



UPVD
Université de Perpignan Via Domitia



Rapport de synthèse

l'Université de Perpignan Via Domitia
en vue d'obtenir
L'HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES EN SCIENCES
par

THIERRY TALBERT

Systèmes électroniques
Applications aux énergies renouvelables et à la modélisation de
composants

Laboratoire d'Electronique Informatique Automatique et Systèmes
Université de Perpignan Via Domitia

Table des matières

Curriculum Vitae	7
Introduction.....	11
Enseignant vacataire, Université Montpellier II.....	11
Licence Pro Technologies du Froid et Energies Renouvelable, IUP GSI.....	11
Licence Sciences Physiques et Technologies de l'Ingénieur.....	11
Master Énergie Solaire.....	12
Master Électronique Automatique Informatique.....	12
Activités à caractère administratif	14
Introduction.....	15
Licence et Master.....	15
École d'ingénieur universitaire Polytech - Département « Énergétique ».....	16
Animation scientifique et activités diverses.....	17
Activités de recherche	18
Introduction.....	19
Systèmes électroniques.....	19
Applications aux énergies renouvelables.....	19
Maîtrise énergétique des bâtiments.....	20
Calculs des indicateurs.....	21
Ubat.....	21
les règles « Th – CE ».....	27
Caractérisation du climat.....	29
Scénarii conventionnels.....	30
Modélisation énergétique des bâtiments.....	32
Modules électroniques.....	37
Paramètres environnementaux.....	38
Paramètres énergétiques.....	39
Configurations types des acquisitions.....	40
Système d'acquisition temps réel.....	42
Régulation énergétique.....	50
PID.....	53
MPC (Model Predictive Control).....	54
FLC (Fuzzy Logic controler).....	56
Comparaison entre les contrôleurs.....	57
Hybridation des sources à énergies renouvelables.....	58
Conclusions et perspectives - SiP - System in Package.....	58
Fiabilité de composants.....	58
Étude électromagnétique.....	59
Modélisation.....	59
Système expérimental.....	59
Étude Thermique.....	60
Modélisation.....	60
Hypothèses.....	60
Identification de paramètres.....	62

L'estimation des paramètres.....	65
La précision des résultats.....	67
Système expérimental.....	71
Conclusions et perspectives - Couplage Electro-thermique.....	76
Bibliographie.....	76
Co-Encadrements de thèses.....	76
Encadrements de stagiaires.....	77
Contrats et Financements.....	79
Introduction.....	80
Monitoring THPE - Fonds de Compétitivité des Entreprises (ex-FCE, FUI) 2006.....	80
Objectifs.....	80
Planning.....	81
Informations diverses.....	82
SolHelios - Languedoc-Roussillon 2006.....	82
Objectifs.....	82
Moyens mis en œuvre.....	82
Installation.....	82
Système de mesure.....	83
Accès aux données et résultats.....	84
Informations diverses.....	86
Opti'EnR - Programme Énergie CNRS 2008.....	86
Objectifs.....	86
Résultats obtenus.....	87
Informations diverses.....	91
SolarGeotherm - Agence Nationale de la Recherche (ANR) 2008.....	91
Objectifs.....	91
Programme de travail.....	92
Retombées scientifiques.....	93
Informations diverses.....	93
Système Embarqué de Monitoring et de Contrôle Modulaire - OSEO-Anvar 2009 -	93
Objectifs.....	93
Architecture du dispositif.....	94
Planning.....	95
Informations diverses.....	96
System in Package - Bonus Qualité Recherche (BQR) 2009.....	96
Objectifs.....	96
Installation à EnR.....	97
Synoptique du prototype SiP à réaliser.....	97
Planning du projet.....	97
Informations diverses.....	98
Publications.....	99
Revue internationale avec comité de lecture.....	100
Congrès internationaux avec comité de lecture.....	100
Revue nationale avec comité de lecture.....	101
Congrès nationaux avec comité de lecture.....	101
Éditeur.....	102

Conférences nationales sans comité de lecture.....	102
Publications/Présentations invitées.....	102

Curriculum Vitae

Thierry Talbert

Né le 31-01-1972 (37 ans) à Perpignan (France)

Situation maritale : célibataire.

Adresse professionnelle

Laboratoire d'Electronique, Informatique
Automatique et Systèmes
Université de Perpignan Via Domitia
52 Avenue Paul Alduy
66860 Perpignan

☎ : 04-68-66-20-85

✉ : talbert@univ-perp.fr

🌐 : <http://elias.univ-perp.fr/>

Adresse personnelle

26 rue de la grange 66430 Bompas

☎ : 04-68-63-27-66

☎ : 06-28-13-02-34

✉ : ttalbert@club-internet.fr

🌐 : <http://ttalbert.club.fr/>

Diplômes

- **1998-2001 Doctorat** à l'Université Montpellier II, Laboratoire d'Electrotechnique de Montpellier, mention très honorable.
Sujet : *“Phénomènes électromagnétiques dans les condensateurs à géométries non symétriques - modèles de répartition de courant, d'inductance et problèmes inverses -”*.
Jury : J.P. Ferrieux, T. Lebey, G. Rojat, N. Daudé, C. Glaize, C. Joubert
- **Février 1998-Juin 1998 Stage de DEA** au Centre d'Electronique et de Micro-optoélectronique de Montpellier.
Sujet : *“Création d'un logiciel d'optimisation utilisant la méthode des algorithmes génétiques”*. Ce sujet a comporté la réalisation d'une partie de code d'éléments finis.
- **1997-1998 DEA** Électronique, mention AB, classé 3^{ème} (Université de Montpellier II).
- **1995-1996 Maîtrise E.E.A** Option Électronique, Électrotechnique, Optoélectronique (Université de Montpellier II).
- **1993-1995 Licence E.E.A**, mention AB (Université de Montpellier II).
- **1990-1993 DEUG A** Option Physique (Université de Perpignan).
- **1989-1990 Bac D** mention AB (Lycée Notre Dame de Bon-secours à Perpignan).

Services civils

- **2003-... Maître de conférences** à l'Université de Perpignan Via Domitia
- **2002-2003 Post-Doctorat** avec la société APEX-British Petroleum Solar division (Montpellier) en collaboration avec M. C. Glaize, Professeur à l'Université Montpellier II, pour une durée d'un an.
Sujet : *“Réalisation d'un onduleur secours connecté au réseau EDF”*.
- **2001-2002 Post-Doctorat** avec la société Intelligent Electronic System (Montpellier) en collaboration avec M. F. Forest, Professeur à l'Université Montpellier II, pour une durée d'un an.

Sujet : *“Réalisation d’un chargeur de batterie 110V/240V incluant un système à absorption sinusoïdale”*.

- **Novembre 1996- Octobre 1997 Dépanneur** en Télévision, Hi-fi, Electroménager (Télé Catalogne à Perpignan).
- **Avril 1993 Cours** de rattrapages de mathématiques (Cours Pigier à Perpignan).
- **Eté 1990 à 2002 Dépanneur/Vendeur** chez Télé Catalogne à Perpignan.
- **Juin 1992-2005 Réalisation d'un programme de gestion** de la clientèle (mailing, historique des achats, historique des pannes, etc...), des stocks (suivi des pièces du fournisseur au client), de facturation (liaison automatique avec la partie gestion de la clientèle et gestion des stocks) pour la société Télé Catalogne à Perpignan. J’ai intégré au logiciel un système automatique de sauvegarde incrémental sur supports multiples (Disquette, CD-Rom, Réseau).

Activités d'enseignement

I. Introduction

Depuis ma prise de fonction en Septembre 2003 à l'Université de Perpignan Via Domitia, j'effectue mon enseignement en licence Sciences Physiques et Technologies de l'Ingénieur, parcours EEA (Électronique Électrotechnique Automatique) et SP (Sciences Physiques) que j'ai l'honneur de diriger depuis 2004 (anciennement licence EEA et Sciences Physiques), ainsi qu'en master mention Électronique Informatique Automatique (anciennement Informatique Automatique et Mathématiques Appliquées).

Une partie de mon enseignement s'est déroulé en master Énergie Solaire, en licence pro Technologies du Froid et Énergies Renouvelables ainsi qu'à l'IUP Génie des Systèmes Industriels.

Les horaires donnés représentent le nombre d'heures de présence devant les étudiants

II. Enseignant vacataire, Université Montpellier II

1998/1999, 1999/2000, 2000/2001, 2001/2002 et 2002/2003

- *Traitement du signal* (TP : 20h), L3
- *Analyse numérique* (TD : 24h), L3
- *Électrotechnique* (TP : 20), L3
- *Langage C* (C : 10h, TP : 10h), L3 CNED

III. Licence Pro Technologies du Froid et Energies Renouvelable, IUP GSI

2003/2004 et 2004/2005

- *Circuits électriques* (C : 10h, TD : 10h), IUP 1ère année

2007/2008

- *Procédés et contrôle* (C : 5h, TP : 4), L3 pro

IV. Licence Sciences Physiques et Technologies de l'Ingénieur

2003/2004, 2004/2005 et 2005/2006

- *Découverte scientifique* (TD : 4,5h), L1
- *EEA* (C : 3h, TD : 4,5h), L1
- *Simulation et pilotage de plateforme d'expérimentation* (C: 3h, TP : 9h), L1
- *EEA2* (C: 3h, TP : 12h), L1
- *EEA 3.1 : Électronique analogique* (TD 8h), L2
- *EEA 3.2 : Électrotechnique* (C : 10h, TD : 12h, TP 8h), L2
- *Projet technologique* (C : 3h, TP : 21h), L2
- *Électrotechnique 2* (TP : 21h), L3
- *Électronique de puissance* (C : 10h, TD : 10h, TP : 20h), L3

2006/2007

- *EEA* (C : 3h, TD : 3h), L1

- *Simulation et pilotage de plateforme d'expérimentation* (C: 3h), L1
- *EEA 3.2 : Électrotechnique* (C : 10h, TD 12h), L2
- *Projet technologique* (C : 3h, TP : 21h), L2
- *Électrotechnique 1* (TP : 12h), L3
- *Électrotechnique 2* (C : 3h, TD : 3h, TP : 12h), L3
- *Électronique de puissance* (C : 10h, TD : 10h, TP : 20h), L3

2007/2008

- *Travaux pratiques EEA* (TP : 18h), L1
- *Transport et transformation de l'énergie électrique* (TD : 15h, TP : 12h), L2
- *Introduction à l'électronique de puissance* (C : 15h, TP : 20h), L2
- *Projet technologique* (C : 3h, TP : 21h), L2
- *Circuits intégrés analogiques et logiques* (TD : 15h), L3
- *Convertisseurs de l'électronique de puissance* (C : 15h, TD : 15h, TP : 21), L3

2008/2009

- *Travaux pratiques* (TP : 18h), L1
- *Transport et transformation de l'énergie électrique* (TP : 12h), L2
- *Introduction à l'électronique de puissance* (C : 15h, TP : 20h), L2
- *Projet technologique* (C : 3h, TP : 21h), L2
- *Convertisseurs de l'électronique de puissance* (C : 15h, TD : 15h, TP : 21), L3

V. Master Énergie Solaire

2005/2006 et 2006/2007

- *Électronique de puissance* (C : 6h, TD 8h, TP : 8h)

2007/2008

- *Électronique de puissance* (C : 6h)

VI. Master Électronique Automatique Informatique

2004/2005 et 2005/2006

- *Composants analogiques* (C : 5h), M1
- *Composants logiques* (C : 5h), M1

2006/2007

- *Composants logiques* (C : 6h, TD : 8h, TP : 3h), M1

2007/2008

- *Architecture et modélisation de composants actifs* (C : 7,5h, TD : 7,5h), M1
- *Électronique intégrée analogique* (C : 4,5h, TD : 6h), M1

2008/2009

- *Architecture et modélisation de composants actifs* (C : 15h), M1
- *Électronique intégrée analogique* (C : 4,5h, TD : 6h), M1
- *Composants programmables en systèmes embarqués* (C : 15h, TP : 15h), M2
- *Gestion de l'énergie en systèmes embarqués* (C : 15h, TD : 15h), M2

Activités à caractère administratif

I. Introduction

Mes activités à caractère administratif concernant 2 grands domaines :

- L'enseignement entre autre avec la responsabilité de la licence « *Sciences Physiques et Technologies de l'Ingénieur* » (l'Université de Perpignan appartenant à la vague A, à partir de la rentrée 2011 la licence portera la nom de « *Sciences Pour l'Ingénieur* ») et le parcours « *Maîtrise Énergétique des Bâtiments* » du département Énergétique de l'école d'ingénieur universitaire Polytech.
- L'animation scientifique au sein du laboratoire ELIAUS.

II. Licence et Master

Lors de mon arrivé à l'Université de Perpignan, j'ai été en charge de la licence EEA. Par suite il m'a été demandé de mettre en place une nouvelle formation, la licence « *Sciences Physiques et Technologies de l'Ingénieur* ». Cette formation est issue de trois licences qui avaient été habilitées lors du plan quadriennal 2004-2007. Il s'agit des licences « *Électronique, Électrotechnique et Automatique (EEA)* », « *Sciences Physiques (SP)* », et « *Génie des Systèmes Industriels (GSI)* ». Compte tenu des thématiques communes pour ces trois licences et des possibilités de mise en commun, il est apparu opportun de les regrouper sous une même appellation de licence avec trois parcours différents. Cette particularité permet aux étudiants, qui souhaitent se consacrer aux Sciences Physiques en général, de ne pas choisir un parcours a priori, mais seulement après deux ou trois semestres en accord avec leurs préférences.

Elle se décline en trois parcours de licence qui correspondent aux grands domaines de compétences des enseignants de l'UFR Sciences :

- Parcours Électronique, Électrotechnique, Automatique (Parcours EEA),
- Parcours Sciences Physiques (Parcours SP),
- Parcours Énergie et Matériaux (Parcours EnerMat).

En ce qui concerne l'organisation de cette licence, elle présente l'originalité d'être totalement commune pour tous les parcours pendant les semestres S1 et S2. Les étudiants intéressés par les sciences physiques théoriques et appliquées peuvent donc s'inscrire et suivre les enseignements de ces deux semestres S1 et S2 sans véritablement choisir de spécialité. Ensuite les enseignements se spécialisent progressivement, ils comportent 50% d'enseignements communs au cours des semestres S3 et S4. Au cours des semestres S5 et S6, seuls 20% environ des enseignements sont communs, les étudiants devront alors avoir choisi leur spécialité. Cette organisation générale offre une très grande souplesse pour les étudiants puisqu'ils peuvent démarrer leur formation sans prendre une véritable orientation spécialisée. En fait c'est seulement à partir du semestre S4 qu'il devient nécessaire de choisir un parcours. Il faut également noter que cette licence a des liens très étroits avec la licence professionnelle « Technologies du Froid et Énergies Renouvelables » (TeFER). Les étudiants de la licence qui souhaiteraient donner une orientation plus professionnelle à leurs études peuvent tout à fait le faire à travers ces deux licences professionnelles. De même, la licence « Sciences Physiques et Technologies de l'Ingénieur » est en relation directe avec les

Masters du domaine Sciences et Technologies de l'Université de Perpignan : le Master Électronique, Automatique et Informatique (Master EAI, anciennement Master IAMA option IA) et le Master Énergie Solaire (Master ES). Ces masters constituent la voie naturelle des étudiants qui ont décidé de poursuivre leurs études dans notre université. Ils seront aidés dans ce choix par l'équipe enseignante qui est commune à la licence SPTI et aux Masters. Cette licence est en cours de modification pour devenir la licence « **Sciences Pour l'Ingénieur** ». Cette nouvelle formation reprendra les thématiques des parcours EEA et EnerMat et inclura les nouvelles orientations de l'UPVD, cad les problématiques des énergies renouvelables. Le dépôt du dossier s'effectuera au mois d'Octobre 2009, et j'en suis le porteur.

En parallèle, pour le plan quadriennal 2007-2010, ainsi que le dépôt de la vague A 2011, il m'a été demandé par le responsable du master EAI, Monique Polit, de mettre en place un parcours « Électronique embarquée ». Ce parcours est issu directement de la recherche qui c'est mise en place petit à petit au laboratoire ELIAUS. L'objectif est de donner aux futurs étudiants l'ensemble des compétences pour concevoir et réaliser les systèmes embarqués pour (i) les systèmes communicants et (ii) le contrôle et la supervision de procédés à énergies renouvelables.

III. École d'ingénieur universitaire Polytech - Département « Énergétique »

La problématique des énergies renouvelables étant jour après jour de plus en plus d'actualité, les laboratoires ELIAUS et PROMES, avec l'école d'ingénieur Polytech de Montpellier ont décidé de mettre en place un département spécifique Énergétique-Énergies renouvelables. Nous avons donc travaillé depuis 2 ans avec Monique Polit, Xavier Py et Jean-Marie Navarro à l'élaboration de ce projet qui a été labellisé au mois d'avril 2009 par la Commission des Titres d'Ingénieur. Le département « *Énergétique* » de Polytech regroupe, sous la forme de deux spécialités en partie mutualisées, deux thématiques complémentaires relevant de deux filières industrielles et commerciales en pleine émergence sous l'impulsion du développement durable. Ces deux filières, l'une concernant les procédés énergétiques (GDPE) et l'autre l'énergétique des bâtiments (MEB), répondent ainsi à un besoin croissant en ingénieurs pour assurer la création ou la mutation des industries correspondantes impliquant les énergies renouvelables. La spécialité dont je suis en charge « **Maîtrise Énergétique des Bâtiments – Énergies Renouvelables** » a pour objectif de former des ingénieurs qui, à partir de solides bases en électronique, automatique et énergétique, pourront développer une aptitude à travailler avec d'autres secteurs d'activité (matériaux du bâtiment par exemple), dans une approche de la maîtrise de la consommation énergétique et du développement des énergies renouvelables dans les bâtiments, applicables aussi bien aux constructions neuves qu'à la rénovation des bâtiments anciens.

- Concevoir et réaliser les systèmes de contrôle commande des sources à EnR (mono sources et/ou hybridation, solaire, géothermie, éolien,...) liés aux bâtiments ;
- Concevoir et réaliser la connexion de la production décentralisée des bâtiments au réseau électrique général ;
- Instrumenter de manière à assurer la gestion optimale par la détermination temps réelle ou non d'indicateurs énergétiques du bâtiment;

- Assurer un choix de sources EnR, ainsi qu'un contrôle optimal afin d'avoir le label bâtiments zéro énergie et/ou bâtiments à énergie positive;
- Assurer l'intégration des matériaux liés à la construction dans la gestion optimisée des procédés énergétiques ;
- Mener à bien l'intégration de ces différents projets (implantation des EnR, diagnostic et suivis énergétique, contrôle commande ...) avec l'ensemble des corps de métiers liés aux bâtiments ;
- Maîtriser la qualité et les risques.

IV. Animation scientifique et activités diverses

Depuis mon arrivée au laboratoire, je m'occupe

- de l'axe transversal regroupant les équipes « *électronique* » et « *automatique* »,
- de l'axe systèmes électroniques embarqués,
- de la totalité des activités liées
 - à la maîtrise énergétique des bâtiments,
 - et aux actions utilisant des procédés géothermiques.
- J'ai été membre des commissions de spécialistes 63 et 27 de l'Université de Perpignan de 2005 à 2008, ainsi que la commission de spécialiste 63 de l'Université Montpellier II de 2006 à 2008.
- J'ai organisé le congrès CCIA en 2006.
- Je gère aussi depuis 2006 l'ensemble de sites web du laboratoire et des formations, soit 4 sites CMS (SPIP, JOOMLA et PHPBB).

Activités de recherche

I. Introduction

J'ai effectué ma thèse au Laboratoire d'Électrotechnique de Montpellier (maintenant Institut d'Électronique du Sud/Groupe Génie Électrique et Matériaux) sous la direction de Christian Glaize en 1999-2001. J'ai été recruté maître de conférences au laboratoire d'Électronique d'Informatique d'Automatique et Systèmes de l'Université de Perpignan Via Domitia en 2003. Lors de mon arrivée au laboratoire, il m'a été demandé de m'occuper de l'organisation d'axes transversaux entre les 2 équipes du laboratoire (Électronique et automatique). Après 3 années, nous avons choisi la supervision d'installations à énergies renouvelables. Dans ce cadre de travail, mes travaux de recherches s'organisent suivant 2 axes

- les systèmes électroniques,
- et la modélisation des composants électroniques.

II. Systèmes électroniques

Mon premier travail a été de mettre en place une structure d'étude et d'application dans le domaine de l'électronique embarqué. Avec en tâche de fond, le fait que le laboratoire ne possède pas la capacité de « créer » de toute pièce un circuit, mais possède suffisamment de capacité par l'intermédiaire de l'ensemble de ses enseignants chercheurs (électronique, électronique de puissance, automatique) pour mettre en place des systèmes électroniques spécifiques aux énergies renouvelables. L'objectif était de mettre en place un système modulaire (i) intégrant le monitoring d'installations (en particulier géothermiques), (ii) pouvant contrôler des installations en utilisant des régulations complexes (commandes RST, MPC par exemple), (iii) tout en ayant une consommation énergétique la plus faible possible. Cette dernière contrainte étant bloquante dans de nombreux cas en particulier pour l'utilisation de règles de commandes « complexes ». Un premier prototype a été réalisé grâce au contrat FUI, thèse de Benjamin PARIS (voir la section Contrats et Financements §2). Une évolution a été réalisée pour des installations géothermiques (§1 Applications aux énergies renouvelables). Et une troisième version est en cours de réalisation, pour l'intégration de la commande au système (§2 SiP) afin qu'elle ne soit plus déportée comme c'est le cas actuellement.

A. Applications aux énergies renouvelables

L'activité anthropique du dernier siècle a profondément modifié l'écosystème dans lequel nous vivons : le changement climatique en est une des conséquences les plus visibles. Ce dernier s'explique en particulier par les émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES), résultants majoritairement de la consommation d'énergies fossiles.

Plus précisément, ces consommations sont imputables aux différents secteurs d'activité dont le bâtiment fait partie. Il représente à lui seul 50% de l'énergie globale consommée en France (40% au niveau européen), c'est-à-dire 25% des émissions de gaz à effet de serre. Le secteur du bâtiment est le seul à voir ses consommations d'énergies finales augmenter ces dernières années, alors que tous les autres connaissent une relative diminution. Cela signifie que d'importants progrès et des efforts doivent être envisagés au niveau de la performance des matériaux, de la conception, du développement des énergies renouvelables et de la gestion énergétique.

