



HAL
open science

Thermique des enceintes habitables et énergies solaires

Jean-Jacques Bézian

► **To cite this version:**

Jean-Jacques Bézian. Thermique des enceintes habitables et énergies solaires. Energie électrique. INSA de Lyon; Université Claude Bernard - Lyon I, 2007. tel-00158153

HAL Id: tel-00158153

<https://theses.hal.science/tel-00158153>

Submitted on 28 Jun 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N° d'ordre HDR : 2007 004

Université Claude BERNARD LYON 1

INSA DE LYON

SYNTHESE DES ACTIVITES DE RECHERCHE

présentée par

Jean Jacques BEZIAN

Ingénieur de Recherche ARMINES

Enseignant Chercheur à l'Ecole des Mines d'Albi

pour l'obtention de

l'Habilitation à Diriger les Recherches

Spécialité : Sciences pour l'Ingénieur

**Thermique des enceintes habitables
et énergies solaires**

Soutenue le 8 juin 2007 devant le jury

Gilbert ACHARD, Professeur des Universités
Bernard BAUDOIN, Professeur des Ecoles des Mines
Gilles FLAMANT, Directeur de Recherche CNRS
Georges LE PALEC, Professeur des Universités
François PENOT, Directeur de Recherche CNRS
Jean Jacques ROUX, Professeur des Universités
Joseph VIRGONE, Maître de Conférences, HDR

Avant Propos

Ce document, après une brève présentation des études antérieures à 1986, décrit principalement les activités de recherche que j'ai menées ou encadrées depuis 1989, en tant qu'ingénieur de recherche ARMINES au sein des laboratoires d'énergétique de l'Ecole des Mines de Paris, à Sophia Antipolis et de l'Ecole des Mines d'Albi, depuis avril 2003.

Les 3 annexes font la liste :

- Des activités pédagogiques et des responsabilités administratives ;
- Des partenariats industriels et institutionnels ;
- Des publications, travaux de recherche et rapports d'études.

Je n'ai pas toujours eu à ma disposition une version numérique lisible des documents qui m'ont permis de rédiger ce mémoire, et la qualité de certaines illustrations en a pâti. Je prie le lecteur de m'en excuser.

Les renvois bibliographiques numériques [x] correspondent à des publications listées en fin de corps de texte.

Les renvois bibliographiques de la forme [Tx] correspondent aux thèses que j'ai personnellement encadrées, dont la liste figure en A1.2 de l'Annexe 1.

Tous les autres renvois, de la forme [Jx] pour mes mémoires de travaux diplômants, [L1], [Px] pour publications, [Cx] pour Congrès et [Rx] pour rapports sont listés en annexe 3.

Table des matières

<i>Avant Propos</i>	2
<i>Table des matières</i>	3
0 - Introduction	6
0.1 : Activités de recherche antérieures à 1989	6
0.1.1 : DEA en métallurgie structurale (1978-1979) [J1, J2]	6
0.1.2 : Thèse en convection naturelle et énergie solaire (1979-1981) [J3]	7
0.1.3 : Enseignement supérieur et énergie solaire (1981-1983)	10
0.1.4 : Energie solaire concentrée, optique géométrique (1983-1986) [C3 à C8]	10
0.2 : Activités de recherche depuis 1989	11
1 - Résolution des systèmes d'équations modélisant les transferts thermiques dans les enceintes habitées par solveurs algèbro-différentiels	14
1.1 : Introduction	14
1.2 : Le langage de description des équations	15
1.3 : Le maillage volumique	17
1.3.1 : Principes	17
1.3.2 : Les zones « convectives »	17
1.3.3 : Les zones de panache	18
1.3.4 : Les zones de jet	18
1.4 : Le maillage de l'enveloppe	20
1.5 : Les transferts par conduction	21
1.5.1 : Nœuds internes de couches homogènes opaques	21
1.5.2 : Nœuds internes à l'interface solide – solide	21
1.5.3 : Nœuds de surface	22
1.5.4 : Nœuds d'éléments semi transparents	22
1.6 : Les transferts par convection	22
1.6.1 : Transferts convectifs internes	22
1.6.2 : Transferts convectifs externes	23
1.6.3 : Zones d'impact de jet	24
1.7 : Les transferts par rayonnement	24
1.7.1 : La méthode des éclairagements radiosités	25
1.7.2 : La détermination des facteurs de forme	26
1.7.3 : Les taches solaires	27
1.8 : Conclusion et perspectives	30
2 : Applications aux transferts thermiques à l'intérieur des habitacles automobiles	31
2.1 : La thermique des habitacles automobiles	31
2.1.1 : Des besoins de connaissance nouveaux	31
2.1.2 : Un partenariat industriel privilégié	31
2.1.3 : Mon implication personnelle	32
2.2 : Les bancs d'essais expérimentaux	33
2.2.1 : Premier banc : banc convectif à l'arrêt au sol, face au sud [T2]	34
2.2.2 : Deuxième banc : banc convectif simulant un roulage, à orientation variable [T4]	34
2.2.3 : Troisième banc : banc d'essais de composants d'habitacles [R32]	36
2.3 : Les modèles spécifiques de transferts thermiques	38
2.3.1 : Modèles à un nœud d'air [T2]	39
2.3.2 : Modèle « nodal » des écoulements internes : le logiciel ATHEBES® [T4]	42

2.3.3 : Résultats de quelques études menées	43
2.4 : Conclusion	48
3 : Applications aux transferts thermiques dans les bâtiments	50
3.1 : La thermique des bâtiments	50
3.1.1 : Les modèles de transfert thermiques internes	50
3.1.2 : Les émetteurs de chaleur : les apports du GREC	53
3.1.3 : Le chauffage aéraulique	56
3.1.4 : La prise en compte des taches solaires	57
3.1.5 : Visualisation des panaches [T6]	58
3.2 : L'enveloppe des bâtiments	58
3.2.1 : Les panneaux de façade ventilés [P1, T3]	59
3.2.2 : Les super isolants granulaires [P2, T5]	60
3.2.3 : Les ouvertures intelligentes et autonomes [R40, R42]	62
3.3 : La climatique des bâtiments	63
3.3.1 : Outils prédictifs pour l'amélioration des systèmes existants	63
3.3.2 : Potentialités des piles à combustibles pour la cogénération dans le domaine des bâtiments [R27, R28, R31]	64
3.3.3 : Les procédés solaires pour les bâtiments	64
3.4 : Conclusions et perspectives	70
4 : Généralisation de la méthode à l'étude des piles à combustible	72
4.1 : Le contexte de départ	72
4.2 : Le module de puissance de FEVER	73
4.3 : La gestion de l'eau dans les piles à combustible [P3, T8]	74
4.4 : La production d'hydrogène embarquée	76
4.4.1 : Le projet PMFP (Plasma and membrane fuel processing)	76
4.4.2 : La collaboration avec N-GHY	77
4.5 : Conclusion et perspectives	78
5 : La concentration de l'énergie solaire pour la production d'électricité	80
5.1 : Activités liées à THEMIS (1983 – 1986)	81
5.1.1 : Introduction	81
5.1.2 : Les statistiques météorologiques [R4, R8, R9]	82
5.1.3 : L'optique des champs d'héliostats [C3, C4, R2, R5, R6]	83
5.1.4 : Quelques résultats obtenus [C8]	84
5.2 : Activités actuelles (depuis 2002)	85
5.2.1 : Introduction : le programme « rayonnement et procédés » du laboratoire	86
5.2.2 : Les centrales innovantes [P6, T10]	87
5.2.3 : Les récepteurs solaires à haute température pour les centrales à tour [T11]	90
5.2.4 : Les calculs radiatifs	91
5.3 : Conclusion et perspectives	92
6 : Conclusions et perspectives	93
Bibliographie	95
Annexe 1 : Activités pédagogiques et responsabilités administratives	96
A1.1 : Activités d'enseignement	96
A1.1.1 : Enseignement antérieurs à 1989	96
A1.1.2 : Enseignements à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris (1992 – 2004)	97
A1.1.3 : Enseignements dans des établissements d'enseignement supérieur autres que les Ecoles des Mines (2000 – 2006)	99

A1.1.4 : Enseignements à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines d'Albi _____	100
A1.1.5 : Autres activités pédagogiques _____	102
A1.2 : Encadrement de travaux de recherche diplômants _____	103
A1.2.1 : Encadrement de Thèses de doctorat (11) _____	103
A1.2.2 : Encadrement d'autres travaux diplômants _____	104
A1.2.3 : Participation à des jurys de thèse _____	107
A1.3 : Responsabilités administratives et d'animation de la recherche _____	109
<i>Annexe 2 : Partenariats industriels et institutionnels _____</i>	<i>111</i>
A2.1 : Organismes publics internationaux _____	111
A2.2 : Organismes publics nationaux _____	112
A2.3 : Entreprises privées _____	113
<i>Annexe 3 : Liste des publications, travaux de recherche et rapports d'études _____</i>	<i>114</i>
A3.1 : Publications _____	114
A3.1.0 : Mémoires de travaux diplômants (3) _____	114
A3.1.1 : Ouvrage de librairie (1) _____	114
A3.1.2 : Articles dans des revues à Comité de Lecture (6) _____	114
A3.1.3 : Autres articles (6) _____	115
A3.2 : Participation à des congrès et colloques _____	116
A3.2.1 : Conférences invitées (12) _____	116
A3.2.2 : Communications dans des colloques avec actes et comité de lecture (26) _____	118
A3.2.3 : Communications dans des colloques avec actes (5) _____	121
A3.2.4 : Communications dans des colloques sans actes (2) _____	122
A3.3 : Brevets et plis d'huissiers _____	122
A3.4 : Dépôts de logiciels _____	122
A3.5 : Organisation de séminaires et ateliers de travail _____	122
A3.6 : Rapports de contrat de recherche _____	123
A3.6.1 : Rapports rédigés pour le Groupe d'Evaluation Scientifique THEMIS [GEST] (9) _____	123
A3.6.2 : Rapports rédigés pour le Centre d'Energétique de l'Ecole des Mines de Paris (33) _____	124
A3.6.3 : Rapports rédigés pour le Centre Energétique Environnement de l'Ecole des Mines d'Albi (8) _____	127

0 - Introduction

Le corps de ce mémoire décrit l'essentiel des activités de recherche que j'ai menées depuis plus d'une quinzaine d'années, date de mon embauche comme Ingénieur de Recherche ARMINES au sein de l'établissement de Sophia Antipolis du Centre d'Energétique de l'Ecole des Mines de Paris.

Mon transfert début 2003 au Centre Energétique Environnement de l'Ecole des Mines d'Albi, intégré au Laboratoire de Génie des Procédés des Solides Divisés, Unité Mixte de Recherche 2392 du CNRS, m'a cependant ouvert de nouvelles perspectives, liées à des travaux de recherche que j'avais menés dans le début des années 1980. Leur description et les perspectives qui en découlent seront donc le dernier chapitre de ce mémoire.

J'ai rejoint le Centre d'Energétique de l'Ecole des Mines de Paris en juin 1989, après avoir successivement « travaillé » pour le CNRS (Laboratoire de Métallurgie d'Orsay, Laboratoire d'Energie Solaire à Odeillo, Pyrénées-Orientales, et dans le cadre de l'évaluation scientifique de la Centrale Solaire THEMIS) et l'AFME (aujourd'hui ADEME).

0.1 : Activités de recherche antérieures à 1989

0.1.1 : DEA en métallurgie structurale (1978-1979) [J1, J2]

Mes activités de recherche ont débuté, en 1978, en dernière année d'Ecole d'Ingénieur, au travers d'un stage de 4 mois au sein du Laboratoire de Métallurgie du CNRS à l'Université d'Orsay, sur l'étude du vieillissement des aciers de type « maraging ». Ce stage a été aussi pris en compte pour l'obtention d'un DEA de Génie Mécanique, option Métallurgie Structurale. Il s'agissait principalement d'études expérimentales, pour lesquelles des échantillons d'acier frittés à forte teneur en nickel, cobalt et tungstène subissaient divers cycles de vieillissement thermique.

Nous avons étudié leur structure interne avec un certain nombre d'appareils très sophistiqués, notamment par microscopie électronique (à transmission, à balayage), par microsonde électronique et par diffusion centrale des rayons X. Nous avons ainsi pu mettre en évidence la structure « armée » de l'acier par des bâtonnets ellipsoïdaux allongés. Une étude par microscopie électronique à transmission sur des lames minces de ces aciers a donné des résultats très proches de ceux obtenus avec du Ni_3Mo , présent dans d'autres aciers de même type où le molybdène remplace le tungstène. Par analogie, nous en avons conclu que nous avons affaire à du Ni_3W .

Cependant, ce composé n'existe pas sur Terre, et toutes les tentatives que nous avons alors effectuées pour en synthétiser à partir de mélanges frittés de nickel et tungstène, en présence ou non de fer et de cobalt, se sont soldées par la formation de Ni_2W et Ni_4W , composés bien répertoriés. En fait, les travaux ultérieurs sur le sujet semblent montrer que

nous avons synthétisé, lors du vieillissement thermique, des précipités de la forme A_3W , mais où A serait un mélange de Ni, Fe et/ou de Co [1].

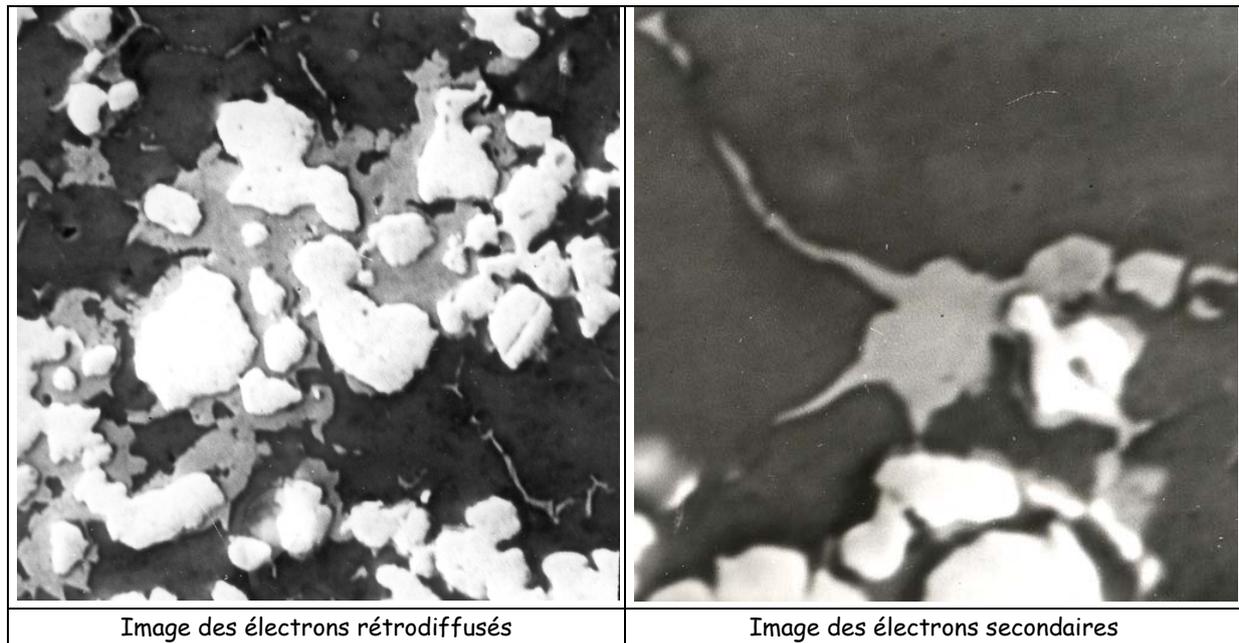


Figure 1 : images par microsonde électronique des différents types d'amas

Enfin, certains de nos résultats ne validaient pas les modèles utilisés au laboratoire. En analysant finement ceux-ci, nous étions remontés à une théorie mise au point à partir de présence d'inclusions sphériques de particules plus dures que la matrice, et nous avons démontré que les extrapolations à des particules ellipsoïdales allongées n'étaient pas pertinentes. Bien qu'ayant pris soin d'édulcorer nos conclusions, on ne nous a pas vraiment félicités.

Ce premier contact avec la recherche fut cependant très formateur, et a sans doute décidé de la poursuite de mes activités dans le domaine. J'y ai appris la minutie nécessaire au bon déroulement d'expérimentations effectuées sur des appareils souvent très sophistiqués. J'ai été très surpris de voir que des résultats expérimentaux, dans des conditions d'obtention irréprochables, pouvaient remettre en cause des « théories » pourtant bien acceptées. J'ai aussi été très surpris de la réaction pas vraiment positive des partisans de ces théories.

J'ai surtout ressenti la fièvre de la découverte quand les experts du domaine nous ont fait comprendre que l'on avait peut-être mis le doigt sur une nouvelle structure inconnue jusque-là, même si nous n'avons pas réussi à en fabriquer « à l'air libre ».

0.1.2 : Thèse en convection naturelle et énergie solaire (1979-1981) [J3]

Changeant complètement de sujet, attiré par la magie du Four Solaire et par les montagnes pyrénéennes, j'ai ensuite effectué une thèse en « Physique de l'Energie », au sein du Laboratoire d'Energie Solaire du CNRS à Odeillo (Pyrénées-Orientales, aujourd'hui

PROMES). Ce travail a été sanctionné fin 1981 par un diplôme de Docteur Ingénieur de l'Université Paris VII.

Le sujet abordé était essentiellement basé sur une étude théorique et expérimentale de la convection naturelle en enceinte close de forme parallélogramme. Le but était de mettre au point une enveloppe de bâtiment innovante, possédant un effet de diode thermique, pour une meilleure répartition temporelle des apports solaires.

La partie théorique était basée sur la mise au point d'un modèle de la convection naturelle dans une cavité de section parallélogramme fermée contenant de l'eau, exposée au flux solaire d'un côté et à la température ambiante de l'autre. Le but de cette modélisation était de faire varier les paramètres géométriques (épaisseur du mur, angle du parallélogramme) pour optimiser cette évolution du mur « TROMBE », c'est-à-dire améliorer, en quantité et qualité, la restitution des calories reçues dans la journée.

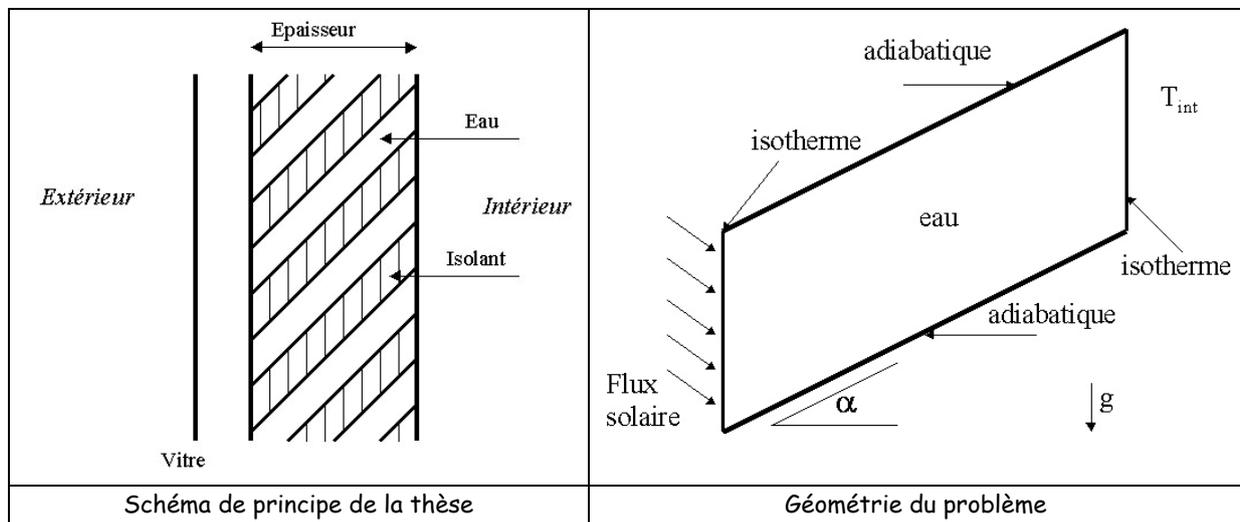


Figure 2 : La géométrie du problème posé

Une approche numérique a été tentée. Elle consistait à essayer de résoudre les équations de NAVIER-STOCKES en 2 dimensions, pour une enceinte fermée de 10 cm de haut, avec 20 cm entre les parois verticales, et un angle de 45°. Les conditions aux limites étaient un flux solaire de 800 W/m² sur la paroi métallique (conductrice) la plus basse, et un échange avec une ambiance intérieure à 20 °C pour la paroi métallique la plus haute. Les 2 parois inclinées étaient considérées comme adiabatiques. Le problème posé était donc très simple. Mais, je n'avais pas le droit de faire un certain nombre d'approximations (notamment celles de BOUSSINESQ).

On était, en 1979, aux balbutiements des méthodes numériques sur ordinateur, et les codes de CFD n'existaient pas. Je n'ai jamais pu faire converger quoi que ce soit, dans un maillage 10 x 10 non orthogonal, vaguement resserré près des parois. Une autre tentative de résolution par les couches limites s'est avérée vaine, et, pour mieux comprendre les phénomènes internes, une cavité transparente a été fabriquée, remplie d'eau et de poudre d'aluminium, afin de visualiser les écoulements. Les phénomènes au niveau des angles

aigus étaient turbulents, laissant peu de chances, à l'époque, à une solution numérique pertinente. Une tentative de résolution du même problème avec le code de CFD FLUENT, en 1996, n'a d'ailleurs donné aucun résultat.

En parallèle de cette étude théorique, nous avons fabriqué un prototype de notre paroi, avec les mêmes caractéristiques géométriques.

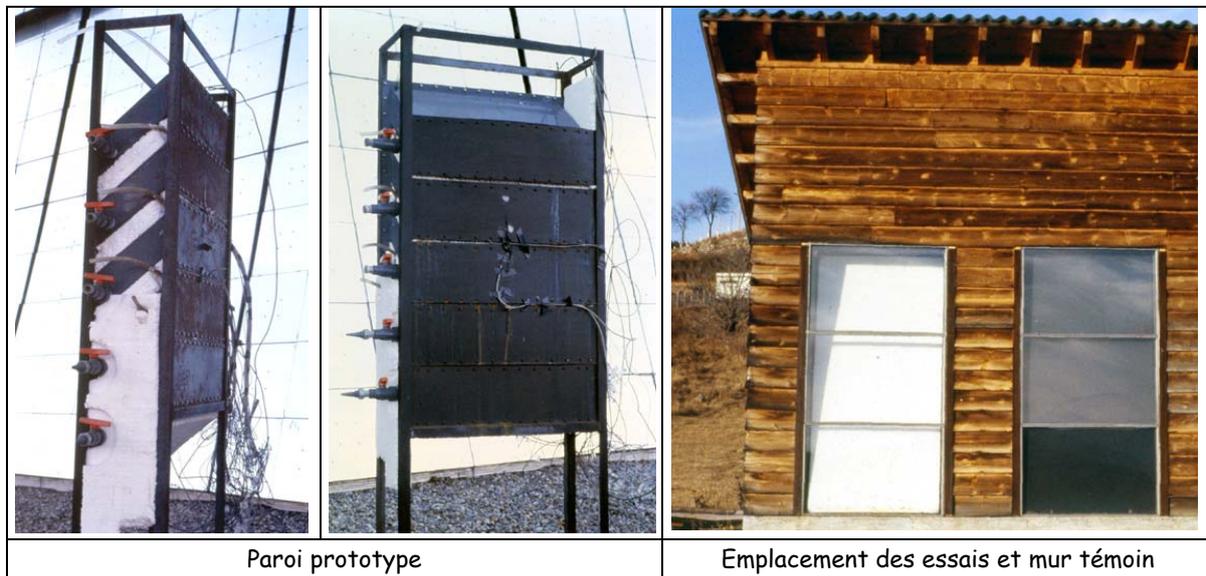


Figure 3 : dispositif expérimental

La partie expérimentale, effectuée avec une structure de 1 m de large, 1,50 m de hauteur et 20 cm d'épaisseur, composée de 5 cavités inclinées à 45 °, s'est déroulée en 2 temps :

- une série d'expérimentations en laboratoire, en ensoleillement artificiel, pour mieux connaître l'évolution de la thermique du fluide à l'intérieur des cavités ;
- une autre série en situation réelle, derrière un double vitrage dans un bâtiment expérimental, en parallèle avec un mur « TROMBE » classique, lui même instrumenté.

Comme cela avait été pressenti, l'inertie thermique de l'eau évite les surchauffes, et l'inclinaison des cavités permet à l'eau, chauffée par le flux solaire, de quitter rapidement la zone en contact avec la paroi sous flux solaire. On a pu noter une bonne homogénéité des températures dans les cavités (pas plus de 3 °C d'écart), à un niveau bien inférieur, lors des journées les plus ensoleillées, que le mur témoin (40 °C au lieu de 60).

On a, par contre, mis en évidence un autre effet favorable, lié à l'inclinaison des cavités : dès le coucher du soleil, une forte stratification s'installe entre le bas de la cavité (maintenant froid), et le haut (en contact avec l'intérieur) pouvant aller jusqu'à une dizaine de degrés. On en a conclu que, de passant en période ensoleillée, le système devenait bloquant hors ensoleillement, et se comportait comme une diode thermique. Des mesures complémentaires en laboratoire, effectuées en chauffant la partie haute des cavités, on montré un port potentiel isolant, avec plus de 30 °C d'écart entre les 2 parois. Nous avons donc baptisé notre paroi : mur diode.

En ce qui concerne les résultats fonctionnels obtenus, ils étaient meilleurs que ceux obtenus par le mur témoin :

- un bon décalage entre le pic d'ensoleillement et le pic de restitution énergétique à la pièce : 9 heures ;
- une efficacité mensuelle de 42 % en février (contre 33 pour le mur témoin), mais qui chutait à 27 % (contre 26).

Les résultats expérimentaux de ce travail étaient encourageants [C1], malgré la non résolution numérique du système d'équations régissant les phénomènes de convection naturelle dans la cavité, ne permettant pas de faire l'étude paramétrique prévue au départ.

Cependant, la complexité induite par cette évolution du principe très simple de mur capteur stockeur n'a pas permis au « mur diode » d'aller, pour l'instant, plus loin dans son développement.

Ces 22 mois passés au four solaire d'Odeillo ont été très riches en enseignements et expérience professionnelle, et m'ont conforté dans mon intention de consacrer ma carrière à la recherche. La notoriété internationale du four solaire, et l'isolement relatif dans ce haut de vallée pyrénéenne a participé pour beaucoup à la richesse des contacts avec les très nombreux chercheurs et stagiaires de toutes les nationalités.

Je me suis d'ailleurs porté candidat à un poste d'attaché de recherche auprès du CNRS, dès le début de l'année 1982. Le sujet, à haut risque, de la thèse d'état à entamer était une étude exploratoire sur la thermolyse directe de l'eau par énergie solaire concentrée dans un réacteur de métal fondu. Ma non disponibilité immédiate (en tant que VSNA affecté en Tunisie) et sans doute d'autres arguments plus « politiques » ne m'ont pas permis d'intégrer le CNRS en tant que chercheur à l'époque.

0.1.3 : Enseignement supérieur et énergie solaire (1981-1983)

Grâce aux relations nouées pendant mon séjour à Odeillo, j'ai pu obtenir facilement un poste de VSNA, comme assistant à la Faculté des Sciences et Techniques de Monastir (en Tunisie). J'y ai, entre autres, enseigné la thermo-hydro-mécanique (couches limites, ondes de choc), les transferts thermiques et les énergies renouvelables. J'avais en charge la station météorologique locale, avec des mesures d'ensoleillement [C2] et ai participé aux expérimentations de la thèse de Pascal BERNAUD, sur les performances d'un capteur solaire à air conçu avec des matériaux locaux.

0.1.4 : Energie solaire concentrée, optique géométrique (1983-1986) [C3 à C8]

Dès ma libération du service militaire, j'ai intégré le Groupe d'Evaluation Scientifique de la centrale électrosolaire THEMIS (GEST), dépendant du CNRS, en tant que personnel mis à disposition par l'AFME (maintenant ADEME) sur le site de Targassone (Pyrénées-Orientales). Pendant plus de 3 années, nous avons évalué cette filière de production d'électricité, afin d'en déduire les potentialités, et proposé de nouveaux concepts, pour en améliorer les rendements.

J'étais plus spécialement chargé de la ressource solaire, depuis le disque solaire jusqu'au plan d'entrée du récepteur. Les domaines scientifiques abordés étaient plutôt liés aux transferts radiatifs, à l'optique géométrique, à la météorologie... Ce sont ces travaux, du domaine de l'Energie Solaire Concentrée, qui ont récemment été remis au goût du jour, et, en relation avec les outils développés au sein de mon nouveau laboratoire, offrent des perspectives de développement intéressantes, qui seront décrites au **chapitre 5**.

Après la fermeture de la Centrale THEMIS par EDF, le 30 septembre 1986, j'ai été chargé de mission de l'AFME pour la métrologie et les essais dans les domaines de l'habitat et des énergies renouvelables, jusqu'à mon embauche, le 15 juin 1989, par le Centre d'Energétique de l'Ecole des Mines de Paris.

0.2 : Activités de recherche depuis 1989

Comme pour tout « Responsable Scientifique » des Ecoles des Mines, quel que soit son statut (fonctionnaire enseignant, contractuel chercheur ou ingénieur de recherche ARMINES), les activités de recherche consistent en encadrement ou co-encadrement de doctorants, en études « personnelles » (avec appui contractuel en très grande majorité) et en gestion ou coordination interne et externe de projets de recherche.

L'intitulé général des travaux que j'ai menés depuis 1989 pourrait être résumé par : « Transferts thermiques dans les systèmes évoluant à température ambiante ». Il s'agit essentiellement de la thermique des enceintes habitables (bâtiment, habitacles automobiles), avec l'étude de divers systèmes énergétiques innovants permettant d'y maintenir des conditions de confort (générateurs et émetteurs de chauffage, y compris systèmes solaires ou de cogénération basés sur des piles à combustibles, procédés de rafraîchissement passif...), ainsi que la mise au point d'éléments d'enveloppe à performances énergétiques améliorées (parois et ouvrants).

La problématique de recherche dans ces domaines est de maintenir une ambiance thermique la plus « confortable possible », en consommant le moins possible d'énergie. Les besoins de recherche sont donc situés à 3 niveaux :

- La caractérisation des ambiances thermiques, tant au niveau des variables physiques objectives que de la qualification subjective pour les occupants ;
- L'optimisation de la conception des systèmes énergétiques actifs, tant au niveau de leur efficacité énergétique intrinsèque que de la souplesse et la robustesse de leurs systèmes de commande et régulation ;
- Le traitement préventif de l'enveloppe de l'enceinte, pour mettre au point des solutions technologiques innovantes basées sur des matériaux ou des systèmes passifs.

Les caractéristiques communes des transferts thermiques dans ces domaines d'application sont principalement :

- Des grands volumes aux géométries complexes, pour lesquels il paraît illusoire de vouloir traiter de façon globale les équations fondamentales de la convection (naturelle

ou forcée) qui régissent les mouvements d'air dans ce type d'enceinte, (nombres de RAYLEIGH très largement supérieurs à 10^{10}) ;

- Un ordre de grandeur semblable pour les transferts par convection et par rayonnement entre surfaces internes ;
- Des phénomènes aux conditions aux limites toujours variables, et souvent difficilement prédictibles, et qui nécessitent un traitement en régime dynamique ;
- Des phénomènes couplés à analyser sur de longues périodes, avec des expérimentations coûteuses ;
- Une grille d'analyse qui passe par des critères non seulement physiques, mais statistiques, physiologiques, sociologiques et économiques.

La spécificité de ces caractéristiques montre toute l'importance de disposer d'outils numériques rapides, précis et performants pour analyser le comportement thermique d'une enceinte habitable en réponse :

- à des conditions aux limites naturelles (ensoleillement, météorologie) ;
- aux perturbations engendrées par l'activité humaine et les systèmes énergétiques.

Les outils mis au point dans le cadre de mes travaux de recherche, pour traiter l'ensemble de ces problèmes ont, dès le début des années 1990, été basés sur l'utilisation de solveurs algèbro-différentiels, qui nécessitent donc de formuler les équations d'une manière spécifique. Ces outils, surtout utilisés pour les applications liées aux enceintes habitables, ont ensuite été adaptés pour répondre à d'autres besoins de recherche. L'ensemble de la démarche de modélisation est présenté dans le **chapitre 1**.

Au cours de ces 15 années de recherche, je me suis donc plus spécialement intéressé à la thermique des bâtiments et des habitacles automobiles.

Les recherches dans le domaine de la thermique des habitacles automobiles, qui ont toujours été menées en partenariat avec des groupes industriels, ont duré de 1990 à 1998. Elles ont tout d'abord porté sur le délicat problème des surchauffes en été, véhicule à l'arrêt, au soleil, puis ont été généralisées à l'amélioration du climat intérieur, quelle que soit la saison, en roulage ou à l'arrêt. Enfin, des questions plus spécifiques ont été abordées, comme la thermique de la planche de bord ou le confort thermique des sièges. Les différents outils numériques et expérimentaux mis en place dans le cadre de ces études sont présentés dans le **chapitre 2**.

En parallèle, de 1989 à maintenant, j'ai toujours eu une forte activité dans le domaine de la thermique des bâtiments. Cette activité a notamment porté sur la caractérisation des performances des différents types d'émetteurs de chaleur, sur la mise au point de suivis expérimentaux sur des habitations réelles équipées de procédés solaires participant au chauffage de l'eau sanitaire et de l'ambiance des locaux, aussi bien que sur l'optimisation du fonctionnement de piles à combustible pour la cogénération de chaleur et d'électricité....

L'ensemble de ces travaux, pour lesquels j'ai aussi eu d'importantes charges de coordination, car très souvent menés en partenariat, est présenté dans le **chapitre 3**.

Enfin, entre 1994 et 1998, à la suite de contacts avec d'autres partenaires du domaine automobile, j'ai participé activement à des programmes de recherche européens dans le cadre des modules de puissance basés sur l'utilisation de piles à combustibles. Bien que la plupart de ces travaux aient été menés sous le sceau de la confidentialité, j'exposerai au sein du **chapitre 4** les principales démarches, les outils mis en place (basés, pour certains, là aussi sur les méthodes numériques développées pour la thermique des ambiances), ainsi que quelques résultats obtenus.

1 - Résolution des systèmes d'équations modélisant les transferts thermiques dans les enceintes habitées par solveurs algébro-différentiels

1.1 : Introduction

Mes premiers essais de développement de modèle numérique, lors de ma thèse, dans une géométrie pas très complexe, et de petites dimensions, m'ont rendu très prudent quand, quelques années après, j'ai eu en charge la modélisation des transferts thermiques, tant dans un habitacle automobile que dans un bâtiment.

Ces grands volumes, aux formes parfois complexes, avec une évolution constante des conditions aux limites, posaient, au début des années 90, des problèmes numériques non résolus.

Certains modèles étaient très simplifiés, obtenus directement ou par réduction automatique de modèles de connaissance. Pour permettre de calculer l'évolution des températures en régime dynamique, ils ne prenaient en compte que quelques dizaines de nœuds de simulation, et seulement une température intérieure moyenne. Si, globalement, ils permettaient de prédire correctement différents bilans thermiques, ils étaient incapables de servir de base à une appréciation du confort généré, et ne pouvaient, par exemple, pas déterminer qu'elle était la meilleure position pour un émetteur de chaleur dans une pièce. De plus, il était impossible d'y représenter les transferts aérauliques, pourtant très importants dans le dimensionnement de nombreux systèmes de chauffage et climatisation.

L'émergence, à la fin des années 80, des premiers codes de mécanique des fluides avait poussé certaines équipes à tenter de modéliser avec ces nouveaux outils prometteurs les transferts aérauliques et thermiques dans ce type d'enceintes. Ces codes proposaient la résolution des équations de NAVIER STOKES, après maillage du volume et des surfaces des parois en contact. Ce sont les températures de ces parois qui constituaient les conditions aux limites, il fallait donc les obtenir par des calculs préliminaires, prenant en compte les transferts conductifs et les échanges radiatifs. Le couplage avec les échanges convectifs entraînait ensuite des itérations très longues et coûteuses en temps de calcul.

Afin d'obtenir des écoulements réalistes, le nombre de nœuds d'air dépassait souvent les 100 000, et il devenait quasiment impossible de valider quoi que ce soit avec des mesures expérimentales. Le centre de calcul de TOYOTA, sur son ordinateur le plus puissant, avait besoin de 60 heures de temps CPU pour trouver une solution convergente de régime permanent des transferts thermiques dans un habitacle automobile. De plus, la prise en compte des caractéristiques de parois était très peu précise, avec des erreurs atteignant la dizaine de degrés, et engendrait donc des solutions irréalistes.

A la même époque, le Centre d'Energétique de l'Ecole des Mines de Paris, en partenariat avec une filiale du CEA, testait à SOPHIA ANTIPOLIS le développement d'un outil permettant de résoudre les systèmes d'équations algébro-différentielles : NEPTUNIX (dans sa version 2).

C'est dans cet environnement que nous avons décidé de formaliser la résolution des équations qui régissent les transferts thermiques dans les enceintes habitables.

1.2 : Le langage de description des équations

Le langage de description de modèle de NEPTUNIX permet l'expression directe des systèmes décrits par $f(x, x', p, l, T) = 0$ (x vecteur des variables continues, p vecteur des paramètres, l vecteur des variables événementielles, T variable indépendante) [2].

T , variable indépendante est le plus souvent le temps, surtout dans un problème en régime dynamique. On formalise une dérivée seconde, z , d'une variable x , par la dérivée de la dérivée première, et ainsi de suite : par exemple :

$$0 = -x' + y$$

$$0 = -y' + z$$

L'algorithme numérique utilisé par NEPTUNIX est un schéma de GEAR modifié, à ordre et pas variables, qui permet la gestion des discontinuités et l'interaction des parties continues et événementielles. Cet algorithme est adapté aux systèmes à fortes discontinuités.

Cet algorithme est un prédicteur correcteur dont le correcteur est un NEWTON-RAPHSON. L'algorithme de NEWTON-RAPHSON nécessite à chaque itération le calcul de la matrice JACOBIENNE, $J=df(i)/dx(j)$ ainsi que la résolution du système linéaire : $J*\delta=-f(x,x',p,l,T)$.

Les équations des modèles sont en général des équations avec peu de variables, la matrice JACOBIENNE est donc une matrice « creuse » (très peu d'éléments non nuls). Il est intéressant pour les optimisations de profiter de cette caractéristique. Les méthodes de résolution linéaire se divisent en méthodes directes et méthodes itératives. NEPTUNIX utilise une méthode directe appelée méthode de CROUT (décomposition LU par colonne) qui est une variante de la méthode de GAUSS intéressante pour les matrices creuses.

NEPTUNIX utilise le calcul formel pour la génération automatique du code de calcul de la JACOBIENNE (dérivation formelle) ainsi que le code de calcul de sa décomposition LU et la résolution du système linéaire. Si la première tâche est assez facile, la seconde est beaucoup plus difficile car la problématique des méthodes directes revient à choisir à chaque étape l'élément pivot. Il faut aussi tenir compte des propriétés creuses de la matrice pour éviter le remplissage de celle-ci. Le défi ici est de faire ce choix de manière formelle tout en garantissant la stabilité numérique ainsi qu'un temps de calcul réduit. Les approches purement numériques de ce problème peuvent engendrer des instabilités.

NEPTUNIX utilise aussi le calcul formel pour générer un code de calcul des conditions initiales du système, point dur de la formulation implicite par manque de convergence globale de l'algorithme de NEWTON-RAPHSON. Les valeurs initiales des degrés de liberté sont propagées dans les équations algébriques. On calcule de proche en proche les valeurs des variables décrites par des équations algébriques.

La problématique posée par l'ensemble de ces fonctionnalités est de disposer d'un moteur de calcul formel performant pour pouvoir traiter des problèmes de plusieurs milliers d'équations ainsi que des algorithmes pertinents. NEPTUNIX utilise un algorithme d'explicitation des équations (couplage heuristique maximal dans un graphe bi réparti). Ce mariage des équations et des variables permet tout à la fois de résoudre formellement le modèle et de décomposer la matrice JACOBIENNE. S'il reste des couples célibataires, le logiciel utilise un critère de MARKOWITZ généralisé avec politique de pivot total pour le choix des pivots restants de la décomposition LU.

Les caractéristiques intrinsèques du solveur NEPTUNIX permettent au développeur de se consacrer à l'écriture des équations, puis à l'analyse des résultats obtenus, et de confier au logiciel la résolution numérique du système d'équations.

En règle générale, l'écriture, en format texte, se fait de manière très naturelle.

Après une série de déclarations, le système d'équations est décrit, ainsi que les conditions aux limites (dans un formalisme identique). Il est possible de forcer les pivots au niveau de chacune des équations. Il ne reste plus qu'à définir le pas de temps, les conditions de convergence, et la simulation peut être lancée.

Le post-traitement des tableaux de résultats est ensuite possible, sous la forme de courbes représentant l'évolution temporelle de variables sélectionnées. Les calculs de bilan, par contre, doivent être intégrés comme des équations du système, et sont calculés pendant la résolution.

