effect	1
		13-High-frequency limit on derivative	10

Les simulations sont effectuées avec le type 2d dans TRNSYS et le modèle exporté du type 2d dans SIMULINK sur une période de 900 heures avec un pas de temps d'une heure (**Start = 0, Stop =900 heures, Step = 1 heure**).

Les résultats des simulations sont exactement les mêmes avec TRNSYS et SIMULINK sauf à l'endroit de la transition entre les paliers des températures. La Figure 23 montre les valeurs de la fonction de contrôle avec TRNSYS et SIMULINK sur l'axe principal (à gauche) et les parts proportionnelle, intégrale et dérivative sur l'axe secondaire (à droite). Les parts proportionnelles sont exactement les mêmes dans les 2 cas, par contre les parts dérivative et intégrale sont légèrement différentes à l'endroit des transitions entre les paliers puis redeviennent les mêmes sur le palier.

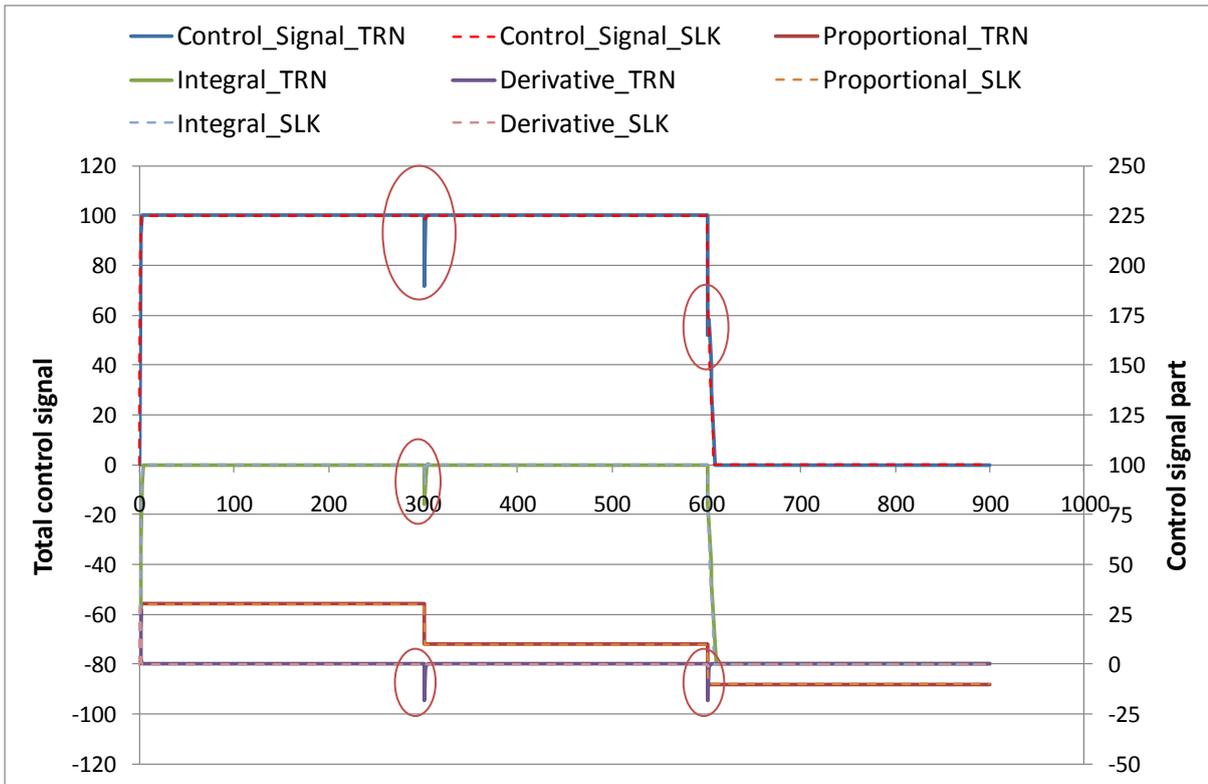


Figure 19– Comparaison des simulations du type 23 avec TRNSYS et Simulink (température avec paliers)

### 3.3 EXPORTATION DU MODÈLE COUPLÉ

#### 3.3.1 TRNSYS16/EXEMPLES/BEGIN

Un modèle couplé a été créé dans Simulink à partir du modèle TRNSYS du projet « begin » fourni dans le dossier « Exemples » de TRNSYS16. Ce modèle calcule l'énergie auxiliaire nécessaire pour assurer un débit d'eau chaude à 60°C avec un capteur solaire muni d'un chauffage auxiliaire. Une pompe assure la circulation de l'eau directement dans le collecteur solaire selon un horaire bien défini (entre 8h et 18h).

Le projet TRNSYS utilise 5 types pour la création du modèle :

1. Type 1 pour le collecteur solaire
2. Type 3 pour la pompe
3. Type 6 pour le chauffage auxiliaire
4. Type 14 pour définir les horaires
5. Type 109 pour la lecture des données climatiques

Avec ces 5 types, 3 autres sont utilisés pour l'affichage et la création du fichier des données de sortie. Les cinq types du modèle ont été exportés dans Simulink. Par contre, l'exportation du type 109 a échoué. Un fichier climatique comportant les données d'entrée nécessaires pour le type 1 a été créé dans Matlab. Il s'agit du fichier climatique TMY2 de la ville de Madison.

Les types exportés ont été assemblés dans Simulink en respectant le même assemblage dans TRNSYS. Les données climatiques sont déterminées à partir du fichier créé dans Matlab.

Les valeurs des paramètres et des entrées sont données dans le tableau suivant, ainsi que les connexions entre les entrées et les sorties.

<b>type 1</b>				
<b>Paramètres</b>		<b>Entrées</b>	<b>&lt;--</b>	<b>Connexion</b>
1-Number in series	1	1-Inlet temperature	20	Type3-Output1
2-Collector area	2	2-Inlet flowrate	100	Type3-Output2
3-Fluid specific heat	4.19	3-Ambient temperature	10	Weather file
4-Efficiency mode	1	4-Incident radiation	0	Weather file
5-Tested flow rate	40	5-Total horizontal radiation	0	Weather file
6-Intercept efficiency	0.8	6-Horizontal diffuse radiation	0	Weather file
7-Efficiency slope	13	7-Ground reflectance	0.2	-
8-Efficiency curvature	0.05	8-Incidence angle	45	Weather file
9-Optical mode 2	2	9-Collector slope	0	Weather file
10-1st-order IAM	0.2			
11-2nd-order IAM	0			

<b>type 3</b>				
<b>Paramètres</b>		<b>Entrées</b>	<b>&lt;--</b>	<b>Connexion</b>
1-Maximum flow rate	50	1-Inlet fluid temperature	20	-
2-Fluid specific heat	4.19	2-Inlet mass flow rate	40	-
3-Maximum power	60	3-Control signal	1	Type14-Ouput1
4-Conversion coefficient	0.05			
5-Power coefficient	0.5			

<b>Type 6</b>				
<b>Paramètres</b>		<b>Entrées</b>	<b>&lt;--</b>	<b>Connexion</b>

1-Maximum heating rate	5000	1-Inlet fluid temperature	20	Type1-Ouput1
2-Specific heat of fluid	4.19	2-Fluid mass flow rate	100	Type1-Ouput2
3-Overall loss coefficient for heater during operation	0	3-Control Function	1	-
4-Efficiency of auxiliary heater	1	4-Set point temperature	60	-

Type 14				
Paramètres		Entrées	<--	Connexion
1-Initial value of time	0	-		
2-Initial value of function	0			
3-Time at point-1	8			
4-Value at point -1	0			
5-Time at point-2	8			
6-Value at point -2	1			
7-Time at point-3	18			
8-Value at point -3	1			
9-Time at point-4	18			
10-Value at point -4	0			
11-Time at point-5	24			
12-Value at point -5	0			

Les simulations sont effectuées avec TRNSYS et le modèle couplé dans SIMULINK sur une période d'un an avec un pas de temps d'une heure (**Start = 0, Stop =8760 heures, Step = 1 heure**). Les résultats des simulations montrent que les valeurs obtenues avec TRNSYS et SIMULINK sont identiques pour les sorties du modèle. Les Figures 19 et 20 montrent les températures de sortie ainsi que les quantités d'énergie du capteur et du chauffage auxiliaire pour le mois de juillet.

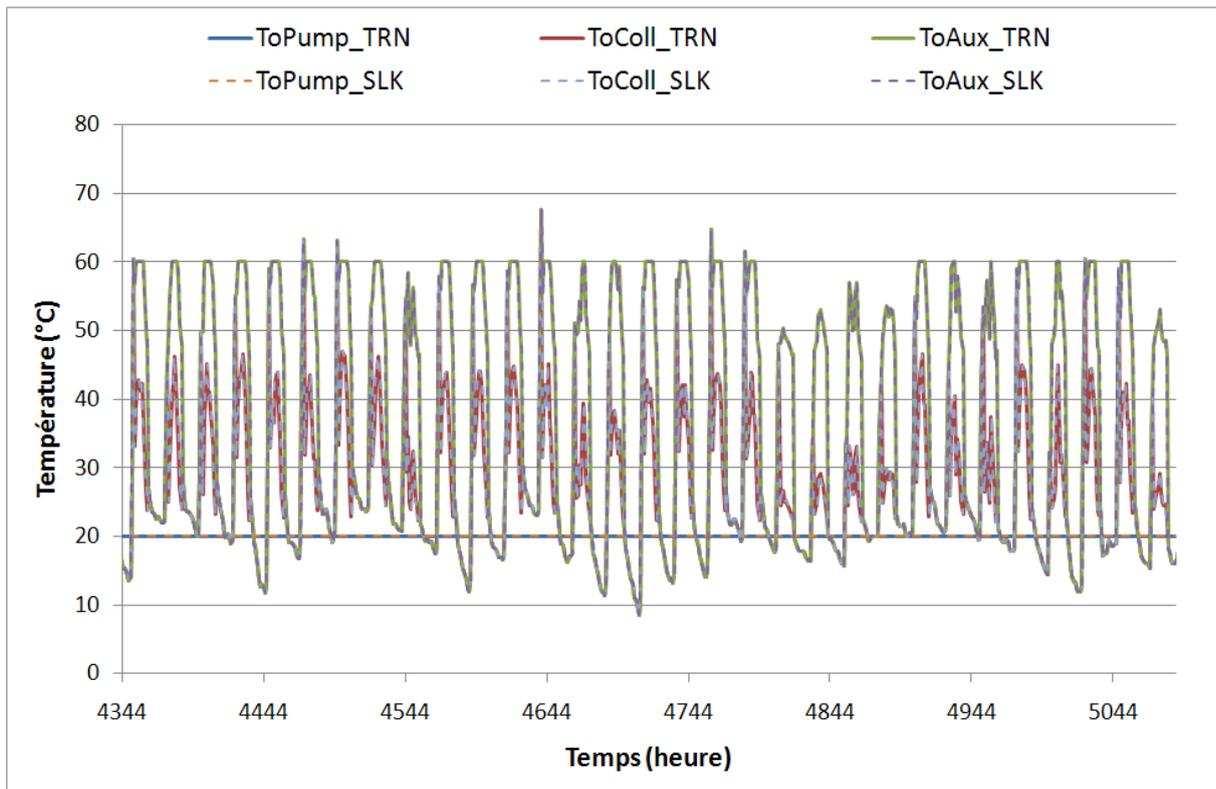


Figure 19– Températures obtenues avec le modèle begin dans TRNSYS et Simulink

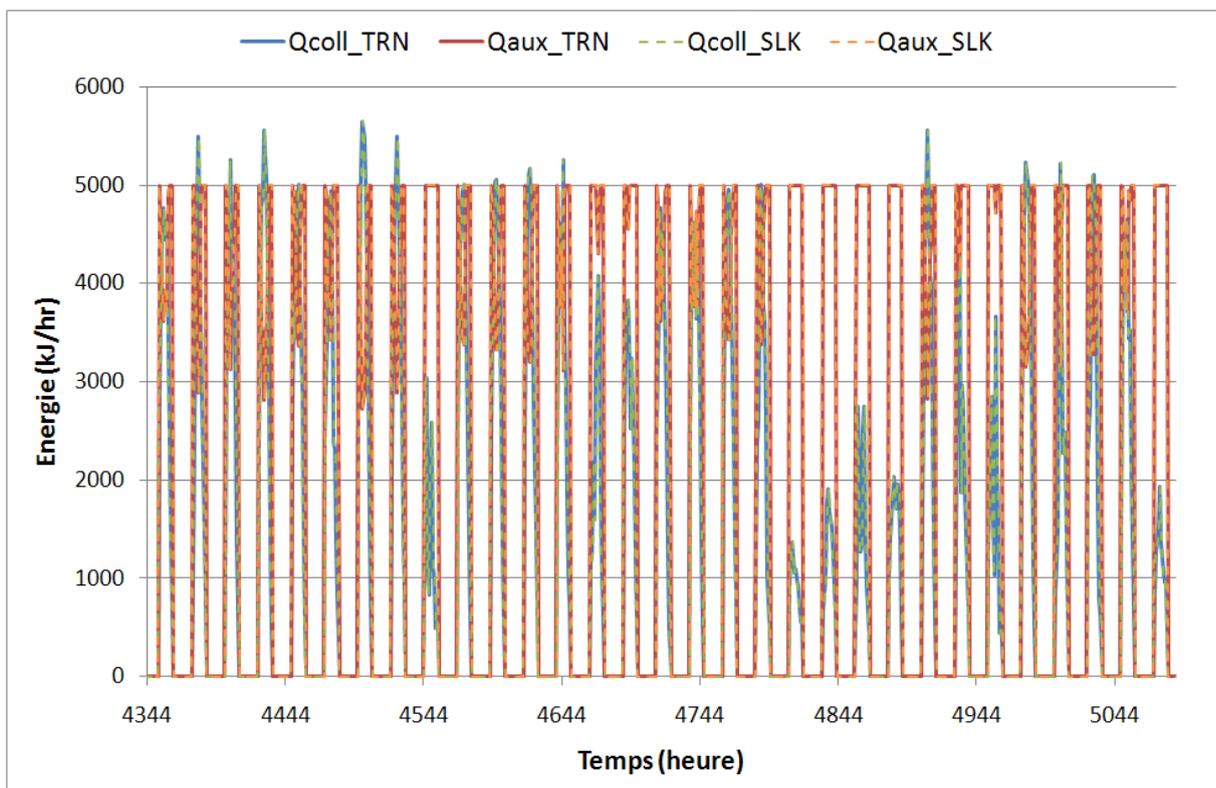


Figure 20– Besoins d'énergie obtenus avec le modèle begin dans TRNSYS et Simulink