Les pouvoirs publics ne s'y sont pas trompés par le biais de la Réglementation Thermique (RT) 2005 des bâtiments et des diagnostics de performances énergétiques. Les contraintes en terme de consommations conventionnelles d'énergie sont revues à la baisse, et les énergies renouvelables favorisées. A l'heure actuelle, la gestion de l'énergie dans les bâtiments reste un enjeu majeur pour l'avenir.

La recherche actuelle s'oriente vers une meilleure connaissance du fonctionnement d'un bâtiment et de l'ensemble des systèmes énergétiques installés. C'est pourquoi nous avons besoin de les instrumenter, à l'aide de capteurs intelligents spécifiques, afin d'obtenir des indicateurs de performances énergétiques. De plus, la connaissance des paramètres environnementaux est nécessaire pour définir le contexte dans lequel le bâti évolue.

Le travail effectué sur les 3 dernières années a permis de mettre en place un ensemble complet et cohérent (i) d'éléments à mesurer, (ii) d'algorithmes et (iii) une structuration d'électronique modulaire. Ce système inclut (1) la mesure, (2) la connectivité, (3) un traitement de l'information temps réel et (4) une consommation complète du système inférieur à 5W. A partir de ce système et moyennant quelques informations « simples » concernant le bâtiment, il est possible d'effectuer un diagnostic de performance énergétique temps réel, ce qui est une première française. En parallèle a été développé un prototype à l'échelle du laboratoire pour tester les contrôles qu'il est possible d'implémenter en temps réel. Ce système se base :

- sur une électronique identique à celle développée lors de la thèse de Benjamin Paris mais auquel on a ajouté un FPGA pour permettre le contrôle d'une installation en temps réel,
- une maquette à l'échelle 1/27 simulant les échanges thermiques entre un bâtiment et l'environnement. Il est évident qu'il n'est pas possible de tester les transitoires de fonctionnement avec ce prototype, cependant les états stables eux sont parfaitement utilisables.

Ce système est utilisé actuellement par les automaticiens du laboratoire mais aussi par l'école Centrale Paris.

En parallèle viens de débiter l'ANR SolarGeotherm (Section Contrats et Financements §5) qui va intégrer sur un site pilote, le système complet de l'acquisition de données, le transfert de l'information, au contrôle intégré temps réel (thèse de Julien NOU).

1. Maîtrise énergétique des bâtiments

Le secteur du bâtiment de par sa consommation d'énergie finale importante représente un enjeu majeur pour l'avenir. En outre les sources utilisées pour répondre aux besoins étant à dominante fossile, ce secteur du bâtiment se place au cœur du déficit « facteur 4 » (réduction d'un facteur 4 des émissions de CO₂ par rapport au niveau de 1990). Cette constatation amène naturellement à considérer la **performance énergétique des bâtiments** comme primordiale.

Toutefois, il peut paraître malaisé de qualifier correctement ce que représente réellement cette performance énergétique. La directive européenne la définit comme **la somme d'énergie effectivement consommée pour répondre aux besoins avec un fonctionnement normal du bâtiment**. Mais encore faut-il savoir comment déterminer les consommations réelles d'énergie, quels indicateurs utiliser ou encore quels usages de l'énergie sont à considérer.

Afin de répondre à ces interrogations, l'étude des **travaux normatifs existants**, dont l'objectif est d'obtenir une définition d'**indicateurs** ainsi que d'inventorier les paramètres essentiels à prendre en compte pour définir une performance énergétique, semble être la voie à suivre. Ces travaux normatifs représentent les outils applicatifs (le « bras armé ») de la réglementation thermique.

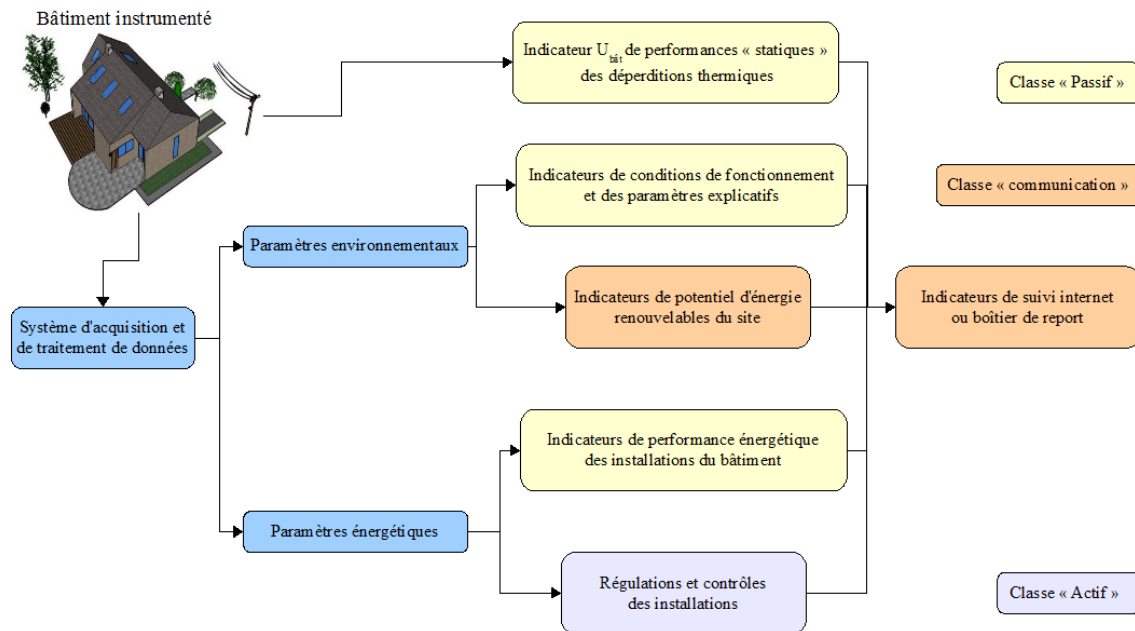


Figure ?? : Bilan d'un audit énergétique. (à voir si garder)

a. Calculs des indicateurs

1. U_{bat}

Les pertes énergétiques liées à l'enveloppe sont précisées par la Figure 2 pour une maison individuelle non isolée. Les règles de calculs « Th – Bât » traitant de cette caractérisation de l'enveloppe sont les documents « Th – U ». Ils se divisent en 5 fascicules permettant la détermination du **coefficient moyen de déperdition par transmission à travers les parois du bâtiment**. Cet indice est noté « $U_{Bât}$ ».

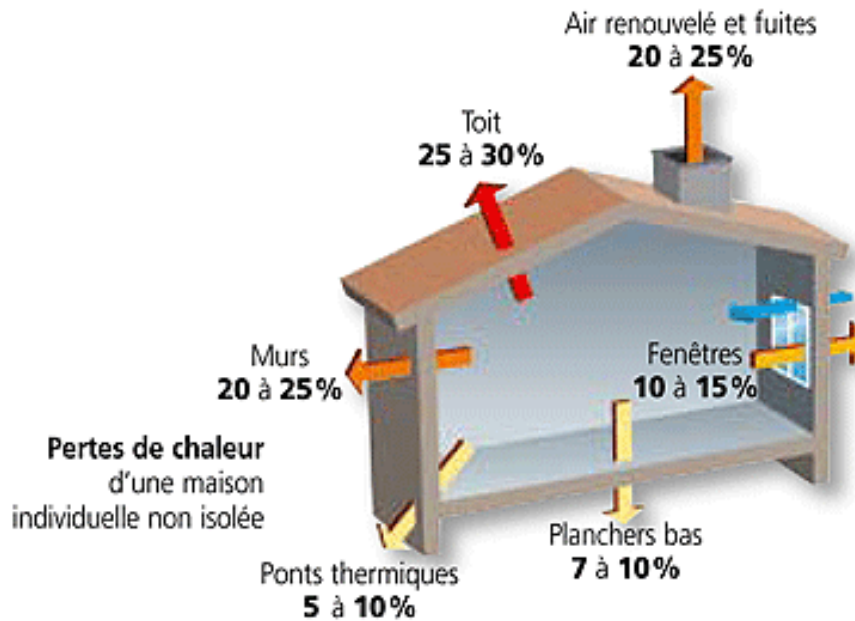


Figure 2 : Principales pertes thermique d'une maison individuelle non isolée [%]¹.

Le premier fascicule [3] traite des caractéristiques utiles des parois. Il fixe les modalités de calcul de « $U_{Bât}$ », rappelle le niveau réglementaire des composants de l'enveloppe et donne également les définitions, les grandeurs physiques, les conventions et les unités utilisées. En ce qui concerne le coefficient de transmission surfacique, il s'exprime en $W.m^{-2}.K^{-1}$, inverse de la résistance thermique notée « R » en $m^2.K.W^{-1}$. Nous apprenons en outre que les conductivités thermiques des matériaux et des éléments de construction sont définies pour une température moyenne de 10 °C. En l'absence d'informations spécifiques sur les conditions limites des surfaces planes, les résistances superficielles intérieures « R_{si} » et extérieures « R_{se} » doivent être considérées (voir Tableau 1). De plus, seules les dimensions intérieures doivent être utilisées pour le calcul des déperditions (règles de prises en compte des décrochements et des angles rentrants pour les surfaces des parois ayant deux faces). Notons qu'il existe des rapports d'études avec tous les éléments nécessaires afin de nous guider dans les calculs.

Plus précisément pour les parois déperditives (opaque, vitrée ou translucides séparant le volume chauffé du bâtiment de l'extérieur, du sol, ou des locaux non chauffés), l'indicateur se définit par (1).

$$U_{Bât} = \frac{H_T}{A_T} \quad (1)$$

H_T est déterminé par (2).

$$H_T = H_D + H_S + H_U \quad (2)$$

avec

¹ Source : www.energy-consulting.be

$$H_D = \sum_i A_i U_i + \sum_k l_k \psi_k + \sum_j \chi_j \quad (3)$$

$$H_S = \sum_s A_s U_{ss} + \sum_j A_j U_{sj} b_j \quad (4a)$$

$$H_S = \sum_v A_v U_{sv} \quad (4b)$$

$$H_U = \sum_l H_{il} b_l \quad (5)$$

Le coefficient b ne sera pas détaillé ici. Notons simplement que son calcul prend en compte des débits d'air entrant et que des valeurs par défaut sont accessibles.

Ce premier fascicule se termine par la présentation du « $U_{Bât-ref}$ » qui est le coefficient moyen de référence de déperdition par les parois et les baies des bâtiments. Cela précise les **niveaux réglementaires des performances thermiques de l'enveloppe** et de ses composants. Son calcul requiert les coefficients de référence donnés dans l'arrêté de la réglementation thermique, pondérés par les caractéristiques géométriques réelles du bâtiment. En outre, les calculs dépendent de la **zone climatique** de la construction.

L'étude des fascicules 2 à 5 se contente de mettre en exergue les grandeurs physiques utiles et certaines conventions sans réellement approfondir l'obtention de certains paramètres. Ainsi le fascicule 2 [4] s'attache à la « **détermination des caractéristiques thermiques utiles des matériaux** ». Ces valeurs thermiques utiles des matériaux se résument à la **conductivité thermique** λ [W.m⁻¹.K⁻¹], à la **capacité thermique massique** C_p [J.kg⁻¹.K⁻¹] et au facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau μ . Ces valeurs dépendent de certaines conditions pour la **température** (10 °C) et pour l'**humidité** (entre 23 et 50 % d'humidité relative pour un matériau à l'abri de la pluie et de la condensation).

Puis le fascicule 3 [5] décrit le « **calcul des coefficients thermiques des parois vitrées** ». L'obtention de ces coefficients thermiques requiert trois éléments pour calculer le coefficient moyen (i) l'élément de remplissage, (ii) la jonction entre la menuiserie et l'élément de remplissage et (iii) la menuiserie. Pour nos travaux les calculs des parois vitrées sont trop précis et dans la plupart des cas il nous est impossible d'obtenir les informations nécessaires. La prise en compte des parois vitrées est réalisée lors du calcul de H_D avec le « R » équivalent du vitrage et de sa surface.

Le fascicule suivant, le numéro 4 [6], se consacre au « **calcul des caractéristiques thermiques des parois opaques** ». Le coefficient surfacique moyen de la paroi sert notamment au calcul de « $U_{Bât}$ ». La première notion importante est de considérer la nature du sol afin d'estimer les déperditions correspondantes. Les sols les plus courants ont pour caractéristiques thermiques (en W.m⁻¹.K⁻¹) 1,5 pour les argiles ou les limons, 2 pour le sable ou le gravier et enfin 3,5 pour une roche homogène. Puis les résistances superficielles des parois, dont la méthode de calcul est détaillée dans ce

fascicule, sont mentionnées dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Valeurs des résistances superficielles [$\text{m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$]².

Paroi donnant sur l'extérieur, un passage ouvert...		R_{si} [$\text{m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$]	R_{se} [$\text{m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$]	$R_{si} + R_{se}$ [$\text{m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$]
Paroi verticale	Flux horizontal	0.13	0.04	0.17
Paroi horizontale	Flux ascendant	0.1	0.04	0.14
Paroi horizontale	Flux descendant	0.17	0.04	0.21

La résistance thermique d'une couche homogène d'une paroi se calcule d'après (6).

$$R_i = \frac{e_i}{\lambda_i} \quad (6)$$

Ensuite notons que la **résistance thermique d'un composant** de bâtiment constitué de plusieurs couches superposées, thermiquement homogènes et perpendiculaires au flux de chaleur, est la somme des résistances thermiques individuelles de toutes les couches. Il existe également des calculs pour les lames d'air et le coefficient de transmission surfacique de la paroi s'exécute suivant (7).

$$U_p = \frac{1}{R_{si} + R + R_{se}} \quad (7)$$

Des tableaux récapitulatifs des méthodes sont déterminés pour les parois les plus usuelles. Les valeurs par défaut des coefficients de transmission surfaciques, linéiques et ponctuels, de la résistance thermique des parois opaques ou des composants des parois opaques sont également disponibles.

Pour finir le dernier fascicule se consacre aux « **ponts thermiques** » [7]. Il contient des valeurs par défaut en plus des règles de calculs. Notons simplement qu'un pont thermique est une partie de l'enveloppe du bâtiment où la résistance thermique, par ailleurs uniforme, est modifiée de façon sensible. Les ponts thermiques entraînent des déperditions supplémentaires pouvant atteindre 40 % des déperditions thermiques totales. Ces ponts thermiques engendrent un risque accru de condensation et sont classés en deux types :

- ✓ linéaire ou 2D [$\text{W}.\text{m}^{-1}.\text{K}^{-1}$],
- ✓ ponctuels ou 3D [$\text{W}.\text{K}^{-1}$].

Retenons également que la prise en compte des ponts thermiques est complexe et peu aisée. Elle nécessite la connaissance des matériaux de l'environnement proche, une dizaine de paramètres,

² Source : fascicule 4.

ainsi qu'un maillage de calcul très fin. Cependant, une approximation couramment utilisée consiste à **estimer les pertes dues à ces ponts thermiques à 10 % des déperditions totales du bâti**.

Algorithme de détermination de l'indicateur « $U_{Bât}$ »

Cet indice de déperditions thermiques « $U_{Bât}$ » utilisant les caractéristiques des matériaux des parois comme les conductivités ou les résistances thermiques ainsi que la géométrie du bâtiment, nous apparaît essentiel pour répondre à notre problématique. En effet, cet indicateur peut servir de référence pour caractériser la performance énergétique d'un bâtiment d'un point de vue « statique ». C'est-à-dire un moyen de qualifier une construction sur des performances de bases sans prise en compte de fonctionnements d'installations ou de consommations d'énergie.

C'est pourquoi un algorithme simplifié de cette méthode de calcul a été élaboré et testé (Figure 3). Il est tiré principalement des équations (1), (2), (6) et (7) ainsi que du Tableau 1.

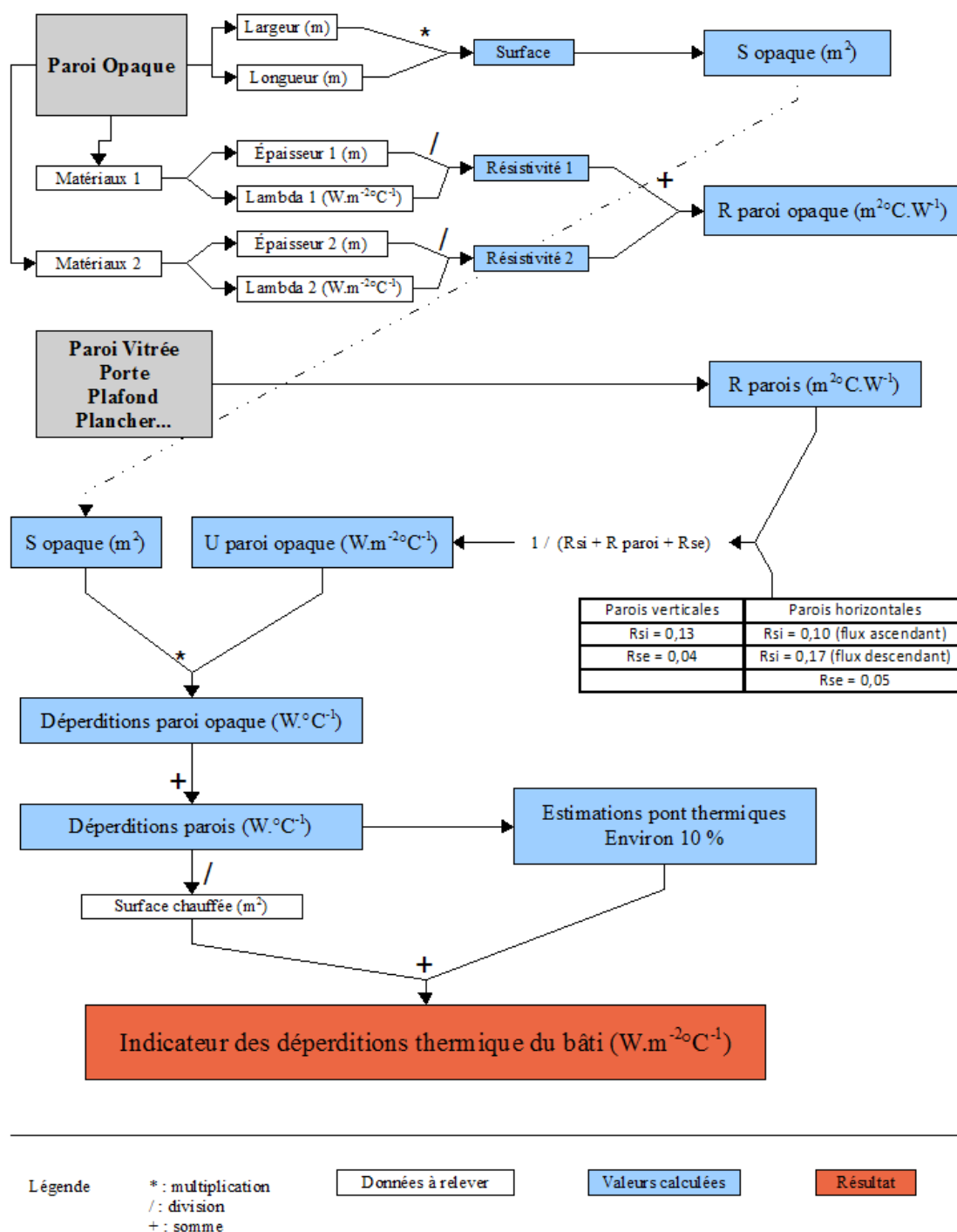


Figure 3 : Algorithme de détermination de l'indicateur « $U_{bât}$ ».

En outre l'étude de ces fascicules a permis de faire ressortir trois paramètres primordiaux pour la performance énergétique du bâtiment, autres que ceux des constituants :

- < la **localisation géographique** (prise en compte de zones climatiques),
- < l'influence de la **température** sur les caractéristiques des matériaux,
- < l'influence de l'**humidité** sur la performance des matériaux.

Cet indicateur permettant de définir les performances de l'enveloppe d'un bâtiment est un point de départ mais n'est certes pas suffisant. En effet, il faut également être capable de caractériser la performance énergétique d'un bâtiment en rapport avec ces consommations d'énergie. Pour cela, le document à étudier se nomme « TH – CE ».

2. les règles « Th – CE »

Les règles « Th – CE » [8] ont pour objet la méthode de calcul réglementaire des consommations conventionnelles d'énergie, C_{ep} et C_{ep-ref} , pour les postes de **chauffage, de refroidissement, de l'eau chaude sanitaire et de l'éclairage des bâtiments**. Cette discrétisation des consommations d'énergie en différents postes rappelle celle utilisée par la RT_2005.

Le coefficient C_{ep} est calculé en appliquant cette méthode de calcul et en utilisant comme données d'entrée les caractéristiques réelles du bâtiment et de ses équipements. Le coefficient C_{ep-ref} est, quant à lui, déterminé en appliquant cette même méthode de calcul mais en utilisant comme données d'entrée les caractéristiques de référence du bâtiment et de ses équipements. Ils sont tous deux exprimés en kWh/m².an⁻¹. En outre, ces règles proposent le calcul réglementaire de la température intérieure conventionnelle, **Tic**, atteinte en été dans un bâtiment. Cette méthode n'étant pas conçue pour être appliquée manuellement dispose toutefois de nombreux aspects forts utiles dans notre applicatif.

Un des points les plus intéressants est **l'architecture des calculs** présentée par la Figure 4 qui fait apparaître une segmentation : projet, bâtiment, zone, groupe, local.