Les premiers travaux menés dès 1989 [C9] ont été la mise en équations, dans le formalisme du solveur choisi, des 3 principaux modes de transfert thermique, associé à un maillage adapté des volumes internes et des enveloppes faisant l'interface avec l'environnement. Enfin, le formalisme de ces systèmes d'équations est rigoureusement identique à celui décrivant le comportement des systèmes « climatiques » couplés à ces enceintes, et équipés de leurs propres lois de régulation et commande.

Ceci nous a permis de créer des simulateurs complets, en régime dynamique, du comportement en conditions réelles d'une enceinte habitée.

1.3 : Le maillage volumique

1.3.1 : Principes

Une des principales originalités de la méthode est liée à la définition des différentes zones à l'intérieur des volumes habitables à modéliser. Ces zones sont définies à partir des écoulements internes aux enceintes. Leur nombre est toujours limité à une vingtaine, ce qui permet de rendre compte des phénomènes avec une précision suffisante. Pour des calculs plus grossiers, on a pu diminuer le nombre de zones à environ 5, pour les 2 domaines d'application principaux (automobile, bâtiment). Les systèmes d'équations gardent ainsi une taille compatible avec une résolution, en régime dynamique, à des temps de calculs raisonnables, pour des longues périodes de simulation.

Chacune des zones est en relation avec un (ou plusieurs) nœud de surface, ou contient une source de débit massique (panache au-dessus d'un élément chauffant, jet en sortie d'une bouche de ventilation...).

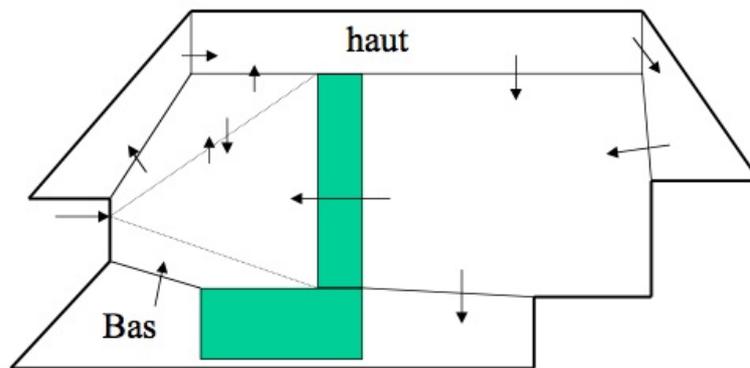


Figure 4 : maillage du volume intérieur d'un habitacle automobile

La figure ci-dessus donne un exemple du découpage zonal d'un habitacle automobile : on peut y distinguer une zone de jet issue de la planche de bord, et le sens privilégié des écoulements. Selon l'étude spécifique que l'on veut effectuer, on peut distinguer le côté droit du côté gauche, en dédoublement les zones au-dessus des sièges, par exemple.

Les zones sont reliées entre elles par des échanges massiques, selon un schéma géométrique préétabli, que l'on a automatisé pour les divers types d'utilisation (habitacle, pièce de bâtiment...). Les particularités du solveur utilisé permettent de ne pas orienter *a priori* le sens des écoulements, et ce sont les bilans en débits sur chaque zone qui, à chaque pas de temps, définissent les différents transferts entre zones.

1.3.2 : Les zones « convectives »

Il s'agit des zones en contact avec un (ou plusieurs) nœud surfacique. Les débits sont générés, au niveau de chacune des zones, par la poussée d'Archimède des échanges convectifs avec les surfaces en contact. Des débits additionnels peuvent être introduits pour prendre en compte un renouvellement d'air extérieur (équivalents à une porosité de la surface), sans modification de la géométrie des écoulements. De même, on peut simuler le

comportement d'une extraction d'air vers l'extérieur, là aussi sans modification de la géométrie des écoulements.

1.3.3 : Les zones de panache

Elles sont caractérisées par un apport d'énergie issu d'un système « externe », par exemple un convecteur, dont le comportement est modélisé par un autre système d'équations. Pour définir ces zones de panache, on introduit des corrélations issues de la littérature, qui donnent, en fonction de la source énergétique, la géométrie de la zone correspondante, et les débits massiques générés.

1.3.4 : Les zones de jet

Dans les enceintes habitables, nous avons affaire à plusieurs types de jets, à des vitesses qui peuvent être faibles (entrée d'air frais dans le cas d'une ventilation mécanique contrôlée), ou fortes (aération d'un véhicule), avec des écarts de température variés, avec ou non impact sur une paroi... Pour définir précisément ces différentes zones de jet, tant au niveau géométrique qu'au niveau des échanges de chaleur et de masse, une étude particulière a été menée dans le cadre d'une thèse. Elle a permis, de la même façon, de générer, en fonction des caractéristiques du jet, la géométrie du volume impliqué, sa taille et les débits massiques échangés avec les zones adjacentes.

Dans un premier temps, nous avons été amenés à observer l'évolution d'un jet libre en utilisant le code de calcul commercial FLUENT® afin de mieux appréhender les champs des vitesses et des températures.

Pour étudier les différentes topologies des zones de jet, nous avons effectué différents calculs, faisant varier les paramètres importants du phénomène :

- le nombre d'Archimède ;
- l'intensité de la turbulence à la sortie ;
- le nombre de Reynolds.

L'écoulement est visualisé par ses normes de vitesses (figure 5), et par ses isothermes (figure 6), au cours de son établissement.

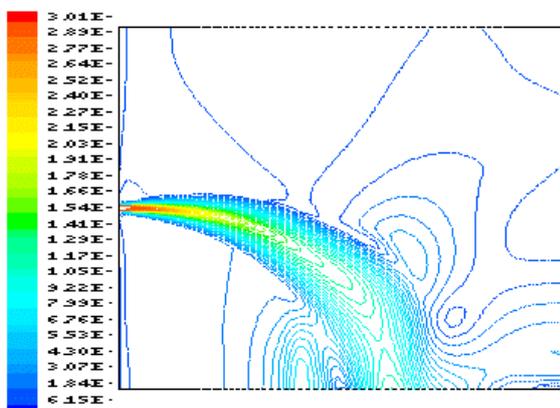


Figure 5 : Normes des vitesses.

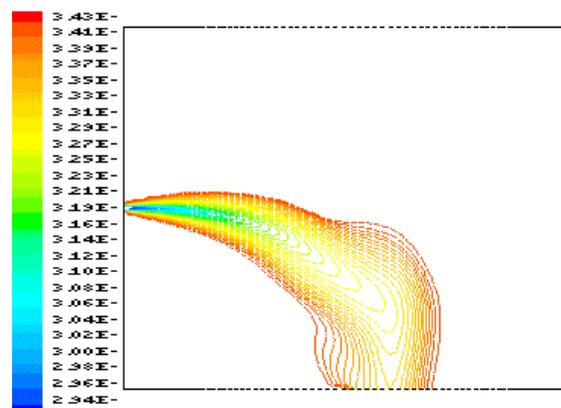


Figure 6 : Isothermes.

Nous avons ainsi pu retrouver les 3 parties constituant un jet libre :

- Le cœur potentiel, à l'intérieur duquel la vitesse en sortie d'orifice reste constante dans un cône qui a pour base l'orifice, et au bord duquel se forme une couche de mélange avec de l'air pris dans l'enceinte par entraînement ;
- La zone de transition, qui débute à la fin du cœur, et où la vitesse décroît longitudinalement, avec un brassage turbulent dans toute la largeur du jet ;
- La zone développée, pour laquelle les profils de vitesse restent semblables (gaussienne), et où les champs de vitesse et de température sont déterminés par des fonctions analytiques.

Ce découpage en trois parties se retrouve pour les jets pariétaux (systèmes de désembuage de pare brise, par exemple), avec cependant des formes différentes (dissymétrie du jet).

A partir des résultats obtenus, nous avons défini les zones de jet par leur contour, que nous avons limité, dans le sens principal de l'écoulement, au lieu des vitesses atteignant 1% de la vitesse d'éjection.

Il se peut alors qu'une zone de jet intercepte (en partie ou totalement) une surface. Dans ce cas, l'impact du jet entraîne des échanges spécifiques, qui sont précisés plus loin.

Ainsi, chaque enceinte à modéliser est décomposée en un nombre de zones limité, fortement corrélées à la physique des écoulements.

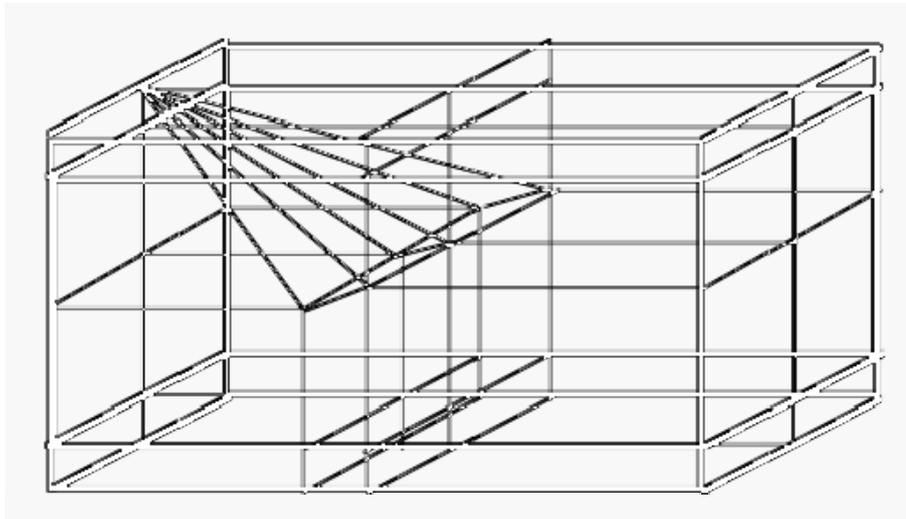


Figure 7 : maillage du volume intérieur d'une pièce avec chauffage aéraulique

Voici un exemple du maillage automatique d'un pièce équipée d'un système de chauffage à air chaud : on y distingue clairement la zone de jet, issu d'une bouche située à la limite d'une paroi verticale et du plafond.

1.4 : Le maillage de l'enveloppe

Les enceintes habitées sont donc définies comme de grands volumes d'air (de quelques à quelques dizaines de m³) que nous avons représentés par une à deux dizaines de zones. Elles sont entourées par des surfaces, plus ou moins épaisses et poreuses, elles-mêmes constituant l'enveloppe. Cette enveloppe peut donc être étanche (pas de transfert de masse entre l'enceinte et l'extérieur) ou partiellement poreuse (renouvellement d'air, chauffage aéraulique ou ventilation, défaut d'étanchéité voulu ou non).

L'expérience acquise dans le domaine des enceintes habitées montre que l'on peut faire une hypothèse de monodimensionalité des transferts thermiques entre le volume interne et l'extérieur. Le découpage de cette enveloppe peut donc facilement rester très rustique dans les 2 autres dimensions : environ 20 à 50 « surfaces » sont suffisantes pour un habitacle automobile précis, et seulement une dizaine pour certaines pièces de bâtiment.

Il est à noter que l'on ne découpe pas les surfaces ainsi définies si elles sont, en partie, exposées au rayonnement solaire direct (tache solaire). Sauf pour des études spécifiques, la tache solaire est « diluée » sur toute la surface, qui possède ainsi un comportement homogène.

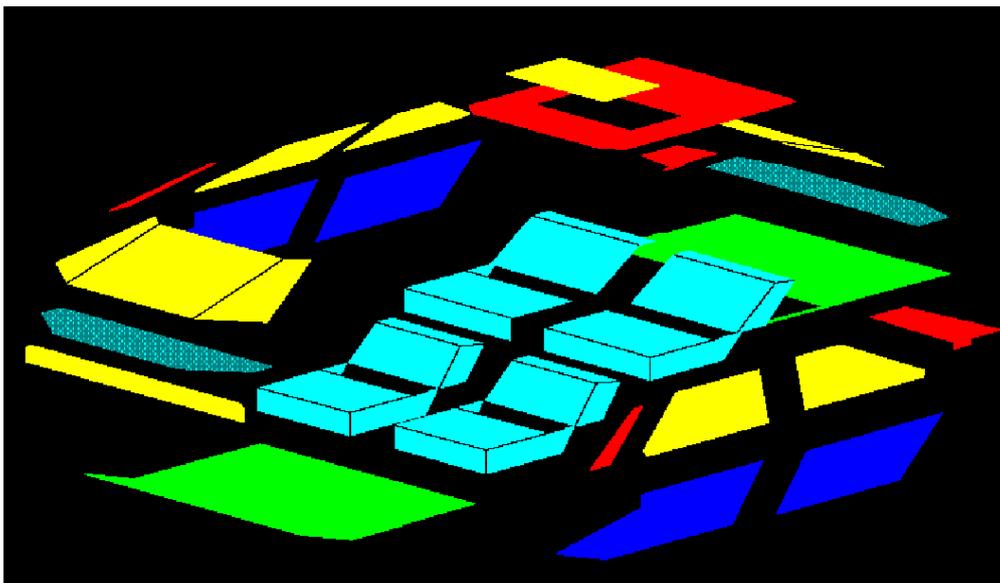


Figure 8 : découpage des surfaces enveloppes d'un habitacle automobile

Dans le sens du transfert thermique, quelques nœuds seulement permettent de modéliser avec une précision largement suffisante son comportement thermique. Chaque « paroi » est décomposée en couches homogènes et isotropes. Les contacts entre couches sont considérés comme parfaits. Certains nœuds sont à l'interface solide – gaz ou solide - solide, les autres sont internes à une couche homogène.

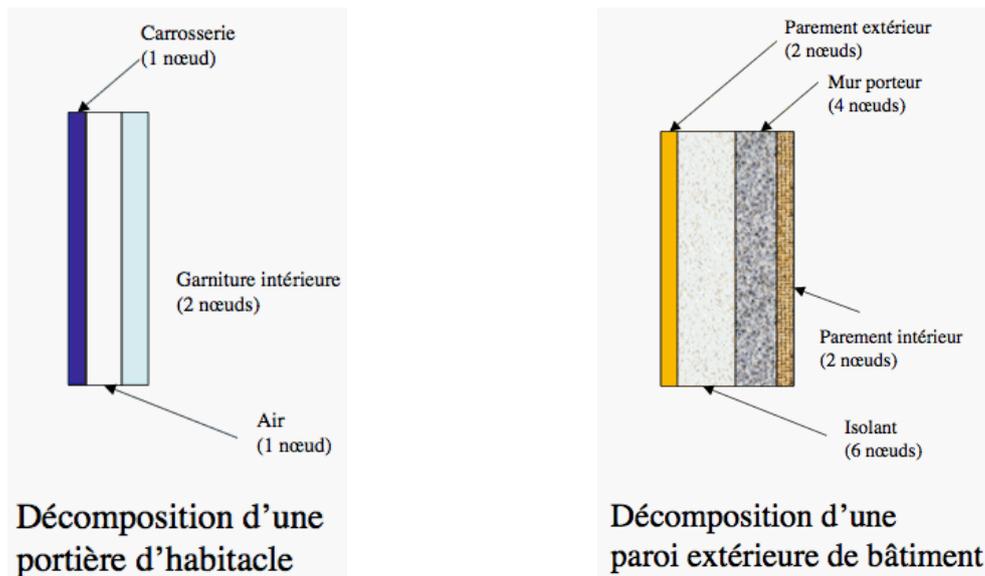


Figure 9 : décomposition de l'enveloppe dans le sens des transferts

Le maillage du volume et de son enveloppe, avec des variantes selon le domaine d'application, est donc une opération simple, qui a été automatisée à partir de la géométrie des problèmes posés.

1.5 : Les transferts par conduction

La principale hypothèse de nos travaux porte donc sur la monodimensionalité des transferts par conduction dans les différents nœuds solides des parois constituant une enveloppe. Cette hypothèse est très proche de la réalité pour les parois internes ou externes des bâtiments, ainsi que pour les divers composants d'une carrosserie de véhicule automobile.

1.5.1 : Nœuds internes de couches homogènes opaques

Les équations d'évolution de la température de ces différents nœuds peuvent donc s'écrire, pour les nœuds intérieurs de couches homogènes, c'est à dire sans interface solide – solide entre $i-1$, i et $i+1$, sous la forme suivante :

$$mC_p \frac{dT_i}{dt} = \lambda S \left(\frac{T_{(i-1)} - T_i}{e_-} + \frac{T_{(i+1)} - T_i}{e_+} \right)$$

Soit : la variation de la température du volume de masse m entourant le nœud i est égale à la somme des flux échangés par conduction avec le nœud $i-1$, distant de e_- et le nœud $i+1$, distant de e_+ .

1.5.2 : Nœuds internes à l'interface solide – solide

Le volume attaché à ce type de nœud est réparti entre les 2 matériaux, ce qui entraîne l'apparition de 2 conductivités différentes.

1.5.3 : Nœuds de surface

Quant aux nœuds de surface en contact avec l'extérieur, dans le bilan des flux reçus, il est tenu compte, en plus des éventuels échanges conductifs coté solide, des échanges convectifs et radiatifs avec l'ambiance (ou les ambiances) en contact. Ce qui donne une équation type de la forme :

$$mC_p \frac{dT_i}{dt} = \sum (\text{Flux conductifs, convectifs, radiatifs})$$

Les flux conductifs sont explicités comme ci-dessus, les flux convectifs peuvent être de convection naturelle ou forcée, les flux radiatifs déterminés par les échanges avec les différents éléments en contacts visuels, pour les différentes bandes spectrales prises en compte.

1.5.4 : Nœuds d'éléments semi transparents

Chaque surface (ce sont essentiellement des vitrages de faible épaisseur, avec des nombres de Biot de l'ordre de 0,05) est considérée comme un nœud unique, échangeant avec 2 environnements (intérieur et extérieur).

Pour ces surfaces semi transparentes, l'évolution de leur température ne se différencie, au niveau des équations, que par le terme lié à l'absorption du rayonnement, en fonction des caractéristiques spectrales du matériau, et de celles de l'éclairement.

Un exemple complet de l'équation d'évolution de la température du nœud représentant une vitre, en contact avec les ambiances interne et externe, est donnée en 1.7.

1.6 : Les transferts par convection

On distingue :

- les transferts à l'intérieur des enceintes, entre un (ou plusieurs) nœud de paroi et une (ou plusieurs) zones du volume intérieur, qui se font principalement par convection naturelle ;
- les transferts avec l'environnement extérieur, pour lesquels on tient éventuellement compte des échanges par convection forcée ;
- les zones d'impact de jet.

1.6.1 : Transferts convectifs internes

Pour chacune des surfaces internes, selon son inclinaison et la différence de température avec la zone d'air attenante, les échanges convectifs sont régis par les corrélations issues de la littérature [3]. Ces corrélations donnent le nombre de NUSSELT (Nu, lié au coefficient de convection) en fonction du nombre de GRASSHOF (Gr, représentant les conditions de l'échange) et du nombre de PRANDT (Pr, caractéristique du fluide). La distance

caractéristique prise en compte dans Nu et Gr est, le plus souvent, la longueur de la surface d'échange dans le sens de l'écoulement.

Ces nombres adimensionnels sont, dans nos conditions de travail, variables en fonction du temps et de l'évolution des propriétés physiques : ils sont donc traités comme des variables, calculées à chaque pas de temps. On détermine ainsi la valeur des échanges thermiques entre une surface et la zone d'air adjacente.

De plus, chaque échange par convection naturelle engendre un débit massique, dont le sens est déterminé à chaque pas de temps, qui participe au bilan des écoulements au niveau de chaque zone d'air.

Pour les surfaces horizontales chaudes qui échangent vers le bas avec de l'air froid (plafond rayonnant par exemple), de même que pour les surfaces froides qui échangent vers le haut avec de l'air chaud, la corrélation choisie est :

$$Nu = 0,27 (Gr Pr)^{0,25}$$

Pour les surfaces horizontales chaudes qui échangent vers le haut avec de l'air froid (plancher chauffant par exemple), de même que pour les surfaces froides qui échangent vers le bas avec de l'air chaud, la corrélation choisie est :

$$Nu = 0,14 (Gr Pr)^{0,33}$$

Pour toutes les surfaces verticales internes, quelles que soient les conditions :

$$Nu = 0,56 (Gr Pr)^{0,25}$$

Pour les surfaces inclinées d'un angle α avec la verticale, notamment les pare-brise et vitres arrière de véhicules :

$$Nu = 0,27 (Gr Pr \cos(\alpha))^{0,25}$$

Les valeurs absolues des échanges par convection naturelle que l'on a pu déterminer dans nos enceintes restent cependant toujours comprises entre 2 et 5 W/m²K, et sont compatibles avec les bilans obtenus lors des expérimentations effectuées.

1.6.2 : Transferts convectifs externes

Aux échanges par convection naturelle (correspondant à un véhicule à l'arrêt, sans vent ou à une paroi externe de bâtiment), on peut ajouter des échanges par convection forcée, pour la prise en compte du vent et/ou du déplacement du véhicule.

Les corrélations utilisées pour quantifier les échanges par convection forcée sont issues de la littérature [3], et prennent en compte la vitesse relative de l'air par rapport à la paroi au travers du nombre de REYNOLDS, dont la distance caractéristique est la longueur de la surface d'échange dans le sens de l'écoulement.

$$Nu = 0,0366 (Re)^{0,8} (Pr)^{0,33}$$

1.6.3 : Zones d'impact de jet

Les zones de jet, telles que définies précédemment, peuvent évoluer librement (cas d'un aérotherme chauffant un grand volume) ou rencontrer rapidement une surface (jet de climatisation automobile frappant un des sièges avant, jet pariétal...). Dans ce dernier cas, les échanges entre jet et paroi suivent des lois de convection forcée, en fonction de la vitesse du jet à l'impact, et de la décroissance de cette vitesse par étalement du jet le long de la paroi. La zone d'impact s'achève quand la convection forcée cède le pas à la convection naturelle (lorsque le nombre de REYNOLDS devient inférieur à $Gr^{0,4}$).

1.7 : Les transferts par rayonnement

Bien que les transferts thermiques dans les enceintes habitées se déroulent à des températures relativement basses, les phénomènes radiatifs y occupent une part très importante. En effet, à ces niveaux de température, les effets du rayonnement infra rouge sont équivalents à ceux de la convection naturelle, et ont une grosse importance sur le confort thermique des usagers.

De plus, l'ensoleillement est une perturbation majeure pour les ambiances, de même que les pertes radiatives nocturnes.

La prise en compte précise des échanges radiatifs est donc un point essentiel pour la précision des modèles de comportement des ambiances habitées.

Par contre, l'air reste transparent aux rayonnements dans les applications qui nous concernent, les seuls milieux semi transparents considérés seront les vitrages.

Dans la plupart des cas traités, nous nous sommes contentés de travailler en ne considérant que 3 bandes spectrales : les 2 premières (visible et proche infra rouge : longueur d'onde < $2,5 \mu\text{m}$) correspondent au spectre de la lumière solaire, la troisième étant réservé à l'infra rouge lointain (émission des corps à température ambiante).

Enfin, nous avons déterminé les échanges par rayonnement entre l'enveloppe et l'ambiance extérieure (y compris le ciel), ainsi que la redistribution des températures par échanges radiatifs entre les paroi internes.

La méthode mise au point passe par un premier calcul préliminaire : la détermination des facteurs de forme entre les surfaces issues du découpage de l'enveloppe. Cette opération n'a lieu qu'une fois par étude simulation.

Ensuite, on doit calculer la position des tâches solaires, qui, elles, se déplacent dans le temps, soit lentement (course apparente du soleil pour enceinte immobile), soit très rapidement (cas d'un véhicule en roulage sur une route sinueuse).

Enfin, les échanges radiatifs entre surface peuvent être calculés, et intégrés aux bilans thermiques de chacune d'elle, par une méthode des éclairements radiosités. Cette méthode sous-entend que l'ensemble des surfaces est diffusant quant à la réflexion des rayonnements reçus, ce qui, globalement, est le cas pour la plupart des surfaces internes des enceintes habitables.

1.7.1 : La méthode des éclairements radiosités

Les surfaces internes des enceintes habitables ne pouvant être considérées comme des corps noirs, les échanges radiatifs entre surfaces doivent prendre en compte les réflexions multiples. Ce problème est bien traité par la méthode des éclairements radiosités.

L'éclairement d'une surface est donc défini par la somme des flux surfaciques radiatifs arrivant sur celle-ci, y compris les flux issus des radiosités des autres parois. Pour une surface d'indice i , entourée par $n-1$ surfaces, pour la longueur d'onde IRL (infra rouge lointain), l'éclairement reçu est de la forme :

$$E_{iIRL} = \sum_j F_{ij} J_{jIRL}$$

Dans cette expression, F_{ij} est le facteur de forme sous lequel la surface i voit la surface j , et J_{jIRL} est la radiosité de la face j .

Pour les surfaces directement exposées au rayonnement solaire direct, on ajoute, pour les bandes spectrales solaires (VIS pour visible et PIR pour proche infra rouge), les termes correspondant au flux solaire direct incident (qui est « étalé » dans le cas de tache solaire partielle) :

$$E_{iVIS} = \omega \Phi_{iVIS} + \sum_j F_{ij} J_{jVIS} \quad \text{et} \quad E_{iPIR} = \omega \Phi_{iPIR} + \sum_j F_{ij} J_{jPIR}$$

où ω est le *ratio* entre la surface de la tache solaire et l'aire de la surface i , et Φ est le flux solaire direct transmis par une des parois semi transparentes.

La radiosité d'une paroi est la somme des flux surfaciques qui « partent » de la paroi, c'est-à-dire la somme du flux émis par cette paroi (fonction de sa température) et de la réflexion de l'éclairement. Son écriture dépend aussi de la bande spectrale considérée.

Pour l'infra rouge lointain :

$$J_{iIRL} = \rho_i E_{iIRL} + \varepsilon_i \sigma T_i^4$$

avec ρ_i le coefficient de réflexion en IRL de la surface, et ε_i son émissivité, σ étant la constante de STEFAN – BOLTZMAN.

Pour les bandes spectrales correspondant au spectre solaire, la radiosité, pour les parois opaques, ne contient que la réflexion de l'éclairement. Par contre, pour les parois semi transparentes, il faut y ajouter la transmission de l'ensoleillement diffus.

Le système d'équations ainsi créé ne pose pas de difficulté de résolution, mais il faut connaître les caractéristiques optiques des matériaux recouvrant les surfaces internes (ce qui ne se trouve pas facilement) et déterminer les facteurs de forme F_{ij} pour les configurations géométriques données. Enfin, il faut aussi calculer le coefficient ω de chaque surface, ω étant égal à 0 s'il n'y a pas de tache solaire, à 1 si la surface est entièrement sous un flux solaire direct, et à une valeur comprise entre 0 et 1 pour tout cas de tache partielle.

1.7.2 : La détermination des facteurs de forme

Dans la plupart des pièces de bâtiment, les angles sont droits, et les surfaces internes parallèles. Il pourrait donc souvent être possible de déterminer analytiquement la valeur du facteur de forme entre 2 d'entre elles. Cependant cela n'est plus valable dès que l'on tient compte de pièces de mobilier, et absolument pas adapté à la complexité des formes géométriques internes aux habitacles automobiles.

De plus, dans la plupart des cas, les surfaces internes ne sont pas convexes, et il faut tenir compte des « blocages » totaux ou partiels engendrés par certaines surfaces par rapport à d'autres.

Nous avons donc mis au point une méthode générale de calculs de facteurs de forme, que l'on a appliquée à toutes les enceintes étudiées, méthode qui a été validée avec les résultats des formules analytiques quand celles-ci étaient disponibles. Cette méthode n'a pas besoin d'être très rapide, car le calcul des facteurs de forme n'est exécuté qu'une fois par géométrie, quelle que soit, par ailleurs, la « durée » de la simulation.

Cette méthode est basée sur les flux discrets. Elle consiste en des lancers de rayons à partir d'une surface émettrice S_e , dans toutes les directions. Parmi les N_e rayons lancés, N_i viennent frapper la surface S_i , et, si N_e est assez grand, le facteur de forme F_{ei} est égal au rapport N_i/N_e .

Pour que la méthode soit « exacte », il faut, à partir de chaque point de la surface émettrice, lancer de façon continue et uniforme une infinité de rayons. La question à résoudre est donc :

- Quelle surface unitaire de base doit-on utiliser ?
- Quel critère pour arrêter le lancer de rayon à partir de chaque surface élémentaire ?

Il semble normal que les points d'où sont lancés les rayons doivent être répartis uniformément sur la surface de départ. Pour cela, on a triangulé toutes les surfaces internes de l'enveloppe de l'enceinte en surfaces élémentaires triangulaires, de façon à ce que

chaque maille ainsi obtenue ait une surface inférieure à une valeur donnée au départ (et identique pour toutes les surfaces à mailler). Une valeur réaliste est basée sur la première triangulation de la plus petite des surfaces issues du découpage « conductif » de l'enveloppe.

Quant au nombre de rayons à lancer, à partir du barycentre de chacun de ces triangles élémentaires, il peut être défini par plusieurs types de critères :

- Un critère de convergence (par exemple le facteur de forme entre la surface élémentaire et une surface réceptrice évolue de moins de n% en doublant le nombre de rayon tirés) ;
- Un nombre brut, identique pour toutes les surfaces élémentaires (dans le cas de géométries simples) ;
- Un nombre fixé de rayons atteignant la plus petite des surfaces en vis à vis...

De plus, il est aussi possible d'utiliser astucieusement les différentes propriétés des facteurs de forme géométriques : leur somme doit être égale à 1 pour une surface fermée, et les valeurs des facteurs de formes conjugués sont proportionnelles à l'inverse de leurs aires.

Enfin, dans le cas d'un rayon frappant plusieurs surfaces internes, il a fallu introduire une boucle complémentaire, pour déterminer quelle surface était la plus proche, dans la direction donnée, pour comptabiliser correctement l'impact.

Globalement, les différentes optimisations ont permis d'obtenir des maillages comportant environ 2000 triangles élémentaires. Pour chaque triangle élémentaire, environ une quinzaine de rayons tirés aléatoirement (dans des directions différentes d'un triangle élémentaire à un autre) suffisent pour obtenir des facteurs de forme d'une précision relative meilleure que 1 %.

C'est cette méthode, qui ne nécessite que la connaissance du maillage géométrique de base, qui a été ensuite appliquée de façon automatique pour tous nos cas d'étude.

1.7.3 : Les taches solaires

La détermination précise de la position des taches solaires est aussi importante dans l'étude des transferts thermiques dans les habitacles automobiles que dans les pièces d'habitation. En effet, leur impact sur le confort thermique (contact de surfaces très chaudes...) et visuel (éblouissement...) est très fort.

Il n'est jamais facile de déterminer exactement la position d'une tache solaire, et ce calcul doit être refait souvent en cours de simulation, ne serait ce que pour tenir compte de la course apparente du soleil dans le ciel. Ce calcul est, de plus, rendu difficile par l'interposition de surfaces (meubles, sièges...) qui interceptent tout ou partie du rayonnement solaire direct.

Pour le calcul de ces taches solaires, nous avons à notre disposition un certain nombre de méthodes, notamment basées sur les flux discrets. Cependant la plupart demandent des

manipulations complexes, et sont difficilement automatisables. De plus, elles ne donnent pas la géométrie exacte de la tache, mais souvent un éclaircissement moyen sur une surface réceptrice. Si ceci est suffisant pour les bilans thermiques, il est impossible d'aller plus loin dans certaines études (notamment la valeur maximale atteinte par certaines parties d'un habitacle, ou l'impact sur le thermostat d'une pièce de bâtiment).

Nous avons donc développé une méthode originale, adaptée des calculs optiques que j'avais effectués sur le champ d'héliostats de la centrale THEMIS [R2]. Cette technique (basée sur des projections de quadrilatères) a été généralisée en lancers de triangles, et permet de donner à la fois le contenu énergétique des taches solaires, et leur géométrie.

Ces calculs sont effectués en pré traitement, à partir d'une géométrie donnée (habitable, pièce de bâtiment meublée...), en fonction de la position du soleil, en hauteur et en azimut. La géométrie calculée des tâches solaires est ensuite prise en compte par le découpage automatique des surfaces.

Au niveau géométrique, nos découpages d'enveloppe sont toujours définis par des polygones convexes, notamment les parois semi transparentes (vitrages automobiles, vitres de bâtiments). Comme il est toujours possible de trianguler un polygone, le premier travail du programme spécifique au calcul des tâches solaires est de trianguler l'ensemble des surfaces définies par la géométrie du problème. Ce nouveau découpage est indépendant de celui qui a permis de calculer les facteurs de forme, et reste assez général pour accepter en entrée un découpage issu des maillages utilisés par les codes commerciaux de type éléments finis, notamment ceux qui sont utilisés pour la conception des bâtiments ou des habitacles.

Un premier traitement, basé sur la position relative du soleil et de chaque surface élimine toutes les surfaces, transparentes ou opaques, qui ne peuvent ni transmettre, ni recevoir directement le flux solaire. Chaque triangle restant est ensuite projeté parallèlement à la direction Soleil – voiture, sur une surface « éclairante », dans un ordre déterminé par la distance à la surface éclairante considérée.

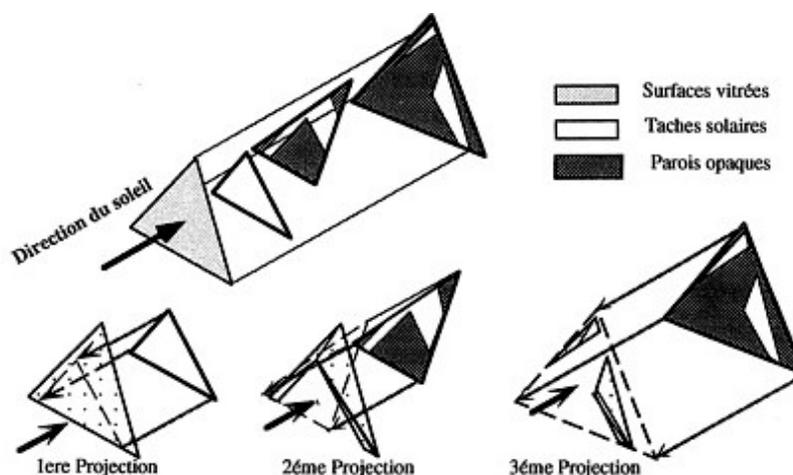


Figure 10 : Détermination directe des tâches solaires

Cette projection se fait très simplement en utilisant des matrices de changement de repère classiques. On se retrouve dans un problème à 2 dimensions. Ensuite, il faut calculer l'intersection, éventuelle, entre le triangle projeté et les différents triangles de la surface éclairante. L'intersection entre 2 triangles peut se faire de 16 façons différentes, sans compter les cas dégénérés où les intersections sont confondues avec les sommets ou les côtés.

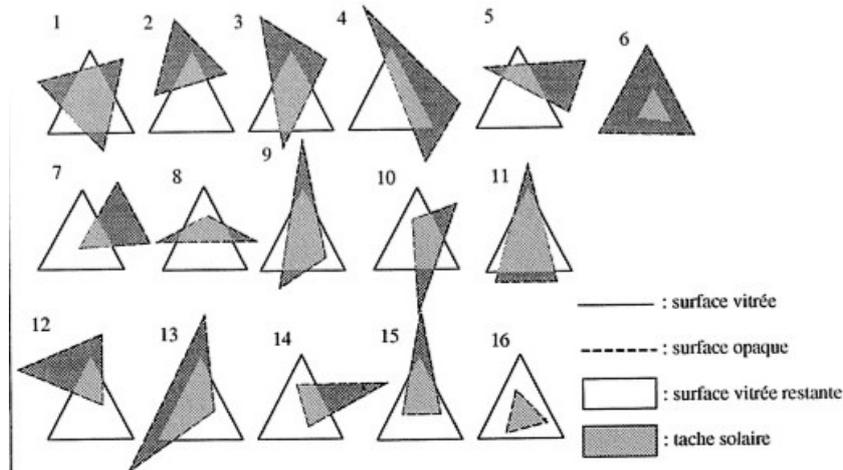


Figure 11 : Les 16 cas d'intersections de 2 triangles entre eux

Les résultats, sous forme de fichiers ensuite lus par le simulateur des transferts thermiques, sont l'ensemble des coordonnées des tâches solaires, pour les surfaces opaques du volume étudié, aux différentes positions de soleil voulues. Pour chaque tâche solaire est précisée la paroi « éclairante » correspondante, ce qui permettra de calculer la densité de flux reçu au niveau de la tâche solaire.

Ci-dessous, 2 exemples de calculs dans nos deux domaines d'application privilégiés.

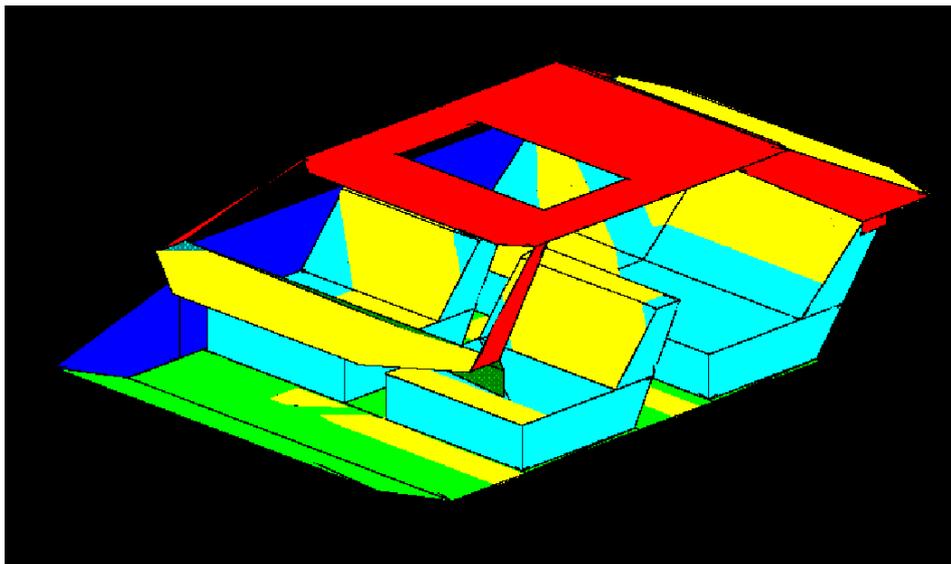


Figure 12 : Taches solaires dans un habitacle automobile

Sur cette image issue du calcul des taches solaires, on remarque l'impact négatif du toit ouvrant sur le dossier du conducteur.

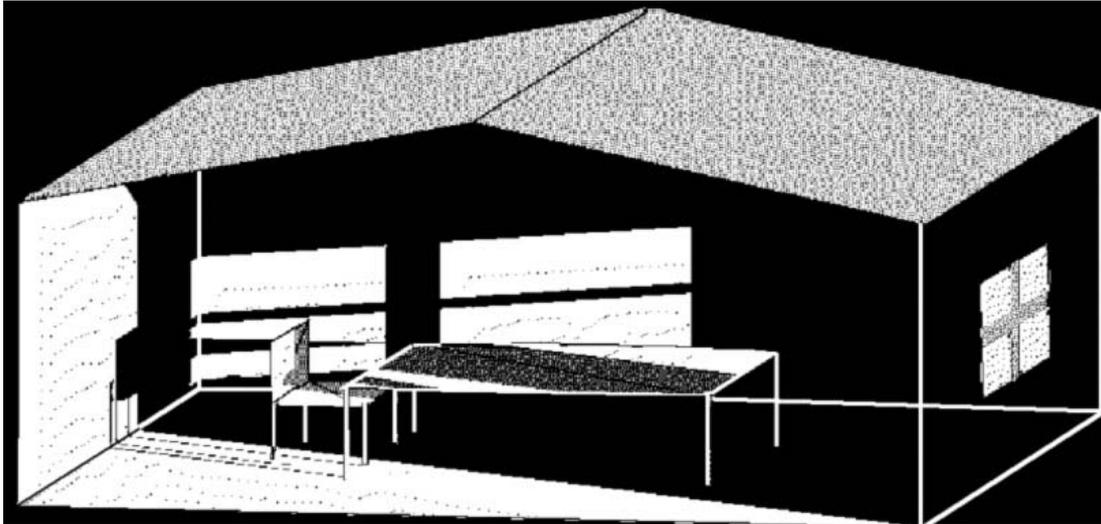


Figure 13 : tâches solaires dans un bâtiment

Cette image des ombres, par un calcul effectué pour une pièce meublée, démontre la précision de la méthode.

1.8 : Conclusion et perspectives

En conclusion de cette partie centrale de mes activités de recherche, la démarche pragmatique, il y a quelques années originale, qui allie :

- un modèle zonal des échanges convectifs, basé sur l'analyse *a priori* des moteurs de convection, (panaches, couches limites, jets...) et validé sur des mesures expérimentales,
- un approfondissement analytique ou numérique des phénomènes localisés (entraînement de jets, évolution de limites de zones...) avant intégration au modèle zonal,
- une modélisation de l'ensemble des comportements thermiques en régime dynamique par un système d'équations algébro-différentielles,
- un traitement numérique par des solveurs commerciaux,

a montré son originalité, et a prouvé qu'elle était très efficace, tant en précision qu'en rapidité de calcul, pour simuler le comportement thermique d'enceintes de formes complexes à température ambiante.