Figure 21 - Le modèle dans TRNSYS

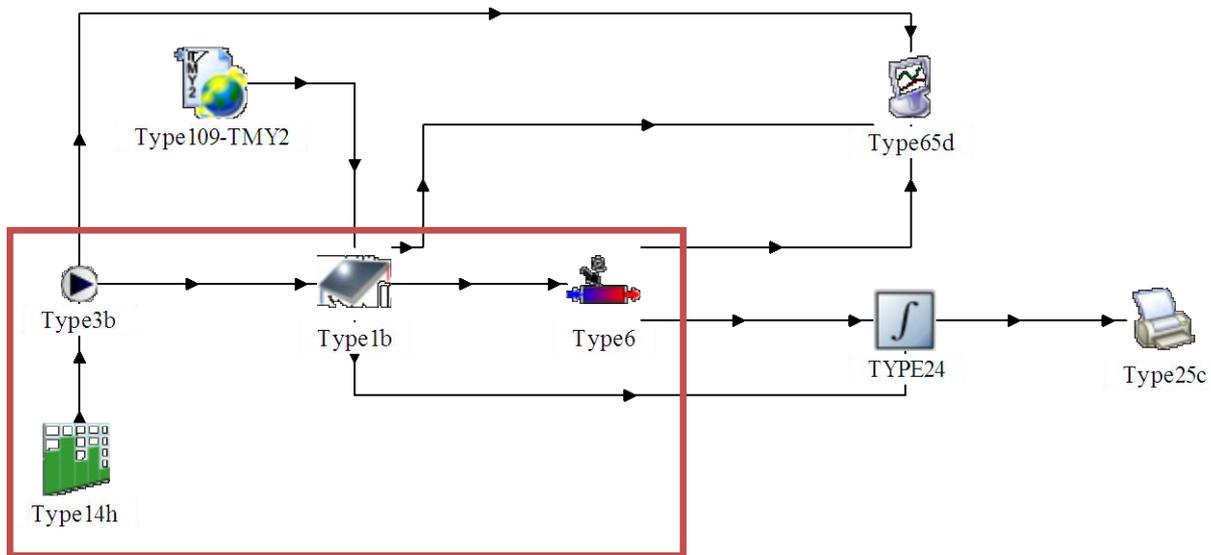
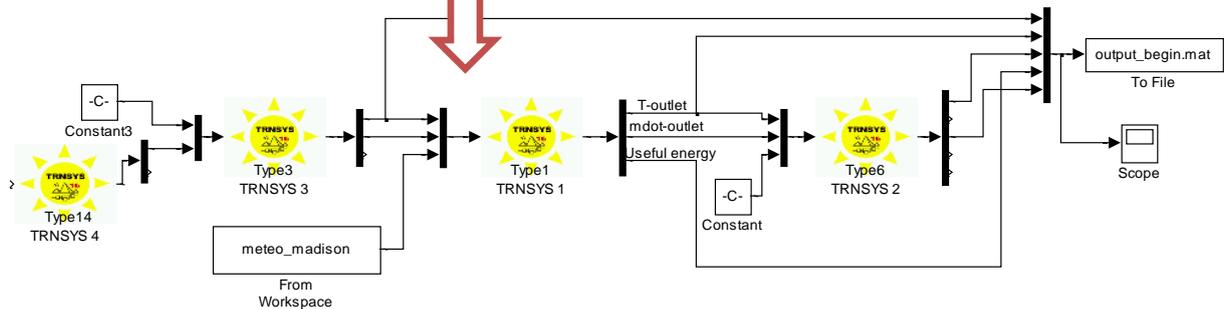


Figure 22 - Le modèle dans Simulink.



### 3.3.2 PROBLÈMES RENCONTRÉS DANS SIMULINK

Plusieurs difficultés ont été rencontrées lors de la création du modèle couplé dans Simulink :

- L'exportation du type 109 dans Simulink a échoué. Pour lire les données climatiques dans Simulink, un fichier txt comportant toutes les données nécessaires pour le fonctionnement du modèle (température extérieure, rayonnements solaires globaux et diffus sur une surface horizontale et inclinée, angle d'incidence, ...) a été créé dans TRNSYS avec le type 109 en utilisant le fichier TMY2 de la ville de Madison. Ce fichier a été copié dans MATLAB pour être lu dans Simulink.
- La connexion entre les entrées et les sorties des types exportés n'est simple dans Simulink. Il n'y a aucune indication sur les sorties dans Simulink. Il faut vérifier pour chaque type le nombre des entrées et des sorties ainsi que leurs ordres dans TRNSYS pour faire les connexions dans SIMULINK. Ceci est d'autant plus difficile lorsque le nombre des entrées ou des sorties du type est important (supérieur à 10 pour certaines types).
- Le temps de simulation dans Simulink est beaucoup plus important. Dans TRNSYS, la simulation est faite en quelques secondes pour une période annuelle, alors que Simulink a mis plus d'un quart d'heure pour la même simulation.

### 3.4 CONCLUSION

Plusieurs tests ont été réalisés avec les types de TRNSYS exportés dans Simulink. Ces tests ont été réalisés d'abord avec des modèles simples comportant un seul type, puis avec un modèle couplé comportant un assemblage de plusieurs types. Les résultats de ces tests ont montré que :

- Les modèles seuls exportés fonctionnent correctement dans Simulink. Les résultats des simulations sont exactement les mêmes que ceux obtenus dans TRNSYS pour les types testés selon les différents scénarii proposés (capteur solaire type 1, ballon de stockage type 40, ballon

de stockage type 60d, pipe type 31, bâtiment multizone type 56, régulateur – differential controller 2d). Aucun problème particulier n'a été rencontré lors de l'exportation ou des simulations dans Simulink.

- Pour le régulateur PID – type 23, les résultats du test réalisé pour une application simple (régulation de la température d'entrée d'un tuyau pour obtenir une température de sortie de 50°C en variant la température d'entrée selon trois paliers de 20-40-60°C) sont légèrement différents avec Simulink à l'endroit des transitions entre les paliers. Des tests supplémentaires sont nécessaires pour vérifier le comportement du régulateur dans des conditions de fonctionnement plus réalistes.
- Pour le modèle couplé, le projet « begin » du dossier d'exemples de TRNSYS a été réalisé dans Simulink en couplant les types exportés du modèle. Le modèle couplé dans Simulink permet de prévoir le même comportement que TRNSYS, les sorties du modèles sont exactement les mêmes avec les deux outils. Par contre, plusieurs difficultés ont été relevées lors de la construction et la simulation du modèle couplé : la lecture des données climatiques (l'exportation du type 109 est déficiente), la connexion des entrées et des sorties qui n'est pas aisée dans Simulink, le temps de simulation dans Simulink très pénalisant par rapport à TRNSYS (15 minutes contre quelques secondes).

En conclusion, l'exportation des modèles seuls testés dans Simulink est facile et ne pose aucun problème particulier. Les modèles exportés permettent de calculer le même comportement que dans TRNSYS. Le modèle couplé qui a été testé dans Simulink permet aussi d'obtenir le même comportement que dans TRNSYS.



## Annexes volet 2

### 1 Exemple de fiche Proforma

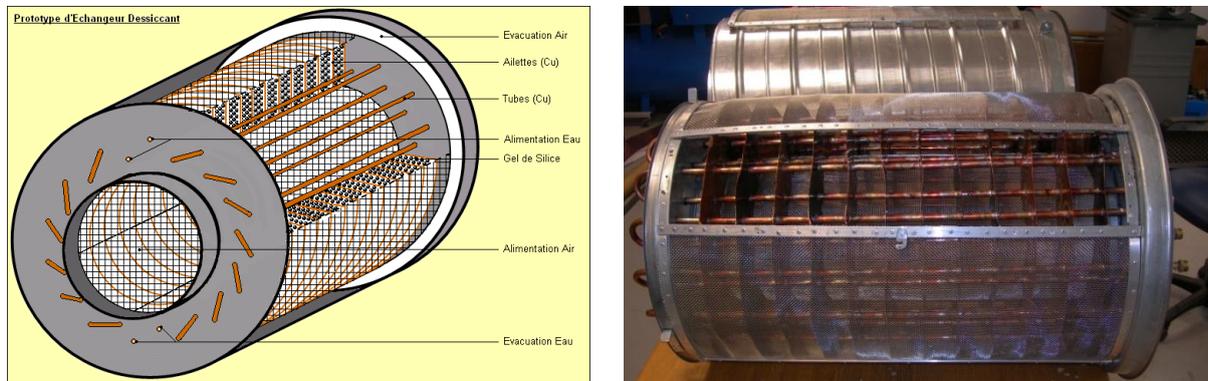
<b>FICHE PROFORMA N° :</b>	
<b>MODELE :</b>	TYPE 182 – Echangeur Dessiccant

<b>FICHE SIGNALÉTIQUE</b>
---------------------------

### Nom générique

#### OBJET

Le Type 182 simule le comportement du prototype d'échangeur dessiccant développé à l'INES. Il s'agit d'un échangeur multifonctionnel air/eau de type tubes et ailettes / calandre, dans lequel est inséré, côté air, un adsorbant sous forme granulaire (Figure 31).



**Figure 31 : Schéma et photographie du prototype d'échangeur dessiccant**

L'eau, chaude ou froide suivant la phase de fonctionnement (respectivement régénération ou adsorption), circule dans les tubes de cuivre. Les ailettes de forme annulaires permettent d'augmenter la surface d'échange et de contact entre l'eau, l'air et l'adsorbant.

L'adsorbant est intégré dans la structure dans les compartiments créés par les ailettes. Il est maintenu par deux grilles de forme cylindrique de diamètre 250 et 450.

L'air est admis au centre de la structure et s'écoule de manière radiale vers l'enveloppe extérieure à travers les interstices de l'empilement de l'adsorbant. Il est évacué en périphérie de l'échangeur.

La géométrie développée pour cet échangeur doit permettre à la fois d'augmenter les performances d'échanges thermique et massique, mais aussi de réduire les pertes de pressions engendrées par le lit compact à travers une faible épaisseur de l'empilement, une grande surface de passage et une faible vitesse d'écoulement de l'air.

#### PHÉNOMÈNE

Les phénomènes physiques correspondent aux transferts de masse et de chaleur mis en jeu lors de la dessiccation (adsorption de l'humidité de l'air) qui a lieu entre un adsorbant (humidité de l'air) et un

adsorbant (matériau dessiccant) et aux transferts de chaleur permis par l'échangeur entre l'air, l'adsorbant et un fluide chaud (phase de régénération) ou froid (phase d'adsorption).

Les équations de conservation de l'énergie et de la masse en coordonnées cylindriques sont définies respectivement par les équations [ 1 ] et [ 2 ].

$$\varepsilon \frac{\partial(\rho_{ah} h_{ah})}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho_{ah} U_{ah} h_{ah})}{\partial r} + \rho_{ad} (1 - \varepsilon) \frac{\partial h_{ad}}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_f U_f h_f)}{\partial z} = 0 \quad [ 1 ]$$

$$\rho_{ad} (1 - \varepsilon) \frac{\partial X}{\partial t} + \varepsilon \frac{\partial(\rho_{ah} W)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho_{ah} U_{ah} W)}{\partial r} = 0 \quad [ 2 ]$$

Afin de simplifier le problème, les masses volumiques des fluides et de l'adsorbant, ainsi que les vitesses des fluides sont considérées constantes par maille et par pas de temps et les tailles de maille sont définies et connues. De plus, les enthalpies de l'air, de l'adsorbant et du fluide sont exprimées en fonction des températures et humidités. Enfin, en exprimant les échanges thermiques et massiques entre les fluides et l'adsorbants, le système d'équation peut s'écrire à travers les équations [ 3 ] et [ 4 ] pour l'air, par les équations [ 5 ] et [ 6 ] pour l'adsorbant et par l'équation [ 7 ] pour le fluide.

$$\begin{aligned} \rho_{ah} \varepsilon (C_{p_{as}} + C_{p_v} W) \frac{\partial T_{ah}}{\partial t} + \rho_{ah} \varepsilon (C_{p_v} T_{ah} + h_{lat}) \frac{\partial W}{\partial t} + \rho_{ah} U_{ah} (C_{p_{as}} + C_{p_v} W) \frac{\partial T_{ah}}{\partial r} \\ + \rho_{ah} U_{ah} (C_{p_v} T_{ah} + h_{lat}) \frac{\partial W}{\partial r} = K_c A_v (T_{ad} - T_{ah}) + H_{mur} \frac{\varepsilon_{ail} S_{ech}}{V_{ech}} (T_f - T_{ah}) \end{aligned} \quad [ 3 ]$$

$$\rho_{ah} \varepsilon \frac{\partial W}{\partial t} + \rho_{ah} U_{ah} \frac{\partial W}{\partial r} = -K_M A_v (W - W_e) \quad [ 4 ]$$

$$\begin{aligned} \rho_{ad} (1 - \varepsilon) \left( C_{p_{eau}} T_{ad} + \frac{\partial h_b}{\partial X} \right) \frac{\partial X}{\partial t} + \rho_{ad} (1 - \varepsilon) C_{p_{eau}} X \frac{\partial T_{ad}}{\partial t} = -K_c A_v (T_{ad} - T_{ah}) \\ + \frac{\lambda \varepsilon_{ail}}{V_{ech}} \left( \frac{S_{tube}}{e_{tube}} + \frac{S_{ail}}{e_{ail}} \right) (T_f - T_{ad}) \end{aligned} \quad [ 5 ]$$

$$\rho_{ad} (1 - \varepsilon) \frac{\partial X}{\partial t} = K_M A_v (W - W_e) \quad [ 6 ]$$

$$\rho_f U_f C_{p_f} \frac{\partial T_f}{\partial z} = -H_{mur} \frac{\varepsilon_{ail} S_{ech}}{V_{ech,f}} (T_f - T_{ah}) - \frac{\lambda \varepsilon_{ail}}{V_{ech,f}} \left( \frac{S_{tube}}{e_{tube}} + \frac{S_{ail}}{e_{ail}} \right) (T_f - T_{ad}) \quad [ 7 ]$$

Pour décrire la conservation de la quantité de mouvement, équation [ 8 ], il est commun d'utiliser les équations de pertes de pression en milieu poreux (Clausse (2003)) en utilisant pour cela la loi de Kozeny-Carman (1927), à laquelle est ajouté un terme correspondant aux pertes de pression singulières de la géométrie, GRETh (1999) .

$$\Delta P = \Delta r \left( \frac{150 \mu_{ah} (1 - \varepsilon)^2}{d_{ad}^2 \varepsilon^3} U_{ah} + \frac{1,75 \rho_{ah} (1 - \varepsilon)}{d_{ad} \varepsilon^3} U_{ah}^2 \right) + K_s \rho \frac{U_{ah}^2}{2} \quad [ 8 ]$$

Les équations et corrélations utilisées sont définies précisément dans le [fichier 20070726 Equ Ech Des](#).