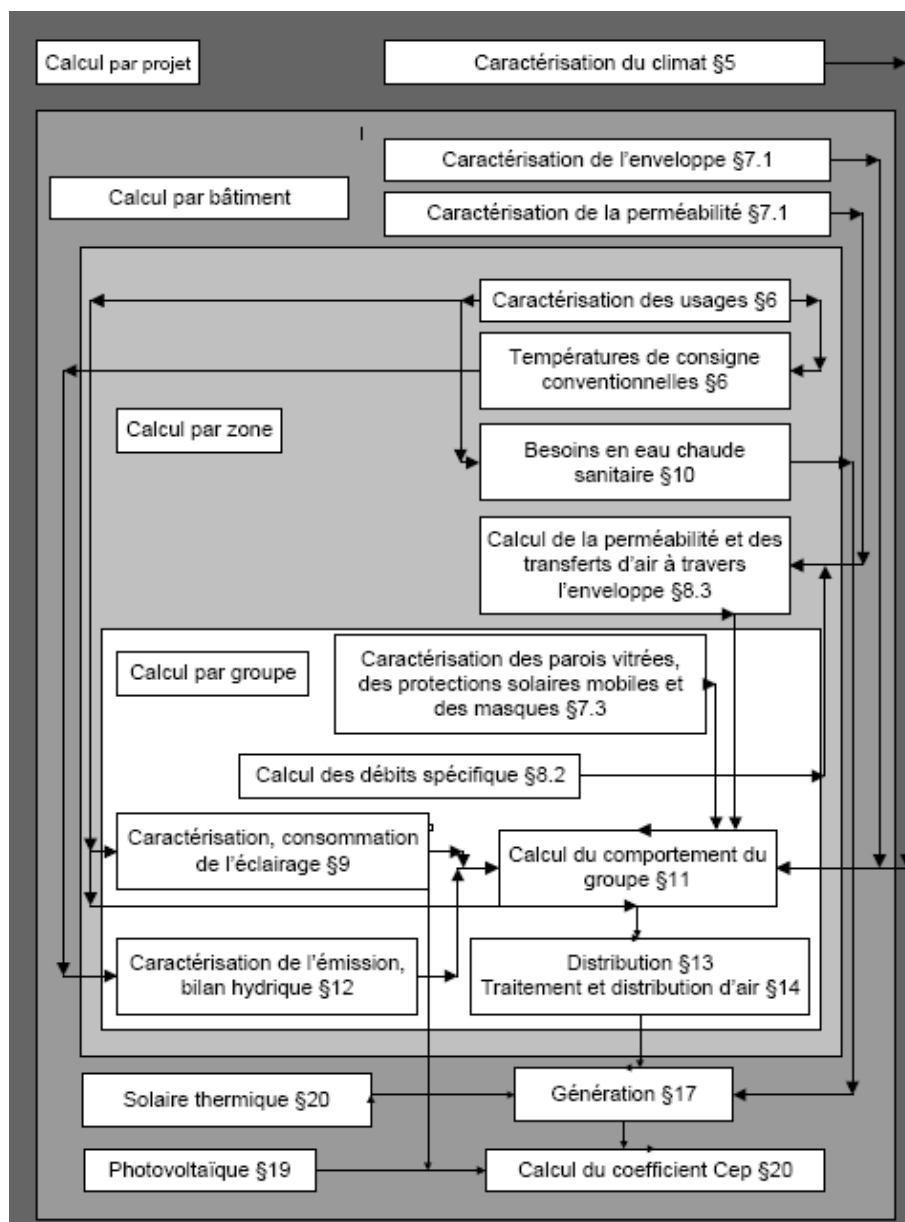


Figure 4 : Architecture des calculs pour un projet.³

Cette segmentation nous permet de connaître les données à collecter (Tableau 2) ou les calculs à effectuer utiles pour l'élaboration des ces indices de consommations. Ces données ainsi que les différentes caractérisations s'avèrent primordiales pour étudier la performance énergétique des bâtiments. Cette architecture des calculs fait également apparaître, en plus d'une caractérisation du climat et de l'enveloppe, une utilisation des ressources **solaires thermiques et photovoltaïque** ainsi que des **températures de consignes conventionnelles**.

Tableau 2 : Données à collecter ou calculs à effectuer.⁴

³ Source : Règles de calculs « Th – CE ».

⁴ Source : Règles de calculs « Th – CE ».

Niveau	Données à collecter ou calculs à effectuer
	Données météorologiques
Projet	Caractérisation de la génération de stockage de chaleur pour la partie commune à plusieurs bâtiments
Bâtiment	Caractérisation de l'enveloppe du bâtiment : coefficient de déperdition spécifique par transmission du bâtiment « $U_{Bât}$ », perméabilité à l'air Caractérisation de la génération de stockage de chaleur pour la partie commune à plusieurs zones mais desservant uniquement le bâtiment
	Caractérisation de la ventilation
Zone	Caractérisation de la génération et du stockage de chaleur pour la partie située dans la zone et desservant uniquement la zone Caractérisation des besoins d'eau chaude sanitaire
	Caractérisation du système d'éclairage
Groupe	Caractérisation de l'émission, de la régulation et de la distribution de chauffage

3. Caractérisation du climat

Au niveau « Projet » figurant sur le Tableau 2, une caractérisation du climat est mentionnée. Celle-ci s'appuie pour chaque zone climatique (Figure 5) sur les données suivantes :

- ✓ I_{Dn} rayonnement direct normal [$W.m^{-2}$],
- ✓ I_{df} rayonnement diffus horizontal [$W.m^{-2}$],
- ✓ θ_{ei} température extérieure [$^{\circ}C$],
- ✓ T_{eiciel} température du ciel [$^{\circ}C$],
- ✓ w_{ei} humidité spécifique de l'air [$kg.kgas^{-1}$],
- ✓ V_e vitesse du vent [$m.s^{-1}$],
- ✓ θ_{cw} température d'eau froide [$^{\circ}C$].

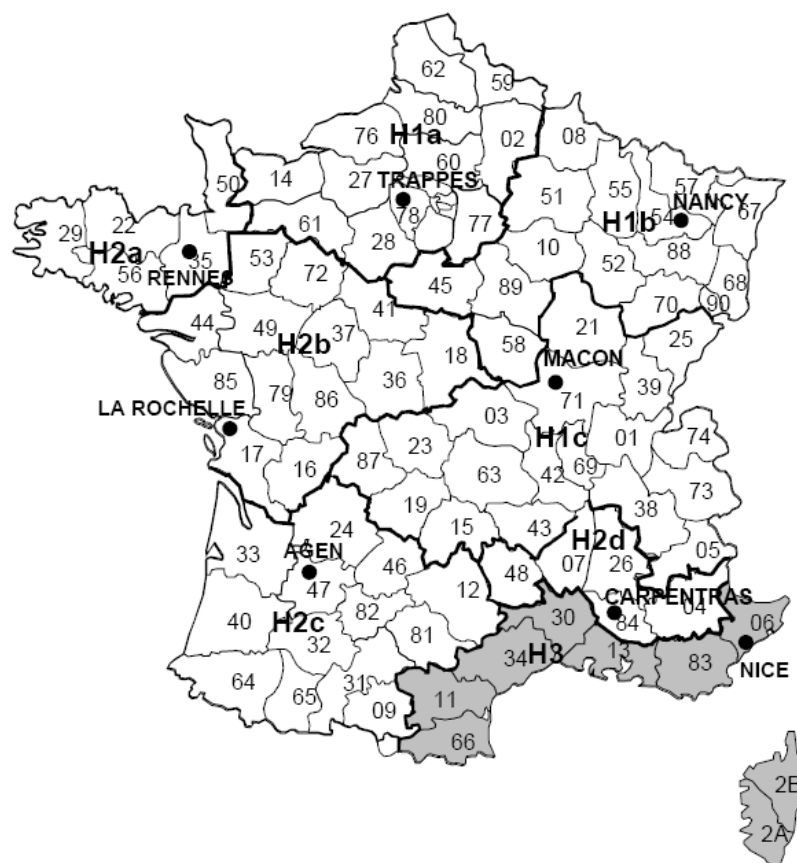


Figure 5 : Zones climatiques⁵.

Au niveau « Bâtiment », la détermination du « $U_{Bât}$ » a déjà été retenue et pour la « Zone » la ventilation et le système d'éclairage sont stipulés tout comme les besoins en ECS. Nous retrouvons ici le découpage des consommations énergétiques par **usages**. Pour l'ensemble des niveaux, une attention particulière est portée au poste de chauffage.

En outre, afin d'estimer les consommations d'un futur bâtiment, des scénarii conventionnels doivent être définis.

4. Scénarii conventionnels

Cette discrétisation en postes énergétiques pour considérer les consommations énergétiques des bâtiments est également sensible pour la définition de scénarii. Conventionnellement, les scénarii d'occupation, de **consignes de température**, de ventilation et d'éclairage artificiel sont les suivants (Tableau 3, 4 et 5). Il faut les mettre en relation avec le type d'usage de bâtiment et les températures conventionnelles de chauffage. Par exemple un logement à « longs » pour « horaire d'occupation », et « moyen » pour « niveau de température ». Ces informations vont s'avérer utiles pour élaborer des consignes de température dans l'optique de développer des contrôleurs.

⁵ Source : Règles de calculs « Th – CE ».

Tableau 3 : Horaires d'occupation⁶.

Horaires d'occupation	Heures par jour	Jours par semaine
Longs	16 (de 0h à 10h et de 18h à 24h)	5 (lundi au vendredi)
	24h	Samedi et dimanche
Moyens	10 (8h à 18 h)	5 (lundi au vendredi)
Courts	5 (9h à 14 h)	5 (lundi au vendredi)

Tableau 4 : Températures de consigne conventionnelles en chauffage [°C]⁷.

Niveau de température	Occupation	Réduction de chauffage de moins de 48h	Réduction de chauffage de plus de 48h
Élevé	21	18	7
Moyen	19	16	7
Réduit	15	7	7

Tableau 5 : Températures de consigne conventionnelles en refroidissement [°C]⁸.

Occupation en logements	Occupation autres cas	Réduction de refroidissement de moins de 48h	Réduction de refroidissement de plus de 48 h
28	26	30	30

Des scénarii d'utilisation de la ventilation et de l'éclairage artificiel sont également disponibles, tout comme des conventions d'apports internes de chaleur et d'humidité.

En résumé, la prise en main des outils réglementaires de la législation française a permis de faire ressortir des points essentiels concernant la performance énergétique des bâtiments :

⁶ Source : Règles de calculs « Th – CE ».

⁷ Source : Règles de calculs « Th – CE ».

⁸ Source : Règles de calculs « Th – CE ».

- < l'indicateur « $U_{Bât}$ » sert à qualifier les déperditions thermiques de l'enveloppe d'un bâtiment,
- < la **conductivité thermique** et les **surfaces** des parois permettent de déterminer « $U_{Bât}$ »,
- < la **capacité massique** est un des paramètres utiles pour définir les matériaux,
- < les **paramètres météorologiques** ont une importance non négligeable sur la performance des matériaux et caractérisent la **zone climatique**,
- < les consommations énergétiques sont divisées en **postes** (chauffage, refroidissement, ECS, éclairage, ventilation) et dépendent de la zone climatique,
- < les bâtiments sont classés en fonction de leurs **usages**,
- < des **scénarii conventionnels** pour les différents postes sont définis pour estimer les consommations énergétiques,
- < l'indicateur global de performance énergétique le plus souvent rencontré est le **kWh.m⁻².an⁻¹**.

Ces différents points exposent l'ensemble des paramètres que l'on peut étudier pour définir la performance énergétique d'un bâtiment. Cependant, il ne s'agit que d'une liste désordonnée, d'un « descriptif » d'une construction qu'il faut à présent classer, clairement et concrètement, en diagnostic. En outre, une description est par définition « passive », il manque un moyen d'action afin d'améliorer cette performance par une gestion adaptée.

b. Modélisation énergétique des bâtiments

Le plan de l'habitat modélisé est visible sur la Figure 14 (les fenêtres sont en bleu). L'agencement des pièces en fonction de l'orientation répond à des principes de base de l'architecture bioclimatique (plébiscitée par la RT_2005). Il s'agit de positionner les chambres à l'est pour profiter du soleil levant et les pièces tampons comme le garage et la buanderie sont exposées au nord. La cuisine et le bureau se trouvent à l'ouest afin de favoriser l'éclairage du soleil de fin de journée et le séjour, au centre de l'habitat, présente une large baie vitrée orientée plein sud (la conception des protections solaires doit être soignée).

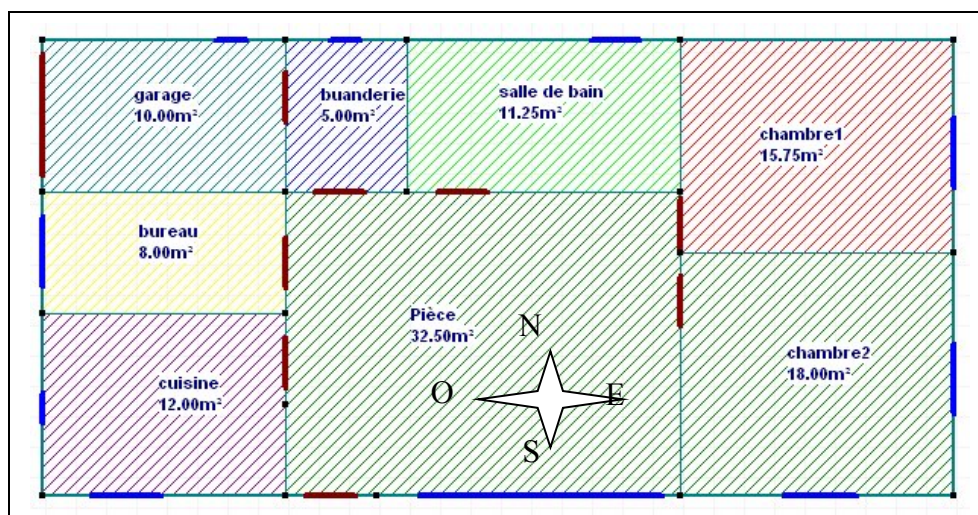


Figure 14 : Plan du modèle de l'habitat.

Le Tableau 14 présente la composition des parois de cette habitation de 112,5 m². Une attention particulière a été portée pour s'approcher des valeurs seuils de la RT_2005 en utilisant les matériaux les plus courants. Le plafond est conçu dans l'optique d'accueillir une toiture végétalisée et pour s'affranchir des problèmes de pente lors de la saisie du modèle.

Tableau 14 : Composition des parois de l'habitat.

Elément	Matériaux	Epaisseur [m]	U [W.m ⁻² .K ⁻¹]	U _{min} RT_2005 [W.m ⁻² .K ⁻¹]
sol carrelé	carrelage	0,022	0,381	0,4
	mortier	0,5		
	béton lourd	0,16		
	polystyrène expansé	0,08		
fenêtre	PVC	0,0002	2,95	2,6
	double vitrage			
plafond	polyuréthane	0,10	0,278	0,34
	béton lourd	0,16		
mur extérieur ou en contact avec un local non chauffé	BA13	0,013	0,341	0,45
	polystyrène expansé	0,07		
	parpaing	0,2		
	enduit extérieur	0,02		
mur intérieur	BA13	0,013	1,306	/
	brique creuse	0,10		
	BA13	0,013		
sol garage	béton lourd	0,2	0,373	0,4
	polystyrène expansé	0,1		

Les premiers tests de simulation réalisés ont pour but d'étudier le comportement du modèle en se basant sur les températures des différentes zones et de vérifier la cohérence des résultats. Aucun scénario de chauffage ou de climatisation n'est utilisé ici. Dans ce cas, les températures à l'intérieur des zones s'échelonnent de 10 à 38 °C environ tout au long de l'année (les simulations se font sur une année avec un pas de temps d'une heure). Notons que le garage présente l'amplitude thermique la plus élevée. Puis, le scénario type d'infiltration d'air du logiciel est ajouté (renouvellement d'air de 0,6 l.h⁻¹). La conséquence est une baisse relative des températures en hiver : elles diminuent de 10 à 8 °C. Enfin, la ventilation par air extérieur (en plus des infiltrations) entraîne une baisse des températures significative en particulier l'été. En effet, les températures varient de 6 à 25 °C tout au long de l'année. Ces résultats satisfaisants valident le modèle créé. Par conséquent une réflexion sur l'audit énergétique est rendue possible.

Cette réflexion sur l'audit énergétique correspond à celle des règles de calcul, c'est-à-dire qu'une **discrétisation par poste énergétique** est effectuée, une **approche multizones** est étudiée et **l'indicateur de performance énergétique global** est utilisé ($\text{kWh.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$) pour qualifier les consommations énergétiques. Des consommations énergétiques doivent de ce fait être simulées.

Par conséquent un scénario de chauffage est déterminé en se référant au document « TH – CE » vu plus haut. Nous rappelons que les logements ont « longs » pour « horaire d'occupation » et « moyen » pour « niveau de température » (Tableau 3 et Tableau 4). Le scénario en question définit une température de 19 °C pendant les périodes d'occupation (de 00h00 à 10h00 et de 18h00 à 24h00) et de 16 °C sans occupation (de 10h00 à 18h00). Ce scénario est appliqué aux pièces suivantes : bureau, chambre 1 et 2, séjour, salle de bain. Le scénario de la climatisation est beaucoup plus simpliste avec une limite à 27 °C dans les chambres, le séjour et le bureau.

Le premier résultat répond aux considérations des **différentes zones thermiques** en étudiant succinctement l'évolution de la température sur une année complète (8760 heures). La Figure 15 montre par exemple l'évolution des températures du garage, du séjour et du bureau.

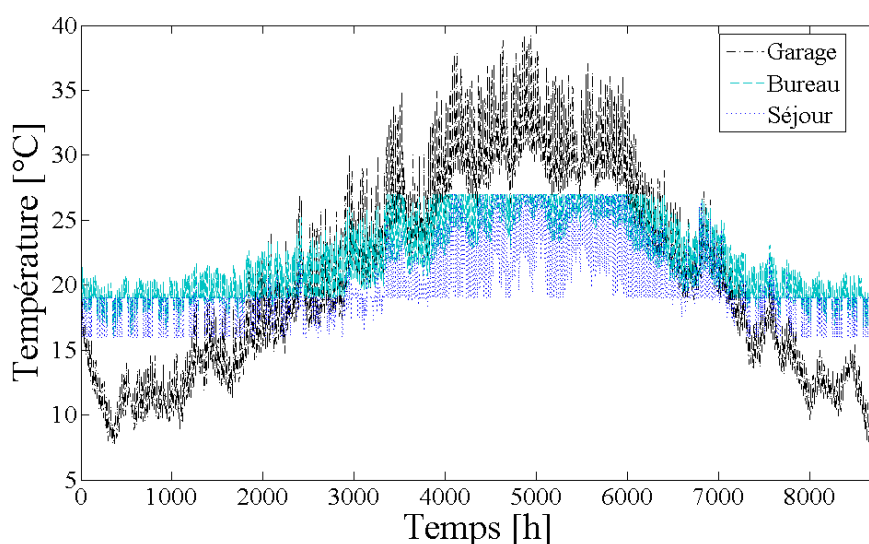


Figure 15 : Evolution des températures des zones [°C].

L'audit énergétique se poursuit par une **discrétisation de l'énergie thermique consommée** selon les usages de chauffage (Figure 16) et de climatisation (Figure 17) pour l'ensemble des pièces concernées. Les bilans sont mensuels (les calculs de la réglementation française s'effectuent au mois).

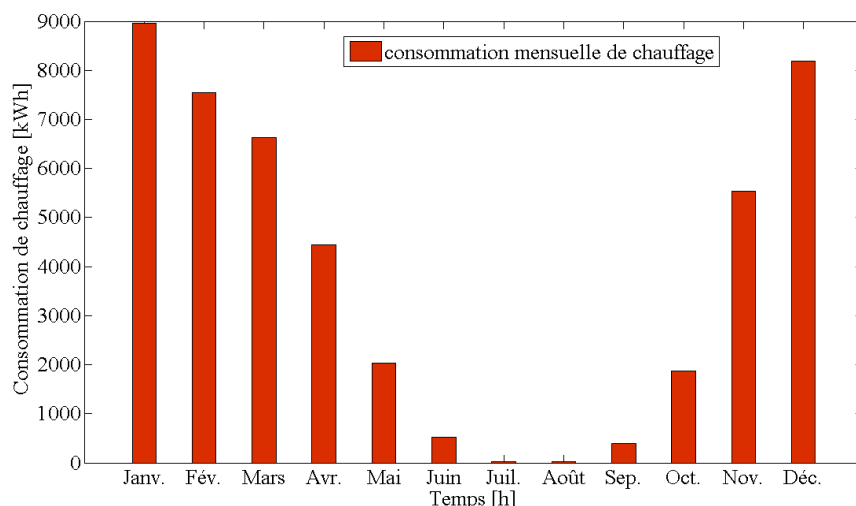


Figure 16 : Consommation de chauffage des zones [kWh].

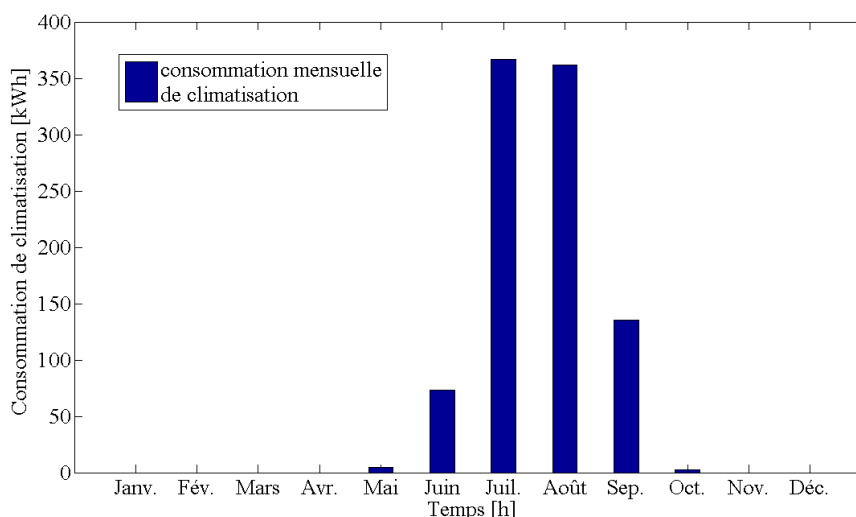


Figure 17 : Consommation de climatisation des zones [kWh].

Ces consommations représentent des totaux annuels de $4,619.10^4$ kWh pour le chauffage et de $9,581.10^2$ pour la climatisation.

Puis, ce type d'approche permet également un **diagnostic en temps réel** (avec un pas de temps horaire). Il s'agit de comparer pour un usage, le chauffage dans notre cas, la limite de la réglementation thermique ($85 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ divisés par le nombre d'heures d'une année) et la valeur totale de la consommation des différentes zones (divisée par la surface de la maison en m^2). Cet exemple est visible sur la Figure 18.