Les outils mis au point ont été adoptés par des centres de recherche industriels, et la même démarche a été appliquée avec succès à une enceinte industrielle à haute température, et, dans un tout autre domaine, à la modélisation d'un poste de détente de gaz naturel.

La méthode reste valable, mais les outils numériques changent : c'est maintenant dans l'environnement MATLAB-SIMULINK que nous travaillons depuis quelques années, notamment lors de la mise au point des simulateurs nécessaires au fonctionnement d'un banc d'essais semi virtuel de systèmes solaires combinés (générateur de chauffage d'eau sanitaire et des locaux de maisons individuelles).

2 : Applications aux transferts thermiques à l'intérieur des habitacles automobiles

2.1 : La thermique des habitacles automobiles

2.1.1 : Des besoins de connaissance nouveaux

Au début des années 1990, la problématique du confort thermique des habitacles automobiles, tant en été qu'en hiver, est devenue une préoccupation de l'ensemble des constructeurs automobiles. Plusieurs phénomènes convergents en ont été la cause, notamment :

- L'augmentation des surfaces vitrées, qui font de la voiture, en été, un excellent capteur solaire par effet de serre ;
- La demande de confort en tout temps et en tout lieu, évolution sociologique irréversible ;
- La parfaite étanchéité des habitacles modernes, empêchant un renouvellement d'air naturel ;
- Les excellents rendements des nouveaux moteurs, diminuant les puissances perdues, utiles pour le chauffage en hiver...

Si, dans la plupart des véhicules, les problèmes liés au chauffage de l'habitacle sont encore résolus en utilisant les pertes thermiques du moteur, les problèmes de rafraîchissement ne le sont pas encore de façon satisfaisante. Pour diminuer l'inconfort d'été, la solution des constructeurs a toujours été de proposer des systèmes de climatisation actifs, basés sur l'utilisation de cycles réfrigérants, lourds, encombrants, pouvant consommer jusqu'à un tiers de la puissance du moteur.

En France, pour résoudre ces problèmes de surchauffe d'été, un consortium mené par PEUGEOT et RENAULT avait entamé des études de caractérisation du comportement thermique des habitacles en régime permanent, à partir de codes classiques de mécanique des fluides, en augmentant régulièrement le nombre de volumes d'air élémentaires et le maillage de l'enveloppe [4]. Cette démarche, malgré de gros investissements, a été abandonnée au début des années 1990, faute de résultats probants.

2.1.2 : Un partenariat industriel privilégié

A la même époque, une société du groupe TOYOTA, l'équipementier AISIN SEIKI, installe un de ses laboratoires de recherche européens sur le site de Sophia Antipolis. En recrutant un certain nombre de chercheurs français locaux, ils débauchent Michel GSCHWIND, chercheur du Centre d'Energétique de l'Ecole des Mines de Paris, qui était un de mes prestataires en tant que chargé de mission AFME, et que je remplace à l'Ecole des Mines. Au cours des différentes rencontres nouées à cette occasion, il est décidé de travailler ensemble sur la thermique de l'habitacle automobile, à partir de l'expérience acquise depuis

quelques années par le Centre d'Energétique dans le domaine de la thermique des bâtiments.

La problématique que nous avons choisi de privilégier est le « préchambrage passif » de l'habitacle, en été, après une exposition statique au soleil. En effet, il n'est pas rare de dépasser 75 °C en température moyenne d'air dans l'habitacle, et on a pu mesurer, en température de surface de planche de bord, des valeurs supérieures à 110 °C sur certains modèles. Ce sont ces conditions difficilement tolérables qui imposent des puissances de climatisation importantes, et ce phénomène est encore amplifié par la faible distance moyenne des parcours automobiles (la médiane se situant aux alentours de 7 km). De plus, les températures atteintes par certains éléments intérieurs (notamment la planche de bord) peuvent accélérer des phénomènes de dégradation des matériaux, avec souvent des transformations structurales inesthétiques.

Dans notre esprit, le préchambrage estival consistait donc à abaisser, avant l'utilisation du véhicule, l'ensemble des températures de l'habitacle, pour diminuer d'autant les puissances de climatisation à installer (et les volumes et poids embarqués). Ces méthodes sont souvent employées, en hiver, dans les pays froids (préchauffage de l'habitacle, du volant...).

Le préchambrage que nous voulions mettre au point était dit passif, car il devait n'utiliser qu'une faible part de l'énergie disponible à bord, c'est-à-dire tirer le moins possible sur la batterie électrochimique, avec des solutions consommant moins que l'énergie nécessaire au démarrage du véhicule.

L'ensemble de nos études nécessitait donc :

- une meilleure connaissance générique du comportement thermique, en régime dynamique, d'un habitacle automobile exposé au rayonnement solaire, dans un premier temps, à l'arrêt ; cette connaissance a été acquise par une série d'expérimentations en ensoleillement réel, et a été capitalisée par le développement d'un code numérique de simulation ;
- la mise au point de concepts innovants, testés d'abord par une approche numérique, puis expérimentalement à partir de prototypes installés sur des véhicules réels.

Ce travail, entamé donc en partenariat avec IMRA Europe (société filiale de AISIN SEIKI), a aussi impliqué ECIA, maintenant FAURECIA, équipementier du groupe PEUGEOT, et, dans une moindre mesure, les équipementiers VALEO, SAINT GOBAIN Vitrages et DELPHI (du groupe GENERAL MOTORS) pour lesquels nous avons fait quelques « études de cas ».

2.1.3 : Mon implication personnelle

J'ai été personnellement responsable de ce programme de recherche pour l'Ecole des Mines de Paris pendant près de 8 années, avec l'encadrement de 4 thèses, dont 2 thèses CIFRE.

Nous avons développé et déposé un simulateur performant, le logiciel ATHEBES®, qui a été acheté par 2 industriels du domaine (SEKURIT, la filiale « verre automobile » du groupe

SAINT GOBAIN, et ECIA), et utilisé au Japon par les ingénieurs du bureau d'études de TOYOTA.

Ces travaux m'ont permis de déposer 3 brevets internationaux, et la réalisation de l'un d'entre eux a été proposée en option sur une des grosses cylindrées de la gamme TOYOTA en 1995.

Les outils numériques mis au point sont basés sur la démarche décrite au chapitre précédent. La plupart des applications particulières ont donné lieu à des expérimentations sur véhicule et en ensoleillement réel, sur les plates-formes d'essais que nous avons montées sur le site de Sophia Antipolis de l'Ecole des Mines de Paris.

Tous ces travaux ayant été financés par des industriels d'un domaine où la concurrence est plutôt sévère, nous n'avons que rarement été autorisés à publier les résultats de nos recherches dans des revues scientifiques internationales. Nous avons seulement pu présenter des versions édulcorées de ces résultats lors de divers congrès internationaux, ou dans des revues techniques automobiles.

2.2 : Les bancs d'essais expérimentaux

Dans le milieu industriel, les mesures sur le comportement thermique des habitacles automobiles sont généralement réalisées en conditions artificielles dans des chambres climatiques. Ceci permet une maîtrise complète des paramètres extérieurs, mais les conditions d'ensoleillement (spectre, orientation...) ne sont que peu représentatives de la réalité, alors qu'elles sont primordiales dans le bilan thermique (sauf la nuit).

Les mesures thermiques en conditions réelles effectuées sur des véhicules en stationnement ou en roulage demandent une métrologie spécifique, et, au début des années 1990, coûtaient très cher aux fabricants soucieux de connaître l'évolution de certaines températures dans leurs habitacles. Il était donc très difficile de s'en procurer, et si l'on nous avait confié quelques résultats de mesure (notamment des températures de planche de bord supérieures à 110 °C lors d'essais au Nevada), il nous était impossible de nous en servir, ne connaissant pas les conditions de température extérieure et d'ensoleillement correspondantes.

Pour mieux appréhender l'importance des différents transferts thermiques, et étudier des procédés capables de générer les ambiances les plus confortables (ou les moins inconfortables) possible, nous avons décidé de nous équiper de nos propres bancs expérimentaux. Ainsi, au cours de ces études, nous avons conçu, réalisé et utilisé 3 bancs expérimentaux différents, tous situés à Sophia Antipolis, en ensoleillement naturel : le premier sur une aire d'essais du Centre Energétique de l'Ecole des Mines de Paris, le second près des locaux de l'IMRA, le dernier sur le toit d'un bâtiment de l'Ecole des Mines de Paris (pour s'affranchir de l'ombre des arbres).

2.2.1 : Premier banc : banc convectif à l'arrêt au sol, face au sud [T2]

Le premier banc a permis de mieux connaître l'évolution, au cours de journées aux conditions climatiques différentes, des différentes températures dans un véhicule Peugeot 405 exposé face au sud, à l'arrêt. Il était équipé de 16 capteurs de température, et la station météorologique et de mesure d'ensoleillement, située sur l'aire d'essais, donnait les conditions extérieures (température d'air, vitesse et orientation du vent, ensoleillement global). Le tout était relié à un système d'acquisition local, permettant une série de mesure toutes les minutes.

On a ainsi pu mesurer, dans les conditions les plus extrêmes, plus de 105 °C en divers point de la planche de bord, des températures de surface de siège supérieures à 90 °C... et des moyennes de températures d'air atteignant souvent les 75 °C. Pour minimiser la charge thermique, au soleil, on a surtout testé l'apport de la convection naturelle, avec différentes combinaisons d'ouvertures (toit ouvrant, vitres partiellement baissées, trappes ménagées dans le plancher de l'habitacle). On a aussi étudié l'influence du soufflage par le ventilateur standard installé sur tous les véhicules, pour de courtes durées avant l'entrée des passagers.

Ces expérimentations ont permis de valider les premiers codes de calcul développés au laboratoire. De plus, un système de protection du rayonnement solaire (tente de collectivité montée sur roulette et glissant sur un rail), pouvant être mis ou enlevé en quelques secondes permettait de mesurer les temps de réponse à un échelon d'ensoleillement, dans le cadre du développement d'un modèle réduit du comportement dynamique de l'habitacle.

2.2.2 : Deuxième banc : banc convectif simulant un roulage, à orientation variable [T4]

Le principal défaut du premier banc d'essais était lié à l'impossibilité de faire varier dynamiquement l'orientation du véhicule par rapport au soleil et de contrôler le vent apparent. Or, ces deux fonctions sont nécessaires pour valider les simulations dans le cas d'un véhicule en mouvement. De plus, la tente utilisée pour s'affranchir du rayonnement solaire imposait des conditions de stagnation, à l'ombre, peu réalistes (ambiance très chaude).

C'est pourquoi, en accord avec notre partenaire IMRA Europe, nous avons conçu et développé un deuxième banc d'essais sur leur site (à moins d'un kilomètre du laboratoire).

Les principales caractéristiques de ce banc d'essais sont semblables à celui construit auparavant, avec cependant deux fonctionnalités supplémentaires :

- le véhicule testé était installé sur un plateau tournant motorisé et programmable ;
- une batterie de ventilateurs de grosse puissance permettait de générer un vent apparent pouvant aller jusqu'à 50 km/h, représentatif d'un parcours urbain ;
- les écrans solaires étaient constitués de films réfléchissant à plus de 95 % le rayonnement solaire, faisant de l'ombre au véhicule sans gêner les échanges par convection.

De plus, l'acquisition de données a été remise à niveau à partir de matériels d'acquisition et de traitement des données actualisées.

Plusieurs milliers d'heures d'essais ont été enregistrées, dans de multiples configurations. Certains essais ont permis de valider l'outil numérique de simulation des transferts thermiques ATHEBES (voir plus loin). D'autres ont permis de tester diverses solutions technologiques pour le refroidissement passif de l'habitacle.

Les graphes ci dessous donnent une image des mesures enregistrées le 16 août 1993. La voiture a été exposée à l'ensoleillement toute la journée, face au sud.

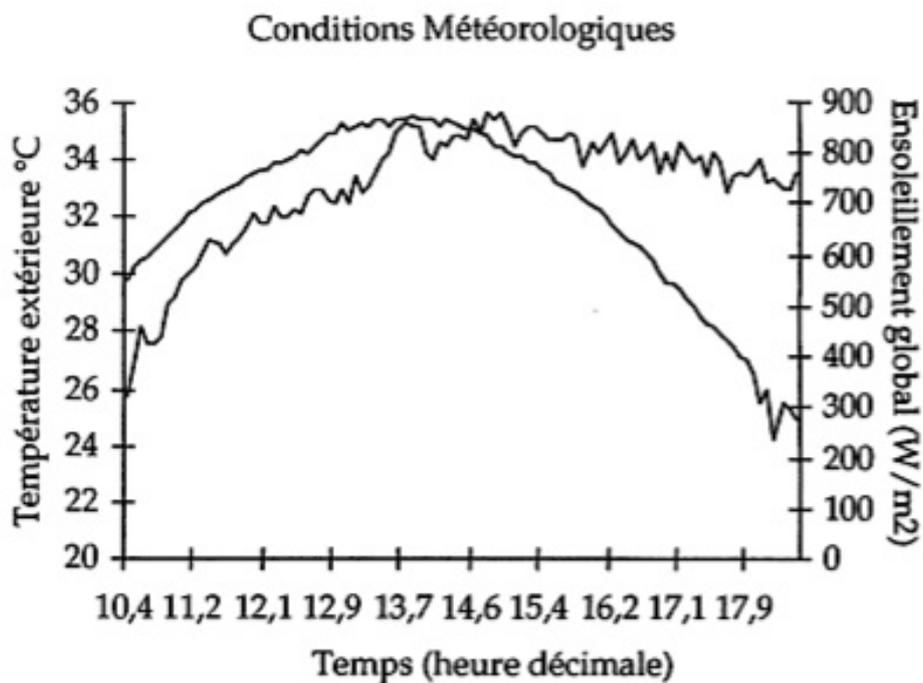


Figure 14 : Conditions météorologiques de 16 août 1993

Les essais ont été effectués par une journée chaude (entre 33 et 35 °C de 13 h 30 à 18 h), et sans nuage avec un ensoleillement global atteignant 850 W/m² vers 12 h solaires.

Les températures d'air ont atteint des valeurs supérieures à 75 °C (au niveau du plafond à l'arrière). Les zones d'occupation (avant gauche, milieu arrière) ont largement dépassé les 65 °C. Enfin, on peut noter une zone beaucoup moins chaude, au niveau des pieds, qui peut s'expliquer par une stratification de l'air dans l'habitacle clos.

Quant aux températures des surfaces intérieures, certaines ont dépassé les 100 °C, au niveau des sièges. On remarque très facilement l'influence du passage de la tache solaire directe. Entre la partie de siège exposée et celle qui est à l'ombre, on note jusqu'à 30 °C d'écart. Quant à la plage arrière, sa température monte quand même jusque vers 90 °C, bien qu'elle soit mieux protégée que les autres surfaces de l'ensoleillement direct.

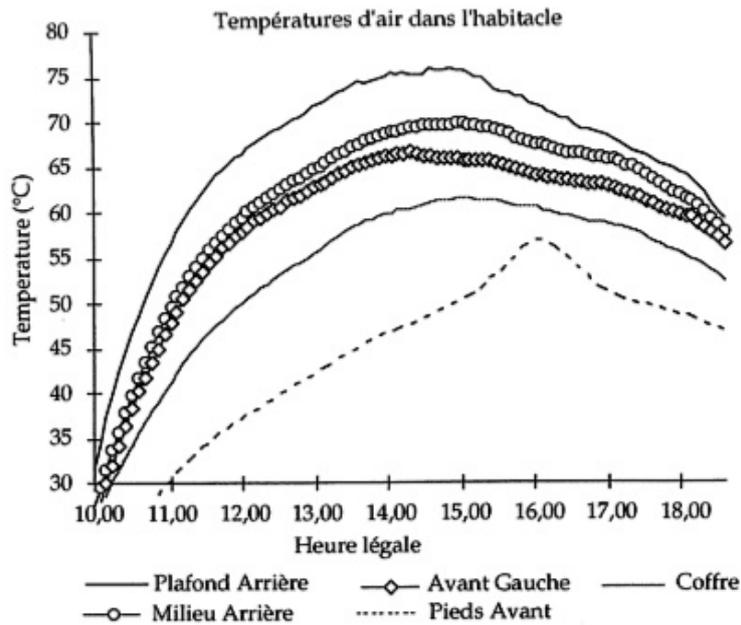


Figure 15 : températures d'air mesurées le 16 août 1993

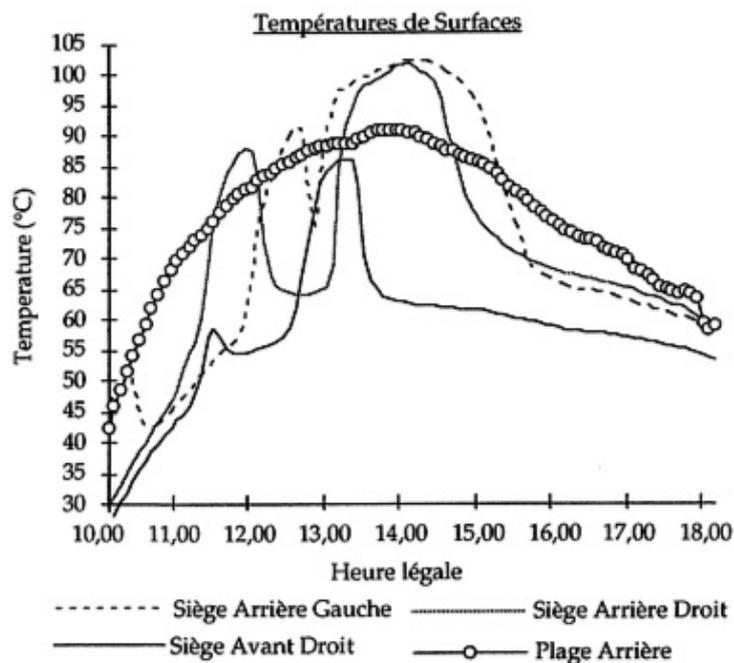


Figure 16 : quelques températures des surfaces internes mesurées le 16 août 1993

2.2.3 : Troisième banc : banc d'essais de composants d'habitacles [R32]

A la suite de la diffusion des résultats obtenus au cours de nos travaux en collaboration avec IMRA Europe, nous avons été contactés par la Direction de la Recherche de la société ECIA, filiale du groupe PSA, pour étudier le comportement thermique des planches de bord, qui présentaient, sur certains modèles haut de gamme, des déformations très peu esthétiques (décollements locaux de la peau supérieure).

Nous avons donc commencé une thèse avec financement CIFRE sur le sujet, étendu par la suite à la thermique des sièges. Cette thèse n'a jamais été soutenue, la fusion entre

Bertrand FAURE et ECIA pour devenir FAURECIA ayant obligé le doctorant à intégrer un poste chez l'industriel à 6 mois de sa soutenance : il n'a jamais ensuite trouvé le temps d'achever la rédaction de son manuscrit.

Une des premières actions liées à cette thèse a été de transférer et de rénover le banc d'essais dont nous disposions sur le site de Sophia Antipolis de l'École des Mines de Paris, en profitant d'une nouvelle aire à notre disposition sur le toit terrasse d'un nouveau bâtiment. En effet, l'ancien banc d'essais, au niveau du sol, était devenu obsolète, et la poussée de la végétation générait une ombre portée nous interdisant de travailler plusieurs heures par jour.



Figure 17 : 4 véhicules en essais de confort thermique en conditions naturelles

La nouvelle plate-forme d'essais pouvait accueillir 4 automobiles en parallèle, chacune équipée de ses capteurs.

La collaboration avec ECIA nous a permis d'utiliser un capteur de position 3D, permettant de générer automatiquement la géométrie des habitacles, sous la forme d'un fichier que nous avons rendu compatible avec les entrées de notre code de calcul des transferts thermiques.



Figure 18 : Maillage 3D de l'intérieur d'un habitacle automobile

De plus, nous nous sommes dotés de moyens d'acquisition performants, capables de gérer plusieurs essais en même temps. De plus, les nouveaux moyens informatiques mis à notre disposition, reliés au réseau interne de l'Ecole, nous permettaient de démarrer et suivre le déroulement des expérimentations depuis notre bureau.

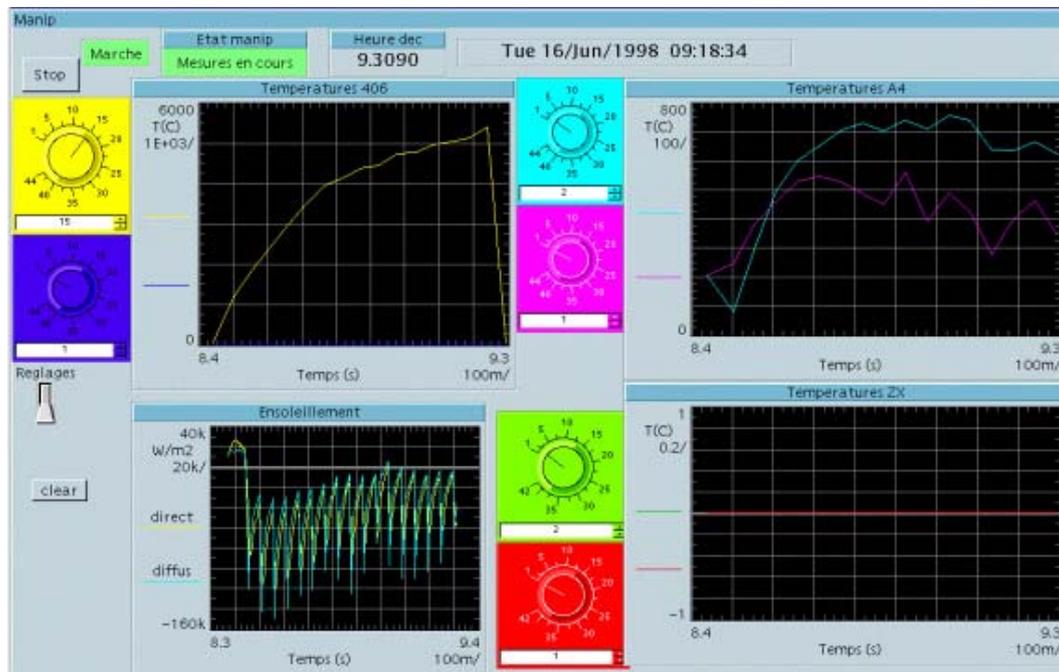


Figure 19 : Visualisation à distance des mesures en temps réel

Cet ensemble expérimental a permis d'engranger de très nombreuses heures de mesures du comportement thermique des habitacles automobiles. A notre connaissance, il était le seul, en Europe, à permettre des mesures en situation réelle, l'ensemble des autres bancs d'essais se faisant en conditions artificielles (chambre climatique, ensoleillement simulé par des rangées de lampes).

Il a permis aussi de tester rapidement et à moindres frais des solutions technologiques innovantes, de valider nos codes de calculs et de mieux connaître et comprendre le rôle des différents transferts dans l'inconfort thermique des habitacles automobiles.

2.3 : Les modèles spécifiques de transferts thermiques

Dans cette partie, nous verrons l'évolution des hypothèses de base choisies tout au long de ce programme de travail, avec, en parallèle, l'évolution des codes de simulation développés.

La problématique générale de l'ensemble de ces études était donc la connaissance de l'évolution des conditions thermiques à l'intérieur d'un habitacle automobile, afin de pouvoir en réguler l'ambiance. C'est-à-dire essayer d'y créer et maintenir des conditions de confort thermique, en fonction du climat extérieur (température, ensoleillement), et par régulation commande des systèmes de chauffage et/ou de climatisation.

Le premier écueil auquel nous nous sommes heurtés était lié à la notion même de confort thermique : toutes les études disponibles correspondaient à un environnement bâti, pour lequel les conditions thermiques sont notablement différentes, et où on essaie de maintenir la neutralité thermique (bilan des échanges du corps humain nul).

Les principales différences sont liées notamment, pour l'habitacle automobile, à l'importance de l'intrant solaire (surfaces de vitrage) et aux vitesses d'air obtenues par ventilation.

Un autre phénomène qui différencie l'automobile et les bâtiments est le facteur temps. L'inertie thermique et les temps d'occupation moyens sont beaucoup plus faibles dans le cas à étudier, obligeant des installations de climatisation surpuissantes, générant elles mêmes des transitoires notoirement inconfortable.

Pour résumer, on pourrait dire que le confort thermique, même en régime permanent, n'est jamais atteint dans un habitacle automobile, selon les critères admis dans les bâtiments. On ne peut donc qu'espérer minimiser l'inconfort thermique : on peut penser qu'il est moins inconfortable de survivre dans un habitacle où il fait 40 °C que dans un autre où il en fait 60 !

2.3.1 : Modèles à un nœud d'air [T2]

L'étude a commencé en 1990, en parallèle avec les premières expérimentations menées. Il a été très rapidement décidé de privilégier les transferts conductifs et radiatifs, et de reporter à plus tard une représentation réaliste des courants convectifs internes. Globalement, ceux-ci avaient peu d'influences sur les bilans énergétiques globaux au niveau de l'habitacle, et cela permettait de tester un certain nombre de procédés innovants, basés sur les caractéristiques optiques de différents composants (vitrages, revêtement internes), ou la modification de l'inertie thermique de certains d'entre eux.

L'écriture des équations sous forme algèbre différentielle a été réalisée selon la méthode générale décrite au chapitre 1, et le solveur utilisé, NEPTUNIX, a permis de bâtir un simulateur robuste, permettant d'étudier des régimes transitoires conformes à la réalité des habitacles exposés au soleil.

Les résultats des simulations ont ensuite été comparés aux mesures obtenues sur le premier banc d'essais, ce qui a prouvé la pertinence des hypothèses prises en compte. Cela nous a permis de faire quelques études paramétriques, en vue de mieux cerner l'efficacité de certaines améliorations dans la conception de l'habitacle.

Avec cette version, pourtant limitée à un seul nœud d'air, nous avons obtenu un certain nombre de résultats quantitatifs intéressants, certains conformes à l'intuition, d'autres plus surprenants.

2.3.1.1 : Effet de la couleur de la carrosserie

La première étude a porté sur la couleur du véhicule. Par rapport à notre véhicule de référence (une PEUGEOT 405 de couleur bleu marine) nous avons testé quelques couleurs plus claires, et une peinture noire.

Les caractéristiques optiques des différentes peintures testées sont données dans le tableau ci-dessous : elles varient peu en émissivité dans l'infra rouge lointain, mais beaucoup en absorption du rayonnement solaire. On peut aussi y lire les résultats obtenus pour certaines températures testées.

Couleur	Données		Températures obtenues en °C			
	Emissivité Infra rouge	Absorption solaire	Air	Tableau de bord	Siège avant	Dossier siège avant
Bleu marine	0,8	0,8	66,6	89,9	70,7	77,0
Blanc	0,8	0,2	56,7	82,4	60,0	67,0
Noir	0,9	0,85	68,0	91,3	72,0	78,2

Les résultats en températures ont été obtenus dans des conditions météorologiques identiques : la voiture blanche est en moyenne 10 °C moins chaude que la voiture noire, tant pour la température de l'air intérieur que pour celle des parois. La couleur de la voiture joue donc un rôle non négligeable dans le comportement thermique de l'habitacle.

2.3.1.2 : Effet du matériau constituant la carrosserie

Nous avons testé une carrosserie en acier (la référence), puis le même véhicule avec une carrosserie en ABS (autre matériau utilisé couramment dans le domaine automobile).

Malgré les caractéristiques physiques très différentes (notamment la conductivité thermique), et des épaisseurs inégales, les résultats en termes d'inconfort thermique, dans les mêmes conditions d'exposition au soleil, se sont révélés très proches : moins de 1 °C d'écart sur toutes les températures calculées.

2.3.1.3 : Effet des caractéristiques optiques des vitrages

Les vitrages sont les principaux responsables des conditions thermiques régnant à l'intérieur d'un habitacle automobile exposé au soleil. Peut-on, en faisant varier leurs propriétés optiques, diminuer les niveaux de températures obtenus ?

A partir des caractéristiques des vitrages présents sur notre véhicule test, et en tenant compte des législations en vigueur (qui imposent une transmission minimale de la partie visible du rayonnement solaire), nous avons proposés d'autres vitrages, disponibles sur le marché, aux propriétés optiques différentes, puis des vitrages virtuels, aux performances idéales.

Les résultats obtenus ne sont pas aussi intéressants que ce que l'on pouvait prévoir. Les meilleurs vitrages réels ne font gagner en moyenne que 5 °C sur les températures, et les vitrages « idéaux » seulement entre 12 et 15 °C sur les températures de surface les plus inconfortables.

2.3.2.4 : Effet de l'absorption solaire des revêtements internes

Les garnitures intérieures des habitacles ne sont jamais choisies pour leur impact sur le confort thermique, mais plutôt à partir de critères de coût et d'esthétique.

Nous avons donc testé différents tissus et revêtements virtuels, avec des coefficients d'absorption du rayonnement solaire allant de 0,6 (la référence) à 0,2 (tissus presque blancs).

Couleur	Données		Températures obtenues en °C			
	Emissivité Infra rouge	Absorption solaire	Air	Tableau de bord	Siège avant	Dossier siège avant
Référence	0,95	0,8	66,6	89,9	70,7	77,0
Blanc	0,95	0,2	45,4	37,6	42,5	42,8
Jaune	0,95	0,35	52,2	44,7	48,7	50,7
Gris	0,95	0,5	56,0	55,3	55,6	59,0

Les résultats sont assez spectaculaires, car on gagne presque 20 °C sur la température d'air et plus de 60 °C sur les surfaces directement exposées au rayonnement solaire (qui passent de 90 à moins de 40 °C). Cependant, il semble évident que cette valeur de 0,2, obtenue pour des tissus propres, ne doit pas résister longtemps au vieillissement lié à l'usage, et que la planche de bord avec une telle réflexion ne pas être autorisée, car elle créerait un éblouissement permanent du conducteur. Il y a cependant un intérêt non négligeable à concevoir un intérieur d'habitacle clair, tout en respectant le confort visuel du conducteur et des passagers.

2.3.2.5 : Synthèse de diverses solutions technologiques passives

Quels sont les résultats obtenus par l'association de diverses innovations technologiques réalistes appliquées dans notre véhicule de référence ?

Il a été assez facile d'obtenir, avec le simulateur, une réduction de la charge thermique d'environ 50 %, en associant vitrages optiquement performants, peinture extérieure et revêtements intérieurs clairs. Cependant, il nous a été difficile d'améliorer ces résultats déjà très intéressants : les limites des solutions entièrement passives semblaient atteintes.

2.3.2.6 : Développement de modèles réduits

A coté d'un grand nombre d'autres essais de solutions technologiques plus ou moins réalistes, dont nous venons de voir quelques exemples, une étude particulière a été menée au cours de cette thèse, concernant la mise au point de modèles réduits (et très rapides) des températures obtenues au sein de l'habitacle automobile.

Après linéarisation des transferts thermiques, nous avons appliqué des techniques de réduction de modèles par identification développées au sein du laboratoire, et des modèles spécifiques de quelques équations seulement nous ont permis de calculer très rapidement

l'évolution des températures choisies tout au long de séquences quelconques de sollicitations extérieures.

Par exemple, les constantes de temps principales qui permettent de modéliser au mieux le comportement de la température du nœud d'air interne sont respectivement de 17,5 minutes et 46 minutes pour notre véhicule de référence.

La même technique de réduction a été aussi appliquée à d'autres températures, avec, pour la planche de bord, par exemple, une constante de temps principale de 67 minutes.

2.3.2.7 : Conclusions sur le modèle à un nœud d'air

Ce premier modèle, à un nœud d'air, nous a donné des indications très intéressantes sur l'intérêt de tester telle ou telle innovation technologique. Repris au niveau de son développement informatique, il fut le cœur du logiciel ATHEBES[®], qui lui a succédé, et qui a permis de capitaliser l'ensemble des développements théoriques effectués dans le cadre de ces recherches.

2.3.2 : Modèle « nodal » des écoulements internes : le logiciel ATHEBES[®] [T4]

A l'analyse des premiers résultats obtenus, et des progrès effectués dans le cadre des recherches sur les modèles zonaux, nous avons proposé, dès 1992, à notre partenaire industriel une adaptation de la méthode zonale, ou « nodale », au cas de l'habitacle automobile. Comme cela a été décrit dans le chapitre 1, les zones étaient définies par leurs écoulements caractéristiques, soit à partir des panaches au dessus des surfaces chaudes, soit par les couches limites le long des parois.

Ainsi, avec un découpage de l'enveloppe en un nombre restreint de surfaces, et en limitant le nombre de volumes d'air à une dizaine, en tenant compte ou non de zones caractéristiques des jets d'air (chaud ou froid) nous avons rapidement obtenu des résultats représentant très bien la dynamique des phénomènes. De plus, les comparaisons effectuées avec les mesures obtenues sur le banc d'essais ont prouvé une précision en tout point inférieure à 2 °C.

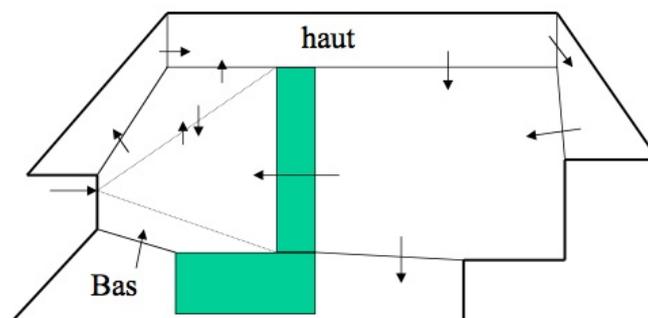


Figure 19 : Découpage du volume d'air intérieur en zones

Cette approche pragmatique, élaborée au cours de 3 thèses successives, a généré, comme résultat intermédiaire, le logiciel ATHEBES[®], qui a connu un succès certain auprès des industriels du domaine. Avec une prise en main simple, il donne, avec rapidité, une précision suffisante pour permettre la comparaison de l'impact de conceptions différentes, notamment au niveau des caractéristiques des vitrages, sur les profils de température au sein de l'habitable. Il est actuellement toujours utilisé dans le centre de recherche de SEKURIT, filiale automobile du groupe SAINT GOBAIN, et chez FAURECIA, un des premiers équipementiers français.

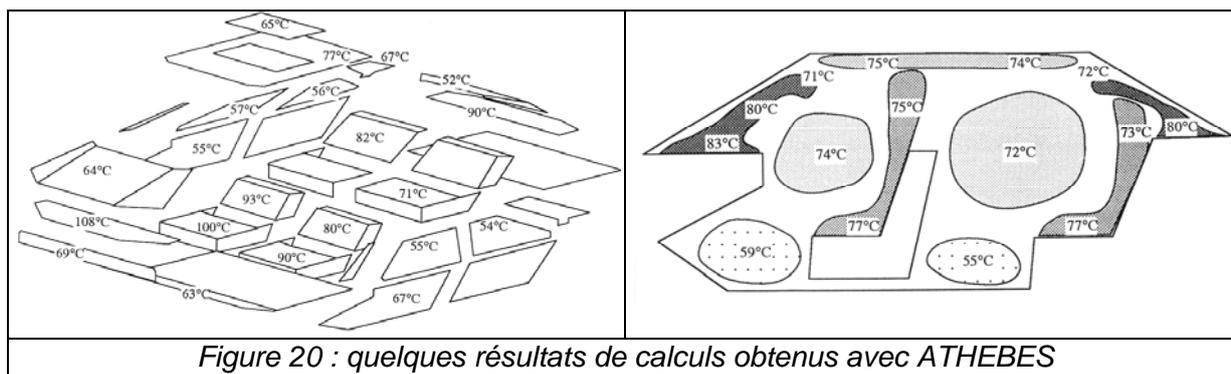


Figure 20 : quelques résultats de calculs obtenus avec ATHEBES

2.3.3 : Résultats de quelques études menées

La démarche globale, associant logiciel et essais en ensoleillement naturel ou en chambre climatique, a été réutilisée, entre autres, pour mettre au point des systèmes performants de préchambrage de l'habitable (refroidissement évaporatif par génération de gouttelettes), pour proposer des modifications dans la conception des planches de bord pour éviter les surchauffes locales ...

2.3.3.1 : préchambrage par convection naturelle [B1 à B3]

L'idée à la base de cette proposition d'étude était de profiter du moteur thermique convectif généré par l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur de l'habitable (écart pouvant dépasser les 40 °C).

Une première étude expérimentale, basée sur l'utilisation de l'entrée d'air de renouvellement classique (sortie au niveau de la planche de bord), et une ouverture partielle du toit ouvrant, avait donné des résultats très médiocres :

- l'air entrant étant échauffé par son passage au travers du bloc moteur et de la planche de bord ;
- les pertes de charge étaient telles que les courants engendrés étaient très faibles ;
- il y avait un court-circuit entre la planche de bord et le toit ouvrant, et très peu de volume était concerné par ce mouvement d'air.

En face de ces mauvais résultats, nous avons tenté de proposer une solution plus performante. Par l'aménagement d'une trappe au niveau de la caisse (fermée en roulage mais ouverte à l'arrêt), et l'ouverture de clapets au niveau du toit, il était envisagé de

produire un taux de renouvellement d'air suffisant pour gagner quelques degrés sur la température de stagnation au niveau des places de passagers.

Il n'y avait *a priori* pas trop de problèmes technologiques dans ces innovations, mais, si elles devaient être adoptées, il eut été nécessaire de vérifier qu'elles n'engendraient pas une dégradation de la rigidité du véhicule.

La prise en compte de ces entrées et sorties d'air était facilement réalisable dans ATHEBES[®], par ajout d'un débit à température extérieure dans la zone d'air attenante à la trappe d'entrée, et par extraction d'un débit massique d'air équivalent dans les zones supérieures, attenantes aux bouches d'extraction.

Les diverses questions posées portaient sur le nombre, la taille et la position de ces ouvertures, de façon à obtenir un rafraîchissement maximal et réparti dans tout le volume habitable.

Les résultats obtenus par simulation, et vérifiés par une expérience spécifique sur un véhicule exposé sur l'aire d'essais furent décevants :

- D'une part, le moteur convectif existe bien, mais sa puissance diminue rapidement avec l'écart de température ;
- D'autre part, si l'air voit bien, en moyenne, sa température baisser d'environ 15 °C, il n'en est pas de même pour les surfaces ensoleillées des sièges et de la planche de bord, qui ne perdent jamais plus de 5 °C, ce qui a été jugé insuffisant par nos partenaires.

C'était donc une fausse bonne idée, et elle fut abandonnée.

2.3.3.2 : préchambrage par refroidissement évaporatif [T7]

Cette étude a aussi été menée avec notre partenaire IMRA Europe, dans le cadre d'une thèse. Elle portait sur le pré-conditionnement de l'air par procédé de brumisation. Ce procédé était déjà utilisé dans les serres agricoles pour maintenir des conditions de cultures acceptables, en été, pour les plantes. Ce procédé consiste à éjecter, dans le volume à rafraîchir, un mélange d'eau et d'air sous pression.

Nous avons d'abord choisi un autre type de brumisation, plus adapté aux petits volumes constituant les habitacles automobiles, capable de produire un brouillard de micro gouttelettes d'eau (diamètre moyen : 3 micromètres) à l'aide d'un procédé piézo-céramique.

Les problèmes technologiques liés à l'adaptation de ce procédé de rafraîchissement ont été assez rapidement résolus et intégrés de façon rationnelle par nos partenaires industriels :

- un réservoir d'eau dans le coffre ;
- une pompe pour envoyer l'eau vers le plafond de l'habitacle dans un récipient contenant l'appareillage piézo-céramique ;
- un ventilateur expulsant le brouillard créé en le répartissant dans l'habitacle.

Cependant, la contrainte principale était de ne pas mouiller les surfaces intérieures, c'est-à-dire que, en fonction des conditions thermodynamiques régnant dans l'habitacle, le temps d'évaporation des gouttelettes devait être inférieur au temps de parcours du nuage entre sa production et les parois.

Dans le cadre de ce travail, nous avons donc développé un simulateur du comportement d'un nuage de gouttelettes, afin de prédire le temps d'évaporation en fonction des débits éjectés et des conditions ambiantes. Des expérimentations ont été menées dans 2 configurations de véhicules (classique et monospace) pour valider nos calculs.

Le modèle que nous avons développé reprend le concept du modèle cellulaire de ZUNG.

Les principales hypothèses prises lors de la formulation des équations sont :

- Le nuage est un arrangement de compacité 0,74 des sphères d'influence.
- Les sphères internes peuvent se saturer, par contre, celles de la couche externe s'évaporent vers l'extérieur comme une demie goutte posée sur une surface, en doublant le temps d'évaporation ainsi que le débit de vapeur.
- Les propriétés thermo physiques de l'air et de la vapeur d'eau sont calculées à chaque pas de temps en fonction de la température.
- L'air et la vapeur d'eau sont considérés comme des gaz parfaits.
- Le rayonnement thermique est négligé.
- Les sphères d'influence sont imperméables aux transferts massiques et thermiques.
- Les équations sont résolues en symétrie sphérique.
- L'aspect microscopique est pris en compte par les facteurs de correction de KELVIN et de KNUDSEN.
- La répartition de la vapeur autour de la goutte et dans la zone de calcul est considérée homogène et uniforme.
- Le phénomène d'évaporation est représenté par la relation de MAXWELL en négligeant le flux de retour de STEFAN.
- Les gouttes et les sphères d'influence restent sphériques.