## HYPOTHÈSES

Le modèle numérique est établi en considérant les hypothèses suivantes communément utilisées par Bullock et Threlkeld (1996), Dupont *et al.* (1994) et Clausse (2003) :  
le modèle est adiabatique ;

les gradients transverses de température et de matière sont nuls ;  
les vitesses d'écoulement des fluides sont constantes dans le temps et unidirectionnelles ;  
les propriétés physiques de l'adsorbant sec sont uniformes ;  
la diffusion longitudinale de l'humidité est négligée ;  
le nombre de Lewis est supposé égal à 1 ;  
la température de paroi des surfaces d'échanges côté eau est supposée égale à la température de l'eau ;  
les vitesses et les masses volumiques des fluides sont supposées constantes dans chaque maille de l'échangeur discrétisé à chaque pas de temps du calcul ;  
les tailles des mailles de discrétisation sont définies et connues.

## MÉTHODE

La structure du programme est définie par le solveur TRNSYS. Le code est en langage FORTRAN. La résolution des équations se fait de manière matricielle, appliquée au système d'équations de transferts et de conservations de masse, d'énergie et de quantité de mouvement définies précédemment.

## CARACTÈRE

...

## Résumé

Le phénomène d'adsorption correspond à un échange de masse de l'adsorbat entre un fluide et l'adsorbant. Ce phénomène dégage une certaine quantité de chaleur, nommée chaleur de sorption. L'intérêt de l'échangeur dessiccant réside dans le contrôle de la température de sorption et de ce fait dans l'optimisation des échanges, mais aussi dans l'intégration des sources de régénération au sein même de la technologie de déshumidification (contrairement aux systèmes DEC classiques ayant recours à une roue dessiccante et deux échangeurs de chaleur.

Entre autres, Bullock & Threlkeld (1966), puis Dupont *et al.* (1994) ont défini le phénomène d'adsorption dans un lit poreux compact par des équations de transferts de masse et de chaleur, alors que Bunnell *et al.* (1977) et Laguerre *et al.* (2006) se sont attachés respectivement aux conductivités apparentes d'un empilement compact et aux transferts de chaleurs convectifs entre un fluide circulant dans un empilement compact et une paroi chaude.

Divers paramètres caractéristiques des couples adsorbant/adsorbat (isotherme de sorption, chaleur de sorption), mais aussi des échanges thermique et hydrique (coefficients d'échanges globaux) sont indispensables à la résolution des équations et doivent ainsi être caractérisés ou estimés.

L'intérêt de ce TYPE réside dans la possibilité de coupler un modèle représentatif de la technologie d'échangeur dessiccant développé au sein d'un environnement évolutif tel que TRNSYS. Le potentiel de la technologie intégrée au sein d'un système complet peut ainsi être étudié. Ce modèle doit de plus permettre d'optimiser les futurs prototypes. En guise de légitimité, les résultats du modèle ont été validés à partir de résultats expérimentaux.

## Mode d'approche

Le modèle est basé sur les équations définies précédemment. Celle-ci sont appliquées à la géométrie représentée sur la Figure 32. Afin de simplifier la géométrie, l'axe z de l'échangeur est considéré comme axe de révolution. La géométrie est discrétisée sur un angle  $\theta = 24^\circ$ .



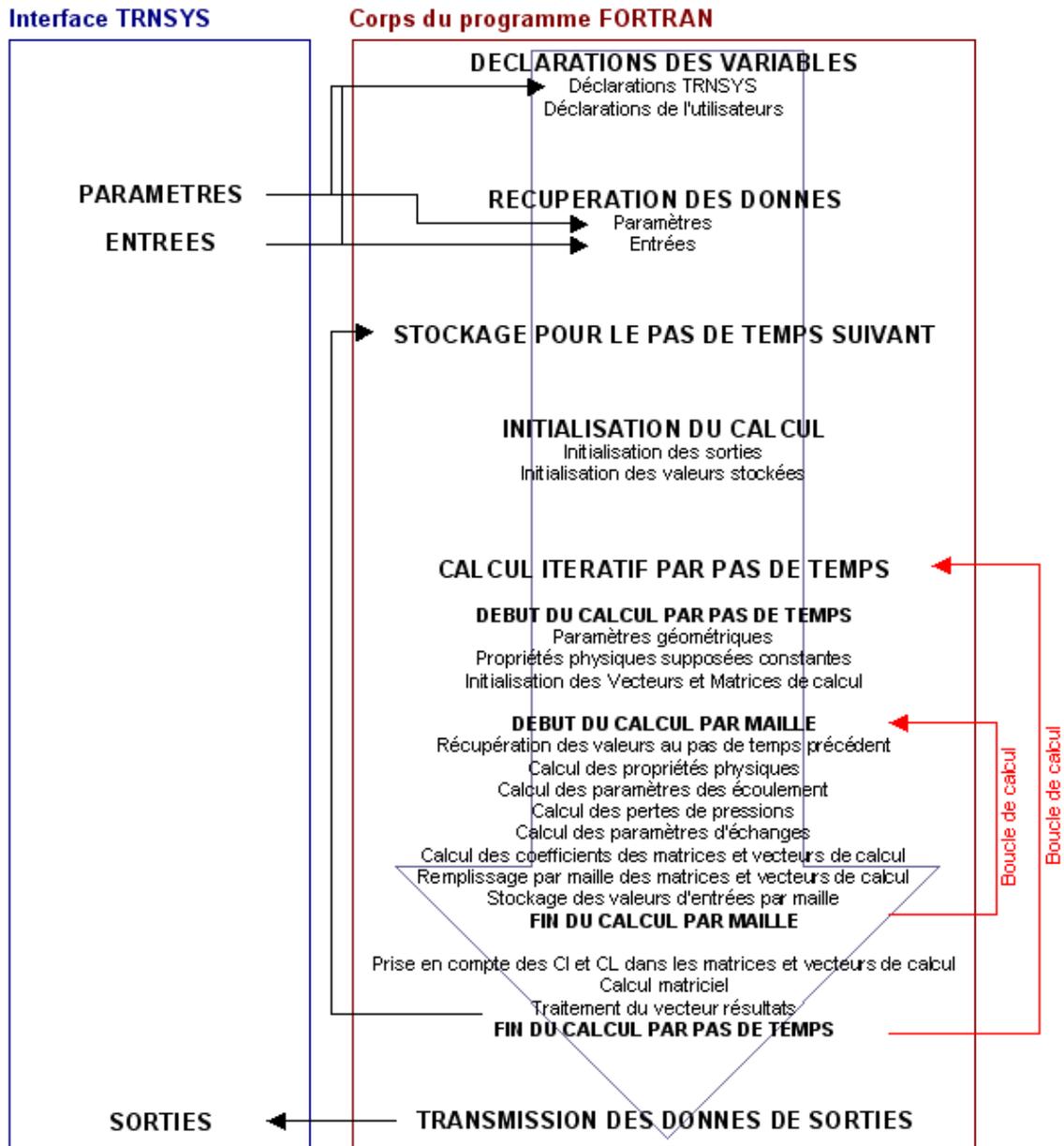
<i>Tf_out</i>	Température du fluide	°C
<i>Pah_out</i>	Pression de l'air	Pa
<i>Tad_out</i>	Température finale moyenne de l'adsorbant	°C
<i>Tah_out</i>	Température de l'air traiter	°C
<i>W_out</i>	Humidité spécifique de l'air traiter	kg.kg <sup>-1</sup>
<i>X_out</i>	Teneur en eau finale moyenne de l'adsorbant	kg.kg <sup>-1</sup>

### VARIABLES INTERNES

<i>A</i>	Matrice équivalente à matA	
<i>A1 à E10</i>	Coefficients matriciels des équations	
<i>Av</i>	Surface spécifique de l'adsorbant	m <sup>2</sup> .m <sup>-3</sup>
<i>Cpads</i>	Chaleur spécifique de l'adsorbant sec	J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
<i>Cpas</i>	Chaleur spécifique de l'air sec	J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
<i>Cpeau</i>	Chaleur spécifique de l'eau liquide	J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
<i>Cpf</i>	Chaleur spécifique du fluide	J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
<i>Cpv</i>	Chaleur spécifique de la vapeur d'eau	J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
<i>Dad</i>	Diamètre de grain de l'adsorbant	m
<i>Darcy</i>	Coefficient de Darcy	
<i>DELTA</i>	Pas de temps TRNSYS	h
<i>Dext</i>	Diamètre extérieur de l'échangeur	m
<i>Df</i>	Diamètre interne des tubes de circulation du fluide	m
<i>Dh</i>	Diamètre hydraulique côté air	m
<i>dHbdX</i>	Enthalpie de mouillage	J.kg <sup>-1</sup>
<i>Dint</i>	Diamètre interne de l'échangeur	m
<i>dPah_si</i>	Pertes de pressions singulières	Pa
<i>dr</i>	Hauteur du lit poreux compact	m
<i>dt</i>	Pas de temps physique	s
<i>dz</i>	Taille d'une maille selon la direction z	m
<i>Eail</i>	Longueur caractéristique inter-aillettes	m
<i>Ef</i>	Efficacité d'aillettes	
<i>Epl</i>	Hauteur d'une maille selon la direction radiale	m
<i>Etube</i>	Longueur caractéristique inter-tubes	m
<i>Hlat</i>	Chaleur latente	J.kg <sup>-1</sup>
<i>Hmur</i>	Coefficient d'échange convectif air/fluide	W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup>
<i>Hre</i>	Humidité relative à l'interface vapeur d'eau/adsorbant	
<i>i, iter, incr</i>	Paramètres d'itération, ou d'incrémentement	
<i>IFLAG</i>	Paramètres du sous-programme MATRIX_INVERT	
<i>Kc</i>	Coefficient d'échange convectif air/adsorbant	W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup>
<i>Kg</i>	Coefficient de pertes de charge singulières	
<i>Km</i>	Coefficient d'échange massique	kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup>
<i>L</i>	Longueur de l'échangeur	m
<i>LAah</i>	Conductivité thermique de l'air	W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
<i>LAI</i>	Conductivité thermique apparente de l'empilement	W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
<i>Mat_nin</i>	Vecteur mémoire des entrées au pas de temps précédent	
<i>matA</i>	Matrice des coefficients d'inconnues	
<i>matB</i>	Vecteur résultats des équations	
<i>matdim</i>	Dimension des matrices	
<i>matX</i>	Vecteur d'inconnues	
<i>Muah</i>	Viscosité dynamique	Pa.s
<i>N</i>	Paramètres du sous-programme MATRIX_INVERT	
<i>Nmaille</i>	Nombre de mailles de discrétisation	
<i>NRC</i>	Paramètres du sous-programme MATRIX_INVERT	
<i>PASail</i>	Pas d'aillettes	m
<i>PI</i>	Nombre $\pi$	
<i>PORO</i>	Porosité de l'empilement	
<i>Pr</i>	Nombre de Prandtl de l'air	
<i>Psat</i>	Pression de saturation	Pa
<i>Pve</i>	Pression de vapeur à l'interface vapeur d'eau/adsorbant	Pa
<i>Re_ad</i>	Nombre de Reynolds base sur le diamètre d'adsorbant	
<i>REDhl</i>	Nombre de Reynolds base sur le diamètre hydraulique	

<i>RHOads</i>	Masse volumique de l'adsorbant	$\text{kg.m}^{-3}$
<i>RHOah</i>	Masse volumique de l'air humide	$\text{kg.m}^{-3}$
<i>RHO<sub>f</sub></i>	Masse volumique du fluide	$\text{kg.m}^{-3}$
<i>Sail</i>	Surface d'échange extérieur des ailettes ramenée à une maille	$\text{m}^2$
<i>Sech</i>	Surface d'échange de l'échangeur (Stube+Sail) ramenée à une maille	$\text{m}^2$
<i>Sl</i>	Surface de passage équivalent basée sur le diamètre hydraulique	$\text{m}^2$
<i>Stube</i>	Surface d'échange extérieur des tubes ramenée à une maille	$\text{m}^2$
<i>U<sub>ah</sub></i>	Vitesse de l'air humide	$\text{m.s}^{-1}$
<i>U<sub>f</sub></i>	Vitesse du fluide	$\text{m.s}^{-1}$
<i>Vech</i>	Volume de l'échangeur dans lequel est intégré l'adsorbant ramenée à une maille	$\text{m}^3$
<i>Vech<sub>f</sub></i>	Volume d'échange côté fluide ramenée à une maille	$\text{m}^3$
<i>We</i>	Humidité spécifique de l'air à l'interface vapeur d'eau/adsorbant	$\text{kg.kg}^{-1}$
<b>Indice</b>		
<i>1</i>	Relatif à la 1 <sup>ère</sup> couche d'adsorbant	
<i>2</i>	Relatif à la 2 <sup>nd</sup> couche d'adsorbant	
<i>n</i>	Relatif à la valeurs au pas de temps précédent	
<i>n<sub>in</sub></i>	Relatif à la valeurs d'entrée au pas de temps précédent	
<i>n<sub>out</sub></i>	Relatif à la valeurs de sortie au pas de temps précédent	

## Schéma fonctionnel



## Schéma bloc

...