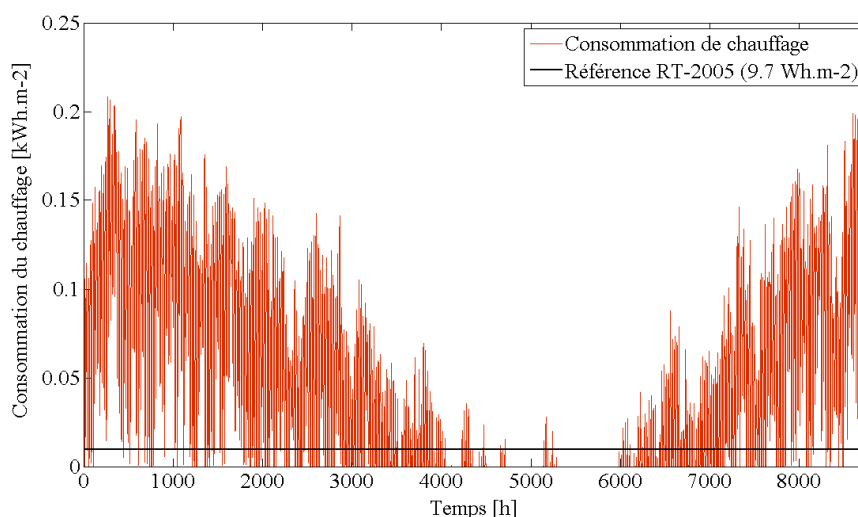


Figure 18 : Diagnostic en temps réel sur le poste chauffage [kWh].

La valeur référence peut être déterminée par exemple pour des labellisations comme « HPE » et « THPE ». Nous voyons ici très clairement que les consommations de notre modèle sont largement supérieures à celles recommandées.

Ensuite les valeurs des puissances électriques appelées sont un atout non négligeable lorsque l'on effectue un audit énergétique dans le résidentiel-tertiaire. Elles permettent d'estimer la consommation de postes comme la ventilation, l'éclairage ou encore l'électricité spécifique. C'est pourquoi à titre d'exemple, une courbe de charge (Figure 19) sur une période d'une semaine, soit 168 heures, est réalisée à l'aide d'un scénario d'utilisation d'un ordinateur de bureau (en fonctionnement de 12h00 à 14h00 et de 18h00 à 20h00 en semaine ; et de 10h00 à 13h00 et de 18h00 à 24h00 le week-end).

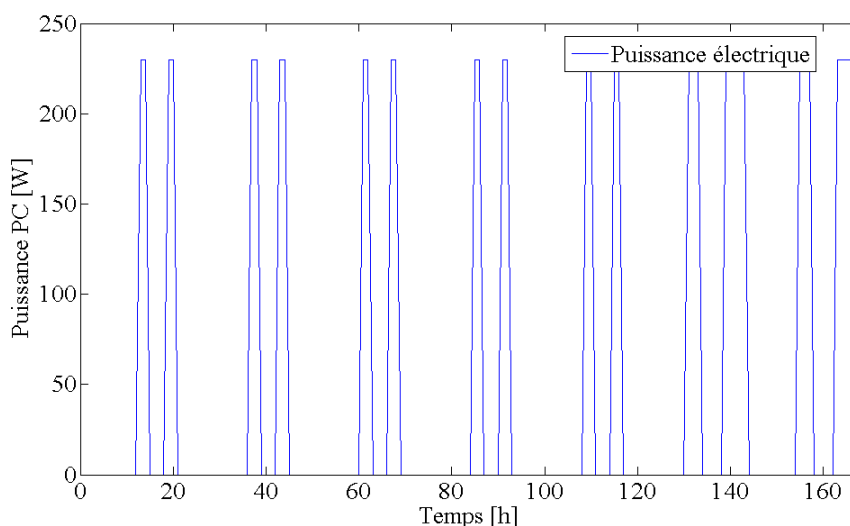


Figure 19 : Appel de puissance de l'ordinateur de bureau [W].

Pour compléter l'audit énergétique envisagé, les énergies renouvelables doivent être prises en compte (rappelons que la RT_2005 attribue à la maison individuelle de référence 2 m² de capteurs

solaires thermiques). Pour ce faire TRNSYS offre des installations types de capteurs solaires thermiques, de modules photovoltaïques ou encore d'éolienne. Grâce aux données météorologiques disponibles pour une année complète dans la bibliothèque de ce logiciel, les figures 20 et 21 présentent les potentialités d'un site en fonction de la ressource et de l'installation. Il s'agit de l'énergie thermique produite par une installation classique de 4 m² de panneaux solaires et de la puissance électrique fournie par une éolienne d'une hauteur de 46 m.

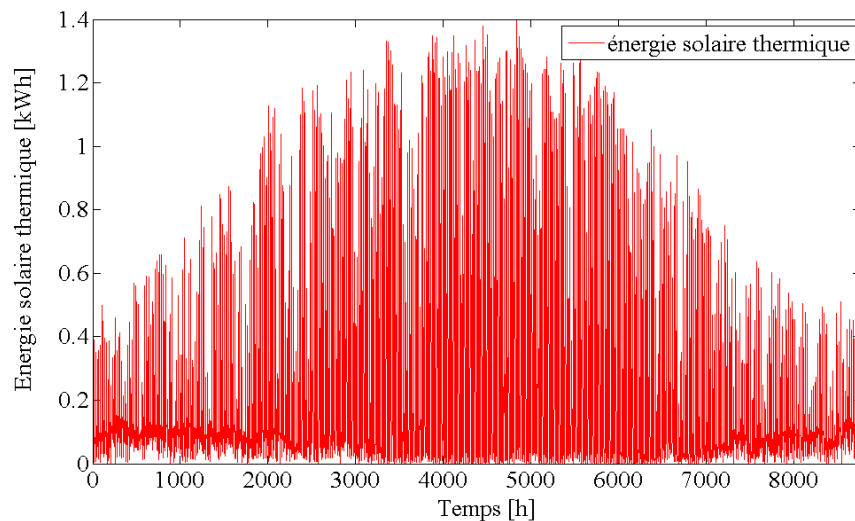


Figure 20 : Potentialité de production solaire thermique d'un site [kWh].

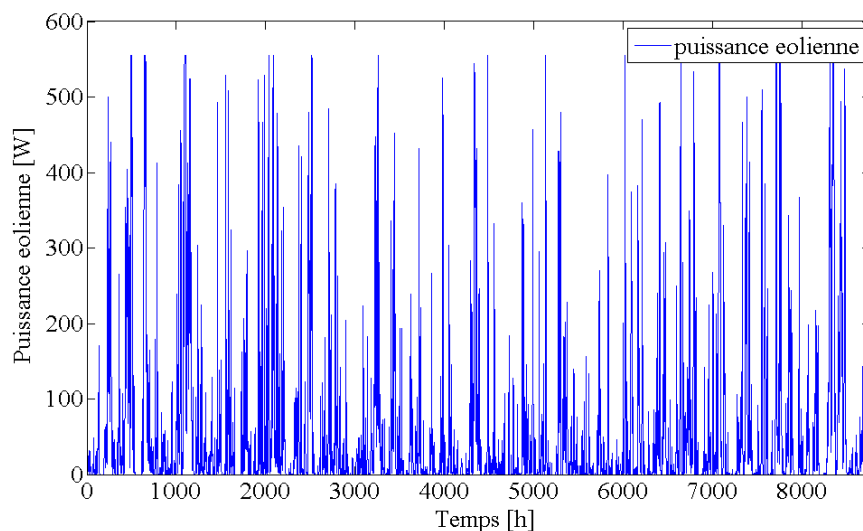


Figure 21 : Potentialité de production éolienne d'un site [W].

c. Modules électroniques

La nécessité d'améliorer la **connaissance du comportement énergétique** des bâtiments existants a été montrée, tout comme celle de définir précisément ce que représente la **performance énergétique**. Pour répondre à ces besoins plusieurs outils sont susceptibles d'être

utiles, à l'image des BEMS (*Building Energy Management System*), afin de recueillir et traiter un certain nombre de données. Encore faut-il déterminer de manière précise qu'elles variables sont réellement nécessaires pour étudier un bâtiment instrumenté.

La réalisation d'un audit requiert des **systèmes d'acquisition de données** ainsi que l'élaboration de différents **algorithmes** nécessaires pour déterminer les indicateurs énergétiques majeurs de celui-ci. Ces outils doivent en outre répondre à certaines contraintes, notamment une simplicité accrue, recherchée dans l'optique de réduire les coûts et de proposer un produit accessible à tous. Ainsi ses systèmes pourront être généralisés et dépasser le stade de prototype propre aux BEMS.

Le système de base a été développé par le laboratoire, puis a été repris par l'entreprise Pyrescom pour un développement industriel. Il possède la caractéristique principale d'effectuer un audit énergétique du bâtiment en temps réel ce qui est une première en France.

1. Paramètres environnementaux

Dans un premier temps « l'architecture des calculs » de la performance énergétique des bâtiments prescrit pour un « projet » la caractérisation du climat. Pour cela certaines des variables stipulées sont retenues. La première d'entre elles concerne le **rayonnement solaire** indispensable pour estimer une ressource solaire d'un site ou encore pour vérifier le bon fonctionnement d'une installation photovoltaïque (PV) ou thermique. L'unité de cette variable est le W.m^{-2} et la mesure s'effectue inévitablement à un endroit dégagé, sur une partie haute du bâtiment afin d'éviter tous masques modifiant les apports solaires. Le capteur doit être positionné à l'horizontale. En parallèle, si l'on souhaite étudier plus précisément l'apport solaire sur un bâtiment, une mesure à la verticale au milieu de la façade sud est sollicitée.

Un point haut dégagé est également demandé pour la mesure de la **vitesse du vent** qui s'exprime en m.s^{-1} . Ce paramètre, sensible aux perturbations de l'environnement proche, permet de classer le bâtiment selon son exposition au vent [4] et représente un facteur explicatif des déperditions énergétiques d'un bâtiment. En effet un vent soufflant à 70 km.h^{-1} double les déperditions thermiques [5]. De plus le potentiel d'énergie éolienne d'une localisation peut être estimé grâce à cette acquisition.

Ensuite pour compléter cette caractérisation du climat, il faut mesurer la **température extérieure**, en $^{\circ}\text{C}$, qui représente le principal facteur explicatif de la performance énergétique ainsi que la plus importante source de perturbation, utile pour mettre en place des régulations d'installations énergétiques. La mesure de la température extérieure s'effectue généralement sous abri aéré et de

couleur claire. Cet abri est positionné au nord du bâtiment et à une distance suffisante d'éléments perturbateurs comme la surface du sol ou une façade.

D'autres paramètres mentionnés comme la température d'eau froide [°C], la température du ciel [°C] ou encore l'humidité spécifique de l'air [kg.kgas⁻¹] ne sont pas retenus en raison de leur manque d'intérêt pour nos objectifs. En revanche **l'humidité relative**, en %, influence quant à elle le comportement thermique des matériaux et permet de qualifier une qualité d'air ambiant. C'est pourquoi ce paramètre est mesuré au sein même des bâtiments tout comme la **température intérieure** [°C]. Cette dernière sert notamment à la détermination des conditions de confort des occupants, et, en plus de la température extérieure, à la régulation de nombreuses installations énergétiques. Actuellement toujours au sujet de la qualité d'air intérieur, la mesure de la concentration en CO₂ est de plus en plus sollicitée, puisqu'elle est directement proportionnelle au nombre d'occupants du bâtiment et devient de ce fait un facteur explicatif des consommations énergétiques et de la variation de la température intérieure.

Enfin la **pression atmosphérique** [hPa] est mesurée en particulier si le besoin de prévisions météorologiques est avéré. Son acquisition se réalise soit à l'intérieur soit à l'extérieur du bâtiment.

2. Paramètres énergétiques

Après avoir listé les variables environnementales, il faut déterminer les paramètres énergétiques primordiaux pour la réalisation d'un diagnostic de performance (ce dernier est basé sur l'obtention d'indicateurs calculés à partir de ces mesures par des algorithmes présentés dans la partie suivante). Pour cela, il faut avant tout connaître quels usages de l'énergie sont présents dans les bâtiments et sous quelles formes. L'étude du deuxième chapitre expose les différents postes énergétiques, dont les principaux sont : le chauffage, le refroidissement ou encore l'électricité spécifique.

La mesure du **courant électrique** [A], répond aux usages de l'électricité spécifique, de la climatisation ainsi que du chauffage dans de nombreux cas. La différenciation de ces postes peut être menée grâce aux différents positionnements de chaque mesure. En effet, de nombreux tableaux électriques séparent les différents circuits et facilitent ainsi la discrétisation de la consommation électrique. En outre s'il existe une installation de modules photovoltaïques, une mesure de courant (généralement en sortie d'onduleur) permet d'estimer la production de cette ressource.

Dans la majorité des bâtiments, les besoins en ECS sont pourvus par l'utilisation d'une résistance électrique. Là encore la mesure du courant électrique est exigée. Ces besoins en ECS peuvent

également être comblés par le solaire thermique. Dans ce cas une estimation de la production de l'installation implique les mesures de **températures départ et retour** du circuit primaire ainsi que celle du courant des circulateurs afin de déterminer le temps de fonctionnement (cette réflexion sera explicitée lors de la présentation de l'algorithme correspondant). Cette méthodologie s'applique également à toutes installations présentant le même mode de fonctionnement comme par exemple les chaudières gaz, fioul ou bois.

3. Configurations types des acquisitions

Ces listes de paramètres environnementaux et énergétiques sont la base des configurations types des acquisitions de données. Le Tableau 1 résume la configuration concernant les paramètres environnementaux tandis que le Tableau 2 présente celle des variables énergétiques. Ces tableaux mentionnent aussi l'utilité des mesures en particulier pour les différents algorithmes nécessaires au diagnostic de performance énergétique ainsi que leurs localisations. En outre les bâtiments visés par une telle instrumentation sont également cités.

Ces tableaux récapitulatifs facilitent l'estimation du **nombre de paramètres à acquérir** selon le type de bâtiments et d'installations énergétiques. Nos objectifs étant de pouvoir adapter rapidement notre instrumentation, chaque paramètre doit être mesuré « simplement » et « unitairement ». C'est pourquoi, certains matériels proposant un ensemble de données regroupés ne sont pas intéressants (et souvent trop chers). Il s'agit de proposer une **modularité des acquisitions** en respectant un certain nombre de **contraintes** comme par exemple un coût limité et une robustesse accrue de l'instrumentation, une mise en œuvre aisée ou encore une centralisation de ces acquisitions.

Tableau 1 : Configuration de l'acquisition des paramètres environnementaux.

<i>Paramètre</i>	<i>Unité</i>	<i>Utilité</i>	<i>Bâtiment visé</i>	<i>Localisation</i>	<i>Aspect facultatif</i>
<i>température extérieure</i>	°C	<i>performance énergétique, régulation</i>	<i>villa, grand et petit tertiaire</i>	<i>nord sous abri</i>	<i>obligatoire</i>
				<i>selon site</i>	<i>facultatif</i>
<i>température intérieure</i>	°C	<i>confort, performance énergétique, régulation</i>		<i>pièce principale</i>	<i>obligatoire</i>
				<i>selon site</i>	<i>facultatif</i>
<i>humidité</i>	%	<i>confort, performance matériaux,</i>		<i>pièce principale</i>	<i>facultatif</i>

<i>régulation</i>				
<i>vent</i>	<i>m.s⁻¹</i>	<i>performance énergétique, algorithme potentiel éolien</i>		
<i>pression</i>	<i>hPa</i>	<i>prévisions météorologiques</i>	<i>plutôt tertiaire</i>	<i>extérieure</i>
<i>ensoleillement</i>	<i>W.m⁻²</i>	<i>performance énergétique, algorithme potentiel solaire</i>		

Tableau 2 : Configuration de l'acquisition des paramètres énergétiques.

<i>Paramètre</i>	<i>Unité</i>	<i>Utilité</i>	<i>Bâtiment visé</i>	<i>Localisation</i>	<i>Aspect facultatif</i>
<i>courant électrique climatisation</i>					
<i>courant électrique chauffage</i>		<i>algorithme indicateur énergétique</i>	<i>villa, grand et petit tertiaire</i>	<i>tableaux électrique</i>	<i>obligatoire si installation</i>
<i>courant électrique ECS</i>	<i>A</i>				
<i>courant électrique ventilation</i>					
<i>courant électrique total</i>		<i>déduire la consommation d'électricité spécifique</i>			<i>obligatoire</i>
<i>Chaudière gaz, fioul et bois + Installations solaire thermique</i>					
<i>T° entrée circuit</i>	<i>°C</i>	<i>estimer le delta de température du fluide caloporteur</i>	<i>villa, grand et petit tertiaire</i>	<i>sur l'installatio n</i>	<i>obligatoire si installation</i>
<i>T° sortie circuit</i>					
<i>Courant électrique</i>	<i>A</i>	<i>consommation électrique et définir</i>			

<i>pompe</i>		<i>le temps de fonctionnement</i>			
<i>Autre</i>					
<i>Courant électrique PV</i>	<i>A</i>	<i>déduire la production PV</i>	<i>villa, grand et petit tertiaire</i>	<i>sortie onduleur</i>	<i>obligatoire si installation</i>

Le **choix du matériel** pour ces systèmes d'acquisition de données est dicté par la collaboration entre les partenaires afin de répondre à un problème d'homogénéité. En effet certains d'entre eux ont évidemment l'habitude d'utiliser des techniques et autres accessoires précis. En ce sens le mode de pensée s'apparente à celui du « *design reuse* » spécifique aux systèmes embarqués [6]. Ces derniers présentent des points similaires à nos objectifs comme la recherche de la fiabilité, la simplicité et la robustesse. De plus ce matériel doit avoir certaines caractéristiques bien définies comme une **puissance de calcul minimum** pour la réalisation des algorithmes simplifiés de l'audit énergétique, des **faibles consommations électriques** ou encore plusieurs moyens de **communication** [7, 8].

4. Système d'acquisition temps réel

Le premier outil élaboré par le laboratoire est basé sur l'instrumentation de la maquette à échelle réduite. Cette maquette a été construite dans le but de tester des régulations pour le chauffage (en déporté sur un ordinateur). Ces tests utilisent la modélisation de **l'évolution de la température** intérieure à partir d'un élément réel. Pour cela un certain nombre de **capteurs** de température est imposé tout comme l'utilisation d'**actionneurs** pour influencer l'évolution de cette température. La réalisation de cet outil permet également, par une première approche, de répondre au point essentiel décrit plus haut dans le choix et la localisation des paramètres à mesurer. En effet les températures (intérieure et extérieure) sont les éléments clefs des paramètres environnementaux relatifs à la performance énergétique des bâtiments, en raison de leurs influences sur les consommations énergétiques et de leurs utilités en termes de régulation d'installations énergétiques. Afin d'être entièrement corrélé aux travaux des partenaires, le système d'acquisition du laboratoire sert de surcroît à l'étude de la communication et de la sécurisation de l'information. L'**architecture** correspondant à ce système est donnée par la Figure 2.

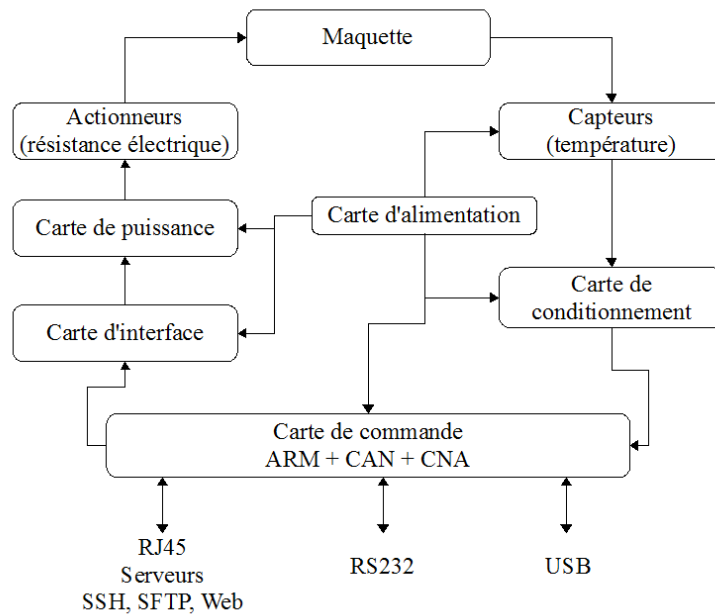


Figure 2 : Architecture du système d'acquisition de données et de commande de la maquette.

Cette carte est basée sur un processeur ARM9 de la société Freescale et possède les caractéristiques suivantes :

- < 8 Mo de mémoire FLASH (type NOR),
- < 16 Mo de SDRAM (*Synchronous Dynamic Random Access Memory*),
- < 1 contrôleur Ethernet 10/100 Mbits Davicom (DM9000)
- < 1 CAN 10 bits Max1027 (8 entrées FIFO (First In First Out), simples ou différentielles, connectées sur bus SPI (*Serial Peripheral Interface*) 10 MHz, 70 mW),
- < 1 CAN 10 bits Max5821 (2 sorties, sur bus I2C (*Inter Integrated Circuit*) compatible bus 400 kHz, 375 mW)
- < l'ensemble du système est géré par un OS Linux (*Operating System*).