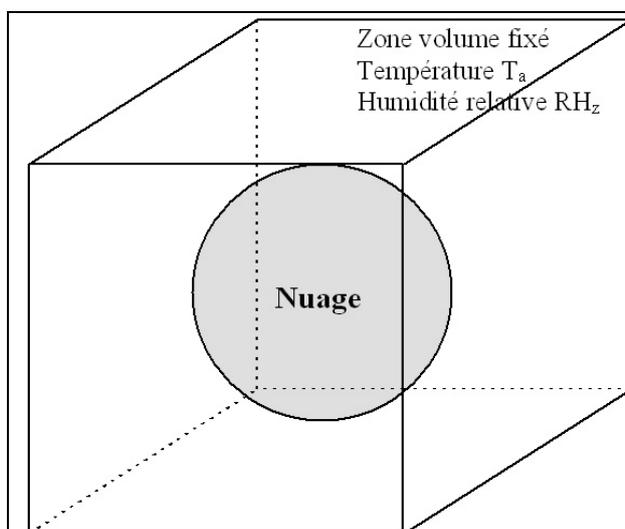


Figure 20 : Approximation des géométries

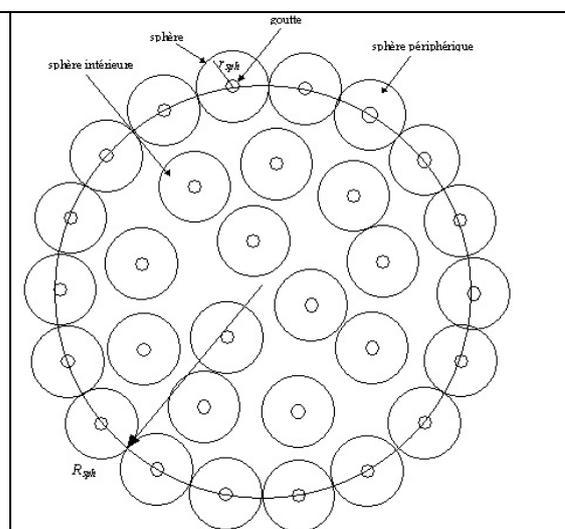


Figure 21 : Modèle de nuage

Les principales équations prises en compte sont :

- La variation de masse qui décrit l'évolution de la taille de la goutte :

$$\frac{d(d_g)}{dt} = - \frac{2}{\pi \rho_g d_g^2} \frac{dm_g}{dt}$$

- Le bilan énergétique sur le maillon élémentaire :

$$m_{ah} C_{pah} \frac{dT_{ah}}{dt} = -2 \pi d_g \lambda_{ah} (T_{ah} - T_g) - L_{vap} \frac{dm_g}{dt}$$

- L'évaporation, basée sur la diffusion au sens de MAXWELL :

$$\frac{dm_g}{dt} = 4 \pi r_g D_v (c_s - c_0) \exp \left(\frac{-3 r_g D_v t}{(r_{sph} - r_g)^3} \right)$$

- L'approche des conductivités infinies, utilisée pour la goutte :

$$L_{vap} \frac{dm_g}{dt} = 4 \pi r_g^2 \lambda_{ah} \left. \frac{dT_{ah}}{dr} \right|_{r=r_g} + m_g C_{pe} \frac{dT_g}{dt}$$

- Le courant convectif, représenté par les nombres de SHERWOOD et de NUSSELT :

$$Sh = 2 + 0,6 R_g^{1/2} S_c^{1/3} \quad Nu = 2 + 0,6 R_g^{1/2} P_r^{1/3}$$

A partir des conditions d'évaporation, au niveau des gouttes externes, puis couche par couche, il nous a été possible de déterminer le temps d'évaporation d'un nuage complet, ainsi que l'impact sur la température et l'humidité relative obtenues en fin d'évaporation.

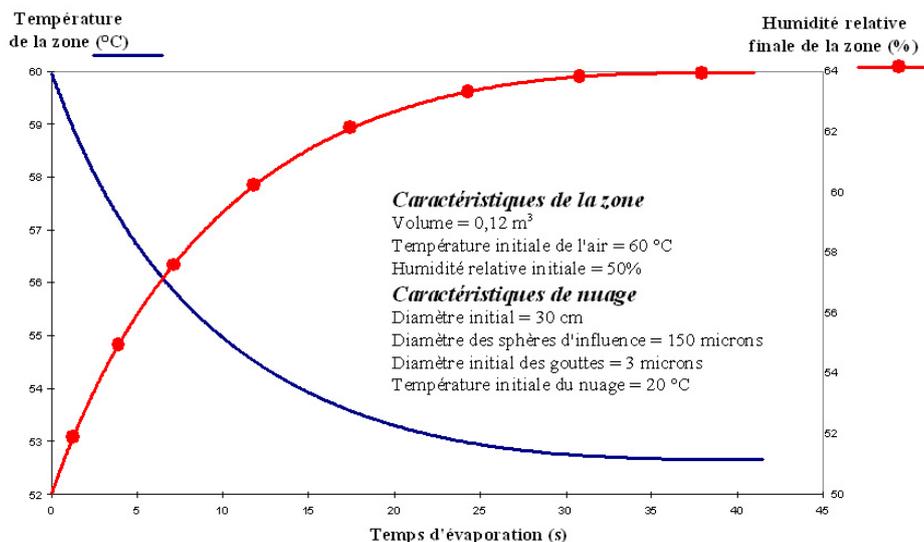


Figure 22 : temps d'évaporation des gouttelettes

Dans les conditions rappelées dans la figure, le calcul prévoit une décroissance de 7 °C en une vingtaine de secondes, pour une augmentation de l'humidité relative de 51 à 64 %.

Cela correspond aux résultats d'essais effectués sur site. Avec des débits d'eau plus importants, nous avons pu mesurer une baisse de température d'air dans l'habitacle de 30 °C (de 74 à 44 °C) en moins de 30 secondes. Les résultats obtenus firent l'objet de vérifications en présence d'ingénieurs de TOYOTA, et ont intéressé la Direction Marketing de la maison mère de nos partenaires. Après un développement technologique et une adaptation industrielle, ce procédé a été proposé en option sur les voitures haut de gamme de la marque pendant quelques années.

2.3.3.3 : étude thermique de planches de bord [R32]

A partir de 1995, un nouveau partenaire s'est intéressé à nos travaux : l'équipement ECIA, filiale du groupe PSA, dont la volonté affichée était, à l'époque, de proposer aux constructeurs automobiles un habitacle complet, et conçu pour offrir à l'utilisateur un confort thermique et une sécurité maximale.

En réalité, les retours de certains véhicules de haut de gamme avec des planches de bord présentant des cloques inesthétiques autant que visibles n'étaient pas vraiment appréciés par la Direction de cette entreprise, qui a décidé de mettre en place un programme de recherche pour remédier à cette situation. Nous lui avons donc proposé une thèse CIFRE.

Le but de cette thèse était la modélisation et l'étude du comportement thermique de la planche de bord d'un véhicule automobile soumises à des contraintes climatiques réelles. Il s'agissait de déterminer sa cartographie thermique en vue d'évaluer les contraintes mécaniques induites par ce champ de température.

Après avoir instrumenté finement la planche de bord de notre véhicule d'essais, une première série de manipulations a démontré la nécessité de modifier la prise en compte de cet élément dans nos codes de calculs. En effet, si la température extérieure de la planche de bord, très influencée par l'ensoleillement direct, était bien représentée dans ATHEBES, il n'en était pas de même pour l'intérieur de l'élément, notamment au niveau des différents gradients présents dans la partie supérieure de l'objet.

Nous avons donc créé un module spécifique : planche de bord, très détaillé, bi dimensionnel, ATHEBES servant alors de générateur de conditions aux limites pour ce module.

Il a fallu notamment prendre en compte les diverses cavités, au sein desquelles des échanges par convection naturelle ont été introduits. De même, la planche de bord contenant de plus en plus de câbles électriques et objets divers, il a fallu, notamment pour les phénomènes d'inertie, les prendre en compte.

Après avoir validé les différentes hypothèses sur des mesures réalisées sur plusieurs planches de bord de véhicules divers, nous avons pu tester diverses solutions pour éviter les

surchauffes locales en surface, et diminuer les gradients locaux, qui entraînaient une décohésion des différentes couches constituant l'enveloppe de la planche de bord.

Après diverses propositions testées virtuellement, une solution pratique a été retenue, après avoir démontré qu'elle était réalisable sur les chaînes de montages du service de production.

Il s'agissait d'associer une sous-couche conductrice de la chaleur (en seconde peau de la planche) à des ponts thermiques reliés à la caisse du véhicule (partie non exposée au soleil et restant à la température ambiante). Un prototype a été réalisé et testé avec succès sur le banc d'essais : les températures maximales obtenues étaient moins chaudes de 15 °C, et les gradients locaux beaucoup plus faibles. Cette solution entraînait cependant un alourdissement de la planche de bord, et faisait perdre un peu de souplesse au toucher de la surface. A ce stade du développement, le produit a été livré au bureau d'études du partenaire, et je ne sais pas si une série de telles planches de bord a réellement été montée sur un ou plusieurs véhicules.

2. 4 : Conclusion

Durant les 8 années de travail dans ce domaine, nous avons mis en place une méthodologie, basée à la fois sur des simulateurs efficaces et des bancs d'essais en ensoleillement naturel performants, mis progressivement au point au cours de 4 thèses successives.

Nous avons toujours travaillé avec des partenaires industriels, exigeants, et souvent peu communicatifs sur les résultats obtenus en commun. Mais nous avons connu des succès scientifiques et techniques, tant du côté de la validité de nos résultats de simulation que des procédés innovants que nous avons vus réalisés pour le marché automobile.

Nous aurions pu aller plus loin dans le domaine, mais nous aurions sans doute dépassé la frontière entre la recherche et le développement technologique, car les demandes de prestation devenaient de plus en plus nombreuses, avec des propositions émanant de grands groupes industriels (Renault, Delphi, Alsthom...).

Nous avons cessé nos activités dans le domaine de la thermique des habitacles automobiles mi 1998, à la convergence de plusieurs phénomènes :

- Une montée en puissance de l'accord-cadre entre le Centre d'Energétique de l'Ecole des Mines de Paris et la Direction de la Recherche de Gaz de France, dont j'étais le responsable, qui me prenait de plus en plus de temps ;
- Une forte implication personnelle dans le développement des systèmes basés sur des piles à combustibles pour la traction automobile ;
- Un redémarrage prévu des activités de recherche et développement autour des procédés solaires thermiques, auquel je tenais à participer ;
- Un désengagement des 2 principaux partenaires (TOYOTA et ECIA), à la suite de modification des stratégies industrielles, entraînant des regroupements d'équipes de recherche ;

- Une volonté de l'établissement parisien du Centre d'Energétique de l'Ecole des Mines de Paris de prendre en main la suite des recherches avec ses propres partenaires.

C'est donc l'équipe de Denis CLODIC, à Paris, qui a repris les activités de recherche dans ce domaine, avec des problématiques plus liées à la climatisation active des habitacles.

Cependant, de ces quelques 8 années passées à participer à la mise au point des innovations avec les industriels du domaine automobile, j'ai retiré de grandes satisfactions, au niveau des résultats concrets obtenus, de la reconnaissance pour l'expertise acquise, et du placement des personnels que j'y ai encadrés.

J'y ai surtout appris l'humilité du chercheur, toujours plein d'idées géniales, devant la dure réalité du monde industriel, avec ses secrets, ses fausses confidentialités, son sens pratique imparable, et ses budgets de recherche parfois généreux, mais toujours très difficiles à obtenir.

3 : Applications aux transferts thermiques dans les bâtiments

Des deux domaines d'études qui ont été mes préoccupations, les études les plus avancées, au début des années 1990, étaient celles consacrées au bâtiment.

Cependant, il était à l'époque impossible de répondre à une question pourtant très simple : quel est le meilleur émetteur de chaleur ? Dit autrement, un convecteur électrique générerait-il un meilleur confort thermique qu'un radiateur à eau chaude ? Et lequel consommait le plus d'énergie pour engendrer un confort donné.

Les résultats obtenus par les études que nous avons menées, en partenariat avec l'ensemble des laboratoires français du domaine, ont permis de mieux connaître les transferts thermiques régnant dans les pièces d'habitation, de quantifier les conditions de confort et les consommations énergétiques, pour apporter des solutions technologiques innovantes.

De plus, quand on s'intéresse à l'évolution des températures dans les pièces des bâtiments, on en vient naturellement à étudier :

- les systèmes qui permettent d'en maintenir l'ambiance « confortable », avec la meilleure efficacité énergétique,
- les caractéristiques des enveloppes qui bornent le volume intérieur.

Une partie non négligeable des travaux de recherche que j'ai menés depuis 1989 est liée à ces deux pôles d'intérêt. Ils sont encore d'actualité début 2007.

3.1 : La thermique des bâtiments

3.1.1 : Les modèles de transfert thermiques internes

En 1990, il existait des modèles « fins » de simulations en régime dynamique, avec un découpage des enveloppes en nombreuses couches homogènes, mais une représentation de la masse d'air.

Des techniques de réduction de modèles, mises en œuvre à partir des modèles fins par analyse modale, permettaient de représenter un bâtiment par une enceinte unique dont le comportement thermique moyen était régi par quelques équations aux paramètres plus ou moins représentatifs de variables physiques.

Par ailleurs, il existait des modèles de régime permanent pour les écoulements d'air, avec pour moteur des panaches autour des émetteurs de chaleur (approche zonale).

Les critères de qualité d'ambiance en vigueur à l'époque, d'ailleurs établis uniquement pour les conditions thermiques régnant dans les bâtiments étaient :

- soit une température moyenne par zone (air ou « résultante ») ;

- soit basés sur les travaux statistiques de FANGER, établis à la neutralité thermique, en régime permanent, avec la quasi impossibilité de prédire, par des calculs numériques trop lourds ou trop imprécis, l'évolution de ces critères au cours du temps.

Nous avons donc participé au développement de 3 nouveaux environnements de simulation des transferts thermiques à l'intérieur des bâtiments, dont la philosophie était basée sur les principes exposés au chapitre 1 de cet ouvrage.

Les modèles développés pour le Groupe de Recherche sur les Emetteurs de Chaleur (GREC) et pour AISIN SEIKI (logiciel BTHEBES®) restaient des modèles mono volume, mais reprenaient l'approche zonale en régime dynamique, avec couplage aux caractéristiques de l'enveloppe et des systèmes de climatique. Pour Gaz de France, dans le cadre de la constitution d'une modélothèque du bâtiment, les modèles ont été étendus à la représentation de bâtiments complets, avec couplage entre plusieurs pièces avec des états thermiques pouvant être différents.

3.1.1.1 : Le modèle GREC

Les principales innovations apportées dans la connaissance et la prédiction du comportement thermique des bâtiments en relation avec leurs systèmes d'émission de chaleur (radiateurs, convecteurs, planchers chauffants...) l'ont été dans le cadre du Groupe de Recherche sur les Emetteurs de Chaleur [GREC], dont j'ai coordonné les travaux tout au long de son existence, de 1989 à 1996 [L1].

Créé sous l'égide de l'Agence Française pour la Maîtrise de l'Énergie, maintenant ADEME, et avec le concours actif des Directions de la Recherche de Gaz de France et d'Électricité de France, le GREC a regroupé, pendant plus de 7 années, 8 laboratoires français (dont le Centre d'Énergétique de l'Ecole des Mines de Paris) travaillant dans le domaine des émetteurs de chaleur. Sa mission était de mettre à la disposition des professionnels des outils numériques et expérimentaux leur permettant de mieux connaître les caractéristiques des émetteurs de chaleur, pour une utilisation plus rationnelle des potentialités spécifiques de chaque système de chauffage.

Les principaux résultats obtenus l'ont été avec la mise au point d'outils numériques, assez simples pour pouvoir simuler le comportement dynamique des émetteurs dans leur environnement sur de longues périodes, mais assez précis pour permettre la comparaison, en régime dynamique, des critères de qualité d'ambiance, donc de différencier le comportement des divers émetteurs.

Le maillage du volume intérieur [5] est basé sur les mêmes principes que ceux qui ont été exposés au chapitre 1, avec 2 éléments thermiques principaux :

- L'émetteur de chaleur, qui engendre un panache, moteur principal du mouvement de l'air dans la pièce ;
- Le vitrage, que l'on peut considérer comme une paroi froide, entraînant la création d'une couche limite thermique qui peut être en conflit avec le panache de l'émetteur, quand celui-ci est en allège.

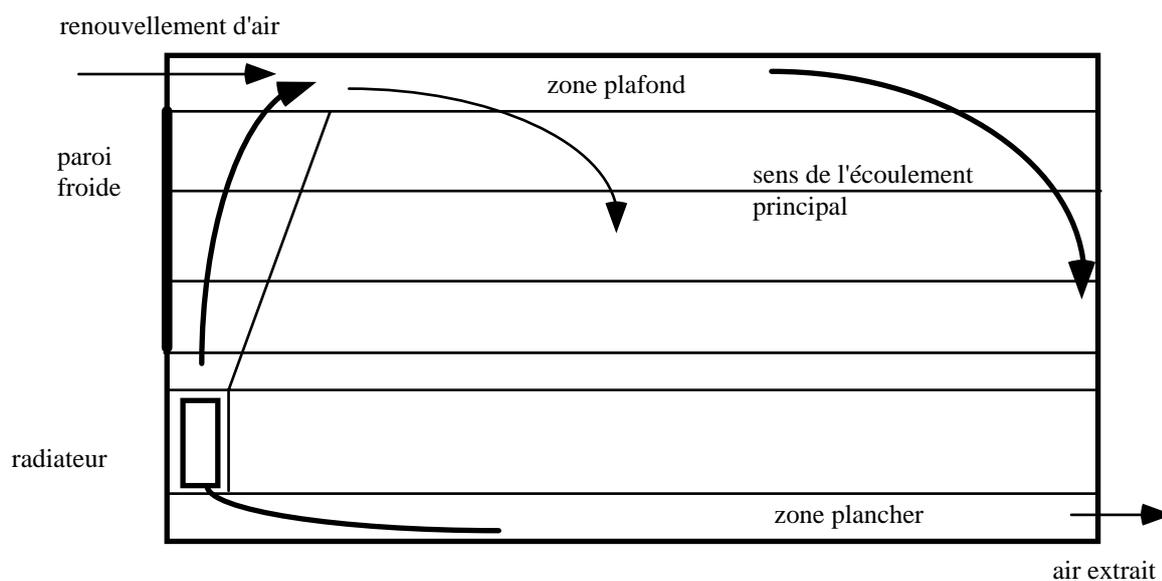


Figure 23 : Exemple de découpage d'une pièce d'habitation équipée d'un émetteur de chaleur localisé en allège de fenêtre

Ce code de calcul, validé par des expérimentations en chambres climatiques, effectuées avec différents émetteurs de chaleur par les partenaires du GREC, a permis de mieux connaître le comportement des différents types d'émetteurs de chaleur, et d'émettre un certain nombre de recommandations à la profession (voir plus loin).

3.1.1.2 : BTHEBES®

En parallèle des travaux effectués pour le GREC, nous avons développé, pour notre partenaire IMRA Europe, un autre code de calcul, en adaptant la méthode générale exposée au chapitre 1, correspondant à une version bâtiment du logiciel ATHEBES® [C16].

Par rapport au modèle développé par le GREC, on a pris en compte l'aspect tridimensionnel des échanges, et on s'est donné la possibilité d'introduire du mobilier, notamment pour des calculs d'éclairage reçu par des plans de travail.

Enfin, les apports solaires ont été traités par absorption uniforme sur toutes les parois éclairées, hypothèse jugée largement suffisante et validée par les résultats d'une étude spécifique.

Ainsi, associant des modèles zonaux générés automatiquement à partir de la description du local, au solveur algèbre différentiel BASILE, de la SII SIMULOG, le logiciel BTHEBES® a permis de simuler de façon précise le comportement thermique d'une pièce d'habitation et d'un volume représentant un local industriel. Nous avons validé les résultats obtenus sur les expérimentations effectuées pour le GREC.

De plus, grâce aux zones de jet, nous avons introduit la possibilité de modéliser un chauffage aéraulique. Les jets d'air chaud correspondant ont été traités comme présenté au chapitre 1. La représentation des écoulements internes, en régime dynamique, a été comparée avec succès à des simulations effectuées sur un code spécifique de mécanique des fluides (N3S).

3.1.1.3 : Le modèle complet de bâtiment

Les principales limites du travail effectué tant dans le cadre du développement de BTHEBES® que du GREC étaient liées au fait que les résultats obtenus l'ont été pour une cellule unique et isolée. En collaboration avec Gaz de France, nous avons utilisé l'environnement de modélisation ALLAN-SIMULATION pour simuler des bâtiments complets (jusqu'à un immeuble de 5 étages), en couplant le comportement de divers volumes représentant des pièces de vie ou des appartements, chacun pouvant avoir des comportements thermiques différents.

La thermique des différentes pièces était reliée par la conduction au travers des parois et par les échanges d'air entre pièces au travers des ouvertures (portes intérieures ouvertes ou fermées). Elle était aussi couplée au comportement des systèmes de climatique, avec une prise en compte plus ou moins fine de la génération, de la distribution et de l'émission de chaleur, en fonction de diverses loi de régulation commande.

Avec ces divers environnements de simulation, nous avons pu obtenir des résultats originaux au travers de nombreuses études pour EDF, GDF ou l'ADEME, surtout liées aux émetteurs de chaleur et aux systèmes de chauffage et leur régulation.

On a ainsi pu répondre à un certain nombre de questions telles que :

L'intérêt de la modulation de la puissance d'une chaudière mixte au gaz naturel ;

L'impact de la position du thermostat sur le confort et la consommation d'énergie d'une maison individuelle ;

La part de l'énergie effectivement récupérée dans une ambiance par les ampoules électriques à effet Joule (en comparaison avec les ampoules dites « basse consommation »)...

3.1.2 : Les émetteurs de chaleur : les apports du GREC

Les premiers résultats obtenus dans le domaine de « l'efficacité énergétique des bâtiments », pour employer le terme consacré actuel, ont permis de départager le comportement des émetteurs de chaleur localisés (convecteurs, radiateurs...) ou non (planchers ou plafonds chauffants). Non seulement on a pu synthétiser de façon claire et consensuelle les qualités et défauts des différents types d'émission, mais on a aussi étudié l'impact de leur position dans une pièce, et mis au point un critère de confort universel, en régime dynamique, adapté à l'environnement de simulation.

Ce critère a été conçu et défini précisément par le CSTB dans le cadre du GREC et a été adopté depuis par plusieurs centres de recherche, dont ceux de Gaz de France.

L'ensemble des résultats obtenus a été consigné dans un ouvrage de librairie [L1], paru aux Presses de l'Ecole des Mines, dont j'ai coordonné la rédaction et rédigé la plupart des chapitres. 5 thèses, dont 2 à l'Ecole des Mines de Paris, ont été soutenues dans le cadre du Groupe de Recherche.

Les résultats principaux sont résumés dans le tableau ci-dessous. Dans le cadre de ces travaux, en plus de la coordination générale du groupe de recherche, j'ai participé activement à la définition de la méthode, et à la synthèse des résultats obtenus

émetteur, type et position	Bâtiment ancien étage courant	Bâtiment neuf étage courant	Maison individuelle sur vide sanitaire
Plancher chauffant à eau calculé selon la norme européenne	Très favorable	Très favorable	Moyen : <i>surisoler ou passer en terre plein</i>
Plafond chauffant électrique	Favorable	Très favorable	Favorable
Convecteur électrique à sortie frontale en allège	Défavorable : <i>trop de pertes par la face froide</i>	Moyen : <i>plus de pertes qu'en opposition</i>	Favorable
Convecteur électrique à sortie frontale en opposition	Moyen : <i>moins de pertes qu'en allège</i>	Favorable	Favorable
Panneau radiant fermé à eau chaude en allège	Favorable	Favorable	Favorable
Panneau radiant fermé à eau chaude en opposition	Moyen : <i>moins confortable qu'en allège</i>	Moyen : <i>moins confortable et plus de pertes</i>	Favorable
Radiateur à eau basse température en allège	Très favorable	Favorable	Très favorable
Radiateur à eau basse température en opposition	Favorable	Moyen : <i>moins confortable et plus de pertes</i>	Favorable
Radiateur à eau de dimensionnement classique en allège	Favorable	Moyen : <i>plus de pertes qu'en opposition</i>	Favorable
Radiateur à eau de dimensionnement classique en opposition	Moyen : <i>moins confortable qu'en allège</i>	Favorable	Favorable

Figure 24 : tableau des recommandations d'utilisation des émetteurs de chaleur

Un certain nombre de conclusions issues de ces travaux ont permis de rectifier quelques idées reçues sur les mérites respectifs des différents émetteurs de chaleur.

On pensait que le convecteur électrique était de loin le moins confortable et le plus consommateur d'entre eux. En fait, tous les émetteurs localisés (radiateur, convecteur, panneaux radiants) ont à peu près les mêmes performances, qui sont globalement 10 % inférieures à celles des émetteurs répartis (plancher chauffant et plafond rayonnant).

Le plafond rayonnant était réputé moins bon que le plancher chauffant : nous avons démontré que leurs performances étaient équivalentes.

Le plancher chauffant (basse température) était considéré comme universellement le meilleur de tous les émetteurs. On s'est aperçu qu'il était le moins bon de tous, en terme de consommation énergétique, dans les rez-de-chaussée de maisons individuelles.

Enfin, nous nous sommes dotés d'un critère de quantification du confort thermique compatible avec les régimes dynamiques et la précision de nos calculs.

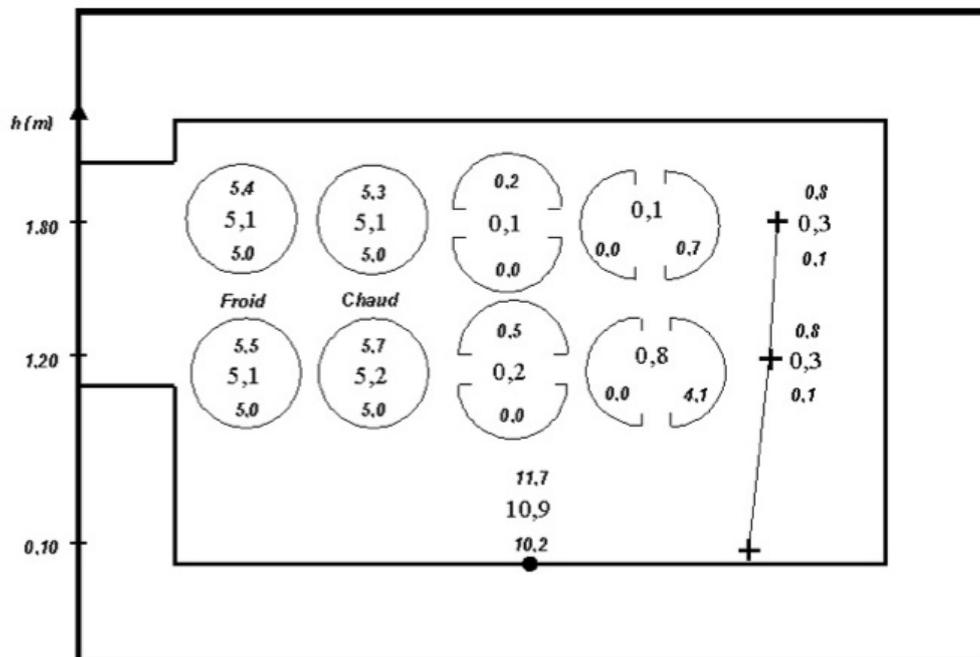


Figure 25 : quantification du confort thermique généré par un radiateur basse température en allège avec une fenêtre en double vitrage

Le critère GRES, qui est une évolution des critères de FANGER en régime dynamique, est basé sur 4 notes (100 voulant dire 100 % d'insatisfaits).

La note G (pour Global) caractérise l'hétérogénéité des températures dans les différentes zones de la pièce : la valeur minimale est 5 (5% de personnes ne sont jamais satisfaites), et l'écart à la consigne est pénalisé par une loi exponentielle, tant pour les valeurs froides que trop chaudes. Sur la figure, on peut lire, dans 4 cercles (2 pour la position assise, 2 pour la position debout), et pour les hétérogénéités froides et chaudes, la valeur moyenne et les valeurs extrêmes obtenues au cours d'une séquence de simulation. Les résultats obtenus sont excellents pour ce type d'émetteur, équipé d'une régulation performante.

Les 4 groupes de valeurs suivants correspondent à la note R, pour asymétrie de rayonnement (asymétrie horizontale ou verticale) : on intègre le rayonnement issu de 2 demies sphères, au centre de la pièce. Là aussi, on fait le calcul pour 2 positions (assis et debout). Ces écarts sont ensuite traduits en termes d'inconfort, avec une base 0. Dans le cas représenté ici, c'est l'asymétrie horizontale en position assise qui est légèrement moins bonne que les autres. Par contre, nous avons pu noter, pour d'autres émetteurs, des écarts entraînant parfois des notes supérieures à 20.

La note suivante, présentée sur une verticale, présente l'écart tête pieds, noté E. Ce critère pénalise les émetteurs qui stratifient la température de l'air dans la zone « utile ». Ce n'est pas le cas pour cet émetteur.

La dernière note, S, pour température de sol, est la plus mauvaise pour ce type d'émetteur, et en règle générale pour tous les émetteurs localisés : le sol est un peu froid par rapport aux normes de confort. Cette note est bien meilleure pour les émetteurs répartis, planchers ou plafonds chauffants. C'est d'ailleurs sur cette note que ces émetteurs se détachent le plus.

Le GREC a donc obtenu des résultats très importants, qui ont permis de mieux comprendre les transferts thermiques dans une pièce chauffée, ainsi que leur couplage avec différents types d'émetteurs de chaleur. Il a permis de passer de calculs en régime statique à des calculs en régime dynamique, bien plus réalistes quant à leurs prévisions.

Les conclusions de ces travaux ont aussi influencé directement les pratiques en cours :

- Gaz de France a préconisé un abandon de la position en allège des radiateurs, économisant en moyenne un tiers de la longueur des tuyaux d'alimentation en eau chaude ;
- Les radiateurs à haute température (80 °C en entrée) ont rapidement été évincés du marché par des radiateurs dits basse température (60 °C) ou « chaleur douce », plus confortable et plus économes ;
- Les panneaux radiants, promis par le marketing à un bel avenir ont vu leur part de marché baisser au profit des convecteurs frontaux, moins chers et aussi performants...

En conclusion de cette partie, j'ai eu la chance de coordonner cette expérience unique, pour laquelle tous les acteurs de la recherche française du domaine ont travaillé de concert, sous les regards attentifs de l'ensemble de la profession.

Cela m'a aussi permis de mener en parallèle d'autres recherches dans le domaine, et de développer notre propre plate-forme logicielle, avec trois partenaires industriels privilégiés : IMRA Europe, Electricité de France et Gaz de France.

3.1.3 : Le chauffage aéraulique

Le GREC n'avait volontairement pas abordé les émetteurs aérauliques (chauffage à air, ventilo-convecteurs...). En complément des travaux du GREC, une approche quelque peu différente a donc été menée en collaboration avec IMRA Europe, pour sa maison mère (AISIN SEIKI du groupe TOYOTA), dont une partie importante de la production concerne les systèmes aérauliques pour le bâtiment.

Nous avons donc développé le logiciel BTHEBES®, destiné aux transferts thermiques dans les bâtiments, adaptation du logiciel de calcul dédié aux habitacles automobiles ATHEBES® (voir chapitre 2).

Ce logiciel nous a permis de proposer des scénarios de régulation de systèmes aérauliques en fonction de leur position dans une enceinte à chauffer, en vue de générer le meilleur confort thermique au moindre coût énergétique [C22].

La figure 26 montre la carte des températures calculées après la mise en route d'un tel système de chauffage à air dans un atelier.

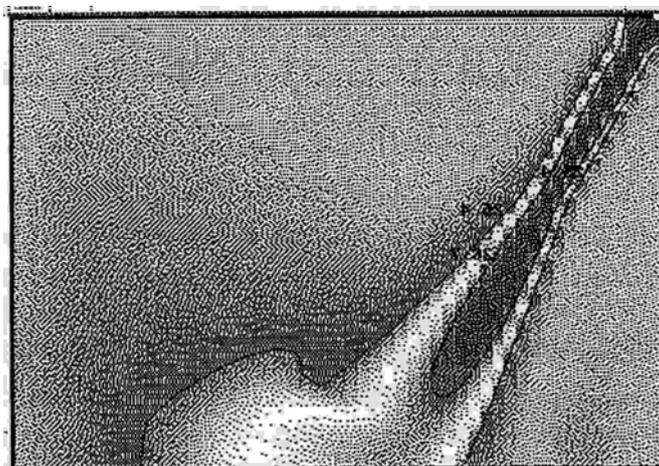


Figure 26 : Coupe médiane de l'interpolation des températures d'air

3.1.4 : La prise en compte des taches solaires

Dans une étude pour Electricité de France [C21], le maillage plus fin de l'enveloppe et la souplesse du logiciel ont permis de déterminer les conditions définissant la meilleure prise en compte des effets de la tache solaire, limitation souvent très importante des logiciels de thermique du bâtiment.

En effet, une des difficultés principales pour la prédiction du comportement thermique est la prise en compte des flux solaires réellement absorbés par les parois internes. Très souvent, l'erreur entre la prédiction et les mesures en site réel est corrélée à l'intensité de l'ensoleillement, souvent simulé par une « surface sud équivalente ».

A l'intérieur du code BTHEBES®, les apports solaires peuvent être modélisés avec différents niveaux de précision. Nous avons donc testé les différentes options, qui ont ensuite été comparées à des résultats d'essais menés par EDF dans des cellules expérimentales sur le site de Cadarache du CEA.

Un premier niveau de précision permet le calcul purement géométrique du flux solaire réellement absorbé par les parois internes d'une pièce équipée d'une fenêtre. Nous avons fait varier la forme de la pièce, la taille de la fenêtre et les caractéristiques optiques des vitrages et des différentes parois internes. Pour une fenêtre de 2 m² dans une pièce rectangulaire de 4 m par 5, avec un flux solaire de 1000 W, la part de l'énergie réellement absorbée passe de 95 % (parois très absorbantes) à 65 % seulement (parois très claires).

Le deuxième niveau de précision consiste à étaler la tache solaire sur toute la surface directement exposée : c'est le niveau standard du calcul de BTHEBES®.

Pour cette étude spécifique, nous avons développé un troisième niveau de précision, dérivé de ce que nous avons mis au point pour l'habitacle automobile : chaque tache solaire est suivie sur son parcours, et toute surface partiellement exposée au rayonnement direct est subdivisée, à chaque pas de temps, pour tenir compte du déplacement de la tache.

Nous avons alors démontré que, sauf dans les cas où il est très important (tenue de matériau...) de connaître la température maximale atteinte sous la tache solaire, ce niveau de précision n'est pas nécessaire.

3.1.5 : Visualisation des panaches [T6]

De même, toujours pour Electricité de France, nous avons mis au point et testé des outils permettant, entre autres, la visualisation et l'analyse de panaches au-dessus d'émetteurs (notamment les ventilo-convecteurs) dans le cadre d'une thèse que j'ai co-encadrée avec le Groupe de Télédétection et Modélisation du Centre d'Energétique de l'Ecole des Mines de Paris. Les résultats obtenus nous ont permis d'affiner notre découpage zonal en présence de tels émetteurs de chaleurs.

3.2 : L'enveloppe des bâtiments

L'enveloppe d'un bâtiment est à la fois sa protection contre les perturbations extérieures, et son interface avec ce même monde extérieur. Depuis plus de 20 ans, c'est plutôt la fonction « isolation » qui a été préconisée et renforcée, permettant une réduction drastique des consommations de chauffage et un filtrage efficace des nuisances sonores. Cependant, en même temps, la taille des ouvrants a augmenté, générant un effet de serre souvent inconfortable. De plus, des systèmes de ventilation de plus en plus sophistiqués ont dû être mis en place pour compenser la moindre porosité d'une enveloppe de plus en plus hermétique.

Mes recherches dans ce domaine des enveloppes ont aussi bien eu pour sujet la mise au point d'isolants de haute performance, que la gestion de l'intrant solaire ou le traitement du renouvellement d'air.

La recherche menée sur les isolants, dans le cadre d'une thèse, était liée au thème « aérogels » du Centre d'Energétique de l'Ecole des Mines de Paris, et nous avons plus spécialement exploré les possibilités de fabrication de tels matériaux, ensuite réduits en poudre et mis sous vide, avec des caractéristiques adaptées à la super-isolation (conductivité thermique inférieure à 10 mW/mK).

Une autre thèse s'est attachée à mettre au point un panneau de façade ventilé, permettant un préchauffage de l'air de renouvellement, tout en gardant l'esthétique appréciée des grandes façades verrières. J'ai aussi participé à un programme français (impliquant le CSTB,

la Direction de la Recherche de Saint Gobain Vitrage et l'ADEME) sur la caractérisation des vitrages électrochromiques, et la mise au point d'algorithmes performants de la gestion de leur transparence. Je ne donnerai pas de détails sur cette action spécifique.

Enfin, j'ai coordonné la recherche d'un projet européen sur la mise au point de systèmes d'ouverture et d'occultation autonomes (en énergie et commande) pour un meilleur confort thermique et visuel de pièces d'habitation.

Ci après, je présente rapidement les démarches adoptées et les principaux résultats obtenus au cours de quelques uns de ces travaux de recherche.

3.2.1 : Les panneaux de façade ventilés [P1, T3]

Cette étude a été menée en partenariat avec la Société Emaillerie Alsacienne, juste avant son rachat par un autre groupe industriel alsacien, dans le cadre d'une convention CIFRE, et a été aidée par l'ADEME.

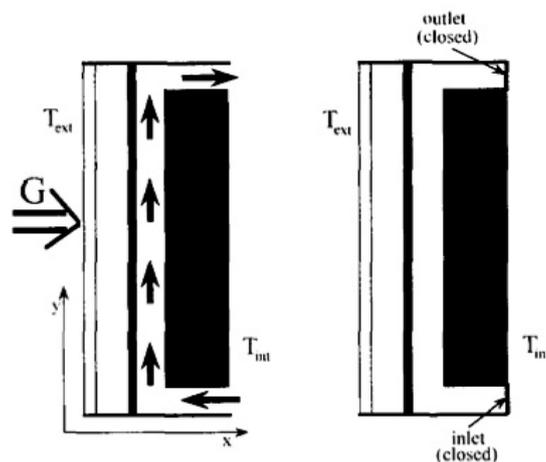


Figure 27 : schéma de principe du panneau de façade ventilé

La société fabriquait des panneaux de façades opaques constitués d'une plaque émaillée, isolée par l'arrière et protégée par un vitrage. De tels panneaux de façades possédaient une qualité architecturale indéniable, permettant d'homogénéiser l'esthétique des bâtiments avec les composants transparents (fenêtres). Cependant, le comportement thermique de ces panneaux (proche de celui d'un capteur solaire) entraînait des désordres obligeant parfois l'industriel à un remplacement complet de ces produits.

L'idée à la base de la thèse était donc d'associer la qualité esthétique de ces panneaux avec une propriété de capteur solaire de type « TROMBE », en ménageant un canal permettant un passage d'air entre la plaque émaillée et l'isolant.

Un modèle théorique des écoulements a été développé, et des prototypes testés dans la cellule PASSYS de l'aire d'essais de Sophia Antipolis. Les conclusions de ce travail portaient sur l'écart optimal entre la plaque et l'isolant : une épaisseur comprise entre 15 et 20 mm garantissait un bilan énergétique positif du panneau tout au long d'une année.

3.2.2 : Les super isolants granulaires [P2, T5]

Notre laboratoire avait mis en évidence le caractère « superisolant » de l'aérogel de silice à l'état de monolithe. D'autre part, il a été montré que les matériaux sous forme divisée (*lits de poudre ou de grains*) sont généralement moins conductifs thermiquement que les monolithes dont ils dérivent. De plus, ces performances sont accrues sous vide partiel ou poussé.

L'objectif principal de cette étude était donc de pouvoir cerner les conditions permettant à des matériaux pris sous une forme granulaire, et sous vide partiel ou poussé, d'offrir des conductivités thermiques inférieures à $10^{-2} \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Cela a été traité dans le cadre d'une thèse théorique et expérimentale sur la détermination de la conductivité thermique effective d'isolants poreux granulaires sous forme de lits de particules, en fonction de leur description géométrique et des caractéristiques optiques et physiques des grains élémentaires les constituant. Un modèle basé sur les phénomènes physiques au sein des lits de particules sphériques a été développé. Il a permis de s'affranchir de contraintes imposées par l'application de modèles exposés dans la littérature (*notamment la nécessité de mesures expérimentales préliminaires*). Il a également permis de prendre en compte un paramètre important de ce genre de structure : l'épaisseur du lit, par opposition aux modèles existants qui considèrent la conductivité des lits granulaires comme une valeur intrinsèque du matériau.