## Formulation

DOMAINE D'APPLICATION – RÈGLES D'USAGE

## Hypothèses détaillées

[Cf. hypothèses générales](#)

## Conditions de validité

...

## Listes des applications

Dessiccation, systèmes DEC, traitement d'air, contrôle d'humidité....

## Proforma équivalent

...

## Modèles amont utilisés

Le modèle utilise les sous-programme, fonction ou module suivant :

getSimulationTimeStep() : Fonction TRNSYS

MATRIX\_INVERT (NRC, N, A, IFLAG) : Sous-programme TRNSYS

MATMUL(A, matB) : module de calcul FORTRAN

## Règles de cohérences pour assemblage

...

## Difficultés

...

### ESSAIS DE VALIDATION

Comparaison des résultats numériques avec ceux expérimentaux réalisés à l'IFFI sur le prototype d'échangeur dessiccant Figure 33.

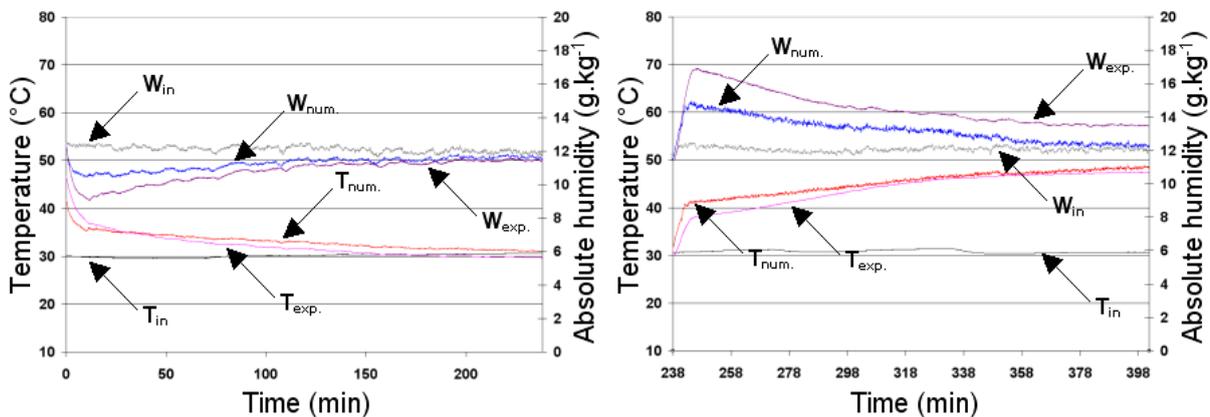


Figure 33 : Comparaison des résultats numériques et expérimentaux

Tendances similaires et proches autant en température que en humidité :  $\Delta T = 1.27 \text{ }^\circ\text{C}$  et  $\Delta W = 0.46 \text{ g.kg}^{-1}$  en adsorption et  $1.28 \text{ g.kg}^{-1}$  en régénération. Le modèle donne des résultats en humidité inférieurs aux expérimentaux. Ces écarts doivent être relativisés en fonction des erreurs de mesures sur les résultats expérimentaux et des précisions des corrélations utilisées, principalement celle du coefficient d'échange régissant les transferts de matières.

### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BOUDEHENN F. 2006. *Etude, dimensionnement et caractérisation d'un échangeur dessiccant pour les systèmes de rafraîchissement solaire*. Mémoire de DRT, pp. 51-63.
- BULLOCK C.E. & THRELKELD J. L. 1966. *Dehumidification of moist air by adiabatic adsorption*. ASHRE Research Project, RP-48, N° 1966, pp. 301-312.
- BUNNEL D.G., IRVIN H.B., OLSON R.W. & SMITH J.M. 1949. *Effective thermal conductivities in gas-solid systems*. Industrial and Engineering Chemistry Research & Development, 41, pp. 1977-1998. Cité par Wen et Ding (2006).
- DUMINIL M. 1986. *Air humide*. Techniques de l'ingénieur, traité Génie Energétique, B 2230, pp.1-27.
- DUPONT M., CELESTINE B., NGUYEN P. H., MERIGOUX J. & BRANDON B. 1994. *Desiccant solar air conditioning in tropical climates: I – Dynamic experimental and numerical studies of silicagel and actived alumina*. Solar Energy, Vol. 52, N° 6, pp. 509-517.
- GRETh. 1999. *Manuel Technique*. Groupement pour la Recherche sur les Echangeurs Thermiques, fiche techniquesTM8.
- GRETh. 2005. Note sur les échangeur à air humide. pp. 1-13.
- GURGEL J.M., ANDRADE FILHO L.S., GRENIER PH. & MEUNIER F. 2001. *Thermal diffusivity and Adsorption Kinetics of Silica-Gel/Water*. Adsorption, 7, pp. 211-219.
- JAMIALAHMADI M., MÜLLER-STEINHAGEN H. & IZADPANAH M.R. 2004. *Pressure drop, gas hold-up and heat transfer during single and two-phase flow through porous media*. International Journal of Heat and Fluid Flow, 26, pp. 156-172.
- JANNOT Y. 2003. *L'air humide*. pp. 1-17.
- KENNARD E.H. 1938. *Kinetic Theory of Gases*. McGraw-Hill, New York, cité par Gurge et al. (2001).
- KOZENY-CARMAN J. 1927. *Über kapillare Leitung des Wassers im Boden*. Ber. Wien. Akd. 136, pp. 271-278. Cité par Jamialahmadi et al. (2004).
- LAGUERRE O., BEN AMARA S. & FLICK D. 2006. *Heat transfer between wall and packed bed crossed by low velocity airflow*. Applied Thermal Engineering, 26, pp. 1951-1960.
- SCHAWE. 2001. *Theoretical and experimental investigations of an adsorption heat pump with heat transfer between two adsorbers*. Thèse de doctorat de l'Institut für Kernenergetik und Energiesysteme des Universität Stuttgart, Annexe B, pp. 106-152.
- TECHAJUNTA S., CHIRARATTANANON S. & EXELL R.H.B. 1998. Experiments in a solar simulator on solid desiccant regeneration and air dehumidification for air conditioning in a tropical humid climate. Renewable Energy, Vol. 17, pp. 2727-2735.
- WASCH A.P. & FROMENT G.F. 1972. *Heat transfer in packed beds*. Chemical Engineering Science, Volume 27, Issue 3, pp. 567-576.
- WEN D. & DING Y. 2006. *Heat transfer of gas flow trough a packed bed*. Chemical Engineering Science, 61, pp. 3532-3542.



## **Annexes volet 3**

### **1 Complément d'information sur l'application de la méthode P.O.D. à l'équation de conservation de l'énergie dans l'air pour un cas 3D**

Alain SEMPEY, Emmanuel BOZONNET et Christian INARD

LEPTIAB EA 4226 ; Pôle Sciences et Technologie, Avenue Michel Crépeaux, 17003 La Rochelle Cedex 1

#### **1.1 OBJECTIFS ET INTÉRÊT**

Les modèles utilisés actuellement en thermique du bâtiment, qu'ils soient nodaux (température homogène) ou zonaux, sont basés sur une simplification géométrique ou sur une dégradation des équations décrivant les phénomènes physiques : les équations de Navier Stokes et l'équation de conservation de l'énergie. Leur précision et d'ores et déjà mise en défaut par certaines applications (simulation énergétique d'un bâtiment, contrôle en temps réel de la température d'un local,...). D'autre part, nous pouvons légitimement nous interroger sur leur capacité à répondre aux exigences accrues tant en terme de consommation énergétique que de confort.

A l'opposé, l'augmentation de la puissance et de la rapidité des machines de calcul ont permis, ces dernières années, un fort développement des logiciels de CFD (Computational Fluid Dynamic). Associés à des résultats expérimentaux pour leur validation, il semble possible d'obtenir des résultats relativement précis dans un certain nombre de cas. Seulement, les modèles CFD exigent des discrétisations spatiale et temporelle très fines qui conduisent à des modèles d'ordre très élevés et à des temps de calculs prohibitifs. Ces modèles sont donc peu adaptés d'une part à des applications de type ingénierie (conception) et d'autre part à de nouveaux besoins tels que le diagnostic énergétique.

Partant d'un modèle détaillé de type CFD, notre objectif consiste à obtenir un modèle d'ordre faible de la distribution de température, c'est-à-dire un modèle décrivant précisant la physique tout en étant résoluble en un temps relativement court. Nous nous appuyons d'une part sur l'utilisation de la décomposition orthogonale aux valeurs propres (ou POD pour Proper Orthogonal Decomposition) qui est une méthode mathématique de réduction de modèles, et d'autre part sur l'écriture des modèles dans l'espace d'état pour leur exploitation. Dans nos travaux antérieurs (Sempey 2007), nous avons déjà montré la faisabilité d'une telle démarche pour un cas bidimensionnel. A présent, nous nous proposons d'appliquer cette méthodologie au cas d'un local expérimental pour lequel nous disposons de données pertinentes.

#### **1.2 PRÉSENTATION DU LOCAL ÉTUDIÉ**

Nous nous proposons de comparer les résultats numériques à des résultats expérimentaux obtenus dans une cellule expérimentale du COSTIC (Figure 34), équipée d'un convecteur électrique et de chambres de garde permettant de contrôler la température extérieure des parois (Palenzuela et al. 1993).

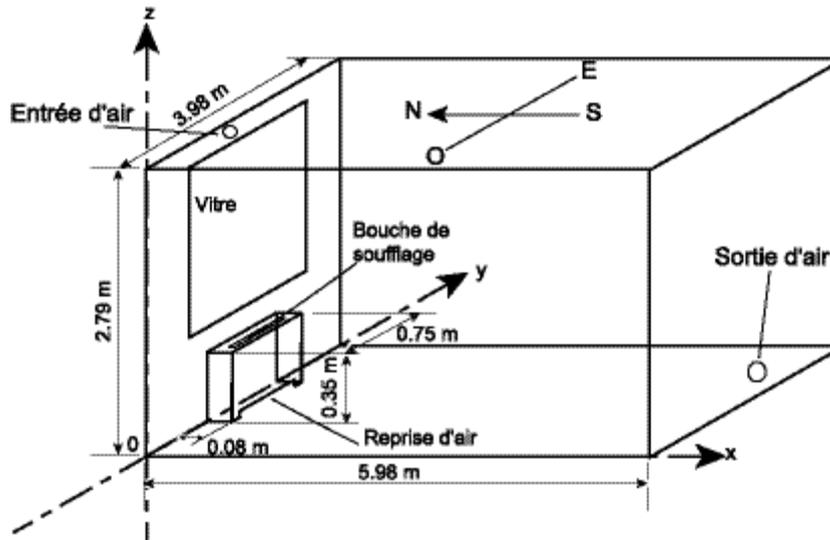


Figure 34 : Local expérimental

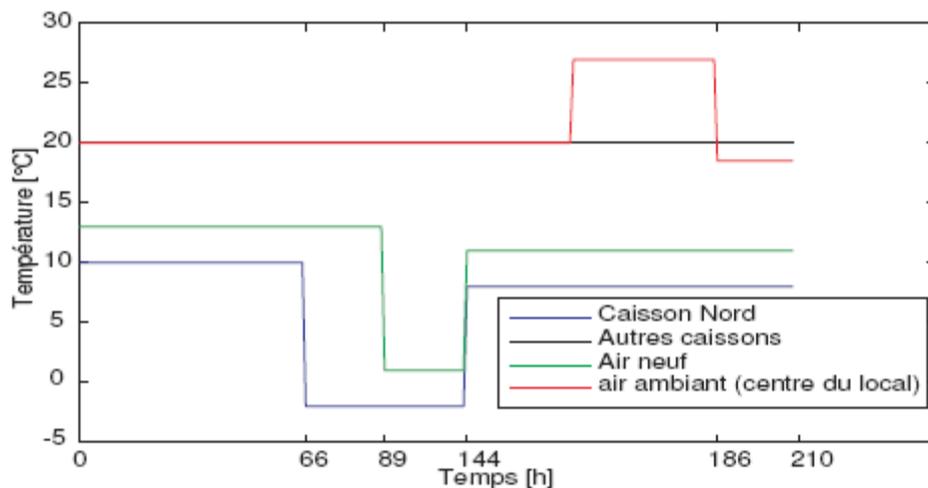


Figure 35 : Scénario de l'essai

Les résultats disponibles correspondent au contrôle du local en fonction de la température ambiante mesurée au centre du local, avec une régulation chronoproportionnelle, en faisant varier également la température du caisson Nord et la température d'air neuf de ventilation suivant les caractéristiques décrites sur la Figure 35.

Ce scénario d'essai à l'avantage de permettre l'étude du comportement du local séparément en fonction de la consigne de température d'air, de la variation de la température extérieure (caisson Nord) et de la température d'air neuf de ventilation.