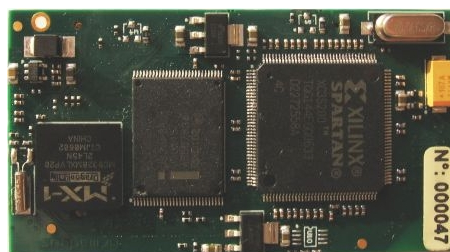
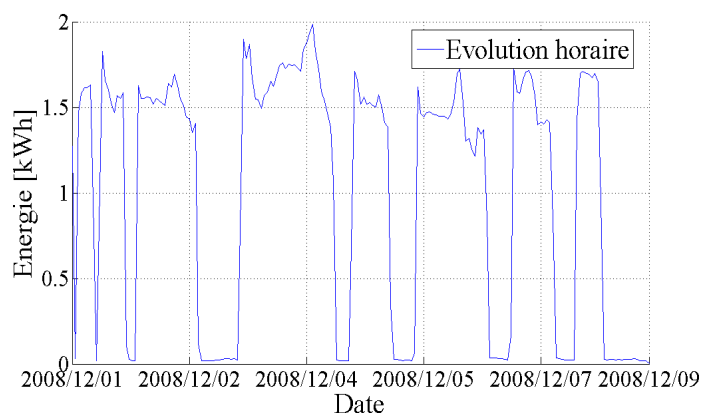
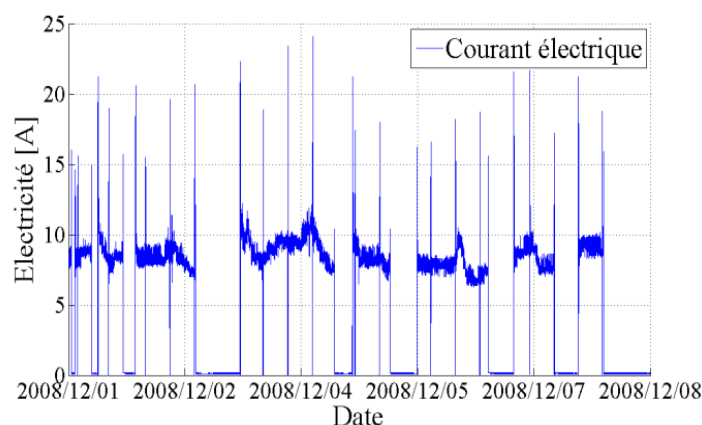
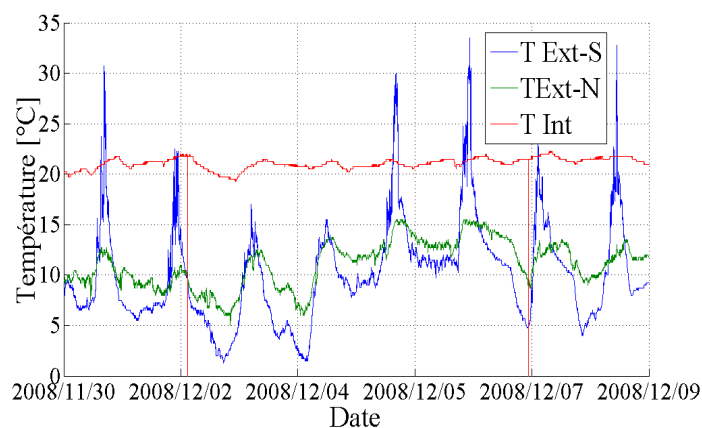


Figure 6 : Cœur du système d'acquisition.

L'ensemble du système a été réalisé en collaboration avec l'association Armadeus. La totalité de la partie logicielle a été réalisée par le laboratoire. Elle comprend

- un noyau linux allégé « *fait maison* »,
- un programme spécifique d'acquisition modulable en fonction des capteurs utilisés, (figure 18, mesures effectuées à l'entreprise Pyrescom)
- un logiciel d'audit temps réel.



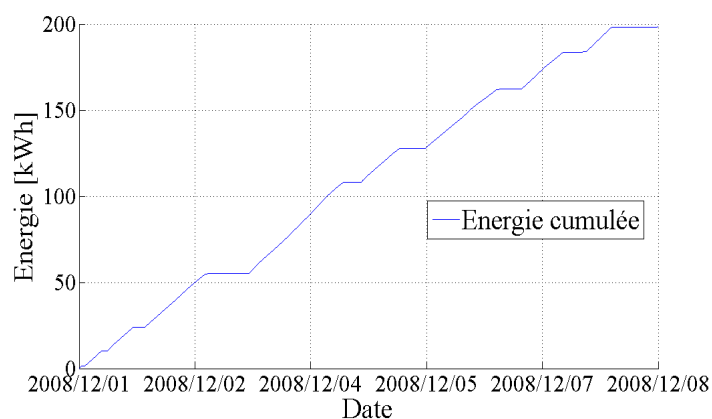


Figure 18 : Courbes de la période du 01/12/2008 au 08/12/2008.

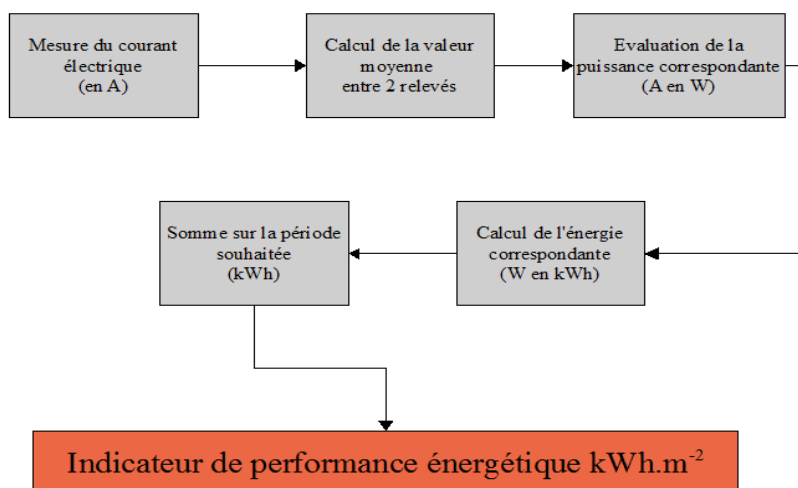


Figure 19 : Algorithme de la consommation électrique.

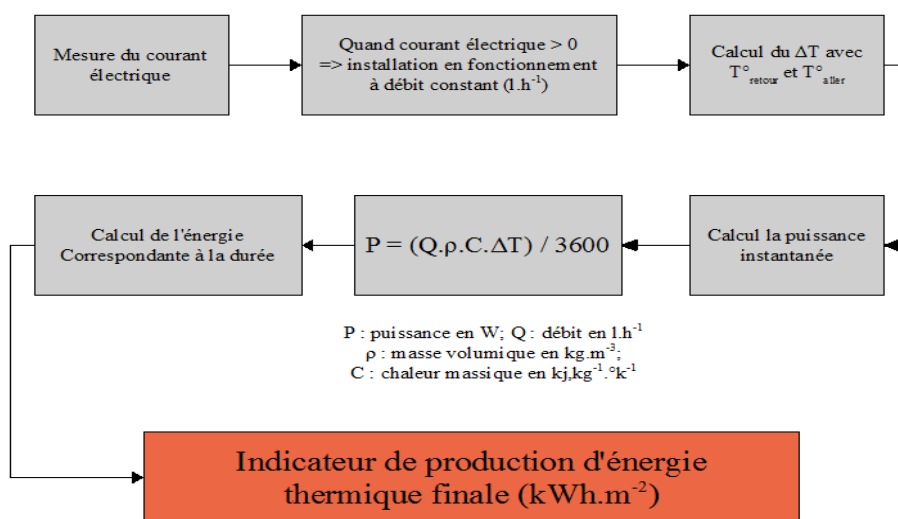


Figure 20 : Algorithme de production d'énergie thermique finale.

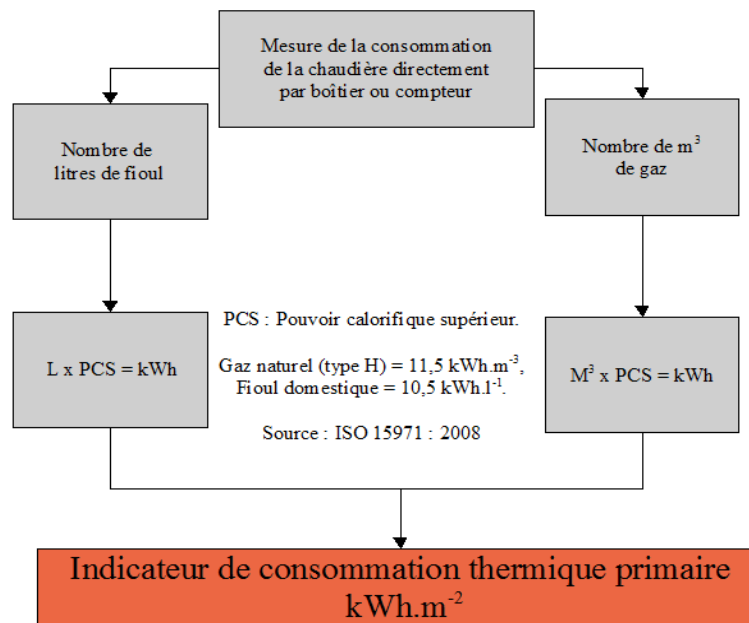


Figure 21 : Algorithme de consommation d'énergie thermique primaire.

Le fonctionnement de ce système se caractérise par de faibles consommations tout au long des différentes phases visibles sur la Figure 7. Les principales d'entre elles sont aux nombres de 3 :

- 1) La première consiste au démarrage du système. La charge de la station attend 30s pour une commande (comme charger un nouveau « *firmware* » ou changer les paramètres de démarrage), puis entame le démarrage de l'OS. A ce point, tous les composants sont alimentés mais sans activités, excepté le processeur ARM9, la mémoire vive et le port RS232. La puissance instantanée est de seulement 1,33 W.
- 2) La seconde phase est le démarrage de l'OS. Il commence par exécuter le noyau Linux Kernel puis tous les logiciels nécessaires (web, acquisition, sécurité d'accès). Ensuite, la communication s'effectue uniquement entre le processeur et la mémoire vive, puis, la communication s'oriente en plus vers la mémoire FLASH et la mémoire vive où est stocké l'OS. Ici, la puissance instantanée augmente à peine de 0,28 W.
- 3) Le processeur est à 90 % de son temps inactif lors de la troisième phase. Les 10 % du temps restant, il récupère les données des différents capteurs, les sauvegarde et les transfère. Il apparait ainsi des pics de puissance instantanée.

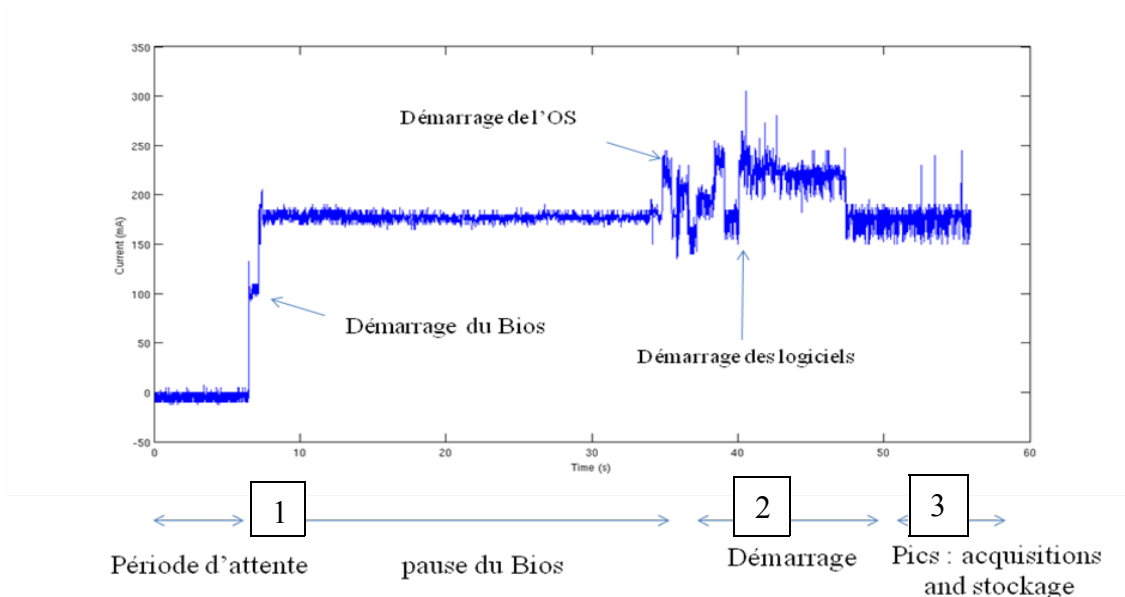


Figure 7 : Fonctionnement du cœur du système d'acquisition (*à reprendre*).

Une version « industrielle » a été développée par l'entreprise Pyrescom, dans le cadre du projet FUI Monitoring THPE. La structuration est légèrement différente car elle utilise un bus RS485 qui n'était pas utilisé dans la version laboratoire.

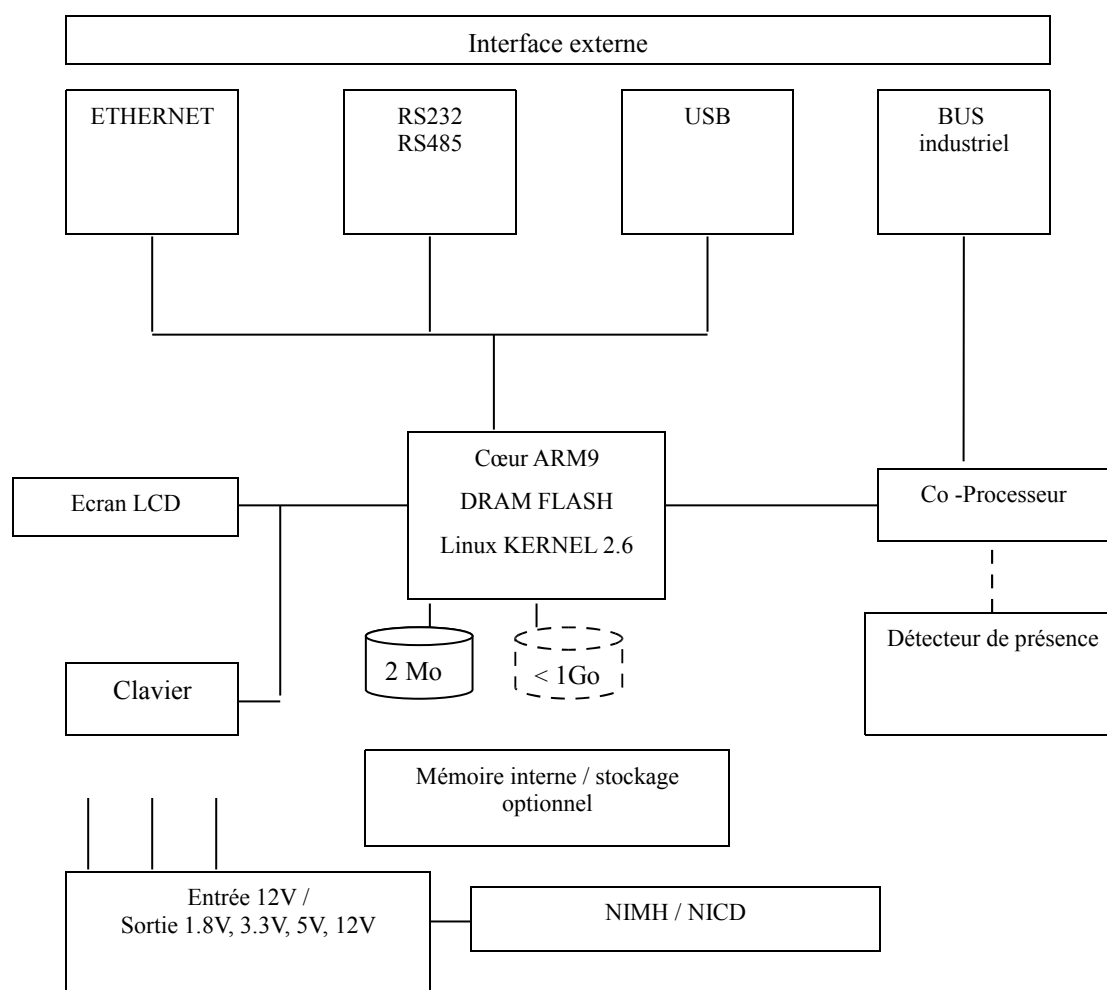


Figure 14 : Schéma bloc de la centrale.

Une architecture client/serveur a été mise en place spécifiquement par Pyrecom et APEX-BP Solar.

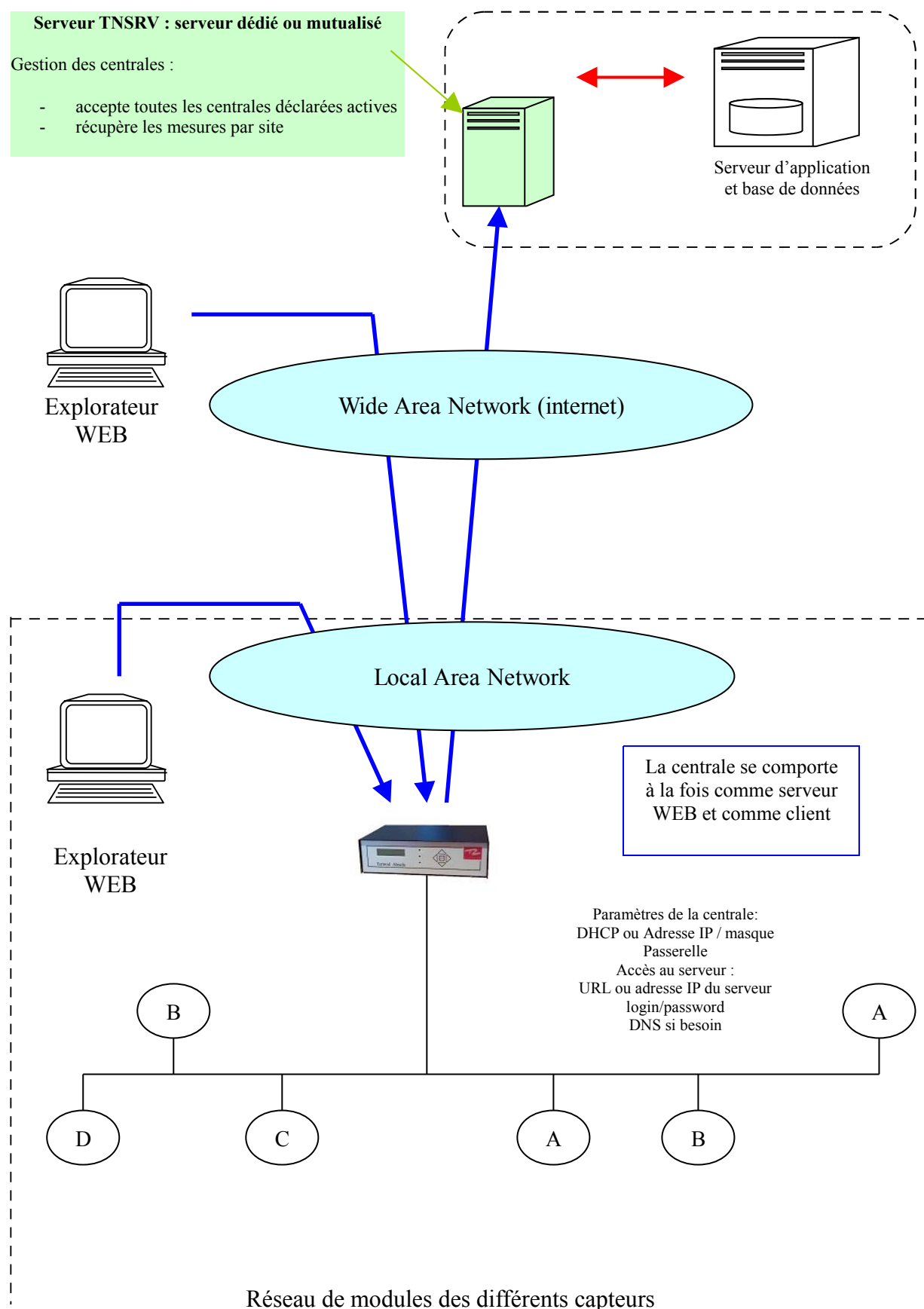
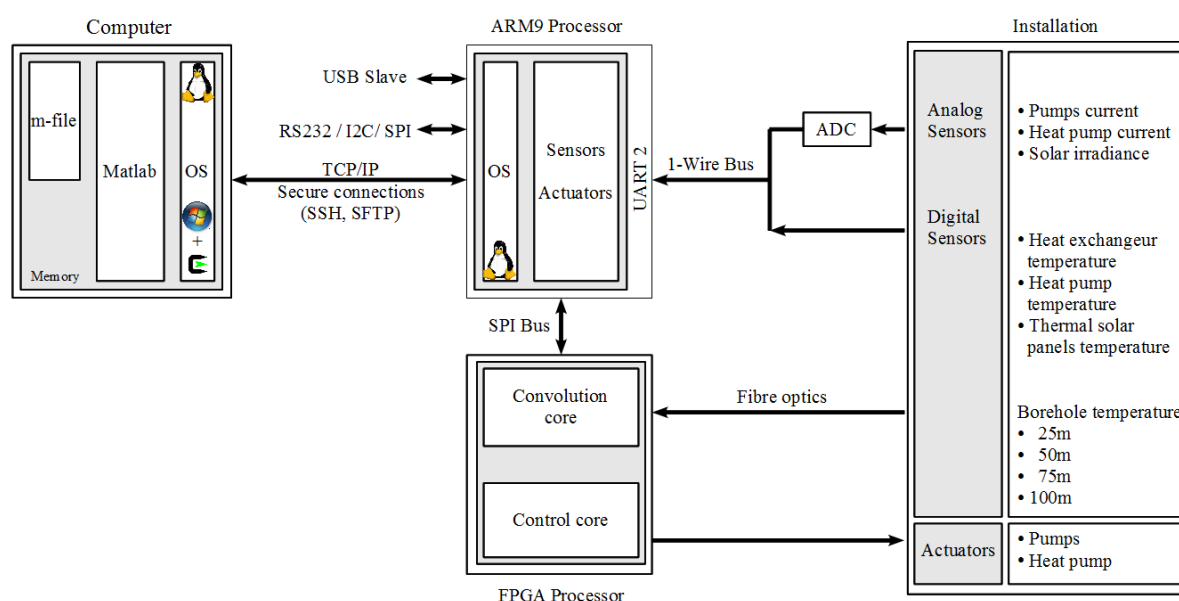


Figure 15 : Architecture de la centrale de monitoring de Pyrescom.

L'inconvénient de cette structure qui est utilisée depuis 2006, est qu'elle n'intègre pas le contrôle en tant que tel dans le système de gestion de l'énergie. Pour cela depuis 2009, je travaille sur une nouvelle architecture avec l'association Armadeus. Cette nouvelle forme va comporter un processeur ARM9 pour l'HIM et la gestion des entrées/sorties, mais aussi un FPGA dont le rôle sera uniquement le contrôle d'actionneurs en intégrant des régulations « *plus robustes* » (MPC, RST etc.).



à développer avec les résultats de cet été de st-pierre

d. Régulation énergétique

Les différents systèmes d'acquisition de données s'avèrent fondamentaux dans l'optique de promouvoir et de « banaliser » les audits énergétiques des bâtiments. Ces acquisitions offrent, après un traitement adapté et ordonné, une source non négligeable d'informations sur la performance énergétique des bâtiments existants. Cependant pour répondre entièrement aux enjeux de ce secteur, ce type de diagnostic se doit d'être complété par une véritable **gestion de l'énergie**. Cette gestion, pour être réellement efficace, se définit par la mise en place d'une **stratégie**.