Les simulations et les mesures de validation ont porté sur des lits de particules sphériques de différents diamètres, de divers matériaux (*verre ordinaire, acier inoxydable Z30C13, polystyrène expansé*). Les résultats obtenus sont regroupés sur la figure suivante. L'appareil de mesure utilisé, le *Ct-mètre*, mis au point par le CSTB de Grenoble, est basé sur le principe du fil chaud, où l'échantillon est considéré comme un milieu semi infini. L'erreur de mesure liée à cet appareillage est estimée à 5%.

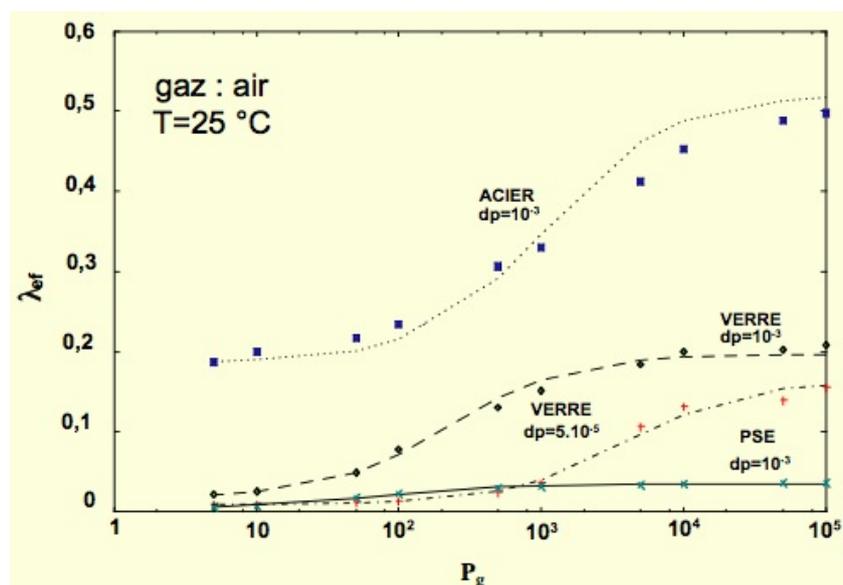


Figure 29 : conductivités effectives mesurées et simulées (Méthode de la sonde)

Un appareil de mesure spécifique a été conçu et construit en partenariat avec le laboratoire de Thermocinétique du CNRS à Nantes. Il nous a permis de mesurer la conductivité effective de différents lits de particules sphériques d'aérogels de silice, et de les comparer à la conductivité thermique de l'aérogel monolithique. Les figures suivantes donnent les principaux résultats obtenus. Nous pouvons y voir une comparaison entre des valeurs de conductivités mesurées d'un aérogel monolithique et celles calculées de deux lits de particules sphériques supposées issues du même aérogel, à température ambiante.

Au cours de ces simulations, nous n'avons fait varier que deux paramètres, le module de dureté des grains d'aérogel et leur émissivité. Ces paramètres ont une influence considérable dans le domaine des basses pressions. La conductivité des particules des lits est prise égale à celle du monolithe évoluant avec la même pression de gaz.

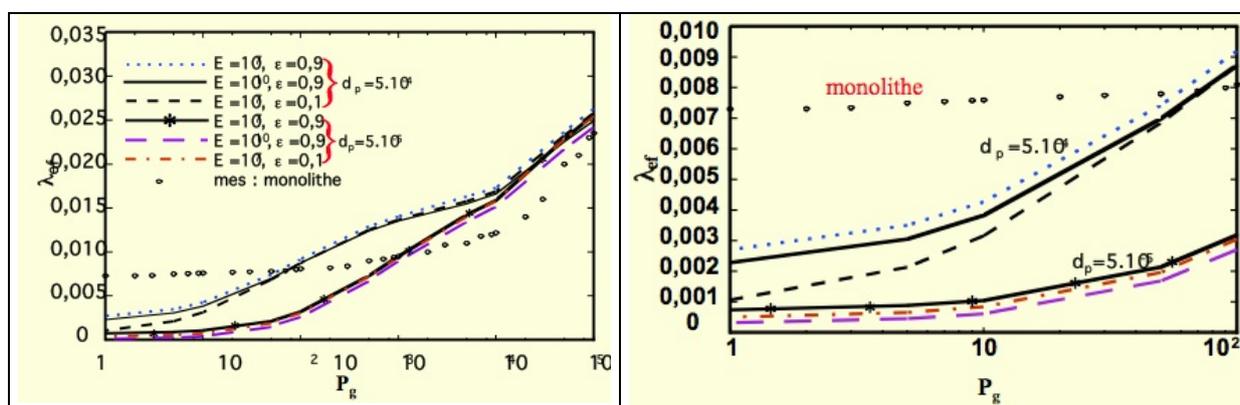


Figure 30 : conductivité effective pour des monolithes et des lits de particules d'aérogels de silice à différents niveaux de vide.

Les comportements sont distincts sur trois zones de pressions :

- à pression atmosphérique, nous pouvons constater que la variation de ces paramètres a peu d'influence sur la conductivité effective ;
- dans le « régime de Knudsen », la granulométrie joue un rôle très important : les lits de faible granulométrie présentent des espaces interparticulaires favorisant une décroissance plus rapide de la conductivité du gaz ;
- dans la zone des vides poussés, les modes de transfert de chaleur subsistant sont la conduction à travers les constriction et le rayonnement.

L'analyse de ces résultats montre que pour des pressions de gaz comprises entre 100 et 10^5 Pa pour les billes de 500 μ m, et entre 10^3 et 10^5 Pa pour celles de 50 μ m, les aérogels monolithiques présentent un meilleur comportement vis à vis de l'isolation thermique. Ceci s'explique par le fait qu'à ces pressions nous assistons à des mélanges entre une phase solide de faible conductivité, l'aérogel, et un gaz, l'air, de conductivité plus élevée. Par contre, vers les basses pressions, les échanges thermiques sont surtout dominés par les contacts entre particules (*pour les diamètres considérés*).

On peut donc noter que les aérogels de silice, sous forme de fines particules sphériques, permettent dans tous les cas de figure d'atteindre des conductivités effectives plus basses que $10^{-2} \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour des pressions inférieures à 500 Pa.

Ces travaux sont toujours d'actualité, car nous participons actuellement à un projet ANR dans le cadre du programme PREBAT dont le principal objectif est d'élaborer des composants d'enveloppe de bâtiment isolants à partir d'aérogels.

3.2.3 : Les ouvertures intelligentes et autonomes [R40, R42]

L'expérience acquise au cours de mes diverses études portant sur la thermique des bâtiments et de l'enveloppe a ensuite été valorisée dans le cadre d'un programme européen de type CRAFT, dont j'ai coordonné la recherche. Ce projet rassemblait plusieurs PME du domaine du bâtiment (bureaux d'études et fabricants de composants). La recherche était effectuée :

- à Londres (Université de North London pour les questions d'éclairage),
- à Athènes (Université Technologique pour la partie ventilation et renouvellement d'air)
- à Sophia Antipolis (Centre d'Energétique de l'Ecole des Mines de Paris, pour la gestion des systèmes énergétiques, les essais et la coordination de l'ensemble).

L'objet de ce projet était la mise au point de systèmes d'ouverture autonome (alimentés par des cellules photovoltaïques), équipés de stores automatiques (qui sont commandés en fonction des besoins en chaleur, en air neuf et en lumière dans la pièce). Ce projet permettait donc d'optimiser la gestion de l'intrant solaire (par les stores) et du renouvellement d'air (par l'ouverture commandée des fenêtres).



Figure 31 : Essais d'un système SOS et installation sur site réel

Les tests ont été menés sur une cellule d'essais de type PASSYS, installée à Sophia Antipolis, et ont démontré la pertinence du concept.

Une première série de prototypes a ensuite été développée et plusieurs exemplaires ont été fabriqués avec l'aide de l'ADEME, et installés dans diverses habitations et pièces de bureaux, avec un suivi des comportements et des performances aux résultats encourageants.

Enfin, dans le cadre de la réhabilitation lourde d'immeubles d'habitation, plusieurs centaines de ces composants ont été installés, et le système est maintenant commercialisé. Ce procédé a été lauréat de nombreuses récompenses et d'après des mesures effectuées sur site par le BE ARCHIMEDES, « permet une climatisation naturelle et 20 % d'économie de chauffage l'hiver ».

3.3 : La climatique des bâtiments

Les conditions de confort thermique à l'intérieur des bâtiments dépendent beaucoup des qualités de l'enveloppe. Ils dépendent aussi, tant en confort estival qu'hivernal, des procédés permettant d'y apporter froid ou chaud, au gré des besoins : ceux ci correspondent à ce que j'appelle ici la climatique.

Les études que j'ai menées personnellement dans ce domaine, la plupart du temps liées à des contrats industriels, ont porté tant sur l'amélioration des performances des systèmes classiques de chauffage que sur les potentialités de systèmes innovants, tels que les piles à combustible ou les procédés solaires.

3.3.1 : Outils prédictifs pour l'amélioration des systèmes existants

En appliquant la méthode décrite au chapitre 1, basée sur la description modulaire des phénomènes par des systèmes d'équations algébriques et différentielles, et l'utilisation de solveurs tels que NEPTUNIX, nous avons mis au point des outils numériques permettant de simuler le comportement de chaudières à gaz [R24], de régulation de systèmes de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire. Ces simulateurs, couplés aux modèles de bâtiments évoqués précédemment, ont toujours été confrontés aux résultats d'expérimentations menées par nos partenaires.

Le même type d'étude a permis de déterminer l'impact de l'utilisation d'ampoules de basse consommation sur les dépenses de chauffage et de climatisation [R37], ou l'influence de la localisation du thermostat pour une installation de chauffage.

En utilisant la même démarche, aux limites de ses possibilités, nous avons également développé un outil numérique permettant de simuler le fonctionnement d'un détendeur de gaz naturel [R36]. Cette étude a été finalisée dans le cadre d'une thèse, effectuée en partenariat avec Gaz de France [P4, P5, T9].

3.3.2 : Potentialités des piles à combustibles pour la cogénération dans le domaine des bâtiments [R27, R28, R31]

J'ai participé, au sein de l'équipe Energétique, Matériaux et Procédés, au projet européen FEVER, dont l'objet était de concevoir et construire un véhicule automobile basé sur l'utilisation d'une pile à combustible.

Les connaissances acquises sur le fonctionnement des piles à combustible et leur système d'alimentation en hydrogène ont été utilisées dans plusieurs études sur les potentialités de ces systèmes en tant qu'installations de cogénération, tant pour des bâtiments tertiaires que pour des maisons individuelles.

Aux simulateurs du comportement thermique de bâtiments plus ou moins complexes était couplé un simulateur de pile à combustible, avec éventuellement l'ensemble des composants permettant son alimentation à partir de gaz naturel.

Les études portaient alors sur diverses stratégies de commande de la pile, en fonction des scénarios de besoins en électricité et des calculs de besoins en chaleur. Le bâtiment était toujours raccordé aux réseaux de gaz naturel et d'électricité, avec éventuellement un stockage d'électricité.

L'influence des tarifs de rachat et de vente des vecteurs énergétiques y était prépondérante, et des algorithmes de gestion de la production de la pile, favorisant alternativement la production de chaleur ou d'électricité ont été mis au point et adoptés par les partenaires industriels (Gaz de France et Electricité de France).

3.3.3 : Les procédés solaires pour les bâtiments

Actuellement, et ce depuis près de 8 ans, mon activité de recherche dans le domaine des systèmes pour le bâtiment s'est recentrée sur les systèmes solaires de production d'eau chaude, tant pour le chauffage des locaux que pour la production d'eau chaude sanitaire. Après une thèse sur le solaire passif, je suis revenu 18 ans après sur le solaire pour les bâtiments, mais du solaire « actif ». Malheureusement, personne ne s'intéresse plus au solaire passif, mais, ce n'est pas irrémédiable !

Cette m'a permis de participer à toutes les réunions d'établissement du Plan Soleil, programme français, sous la responsabilité de l'ADEME, de relance du marché des installations solaires pour les bâtiments. J'ai aussi fait partie de toutes les commissions techniques organisées autour des capteurs solaires et des différents procédés solaires : groupes de normalisation, de certification, de réflexion sur les installations solaires collectives, sur les systèmes solaires combinés...

Toutes ces actions avaient pour principal objectif de s'assurer de la maturité de l'offre en matière de composants de procédés solaires, tant au niveau de la qualité des produits que de la pertinence des outils de dimensionnement.

3.3.3.1 : Les essais solaires pour la certification

J'ai ainsi pris en charge, de 1999 à 2003, au sein du centre d'Energétique de l'Ecole des Mines de Paris, la responsabilité des essais de performance thermique des capteurs solaires, essais obligatoires dans le cadre de la certification de ces matériels. Nous avons conçu et réalisé un nouveau banc d'essais entièrement automatisé et autonome, capable d'effectuer les essais selon la norme française, puis européenne.

3.3.3.2 : Le banc d'essais semi virtuel [C23, C24, R50]

En liaison avec le CSTB, j'ai participé à la conception et à la réalisation d'un banc d'essais « semi virtuel » pour tester ces systèmes. Les essais sont menés en utilisant des objets réels spécifiques, ou leur représentation virtuelle, tels que capteur, stockage, régulation... couplés, au travers de systèmes numériques, à des objets (échangeurs de chaleur) représentant virtuellement le comportement d'un bâtiment.

Composé d'une partie réelle (le SSC d'un fabricant), commandée en temps réel par la partie logicielle (MATLAB-SIMILINK), le laboratoire semi virtuel permet la modélisation et la simulation de l'environnement du système à tester. L'originalité du banc est d'utiliser au maximum les possibilités offertes par la simulation et de limiter la partie réelle du banc à un minimum de composants.

Les données météorologiques, les caractéristiques de comportement des bâtiments, les émetteurs de chaleur, les auxiliaires, les unités de stockage, les capteurs solaires thermiques, les stratégies de régulation, les profils de puisage d'eau chaude sanitaire... peuvent ainsi être librement programmés dans la partie logicielle «simulation en temps réel».

L'interface entre les deux parties permet de commander aux circuits hydrauliques les débits et températures d'entrée du système à tester, en fonction de séquences tests programmées ou des résultats de la simulation de l'environnement : émulation en apport de chaleur (source) et en production de froid (charge). Ci-dessous on peut voir un ensemble de vannes commandant les échangeurs simulant divers composants de circuits thermiques.



Figure 32 : vannes régulant les températures simulées sur le banc d'essais semi virtuel

L'interface permet aussi d'enregistrer sur PC toutes les entrées-sorties du système nécessaires à son évaluation (températures, débits, quantité d'énergie...).

Enfin, plusieurs types d'applications fournies par des industriels peuvent être testées notamment les SSC pour la production combinée d'eau chaude sanitaire et de chauffage par plancher chauffant et/ou radiateurs.

Le but de la recherche que nous avons menée, en plus de la participation à la conception de l'ensemble du banc d'essais, était de définir qu'elle devait être la séquence d'essais minimale qui permettrait de connaître précisément le comportement de tels systèmes dans la plupart des conditions d'utilisation.

3.3.3.3 : la base de données européennes SWITCH [R41]

J'ai aussi, dans le domaine de l'énergie solaire, proposé et obtenu des financements de la Commission des Communautés Européennes dans le cadre d'un projet européen, dont j'ai été coordinateur. Ce projet avait pour but de mettre en place des outils de conception globalisée d'installations solaires capables de produire chauffage, eau chaude et climatisation pour les maisons individuelles, en optimisant l'association de divers types de capteurs, de leur gestion, en fonction de l'évolution des divers besoins énergétiques. Ce projet s'appuyait, entre autres, sur un calcul des besoins énergétiques des bâtiments, basé sur les bibliothèques de modèles déjà présentées dans les chapitres précédents.

Avec l'aide de plusieurs bureaux d'études européens (danois, espagnol, allemand et français), nous avons donc mis en place, dans le courant de l'année 2001, une plate-forme logicielle permettant à toute personne de faire un dimensionnement de son système solaire pour faire de l'eau chaude ou du chauffage.

L'interactivité du logiciel nous permettait, par exemple, de faire en temps réel un certain nombre de calculs préliminaires pendant que l'utilisateur remplissait la fiche descriptive de ses besoins. En quelques secondes, l'outil calculait une surface de capteurs solaires « raisonnable », et donnait la production annuelle des capteurs solaires, les besoins de chauffage, d'eau chaude sanitaire ainsi que les besoins en énergie auxiliaire.

Cette base de données est, 6 ans après, toujours opérationnelle, et donne des prédictions toujours très proches des outils plus modernes mis en place sur le site de l'INES (Institut National d'Énergie Solaire en Savoie).

3.3.3.3 : les suivis sur sites réels de systèmes solaires combinés [R47, R48, R49]

Pouvoir comparer les performances de divers types de systèmes solaires combinés (procédés participant à la fois au chauffage des bâtiments et de l'eau chaude sanitaire) n'est pas aussi évident que cela peut le paraître. Une forte production du champ de capteurs solaires peut masquer une inefficacité du système telle que certaines installations consomment plus d'énergie avec l'installation solaire que sans.

Et puis, comment comparer un petit système avec des radiateurs installé en Europe du Nord et un plancher solaire direct en altitude ?

Une méthode « universelle » a été développée dans le cadre d'un groupe de travail dont je faisais partie au cours de l'année 2001. Il s'appuyait sur les réflexions d'un groupe de travail de l'Agence Internationale de l'Energie [6].

En effet, il n'est pas suffisant de connaître la productivité (quantité d'énergie délivrée annuellement par m² de capteur), ou la fraction solaire (part des besoins de chauffage et d'eau chaude couverts par l'énergie solaire), pour caractériser correctement un SSC. Les deux indicateurs précédents ne s'appliquent qu'à la partie solaire du système, et ne donnent aucune indication sur son fonctionnement global.

La vraie question est de connaître l'économie d'énergie d'appoint apportée par le SSC en comparaison avec une installation conventionnelle sans partie solaire, appelée installation de "référence", qui aurait fourni le même service : il s'agit du taux d'économie d'énergie (F_{sav}), rapport entre cette économie et la consommation de l'installation de "référence".

La difficulté dans la définition du taux d'économie d'énergie réside dans le choix de la référence : si la référence est trop exigeante, l'économie sera minorée. Inversement, si la référence est trop laxiste, l'économie apparaît artificiellement comme plus importante. Pour pouvoir confronter utilement les taux d'économie pour différents SSC, il faut comparer la valeur de F_{sav} pour le système réel avec la valeur théorique maximale qu'aurait un SSC idéal sans pertes. Cette grandeur est appelée Fraction Solarisable des Consommations (FSC).

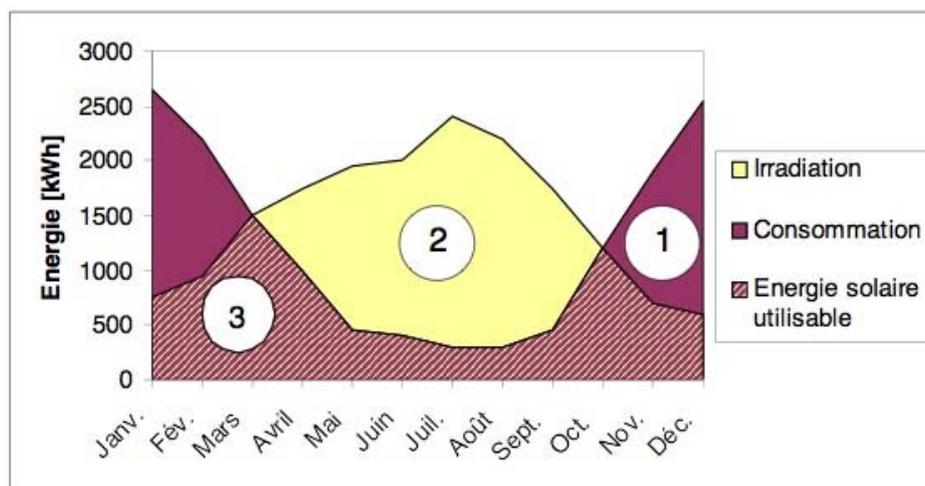
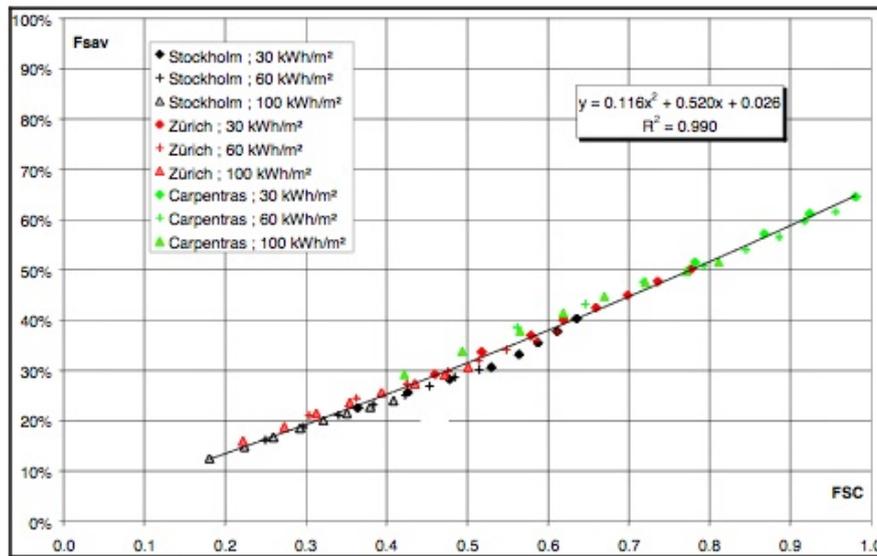


Figure 33 : définition de la fraction solarisable des consommations

Sur la figure ci dessus, on mesure bien ce que peut être cette FSC. La zone 1 représente les besoins énergétiques d'une maison individuelle. Ces besoins sont très importants en période hivernale, et sont limités aux besoins en eau chaude sanitaire l'été. La zone 2 correspond au produit du flux solaire global dans le plan des capteurs par la surface de captation. C'est l'énergie qu'on pourrait récupérer si tous les rendements étaient égaux à 1. La partie claire de la zone 2 correspond à toute l'énergie solaire inutile, et montre la mauvaise adéquation

entre les besoins énergétiques et la ressource solaire. La zone 3 correspond donc à la partie des besoins qui pourraient effectivement être couverts par l'énergie solaire si le système installé avait un rendement de 1.

Des calculs théoriques sur divers types de SSC ont ensuite été effectués pour divers climats européens, dont certains ont été confrontés à des mesures sur site. On en a déduit un diagramme FSAV/FSC, tel que visualisé ci dessous pour un type de SSC donné.



Sur ce schéma, on peut constater que pour le même type de SSC, quelle que soit la qualité de la maison (illustrée par ces consommations annuelles au m²), le climat ou la taille du champ de capteurs solaires, tous les points représentatifs du fonctionnement annuel d'un SSC s'alignent sur une courbe très proche d'une droite. C'est cette courbe qui représente l'efficacité intrinsèque du SSC.

Ainsi, quand on installe un champ de capteur tel que la fraction solarisable des consommations est de 60 %, on peut espérer économiser 38 % d'énergie environ par rapport à la même habitation sans SSC. Si on divise la surface du champ de capteurs par 2 (on passe à une SSC de 30 %), la part d'énergie économisée est limitée à environ 20 %.

Un certain nombre de ces courbes caractéristiques ont ensuite été regroupées sur le même graphe. L'enveloppe des courbes correspond donc à l'ensemble des résultats obtenus pour un certain nombre de SSC testés. On note déjà une grande dispersion des « efficacités » des divers systèmes. On peut remettre en doute certaines extrapolations (notamment la meilleure des courbes qui a un FSAV supérieur à la FSC pour les petites valeurs de FSC).

Par contre, peut-on se satisfaire de voir certains systèmes avoir une FSAV moitié de certains autres pour la même FSC ? Il semble plutôt qu'il faille se dire : un bon SSC doit avoir des performances correspondant, par exemple, à la courbe 3a ci-dessous, tous les autres étant moins bons, et tout nouveau système ayant une courbe en dessous de la plus basse étant mauvais (et donc ne doit pas donner le droit à des primes issues d'argent public).

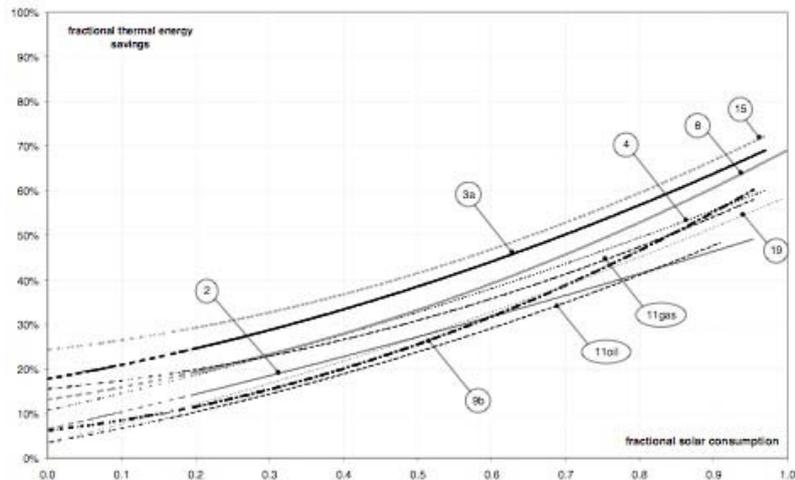


Figure 35 : représentation de la caractéristique d'une dizaine de SSC

Ces courbes étant issues de calculs théoriques, il était intéressant d'essayer de situer les performances réelles de SSC sur site, dans le cadre d'installation dans des maisons individuelles habitées. C'est ce qui a été proposé par l'ADEME à l'ensemble des fabricants français. A la suite d'un appel d'offre européen lancé par l'ADEME, j'ai donc pris en charge le suivi de 20 installations de systèmes solaires combinés de 3 fabricants français réparties sur 5 régions françaises.

Le travail confié a tout d'abord porté sur la définition de la métrologie la plus adaptée, d'après le cahier des charges de la campagne de mesures, et en fonction des spécificités de chacun des systèmes installés.

Ensuite, la métrologie définie a été installée sur chacun des sites, en collaboration avec chaque installateur correspondant, prévenu, ainsi que l'utilisateur (souvent propriétaire occupant) de la démarche par le fabricant partenaire.

Tout au long de la campagne de mesures, les données sont enregistrées, envoyées tous les jours par MODEM GSM sur un ordinateur du laboratoire, et traitées quotidiennement (calculs simples de « maintenance ») et mensuellement (émission de bilans précis). Une fiche mensuelle est remplie et envoyée à Thomas LETZ (ASDER puis INES), coordinateur des suivis.

Les résultats obtenus par ce travail ne sont pas très optimistes : les performances mesurées sur les différents sites par les différents types de systèmes solaires combinés sont, sauf pour un type très précis, très en dessous des performances attendues.

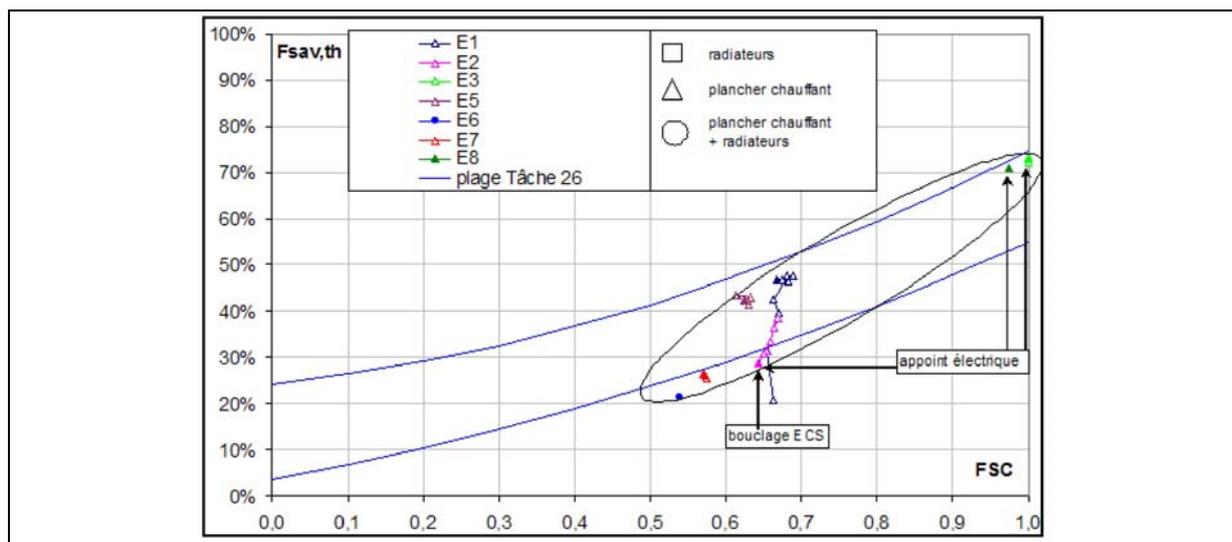


Figure 36 : résultats obtenus pour les SSC de la société CLIPSOL

Seul le plancher solaire direct de la Société CLIPSOL (4 points sur 7 sur la figure ci-dessus), système pour lequel, en période de chauffage, les calories solaires passent directement des capteurs au plancher chauffant, a des performances intéressantes. Le même système associé aussi à des radiateurs est déjà moins bon. Enfin, tous les systèmes à hydro accumulation ont des pertes thermiques qui nuisent grandement à leur efficacité, et sont représentés par des courbes en dessous de la zone définie par l'étude déjà citée. Et que dire de la médiocrité de la qualité de certaines installations, dont les performances sont encore diminuées par une mauvaise compréhension du fonctionnement de ces procédés parfois trop compliqués.

Cette très lourde campagne de mesures laisse un goût amer à ceux qui y ont participé : en face de l'engouement du public pour le chauffage solaire, il n'y a que très peu de bons produits, bien conçus, bien installés, bien commandés. Même si la plupart des procédés sur el marché fonctionnent, leurs performances, pour un investissement conséquent, sont largement en dessous des prévisions. On peut espérer que cela ne nuira pas trop à la crédibilité du solaire, qui peut pourtant apporter beaucoup, surtout si on associe du solaire « passif » aux SSC.

3.4 : Conclusions et perspectives

Les études que j'ai menées depuis plus de 25 ans dans le domaine du bâtiment vont de la thermique fine des composants d'enveloppe à l'étude du couplage entre les enceintes habitables et les procédés de la climatique. Tout cela est maintenant regroupé dans un domaine de recherche et développement émergent que l'on appelle : « efficacité énergétique des bâtiments ». Un Groupe d'Analyse Thématique du CNRS a même été créé en 2002 à ce sujet, et j'en fait toujours partie.

Je pensai qu'en arrivant au LGPSD, laboratoire CNRS dont la thématique principale était les solides divisés, je m'éloignerais petit à petit du domaine du bâtiment, problématique inexistante avant mon arrivée, tant en recherche qu'en enseignement.

Cependant, la pression territoriale locale sur le domaine de l'efficacité énergétique dans les bâtiments a généré un certain nombre de demandes auprès de la Direction de l'Ecole, demandes rapidement répercutées sur mon équipe, qui possède aussi des spécialistes de la caractérisation thermique des matériaux. De fil en aiguille, nous avons participé à un programme de l'ANR PREBAT, puis préparé une proposition à l'appel d'offres de la Fondation Bâtiment Energie. Notre proposition ayant été retenue, je me retrouve coordinateur d'un gros projet, que je décris rapidement ci-dessous.

Le projet BEST a pour finalité de proposer les solutions qui permettent de réaliser des **B**âtiments fonctionnant principalement avec l'**E**nergie **S**olaire pour le **T**ertiaire. Contrairement à la pratique habituelle, il s'agit de concevoir les bâtiments tertiaires autour du concept solaire et non pas d'intégrer le solaire dans un bâtiment classique. Cette approche constitue en fait le moyen d'appropriation Architecturale, Technique, Economique et Sociologique pour parvenir à des bâtiments de bureau de Haute Qualité Environnementale, dont la source principale de fonctionnement énergétique est l'utilisation de l'énergie véhiculée par le rayonnement solaire.

Le projet BEST, un peu dans la même philosophie que le projet européen SWITCH, aboutit à proposer une boîte à outil logicielle comprenant trois compartiments interconnectés.

- Le compartiment de conception Architecturale et Technique (CAT),
- Le compartiment de conception des aspects Sociologiques et Organisationnels de l'activité des occupants (CSO),
- Le compartiment Economique relatif aux investissements et au fonctionnement (CEC).

La boîte à outil sera appliquée et testée sur la réalisation de deux bâtiments par un Maître d'Ouvrage Public et un Maître d'Ouvrage Privé. Une fois validée, cette boîte à outil sera accessible en ligne aux Architectes, Maîtres d'œuvre, Maîtres d'ouvrages qui pourront l'utiliser pour l'appliquer dès l'origine de leur projet. Cette diffusion permettra aussi aux Entreprises occupant les locaux d'être mobilisées sur le sujet de la protection de l'environnement dans le monde de l'activité tertiaire. Le marché visé est celui des immeubles tertiaires de bureaux neufs. Le marché n'est pas limité concernant les pays où le projet pourra être appliqué.

Le Consortium constitué pour le projet BEST réunit l'ensemble de la profession, depuis la Recherche jusqu'à la maîtrise d'ouvrage en passant par l'ingénierie technique et sociologique, les fabricants des systèmes énergétiques, la maîtrise d'œuvre...

Ce consortium pourrait être élargi à un certain nombre de partenaires européens, pour proposer un projet de plus grande ampleur dans le cadre du 7^{ème} PCRD.

4 : Généralisation de la méthode à l'étude des piles à combustible

Cette partie du manuscrit, volontairement très résumée, présente les diverses activités auxquelles j'ai participé depuis 1995 dans le domaine de la filière hydrogène en général, et des piles à combustibles en particulier.

Je ne donnerai ici que très peu d'informations générales sur les piles à combustibles [R34].

Une pile à combustible est un générateur qui convertit directement en énergie électrique l'énergie chimique issue de la réaction électrochimique entre :

- un combustible (hydrogène, méthanol ...) et ;
- un comburant (généralement de l'oxygène pris dans l'air) ;

c'est, globalement, l'électrolyse de l'eau inversée. Cette réaction produit donc de l'eau, de l'électricité et de la chaleur.

Une pile à combustible se différencie des autres piles par le fait que les réactifs sont renouvelés et les produits évacués en permanence. Chaque cellule élémentaire d'une pile à combustible comprend deux électrodes, en général poreuses :

- l'anode est alimentée en combustible (hydrogène, ...) ;
- la cathode est alimentée en comburant (oxygène, ...).

Les électrodes sont séparées par un électrolyte dont le rôle est de permettre la migration des ions de l'une à l'autre, sous l'effet du champ électrique créé.

Les piles à combustible sont classées selon la nature de l'électrolyte et la température de fonctionnement. J'ai essentiellement travaillé sur les piles fonctionnant à basse température, notamment les piles à électrolyte polymère solide, dites PEMFC pour Proton Exchange Membrane Fuel Cell, fonctionnant dès l'ambiante.

Leurs avantages sont donc des temps de démarrage quasiment instantanés et compatibles avec des applications automobiles (pour les PEM) ; de plus, elles mettent en oeuvre des technologies moins délicates. Par contre, elles nécessitent une alimentation en combustible très riche en hydrogène (le plus pur possible) et sont sensibles à l'empoisonnement, notamment par le CO et le CO₂.

4.1 : Le contexte de départ

Dés 1992, le Centre d'Energétique de l'Ecole des Mines de Paris, dans son établissement de Sophia Antipolis, a commencé des recherches dans le domaine des piles à combustibles, recherches arrêtés en France depuis près de 20 ans. C'est l'arrivée d'un ingénieur électrochimiste néerlandais, qui avait la volonté de travailler sur le domaine, associée à la grande liberté de manœuvre que nous avons à l'époque, qui a permis de commencer ce travail de pionnier, à une époque où personne, en France, ne travaillait sur le sujet.

C'est en 1995 que Renault, poussé par les premiers efforts de ses concurrents dans le domaine, décida de monter un programme de recherche sur le sujet, en s'appuyant notamment sur les compétences d'un certain nombre de partenaires européens. Etant les seuls chercheurs universitaires français sur le sujet à l'époque, nous rejoignîmes le consortium dans le cadre d'un projet européen nommé FEVER, dont le but était de faire rouler au moins 500 km une voiture équipée d'une pile à combustible et d'un réservoir d'hydrogène liquide.

C'est à ce moment-là que j'ai été sollicité pour participer aux recherches du laboratoire sur l'intégration thermique du module de puissance (la pile et tous les auxiliaires), ainsi que sur la gestion de l'eau sur ce module de puissance.

4.2 : Le module de puissance de FEVER

Le projet FEVER [7] était basé sur l'utilisation d'une pile à combustible de type PEM (Proton Exchange Membrane), fournie par la société DE NORA, et d'un réservoir d'hydrogène liquide (conçu par la société AIR LIQUIDE) permettant de stocker les 8 kg nécessaires pour effectuer les 500 km prévus par le projet. Le véhicule test était une LAGUNA BREAK, dont l'habitabilité fut largement réduite pour pouvoir transporter un vrai laboratoire roulant.

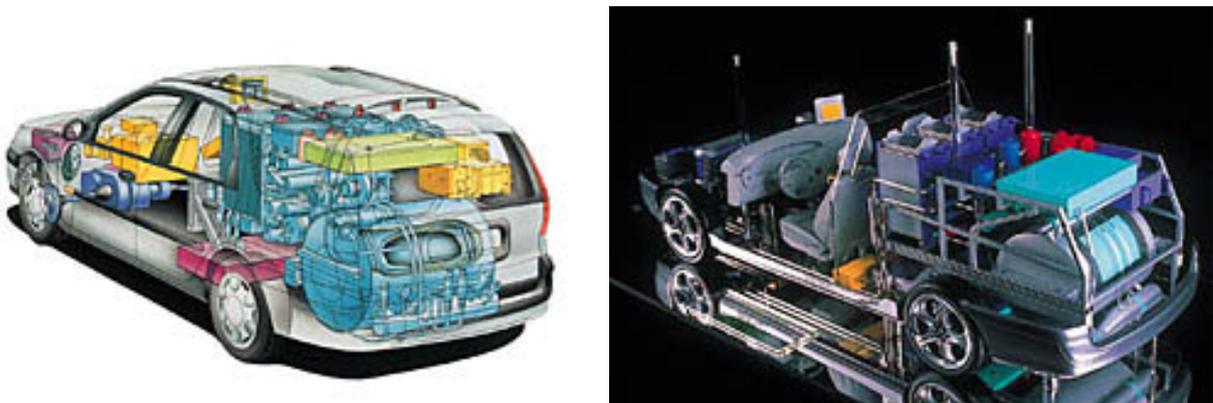


Figure 37 : 2 images de la LAGUNA BREAK du projet FEVER équipée de piles à combustible et d'un réservoir d'hydrogène

La conception du module de puissance du véhicule FEVER était à la charge d'une équipe de ANSALDO, le FRAMATOME italien, qui avait l'habitude de travailler avec des piles de la Société DE NORA, notre fournisseur dans le projet.

Très rapidement, nous avons décidé, avec notre partenaire RENAULT, de superviser la conception du module de puissance, notamment dans la gestion des transitoires (démarrage du module de puissance avec de l'hydrogène liquide arrivant, à froid, dans certains composants de l'alimentation de la pile).

En modélisant l'ensemble des composants du module de puissance dans notre environnement logiciel (solveur algèbre différentiel tel que décrit au chapitre 1), nous avons

pu rapidement constater des risques de gel dans certains échangeurs, et proposé des architectures alternatives moins dangereuses.

Le logiciel a aussi permis de simuler, en régime dynamique, le comportement de l'ensemble du module de puissance sollicité par le véhicule au cours de cycle de roulage normalisés. A tout instant, nous connaissions l'état du stock, les différentes températures des différents composants, les taux d'humidités dans les membranes, la puissance disponible aux roues... et pouvions calculer l'autonomie du véhicule en fonction du parcours envisagé [8].

Cela nous a aussi aidé, pendant le projet, à définir l'intérêt relatif de diverses solutions, notamment celle qui était basée sur une turbine installée en sortie de pile pour récupérer une partie de l'énergie contenue dans le circuit d'air sous pression. Nous en avons conclu que la présence de la turbine de récupération permettait d'augmenter l'efficacité du système de 5 %, au prix d'une complexité largement accrue.

4.3 : La gestion de l'eau dans les piles à combustible [P3, T8]

Dans une pile de type PEM, les membranes doivent être hydratées pour permettre le transfert d'ions H⁺ de l'anode vers la cathode. L'air et l'hydrogène doivent donc être saturés à l'entrée de la pile. De plus, il y a production d'eau à la cathode, et l'eau liquide doit être évacuée pour éviter de noyer la pile, ce qui pourrait entraîner de graves désagréments. Connaître en tout point des circuits l'humidité est donc un enjeu majeur pour la bonne gestion d'une pile de type PEM.

J'ai donc supervisé, dans le cadre d'une thèse, une étude théorique et expérimentale pour améliorer la conception géométrique des collecteurs d'eau liquide en bas de chaque cellule de la pile.