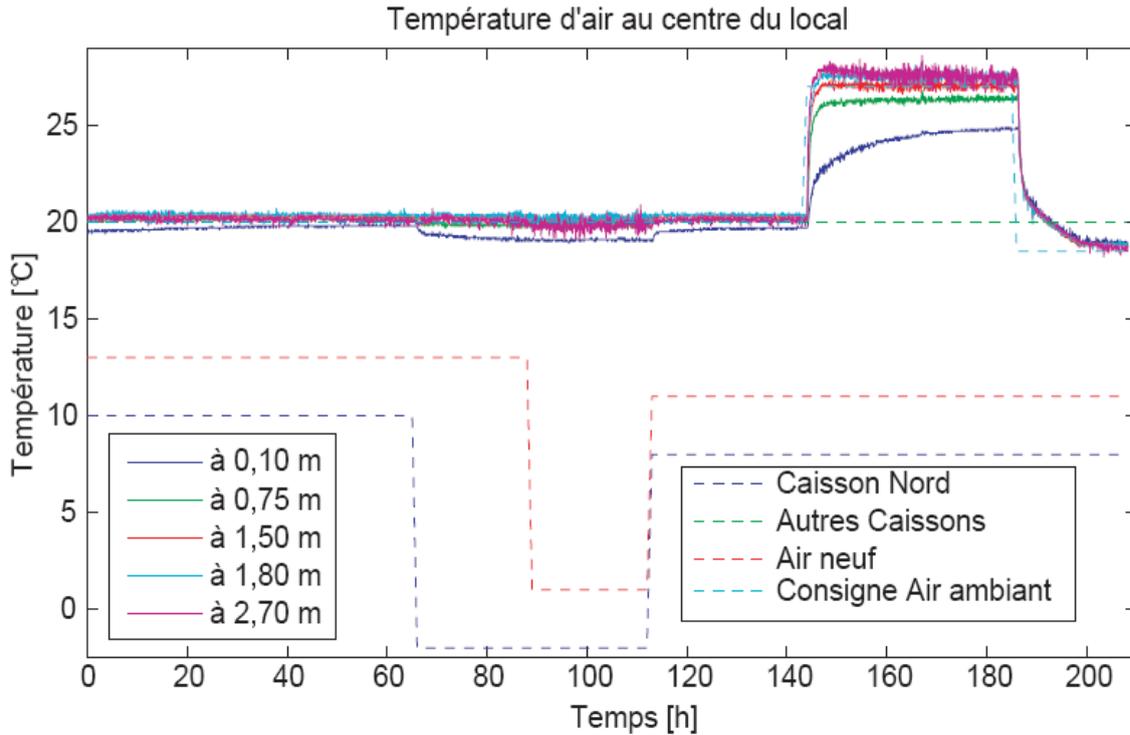


Figure 36 : Résultats de l'essai

Ces résultats (cf. Figure 36) font apparaître plusieurs éléments importants :

- Il existe un gradient de température vertical dont la valeur varie en fonction des conditions,
- le plancher de forte inertie engendre un comportement transitoire différent de la température de l'air à 0,10 m de hauteur,
- l'influence des températures du caisson Nord et de l'air neuf est faible.

### 1.3 LA DÉCOMPOSITION ORTHOGONALE AUX VALEURS PROPRES (POD)

La POD fait partie de la famille des méthodes spectrales qui reposent sur la sélection de modes propres par résolution d'un problème aux valeurs propres. Alors que beaucoup de ces méthodes sont limitées à des problèmes de taille raisonnable, de l'ordre de 1000, la POD réussit à contourner ce problème.

#### 1.3.1 PRINCIPE

Considérons  $\mathbf{X}(\mathbf{x}, t)$  un ensemble d'observations, aussi appelées snapshots (ou clichés), d'un processus physique, obtenues en  $N$  instants différents sur un domaine spatial noté  $\Omega$ . Ces observations peuvent être issues de données expérimentales ou numériques correspondant à des champs de vitesse, de vorticité, de température,... Nous cherchons une fonction  $\phi$  qui possède, au sens des moindres carrés, la plus grande projection sur les observations, c'est- -dire :

$$\begin{cases} \overline{(\mathbf{X}, \phi)^2} = \max_{\psi \in L^2(\Omega)} \overline{(\mathbf{X}, \psi)^2} \\ (\phi, \phi) = 1 \end{cases}, \quad \text{Equation 1}$$

où :

- $L^2(\Omega)$  : espace des fonctions de carré intégrable sur le domaine  $\Omega$ ,
- $\overline{\bullet}$  : opérateur statistique de moyenne,
- $(\bullet, \bullet)$  : produit scalaire de  $L^2$  défini par  $(\phi, \psi) = \int_{\Omega} \phi(\mathbf{x})\psi(\mathbf{x})d\mathbf{x}$ .

Un calcul variationnel (Allery 2002) permet de montrer que l’expression (1) est équivalente à l’intégrale de Fredholm définie par le problème aux valeurs propres suivant :

Trouver  $\lambda \in \mathbb{R}$  et  $\phi \in L^2(\Omega)$  tels que :

$$\int_{\Omega} R(\mathbf{x}, \mathbf{x}')\phi(\mathbf{x}')d\mathbf{x}' = \lambda \phi(\mathbf{x}), \quad \text{Equation 2}$$

où  $R$  est le tenseur de corrélation spatiale défini par  $R_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \overline{X_i(\mathbf{x}, t)X_j(\mathbf{x}', t)}$

Les solutions  $\phi_n$  sont communément appelées fonctions propres empiriques, modes propres orthogonaux ou modes principaux. Du fait de l’orthogonalité de la base ainsi constituée, le vecteur  $\mathbf{X}$  peut s’écrire :

$$\mathbf{X}(\mathbf{x}, t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n(t)\phi_n(\mathbf{x}) \text{ avec } a_n(t) = (\mathbf{X}(\mathbf{x}, t), \phi_n), \quad \text{Equation 3}$$

Les coefficients  $a_n(t)$  sont incorrélés et leurs valeurs moyennes sont les valeurs propres  $\lambda_n$  :

$$\overline{a_n(t)a_m^t(t)} = \delta_{nm}\lambda_n, \quad \text{Equation 4}$$

$C$  étant symétrique et définie semi-positive, toutes les valeurs propres sont réelles et non négatives. Elles peuvent donc être ordonnées :  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \dots \geq \lambda_M$ . Chaque valeur propre représente pour le mode correspondant sa contribution à une énergie moyenne (Sirovich et al. 1991) :

$$E = \overline{(\mathbf{X}, \mathbf{X})} = \sum_{n=1}^{\infty} \lambda_n, \quad \text{Equation 5}$$

Cette notion d’énergie ne représente pas forcément une énergie physique. Si  $\mathbf{X}$  est un champ de vitesse, alors cette notion est à rapprocher de l’énergie cinétique de l’écoulement, alors que pour la température, elle représente plutôt la quantité d’informations contenue dans le mode. Deane et Sirovich (Deane et al. 1991) en donnent l’illustration suivante : le fait que le premier mode capture par exemple 65% de l’énergie peut signifier statistiquement que l’écoulement dépense 65% de son temps à exécuter ce mouvement. La principale propriété de la POD est alors son habileté à donner la meilleure approximation de l’écoulement au sens énergétique.

Ainsi, l'énergie contenue dans les  $m$  premiers modes est toujours supérieure à l'énergie contenue dans n'importe quelle autre base de dimension  $m$  comme par exemple la base de Fourier (Berkooz et al. 1993).

Dans la pratique, et notamment si les snapshots ont été obtenus par des simulations numériques, le calcul du tenseur  $R$  peut s'avérer être très long. Aussi, pour réduire la taille du problème aux valeurs propres à résoudre, la méthode des snapshots, introduite par Sirovich (Sirovich 1987), propose d'exprimer les modes propres en fonction des données originales. Soit  $\phi_n$  un mode propre de la décomposition orthogonale, alors on cherche les coefficients  $A_{nj}$  tels que :

$$\phi_n(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^N A_{nj} \mathbf{X}(\mathbf{x}, t_j), \quad \text{Equation 6}$$

$\phi_n$  vérifie le problème aux valeurs propres (2) dans lequel la matrice de corrélation spatiale peut être calculée en évaluant la moyenne temporelle comme une moyenne d'ensemble sur les observations  $\mathbf{X}(\mathbf{x}, t_j)$  pour  $j=1, \dots, N$ , c'est-à-dire :

$$\mathbf{R}(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \mathbf{X}(\mathbf{x}, t_j) \mathbf{X}^*(\mathbf{x}', t_j) \approx \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \mathbf{X}(\mathbf{x}, t_j) \mathbf{X}^*(\mathbf{x}', t_j), \quad \text{Equation 7}$$

En introduisant cette relation et l'expression (6) dans l'équation (2), il vient :

$$\frac{1}{N} \int_{\Omega} \sum_{j=1}^N \mathbf{X}(\mathbf{x}, t_j) \mathbf{X}^*(\mathbf{x}', t_j) \sum_{k=1}^N A_{nk} \mathbf{X}(\mathbf{x}', t_k) d\mathbf{x}' = \lambda_n \sum_{k=1}^N A_{nk} \mathbf{X}(\mathbf{x}, t_k), \quad \text{Equation 8}$$

ce qui peut s'écrire :

$$\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \frac{1}{N} \int_{\Omega} \mathbf{X}(\mathbf{x}', t_k) \mathbf{X}^*(\mathbf{x}', t_j) d\mathbf{x}' A_{nk} \mathbf{X}(\mathbf{x}, t_j) = \lambda_n \sum_{k=1}^N A_{nk} \mathbf{X}(\mathbf{x}, t_k), \quad \text{Equation 9}$$

On obtient alors la condition suffisante pour que  $\{A_{nk}, k=1, \dots, N\}$  soit solution de l'équation (6) :

$$\sum_{k=1}^N \frac{1}{N} \int_{\Omega} \mathbf{X}(\mathbf{x}', t_k) \mathbf{X}^*(\mathbf{x}', t_j) d\mathbf{x}' A_{nk} = \lambda_n A_{nj} \text{ pour } j \in [1, N], \quad \text{Equation 10}$$

La recherche des coefficients  $A_{nj}$  se ramène alors au problème aux valeurs propres suivant :

$$\text{Trouver } \lambda_n \text{ et } A_{nj} \text{ tels que } \sum_{k=1}^N C_{kj} A_{nk} = \lambda_n A_{nj} \text{ pour } j \in [1, N], \quad \text{Equation 11}$$

où  $C$  le tenseur de corrélation temporelle défini par :

$$C_{kj} = \frac{1}{N} \int_{\Omega} X_i(\mathbf{x}, t_k) X_i(\mathbf{x}, t_j) d\mathbf{x} \quad \text{Equation 12}$$

Alors que le problème aux valeurs propres (2) est de dimension  $N_m \times N_m$  où  $N_m$  est le nombre de mesures spatiales, le problème issu de la méthode des snapshots est de dimension  $N \times N$  où

$N$  est le nombre de mesures temporelles. Dans le cas de simulations numériques, le maillage spatial est important mais la taille temporelle est limitée, la méthode des snapshots est donc plus aisée à résoudre.

Pour augmenter la précision de la réduction, la POD est appliquée à la partie fluctuante de  $\mathbf{X}$  qui est égale à la différence entre  $\mathbf{X}(x,t)$  et sa moyenne temporelle  $\mathbf{X}_m(x)$ . Il vient alors la formulation de la décomposition directe du champ  $\mathbf{X}$  :

$$\mathbf{X}(\mathbf{x},t) = \mathbf{X}_m(\mathbf{x}) + \sum_{n=1}^N a_n(t)\phi_n(\mathbf{x}), \quad \text{Equation 13}$$

$\sum_{n=1}^m \lambda_i$  représente alors la contribution cumulative des  $m$  premiers modes propres à l'énergie de fluctuation. Un critère de troncature de la base peut alors être déterminé en se fixant la quantité de l'énergie que l'on souhaite conserver. En se référant à (Sirovich et al. 1991), l'indice de troncature  $m$  peut ainsi être défini par :

$$E_r = \frac{\sum_{n=1}^m \lambda_i}{\sum_{n=1}^N \lambda_i} \geq 0,90 \text{ et } \frac{\lambda_{m+1}}{\lambda_1} < 10^{-2}, \quad \text{Equation 14}$$

### 1.3.2 FACTEURS LIMITANT DE LA POD

Tout d'abord, nous pouvons nous interroger sur la représentativité des snapshots et donc de la base obtenue. En effet, les snapshots étant issus d'un échantillonnage d'une simulation donnée, ils ne représentent donc *a priori* que le comportement du système lors de cette simulation. La problématique du choix des snapshots et donc de la représentativité de la base, repose alors sur le choix de la simulation pour qu'elle représente la dynamique la plus large possible du système. Dans le cas du contrôle en boucle fermée, (Park et al. 2001) démontre que l'utilisation d'un double échelon comme excitation du système permet d'exciter tout le spectre de fréquences du système. D'autre part, ce signal représente correctement la commande en tout ou rien d'un convecteur.

Enfin, l'application de la POD repose sur notre capacité à réaliser des simulations CFD du système étudié. Rappelons que dans notre cas, celles-ci se justifient déjà par l'obligation d'obtenir préalablement un champ de vitesse issu de simulations en régime permanent. Toutefois, les simulations à l'origine des snapshots sont de type instationnaire ce qui peut compliquer les simulations et augmenter le temps de calcul. Aussi peut-on légitimement se demander s'il n'est pas plus intéressant de travailler directement avec les logiciels de CFD plutôt que d'y consacrer beaucoup de temps pour obtenir in fine des modèles d'ordre réduit. La réponse réside dans les utilisations des modèles obtenus (conception, diagnostic, contrôle,...) qui nécessite d'une part des modèles d'ordre faible et d'autre part des compétences différentes.

## 1.4 MÉTHODE DE CALCUL DE LA DISTRIBUTION DE TEMPÉRATURE

La distribution de température dans un local peut être obtenue en résolvant l'équation de conservation de l'énergie :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \mathbf{grad} \theta = \text{div}(a_{\text{eff}} \mathbf{grad} \theta) + \frac{S_p}{\rho C_p} \quad \text{Equation 15}$$

associée aux conditions aux limites. Dans notre cas, le terme source  $S_p / \rho C_p$  sera considéré comme nul.

Afin de construire un modèle d'ordre réduit de la distribution dans un local équipé d'un émetteur localisé, nous reprenons l'hypothèse de champ de vitesse fixé qui permet de ne résoudre que l'équation de conservation de l'énergie (Equation 15) en fixant les valeurs du champ de vitesse, de la diffusivité effective et des coefficients d'échange superficiel convectif.

### 1.4.1 CHOIX DU CHAMP DE VITESSE ET CONSTRUCTION DU MODÈLE D'ORDRE ÉLEVÉ

Une solution peut consister à différencier plusieurs configurations si le champ de vitesse varie trop en fonction des conditions de soufflage. Plusieurs modèles sont alors obtenus, un pour chaque configuration. La difficulté réside alors dans le choix d'une méthode pour passer d'une configuration à l'autre, c'est-à-dire d'un modèle à l'autre. Dans nos travaux précédents, nous avons fait le choix d'obtenir la distribution de température en réalisant une interpolation de type logique floue (Sempey et al. 2008) des températures obtenues à partir des différents modèles. Cette méthode initiait néanmoins beaucoup de questions notamment sur le choix des coefficients d'interpolation.