La connaissance des différents contextes, notamment politiques et climatiques, ainsi que les documentations et autres règles de calculs de la législation française, par la présentation de l'ensemble des facteurs relatifs à la performance énergétique des bâtiments, facilitent l'élaboration

de cette stratégie. Cette dernière, consacrée au chauffage des locaux, s'appuie sur deux points principaux : (i) une réduction de la consommation **d'énergie fossile** et (ii) un recours aux **énergies renouvelables** favorisés.

L'application de cette stratégie de gestion de l'énergie requiert l'élaboration de plusieurs types de **contrôleurs** : un PID (Proportionnel Intégral Dérivé) standard, amélioré par un MPC (*Model Predictive Control*) puis par un FLC (*Fuzzy Logic Control*). Toutefois, il apparaît essentiel, dans l'objectif d'implanter ces contrôleurs dans un bâtiment réel, de les soumettre à une comparaison basée sur des **simulations**. Pour cela, des modèles déterminant **l'évolution d'une température intérieure**, des **scénarii** de température de consigne et différents **indices** sont développés. En outre, les usages des bâtiments étant de natures variées, l'adaptation rapide de ces contrôleurs à un usage précis est recherchée. Le travail a été effectué par Benjamin Paris en collaboration avec Julien Eynard.

Pour tester les contrôleurs et utiliser les indices précités, deux **consignes de température** correspondant au résidentiel-tertiaire, basées sur la documentation légale existante et sur l'usage du bâtiment, sont définies. En élaborant deux types de consignes avec les caractéristiques du résidentiel-tertiaire, cela permet se rapprocher des scénarii existants pour l'ensemble des vocations des bâtiments. Les logements ont « longs » pour « horaires d'occupation » et « moyen » pour « niveau de température ». Les bureaux quant à eux ont « moyens » et « moyen » respectivement.

En outre la norme se référant au calcul des besoins d'énergie pour le chauffage des locaux [30] explique la nécessité de définir trois périodes distinctes : la période de chauffage à puissance normale et celles à chauffage réduit de types A et B.

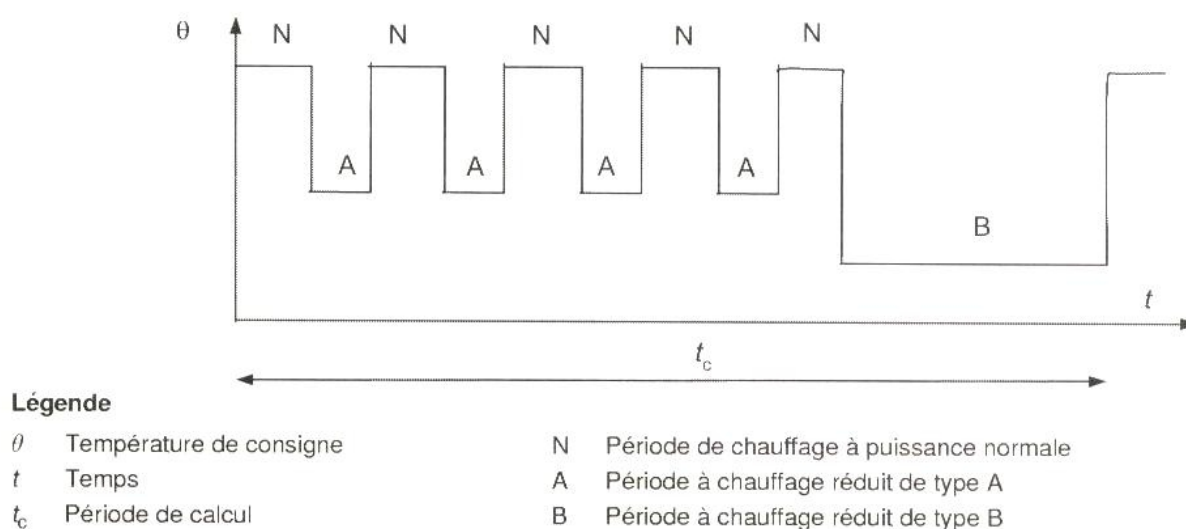
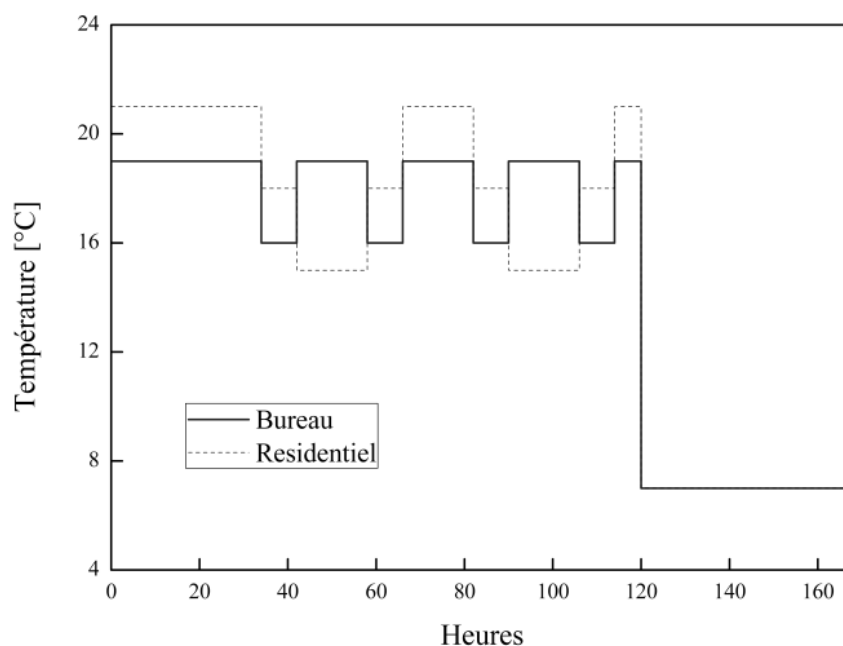


Figure 3 : Exemple de mode d'intermittence.⁹

Ainsi, en considérant les valeurs des scénarii et la pertinence de présenter trois périodes différentes, la Figure 4 montre les consignes élaborées dans notre cas pour les logements et les bâtiments de bureaux. Dans l'optique des tester la robustesse et l'adaptation de nos contrôleurs, deux consignes semblaient être judicieuses. En outre, les écarts de températures étant faibles (elles s'échelonnent de 7 °C à 22 °C) et les temps de variations étant relativement lents, la consigne des logements a subi de légères modifications par rapport aux valeurs des tableaux.



⁹ Source : Norme NF EN ISO 13790

Figure 4 : Consignes de températures des logements et des bureaux.

Les différents **usages des bâtiments** nous amène à réfléchir sur les **optimums des différents paramètres des contrôleurs**, en relation avec les critères définis ultérieurement. Par exemple, pour un hôpital, on ne pourra se permettre de minimiser le critère de suivi de consigne pour maximiser l'indice de performance, ou encore une école préférera minimiser ces consommations en période de vacances et maximiser l'indice de confort lors des périodes d'enseignements. Il faut donc établir **un lien entre les paramètres des contrôleurs et les valeurs des différents indices**, afin d'adapter au mieux la gestion énergétique des ressources disponibles à l'usage du bâtiment et aux souhaits des occupants ou des gestionnaires.

1. PID

Le schéma de l'application de ce contrôleur est visible sur la Figure 5 et rappelle que pour répondre à notre stratégie de gestion de l'énergie, notre contrôle doit gérer deux sources de chaleur : une à énergie fossile, l'autre à ressource renouvelable. Les commandes respectives des radiateurs à énergies fossile R_{EF} et renouvelable R_{ER} sont U_{EF}^{PID} et U_{ER}^{PID} .

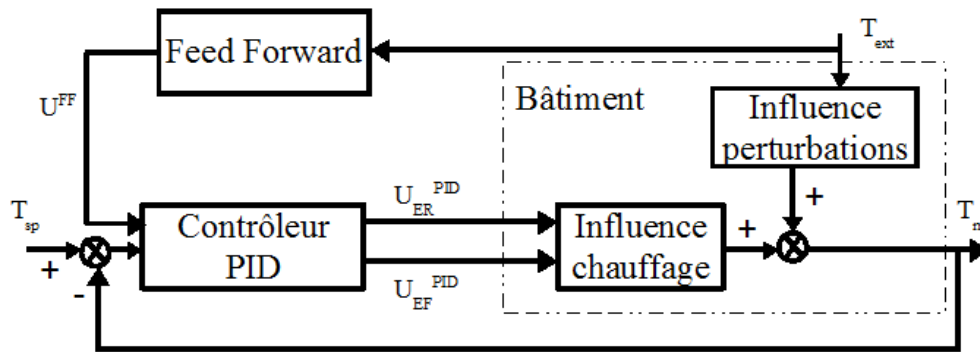


Figure 5: Structure du contrôle par PID.

Suivant la méthodologie exposée plus haut, ce contrôleur PID est défini par (4) :

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{max} = U_{ER_max} + U_{EF_max} \\ T_{aw} = \frac{T_s}{K_I} \\ x_I(k) = x_I(k-1) + K_I \cdot (T_c(k) - T_m(k)) \\ x_D(k) = K_D \cdot x_D(k-1) + (T_m(k-1) - T_m(k)) \\ u(k) = K_P \cdot (T_c(k) - T_m(k) + x_I(k) + x_D(k)) \\ u_{sat_PID}(k) = u_{PID}(k) \\ \text{si } u_{PID}(k) > U_{max}(k) \text{ alors } u_{sat_PID}(k) = U_{max} \\ \text{si } u_{PID}(k) < 0 \text{ alors } u_{sat_PID}(k) = 0 \\ x_I(k) = x_I(k) + \left(\frac{T_s}{K_P \cdot T_{aw}} \right) \cdot (u_{sat_PID}(k) - u_{PID}(k)) \end{array} \right. \quad (4)$$

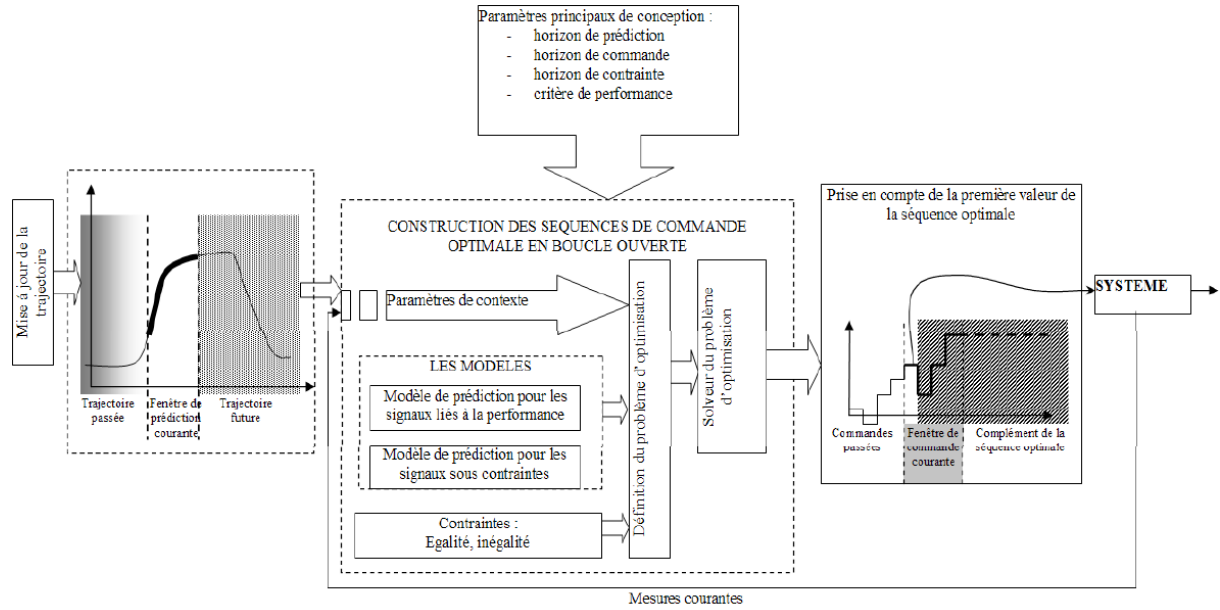
Le problème de maximisation de l'indice I_P se représente par (5) qui permet l'obtention des paramètres optimaux de ce contrôleur, les plus appropriés à nos objectifs :

$$\max_{K_P, K_I, K_D} (I_P = I_C - \%_{EF}) \quad (5)$$

2. MPC (Model Predictive Control)

Plusieurs approches pour la mise en œuvre de ce type de commande existent comme par exemple par MPC. Dans ce cas, il faut en premier lieu décrire le modèle linéaire à temps invariant. Puis l'ajout d'une action intégrale pour annuler les erreurs statiques, réalisée par (6), est nécessaire.

$$u(t) = u(t-1) + \Delta u(t) \quad (6)$$


 Figure 6: Schéma récapitulatif de la commande prédictive¹⁰.

On obtient de ce fait une représentation d'état étendue. Puis, la prédiction de la sortie est enfin possible ainsi que l'élaboration de la fonction de coût quadratique. La minimisation de ce coût, représentée par (7), donne la séquence de commandes futures.

$$\min_{\Delta u(k/k), \dots, \Delta u(k+m-1/k)} \sum_{i=0}^{p-1} \left(\sum_{j=1}^{n_y} \left| \omega^y \times (y_j(k+i+1/k) - y_j^{rsf}(k+i+1)) \right|^2 + \sum_{j=1}^{n_u} \left| \omega^{\Delta u} \times \Delta u_j(k+i/k) \right|^2 + \sum_{j=1}^{n_u} \left| \omega^u \times (u_j(k+i/k) - u_j^{rsf}(k+i)) \right|^2 \right) \quad (7)$$

$$\text{tel que } \begin{cases} \text{modèle physique du système} \\ u_{jmin} \leq u_j(k+i/k) \leq u_{jmax} \\ \Delta u_{jmin} \leq \Delta u_j(k+i/k) \leq \Delta u_{jmax} \\ y_{jmin} \leq y_j(k+i/k) \leq y_{jmax} \\ \Delta u_j(k+h/k) = 0 \\ h = \{m, \dots, p-1\} \end{cases}$$

¹⁰ Soce : Journées JD JN MACS 2009

Pour finir, par application du principe de l'horizon fuyant, la première valeur de cette séquence est appliquée au système.

3. FLC (Fuzzy Logic controller)

L'application de la stratégie sur la mise en application de cet outil s'apparente à celle rencontrée pour le MPC (Figure 10). A partir de la différence (ε) entre la température de consigne et la température moyenne courante, le contrôleur PID estime la puissance de R_{ER} (U_{ER}^{PID}) alors qu'un premier module flou détermine si cette valeur a besoin d'être ajustée ou non (U_{ER}^{FLC}). Puis, se basant sur ε et U_{ER} , un second module flou évalue la puissance à appliquer à R_{EF} (U_{EF}^{FLC}).

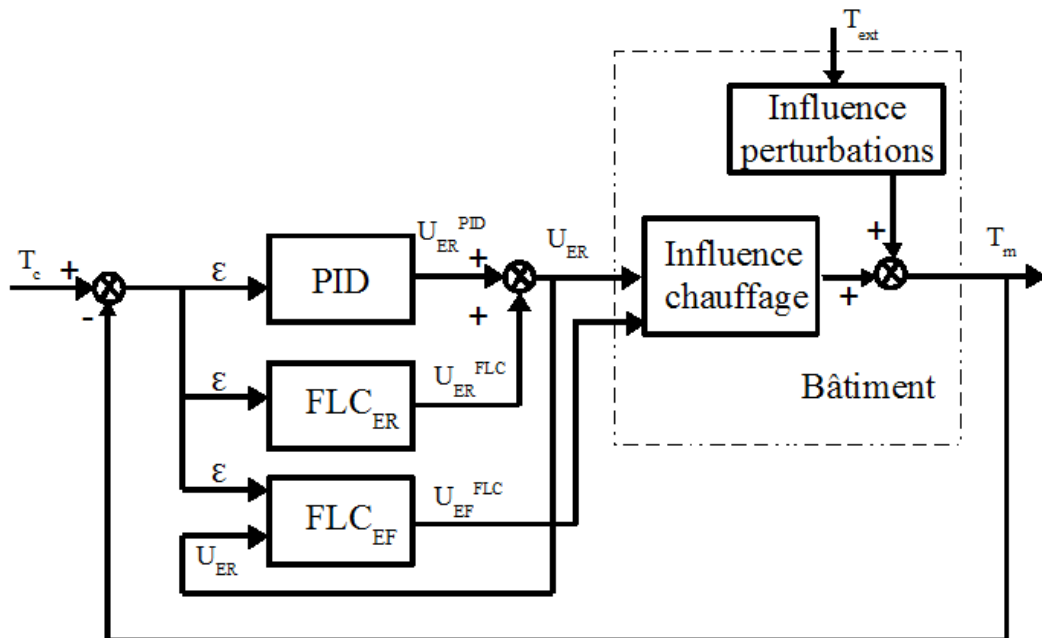


Figure 10: Structure du contrôle par PID-FLC.

Les valeurs de U_{ER}^{FLC} et U_{EF}^{FLC} sont normalisées entre -1 et +1 ($U_{ER}^{FLC} = [-1; +1]$) ainsi qu'entre 0 et +1 ($U_{EF}^{FLC} = [0; +1]$) respectivement. Elles sont ensuite dénormalisées utilisant les gains K_{ER} et K_{EF} . La caractérisation de tous les paramètres précités par leurs univers de discours respectifs, en utilisant les ensembles flous et les fonctions d'appartenance, est ensuite essentielle. Puis il faut définir une base de règles appropriée (présentée plus tard) qui lie les entrées et sorties du contrôleur, dans l'optique de maximiser I_P , toujours en accord avec notre stratégie. (14) stipule la manière dont cet

indicateur peut être maximisé, c'est-à-dire par l'optimisation des différents gains.

$$\max_{K_P, K_I, K_D, K_{RE}, K_{FE}} (I_P = I_C - \%_{FE}) \quad (14)$$

Finalement, (15) expose l'ajout d'une contrainte C_{ε} , correspondant à l'écart (ε) de température **maximal** entre la consigne et la température moyenne du modèle, pour chaque intervalle de temps durant lequel la consigne est invariante (Figure 4).

$$C_{\varepsilon 1:10} : |T_c(j) - T_m(j)| < \varepsilon^{\circ}\text{C} \quad (15)$$

avec $j \in \{1h; 3h; \dots; 17h; 21h\}$

4. Comparaison entre les contrôleurs

Les résultats des simulations des contrôles PID et PID-MPC, utilisant le model théorique pour les différentes consignes de températures (Tableau 3), sont exposés ici. Rappelons que le contrôleur PID représente la référence.

Tableau 3 : Résultats des simulations obtenus avec le modèle théorique (contrôleurs PID et PID-MPC).

	E_{ER} [Wh. m ⁻²]	E_{EF} [Wh. m ⁻²]	$\%_{EF}$ [%]	I_C [%]	I_P [%]
Consigne des bureaux					
PID	4316	577	11,8	78,7	66,9
PID-MPC	4353	564	11,4	86,3	74,8
Consigne des résidences					
PID	4315	635	12,8	76,3	63,5
PID-MPC	4367	570	11,5	82,5	71

Ces résultats répondent à notre stratégie de contrôle puisque dans un premier temps la **consommation d'énergie fossile est réduite** de 2,3 % pour la consigne des bureaux et de 10,2 % pour la consigne du résidentiel. Dans un second temps, le **recours aux énergies renouvelables est**

favorisé grâce contrôleur PID-MPC de 1 % et de 1,2 % respectivement. Cela se traduit par une diminution de la part d'énergie fossile, d'où une baisse de l'indice $\%_{EF}$, ainsi que par une augmentation du critère de confort I_c . En conséquent la performance globale du contrôleur PID-MPC, présentant un meilleur I_p quelque soit la consigne, est supérieure à notre référence. Notons que ces pourcentages peuvent paraître faibles, mais ces derniers sont calculés à partir de valeurs peu importantes correspondantes à une seule semaine de simulation, et que sur la durée de vie d'un bâtiment, ces résultats se montreraient significatifs.

À compléter avec le contrôleur flou

2. Hybridation des sources à énergies renouvelables

À compléter avec les premiers résultats de Julien sur l'intérêt de l'hybridation des sources EnR.

3. Conclusions et perspectives - SiP - System in Package

Cette recherche est la suite tant au niveau applicatif que recherche fondamentale de l'application aux énergies renouvelables. Dans l'état actuel des travaux effectués au laboratoire la régulation est faite sous Matlab avec un pc utilisant un micro-processeur Core 2 Duo ©. Cependant les calculs nécessitent beaucoup de temps. Même si les gains énergétiques obtenus prouvent que la technique est bonne, une utilisation pour la gestion d'un bâtiment, dans un système embarqué semble impossible. Pour cela, je travaille sur la réalisation d'un algorithme MPC qui est implémentable sur un ASIC (FPGA). Le but recherché est non seulement la réalisation d'un cœur spécifique, mais aussi la modularité pour l'utilisation sur d'autres installations (Section Contrats et Financements §7).

III. Fiabilité de composants

Les progrès de l'électronique de puissance durant les trente dernières années, ont permis la réalisation de convertisseurs de plus en plus puissants dans un volume de plus en plus faible. L'augmentation de la fréquence de découpage de ces alimentations a considérablement aidé à cette miniaturisation mais elle impose inévitablement des contraintes électriques (harmoniques de tension et de courant). Il n'est pas rare de trouver des variations de tension $\frac{dv}{dt}$ de l'ordre de quelques centaines de volts/ μ s, et des variations d'intensité $\frac{di}{dt}$ de quelques dizaines d'ampères/ μ s sur l'ensemble des éléments constitutifs du convertisseur, composants passifs, interrupteurs. Ces contraintes provoquent une diminution de la fiabilité du système par une diminution de la durée de vie des composants, en particulier des composants passifs et surtout des condensateurs. Ces derniers se retrouvent dans :

- la compensation de facteur de puissance d'installation électrique (la mise en parallèle de

condensateurs permet de diminuer l'énergie réactive consommée par un système);

- les circuits d'aide à la commutation (CALC) afin de limiter la variation de tension aux bornes des composants;
- les circuits de commutation dans les convertisseurs statiques, tels le circuit résonnant des onduleurs à résonance;
- les filtres de lignes afin d'empêcher la propagation de perturbations haute fréquence. La faible impédance des condensateurs aux signaux de fréquence élevée court-circuite les signaux hautes fréquences (les parasites) tandis qu'à fréquence plus faible leur impédance élevée laisse intact les signaux utiles;
- le stockage d'énergie pour le filtrage de tension continue issue de redresseurs;
- les systèmes à décharge impulsionnelle pour la production de champs magnétiques intenses et les lasers pulsés.