Nous avons donc développé un simulateur des écoulements dans les cellules de la pile, basé sur l'utilisation du code commercial de Mécanique des Fluides FLUENT. Celui-ci utilise une méthode de volumes de fluide, qui semblait la meilleure approche pour nos écoulements diphasiques et tridimensionnels.

Dans un premier temps, nous nous sommes contentés de ne traiter le problème que pour un seul fluide, l'air. Cela nous a permis de comparer diverses conceptions géométriques du joint du bas des cellules, qui assure à la fois l'évacuation des fluides et l'étanchéité. Les premiers résultats furent analysés en partenariat avec nos collègues de DE NORA.

Puis, nous avons essayé de comprendre les phénomènes de mélange entre les 2 phases présentes dans le compartiment cathodique : l'air et l'eau. Les difficultés numériques rencontrées étaient liées à la complexité de la géométrie, et la grande différence de densité entre les 2 phases. De plus, nous avons à faire un compromis entre l'échelle macroscopique (équation des moments) et l'échelle microscopique (évolution de l'interface).

Dans chaque maille de la grille représentant notre volume d'étude, nous avons considéré une fonction F , égale à 1 en tout point occupé par l'eau, et à 0 en tout point occupé par l'air. Nous avons obtenu des résultats très intéressants, mais les temps de calcul étaient prohibitifs.

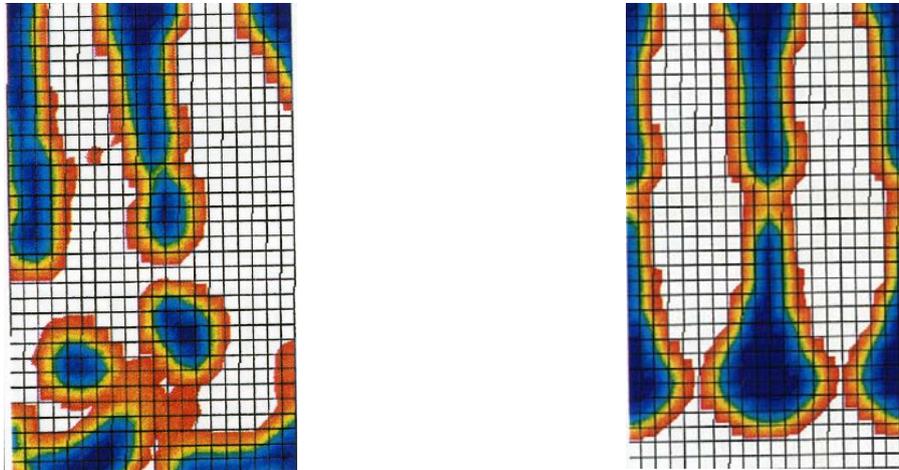


Figure 38 : calculs en diphasique dans 2 zones de la cellule

Cependant, nous avons pu démontrer que le mélange des 2 fluides avait un comportement hydrodynamique très proche de celui d'un fluide monophasique. Cela nous a donc permis de tester plus facilement diverses conceptions de géométries de cellules.

En parallèle de ce travail numérique, nous avons conçu, construit et instrumenté une maquette transparente, permettant d'observer visuellement les écoulements diphasiques, et de tester différentes conceptions de collecteur d'eau de bas de cellules.

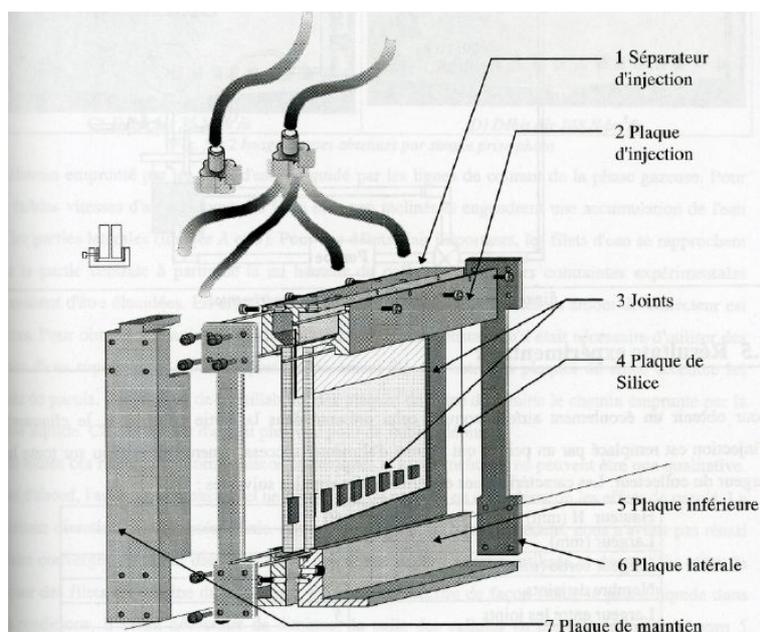


Figure 39 : Schéma de la maquette de visualisation des écoulements

Nous avons ainsi pu comparer les résultats de nos simulations numériques avec des écoulements réels, et la figure suivante prouve le bon accord entre les deux approches.

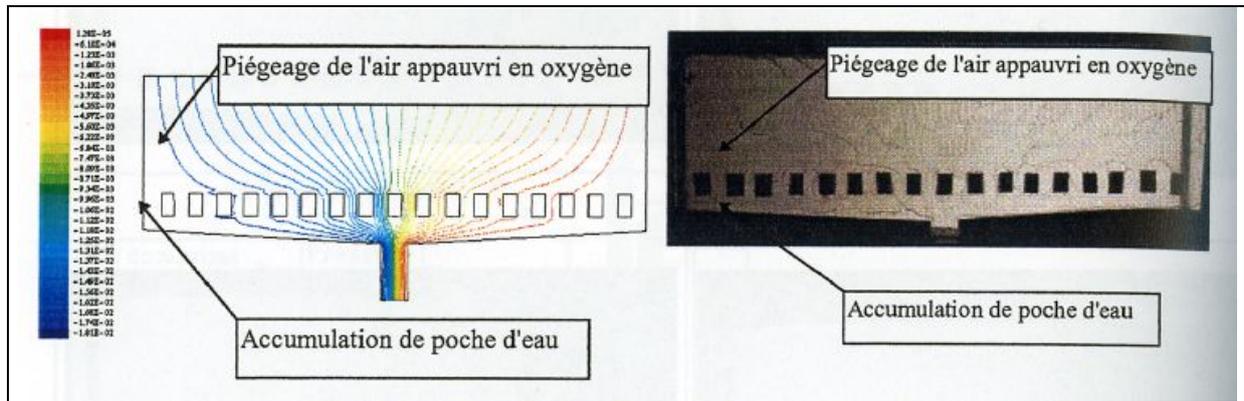


Figure 40 : comparaison calculs – expérience pour les écoulements d'eau

4.4 : La production d'hydrogène embarquée

La solution adoptée pour le transport du combustible par le projet FEVER était un réservoir d'hydrogène liquide pouvant contenir 8 kg d'hydrogène. Cette solution s'est vite avérée très encombrante, très complexe, et irréaliste dans l'état actuel de maturité de la distribution d'hydrogène.

D'autres projets, à la même époque, portaient sur des bouteilles d'hydrogènes sous pression, mais les pressions nécessaires pour avoir un minimum d'autonomie étaient très importantes (près de 1000 bars). Non seulement les technologies n'étaient pas mures, mais les coûts énergétiques de compression étaient supérieurs à l'énergie contenue dans les bouteilles.

Au bout de quelques années, la plupart des équipes impliquées dans ce domaine de recherche sont arrivées à la même conclusion : il faut fabriquer l'hydrogène à bord, si possible avec du carburant classique (et donc déjà disponible partout avec son réseau de distribution).

Dans ce domaine de la production d'hydrogène à bord de véhicules automobiles, j'ai, un peu par hasard, participé à 2 projets de recherche, l'un testant une solution par l'utilisation de plasmas froids, l'autre utilisant une intégration thermique poussée, sans catalyseur, par des réactions globalement autothermes.

4.4.1 : Le projet PMFP (Plasma and membrane fuel processing)

C'était un projet pris en charge en 2000 par l'équipe Plasmas du Centre d'Energétique de l'Ecole des Mines de Paris, dans le cadre d'un consortium européen bâti autour de DAIMLER CHRYSLER. Mon expérience, à cette époque, du contexte des piles à combustible m'a permis de participer aux recherches menées par mes collègues de cette équipe.

Etait il possible de concevoir un reformeur embarqué (générateur d'hydrogène par réaction thermodynamique à partir de composé hydrogéné, notamment de type hydrocarbure) utilisant une technologie plasma ? En effet, les conditions thermodynamiques créées par un arc plasma intermittent devaient permettre de séparer les molécules d'hydrogène, sans possibilité de recombinaison, et sans utilisation de catalyseurs en matériaux précieux.

Dans un premier temps, nous avons démontré la faisabilité du concept, par des allers retours fréquents entre des codes spécifiques aux plasmas et des maquettes d'électrodes glissantes.

Puis, nous avons conçu et construit un prototype, et avons testé divers ratios entre hydrocarbure et eau injectée pour améliorer la production d'hydrogène. Ces résultats ont été fournis à DAIMLER CHRYSLER, qui a poursuivi seul les développements sur ce sujet.

4.4.2 : La collaboration avec N-GHY

En arrivant à Albi, j'ai tout de suite été en contact avec une société locale, N-GHY, issue de la recherche de notre laboratoire dans le domaine du reformage pour la production d'hydrogène de type pile à combustible. N-GHY est une entreprise spécialisée dans le domaine de la recherche et du développement de processeurs pour piles à combustibles. Cette société est composée d'une quinzaine de salariés qui sont principalement des ingénieurs et des doctorants.

N-GHY travaille actuellement sur divers projets de générateurs d'hydrogène, notamment à partir de bio carburants, constitués de deux pièces majeures :

- Un module chaud dans lequel sont effectuées les réactions chimiques permettant de produire l'hydrogène
- Un module froid qui a pour but de refroidir les gaz afin qu'ils puissent être utilisés ou stockés.

Au niveau du module chaud, deux paramètres fondamentaux doivent être « évalués » avec précision, afin d'en optimiser le fonctionnement :

- Les températures atteintes au sein du module
- Les écoulements et les mélanges des réactifs et des produits.

La spécificité des modules chauds de la société est qu'ils n'utilisent pas de catalyseur noble, et que l'intégration permet de gérer au mieux les différentes réactions afin que le procédé soit neutre au niveau thermique. Aussi, la connaissance des températures de fonctionnement du module est très importante pour déterminer les éléments suivants, indispensables lors du dimensionnement du module :

- Les matériaux, aciers ou céramiques qui constitueront l'isolation du module
- Les pertes thermiques dissipées avec le milieu extérieur
- Le temps de séjour des réactifs et donc le volume des chambres de réaction

Enfin, l'étude des écoulements et des mélanges renseigne sur :

- La bonne homogénéisation des réactifs qui favorisent les réactions chimiques
- Le bon dimensionnement des injections (vitesses, trajectoires ...)

Nous participons donc à l'amélioration des connaissances du comportement thermique du module chaud du reformeur, en utilisant nos codes de calcul des transferts radiatifs (voir chapitre 5) couplés à des codes de mécanique des fluides commerciaux (FLUENT ou STAR CD). Les études sont en cours, en partenariat avec le GRETH du CEA, et font l'objet d'une aide de l'ADEME au travers du réseau PaCO.

Voici les premiers résultats, non publiés, obtenus en termes sources radiatifs dans une première configuration géométrique proposée par nos partenaires.

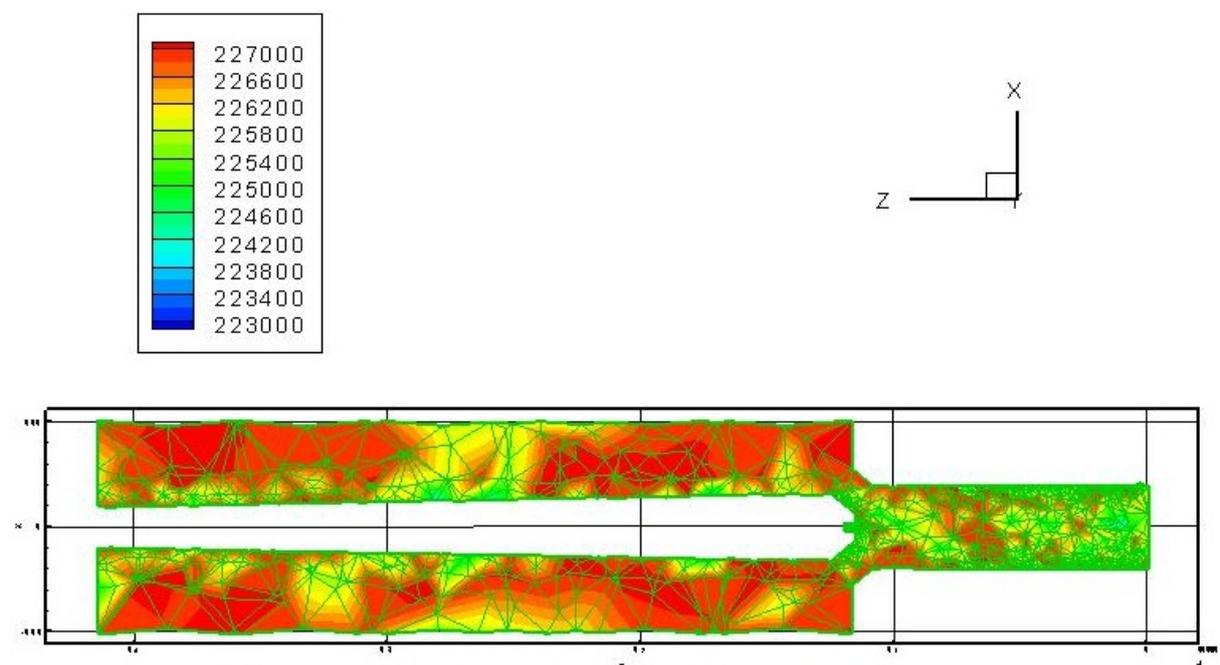


Figure 41 : Termes sources radiatifs dans le module chaud d'un reformeur prototype de la société N-GHY

4.5 : Conclusion et perspectives

La filière hydrogène a le vent en poupe, et des investissements lourds lui sont réservés sur de nombreux budgets de recherche de la plupart des grosses entreprises mondiales (constructeurs automobiles, chimistes, électromécaniciens, producteurs d'énergie...)

J'ai cru pendant un temps que tout cela arriverait rapidement sur le marché, et que l'on aurait bientôt à disposition une source d'énergie propre et versatile.

Depuis que j'ai repris mes activités dans le domaine du solaire, je crois de moins en moins à l'intérêt de cette filière, qui restera aux mains des mêmes compagnies que celles qui nous approvisionnent actuellement, avec des composants nécessairement très sophistiqués et de très haute technologie.

Si je continue à faire quelques calculs dans ce domaine, c'est bien pour avoir un sujet de collaboration avec une équipe locale dont la motivation reste entière. Mais c'est plutôt vers la production d'énergie par procédés solaires à concentration que je compte consacrer la plus grande partie de mon effort de recherche dans les années à venir.

5 : La concentration de l'énergie solaire pour la production d'électricité

Ce chapitre me tient particulièrement à cœur, car il fait le lien entre une activité passée, menée dans un contexte exceptionnel, et mes nouvelles préoccupations, qui devraient prendre une part prépondérante dans mes activités de recherche à court et moyen termes.

Le contexte, entre 1983 et 1986, était effectivement exceptionnel, car, avec deux collègues du CNRS, nous formions le noyau permanent du Groupe d'Evaluation Scientifique de la centrale solaire Thémis, une des 6 centrales prototypes fonctionnant à l'époque dans le monde. Nous étions rattachés administrativement au Laboratoire d'Energie Solaire d'Odeillo, qui devint l'IMP du CNRS en 1986, puis le PROMES en 2003, après la séparation avec le LET de l'Université de Poitiers et l'absorption du laboratoire des Ultra Réfractaires d'Odeillo et d'un laboratoire de Perpignan.

Pendant plus de 3 années, nous avons à notre disposition un immense champ d'expériences, faisant appel à de nombreux domaines de la physique, et accueillant de nombreux chercheurs étrangers. Nous travaillions en coordination avec 3 autres équipes de recherche, une de la DER d'EDF à Chatou, une au four solaire d'Odeillo et le GESER installé à l'Ecole Centrale de Paris.



Figure 41 : Vue aérienne de la centrale THEMIS en fonctionnement

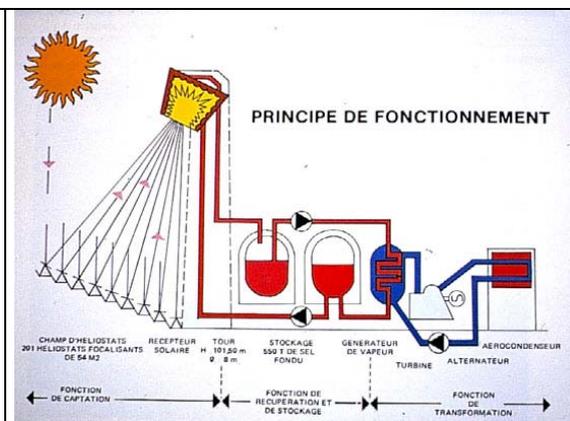


Figure 42 : Schéma de principe

J'étais chargé plus particulièrement de la partie collecte, c'est-à-dire des phénomènes physiques entre le disque solaire et l'entrée du récepteur, y compris les statistiques météorologiques.

Après la fermeture de la centrale en 1986, l'énergie solaire à concentration traversa un long désert, avec seulement par une veille technologique effectuée par nos collègues d'Odeillo, jusqu'à la création d'un Groupe d'Analyse Thématique consacré à ce sujet, dans le cadre du programme Energie du CNRS, initié en 2002. Même si ce groupe a disparu assez rapidement, il a permis de mettre autour d'une table divers laboratoires intéressés par le

sujet. Le Centre d'Energétique de l'Ecole des Mines de Paris me proposa comme son représentant dans le groupe, auquel participait aussi le Centre Energétique Environnement de l'Ecole des Mines d'Albi. Dès 2003, je devenais le représentant unique des 2 écoles.

Le groupe issu du GAT, nommé SOLTEC, accueille maintenant des industriels motivés, tels que TOTAL, EDF, VEOLIA, et d'autres laboratoires universitaires, du CNRS ou du CEA. Sous la conduite du PROMES, il propose des projets ambitieux, et coordonne plus ou moins formellement les efforts de recherche d'équipes représentant environ 15 personnes à plein temps. Ce nombre devrait rapidement augmenter, avec pour objectif d'atteindre une masse critique d'environ 50 personnes, comme nos collègues allemands et espagnols, leaders mondiaux dans le domaine.

C'est après mon transfert sur Albi que j'ai pu reprendre des activités de recherche dans le domaine, et je prévois que celles-ci devraient devenir bientôt mon principal centre d'intérêt, du moins au niveau de mes activités de recherche.

5.1 : Activités liées à THEMIS (1983 – 1986)

5.1.1 : Introduction

La Centrale THEMIS était en fait le Centre National d'Essais Solaire, mais l'omniprésence d'EDF entre la décision de construction (en 1979) et l'arrêt de la production (en 1986) a imposé ce terme, et a aussi permis de dire que cette centrale solaire n'était pas rentable, ce qui n'a jamais été le but de ceux qui avait initié le projet.

En effet, une équipe mixte EDF – CNRS de chercheurs et ingénieurs motivés avait été créée en 1975 avec pour projet la conception, la construction et l'expérimentation d'une centrale solaire thermodynamique : l'équipe THEM. Les principales options technologiques sont choisies, un lieu d'implantation trouvé, des essais préliminaires au four solaire d'Odeillo menées à bien. Mais, fin 1978, l'équipe est dissoute. Cependant, devant le tollé de cette décision, le pouvoir exécutif impose à EDF la construction, sur ces fonds propres, de la centrale.

C'est donc la Région d'Equipement Alpes Méditerranée d'EDF qui se voit contrainte de construire ce prototype, et qui reprend, dans l'urgence une partie des conclusions de l'équipe THEM. La centrale est donc construite avec les normes du nucléaire, et EDF en profite pour tester en vraie grandeur les nouveaux systèmes de commande de ces futures centrales nucléaires. Ce sont d'ailleurs ces composants électroniques innovants qui retardent de plus d'une année le démarrage de la production, qui a lieu au printemps 1983.

Pendant les 3 années de fonctionnement de la centrale, au sein de l'équipe GEST, nous avons pu mener une évaluation scientifique du comportement des différents composants, et conclu à la pertinence de la plupart des choix techniques effectués lors de la phase de conception.

5.1.2 : Les statistiques météorologiques [R4, R8, R9]

Durant les 3 années de production de la centrale, j'avais en charge le parc d'instrumentation météorologique, et l'analyse des diverses données mesurées pour en évaluer l'impact sur le fonctionnement et les rendements de la centrale.

J'avais donc à ma disposition 6 stations météorologiques complètes, avec chacune un pyréliomètre à monture équatoriale automatique, une mesure normalisée de la température extérieure, une mesure de la vitesse et de la direction de vent. 5 de ces stations étaient réparties dans le champ d'héliostats, la 6^{ème} en haut de la tour. Les mesures étaient archivées à un pas de 10 minutes.

Les études faites à cette occasion étaient surtout liées à la détermination de la disponibilité de la centrale (température trop basse, vent trop fort) et à la mesure de l'intrant solaire pour les calculs de rendement.

Sur les 3 années, malgré l'altitude du site (supérieure à 1600 m) très peu d'énergie solaire a été perdue par température extérieure trop basse (l'électronique des héliostats ne supportant pas les températures inférieures à -10 °C). En fait, pendant la période suivie, on n'a perdu qu'environ 15 kWh par m² (sur 1700 annuels) sur 3 jours ensoleillés du mois le plus froid de la période (janvier 1985, avec une température extérieure moyenne de $-4,8\text{ °C}$, et minimale de -18 °C). En ce qui concerne l'année « de référence 1984 », il y a quand même 186 jours de gel, 75 jours à moyenne négative et 25 jours à maximum négatif. Pour de futurs projets en altitude, cette limitation en température est tout de même à vérifier, notamment au niveau de l'électronique et des systèmes de lubrification des moteurs des héliostats.

Un autre phénomène météorologique peut entraver la bonne marche d'une centrale solaire, et ce d'autant plus que les héliostats sont de grande taille (tendance actuelle pour diminuer les coûts) : la vitesse de vent. Malgré la mauvaise réputation du site, et des mesures parfois supérieures à 160 km/h, on a pu estimer la perte par impossibilité de faire fonctionner les héliostats à environ 30 kWh/m² par an, soit moins de 2 % de l'ensoleillement direct reçu. Pour ce qui est des pertes thermiques en chaudière supplémentaires liées à la vitesse du vent, en fonction de sa direction et du fonctionnement de la centrale, on les a estimées en moyenne à environ 100 kW, soit à peu près 1 % de l'énergie incidente. Là aussi, pour d'autres types de chaudières (notamment cylindriques externes), ces pertes pourraient être plus importantes.

Pour ce qui est des mesures d'ensoleillement, elles nous ont permis, avec l'appui de la station d'Odeillo toute proche, de faire des bilans très précis sur la ressource solaire.

Ainsi, pour une moyenne attendue d'environ 1700 kWh/m² an, on a mesuré, sur les 3 années, 1600, 1696 et 1865, ce qui fait une moyenne très légèrement supérieure aux prévisions. Quant aux valeurs maximales mesurées, elles furent souvent au-dessus des 1000 W/m², 100 heures en 1984, 160 heures en 1985, le maximum ayant été de 1080 W/m² en avril 1985). Pour ce qui est du nombre d'heure d'ensoleillement (supérieur à 120 W/m²),

les prévisions étaient de 2400 heures par an. On a mesuré 2415, 2433 et 2610 heures pour les 3 années de fonctionnement de la centrale.

En plus de ces études statistiques, un certain nombre de résultats plus spécifiques ont été obtenus, notamment sur le trouble atmosphérique et sur la dissymétrie matin soir.

Le trouble atmosphérique, (sous la forme de trouble de LINKE) est très faible dans cette vallée de montagne sans industrie. En moyenne, nous avons mesuré une valeur autour de 4,3, soit une atténuation moyenne de 1 % dans le trajet moyen héliostat – récepteur. Pour les plus belles journées par décade, tout au long de l'année on a calculé une valeur de 2,3, et on a souvent mesuré des valeurs de trouble de 2. Si sur le site de Thémis, l'atténuation entre les héliostats et le récepteur est très faible, il n'en serait pas de même pour des champs plus grands et des atmosphères plus trouble (notamment au niveau de la mer).

Un autre phénomène sensible sur le site est, à part pour les mois d'hiver, la non symétrie des énergies arrivant avant et après midi solaire. Sur les 3 années de mesures, 55 % de l'énergie solaire est arrivée le matin (plus de 60 % pour les mois d'été), ce qui fait que le rendement optique du champ d'héliostat eut été amélioré par un décalage vers l'ouest de quelques degrés (favorisant le rendement optique le matin). Un calcul approché effectué pour le champ de Thémis démontrait que l'on pouvait ainsi améliorer de 2 % ce rendement optique. Ce phénomène est certainement à prendre en compte sur tout site où l'on voudrait implanter une centrale, alors qu'actuellement on préconise toujours un champ symétrique par rapport à un axe nord – sud.

Ces quelques résultats de travaux menés entre 1983 et 1986 sont toujours d'actualité, et démontrent l'importance d'une bonne connaissance a priori des conditions météorologiques, à la fois pour les calculs prévisionnels, les conditions limites d'utilisation et pour l'optimisation de l'implantation des champs d'héliostats.

5.1.3 : L'optique des champs d'héliostats [C3, C4, R2, R5, R6]

Le premier travail qui m'échut, en arrivant dans l'équipe, fut de quantifier les performances du champ d'héliostat.

Pour cela, il fallait comparer les résultats expérimentaux obtenus sur site aux prévisions fournies par les divers codes disponibles à l'époque ou développés par l'équipe THEM lors de la conception du champ d'héliostats.

J'ai très vite repris les codes de calculs qui avaient été développés lors de la phase projet, pour y introduire un certain nombre de précisions. Tout d'abord j'ai remplacé les rectangles représentant les héliostats par leur véritable géométrie. Ensuite, j'ai mis au point une méthode « exacte » de calcul des ombres et des blocages, par projection dans la direction du soleil et des rayons réfléchis des héliostats voisins dans le plan de chacun des héliostats. C'est cette méthode, au départ adaptée à la géométrie rectangulaire des miroirs, qui a été généralisée par triangulation de surfaces quelconques pour le calcul des tâches solaires dans les habitacles automobiles et les pièces de bâtiment (voir plus haut).

J'ai aussi intégré la luminance variable du soleil, en remplacement d'un soleil à luminance constante. De plus, j'ai proposé de prendre en compte les différentes irrégularités de surface des miroirs et les erreurs de pointage en site et en azimut sous la forme de distributions gaussiennes, elles-mêmes convoluées à la forme du soleil.

Toutes ces améliorations ont permis d'obtenir des résultats précis, tout en ne demandant que des temps de calcul modérés. Par contre, son adaptation à d'autres champs d'héliostats n'était pas prévue, et aurait certainement demandé de généraliser un certain nombre d'hypothèses.

Des comparaisons entre les résultats de ce code de calcul et des mesures effectuées sur site ont été menées, avec d'importantes difficultés pour avoir des mesures réelles fiables. Globalement, on a obtenu, sur diverses configurations de champs partiels, des densités de flux maximales équivalentes, et une puissance en entrée chaudière très proche, mais des cartes de flux légèrement différentes.

D'autres comparaisons ont été effectuées avec divers codes de calculs de recherche français ou américains, notamment basés sur des techniques de lancers de rayons. Le code que j'avais développé représentait un très bon rapport entre la précision des résultats et les temps de calcul. Par contre, il n'est pas évident que les progrès effectués depuis 20 ans en puissance de calcul et parallélisation ne modifient pas la donne.

C'est pourquoi une des recherches que j'aimerais bien mener dans un avenir très proche serait d'adapter les méthodes de Monte-Carlo développées récemment au laboratoire pour ces calculs de flux solaires concentrés par des champs d'héliostats.

5.1.4 : Quelques résultats obtenus [C8]

La centrale Thémis était, à l'époque, un phare de la lutte des institutions établies contre les doux rêveurs qui croyaient à la possibilité d'utiliser l'énergie solaire à des fins domestiques ou industrielles. Aussi, pour se désengager du projet, les détracteurs de Thémis ont énoncé de très nombreuses contre vérités avant, pendant et au niveau des bilans du programme.

Comme j'ai participé, avec mes collègues du GEST, à la rédaction d'un bilan faisant la synthèse des leçons apprises au cours des 3 années d'évaluation, je vais résumer ici les principaux enseignements de l'évaluation.

L'expérience Thémis a tout d'abord démontré la pertinence des principales options choisies lors de la phase de conception, notamment la souplesse apportée par l'emploi d'un sel fondu comme fluide caloporteur.

Les performances au régime nominal ont été convenablement approchées, tant en ce qui concerne les composants solaires (champ d'héliostats, récepteur solaire) que le système global (rendement net de 0,17 au lieu de 0,19 prévus).

Par contre, les nombreux incidents rencontrés sur les matériels conventionnels et l'importance des consommations auxiliaires, liées au mode de fonctionnement d'EDF pour ses centrales thermiques ont empêché d'avoir une mesure significative de la production annuelle. Pour l'estimer, nous avons développé une analyse de l'ensemble des composants de la centrale qui s'appuie sur des résultats partiels réellement obtenus, et que nous avons extrapolés. Nous avons ainsi défini une véritable filière capable de produire de l'électricité avec un bon rendement.

La centrale Thémis à Targassonne pouvait produire 73 kWh électrique par m² de miroir et par an, ce qui est modeste, mais elle n'était que le premier prototype d'une nouvelle filière. Avec quelques modifications mineures, elle aurait produit environ 160 kWh par m² et par an. Si elle avait été 10 fois plus importante, on serait passé à 240 kWh par m² et par an, et avec un climat saharien ou californien, on aurait pu produire 330 kWh par m² de miroir et par an, ce qui devient notable.

Nous avons donc ainsi caractérisé une filière d'une conception proche du prototype Thémis. Les principales modifications que nous avons proposées sont listées ci-dessous :

- accroître le rendement optique global du champ d'héliostats (réflectivité, disponibilité, conception...);
- simplifier au maximum la conception des boucles fluides, pour éviter tout bouchage d'un circuit par du sel qui figé à température ambiante ;
- bien concevoir les arrêts de la centrale, beaucoup plus longs que la période de production : il faudrait minimiser au maximum les consommations énergétiques pendant les arrêts.

Par ce bilan, nous avons démontré tout l'intérêt de l'évaluation de ce prototype, dont les enseignements sont toujours d'actualité, puisqu'ils ont été utilisés par les concepteurs du projet SOLAR 2, installé en Californie, lui même étant à l'origine du futur projet SOLAR TRES, qui devrait voir le jour prochainement dans le sud de l'Espagne.

5.2 : Activités actuelles (depuis 2002)

En 2002, le département SPI du CNRS a décidé de relancer un Programme Energie au sein du CNRS, sous l'impulsion de Bernard SPINNER, alors directeur de l'IMP (maintenant PROMES). 12 groupes d'analyse thématique ont alors été créés, dont un était consacré au « solaire thermique », dirigé par Alain FERRIERE, chercheur de l'IMP à Odeillo, et ancien collègue de travail sur la centrale Thémis.

Le CNRS avait ouvert son programme à un certain nombre d'équipes universitaires et de laboratoires d'école d'ingénieur, et je fus donc volontaire pour représenter le Centre d'Energétique de l'Ecole des Mines de Paris. L'Ecole des Mines d'Albi, que j'ai rejoint en 2003, était représenté par la responsable de son programme « Rayonnement et Procédés ».

Ce programme est maintenant intégré à l'axe de recherche dont je suis responsable à Albi, ce qui m'a permis de faire adopter un nouveau domaine d'application aux outils numériques

qui y avaient été développés. La démarche de recherche était initialement consacrée à la modélisation des transferts radiatifs pour une meilleure compréhension des phénomènes physiques dans les chambres de combustion. Nous avons vite constaté que certains outils pouvaient très bien être adaptés aux calculs très précis des flux solaires concentrés par tout type de champ d'héliostats. Après une description rapide de la démarche qui a permis de mettre au point les outils développés, sans ma participation, je présenterai le contexte de leur adaptation aux calculs pour le domaine du solaire concentré.

5.2.1 : Introduction : le programme « rayonnement et procédés » du laboratoire

La démarche originale de l'équipe a été de développer en parallèle un outil de simulation, dit de référence, basée sur la résolution de la forme intégrale de l'équation des transferts radiatifs par une méthode statistique de Monte Carlo, et un outil « simplifié », s'appuyant sur une méthode aux ordonnées discrètes [9].

Au départ, cette démarche avait pour but de pallier aux imprécisions liées aux hypothèses simplificatrices très simplistes prises en compte pour modéliser les échanges radiatifs dans la plupart des procédés à haute température. En effet, d'une façon générale, le rayonnement est mal pris en compte dans ces procédés malgré son influence sur le rendement énergétique, l'émission de polluants ou la tenue des matériaux.

Dans ce contexte, les objectifs du programme « rayonnement et procédés » sont multiples :

- Mieux comprendre les processus d'échange par rayonnement dans les systèmes complexes (couplages rayonnement - chimie, écoulement - rayonnement des particules...).
- Développer des modèles et des simulations des transferts radiatifs dans les procédés, notamment les systèmes en combustion.
- Mettre au point des méthodes de diagnostic non intrusives afin de valider les modèles et de proposer des voies pour le contrôle en ligne des procédés (méthodes inverses).

Les problèmes sont abordés d'une façon pluridisciplinaire à travers des collaborations dans différents domaines : physique (LE de l'UPS à Toulouse), combustion, (CERFACS à Toulouse), informatique (IRIT à Toulouse), procédés (PROMES du CNRS à Odeillo).

Le programme « rayonnement et procédés » a donc développé deux grandes familles d'outils :

- Des outils très précis, dits de référence, basés sur des algorithmes de Monte-Carlo ;
- Des modèles approchés, basés sur une méthode aux ordonnées discrètes.

Ces développements numériques sont appuyés par des expérimentations de laboratoire, qui permettent, dans des conditions bien déterminées, de valider les résultats obtenus par les différents codes de calcul développés.

5.2.1.1 : Les outils de référence

Ils sont basés sur la résolution de l'équation des transferts radiatifs sous sa forme intégrale, qui permet le calcul des échanges nets entre 2 éléments de surface, 1 élément de surface et un volume élémentaire, ou entre 2 volumes élémentaires.

A priori, aucune approximation n'est nécessaire, et la résolution de l'équation se fait à travers une méthode de Monte-Carlo, pour laquelle on introduit des lois de distribution spécifiques à chaque problème posé. Cette méthode, exacte après une infinité de tirages, permet d'avoir, en même temps que la résolution de l'équation, une estimation de la précision du calcul. Il est donc possible d'arrêter le calcul lorsque la précision demandée est atteinte.

Malgré les innovations mises au point, les temps de calculs restaient importants, et de nouvelles améliorations ont été développées :

- D'une part, pour prendre en compte les géométries complexes, on a développé des algorithmes de suivi de rayons à partir de techniques employées dans le cadre de la synthèse d'image (jeux vidéos).
- D'autre part, on a utilisé une propriété de la formulation de l'équation sous sa forme intégrale pour calculer, sans surcoût en temps de calcul, la sensibilité des résultats obtenus à l'ensemble des paramètres pris en compte, y compris la sensibilité aux bornes des intégrales.

Ce sont ces modèles de référence que nous comptons adapter aux calculs de flux solaires concentrés collectés par des champs d'héliostats.

5.2.1.2 : Les modèles simplifiés

Ce sont ces modèles qui sont utilisés l'étude présentée au chapitre 4.4.2. Ils ont, dès le début du programme, été conçus pour des couplages futurs avec d'autres codes simulant d'autres phénomènes physiques, notamment ceux de mécanique des fluides.

Dans cette optique, l'équipe a développé un code de calcul des transferts radiatifs basé sur la Méthode aux Ordonnées Discrètes et utilisant des maillages non structurés issus de la dynamique des fluides.

Si il n'est pas envisagé, dans un futur proche, de coupler les codes de référence avec des codes représentant l'évolution d'autres phénomènes, les modèles « simplifiés » doivent permettre, dans un proche avenir, de tels couplages. C'est le sujet actuel de quelques équipes internationales, et les difficultés rencontrées sont pour la plupart liées au caractère « non local » des transferts radiatifs, contrairement aux autres phénomènes physiques et thermiques.

5.2.2 : Les centrales innovantes [P6, T10]

Les centrales solaires existantes (prototypes construits depuis 30 ans et nouvelles centrales commerciales) sont limitées par l'utilisation de cycles classiques basés sur des composants plus ou moins éprouvés, avec des rendements en électricité dépassant souvent les 25 % au point nominal et les 20 % en moyenne annuelle.

Si l'on veut augmenter les rendements de ces systèmes, une des solutions les plus prometteuses est d'utiliser, dans le cadre des centrales à tour, des cycles combinés (turbine à gaz et turbine à vapeur en série), l'air caloporteur étant chauffé à plus de 1000 °C dans un récepteur au foyer du concentrateur solaire.

Cela pose le problème du nouveau cahier des charges pour le concentrateur, qui doit générer au foyer, avec des puissances de plusieurs dizaines de MW, des densités de flux beaucoup plus importantes, et sans doute beaucoup plus constantes tout au long de l'année. D'où le besoin de nouveaux outils de calculs pour prédire les cartes de flux obtenues, et notre volonté d'adapter nos outils de transfert radiatifs à ce problème. Nous espérons aussi développer les moyens de faire de la conception optimisée de concentrateurs, en fonction des cartes de flux que l'on voudra obtenir au foyer. Les bases de ce travail sont données au chapitre 5.2.4.

Les cycles à turbine à gaz entraînent aussi le développement d'une nouvelle génération de récepteurs solaires, qui vont travailler à plus haute température, et chauffer un gaz plutôt qu'un liquide. C'est ce composant qui demande actuellement le plus de développement technologique, tant au niveau de sa conception thermique que géométrique. Le choix des matériaux à utiliser est aussi très important, surtout pour supporter les cyclages thermiques engendrés par le caractère discontinu de la ressource solaire. Dans ce cadre, nous avons commencé l'étude d'un nouveau type de récepteur, basé sur un lit fluidisé de particules réfractaires directement soumises au rayonnement solaire concentré. L'étude, en cours, est présentée au chapitre suivant.

Enfin, depuis octobre 2004, je participe à l'encadrement d'une thèse dont le titre est : développement d'un outil technico-économique pour la conception optimisée de centrales solaires thermodynamiques. Cette thèse est financée par les départements Energies Renouvelables de l'ADEME et de TOTAL. Elle se déroule à Odeillo, au sein du PROMES. Ma contribution a porté sur les calculs de cycles thermodynamiques et les calculs de champs liés aux performances des champs d'héliostats.

Le premier sujet concerne l'analyse des cycles thermodynamiques (notamment par l'utilisation de l'outil THERMOPTIM, développé par Renaud GICQUEL de l'Ecole des Mines de Paris). L'expérience acquise pendant plusieurs années, notamment par mes enseignements, dans le domaine a pu être mise à contribution, et a permis à Pierre GARCIA d'avoir une approche pragmatique des phénomènes.

L'autre sujet que j'ai plus spécifiquement suivi concerne les calculs de flux, à partir des codes issus de l'expérience THEMIS, et des études menées à l'époque sur le sujet. Cette étude a été très orientée sur les logiciels de calculs des flux solaires concentrés par des champs d'héliostats (avec une application pratique directe sur le champ d'héliostats de THEMIS). Le tableau ci-après reprend les principales caractéristiques des 5 logiciels étudiés.

On retrouve les 2 grandes approches mathématiques de codes de calcul, déjà présentes dans les années 1970, par techniques statistiques de Monte-Carlo ou par approches plus

analytiques par convolutions. Ces deux familles, correspondant aux deux types de problèmes rencontrés dans l'étude d'une installation solaire à récepteur central :

- famille 1 : codes de calcul des performances d'un champ pour une installation donnée comme MIRVAL, SOLTRACE ou FIAT LUX,
- famille 2 : codes d'optimisation de la conception d'un projet d'installation comme WINDELSOL ou HFLCAL.