Or, pour appliquer l'hypothèse de champ de vitesse fixé, nous disposerons d'un échantillonnage du champ de vitesse et de la diffusivité effective en fonction des conditions de soufflage définies par le nombre d'Archimède  $Ar$ . Nous pouvons donc appliquer la POD à cet échantillonnage et obtenir ainsi les expressions suivantes :

$$\mathbf{v}(\mathbf{x}, Ar) \approx \sum_{k=0}^N a_k(Ar) \boldsymbol{\psi}_k(\mathbf{x}) \quad \text{Equation 16}$$

$$a_{\text{eff}}(\mathbf{x}, Ar) \approx \sum_{k=0}^L l_k(Ar) \chi_k(\mathbf{x}) \quad \text{Equation 17}$$

où l'indice 0 représente le champ moyen.

Les valeurs intermédiaires des coefficients  $a_k(Ar)$  et  $l_k(Ar)$  peuvent ensuite être obtenues par une interpolation polynomiale d'ordre 3 ((Ly et al. 2001)).

En substituant ces expressions dans l'équation de conservation de l'énergie (15), il vient :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \sum_{k=0}^N a_k(Ar) \frac{\partial}{\partial x_i} (\boldsymbol{\psi}_k \theta) + \sum_{k=0}^L l_k(Ar) \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \chi_k \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \right) \quad \text{Equation 18}$$

En utilisant le schéma QUICK pour effectuer une discrétisation spatiale des termes de transport et de diffusion, on obtient :

- Pour les termes de transport :  $\forall k, -\frac{\partial}{\partial x_i}(\psi_k \theta) = \mathbf{A}'_k \theta + \mathbf{B}'_k \mathbf{U},$
- Pour les termes de diffusion :  $\forall k, \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \chi_k \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \right) = \mathbf{A}^d_k \theta + \mathbf{B}^d_k \mathbf{U}.$

$$\text{Soit } \frac{\partial \theta}{\partial t} = \left( \sum_{k=0}^N a_k(Ar) \mathbf{A}'_k + \sum_{k=0}^L l_k(Ar) \mathbf{A}^d_k \right) \theta + \left( \sum_{k=0}^N a_k(Ar) \mathbf{B}'_k + \sum_{k=0}^L l_k(Ar) \mathbf{B}^d_k \right) \mathbf{U}$$

Le modèle d'ordre élevé prend donc bien la forme d'un système d'état :

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{A}\boldsymbol{\theta} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\boldsymbol{\theta} + \mathbf{D}\mathbf{u} \end{cases} \quad \text{Equation 19}$$

avec :

$$\mathbf{A} = \sum_{k=0}^N a_k(Ar) \mathbf{A}'_k + \sum_{k=0}^L l_k(Ar) \mathbf{A}^d_k,$$

$$\mathbf{B} = \sum_{k=0}^N a_k(Ar) \mathbf{B}'_k + \sum_{k=0}^L l_k(Ar) \mathbf{B}^d_k,$$

$\mathbf{D}$  la matrice nulle,

$\mathbf{C}$  la matrice unité dans le cas où toutes les températures sont observées.

Contrairement à ce qui avait été fait auparavant, l'interpolation entre les différentes configurations est ici faite sur la vitesse et la diffusivité effective et est présente au sein même du modèle. L'interpolation est définie par les coefficients  $a_k(Ar)$  et  $l_k(Ar)$  construits de façon rigoureuse à partir de la décomposition POD du champ de vitesse.

Pour les coefficients d'échanges superficiels convectifs, une étude de leurs variations a montré qu'il était possible de les maintenir constant. Leur valeur moyenne sur l'ensemble des conditions de soufflage a donc été retenue.

#### 1.4.2 CONSTRUCTION DU MODÈLE D'ORDRE RÉDUIT

La première étape consiste à appliquer la POD à un échantillonnage temporel de la température obtenu à partir de simulations CFD. En nous basant sur les travaux de (Park et al. 2001), l'excitation du régime transitoire sera donnée par deux échelons successifs de sens opposé, décrivant l'ensemble du régime de fonctionnement (puissance d'émission) de l'émetteur. La décomposition orthogonale de la température aura alors pour expression :

$$\theta(\mathbf{x}, t) = \theta_m(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^M b_i(t) \boldsymbol{\varphi}_i(\mathbf{x}) \quad \text{Equation 20}$$

Après introduction de cette expression dans l'équation d'état, le résultat est projeté sur la base  $(\boldsymbol{\varphi}_i)_{i \in [1, M]}$  orthogonale et conduit à l'expression suivante :

$$\forall j \in [1, M], \quad \dot{b}_j(t) = \sum_{i=1}^M \frac{(\boldsymbol{\varphi}_j, \mathbf{A} \boldsymbol{\varphi}_i)}{\|\boldsymbol{\varphi}_j\|^2} b_i(t) + \frac{(\boldsymbol{\varphi}_j, \mathbf{A} \boldsymbol{\theta}_m)}{\|\boldsymbol{\varphi}_j\|^2} + \frac{(\boldsymbol{\varphi}_j, \mathbf{B} \mathbf{u}(t))}{\|\boldsymbol{\varphi}_j\|^2} \quad \text{Equation 21}$$

En écrivant matriciellement l'équation (21), on obtient le système d'état du modèle d'ordre réduit :

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{b}} = \mathbf{A}_r \mathbf{b} + \mathbf{B}_r \mathbf{u} + \mathbf{E}_r \boldsymbol{\theta}_m \\ \boldsymbol{\theta} = \mathbf{C}_r \mathbf{b} + \mathbf{D}_r \mathbf{u} + \boldsymbol{\theta}_m \end{cases} \quad \text{Equation 22}$$

avec :

$$\forall (i, j) \in [1, M]^2,$$

$$\mathbf{A}_r(i, j) = \sum_{k=0}^N a_k \frac{(\boldsymbol{\varphi}_i, \mathbf{A}_k^t \boldsymbol{\varphi}_j)}{\|\boldsymbol{\varphi}_i\|^2} + \sum_{k=0}^L l_k \frac{(\boldsymbol{\varphi}_i, \mathbf{A}_k^d \boldsymbol{\varphi}_j)}{\|\boldsymbol{\varphi}_i\|^2} = \sum_{k=0}^N a_k \mathbf{A}_{rk}^t + \sum_{k=0}^L l_k \mathbf{A}_{rk}^d,$$

$$\forall (i, j) \in [1, M] \times [1, N_{CL}],$$

$$\mathbf{B}_r(i, j) = \sum_{k=0}^N a_k \frac{(\boldsymbol{\varphi}_i, \mathbf{B}_k^t(:, j))}{\|\boldsymbol{\varphi}_i\|^2} + \sum_{k=0}^L l_k \frac{(\boldsymbol{\varphi}_i, \mathbf{B}_k^d(:, j))}{\|\boldsymbol{\varphi}_i\|^2} = \sum_{k=0}^N a_k \mathbf{B}_{rk}^t + \sum_{k=0}^L l_k \mathbf{B}_{rk}^d,$$

$$\forall (i, j) \in [1, M]^2,$$

$$\mathbf{E}_r(i, j) = \sum_{k=0}^N a_k \frac{(\boldsymbol{\varphi}_i, \mathbf{A}_k^t(:, j))}{\|\boldsymbol{\varphi}_i\|^2} + \sum_{k=0}^L l_k \frac{(\boldsymbol{\varphi}_i, \mathbf{A}_k^d(:, j))}{\|\boldsymbol{\varphi}_i\|^2} = \sum_{k=0}^N a_k \mathbf{E}_{rk}^t + \sum_{k=0}^L l_k \mathbf{E}_{rk}^d$$

- $\mathbf{D}_r$  la matrice nulle,
- $\mathbf{C}_r$  la matrice d'observation de dimension  $n_{obs} \times M$ , où  $n_{obs}$  est le nombre de températures observées. Elle permet de reconstruire la température à partir de l'expression (24).

Il faut noter que l'ordre de ce système, égal à M, dépend du nombre de modes propres conservés, et sera donc très faible. De plus, les matrices d'état  $\mathbf{A}_r$ ,  $\mathbf{B}_r$ ,  $\mathbf{C}_r$  et  $\mathbf{D}_r$  sont recalculées à chaque fois mais ne dépendent que de l'interpolation des données (champ de vitesse, diffusivité effective et coefficients d'échange superficiel convectif). La résolution très rapide du système permet donc de s'adapter au changement de configuration.

## 1.5 RÉSULTATS

### 1.5.1 SIMULATIONS CFD

Afin d’obtenir des échantillonnages en température et en vitesse pour obtenir les bases de projection, des simulations CFD ont été réalisées avec le logiciel StarCD :

- Des simulations en régime permanent pour les températures de soufflage suivantes :

Température de soufflage [°C]	20	24	28	32	34	36	40	44	48	52
Puissance émise [W]	50	100	143	170	191	230	338	685	786	1041

- Une simulation en régime transitoire pour une variation en de conditions de soufflages de 24 à 52°C puis de 52°C à 24°C après stabilisation.

### Maillage

Il a d’abord été nécessaire de simplifier la géométrie en négligeant l’épaisseur du convecteur et en recentrant l’entrée et la sortie d’air du système de ventilation (cf. Figure 37)

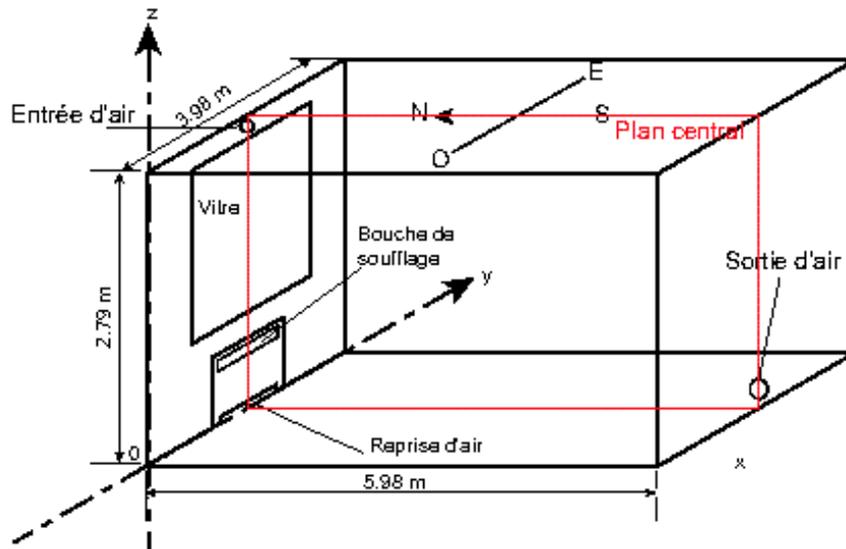


Figure 37 : Géométrie simplifiée du local

Le local étant complètement symétrique autour du plan central, il est alors possible de ne mailler que la moitié du local. Les paramètres du maillage sont :

- Un rapport de forme inférieur à 20,
- Un pas de grossissement de 1,2 maximum entre 2 mailles voisines,
- Une épaisseur adimensionnelle  $y^+$  de la première maille contre les parois voisines de 4. Par paroi, on obtient les valeurs moyennes indiquées dans le Tableau 1.

		Convecteur à la puissance max	Convecteur éteint
	y [mm]	$y_{moy}^+$	$y_{moy}^+$

Paroi Nord	5	4,6	3,4
Paroi Sud	5	3,2	3,1
Paroi Ouest	10	5,8	5,6
Plafond	5	3,2	1,3
Plancher	8	3,0	3,8

**Tableau 1 : Epaisseur adimensionnelle de la première maille**

On obtient alors un maillage contenant 479544 mailles pour la moitié du local.

### Modèles de turbulence

Deux modèles de turbulence ont été testés. Il s'agit :

- Du modèle  $k - \omega$  SST à bas nombre de Reynolds,
- Du modèle  $k - \varepsilon$  à bas nombre de Reynolds,

L'utilisation de ces modèles requiert en principe un maillage fin au niveau des conditions aux limites, c'est-à-dire un  $y^+$  proche de 1. Mais pour diminuer un peu le nombre de mailles, il est possible de faire un compromis et d'utiliser un  $y^+$  proche de 4.

Au niveau des conditions aux limites, des lois de paroi hybrides ont été adoptées.

### Résolution

Pour la résolution, nous avons utilisé :

- Résolution des équations de Navier Stokes : procédure PISO,
- Discrétisation temporelle : schéma Crank Nicholson (blending factor de 0,5),
- Discrétisation spatiale :
- Schéma Upwind pour U, V, W,  $k$  et  $\varepsilon$  (ou  $\omega$ ),
- Schéma centré pour la masse volumique  $\rho$ ,
- Schéma MARS pour la température T.
- Pas de temps : de 0,1 à 0,5s

Les résultats obtenus (cf. Tableau 2) montrent qu'il est très difficile d'obtenir la convergence des équations, notamment pour la température. Pour les autres grandeurs, la convergence demeure très lente en particulier pour le modèle  $k - \omega$  SST.

	Modèle $k - \omega$ SST	Modèle $k - \varepsilon$
U v w	$10^{-5}$ et $10^{-4}$	$10^{-5}$ et $10^{-4}$
$\rho$	$10^{-7}$ et $10^{-6}$	$10^{-5}$

$k$	$10^{-7}$ et $10^{-5}$	$10^{-5}$ et $10^{-4}$
$\varepsilon$ (ou $\omega$ )	$10^{-4}$ et $10^{-3}$	$10^{-4}$
$T$	$10^{-1}$	$<1$

Tableau 2 : convergence des équations

## Résultats

La Figure 38 et la Figure 39 représentent la distribution de température dans le plan central obtenu avec le logiciel CFD. Les écarts avec les mesures pour des puissances de soufflage proches sont aussi donnés en 5 points placés sur la verticale centrale.