Le travail qui a été mené sur ces 3 dernières années a permis la réalisation d'un banc de test non destructif à l'échelle du micro-mètre. Ce banc permet la caractérisation thermique de composants électroniques. A ce module de mesure a été ajouté un système de « chauffe » électrique (onduleur quasi-résonant) qui injecte de manière contrôlée des sinusoïdes de courant réglables en amplitude, en puissance et en fréquence. Ces signaux permettent d'injecter des images des harmoniques qui sont propagées naturellement lors des commutations dans les convertisseurs statiques. Le système de détection, basé sur la réflexion d'un faisceau laser, permet de mesurer à l'échelle du micron les variations de température présentes en surface du composant. A partir de la cartographie thermique de surface réalisée, et par technique inverse, il est possible de retrouver la distribution volumique de courant responsable de cet échauffement.

Le travail réalisé est parfaitement complémentaire de celui que j'ai mis en place, il y a 5 ans, dans le domaine électromagnétique. En effet, la cause de l'échauffement dans les condensateurs est la non-homogénéité de la densité de courant. Nous avons avec ces 2 techniques de mesures non destructives, 2 manières différentes et donc parfaitement complémentaires de reconstituer le comportement à l'intérieur même du composants. Il devient donc possible de mettre en place des systèmes on-line de mesure de la fiabilité en fonctionnement. Cette technique pourrait même effectuer des pré-dimensionnements géométriques de composants qui pourraient être associés aux harmoniques générées. L'intérêt intervient ici dans le cadre de l'intégration des composants passifs au plus prêt des convertisseurs.

A. Étude électromagnétique

1. Modélisation

Prendre ici la modélisation sous la forme de cavités résonantes des condensateurs

2. Système expérimental

Prendre ici le systèmes expérimental de Gasquet

B. Étude Thermique

1. Modélisation

a. Hypothèses

Nous allons considérer que :

- a- le condensateur est un milieu homogène et semi infini, à l'identique de ce qui a été fait en électromagnétisme
- b- la surface observée par la caméra infrarouge, que nous nommerons « surface supérieure » (face noire figure 72), est plane et considérée comme adiabatique (pas de pertes convectives),
- c- la source de chaleur est ponctuelle, ce point impose une température fixée à l'ensemble du condensateur.

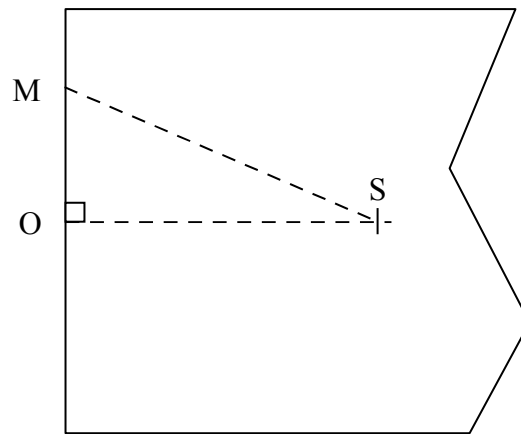


Figure 75
Géométrie du problème

Résolution de l'équation de la chaleur

Il s'agit donc d'écrire la température, à tout instant, d'un point M situé à une distance $MS = x$ d'un point S imposant un saut de température à $t = 0$. Le point M est initialement à la température T_0 et le point S est porté à la température $T_{\max}$. On a donc :

$$\frac{\partial^2 T^*(x,t)}{\partial x^2} - \frac{1}{a} \frac{\partial T^*(x,t)}{\partial t} = 0$$

$$T^*(x,0) = 0$$

$$T^*(0,t) = T_{\max} - T_0$$

La résolution s'effectue dans l'espace de Laplace. Et la solution originale est donnée par la transformée inverse de $\bar{T}^*(x,p)$, elle s'écrit :

$$T(x,t) = T_0 + (T_{\max} - T_0) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right)$$

La température de M est donnée par la relation :

$$T(e,t) = T_0 + (T_{\max} - T_0) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{d^2 + e^2}}{2\sqrt{at}}\right)$$

avec :
d : distance MO,
e : distance OS,
erfc : la fonction d'erreur complémentaire.

Ce modèle dépend donc de trois paramètres : T_0 , $T_{\max}$ et e.

La solution $T(e,t)$ permet de tracer les réseaux de courbes des figures 1 et 2. La figure 2 représente l'évolution de la température normalisée ($T_0 = 0$, $T_{\max}=1$) en fonction du temps pour différents valeurs de x, c'est-à-dire pour différents points M situé sur la surface supérieure du condensateur. La figure 2 permet de visualiser la progression du front thermique sur la surface, c'est-à-dire la température de la surface supérieure à instant fixé.

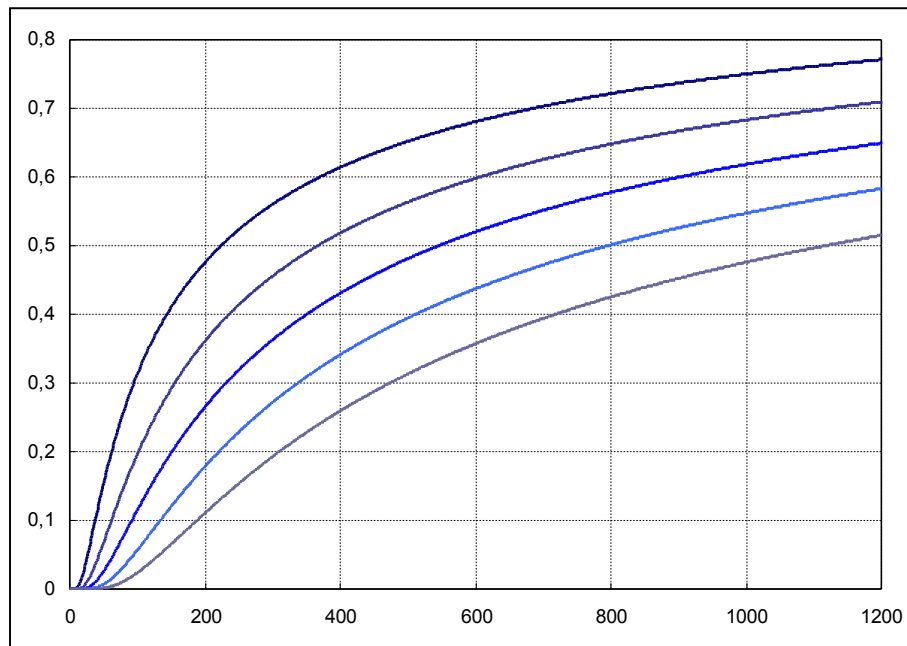


Figure 1: Température normalisée en fonction du temps pour différentes valeurs de OM

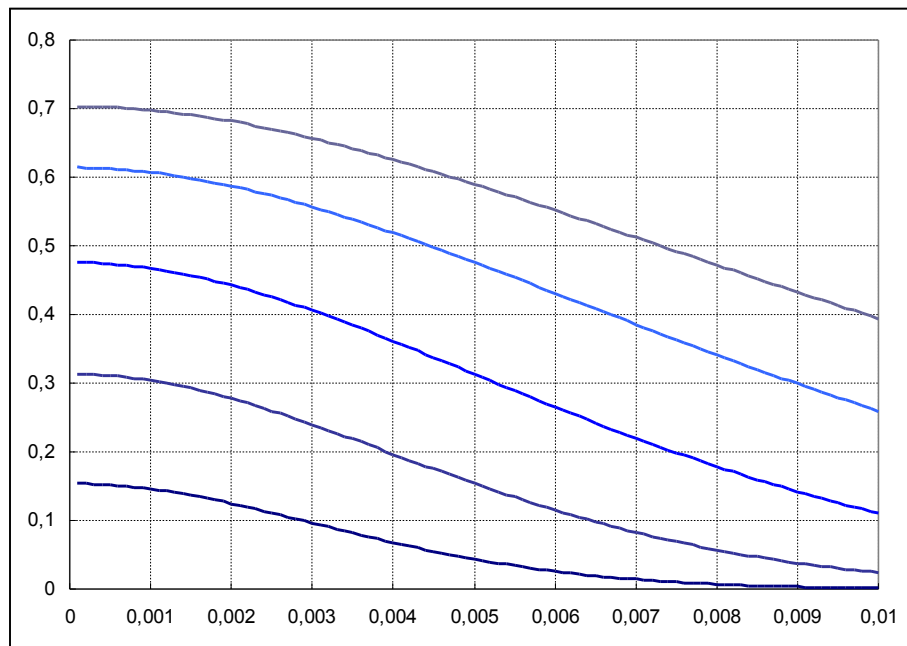


Figure 2: Température normalisée en fonction de OM pour différents instants

b. Identification de paramètres

Position du problème

La première étape consiste à définir le plus clairement possible le système réel à étudier, c'est à dire le banc d'essai et plus particulièrement les mesures expérimentales qu'on va pouvoir obtenir. Parallèlement, nous devons développer un modèle de comportement de la réponse du système expérimental et identifier les différentes catégories de paramètres dont elle dépend. Nous nous interrogerons ensuite sur l'importance et l'influence relative de chacun des différents paramètres sur les mesures expérimentales.

Le système réel

Lorsque l'on parle du système réel, on désigne plus exactement le condensateur (dans notre cas particulier) associé à la caméra infrarouge, ainsi que l'excitation à laquelle on le soumet et la réponse que l'on obtient. C'est cette réponse que l'on désigne par le terme de "mesure expérimentale". Cependant, les valeurs obtenues ne sont pas des valeurs exactes. Elles sont entachées d'une incertitude : le bruit de mesure.

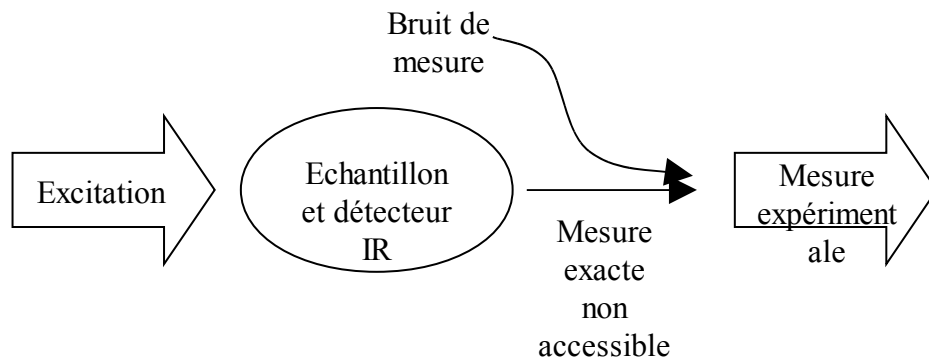


Figure 3: Le système réel et la mesure expérimentale

La mesure expérimentale (M^*) est donc composée d'une mesure exacte (M_{ex}) et d'un bruit de mesure additif (Ω) issu de l'expérimentation elle-même. Ce dernier peut être par exemple d'origine optique (perturbation du signal reçu par la caméra infrarouge). La mesure exacte est donc inaccessible (figure 3). La mesure expérimentale est une grandeur discrète et il est alors possible de l'écrire sous forme vectorielle où chaque composante M^*_i représente la valeur de la mesure au temps t_i , la dimension de ce vecteur est égale au nombre de points de mesure (ici, $\dim \mathbf{M}^* = n$).

$$\mathbf{M}^* = (M^*_1, \dots, M^*_i, \dots, M^*_n)^T$$

Il est possible de définir le bruit de mesure Ω comme une grandeur aléatoire et donc d'en donner des caractéristiques statistiques : son écart-type (σ), sa moyenne et toutes les autres valeurs associées (variance,...). On admet couramment que le bruit de mesure est blanc (c'est à dire qu'il contient toutes les fréquences et que sa moyenne nulle), qu'il est de distribution normale et que sa matrice de covariance est diagonale et vérifie la relation :

$$\text{Cov}(\epsilon) = \sigma^2 \mathbf{I}$$

L'expression (?) signifie que toutes les erreurs sont indépendantes (non corrélées) et que toutes les erreurs ont la même variance. Expérimentalement, il s'agira de s'assurer de toutes ces hypothèses.

Le modèle de comportement

Un modèle direct dépend de paramètres qui sont connus ou non. Les paramètres connus sont souvent issus de réglages expérimentaux ou liés à des propriétés de l'échantillon à caractériser qui ont été mesurées précédemment par une autre méthode ou issues de la littérature. Les paramètres inconnus sont les paramètres que l'on souhaite estimer. Cependant, il peut arriver que certains paramètres inconnus n'intéressent pas l'expérimentateur mais leur connaissance précise reste néanmoins indispensable pour l'estimation des paramètres "intéressants".

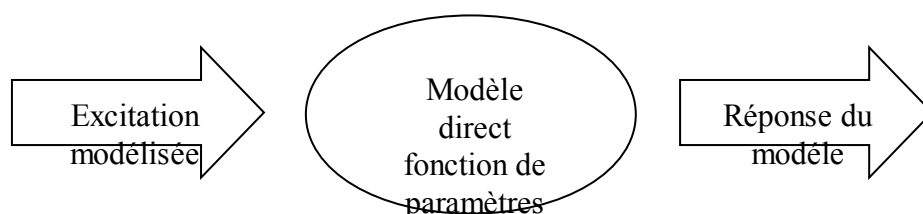


Figure 4: Le modèle direct

Ainsi, il est possible d'écrire l'égalité suivante :

$$M_i = M(\beta_1, \dots, \beta_p, t_i) = \eta(\beta, t_i)$$

avec : M_i : la valeur du modèle à t_i

β_j : le $j^{\text{ième}}$ paramètre du modèle, $j^{\text{ième}}$ composante du vecteur paramètre β ($1 \leq j \leq p$)

t_i : le $i^{\text{ième}}$ instant ($1 \leq i \leq n$)

Comme dans le paragraphe précédent, on peut définir un vecteur de dimension n contenant les n valeurs du modèle :

$$\mathbf{M} = (M_1, \dots, M_i, \dots, M_n)^T$$

$\eta(\beta, t)$ représente l'observable (ou l'équation d'état) du système réel.

Les coefficients de sensibilité

Le coefficient de sensibilité X_j de η au temps t_i par rapport au paramètre β_j est défini par la relation :

$$X_j(\beta, t_i) = \frac{\partial \eta(\beta, t)}{\partial \beta_j} \Big|_{t_i, \beta_{k \neq j}}$$

Ce coefficient indique quelle est la variation du modèle (η) correspondant à une variation de l'un des paramètres (β_j), tous les autres paramètres étant fixés (instant t_i et $\beta_{k \neq j}$). Autrement dit, il définit l'influence d'un paramètre seul sur l'observable. Ainsi, on comprend aisément que l'on cherchera à avoir des sensibilités importantes pour les paramètres recherchés et faibles pour les paramètres connus. On doit donc comparer les différentes sensibilités de chacun des paramètres. Cependant, ces coefficients s'expriment dans des unités souvent différentes et leur comparaison est délicate. Il est donc souhaitable de travailler avec les coefficients de sensibilité réduits. Ils sont définis par la relation :

$$Z_j(\beta, t_i) = \beta_j X_j(\beta, t_i)$$

Leur unité est alors la même que celle de l'observable. Ils indiquent la variation absolue de l'observable liée à une variation relative d'un paramètre du modèle. Les coefficients de sensibilité peuvent être rassemblés dans une matrice, que l'on appelle alors la matrice de sensibilité. Chaque ligne correspond à un instant, chaque colonne correspond à la valeur d'un coefficient au cours du temps.

Un examen minutieux des coefficients de sensibilité permet alors de savoir s'il est possible d'estimer les paramètres que l'on recherche, c'est à dire de savoir si l'inversion du problème est possible. On peut alors rencontrer les différents cas suivants :

- $Z_j(t, \beta) = 0$ signifie que l'observable n'est absolument pas sensible au paramètre β_j . Il sera impossible d'estimer β_j au moyen de cette observable.
- $|Z_j(t, \beta)| \leq 0.01 |\eta(\beta, t)|$ signifie que l'estimation de β_j sera difficile. Des précautions expérimentales particulières devront être prises et l'algorithme d'identification devra être adapté.
- $|Z_j(t, \beta)| \geq 0.01 |\eta(\beta, t)|$ est le cas le plus favorable. β_j doit pouvoir être identifié sans trop de

problèmes.

Cependant, pour l'identification simultanée de plusieurs paramètres, le problème de la dépendance linéaire des coefficients se pose. En effet, si deux ou plusieurs coefficients sont linéairement dépendants (ie. : $Z_j = C.Z_k$, C étant une constante), cela signifiera qu'une même variation de β_j ou de β_k a la même incidence sur η .

On ne pourra alors pas identifier simultanément ces deux paramètres.

En suivant une telle démarche, nous nous assurons de la pertinence de notre expérimentation.

Etude de sensibilité

Nous cherchons à estimer les deux paramètres suivants : la profondeur e à laquelle se situe la source ainsi que la température maximale $T_{\max}$ atteinte par l'ensemble du condensateur.

Traçons les rapports suivants, pour x fixé à x_0 :

$$R_1(x_0, t) = |Z_1(x_0, t)| / \hat{v}(x_0, t)$$

$$R_2(x_0, t) = |Z_2(x_0, t)| / \hat{v}(x_0, t)$$

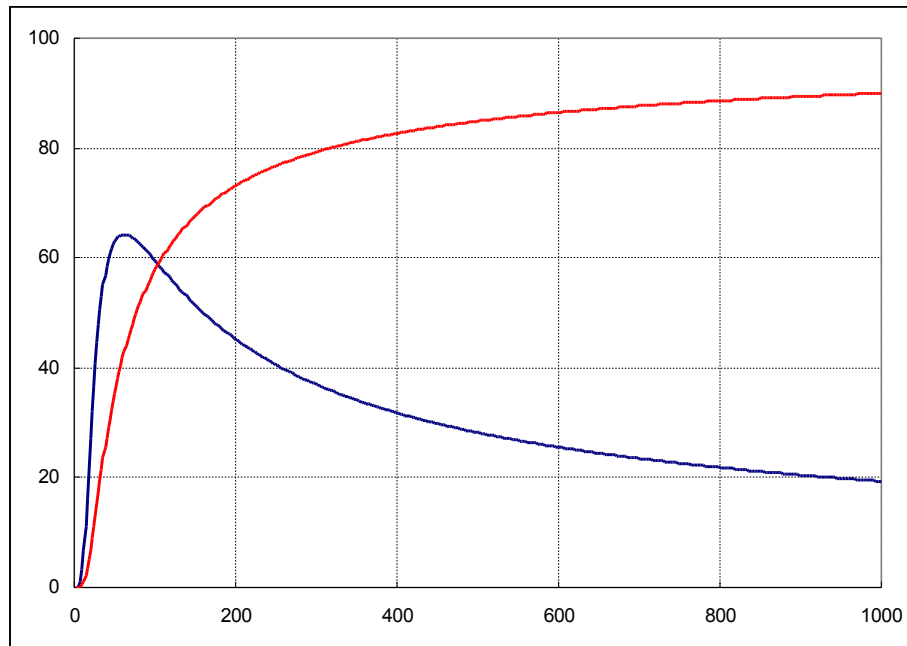


Figure 5: Rapports $R1(x_0, t)$ et $R2(x_0, t)$ (en %) en fonction du temps (en s)

Nous constatons que les niveaux de sensibilité du modèle à chaque paramètre sont largement supérieurs à 10%, de plus, les allures sont totalement décorélées pour des instants inférieurs à 500s. L'identification simultanée des deux paramètres sera donc possible entre 0 et 500s.

c. L'estimation des paramètres

Principe de l'estimation

En comparant les mesures aux valeurs fournies par un modèle adapté fonction de paramètres ajustables, il est possible d'établir un critère. Ce critère peut être minimisé en corrigeant pas à pas les paramètres. Lorsque le critère atteint une valeur limite pour laquelle la valeur des paramètres n'évolue plus,

l'algorithme d'estimation est stoppé. On obtient ainsi les valeurs estimées (**b**) des paramètres que l'on cherche (**β**). Il s'agit alors de calculer la précision de ces résultats.

Le critère à minimiser

Nous utiliserons le critère, très classique, des moindres carrés ordinaires. En effet, nous ne supposons aucune hypothèse à priori concernant le bruit de mesure ou les paramètres recherchés. Ce critère consiste à calculer l'écart relatif qui existe entre des mesures expérimentales (**M***) et un modèle (**M**).

On note S le critère :

$$S(\beta) = (M^* - M(\beta))^T (M^* - M(\beta))$$

Le critère, ou fonction coût, est donc une fonction scalaire des paramètres β_j . Chercher la meilleure estimation b_{opt} du vecteur paramètre β revient alors à chercher un extremum (un minimum dans ce cas) de la fonction S.

La méthode de minimisation

Nous venons de définir un critère que nous devons minimiser. Le choix de la méthode de minimisation dépend du comportement du modèle par rapport aux paramètres. Si le modèle est linéaire, les coefficients de sensibilité sont indépendants des paramètres. Ce n'est pas vrai dans notre cas. Nous utiliserons donc une méthode adaptée. Nous avons choisi une méthode classique appartenant à la classe des méthodes du gradient : la méthode de Gauss-Newton. C'est une méthode qui permet une optimisation du pas de descente lorsque l'on s'approche de la solution.