Etude comparative sur les codes pour le calcul des flux concentrés

Name	MIRVAL	FIAT LUX	WINDELSOL	HFLCAL	SOLTRACE
Utilisé par	SANDIA / DLR	CIEMAT-PSA	CIEMAT	DLR	NREL
Technologies	CRS	CRS	CRS	CRS	CRS-PT-DS-SF-PV
Années de développement	1978	1999-2000 (pas de manuel utilisateur)	2001	1986	1999-2004
Disponibilité	public	en validation	public	non diffusé	public
Langage de Prog.	FORTRAN	MATLAB	FORTRAN - Basic	FORTRAN	Delphi5
Méthode de calcul	Monte-Carlo	Monte-Carlo (?)	Convolution	Convolution	Monte-Carlo
Réflexion multiple	oui	non	non	oui	oui
Type de surface réceptrice	plane ou cylindrique	plane	plane, cavité ou cylindrique	plane, cylindrique ou conique	quelconque
Modèle pour performances annuelles	oui	non, calcul à une instant donné	oui	oui	non, calcul à une instant donné
Calculs économiques	non	non	oui	oui	non
Optimisation	sur critères énergétiques (ajout DLR)	non	par méthode RS, sur critères énergétiques	sur critères économiques	non

Figure 43 : tableau comparatif des logiciels de calculs de champ d'héliostats disponibles en 2006

Dans le cadre général de nos recherches futures sur la conception de centrales solaires innovantes, il semble intéressant de maîtriser un logiciel de chaque famille. En effet, les logiciels de famille 1 permettraient d'évaluer la distribution de flux disponible en haut d'une tour (comme celle de Thémis) et donc de dimensionner en conséquence un récepteur (comme celui de Pégase, premier projet concret proposé dans le cadre de la réouverture du centre d'essais solaires sur le site de l'ancienne centrale Thémis).

La polyvalence de SOLTRACE le rend intéressant pour d'autres sujets de recherche, comme les fours solaires ou les paraboles Stirling. C'est celui qui a été utilisé pour la modélisation du projet Pégase. Il a servi notamment à l'étude paramétrique des performances du champ en fonction de la précision de pointage et de la stratégie de visée, à la description de la tache focale sur la surface d'un ou plusieurs modules de récepteurs disposés en sommet de tour, et à l'établissement d'une matrice d'efficacité précise.

Les logiciels de famille 2, tels que WINDELSOL, semblent plus pertinents pour l'évaluation technico-économique des diverses filières de centrales à tour. Cependant de nombreuses extensions ou modifications seront sans doute à apporter pour les adapter à l'étude des concepts de centrales de nouvelle génération.

Enfin, nous avons aussi conclu à une inadéquation des codes actuels à faire des calculs assez précis pour la conception de nouveaux systèmes de concentration, à la fois puissants et permettant de collecter l'énergie à très haut niveau de température.

5.2.3 : Les récepteurs solaires à haute température pour les centrales à tour [T11]

Pour collecter de l'énergie à moins de 600 °C, les récepteurs actuels des centrales solaires à tour sont des cavités plus ou moins fermées, tapissées de tuyaux par lesquels passe le fluide caloporteur. Celui-ci est soit un « sel » fondu, soit directement de l'eau sous pression (liquide ou vapeur). L'énergie ainsi récoltée sert de source chaude à un cycle classique de Rankine, en récupérant l'énergie mécanique au travers d'une turbine à vapeur.



Figure 44 : cavité réceptrice de la Centrale THEMIS

Pour améliorer le rendement thermodynamique, une des solutions est d'utiliser une source d'énergie plus chaude, ce qui est tout à fait possible avec un concentrateur solaire. On peut ainsi utiliser des turbines à gaz, en adoptant l'air sous pression comme fluide caloporteur. En théorie, avec une source chaude à 1500 °C, et un cycle combiné (cycle de Rankine en récupérant la chaleur des gaz en sortie de turbine) on peut largement dépasser les 50 % de rendement thermodynamique.

Cependant, chauffer de l'air sous pression à plus de 1000 °C, voire 1500, pose de nombreux problèmes technologiques. Les solutions actuellement testées ou en projet passent par des échangeurs solide – air (projets SOLGATE ou PEGASE). Les surfaces d'échange assez faibles et le cyclage thermique des matériaux utilisés font que ces solutions semblent largement perfectibles.

C'est pour proposer une alternative que nous avons entamé, dans le cadre d'une thèse, une étude sur l'utilisation de lits fluidisés directement insolés comme collecteur d'énergie solaire concentrée. Nous profitons ainsi des compétences du laboratoire sur les solides divisés, en plus des outils développés pour les calculs radiatifs.

La technique des récepteurs solaires à lits fluidisés a déjà été testée pour les centrales à tour, il y a près de trente ans, dans une autre configuration, le flux concentré arrivant presque horizontalement. Dans notre travail, nous utilisons un nouveau concept de

concentrateur, avec réflecteur secondaire, qui permet de recevoir les flux solaires verticalement.

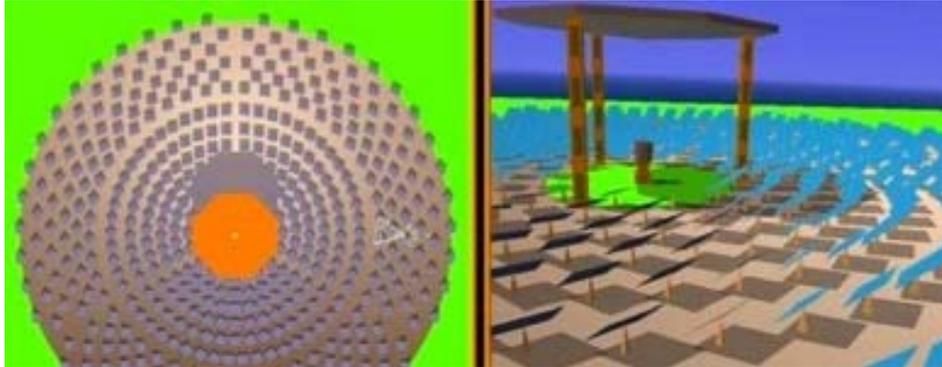


Figure 45 : Concept de champ d'héliostats à réflecteur secondaire

La thèse est en cours. Elle doit déboucher sur la conception d'un récepteur solaire optimisé, tant en rendement thermique qu'en efficacité d'échange. Un premier prototype a déjà été testé en laboratoire en ensoleillement artificiel, un second sera installé au foyer du four solaire de 6 kW du PROMES à Odeillo. En parallèle, un modèle fin des transferts thermiques régnant dans le récepteur à lit fluidisé à été développé, à partir des outils numériques du laboratoire.

5.2.4 : Les calculs radiatifs

Le rayonnement solaire concentré permet d'obtenir au foyer des concentrateurs des densités de flux très importantes (jusqu'à 20 MW par m²). Les besoins actuels en chimie solaire et en production d'électricité solaire par voie thermodynamique nécessitent des outils de conception de concentrateurs de plus en plus précis et rapides.

Comme nous l'avons vu plus haut, notre équipe a mis au point de nouvelles méthodologies pour le calcul des transferts radiatifs, basées sur des algorithmes statistiques de type Monte-Carlo. Leur application aux calculs des flux solaires concentrés engendrés par des champs de miroirs semble très prometteuse, et permettrait une optimisation plus efficace de la conception de tout concentrateur de l'énergie solaire. Nous avons donc décidé de proposer un nouveau travail de thèse sur ce sujet.

Le travail que nous allons entamer sera donc de formaliser le problème de la concentration du rayonnement solaire, puis d'adapter les algorithmes développés à ce cas particulier. Les premiers résultats, sur des configurations simplifiées, seront comparés à des solutions analytiques connues, et les résultats des simulations complètes seront confrontés à des mesures effectuées sur le champ d'héliostat du projet PEGASE du PROMES.

Ensuite, ces algorithmes devront être intégrés dans une plate-forme logicielle pour permettre l'optimisation de la conception des concentrateurs en fonction des cartes de flux à obtenir à leurs foyers pour des applications à hautes et très hautes températures (jusqu'à 2500 K).

5.3 : Conclusion et perspectives

A l'heure où les nouvelles incitations tarifaires rendent de plus en plus crédible l'émergence d'une filière thermodynamique de production d'électricité, de nouveaux besoins de recherche apparaissent, la plupart liés aux plus hautes densités de flux nécessaires à la collecte d'énergie solaire.

Pour améliorer les performances de cette filière, il faut concevoir des procédés innovants basés sur de nouveaux concentrateurs plus efficaces à de plus haut niveau de température ; il faut concevoir de nouveaux collecteurs à haute et très haute température, capables de chauffer de l'air sous pression à plus de 1500 °C.

Nous sommes engagés, avec l'aide des chercheurs du PROMES et du LAPLACE, dans cette problématique. Ce retour à mes activités passées devrait prendre une part grandissante de mon emploi du temps, d'autant plus que nous sommes à l'aube d'un véritable essor de ce domaine de recherche et d'innovation.

6 : Conclusions et perspectives

Malgré ma nouvelle localisation dans un centre de recherche dont la thématique principale est « les solides divisés », je resterai, ainsi que l'équipe dont je suis responsable, très marginal par rapport au laboratoire sur mes sujets de recherche, toujours très liés aux transferts thermiques, avec pour applications principales les bâtiments et l'énergie solaire.

Cette marginalité n'est d'ailleurs même localement que très relative, au vu de l'intérêt porté par la majorité des élèves de l'école sur les problèmes liées aux énergies, notamment renouvelables, et de l'intérêt porté par l'ensemble des collectivités territoriales qui nous entourent pour cette expertise dans ces domaines.

Cette expertise est surtout liée aux compétences que nous avons acquises dans le domaine de l'efficacité énergétique des bâtiments, avec, ou non, association avec l'énergie solaire.

Les études que l'on nous propose sont, le plus souvent, très appliquées, dans le cadre de consortiums régionaux, nationaux ou européens. Les outils mis au point au cours de mes recherches antérieures, adaptés au coup par coup aux problématiques spécifiques de chaque étude, sont largement suffisants et ne demandent pas de remise en cause fondamentale de la méthodologie décrite dans ce rapport.

Ces études, nombreuses et correctement financées, pourraient déboucher, à court terme, sur une nouvelle structuration de notre équipe de recherche, avec extraction du laboratoire et association plus ou moins formalisée à d'autres intervenants du secteur, spécialistes de l'innovation ou chercheurs en sociologie, architectes ou industriels...

Cependant, cet avenir potentiel, sans doute très confortable, ne me satisfait pas entièrement, le virus de la recherche, qui ne m'a jamais quitté, m'orientant plutôt vers des questions plus académiques.

En fait, il existe des perspectives de recherche à un niveau plus fondamental, et elles sont rendues possibles par l'ensemble d'outils méthodologiques mis au point dans notre laboratoire pour une meilleure connaissance des transferts radiatifs. Ces outils, décrits au chapitre précédent, permettent de mieux prendre en compte la double complexité, géométrique et spectrale, des échanges nets par rayonnement entre surfaces (avec leurs propriétés optiques), volumes (et les milieux participants qu'ils contiennent)...

Dans les recherches auxquelles je participe actuellement, et que je compte développer dans les années à venir, c'est principalement au niveau de l'utilisation de l'énergie solaire concentrée que nous tentons d'adapter ces outils, tant pour les systèmes concentrateurs que pour les récepteurs transformant l'énergie électromagnétique en énergie thermique.

Ces recherches ne pourraient pas être menées en dehors d'une collaboration étroite avec une équipe de chercheurs « théoriciens » du laboratoire LAPLACE à Toulouse, et mes

collègues chercheurs du laboratoire PROMES à Odeillo. Cette collaboration, associée à la marginalité de nos recherches dans notre propre laboratoire, nous imposera, à court terme, de sortir de notre cadre de recherche actuel.

Faudra t'il que notre équipe de thermiciens se rapproche de nos partenaires naturels, sur la base d'un gros projet international, d'un rassemblement structurel, d'un déplacement géographique ?

La réponse n'est pas encore sûre, mais ce sera le prix à payer pour continuer à exercer pleinement le métier passionnant de chercheur.

Bibliographie

- [1] E. SAKR, C. SERVANT, P. LACOMBE
Investigation into the effect of an increase in tungsten content on the behaviour during ageing of maraging type Fe-Ni-Co-W alloys
Journal of Materials Science, vol. 16 Issue 2 (1981), p 465-476
- [2] A. BUHSING
Neptunix 4
Conférence SIMOUEST – Ecole Centrale de Nantes – 4, 5 juin 1998
- [3] Y. JALURIA, K. E. TORRANCE
Computational Heat Transfer
Hemisphere Publishing Company, New York, 1986
- [4] F. PERRIN, J. F. SACADURA, M. J. PAKLEZA
Elaboration d'un modèle de simulation numérique du comportement thermique d'un habitacle automobile : de la conception à l'utilisation
SFT, journée d'étude sur les codes de calcul en convection. Paris ; 27 mars 1991
- [5] C. INARD
Les modèles zonaux en thermique du bâtiment
Mémoire d'habilitation à diriger les recherches – INSA de Lyon et Université Claude BERNARD Lyon 1 – 6 décembre 1996
- [6] T. LETZ
Les systèmes solaires combinés : quel bilan et quel avenir ?
Présentation aux journées thématiques SFT – IBPSA, Le Bourget du Lac, 21 mars 2006
- [7] J. C. GRIESEMANN, B. MARCENARO, P. ACHARD
FEVER : Fuel Cell Electrical Vehicule for Efficiency and Range
Rapport de fin de contrat pour la Commission des Communautés Européennes – JOU – 2 – 031 : 30 juin 1998
- [8] L. ROUYEYRE
Contribution à l'optimisation du système de génération d'électricité comprenant une pile à combustible pour le véhicule électrique
Thèse de doctorat en « énergétique » de l'Ecole des Mines de Paris : 1^{er} avril 1998
- [9] M. EL HAFI
Modélisation des transferts radiatifs dans les procédés de combustion
Mémoire d'habilitation à diriger les recherches – Université Paul SABATIER Toulouse ; 10 novembre 2006

Annexe 1 : Activités pédagogiques et responsabilités administratives

Mon statut d'ingénieur de recherche aurait dû me « protéger » de charges d'enseignement trop pesantes. Cependant, et notamment depuis mon arrivée à Albi, en 2003, j'assume une charge pédagogique à peu près équivalente à la moyenne de mes collègues enseignants chercheurs. Si on y ajoute les diverses responsabilités administratives dont j'ai été chargé, c'est plus de la moitié de mon temps de travail qui est résumée dans cette annexe.

Les activités pédagogiques présentées ici portent sur les enseignements effectués depuis 1981 dans le cadre de formation diplômantes de l'enseignement supérieur.

Dans cette annexe est aussi listé l'ensemble de mon action d'encadrement de travaux diplômants, tant les thèses que j'ai encadrées ou co encadrées que les travaux de fin d'études d'ingénieurs, de mastere de spécialité ou de DEA.

Cette annexe est complétée par un rappel des responsabilités administratives ou d'animation de la recherche que j'ai eu, ou que j'assume encore, tout au long de ces dernières années.

A1.1 : Activités d'enseignement

Les différents enseignements sont présentés par établissement d'enseignement supérieur, et plus ou moins par ordre chronologique.

Ils sont essentiellement concentrés dans les domaines des **Transferts Thermiques** (tous types d'échanges de chaleur), des **Procédés Thermodynamiques de Production d'énergie mécanique** et des **Energies Renouvelables**.

A1.1.1 : Enseignement antérieurs à 1989

Mes premières expériences d'enseignement ont eu lieu à la Faculté des Sciences et Techniques de Monastir, au sein de l'Université de Tunisie entre 1981 et 1983.

- Travaux Dirigés de Physique (2 groupes de 25 étudiants) en 1^{ère} année de 1^{er} cycle
- Travaux dirigés de Thermohydrodynamique (7 étudiants) en 5^{ème} année Ingéniorat
- Etude des couches limites, étude des ondes de choc
- Cours et travaux dirigés dans le cadre d'un enseignement de 20 heures sur les Energies Renouvelables (7 étudiants) en 5^{ème} année d'Ingéniorat
- Energie Solaire Thermique et Photovoltaïque, Energie Eolienne, Petites Centrales Hydrauliques
- Travaux dirigés du Cours de Thermique (20 étudiants) en Maîtrise de Physique
- Transferts thermiques par conduction, rayonnement et convection

A1.1.2 : Enseignements à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris (1992 – 2004)

De 1989 à 2003, bien que basé à Sophia Antipolis, j'ai toujours eu la volonté de participer aux enseignements de l'Ecole des Mines de Paris, malgré les contraintes géographiques que cela pouvait parfois entraîner.

De plus, j'ai participé activement aux enseignements donnés sur place, tant dans le cadre du DEA commun avec l'Université de Nice (puis l'Université de Marseille) que dans les différentes formations de 3^{ème} cycle propres à l'Ecole des Mines de Paris.

A1.1.2.1 : DEA de Mécanique Energétique commun à l'Université de Nice Sophia Antipolis et à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris (10 étudiants en moyenne) (1992 – 2000)

Ces enseignements ont duré jusqu'à la fermeture de ce DEA, en 2000.

- Cours et TD de transferts thermiques par rayonnement (1992 – 2000)
 - *Définitions : émetteurs, récepteurs*
 - *Le corps noir*
 - *Les échanges entre surfaces noires*
 - *Les échanges entre surfaces réelles*
 - *Les milieux semi transparents*
 - *La concentration du rayonnement solaire*

- Cours et TD de transferts thermiques par conduction (1994 – 1996)
 - *Théorie de la conduction de la chaleur*
 - *Conduction en régime stationnaire*
 - *Conduction en régime dynamique*

A1.1.2.2 : Tronc commun du cycle civil de l'Ecole des Mines de Paris (1996 – 2002)

Ces enseignements ont eu lieu à Paris, et j'ai renoncé à y participer après mon installation à Albi, où mes activités locales d'enseignement ont vite pris de l'ampleur.

- Encadrement de projet dans le cadre des enseignements de Transferts Thermiques à l'Ecole des Mines de Paris :
 - *Tronc commun 2^{ème} année du cycle civil 1996 – 2001 (25 élèves)*
 - *Tronc commun 1^{ère} année du cycle civil 2000 – 2002 (20 élèves)*
 - *Transferts thermiques couplés rayonnement – convection dans une enceinte automobile pour en apprécier les conditions de confort*
 - *Transferts thermiques couplés rayonnement – conduction – convection dans un capteur solaire plan pour simuler l'efficacité énergétique d'innovations technologiques*

A1.1.2.3 : Enseignements spécialisés de l'Ecole des Mines de Paris (1996 – 2002)

Les TP étaient dispensés à Sophia Antipolis, au cours de semaines bloquées en présence des élèves parisiens.

- Montage et encadrement d'un TP (2^{ème} année du cycle civil) numérique et expérimental sur la Thermique de l'habitacle automobile (1996 – 1999)
 - *Transferts thermiques couplés rayonnement – convection dans une enceinte automobile pour apprécier les conditions de confort apportés par des systèmes passifs de diminution de la charge thermique*

Les projets étaient encadrés à Paris, au cours d'une dizaine de séances.

- Encadrement de projet dans le cadre des enseignements de Machines thermique (3^{ème} année du cycle civil) à l'Ecole des Mines de Paris (2001) :
 - *Conception d'une centrale à énergie solaire basée sur un moteur ERICSSON*

A1.1.2.4 : Mastère de Mécanique Numérique du Centre de Mise en Forme des Matériaux de l'Ecole des Mines de Paris (1999 – 2003)

Ce Mastère a été créé en 1999. J'y ai représenté le Centre d'Energétique pendant 4 années, et y fût membre permanent du Comité Pédagogique et du jury d'attribution du diplôme (10 élèves en moyenne).

- Cours et TD de transferts thermiques (1999 – 2002)
 - *Rayonnement*
 - *Conduction*
 - *Convection*
- Cours et TD de transferts radiatifs (2003)
- TP de thermique numérique (1999 – 2002)
 - *Utilisation comparée de FLUENT et MATLAB pour résoudre le même problème de transferts thermiques :*
 - *Thermique de l'habitacle automobile*
 - *Thermique d'un four de préchauffage de billettes d'acier*

A1.1.2.5 : Mastère « Ingénierie et Gestion de l'Energie » des Centres d'Energétique et de Mathématiques Appliquées de l'Ecole des Mines de Paris (2000 – 2002)

J'ai activement participé à la mise en place du Mastère, qui a ouvert en Octobre 2000. J'y fus membre permanent du Comité Pédagogique et du jury d'attribution du diplôme (15 élèves en moyenne)

- Cours et TD de Machines Thermiques (2001 – 2002)
 - *Rappels de thermodynamique et des cycles moteurs*
 - *Echangeurs de chaleur*
 - *Combustion et turbines à gaz*
 - *Génération de vapeur et cycles diphasiques*
 - *Cycles combinés et cogénération*

A1.1.2.6 : Mastère européen en Energies Renouvelables du Centre d'Energétique de l'Ecole des Mines de Paris (2002 - 2004)

J'ai activement participé à la mise en place de ce Mastère, qui a ouvert en Octobre 2002 : en moyenne, 8 élèves issus de divers pays de l'Union Européenne. Lors de son année d'ouverture, seule année avant mon transfert à Albi, j'étais l'enseignant ayant le plus d'heures de cours

- Cours et TD de transferts thermiques (2002 – 2004)
 - *Rayonnement*
 - *Conduction*
 - *Convection*
- Cours sur les Machines Thermiques (2002 – 2004)
- Cours sur l'Energie Solaire Thermique (2002)
 - *Procédés solaires pour l'habitat*
 - *Procédés solaires à haute température*
- Responsable du module et des cours sur la production d'énergie à partir de petites centrales hydrauliques (2002 – 2003)
 - *Les différentes turbines hydrauliques*
 - *Les différentes phases d'un projet de petite centrale hydraulique*

Depuis 2004, je n'effectue plus d'activité d'enseignement pour l'Ecole des Mines de Paris.

A1.1.3 : Enseignements dans des établissements d'enseignement supérieur autres que les Ecoles des Mines (2000 – 2006)

Par mes divers contacts académiques, notamment au travers de la Société Française de Thermique, on m'a proposé d'effectuer un certain nombre d'enseignements dans des établissements ne relevant pas du Ministère de l'Industrie.

Ces activités se poursuivent, permettant des contacts fructueux avec d'autres équipes pédagogiques.

A1.1.3.1 : Université d'Aix Marseille II – Institut de Mécanique de Marseille (2000 – 2006)

Ces enseignements portent sur 2 matières différentes dans le cadre de 2 cursus différents.

Dans le cadre de la Maîtrise de Technologie Mécanique de (2000 – 2002) :

- Cours et TD de Machines Thermiques (2000 – 2002) (25 élèves en moyenne)
 - *Rappels de thermodynamique et des cycles moteurs*
 - *Echangeurs de chaleur*
 - *Cycles frigorifiques*

- *Combustion et turbines à gaz*
- *Génération de vapeur et cycles diphasiques*
- *Cycles combinés et cogénération*
- *Energie solaire et piles à combustible*

Dans le cadre d'un Master Professionnel en Génie Civil (depuis 2005)

- Cours sur l'efficacité énergétique des bâtiments (depuis 2005) (25 élèves)
 - *Typologie des bâtiments et consommations énergétiques spécifiques*
 - *Transferts thermiques*
 - *Le confort thermique : physiologie, critères et mesure.*
 - *La conception*
 - *Les procédés de maintien du confort*
 - *Intégration des énergies renouvelables : solaire passif, solaire actif, géothermie...*

A1.1.3.2 : Ecole Nationale Supérieure de Techniques Avancées (2001 – 2002)

J'ai participé, pendant 2 années scolaires, aux enseignements d'une option de dernière année du cycle Ingénieur Civil, dans le module Modélisation et Contrôle des Procédés.

- Cours et TD « Procédés performants de production d'électricité et de cogénération » (2001 – 2002) (9 élèves)
 - *Rappels de thermodynamique et introduction aux outils logiciels*
 - *Eléments de combustion et turbines à gaz*
 - *Les échangeurs et installations à vapeur*
 - *Cycles combinés et cogénération*
 - *Piles à combustible*

A1.1.4 : Enseignements à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines d'Albi

En 1992-1993, depuis Sophia Antipolis, j'ai participé au montage de l'option énergétique des promotions de formation continue de la toute nouvelle Ecole des Mines implantée à Albi. J'y ai, dans ce cadre, effectué des enseignements jusqu'en 1996.

Depuis mon installation dans cet établissement, j'ai été chargé d'un certain nombre d'enseignements, la plupart nouveaux.

A1.1.4.1 : Ecole Nationale Supérieure des Mines d'Albi (1992 – 1995) en tant que vacataire

Cycle Formation Continue : Option Energétique (en moyenne 10 élèves par promotion)

- Cours et TD de transferts thermiques par rayonnement (1993 – 1996)
 - *Définitions : émetteurs, récepteurs*
 - *Le corps noir*
 - *Les échanges entre surfaces noires*
 - *Les échanges entre surfaces réelles*

- *Les milieux semi transparents*
- *La concentration du rayonnement solaire*
- Cours et TD de transferts thermiques par convection (1993 – 1994)
 - *Rappels sur les couches limites*
 - *Convection naturelle*
 - *Convection forcée*

A1.1.4.2 : Ecole Nationale Supérieure des Mines d'Albi Carmaux (depuis 2003)

Certains cours ont lieu dans le cadre de l'Option Génie Energétique : (20 élèves de dernière année en moyenne)

- Cours et TD de Politique Mondiale de l'Energie (depuis 2003)
 - *Gisements et ressources*
 - *Echanges Internationaux*
 - *Analyse prévisionnelle d'un filière*
 - *Intérêt des Energies Renouvelables*
- Cours et TD sur l'énergie solaire (depuis 2004)
 - *Gisement solaire*
 - *Procédés solaires pour l'habitat*
 - *Procédés solaires à haute température*
 - *Electricité solaire photovoltaïque*
- Encadrement des Projets Thermiques (2004) : 20 élèves

D'autres cours ont pour cadre le cycle de formation initiale, au sein du département Génie des Procédés - Energétique

- Cours électif IFI2 et IFI3 : Energie solaire (2004-2006) : 35 élèves en moyenne
 - *Gisement solaire*
 - *Procédés solaires pour l'habitat*
 - *Procédés solaires à haute température*
 - *Electricité solaire photovoltaïque*
- Cours électif IFI2 et IFI3 : Energies renouvelables (depuis 2006) : 40 élèves en moyenne
 - *Contexte énergétique*
 - *Energie solaire*
 - *Energie éolienne*
 - *Petite hydraulique*
- Cours modulaire IFI 3 : Transferts radiatifs (2005) 26 élèves
 - *Définitions : émetteurs, récepteurs*
 - *Le corps noir*
 - *Les échanges entre surfaces noires*
 - *Les échanges entre surfaces réelles*
 - *Les milieux semi transparents*
 - *La concentration du rayonnement solaire*

- Encadrement de TD de transferts thermiques (2005) IFI2 : 25 élèves
 - *Transferts de masse et de chaleur par convection*
- Encadrement d'un projet IFI3 (2004) : 5 élèves
 - *Conception et réalisation d'un concentrateur solaire*

A1.1.5 : Autres activités pédagogiques

J'ai aussi organisé et encadré, entre 1992 et 2000, pour la Direction de la Recherche de Gaz de France, de nombreux stages de formation à la modélisation dans l'environnement ALLAN.SIMULATION.

Enfin, en septembre 2000, j'ai co-organisé et été enseignant principal, à Hô Chi Minh Ville, au Vietnam, d'un séminaire international sur la Maîtrise de l'Energie dans les bâtiments tertiaires, pour le compte de l'Agence Internationale de la Francophonie, avec l'aide de l'ADEME.

A1.2 : Encadrement de travaux de recherche diplômants

A1.2.1 : Encadrement de Thèses de doctorat (11)

[T1] HOUZELOT-BRIAND Patricia

Etude du couplage thermique dynamique entre un émetteur de chaleur et son environnement (Transient heat transfer between an heat emittor and its surroundings).

Thèse de Doctorat en Energétique, Ecole des Mines de Paris, 15 juin 1992.

Co-encadrement avec Michel GSCHWIND (50 %)

[T2] CHEIKH Abdellatif

Etude numérique et expérimentale des transferts thermiques au sein d'un habitacle de voiture automobile à l'arrêt sous conditions climatiques réelles (Numerical and experimental study of heat transfer in a stationary car cell under real climatic conditions)

Thèse de Doctorat en Energétique, Ecole des Mines de Paris, 3 décembre 1992.

[T3] MOOTZ Frank

Modélisation numérique des transferts thermoconvectifs d'un panneau de façade ventilé (Numerical simulation of convective and conductive heat transfer in a ventilated panel).

Thèse de Doctorat Européen en Energétique, Ecole des Mines de Paris, 17 décembre 1993.

[T4] FONZES Georges

Etude et amélioration des conditions thermiques dans un habitacle de voiture (Thermal behaviour of a vehicle passenger cell. Study and improvement).

Thèse de Doctorat en Energétique, Ecole des Mines de Paris, 13 juillet 1994.

[T5] MELKA Slimane

Etude théorique et expérimentale des transferts thermiques dans les milieux poreux granulaires pour l'isolation thermique (Theorical and experimental study of the heat transfer in granular porous media for the thermal isolation).

Thèse de Doctorat « Energétique », Ecole des Mines de Paris, 25 mars 1996.

[T6] NEROT-SALHI Sophie

Techniques d'analyse d'images appliquées à l'étude des structures dans les écoulements (Image analysis applied to the study of the structures in flows).

Thèse de Doctorat « Energétique », Ecole des Mines de Paris, 12 décembre 1996.

Co-encadrement avec François CAUNEAU (40 %)

[T7] GUERASSIMOFF Gilles

Etude numérique de jets d'air horizontaux et de la brumisation en vue de leur couplage pour le rafraîchissement d'enceintes habitables (Numerical study of horizontal air jets and brumisation in view to be coupled for cooling of habitable enclosures).

Thèse de Doctorat « Energétique », Ecole des Mines de Paris, 7 novembre 1997.

[T8] PICOT, David

Etude numérique et expérimentale des écoulements dans une pile à combustible de type PEM adaptable aux applications embarquées (Experimental and numerical study of flows in PEM fuel cell stacks for traction applications).

Thèse de Doctorat « Energétique », Ecole des Mines de Paris, 27 janvier 1998.

Co-encadrement avec Rudolf METKEMEIJER (50 %)

[T9] EL GOLLI Rami

Etude de stabilité et modélisation des détendeurs de gaz (Stability study and modelling of a gas pressure regulator).

Thèse de Doctorat « Energétique », Ecole des Mines de Paris, 25 avril 2003.

[T10] GARCIA Pierre

Outils d'évaluation technico-économique et contribution à la conception de centrales électrosolaires thermodynamiques du futur

Thèse en cours depuis le 1^{er} octobre 2004, Université de Perpignan

Co-encadrement avec Alain FERRIERE (20 %)

[T11] BOUNACEUR Arezki

Interaction lit fluidisé - flux solaire concentré pour le chauffage de l'air à plus de 1000 K

Thèse en cours depuis le 1^{er} septembre 2005, Ecole des Mines de Paris

Co-encadrement avec Alain DE RYCK (80 %)

A1.2.2 : Encadrement d'autres travaux diplômants

Depuis 1981, j'ai encadré une trentaine de travaux de fin d'études d'ingénieurs, ou autres stages de DEA ou MASTERE. En voici la liste, avec les sujets abordés au cours de ces études.

FOURCADE Yves

Convection naturelle en cavité fermée

Mémoire de stage de DEA d'Energétique, Université de Perpignan - Odeillo, juin 1981.

PACHER Flavio

Etude du doublet système – enveloppe dans le cadre de chauffage par radiateur à eau

Mémoire de stage de DEA d'Energétique, Ecole des Mines de Paris - Université de Nice - Sophia Antipolis, juin 1989.

GUERASSIMOFF Gilles.

Etude des jets en vue de leur application dans un habitacle automobile.

Mémoire de stage de DEA d'Energétique, Ecole des Mines de Paris - Université de Nice - Sophia Antipolis, juin 1992.

PLANET Jérôme

Modélisation dynamique des intrants solaires.

Mémoire de stage de DEA d'Energétique, Ecole des Mines de Paris - Université de Nice - Sophia Antipolis, juin 1993.

BAHET Azzedine.

Modélisation des transferts thermiques à l'intérieur d'un matériau composite contenant un matériau à changement de phase en capsule.

Mémoire de stage de DEA d'Energétique, Ecole des Mines de Paris - Université de Nice - Sophia Antipolis, juin 1994.

LEMOINE, Michael.

Modélisation et optimisation d'une pile à combustible.

Mémoire d'Ingénieur, Option « Machines - Energétique », Ecole des Mines de Paris, juin 1997 (GdF/DR - Saint-Denis).

NIAY, Philippe.

Etude de l'influence de la composition du gaz naturel sur le fonctionnement d'un moteur.

Mémoire d'Ingénieur, Option « Machines - Energétique », Ecole des Mines de Paris, juin 1998 (PSA, Vélizy - DETA/RMP).

JABRI Mounir

Mise au point d'un capteur de position basé sur l'analyse du signal d'une cellule photovoltaïque

Mémoire de stage de DEA d'Energétique, Ecole des Mines de Paris - Université de Nice - Sophia Antipolis, juin 2000.

CURTIL Laurianne

Modélisation et conception d'un four verrier pilote

Mémoire d'Ingénieur, Option « Machines - Energétique », Ecole des Mines de Paris, juin 2000 (Saint Gobain Recherche – Aubervilliers).

CRETON, Cédric.

Convertibilité du chauffage électrique. Mission ADEME (Sophia-Antipolis).

Mémoire de Mastère Spécialisé en « Ingénierie et Gestion de l'Energie », Ecole des Mines de Paris, septembre 2001

BAILLY, Vincent

Prédimensionnement de systèmes trigénérateurs

Mémoire d'Ingénieur, Option « Machines - Energétique », Ecole des Mines de Paris, juin 2002 (CERT - EDF – La Défense).

GABRIEL Laure

Développement d'une démarche écocritère-énergie sur des équipements électriques, notamment les systèmes d'affichage. Mission ADEME (Sophia Antipolis)

Mémoire de Mastère Spécialisé en « Ingénierie et Gestion de l'Energie », Ecole des Mines de Paris, septembre 2002

GERGELE Pierre

Micro turbines : Etude thermodynamique

Mémoire d'Ingénieur, Option « Machines - Energétique », Ecole des Mines de Paris, juin 2003 (ONERA Palaiseau).

LOPEZ Nicolas

Faisabilité d'une cogénération sur le site ESSO de l'étang de Berre

Mémoire de Mastère Spécialisé en « Ingénierie et Gestion de l'Energie », Ecole des Mines de Paris, septembre 2003

GROLLEMUND Raphaël

Développement d'une démarche Eco – Critère - Energie sur les systèmes de transmission

Mémoire de Mastère Spécialisé en « Ingénierie et Gestion de l'Energie », Ecole des Mines de Paris, septembre 2003

BAUD Guillaume

Suivi de la concurrence de VALEO Climatisation au travers de veilles brevets, technologique et concurrentielle

Mémoire de Travail de Fin d'Etudes, Option Génie Industriel, Ecole des Mines d'Albi, juin 2004

MATTA Christophe

Intégration de systèmes solaires photovoltaïques en enveloppe de bâtiments.

Mémoire de Travail de Fin d'Etudes, Option Génie Energétique, Ecole des Mines d'Albi, juin 2004

MERCIER Arnaud

Etudes thermiques et aérauliques du module chaud d'un générateur d'hydrogène.

Mémoire de Travail de Fin d'Etudes, Option Génie Energétique, Ecole des Mines d'Albi, juin 2004

SUREDA Llorenç

Conception d'un prototype de concentrateur solaire pour la production d'électricité

Mémoire de Travail de Fin d'Etudes, Université Technique de Barcelone, février 2005

CORTES Emilie

Mise en place de bases de données et modélisation du comportement de procédés de froid solaire

Mémoire de Travail de Fin d'Etudes, Option Génie Energétique, Ecole des Mines d'Albi, juin 2005

GAUTIER Roxane

Etudes d'impacts concernant la réalisation de parcs éoliens dans le Berry et la Champagne : choix des projets susceptibles d'aboutir

Mémoire de Travail de Fin d'Etudes, Option Génie Energétique, Ecole des Mines d'Albi, juin 2005

MOUNEYDIER Rémy

Etude technique sur la chaufferie du site St Martin de AIRBUS : mise aux normes des deux chaudières d'une puissance totale de 36 MW et passage du fioul lourd au domestique comme combustible de secours.

Mémoire de Travail de Fin d'Etudes, Option Génie Energétique, Ecole des Mines d'Albi, juin 2005

WYLLEMINS Johann

Diagnostic énergétique des locaux de bureaux d'une entreprise et mise en place de feuilles de calcul type de diagnostic énergétique avec applications à différentes études.

Mémoire de Travail de Fin d'Etudes, Option Génie Energétique, Ecole des Mines d'Albi, juin 2005

SENDIN Sabrina

Amélioration des prévisions de performances et élaboration d'un outil informatique de prescription pour les systèmes solaires combinés

Mémoire de Travail de Fin d'Etudes, Option Génie Energétique, Ecole des Mines d'Albi, septembre 2005

LE STER Anne

Reconversion de la centrale THEMIS en centrale photovoltaïque - Etude de définition et conception de 4 héliostats photovoltaïques pilotes

Mémoire de Travail de Fin d'Etudes, Option Génie Energétique, Ecole des Mines d'Albi, juin 2006

CHEDAL ANGLAY Guillaume

Validation d'une méthode permettant de caractériser les performances de systèmes solaires combinés (S.S.C.)

Mémoire de Travail de Fin d'Etudes, Option Génie Energétique, Ecole des Mines d'Albi, juin 2006

COULIE Julien

Dimensionnement et modélisation de réacteurs de réformage.

Mémoire de Travail de Fin d'Etudes, Option Génie Energétique, Ecole des Mines d'Albi, juin 2006

A1.2.3 : Participation à des jurys de thèse

Depuis 1987, j'ai été invité à examiner des travaux de thèse et à participer à des jurys de soutenance pour des étudiants dont je n'avais pas encadré les travaux. En voici la liste.

En tant que président (1)

ROY, David.

Evaluation de l'impact de technologies de pré-conditionnement thermique d'un habitacle automobile sur la consommation en carburant ainsi que sur le confort thermique des passagers (Impact of thermal preconditioning systems on the fuel consumption and the passengers thermal comfort).

Thèse de Doctorat en Energétique, Ecole des Mines de Paris, 21 septembre 2001

En tant que rapporteur (3)

HENault François

Concentration du rayonnement solaire par simple et double réflexion : contribution aux méthodes de réglage et de contrôle des surfaces réfléchissantes à facettes

Thèse de Doctorat en Optique Géométrique de l'Université d'Orsay ; 1^{er} juin 1987

CHITOU Naïmoulaï

Contribution à l'étude des transferts thermiques convectifs en régime variable

Thèse de Doctorat en Mécanique et Energétique de l'Université de Reims Champagne Ardennes ; 2 juin 1999

ELMTIRI Mohamed

Modélisation de cycle de vie de bâtiments équipés de composants solaires à eau

Thèse de Doctorat en de l'Université Paris XII ; 23 janvier 2007

En tant qu'examinateur (6)

LAPLAIGE Philippe

Géothermie moyenne température

Thèse de Doctorat de l'Université de Marseille ; 26 juin 1987

BARLES Pierre

Etude du couplage thermique dynamique entre un émetteur de chaleur et son environnement

Thèse de Doctorat en « Energétique » de l'Université de Nice ; 12 novembre 1990

ATTALAGE Rahula Anuya

Etude théorique et expérimentale du comportement dynamique des émetteurs de chaleur à circulation d'eau

Thèse de Doctorat en « Energétique » de l'Ecole des Mines de Paris ; 2 septembre 1992

BOUIA Hassan

Modélisation simplifiée d'écoulements de convection mixte interne : application aux échanges thermo-aérodynamiques dans les locaux

Thèse de Doctorat en « Mécanique de Fluides » de l'Université de Poitiers ; 12 mars 1993

DURING Hubert

Consommations énergétiques et confort thermique des locaux chauffés : approche par les modèles zonaux

Thèse de Doctorat en « Energétique » de l'INSA de Lyon ; 11 juillet 1994

SOLER – BLANC Valérie

Contribution à la réalisation d'un laboratoire semi – virtuel pour l'étude de systèmes solaires

Thèse de Doctorat en « Sciences » de l'Université de Nice – Sophia Antipolis ; 16 décembre 2003

Enfin, j'ai été rapporteur d'un travail dans le cadre d'un Diplôme de Recherche Technologique.

MARTIN Laurence

Les récupérateurs de chaleur à haute température

Diplôme de Recherche Technologique en Génie des Procédés thermiques et chimiques de l'Université Joseph FOURIER de Grenoble ; 8 juillet 2003

A1.3 : Responsabilités administratives et d'animation de la recherche

J'ai commencé à assurer des activités annexes au cours de ma thèse, pendant laquelle j'ai été le représentant élu des thésards au Conseil de laboratoire.

Puis, dans le cadre des réflexions menées au sein de l'Ecole des Mines sur les évolutions à adopter, j'ai été un des membres du Comité Consultatif de Programmation de la Recherche (CCPR) mis en place, entre 1992 et 1995, au sein du Centre d'Energétique. Nous y avons notamment réfléchi sur les évolutions de la formation doctorale, sur la mise en place d'une démarche qualité au niveau de la recherche et sur le choix de nouveaux axes de recherche.

J'ai également participé à l'ensemble des réunions du groupe « Enseignement et Recherche », en 1996-1997, dans le cadre de la préparation du 1^{er} Séminaire de Dourdan, rassemblant l'ensemble des cadres de l'Ecole des Mines de Paris.