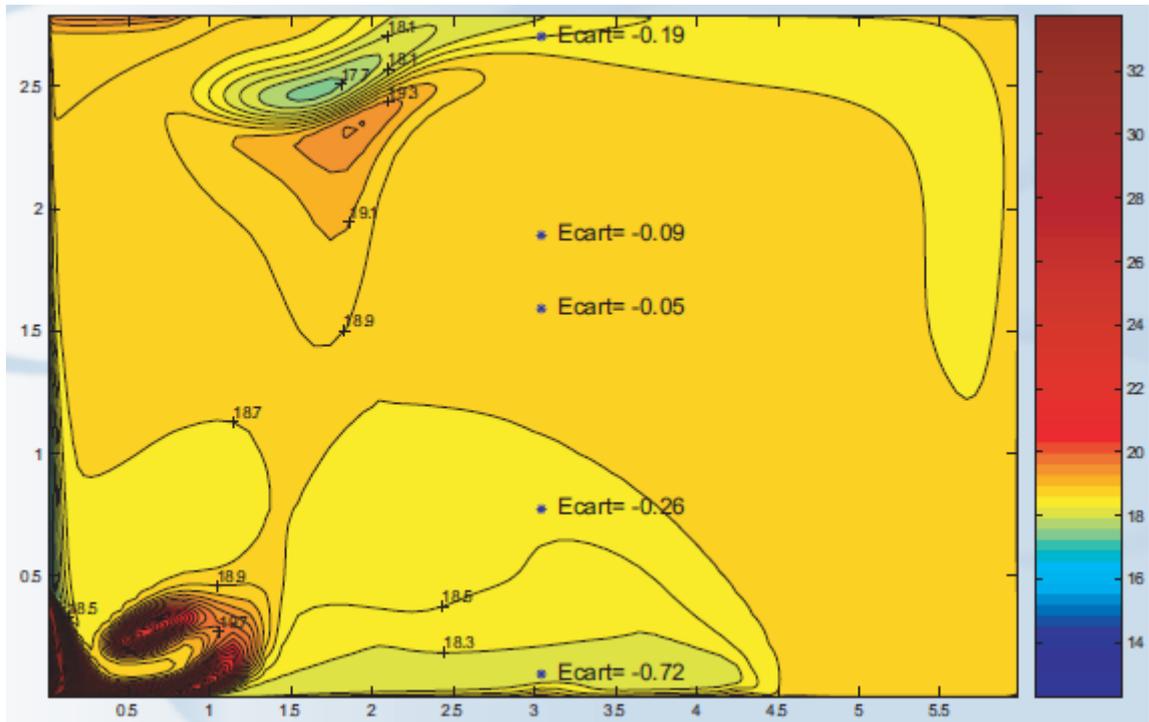


Figure 38 : Température [°C] CFD pour une puissance de soufflage de 191W et écart avec les mesures pour une puissance de 145W

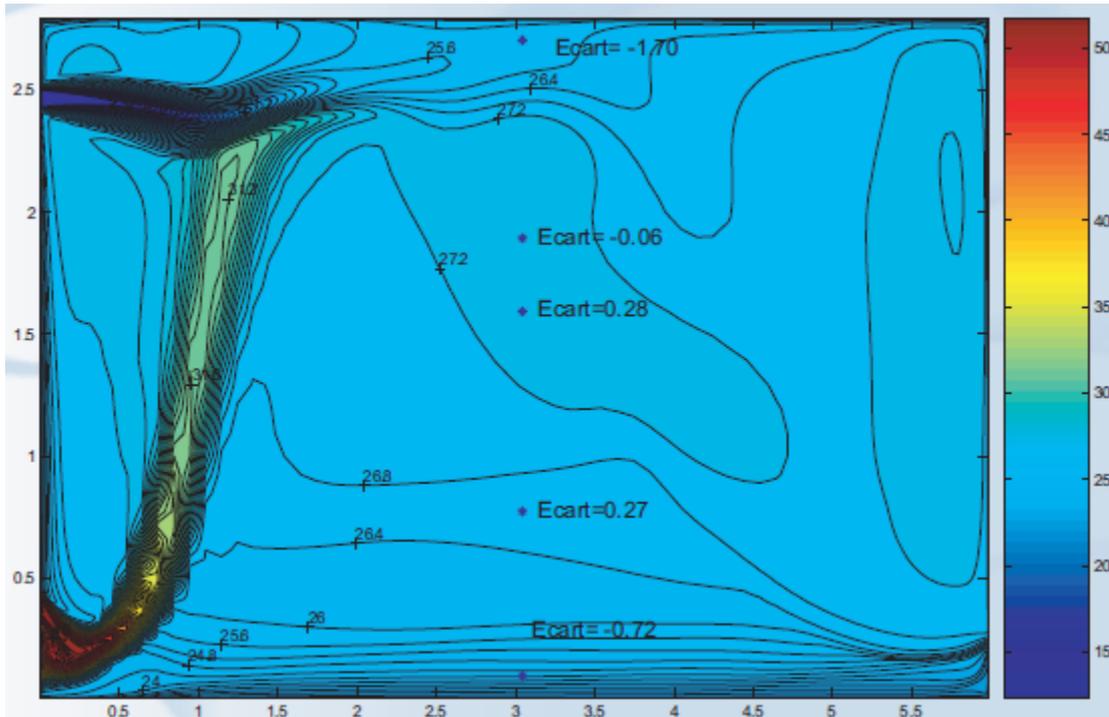


Figure 39 : Température [°C] CFD pour une puissance de soufflage de 1041W et écart avec les mesures pour une puissance de 1195W

Ces résultats montrent une bonne concordance des résultats CFD au centre de la pièce, c'est-à-dire dans la zone d'occupation. Par contre les valeurs des températures près des parois sont sous-estimées. Ce n'est pas étonnant puisque ces zones sont le siège de forts gradients thermiques. Enfin et bien que nous ne disposons pas de mesures au sein des jets d'air, il est prudent de garder des doutes sur leur bonne résolution par des outils CFD.

En conclusion, nous pouvons noter que le calcul de la distribution de température dans un local avec un outil CFD commercial reste encore un exercice difficile. Une première raison réside dans la complexité des écoulements existants qui se manifeste par la coexistence d'écoulement avec différent type de convection et de différent degré de turbulence. De plus dans notre cas d'étude, la présence de deux jets, un froid et un chaud, venait complexifier l'écoulement. Ainsi au vue de cette étude, il apparaît nécessaire d'améliorer plusieurs points et notamment le traitement de jets et des conditions aux limites. L'introduction de modèles de connaissance propres au bâtiment représentera sans doute une première solution. Il n'est pas sur que l'utilisation de logiciels CFD commerciaux nous le permettra d'une part parce qu'ils ne sont pas assez ouvert pour permettre de telles modifications et d'autres part parce qu'ils ne sont pas forcément adaptés à la physique des phénomènes en présence.

### 1.5.2 MODÈLE D'ORDRE ÉLEVÉ

La principale difficulté rencontrée dans cette étape est relative à l'écriture d'un programme de discrétisation de l'équation de conservation de la chaleur en trois dimension afin d'obtenir un système d'état. Etant donné la taille du maillage (479544 mailles), il n'était pas possible de résoudre ce système et donc de le déboguer. Afin de trouver les erreurs de programmation, nous avons du créer un cas d'étude simple. Le local a donc été remplacé par un cube de 10 cm de

côté, divisé en maille de 1 cm de côté. Les conditions aux limites et le champ de vitesse étaient imposés et complexifiés par étape. Nous avons ainsi réussi à obtenir un programme correct permettant de calculer le système d'état d'ordre élevé.

### 1.5.3 BASES POD

La POD a tout d'abord été appliquée à l'échantillonnage en vitesse et température en régime permanent obtenu par les simulations CFD. Pour ces 2 grandeurs, nous avons donc obtenu une base POD contenant 9 modes puisque l'échantillonnage contenait 9 régimes permanents (température de soufflage de 20 à 52°C par pas de 4°C). Le Tableau 3 contient les données énergétiques des bases POD en régime permanent pour la vitesse et la température. Les lignes en gras (mode 1 pour la température et mode 8 pour la vitesse) représentent la satisfaction au critère de troncature de l'équation 19. Il apparaît clairement qu'il faut beaucoup plus de modes pour la vitesse que pour la température afin de conserver suffisamment d'information. Fort logiquement, le taux décroissance de l'énergie est également beaucoup plus faible pour la vitesse. Ainsi les ordres de grandeurs de l'énergie des 2 premiers modes en vitesse sont très similaires (en italique dans le tableau).

Mode	Vitesse			Température		
	Valeur propre	Energie	Energie cumulée	Valeur propre	Energie	Energie cumulée
1	0,074	<i>57,98</i>	57,98	<b>431,57</b>	<b>99,36</b>	<b>99,36</b>
2	0,027	<i>21,20</i>	79,20	1,22	0,28	99,65
3	0,010	8,10	87,30	0,84	0,19	99,84
4	0,006	4,72	92,01	0,26	0,06	99,90
5	0,004	3,54	95,55	0,21	0,05	99,95
6	0,003	2,57	98,12	0,15	0,03	99,98
7	0,002	1,18	99,30	0,05	0,01	100,00
8	<b>0,001</b>	<b>0,70</b>	<b>100</b>	0,02	0,00	100,00
9	0,000	0,00	100	0,00	0,00	100,00

Tableau 3: Contenu énergétique des modes de la base POD en régime permanent

La Figure 40 permet de comparer les 2 premiers modes de la base en températures. Il apparaît tout de suite que le deuxième mode contient très peu d'information, celle-ci étant localisée uniquement au niveau du jet d'air chaud et de son intersection avec le jet d'air froid. A contrario, le premier mode contient des informations pour l'ensemble du plan central. Nous avons déjà remarqué dans une étude précédente que le mode 1 est d'ailleurs une bonne représentation du comportement moyen du champ fluctuant.

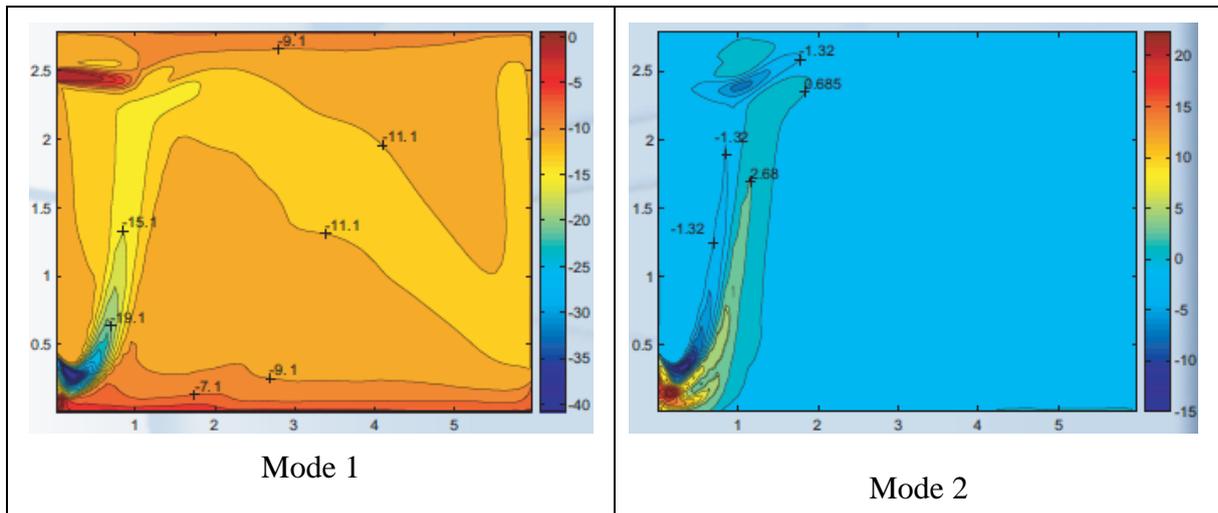


Figure 40 : Modes 1 et 2 de l'échantillonnage de la température en régime permanent

Une base POD a également été construite à partir de l'échantillonnage en régime instationnaire en réponse à un échelon de la température de soufflage de 24 à 52°C. Le Tableau 4 contient le contenu énergétique des premiers modes des bases ainsi obtenues.

Mode	Vitesse			Température		
	Valeur propre	Energie	Energie cumulée	Valeur propre	Energie	Energie cumulée
1	0,0257	<i>34,53</i>	34,53	286,11	<i>92,12</i>	92,12
2	0,0238	<i>32,00</i>	66,53	13,74	<i>4,42</i>	96,54
3	0,0070	9,46	76,00	7,57	2,44	98,98
4	0,0044	5,97	81,97	<b>1,30</b>	<b>0,42</b>	<b>99,40</b>
5	0,0028	3,69	85,66	0,57	0,18	99,58
⋮						
15	<b>0,0003</b>	<b>0,43</b>	<b>97,31</b>			
16	0,0002	0,29	97,60			
17	0,0002	0,27	97,86			

Tableau 4 : contenu énergétique des modes des bases en régime transitoire

Il apparaît toujours une nette différence entre le champ de vitesse et la distribution de température quant au nombre de modes à garder. L'information intéressante à noter pour notre étude est que seuls 4 modes sont a priori nécessaires ce qui est extrêmement peu. Cette valeur est même inférieure à celle obtenue dans un cas d'étude en 2D (Sempey et al. 2008), puisque dans une des configuration étudiée, il nous fallait conserver 7 modes.

Concernant la décroissance en énergie, nous pouvons de nouveau noter une différence entre la vitesse et la température (valeurs en italique dans le Tableau 4). En effet, les deux premiers modes en vitesse ont un contenu énergétique très proche alors que le premier mode en température est largement dominant.

La Figure 41 permet de comparer le premier mode des bases en température pour les échantillonnages en régime permanent et en régime transitoire. Si le tableau précédent a permis de montrer que le mode 1 contient moins d'énergie en régime transitoire, cette figure montre également une différence sur la répartition géographique. En effet, en régime transitoire, le mode 1 met plus en évidence les zones de jets, c'est-à-dire des zones très sollicitées par la dynamique de la distribution de température.