Les dernières actions de ce type dans cet établissement ont eu pour sujet, entre 2000 et 2003, l'innovation pédagogique contenue dans l'Acte d'Entreprendre, qui oblige chaque élève de l'Ecole à mener une action d'envergure en relation avec le monde extérieur. J'ai participé à la réflexion initiale, encadré un certain nombre d'élèves, et ai été animateur d'un des groupes de réflexion, à Paris, qui suivait une vingtaine d'élèves.

Dès mon arrivée sur Albi, j'ai pris la responsabilité du suivi financier des contrats industriels du Centre de Recherche (environ 400 000 € annuels), que j'ai assurée jusqu'en décembre 2004 (intégration du Centre dans le laboratoire CNRS). Cela m'a donné le droit de participer au comité de pilotage des affaires financières de l'école.

En 2004 – 2005, l'Ecole des Mines d'Albi a mis en place une réflexion stratégique pour faire le bilan de ces 10 premières années d'existence, et pour proposer une feuille de route pour les 10 années suivantes. Dans ce cadre, 3 commissions ont été mises en place par la Direction, et j'ai été nommé animateur de la commission sur le développement économique,

ou l'on a réfléchi aux méthodes qui pourrait permettre à l'école, par ses actions de formation et recherche, de participer de façon optimale au développement économique local. Cette responsabilité, très gourmande en temps de travail, m'a permis de très rapidement m'intégrer au tissu économique local, et de devenir un des interlocuteur privilégiés des décideurs dans le domaine des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique.

Au sein du laboratoire, je suis responsable des actions de communication, et suis membre du comité de pilotage de la communication de l'école. J'ai d'ailleurs été responsable, pour l'année 2005, du site internet du laboratoire.

Enfin, depuis le 1^{er} janvier 2005, je suis responsable d'un des 6 axes de recherche du laboratoire, qui regroupe 5 enseignants chercheurs et une dizaine de doctorants sur des thèmes de la thermique, notamment sur les transferts radiatifs et la métrologie thermique, avec pour application le génie des procédés, notamment à haute température et solaires. En tant que responsable d'axe, je participe de droit au Comité Scientifique du laboratoire, dont le rôle est de définir la stratégie en termes d'actions de recherche.

Toutes ces activités « annexes » occupent une partie non négligeable de mon temps, environ 30 %, mais elles sont très importantes pour la pérennité de nos thématiques dans un laboratoire dominé par des spécialistes des particules.

Annexe 2 : Partenariats industriels et institutionnels

Depuis 1989, conformément à mon statut d'ingénieur de recherche ARMINES, plus de 90 % de mes activités de recherche le sont dans le cadre de contrats.

La liste ci-dessous prend en compte les contrats négociés et réalisés par moi même ou sous ma responsabilité, ainsi que ceux pour lesquels dont j'ai assuré une responsabilité technique totale ou partielle.

A2.1 : Organismes publics internationaux

Commission des Communautés Européennes

Participation au projet « Fuel cell vehicle for efficiency and range » [FEVER], JOE2 (1994 – 1998)

La coordination était assurée par RENAULT [F], avec pour participants, entre autres : VOLVO [S], AIR LIQUIDE [F], ANSALDO [I] et DE NORA PERMELEC [I]

Coordination de la recherche dans le cadre du projet « Self Openings and Shadings [SOS]», JOE3-CT98-7036 (1999 - 2000) ; projet JOULE CRAFT (à l'attention des PME).

La coordination était assurée par le bureau d'études ARCHIMEDES [F], avec pour participants 4 autres PME : SOLISO [F], FIMA [F], BOMIN SOLAR [D] et IST [D] et 2 autres laboratoires de recherche : le laboratoire d'architecture de l'Université Londres Nord [GB] et le laboratoire de génie énergétique de l'Université Technique d'Athènes [GR]

Coordination du projet de recherché « Solar Water Integrated Thermal Cooling and Heating [SWITCH] », NNE5/1999/275 ; (2000 - 2001).

J'assurais la coordination de 4 PME : ESBENSEN [DK], INSPIRA [E], ENERSOFT [E] et IST [D]

Participation au projet « Plasma Membranes Fuel Processor [PMFP] », NNE5/2000/00495 (2001 – 2003)

La coordination était assurée par I.CON Innovation pour le compte de DAIMLER CHRYSLER (MERCEDES) avec pour partenaires 2 autres entreprises (JOHNSON MATTHEY et MIKROWELLEN UMWELT T.) et un laboratoire universitaire (Université de Madère).

Institut de l'Energie des Pays Francophones

Co-organisation avec les bureaux d'études ARCHIMEDES [F] et ENERTEAM [VN] et participation à un séminaire international sur la Maîtrise de l'Energie dans les bâtiments tertiaires, à Hô Chi Minh Ville, au Vietnam (septembre 2000).

A2.2 : Organismes publics nationaux

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie [ADEME]

- Dynamique des Emetteurs et des Systèmes, (1989 - 1990) ; responsable technique, en collaboration avec le CSTB [F]
- Groupe de Recherche sur le Emetteurs de Chaleur [GREC], (1990 - 1996) : coordinateur
- Mise au point de matériaux isolants, (1993 - 1994) ; responsable technique
- Diverses études techniques (ampoules basse consommation, taches solaires, piles à combustible) (1996 - 1998) : responsable technique
- Systèmes solaires pour l'eau chaude et le chauffage des bâtiments, (1999 - 2001) : expert
- Conception d'un banc d'essais semi virtuel pour les systèmes solaires combinés (2000 – 2005) : expert en collaboration avec le CSTB [F]
- Développement d'un système automatique et autonome d'occultation pour les bâtiments, (2001 – 2002) : responsable technique, en collaboration avec le BE ARCHIMEDES [F]
- Montage d'un banc d'essais expérimental pour qualification de capteurs solaires (2001 - 2003) : responsable technique
- Enquête pour la mise en place d'une politique de recherche sur les chauffe eau solaires individuels (2002 - 2004) : expert, en collaboration avec le BE ALPHEEIS [F]
- Groupe solaire collectif (2002 – 2006) : expert
- Suivis de Systèmes Solaires Combinés installés dans 21 maisons individuelles (2003 – en cours) : responsable technique
- Activités dans le domaine du solaire à concentration (2004 - en cours) : expert

Ministère de l'équipement et du Logement

Intégration des composants solaires thermiques actifs dans la structure bâtie (2004 – 2005) : expert, en collaboration avec le BE ALPHEEIS [F] et le Laboratoire des Sciences de l'Habitat de l'ENTPE.

Agence Nationale de la Recherche

ANR PAN'H : Projet THERMOCONV2 : transferts radiatifs dans un reformeur générant de l'hydrogène (2005 – en cours) : expert. La coordination est assurée par la PME N-GHY, avec la participation de SOFIPROTEOL et du GRETH du CEA.

ANR CI : Projet CORAYL : couplage rayonnement combustion (2006 – en cours) : expert. La coordination est assurée par le laboratoire EM2C de Centrale Paris, avec le CERFACS comme partenaire.

ANR PREBAT : Projet NANOPU : élaboration et caractérisation de composés super isolants (2006 – en cours) : expert. La coordination est assurée par ARMINES PARIS, avec la participation du bureau d'études TBC, de Toulouse.

Fondation Bâtiment Energie

Coordinateur du projet BEST :bâtiments tertiaires autonomes en énergie conçus à partir de la captation d'énergie solaire (2007 – en cours) proposé avec la société TBC, 2 cabinets d'architectes, et une dizaine d'autres partenaires privés.

A2.3 : Entreprises privées

Je ne reporte dans ce chapitre que les entreprises privées pour lesquelles j'ai été le seul contractant dans le cadre d'études spécifiques. En effet, toutes les actions financées par la Commission des Communautés Européennes et l'Agence Nationale de la Recherche ont été ou sont menées au sein de consortiums comprenant la plupart du temps au moins une entreprise industrielle privée. Elles ont déjà été citées auparavant.

IMRA Europe (filiale d' AISIN SEIKI, du Groupe TOYOTA)

Thermique de l'habitacle automobile et thermique des bâtiments (1990-1997) : responsable technique

Emalleries Alsaciennes (verrier Strasbourgeois)

Mise au point d'un panneau de façade ventilé (1990 - 1993) : expert

Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France

Evaluation de solveurs et environnements logiciels (1991 - 1993) : responsable technique

Visualisation et analyse de panache d'émetteurs (1996) : expert

Piles à combustible et cogénération (1996 - 1997) : responsable technique

Direction de la Recherche de Gaz de France

Etude du comportement de chaudières (1993 - 1994) : responsable technique

Intégration de piles à combustibles dans les bâtiments (1995 - 1996) : responsable technique

Accord cadre de recherche pour l'Energétique : (1997 - 2003) : responsable technique

Diverses actions de modélisation : lois de régulation de chaudières, détenteur, moteur thermique, four de métallurgie (1997 - 2000) : responsable technique

Projet POSTEDECO, postes de détente : (2000 - 2003) : expert

ECIA (Filiale du Groupe Peugeot)

Limitations des points chauds dans un habitacle automobile (1994 - 1998) : responsable technique

CTA (fabricants Lyonnais de chaudières thermodynamiques et de planchers chauffants)

Code de dimensionnement de planchers chauffants et rafraîchissants (1999) : responsable technique

Annexe 3 : Liste des publications, travaux de recherche et rapports d'études

A3.1 : Publications

A3.1.0 : Mémoires de travaux diplômants (3)

[J1] BEZIAN Jean-Jacques

Précipitations dans les aciers de type MARAGING Fe-18 Ni-8 Co-10 W

Mémoire de stage DEA de Génie Mécanique, Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers - Université Paris Sud Orsay, Laboratoire de Métallurgie - Paris, juin 1979.

[J2] BEZIAN Jean-Jacques, TISSIE Jean-Claude

Précipitations dans les aciers de type MARAGING Fe-18 Ni-8 Co-10 W

Mémoire de travail de fin d'études, Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers - Paris, juin 1979.

[J3] BEZIAN Jean-Jacques

Convection naturelle dans une cavité inclinée. Application au chauffage et à la climatisation de l'habitat

Thèse de Doctorat d'Ingénieur en Physique de l'Energie de l'Université Paris VII – 11 décembre 1981

A3.1.1 : Ouvrage de librairie (1)

[L1] BEZIAN Jean-Jacques, BARLES Pierre, FRANCOIS Claude et INARD Christian.

Les émetteurs de chaleur

Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris, ISBN 2-911762-03-7, janvier 1997

A3.1.2 : Articles dans des revues à Comité de Lecture (6)

[P1] MOOTZ Franck et BEZIAN Jean-Jacques

Numerical Study of a ventilated façade panel

Solar Energy, Volume 57, n° 1, juillet 1996, p. 29-36

[P2] MELKA Slimane et BEZIAN Jean-Jacques

L'isolation thermique par les matériaux granulaires

Revue Générale de Thermique, tome 36, n° 5, mai 1997, p. 345-353

[P3] PICOT David, METKEMEIJER Rudolf, BEZIAN Jean-Jacques et ROUVEYRE Luc

Impact of the mater symmetry factor on humidification and cooling strategies for PEM fuel cell stacks

Journal of Power Sources, Volume 75, octobre 1998, p. 251-260

[P4] EL GOLLI Rami, BEZIAN Jean-Jacques, GRENOUILLEAU Pascal et MENU François
Stability study and modelling of a pressure regulating station

International Journal of Pressure Vessels and Piping, Volume 82, janvier 2005, p. 51-60

[P5] EL GOLLI Rami, BEZIAN Jean-Jacques, DELENNE Bruno et MENU François
Modelling of a pressure regulator

International Journal of Pressure Vessels and Piping, Volume 84, avril 2007, p. 234-243,

[P6] GARCIA Pierre, FERRIERE Alain et BEZIAN Jean-Jacques

Codes for solar flux calculation dedicated to Central Receiver System applications: a comparative review

Solar Energy, à paraître, acceptée le 7 février 2007

A3.1.3 : Autres articles (6)

BEZIAN Jean-Jacques

L'énergie solaire concentrée

GADZ'ARTS 84, Revue de l'Union des Elèves de l'ENSAM – Maîtriser les énergies – 1985, p 19-25

ALBUISSON Michel, BALEYNAUD Jean-Michel, BEZIAN Jean-Jacques, CAUNEAU François, RANCHIN Thierry, et WALD Lucien.

Recherche en Energétique et Imagerie

Revue de l'Ecole des Mines de Paris, 1993, p. 12-20.

FONZES Georges, LOISEAU Philippe, GSCHWIND Michel, and BEZIAN Jean-Jacques.
Athebes, a car thermal behavior simulation software.

ATA, Giornale della « Associazione Tecnica dell'Automobile », n° 3, marzo 1996, p. 128-133.

BEZIAN Jean-Jacques.

Le choix de la température de l'eau des installations : les indications obtenues par le GREC (Groupe de Recherche sur les Emetteurs de Chaleur).

Chauffage, Ventilation, Conditionnement d'Air - CVC n° 10, octobre 1998, p. 24-27.

BEZIAN, Jean-Jacques, MEUNIER, Michel-Ange, et MENARD, Lionel.

Le projet européen SWITCH (SWITCH : une base de données interactive et une aide au pré-dimensionnement d'installations solaires pour l'eau chaude sanitaire et le chauffage des maisons individuelles).

CVC (Chauffage, Ventilation, Conditionnement d'Air) n° 5, mai 2001, p. 35.

BEZIAN, Jean-Jacques, BAUDIN, Christian, et GATT, Patrick.

Les essais de performances thermiques des capteurs solaires.

CVC (Chauffage, Ventilation, Conditionnement d'Air) n° 6, juin 2001, p. 50.

A3.2 : Participation à des congrès et colloques

A3.2.1 : Conférences invitées (12)

BEZIAN Jean-Jacques.

Les données météorologiques et le solaire à concentration

Conférence donnée au Ministère des Transports, le 13 février 1987, dans le cadre d'un séminaire sur « Assistance en matière d'Energies Renouvelables » organisé par la Direction de la Météorologie.

BEZIAN Jean-Jacques.

La concentration de l'énergie solaire

Conférence donnée à l'Institut Supérieur des Traducteurs et Interprètes à Bruxelles, le 25 février 1987

BEZIAN Jean-Jacques.

Fours et Centrales solaires

Conférence donnée à l'Institut Supérieur Industriel de Bruxelles, le 25 février 1987

BEZIAN Jean-Jacques.

Aspects technico - économiques de l'implantation de systèmes éoliens ou solaires

Conférence donnée à l'Institut d'Etudes Politiques de l'Energie à Grenoble, le 22 février 1988

FONZES Georges, BEZIAN Jean-Jacques, CHEIKH Abdellatif, et GSCHWIND Michel.

Modélisation nodale dynamique des échanges par convection naturelle à l'intérieur d'un habitacle automobile.

Journée d'études de la Société Française des Thermiciens, Paris, 24 mars 1993.

BEZIAN Jean-Jacques.

Le Groupe de Recherche, une structure de travail efficace : l'expérience du GREC (Groupe de Recherche sur les Emetteurs de Chaleur).

C.R. de la Journée d'Etudes SFT « Thermoaéraulique des transferts couplés émetteurs de chaleur - bâtiments », Paris, 2 février 1994.

NEROT Sophie, CAUNEAU François et BEZIAN Jean-Jacques.

Application des techniques d'analyse d'image à l'analyse de la transition laminaire - turbulente. Cas d'un jet pariétal.

Journée d'Etudes SFT « Phénomènes chaotiques et transition en convection thermique », Paris, 16 mars 1994.

MELKA Slimane, SALLEE Hébert, RIGACCI Arnaud, CHEVALIER Bruno, ACHARD Patrick et BEZIAN Jean-Jacques.

Les aérogels : isolants transparents - super isolants.

Journée d'Etudes de la Société Française des Thermiciens (SFT), section « Thermocinétique », Paris, 7 février 1996 (15 p.)

BEZIAN Jean-Jacques

La Thermique des Enceintes Habitables

8èmes Journées Internationales de Thermique - JITH 97, Marseille, France, 10 juillet 1997

BEZIAN Jean-Jacques.

Modélisation des écoulements et de la thermique de l'habitable.

Congrès International « Plastiques et carrosserie automobile », SIA (Société des Ingénieurs Automobile) – SFIP (Société Française des Ingénieurs de Plastiques), Sophia Antipolis, 26-27 octobre 2000. ©2000 SFIP/SIA/102000.007.

BEZIAN Jean-Jacques

Efficacité énergétique des bâtiments

Séminaire International « Computational Fluid Dynamics », Université de Béchar (Algérie), 22-23 avril 2006.

BEZIAN Jean-Jacques

Les systèmes solaires à concentration

Séminaire International « Computational Fluid Dynamics », Université de Béchar (Algérie), 22-23 avril 2006.

A3.2.2 : Communications dans des colloques avec actes et comité de lecture (26)

[C1] BEZIAN Jean-Jacques et ARNAUD Georges

Application de la convection naturelle en cavité inclinée au chauffage solaire passif

Comptes-rendus de la Conférence Internationale sur l'Architecture Solaire, Cannes (FRANCE), 13-16 décembre 1982, Lavoisier Tec & Doc, p. 424-429

[C2] EL GOLLI Salem, BEZIAN Jean-Jacques, LE PALEC Georges, BOURNOT Philippe, CHAMPAGNE Jean-Yves, ALLOUCHE Mohamed

Corrélations solaires sur le site de Monastir.

Compte-rendus des 1ères Journées Internationales sur les Transferts Héliothermiques, JITH 83, Monastir (TUNISIE), 4-10 avril 1983, p. 65-70

[C3] BEZIAN Jean-Jacques et BONDUELLE Bruno

THEMIS Heliostat Field

Proceedings of the 2nd International Workshop on the design, construction and operation of solar central receiver projects, Varèse (ITALIE), 4-8 juin 1984, D. REIDEL Publishing Company, p. 106-111.

[C4] BEZIAN Jean-Jacques

Calculs de flux solaires concentrés, modèles à luminance variable

Compte-rendus des 2èmes Journées Internationales sur les Transferts Héliothermiques JITH, Rabat (MAROC), 2-5 avril 1985, p 709-717

[C5] BEZIAN Jean-Jacques

THEMIS solar power plant : first evaluation results.

In : INTERSOL 85 : congrès biennal de la Société Internationale d'Energie Solaire (ISES), Montréal (CANADA), 23-29 juin 1985

[C6] PHARABOD François, BEZIAN Jean-Jacques, BONDUELLE Bruno, RIVOIRE Bruno et GUILLIARD Jean

THEMIS evaluation report

In : « Solar thermal central receiver systems », 23-27 juin 1986, Konstanz (RFA) ; Proceedings of the Third International Workshop on the design, construction and operation of solar central receiver projects, Vol. 1, p 91-104.

[C7] BEZIAN Jean-Jacques, CAZIN BOURGUIGNON Anne Marie et BONNAFOUS Jean Pierre

Solar flux measurement : methods tested in THEMIS

In : « Solar thermal central receiver systems », 23-27 juin 1986, Konstanz (RFA) ; Proceedings of the Third International Workshop on the design, construction and operation of solar central receiver projects, Vol. 1, p 423-432.

[C8] BEZIAN Jean-Jacques, BONDUELLE Bruno et RIVOIRE Bruno

Prospective evaluation of molten salt solar plants based on THEMIS results

In : « Advances in Solar Energy Technology », Pergamon Press 1987, ISBN 0.08034316, p. 1666-1670.

[C9] ANDRIEUX Franck, BARLES Pierre, BEZIAN Jean-Jacques, GICQUEL Renaud, HOUZELOT Patricia et MAYER Didier

Utilisation de NEPTUNIX pour la modélisation de systèmes énergétiques complexes

In Actes de la Rencontre SFT 90 : Nantes, France, 20-21 mai 1990.

[C10] MOOTZ Franck, and BEZIAN Jean-Jacques.

An energy saving breast-wall panel for office buildings.

International Conference « Next Generation Technologies for Efficient Energy End Uses and Fuel Switching », 7-9 April 1992, Dortmund (RFA). In Proceedings, sessions I-IV, p. 175-188.

[C11] BEZIAN Jean-Jacques, CHEIKH Abdellatif, et FONZES Georges.

Modélisation dynamique des échanges par convection naturelle à l'intérieur d'un habitacle automobile.

In Actes de la Rencontre SFT 92 : Colloque de Thermique « Systèmes Thermiques Instationnaires », Sophia Antipolis, France, 20-21 mai 1992. Co-édité par la SFT et l'Ecole des Mines de Paris (ISBN 2-9504471-4-7), janvier 1993, p. 21-29.

[C12] MOOTZ Frank, et BEZIAN, Jean-Jacques.

Convection naturelle dans un panneau de façade ventilé.

Rencontre SFT 93 : Colloque « La Thermique, trait d'union entre les sciences et les technologies », Pau, 25-26 mai 1993. Editions Européennes Thermique et Industrie, Paris, mars 1994, p. 175-183.

[C13] BEZIAN Jean-Jacques et MOOTZ Frank.

Bilan énergétique de la solarisation de panneaux de façade en vitrage extérieur collé.

In : Actes des 7èmes Journées Internationales de l'Energie Thermique JITH 95: « Contribution à la préservation de l'Environnement par une meilleure connaissance des systèmes énergétiques », Marrakech, (MAROC), 3-5 avril 1995, vol. 3, p. 630-638.

[C14] NEROT Sophie, CAUNEAU François et BEZIAN Jean-Jacques.

Techniques d'images appliquées à l'étude d'un écoulement turbulent au-dessus d'un ventilateur.

In : Actes du Congrès SFT 95, Poitiers, France, 17-18-19 mai 1995 : « La Thermique de l'Homme et de son Proche Environnement », F. Penot et J. B. Saulnier eds., Elsevier, Amsterdam, p. 656-661, 1996.

[C15] NEROT Sophie, CAUNEAU François et BEZIAN Jean-Jacques.

Techniques d'images appliquées à l'étude des champs de vitesses dans les écoulements turbulents.

In : Actes du 6ème Colloque National de Visualisation et de Traitement d'Images en Mécanique des Fluides, Saint-Etienne, France, 30 mai - 2 juin 1995.

[C16] GSCHWIND Michel, FONZES Georges, LOISEAU Philippe, BEZIAN Jean-Jacques, HASEBE T., FUJITA S., and TAKEDA I.

A zonal model to simulate a room heated by a gas hat pump (GHP) : BTHEBES.

In : Proceedings of the 5th International Conference on Air Distribution in Rooms, ROOMVENT'96, Osaka, (JAPON), July 17-19, 1996, vol. 1, p. 61-68.

[C17] MELKA Slimane et BEZIAN Jean-Jacques.

Transferts thermiques dans les isolants poreux granulaires.

In : Actes du Congrès SFT 96, Valenciennes, France, 13-14-15 mai 1996, « Thermique et Transports », édité par Elsevier, septembre 1997, ISBN 2-84-299-012-9, p. 221-228.

[C18] GUERASSIMOFF Gilles, BEZIAN Jean-Jacques et FONZES Georges.

Caractérisation des paramètres descriptifs d'un jet anisotherme.

In : Actes du Congrès SFT 96, Valenciennes, France, 13-14-15 mai 1996, « Thermique et Transports », édité par Elsevier, septembre 1997, ISBN 2-84-299-012-9, p. 569-574.

[C19] GUERASSIMOFF Gilles et BEZIAN Jean-Jacques.

Etude numérique du refroidissement évaporatif d'un nuage compact de gouttelettes d'eau.

In : Actes du Congrès SFT 97 « Thermique aéronautique et Spatiale », Toulouse, France, 20-22 mai 1997, Elsevier Ed., p. 631-636.

[C20] PICOT David, METKEMEIJER Rudolf et BEZIAN Jean-Jacques.

Transferts thermiques et hydriques dans un réacteur pile à combustible de type PEM.

In : Actes du Congrès SFT 97 « Thermique aéronautique et Spatiale », Toulouse, France, 20-22 mai 1997, Elsevier Ed., p. 719-724.

[C21] DAUTIN Sophie, DALICIEUX Pascal, LOISEAU Philippe et BEZIAN Jean-Jacques.

Study of the influence of the modelisation of solar spots in an experimental cell.

In : Proceedings of the 2nd Int. Conference Buildings and the Environment, Paris, France, 9-12 June 1997, Vol. I, p. 551-559.

[C22] BEZIAN Jean-Jacques, GUERASSIMOFF Gilles, FONZES Georges, GSCHWIND Michel et LOISEAU Philippe.

Thermique des bâtiments : couplage chauffage aéraulique - plancher chauffant.

In : Actes des 8èmes Journées Internationales de Thermique - JITH 97, Marseille, France, 7-10 juillet 1997, vol. 2, p. 377-384.

[C23] BEZIAN, Jean-Jacques, MEUNIER, Michel-Ange, CACCAVELLI, Dominique, et MORLOT, Rodolphe.

Caractérisation des systèmes solaires combinés (chauffage et eau chaude sanitaire) par approche semi-virtuelle.

In : Actes des 10èmes Journées Internationales de Thermique (JITH 2001), La Marsa, Tunisie, 17-20 septembre 2001

[C24] MORLOT, Rodolphe, MEUNIER, Michel-Ange, CACCAVELLI, Dominique, et BEZIAN, Jean-Jacques.

Définition d'une procédure de certification de systèmes combinés pour la production de chauffage et d'eau chaude sanitaire dans les habitations.

In : Actes de la Conférence Internationale « Energie solaire et bâtiment » CISBAT 2001, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 3-4 octobre 2001

[C25] DELENNE, B., BOULARAN, J., MODE, L., EL GOLLI, Rami, BEZIAN, Jean-Jacques , and GUERASSIMOFF, Gilles,

Stability study of a pressure regulator by modelling and experimental design (Etude de stabilité d'un détendeur régulateur ; modélisation et plan d'expériences).

In: Proceedings of the 2001 International Gaz Research Conference (IGRC), Amsterdam, The Netherlands, 5-8 November 2001

[C26] BEZIAN Jean-Jacques, SUREDA TRUYOLS Llorenç

Etude d'un concentrateur solaire linéique fixe intégré en toiture de bâtiment

In : Actes des 12èmes Journées Internationales de Thermique (JITH 2005), Tanger, MAROC, 15-18 novembre 2005

A3.2.3 : Communications dans des colloques avec actes (5)

BEZIAN Jean-Jacques, BONDUELLE Bruno et HENAULT François

Le champ d'héliostats de la centrale solaire THEMIS

In : « Séminaire Bilan du Programme Héliothermie AFME - CNRS » 16-19 septembre 1986, Sophia Antipolis,

BEZIAN Jean-Jacques

Les données météorologiques à Targassonne

In : « Séminaire Bilan du Programme Héliothermie AFME - CNRS » 16-19 septembre 1986, Sophia Antipolis, p 355-366

BEZIAN Jean-Jacques

Le mesurage des flux et des débits à THEMIS

In : « Séminaire Bilan du Programme Héliothermie AFME - CNRS » 16-19 septembre 1986, Sophia Antipolis, p 393-400

BEZIAN Jean-Jacques, HENAULT François et IZYGON Michel

Modélisation des flux réfléchis par un champ d'héliostats : comparaison de divers modèles

In : « Séminaire Bilan du Programme Héliothermie AFME - CNRS » 16-19 septembre 1986, Sophia Antipolis, p 431-444

FONZES Georges, LOISEAU Philippe, GSCHWIND Michel, and BEZIAN Jean-Jacques.
ATHEBES, a car thermal behavior simulation software.

Proceedings of Industrial & Economic Congress « Europe, evolution and tendencies of the automotive industry », Torino, Italy, november 14-18, 1994.

A3.2.4 : Communications dans des colloques sans actes (2)

BEZIAN Jean-Jacques

Potential for improvement of central solar receiver plant

CRS-DCS Evaluation Deliverable Review - IEA - Almería (Espagne), 15-18 octobre 1984

NEROT Sophie, CAUNEAU François et BEZIAN, Jean-Jacques.

Techniques d'images appliquées à l'étude d'un écoulement turbulent.

Congrès Général de Physique SFP 95, Marseille, 4-8 septembre 1995.

A3.3 : Brevets et plis d'huissiers

[B1] ARMINES/IMRA.

Dispositif de ventilation naturelle de l'habitacle d'un véhicule, notamment automobile.

Inventeurs : BEZIAN Jean-Jacques, GSCHWIND Michel et FONZES Georges. France,

Brevet n° 92.02839 du 10 mars 1992.

[B2] ARMINES/IMRA.

Dispositif pour abaisser la température ambiante dans l'habitacle d'un véhicule.

Inventeurs : FONZES Georges et BEZIAN Jean-Jacques. Brevet n° 92.15013 du 14 décembre 1992 (France/CEE, USA, Japon).

[B3] ARMINES/IMRA Europe SA.

Procédé pour abaisser la température ambiante dans l'habitacle d'un véhicule.

Inventeurs : FONZES Georges et BEZIAN Jean-Jacques. Brevet n° 93.15648 du 24 décembre 1993 (France/CEE, USA, Japon).

A3.4 : Dépôts de logiciels

BEZIAN Jean-Jacques, LOISEAU Philippe et FONZES Georges

Logiciel ATHEBES (Automotive Thermal Behaviour Simulation Software) Avril 1994

BEZIAN Jean-Jacques, LOISEAU Philippe et FONZES Georges

Logiciel BTHEBES (Building Thermal Behaviour Simulation Software) Avril 1994

A3.5 : Organisation de séminaires et ateliers de travail

Secrétaire du Comité d'organisation des journées SFT 92 : Colloque de Thermique « Systèmes Thermiques Instationnaires », Sophia Antipolis, 20-21 mai 1992. Rencontre annuelle de la Société Française des Thermiciens, organisée avec le concours de l'ADEME, EDF, GDF, et ARMINES.

Organisateur de la Journée d'Etudes de la Société Française des Thermiciens (SFT) « *Thermo-aéraulique des transferts couplés émetteurs de chaleur - bâtiments* ». Institut Français de l'Energie, Paris, 2 février 1994.

Co organisateur du Séminaire International : « La maîtrise de l'énergie dans les bâtiments tertiaires », sous l'égide de l'Institut de l'Energie des Pays Francophones et de l'ADEME, Hotel Majestic, Hô Chi Minh Ville, du 18 au 22 septembre 2000

Co organisateur du Séminaire : « Les besoins d'innovation en solaire thermique » tenu dans les locaux de l'ADEME à Sophia Antipolis les 27 et 28 avril 2004 avec une centaine de participants.

Président du Comité d'Organisation et membre du Comité Scientifique des 13èmes Journées Internationales de Thermique, qui se tiendront à Albi du 28 au 30 août 2007, avec une participation attendue de plus de 200 personnes.

A3.6 : Rapports de contrat de recherche

A3.6.1 : Rapports rédigés pour le Groupe d'Evaluation Scientifique THEMIS [GEST] (9)

[R1] BEZIAN Jean-Jacques
Première campagne d'ombre sur le champ THEM
Rapport GEST 002 - août 1983

[R2] BEZIAN Jean-Jacques
Surface efficace des héliostats : méthode analytique
Rapport GEST 010 - mars 1984

[R3] BONDUELLE Bruno et BEZIAN Jean-Jacques
Compte rendu du colloque I. E. A. : Almería - ESPAGNE, 15-18 octobre 1984
Rapport GEST 017 - octobre 1984

[R4] BEZIAN Jean-Jacques
Trouble atmosphérique à THEMIS
Rapport GEST 019 - décembre 1984

[R5] BEZIAN Jean-Jacques
Calcul des flux concentrés avec soleil à luminance variable
Rapport GEST 020 - décembre 1984

[R6] BEZIAN Jean-Jacques
Rapport moyen pondéré annuel de surface efficace du champ
Rapport GEST 023 - juillet 1985

[R7] BEZIAN Jean-Jacques

Les 3 meilleurs jours de THEMIS et SOLAR ONE
Rapport GEST 024 - juillet 1985

[R8] BEZIAN Jean-Jacques
Atténuation atmosphérique dans le trajet héliostat - chaudière
Rapport GEST 029 - septembre 1985

[R9] BEZIAN Jean-Jacques
Données météorologiques à THEMIS
Rapport GEST 037 - octobre 1986

A3.6.2 : Rapports rédigés pour le Centre d'Energétique de l'Ecole des Mines de Paris (33)

[R10] BEZIAN Jean-Jacques ; ENOUT Alain ; FULCHERI Laurent
Test d'une régulation basée sur la commande optimale appliquée à un bâtiment tertiaire
Rapport final de l'Accord Cadre AFME - ARMINES : action 89-92-0001 ; mars 1990 ; INIST-CNRS, Cote INIST : RP 400 (1397)

[R11] BEZIAN Jean-Jacques
Etudes et essais d'un débitmètre thermique pour le comptage des calories dans les installations importantes
Rapport final de l'Accord Cadre AFME - ARMINES : action 89-04-0001 ; mars 1990 ; INIST-CNRS, Cote INIST : RP 400 (1403)

[R12] ATTALAGE Rahula, BEZIAN Jean-Jacques et HOUZELOT Patricia
Etude du couplage thermique dynamique entre un émetteur de chaleur et son environnement
Rapport final de l'Accord Cadre AFME - ARMINES : action D.3 ; mars 1990

[R13] BEZIAN Jean-Jacques
Coordination du Groupe de Recherche sur les Emetteurs de Chaleur
Convention AFME - ARMINES ; rapport intermédiaire ; juillet 1990

[R14] BEZIAN Jean-Jacques
Coordination du Groupe de Recherche sur les Emetteurs de Chaleur
Convention AFME - ARMINES ; rapport annuel final ; janvier 1991

[R15] CHEIKH Abdelatif, BEZIAN Jean-Jacques
Cars air conditioning
IMRA – EMP rapport final de contrat ; janvier 1991

[R16] BEZIAN Jean-Jacques
Natural convection heat and mass transfers inside the passenger cell of a parked car exposed to solar radiations.
Rapport pour la société IMRA Europe ; mai 1991

[R17] BEZIAN Jean-Jacques

Coordination du Groupe de Recherche sur les Emetteurs de Chaleur
Convention AFME - ARMINES ; rapport intermédiaire ; juillet 1991

[R18] BEZIAN Jean-Jacques

Coordination du Groupe de Recherche sur les Emetteurs de Chaleur
Convention AFME - ARMINES ; rapport annuel final ; février 1992

[R19] BEZIAN Jean-Jacques

Evaluation du solveur NEPTUNIX
Rapport pour la Direction des Etudes et Recherche d'EDF ; Février 1992

[R20] CHEICK Abdelatif et BEZIAN Jean-Jacques

A fast model to calculate solar spots on car internal walls
Rapport pour la société IMRA Europe ; mars 1992

[R21] BEZIAN Jean-Jacques

Coordination du Groupe de Recherche sur les Emetteurs de Chaleur
Convention AFME - ARMINES ; rapport intermédiaire ; juillet 1992

[R22] BEZIAN Jean-Jacques

A simulation code for modelizing the influence of air jets on the thermal behaviour of a car cell
Rapport pour la société IMRA Europe ; mars 1993

[R23] BEZIAN Jean-Jacques, ALBUISSON Laurent et MOOTZ Franck

Panneau de façade modulaire en produit verrier utilisable en capteur solaire
Rapport pour l'ADEME ; août 1993

[R24] BEZIAN Jean-Jacques

Modèle de chaudière mixte à gaz dans l'environnement ALLAN – NEPTUNIX
Rapport final d'étude pour Gaz de France ; mars 1994

[R25] BEZIAN Jean-Jacques

Coordination du Groupe de Recherche sur les Emetteurs de Chaleur
Convention AFME - ARMINES ; rapport final ; novembre 1994

[R26] ACHARD Patrick, BEZIAN Jean-Jacques et TANTOT NEIRAC Mireille

Evaluation par simulation de l'intérêt des vitrages électrochromes
Rapport d'avancement de convention ADEME ; juillet 1995

[R27] BEZIAN Jean-Jacques

Intégration des PAFC existantes en situation opérationnelle
Action de recherche pour Gaz de France : rapport final ; juin 1996

[R28] LARIVIERE Eric et BEZIAN Jean-Jacques

Projet PILES - Intégration des PAFC en situation opérationnelle – Approche par simulation
Rapports 01PC62000 : Direction de la Recherche de Gaz de France ; août 1996

[R29] BEZIAN Jean-Jacques, COURBON Philippe et PEUPORTIER Bruno
Prise en compte de la tâche solaire dans un outil de simulation thermique
Rapport final de convention ADEME ; novembre 1996

[R30] ACHARD Patrick, BEZIAN Jean-Jacques et TANTOT NEIRAC Mireille
Evaluation par simulation de l'intérêt des vitrages électrochromes
Rapport final de convention ADEME ; novembre 1996

[R31] BEZIAN Jean-Jacques
PEMFC et cogénération
Action de recherche pour la Direction Etudes et Recherche d'Electricité de France : rapport final juin 1997

[R32] PLANET Jérôme, BEZIAN Jean-Jacques
Modélisation et étude expérimentale du comportement d'une planche de bord en conditions climatiques réelles
Action de recherche pour la Direction de la Recherche d'ECIA : rapport juin 1997

[R33] BEZIAN Jean-Jacques
Transferts de chaleur et lampes basses consommations
Rapport final d'un marché passé par l'ADEME ; juillet 1998

[R34] BEZIAN Jean-Jacques
Systèmes de piles à combustible pour la cogénération – Etat de l'art
Rapport réalisé pour le compte de l'ADEME ; 31 octobre 1998
Disponible sur Internet à l'adresse <http://www-cenerg.cma.fr/stockage/pilaco.pdf>

[R35] BEZIAN Jean-Jacques et GUERASSIMOFF Gilles
Modélothèque de procédés industriels : cahier des charges
Rapport final d'une action de l'Accord Cadre GDF – CENERG ; novembre 1998

[R36] BEZIAN Jean-Jacques et GUERASSIMOFF Gilles
Modélisation d'un poste de Télédétente
Rapport final d'une action de l'Accord cadre GDF – CENERG ; mars 1999

[R37] BEZIAN Jean-Jacques
Impact des ampoules basse consommation
Rapport final d'une étude réalisée pour le département Maîtrise de la demande de l'électricité de l'ADEME

[R38] BEZIAN Jean-Jacques
Dimensionnement des planchers à circulation d'eau pour le chauffage et le rafraîchissement : état de l'art

Rapport d'une action de recherche pour la société CTA ; mai 1999

[R39] BEZIAN Jean-Jacques et GUERASSIMOFF Gilles

Modélisation d'un four de réchauffage

Rapport final d'une action de l'Accord cadre GDF – CENERG ; juin 2000

[R40] JAURE Serge, DESCHAMPS Hervé et BEZIAN Jean-Jacques

Self Openings and Shadings

Rapport final du Contrat Européen JO_3-CT98-7036 ; décembre 2000

[R41] BEZIAN Jean-Jacques

SWITCH : Solar Water Integrated Thermal Cooling and Heating Systems

Rapport final du Contrat Européen NNE5/1999/275 ; mars 2002

[R42] JAURE Serge, DESCHAMPS Hervé et BEZIAN Jean-Jacques

Automate de gestion d'une baie équipée d'un store

Rapport final d'une étude menée pour le compte du Département Energies Renouvelables de l'ADEME ; octobre 2002

A3.6.3 : Rapports rédigés pour le Centre Energétique Environnement de l'Ecole des Mines d'Albi (8)

[R43] BEZIAN Jean-Jacques et FILLOUX Alain

Etude exploratoire pour la définition de programmes de recherche sur les chauffe-eau solaires individuels innovants

Rapport final d'une étude menée pour le compte du Département Energies Renouvelables de l'ADEME, août 2003

[R44] BEZIAN Jean-Jacques et COMMENT Elian

Electrification de wagons SNCF par voie solaire

Rapport final d'une étude menée pour le compte de la Direction de la Recherche et de la Technologie de la SNCF, décembre 2003

[R45] BEZIAN Jean-Jacques, FILLOUX Alain et MICHEL Pierre

Intégration des composants solaires thermiques actifs dans la structure bâtie

Rapport final d'une étude menée pour le Plan Urbanisme, Construction et Architecture du Ministère, juin 2005

[R46] BEZIAN Jean-Jacques

Participation aux travaux du Programme SolarPACES de l'Agence Internationale de l'Energie

Rapport final d'une étude menée pour le compte du Département Energies Renouvelables de l'ADEME, janvier 2006

[R47] BEZIAN Jean-Jacques

Suivi de huit systèmes solaires combinés de la Société GIORDANO

Rapport final d'une étude menée pour le compte du Département Energies Renouvelables de l'ADEME, mars 2006

[R48] BEZIAN Jean-Jacques

Suivi de huit systèmes solaires combinés de la Société CLIPSOL

Rapport final d'une étude menée pour le compte du Département Energies Renouvelables de l'ADEME, mars 2006

[R49] BEZIAN Jean-Jacques

Suivi de cinq systèmes solaires combinés de la Société Solaire Connexion

Rapport final d'une étude menée pour le compte du Département Energies Renouvelables de l'ADEME, mars 2007

[R50] BEZIAN Jean-Jacques

Procédure d'évaluation des systèmes solaires combinés

Rapport final d'une étude menée pour le compte du Département Energies Renouvelables de l'ADEME, mars 2007