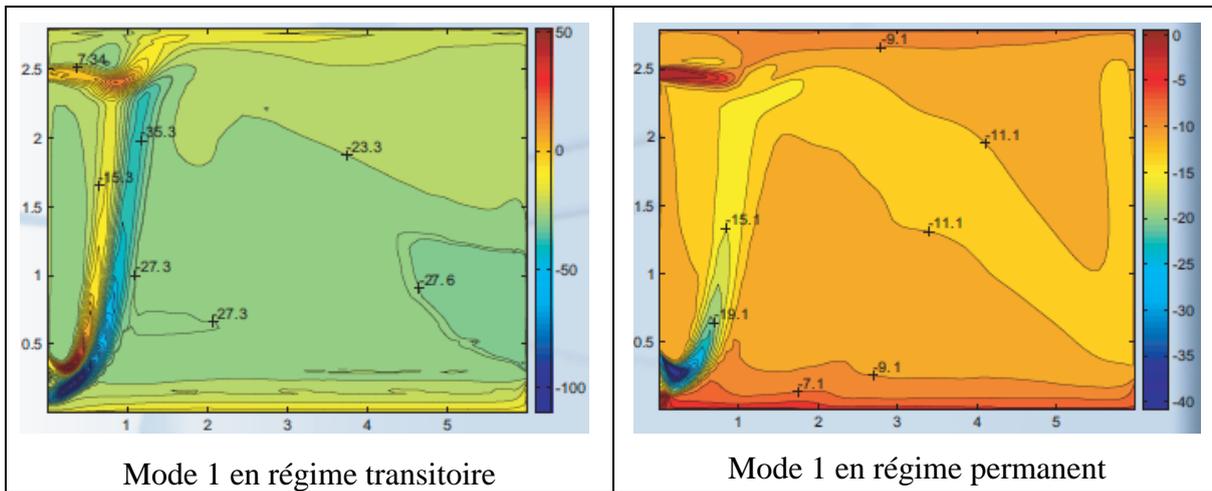


Figure 41 : Mode 1 pour les 2 échantillonnages

### 1.5.4 MODÈLE D'ORDRE RÉDUIT

Afin de résoudre le modèle d'ordre réduit (Equation 22), il faut à chaque pas de temps recalculer les coefficients  $a_k(Ar)$  et  $l_k(Ar)$  par une interpolation polynomiale d'ordre 3 basée sur la valeur du nombre d'Archimède dont l'expression est donnée par :

$$Ar = \frac{g\beta(\theta_{souv} - \theta_{\infty})}{v_{souv}^2} \quad \text{Equation 23}$$

Avec :

- $g$  l'accélération de la pesanteur,
- $\beta$  le coefficient d'expansion volumique égal à l'inverse de la température de reprise,
- $\theta_{souv}$  la température de soufflage,
- $\theta_{\infty}$  la température de l'air ambiant, c'est-à-dire la température dans la zone d'occupation, hors du jet,
- $v_{souv}$  la vitesse de soufflage.

Étant donné que la vitesse de soufflage n'est pas contrôlée dans le cas d'un convecteur, et que de plus nous ne calculons pas la vitesse d'air en temps réel, il est difficile d'accéder à la valeur du nombre d'Archimède. Nous avons donc choisi de réaliser l'interpolation à partir de  $\theta_{\infty}$  qui peut se calculer à chaque pas de temps par la moyenne des températures des mailles situées dans la zone d'occupation. Le Tableau 5 montre que cette température est bien représentative de l'évolution du nombre d'Archimède et donc de l'écoulement hormis pour les températures de soufflage de 44 et 48°C. Après vérification des conditions de soufflage, il est apparu qu'une erreur a été faite sur la vitesse de soufflage (cf. ligne 4 du Tableau 5) pour ces 2 conditions. Elles seront donc exclues de notre étude. La température  $\theta_{\infty}$  a aussi l'avantage de tenir compte de la constante de temps dynamique du local. En effet, elle permet de prendre en compte le

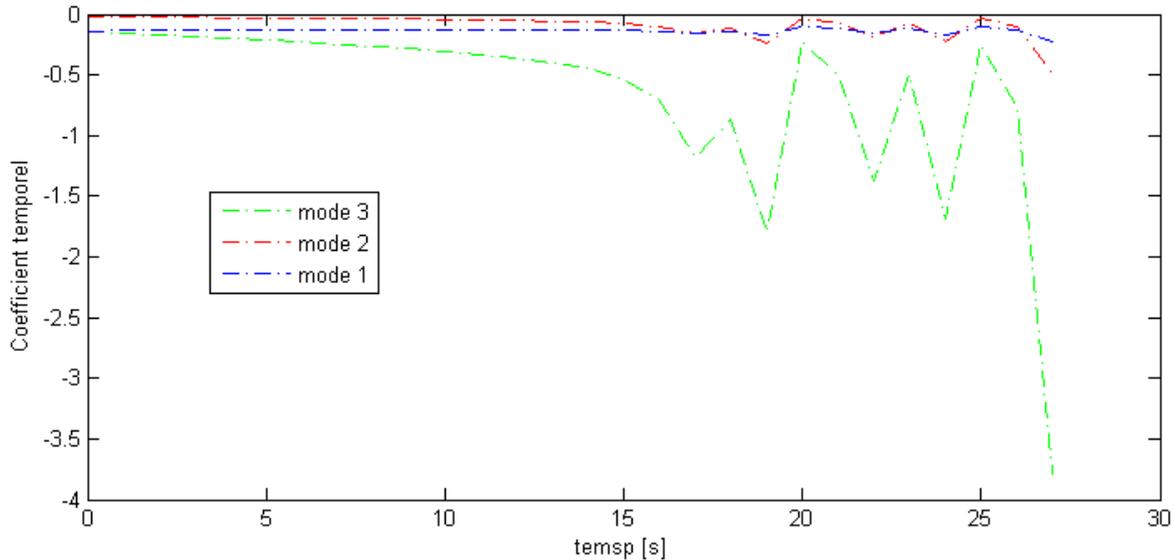
temps entre le changement des conditions initiales et l'impact sur la distribution de température dans le local.

$\theta_{souf}$	20	24	28	32	36	40	44	48	52
$\theta_{\infty}$	17,44	17,70	18,15	18,75	19,34	20,50	24,09	24,89	26,70
$Ar$	0,1161	0,2564	0,3571	0,4358	0,5138	0,5777	1,6663	1,9040	0,9140
$v_{souf}$	0,878	0,873	0,868	0,859	0,848	0,843	0,591	0,588	0,813

**Tableau 5 : Caractérisation de l'écoulement en fonction des conditions de soufflage**

Nous avons résolu le du modèle d'ordre réduit en réponse à un échelon de température de 24 à 52°C, c'est-à-dire le même échelon que celui retenu pour construire la base POD en température. Ce choix devait ainsi nous permettre de comparer les coefficients temporels obtenus avec le MOR et ceux obtenus directement en calculant la base POD.

Malheureusement, les résultats n'ont pas été concluant (cf. Figure 42). En effet, les résultats montrent une divergence rapide précédée d'une instabilité. Ces résultats peuvent s'expliquer par un manque de représentativité de la base en vitesse. Tout d'abord, celle-ci est construite sur un échantillonnage comportant peu d'images en raison de la difficulté et du temps pour obtenir des simulations CFD satisfaisantes. Ensuite, l'échantillonnage est représentatif des régimes permanents atteints pour chaque condition de soufflage et ne tient donc pas compte de la dynamique du champ de vitesse. A un instant donné de la résolution du MOR, le champ de vitesse interpolé à partir de la base POD en vitesse n'est donc pas tout à fait représentatif de l'écoulement, et n'est donc pas compatible avec la distribution de température. Dans le cas bidimensionnel traité dans une étude précédente (Sempey 2007), nous avons pourtant réussi à calculer la température en utilisant des images du champ de vitesse en régime permanent. Mais nous avons rajouté plusieurs éléments. D'une part, l'intervalle des conditions de soufflages était divisé en quatre afin de déterminer des configurations différentes au sein desquelles le champ de vitesse variait peu. Le champ de vitesse en régime permanent était alors représentatif du champ de vitesse instationnaire. D'autre part, une fois les MOR des différentes configurations résolus, une interpolation tenant compte de la constante de temps du local était effectuée, ce qui venait renforcer la prise en compte de la dynamique du système. Mais cette méthode avait des inconvénients et notamment relatif à la gestion des différentes configurations et de la continuité entre elles, d'où la justification de la méthode testée dans ce projet.



**Figure 42 : Coefficient temporel obtenu par la résolution du modèle d'ordre réduit pour un échelon de 24°C à 52°C**

Une nouvelle méthode est en train d'être testée dans le cadre d'une thèse réalisée au LEPTIAB. Il s'agit de résoudre en temps réel à la fois l'équation de conservation de l'énergie et les équations de Navier Stokes en s'appuyant sur une base POD construite à partir d'un échantillonnage en température et vitesse en régime instationnaire. Cet échantillonnage est de plus obtenu à partir de simulations LES (Large Eddy Simulation), méthode de simulation plus pénalisante en temps de calcul mais qui devrait se montrer plus performante en précision.

## 1.6 CONCLUSION ET SUITE DES TRAVAUX

En raison de l'instabilité du modèle d'ordre réduit, il n'a pas été possible de comparer sa réponse à celle mesurée du local réel. Néanmoins les mesures ont permis de caler les simulations CFD afin de s'assurer que les résultats des simulations CFD étaient réalistes. A partir de ces résultats, il a alors été possible de démontrer qu'un faible nombre de modes était nécessaire pour représenter une distribution de température en 3D, ce qui nous a conduits à un système dynamique d'ordre 4. C'est un ordre extrêmement faible qui pourra permettre la résolution en temps réel si le problème d'instabilité est résolu. Une solution à ce problème a déjà été mise en œuvre dans des travaux précédents. Elle nous obligeait à distinguer plusieurs configurations de la distribution de températures et demandait donc une certaine expertise de l'utilisateur. Le champ de vitesse était alors approché par sa valeur pour un régime permanent représentatif de chaque configuration. Une nouvelle approche est maintenant testée au LEPTIAB dans le cadre d'une thèse. Il s'agit de résoudre en temps réel l'équation de conservation de l'énergie mais également les équations de Navier Stokes, supprimant ainsi toute approximation du champ de vitesse par des images en régime permanent. Enfin, il reste une dernière difficulté à surmonter. C'est celle qui consiste à obtenir à partir de simulations dynamiques des résultats réalistes et suffisamment convergés pour pouvoir appliquer la POD.

Depuis le début du projet DYNASIMUL, plusieurs équipes se sont emparées de cette problématique à travers des thèses ou encore des projets exploratoires du CNRS.

## 1.7 NOMENCLATURE

### *Lettres latines*

$a_{eff}$	diffusivité effective de l'air ( $m^2/s$ )
$a_n(t)$	coefficient temporel associé au $n^{ième}$ mode propre
$b_n(t)$	coefficient temporel associé au $n^{ième}$ mode propre
$C$	tenseur de corrélation temporel
$C_p$	capacité calorifique massique à pression constante ( $J/kg^{\circ}C$ )
$E$	énergie
$M$	nombre de modes propres conservés pour la température
$m$	nombre de modes propres conservés dans le cas général
$R$	tenseur de corrélation spatiale
$S_p$	terme source ( $W/m^3$ )
$t$	temps (s)
$\mathbf{v}$	champ de vitesse (m/s)
$\mathbf{x}$	vecteur des coordonnées spatiales (m)

### *Lettres grecques*

$\theta$	température ( $^{\circ}C$ )
$\lambda$	valeur propre
$\rho$	masse volumique de l'air ( $kg/m^3$ )
$\varphi$	mode propre pour la température
$\Psi$	mode propre pour la vitesse
$\phi$	mode propre dans le cas général

### REFERENCES général

## 1.8 REFERENCES

- Allery, C. (2002). Contribution à l'identification des bifurcations et à l'étude des écoulements fluides par des systèmes dynamiques d'ordre faible (P.O.D.). PhD, University of Poitiers, France: 184.
- Basman, E. and E. H. Khalifa (2005). "Application of proper orthogonal decomposition to indoor airflows." *ASHRAE Transactions* **111**: 625-634.
- Berkooz, G., P. Holmes and J. L. Lumley (1993). "The proper orthogonal decomposition in the analysis of turbulent flows." *Annual reviews of fluid mechanics* **25**: 539-575.
- Deane, A. E. and L. Sirovich (1991). "A computational study of Rayleigh-Bénard convection. Part 1. Rayleigh-number scaling." *Journal of Fluid Mechanics* **222**: 231-250.
- Ghiaus, C. and A. G. Ghiaus (1999). "Evaluation of the indoor temperature field using a given air velocity distribution." *Building and Environment* **34**(6): 671-679.
- Ly, H. V. and H. T. Tran (2001). "Modeling and control of physical processes using proper orthogonal decomposition." *Mathematical and Computer Modelling* **33**(1-3): 223-236.
- Palenzuela, D. and V. Bayetti (1993). Essai d'un convecteur électrique en régime dynamique dans la cellule CIRCE (régulation chronoproportionnelle). En vue de la comparaison avec le modèle couplé enveloppe-émetteur., COSTIC: 29.
- Park, H. M. and W. J. Lee (2001). "Feedback control of natural convection." *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* **191**(8-10): 1013-1028.

- Peng, X. and A. H. C. Van Paassen (1998). "A state space model for predicting and controlling the temperature responses of indoor air zones." Energy and Buildings **28**(2): 197-203.
- Sempey, A. (2007). *Prise en compte du champ thermo-convectif pour le contrôle thermique des espaces habitables*. Doctorat, La Rochelle: 247.
- Sempey, A., C. Inard, C. Ghiaus and C. Allery (2008). "Fast simulation of temperature distribution in air conditioned rooms by using proper orthogonal decomposition." Building and Environment: doi:10.1016/j.buildenv.2008.03.004.
- Sirovich, L. (1987). "Turbulence and the dynamics of coherent structures, Part 1: Coherent structures. Part 2: Symmetries and transformations. Part 3: Dynamics and scaling." Quarterly of Applied Mechanics **45**: 561-590.
- Sirovich, L. and A. E. Deane (1991). "A computational study of Rayleigh-Benard convection. Part 2. Dimension considerations." Journal of Fluid Mechanics **222**: 251-265.