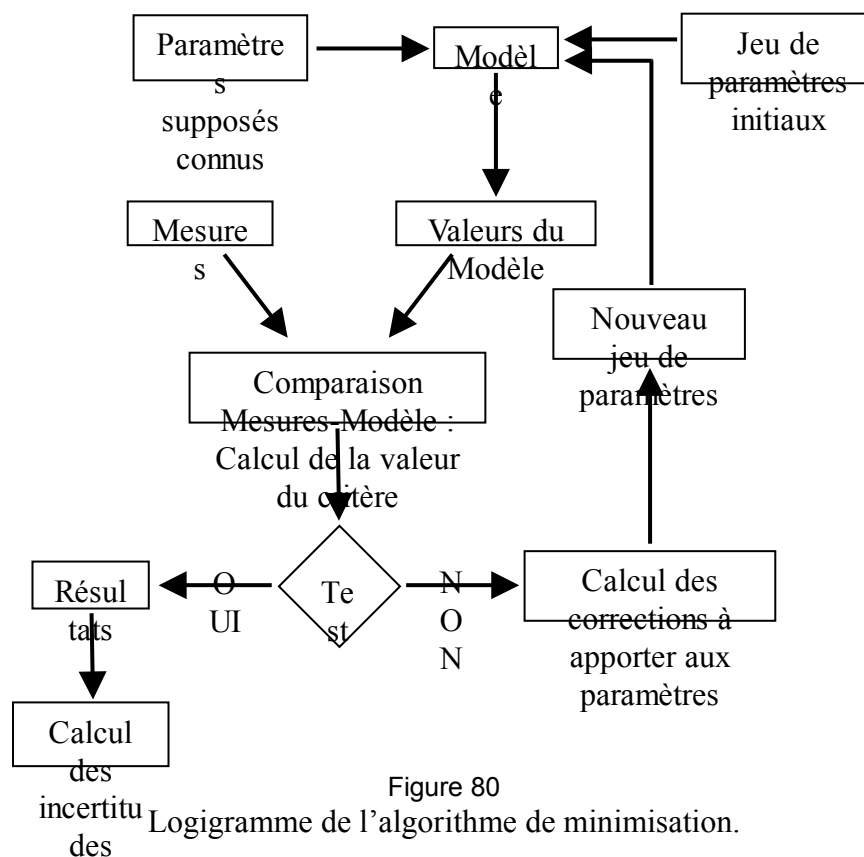


Figure 80

Logigramme de l'algorithme de minimisation.

En calculant une première fois les valeurs du modèle à l'aide d'un jeu de paramètres initiaux, nous expliquerons comment choisir ces valeurs initiales plus loin, on peut calculer la première valeur du critère avec l'expression (?). Si la condition test, basée sur la variation relative de chaque paramètre, n'est pas remplie (voir : le critère d'arrêt des itérations), l'algorithme calcule ensuite les corrections à apporter aux paramètres pour faire diminuer $S(\mathbf{b})$ à l'itération suivante. Le nouveau jeu de paramètres est ainsi réinjecté dans le modèle pour commencer l'itération suivante. On peut écrire la relation de récurrence suivante entre un paramètre à l'itération $k+1$ et sa valeur à l'itération k :

$$b_i^{(k+1)} = b_i^{(k)} + \Delta b_i^{(k)}$$

On appelle $\Delta b_i^{(k)}$ le pas correctif à l'itération k de la $i^{\text{ème}}$ composante du vecteur paramètre $\mathbf{b}$.

Le critère d'arrêt des itérations que nous avons choisi, proposé par Beck [20], est exprimé par l'expression suivante. S'il est respecté, cela signifie que le paramètre b_i a été corrigé d'une valeur négligeable d'une itération à la suivante.

$$\frac{|b_i^{(k+1)} - b_i^{(k)}|}{|b_i^{(k)}| + \delta_1} < \delta$$

avec $\delta_1 : 10^{-10}$
 $\delta : 10^{-4}$

Le pas de Gauss-Newton $\Delta \mathbf{b}^{(k)}_{\text{GN}}$ est donnée par l'expression suivante :

$$\Delta \mathbf{b}^{(k)}_{\text{GN}} = [\mathbf{X}^{\text{T}(k)} \mathbf{X}^{(k)}]^{-1} [\mathbf{X}^{\text{T}(k)} (\mathbf{M}^* - \mathbf{M}(\mathbf{b}^{(k)}))] \quad (\text{III.14})$$

On remarque dans cette expression la présence de la matrice de sensibilité. Et plus exactement, l'expression de la matrice qui approxime le Hessien : $\mathbf{X}^{\text{T}}\mathbf{X}$. On remarque aussi que pour calculer la valeur de paramètres à l'itération suivante, il est nécessaire d'inverser cette matrice. Son conditionnement devra donc être surveillé d'une itération à l'autre.

d. La précision des résultats

Lorsque l'on procède à l'estimation d'un paramètre β_i , il est important de connaître le niveau de confiance que l'on peut accorder à l'estimée b_i .

Les différents types d'erreurs

L'expérience effectuée et l'estimation terminée, nous disposons donc d'une valeur estimée $\mathbf{b}$ de la valeur exacte $\boldsymbol{\beta}$. On peut ainsi définir l'erreur d'estimation $\mathbf{e}_b$ par l'expression :

$$\mathbf{e}_b = \mathbf{b} - \boldsymbol{\beta}$$

Si l'on réalise un certain nombre n d'expériences identiques et que l'on procède à une estimation par

expérience, on obtient alors n estimations des paramètres que l'on cherche. Les n estimations $\mathbf{b}$ peuvent être considérées comme des variables aléatoires et il est ainsi possible d'en donner des caractéristiques statistiques. Nous allons donc nous attacher à cet aspect statistique des estimations.

Il est possible de décomposer l'erreur d'estimation en somme de plusieurs erreurs. La figure ci-dessous présente la terminologie et les composantes de l'erreur e_b d'estimation.

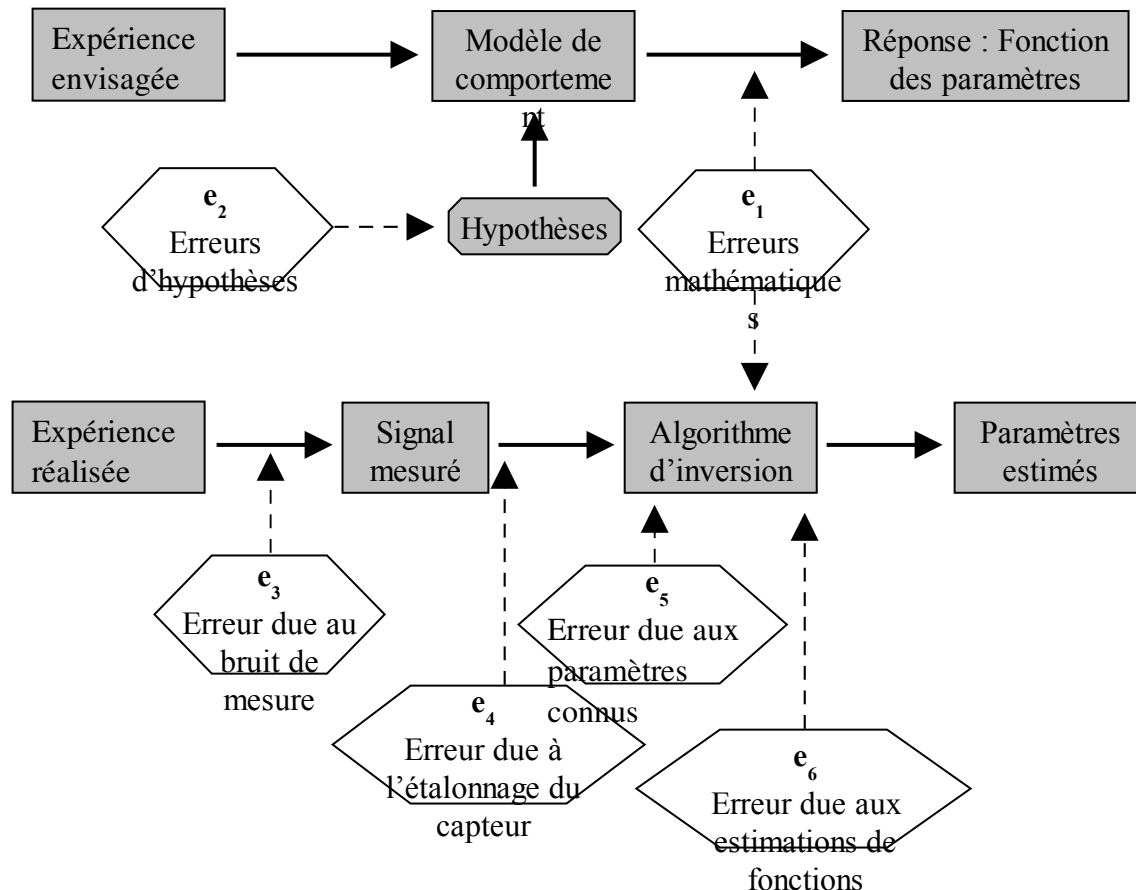


Figure 6: Les différentes composantes de l'erreur d'estimation

On peut alors écrire :

$$e_b = e_1 + e_2 + e_3 + e_4 + e_5 + e_6$$

Cette hypothèse, volontairement réductrice, ne prend pas en compte les effets couplés de deux sources d'erreurs.

Description des e_i .

L'erreur mathématique e_1 , ou erreur de résolution du problème direct, est complètement liée à la méthode utilisée pour résoudre le problème direct (séparation des variables, différences finies, ...). Elle est liée, aussi, aux approximations faites par l'ordinateur. Le résultat des calculs sera toujours une solution approchée de la solution exacte. C'est cet écart que l'on représente par la composante e_1 . On peut facilement évaluer cet

composante : soit on fait appel à des numériciens qui sont alors capables d'évaluer cette composante, soit, au prix de quelques essais de calage sur un cas test connu, on adapte toutes les données numériques de l'algorithme (pas de temps, d'espace, nombre d'itérations,...) pour obtenir le meilleur résultat. Le résultat exact étant connu, on peut alors facilement évaluer l'erreur due au calcul numérique.

Les erreurs d'hypothèses (composante e_2) mettent en jeu les influences sur un résultat que peuvent avoir des hypothèses que l'on a supposées et que l'on n'a pas respectées expérimentalement, ou qui dans un cas particulier n'ont pas été vérifiées, ou bien encore que l'on ignore. Ces hypothèses peuvent avoir un effet non négligeable sur les résultats de l'estimation. Il s'agit donc d'être le plus rigoureux possible dans la modélisation et surtout au cours de l'expérimentation. Il faut savoir placer l'expérience dans les exigences des hypothèses prises ou savoir et pouvoir modéliser exactement une expérience quelconque. Ce qui n'est, évidemment, pas le plus simple.

Dans l'erreur due au bruit de mesure, notée e_3 , on inclut les erreurs dues au dispositif de mesure. Ce dispositif génère un bruit, souvent additif et aléatoire par nature. Ainsi, il devient plus difficile d'être sûr de l'unicité du problème. Cette composante requiert une attention particulière ; le paragraphe suivant lui est consacré.

Dans notre expérience, nous avons une caméra qui convertit un rayonnement infrarouge en signal visible. Cette conversion peut induire des problèmes. C'est la composante e_4 de l'erreur d'estimation. Afin de réduire cette source d'erreur, il suffit simplement de s'assurer du bon fonctionnement des différents appareils que l'on utilise et s'ils sont utilisés dans les bonnes conditions expérimentales. Il faut aussi s'assurer que l'appareillage est adapté aux conditions expérimentales. Ceci vérifié, cette composante devient quasi-nulle.

L'erreur due aux paramètres supposés connus est une erreur induite par l'expérimentateur lui-même. Dans son problème, il peut être amené pour calculer les résultats à utiliser des grandeurs qu'il n'estime pas lui-même (et c'est souvent, voire toujours le cas). Ces grandeurs sont donc mesurées ou calculées par un tiers. Elles ont donc une incertitude ou une précision qui leur est propre. C'est l'influence de la bonne ou mauvaise connaissance de ces grandeurs qui est caractérisée par la composante e_5 .

La composante e_6 est présente uniquement dans les cas où l'on cherche à estimer des fonctions. C'est une erreur déterministe qui est produite par des méthodes inverses particulières comme les filtrages numériques ou les temps futurs de Beck.

Erreur due au bruit de mesure

Nous allons supposer que le bruit de mesure est une variable aléatoire qui est :

- additive,
- de moyenne nulle,
- d'écart-type constant,
- non corrélée,
- contenant toutes les fréquences.

On peut montrer que l'estimateur des moindres carrés est l'estimateur qui minimise la variance de l'erreur due au bruit de mesure. C'est à dire que l'estimée $\mathbf{b}$ minimise la somme quadratique $S(\mathbf{b})$ des écarts entre les mesures et le modèle direct que l'on peut écrire, dans le cas d'un modèle linéaire :

$$S(\mathbf{b}) = (\mathbf{M}^* - \mathbf{X} \mathbf{b})^T \cdot (\mathbf{M}^* - \mathbf{X} \mathbf{b})$$

La solution s'écrit alors :

$$\mathbf{b} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{M}^*$$

Il vient alors l'expression de la matrice de covariance de $\mathbf{b}$:

$$\text{COV}(\mathbf{b}) = \text{COV}(\mathbf{e}_3) = \sigma^2 (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \quad (\text{III.22})$$

σ étant l'écart-type du bruit de mesure, et :

$$\text{COV}(\mathbf{b}) = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & \text{cov}(b_1, b_2) \\ \text{cov}(b_2, b_1) & \sigma_2^2 \end{pmatrix} \quad (\text{III.23})$$

L'équation précédente montre que l'inverse du Hessien a un rôle d'amplificateur du bruit de mesure. L'inverse d'une matrice étant proportionnel à l'inverse du déterminant de la matrice, on comprend bien que maximiser le déterminant de l'approximation du Hessien revient à minimiser l'écart-type de chaque estimation (σ_i). Cependant, on ne dispose pas toujours des caractéristiques statistiques du bruit de mesure pour pouvoir calculer les éléments de la matrice de covariance. Grâce à la valeur du critère calculée en fin d'identification, on peut obtenir une estimation s^2 de σ^2 . On a, dans le cas d'un bruit de mesure à variance constante :

$$s^2 = \frac{S_{\text{fin}}(\mathbf{b})}{n - p}$$

Avec $S_{\text{fin}}(\mathbf{b})$: la valeur finale du critère,
 n : le nombre de point ayant servi à l'estimation,
 p : le nombre de paramètres estimés.

Ainsi, on peut écrire :

$$\sigma_{i(3)} = s^2 [(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1/2}]_{ii}$$

où : s^2 est l'écart-type du bruit approché par l'équation ,

$[\mathbf{Mat}]_{ii}$ représente la composante de la $i^{\text{ème}}$ ligne et $i^{\text{ème}}$ colonne de la matrice $\mathbf{Mat}$,

$\sigma_{i(3)}$ est l'écart-type de l'erreur due au bruit sur la $i^{\text{ème}}$ composante du vecteur paramètre.

Cherchons maintenant à associer un niveau de confiance à chaque résultat. Une manière pratique est de définir les intervalles de confiance à $x\%$: c'est à dire que l'on pourra être sûr à $x\%$ que le résultat est dans cet intervalle. La demi-largeur de l'intervalle est proportionnelle à la variance de la meilleure estimation $\mathbf{b}_{\text{meil}}$, on peut alors écrire, dans le cas du bruit gaussien :

$$\mathbf{b}_{\text{meil}} = \mathbf{b} \pm K_{\text{conf}} \cdot \sigma_{\mathbf{b}}$$

où K est une constante qui dépend du niveau de confiance que l'on a choisi. Dans le tableau présenté, on peut trouver les valeurs de K_{conf} en fonction du nombre de paramètres que l'on estime et du niveau de confiance que l'on a choisi. Habituellement, on prend 95%.

Nombre de paramètres	Confiance : 90 %	Confiance : 95%
1	1.645	1.960
2	2.146	2.447
3	2.500	2.795
4	2.789	3.080

Ainsi, si l'on cherche à estimer trois paramètres et que l'on veut être sûr à 95% du résultat, on peut écrire :

$$b_{i \text{ meil}} - 2.795 \sigma_b < \beta_i < b_{i \text{ meil}} + 2.795 \sigma_b, \quad i=1,2,3$$

L'erreur absolue due au bruit de mesure sur la $i^{\text{ème}}$ composante du vecteur paramètre peut alors s'écrire :

$$(\mathbf{e}_3)_i = K_{\text{conf}} \cdot \sigma_i (3)$$

2. Système expérimental



Figure 69
Caméra infrarouge



Figure 70
Module caméra infrarouge

Nous disposons pour ces mesures d'une caméra infrarouge (figure 69) située à la DGA au four solaire militaire tout comme le banc BAPTEM. La caméra dispose d'un système de refroidissement à l'azote ainsi que d'un module complet permettant la vision thermique ainsi que le traitement et l'enregistrement des données (figure 70).

Le composant est préparé de façon tout autre que pour le banc photothermique. Le porte échantillon n'est plus utile, cela dit pour un maintien correct lors des mesures le condensateur est soudé sur une plaque rigide.

Nous avons également peint notre composant à l'aide d'une peinture prévue pour les études thermiques et dont l'émissivité est connue. Le but de cette préparation étant de garder une émissivité de surface constante sur l'ensemble du composant

Le déroulement des expériences est fort simple, une fois le condensateur alimenté grâce à notre onduleur nous effectuons des relevés de température, par l'intermédiaire de la caméra infrarouge, en temps réel sur plusieurs faces du condensateur (figure 71). Nous obtenons ainsi des profils de température en fonction du temps d'alimentation.

De ces résultats nous pouvons alors tirer des conclusions après application des méthodes inverses (paragraphe 5).

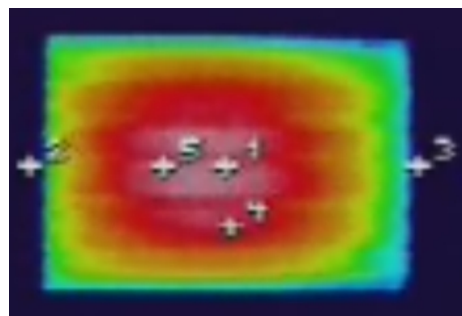


Figure 71
Surface du condensateur vu par caméra thermique

Il s'agit dans un premier temps de repérer le ou les points de chaleurs les plus élevés en terme de température et en surface sur un condensateur. Par la suite nous verrons si la fréquence d'excitation influe sur la répartition de chaleur.

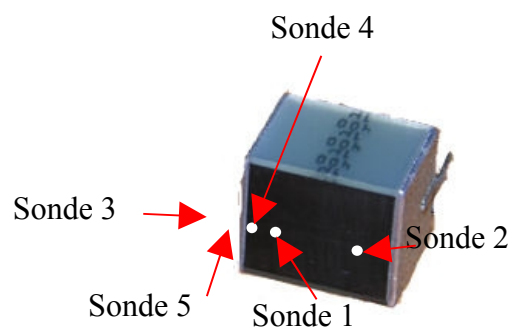


Figure 72
Répartitions des sondes de température

Nous prenons un exemple d'évolution de la température sur l'ensemble du condensateur en utilisant des points représentatifs comme sur la figure 72.

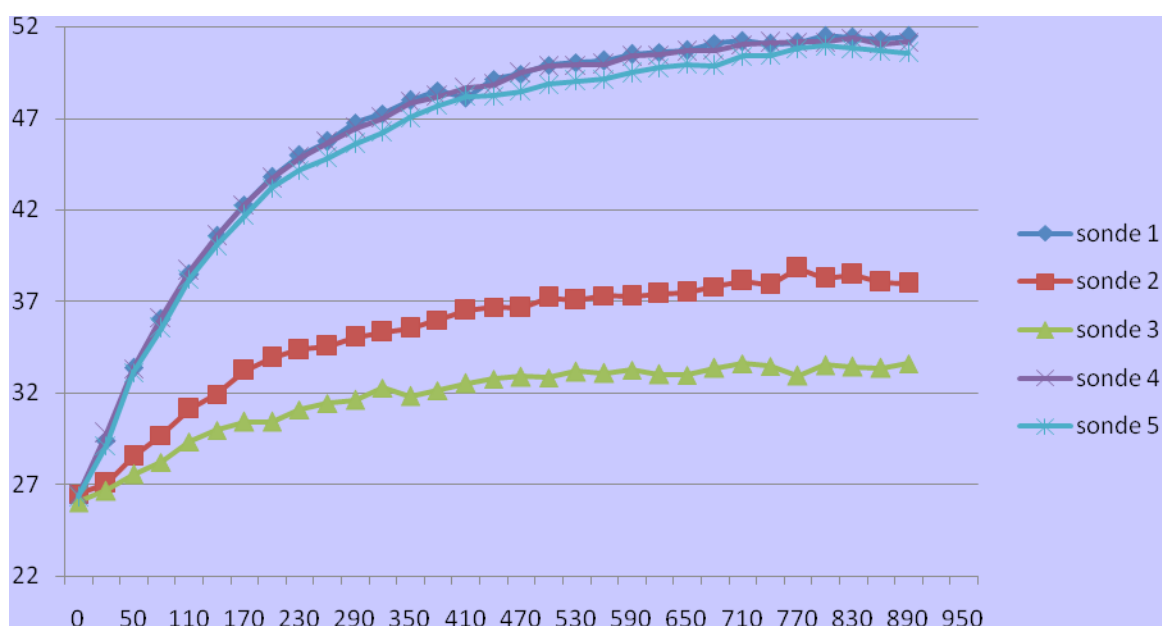


Figure 73
Evolution de la température suivant les sondes

Cette représentation confirme que le point central est bel et bien le point source de l'échauffement (sonde 1 figure 72). La dynamique est bien plus importante sur ce point que sur tous les autres et la température en régime quasi permanent est aussi plus grande que dans le reste du composant en surface.

Pour connaître l'emplacement de la source dans l'axe de la profondeur au condensateur nous réalisons le même type de mesures sur la face latérale du composant (figure 74). L'image que nous obtenons est moins précise que pour la figure 71 Cette répartition non symétrique est certainement du à l'isolant qui recouvre le condensateur sur cette face.

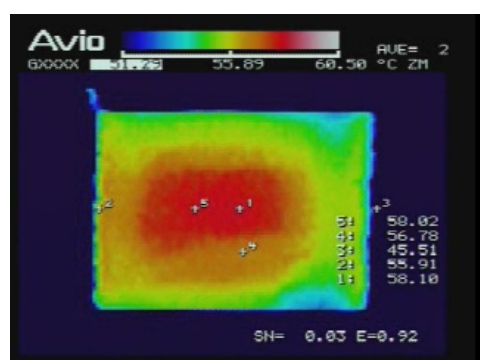


Figure 74
Face latéral du condensateur par caméra thermique

La localisation avec précision de la source de chaleur passe par une étude théorique et par la mise en place d'un modèle retraçant fidèlement les caractéristiques du condensateur et plus particulièrement son comportement thermique.

Estimation n°1 : intensité = 2 x 0,4 A et fréquence = 34364 Hz

Les valeurs initiales des paramètres sont :

$$e_0 = 4 \text{ mm},$$

$$T_{\max 0} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Les valeurs estimées et leurs incertitudes sont les suivantes :

$$e = 4,80 \text{ mm} \quad (1 \%)$$

$$T_{\max} = 33,4 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (1 \%)$$

Sur le graphe suivant, nous représentons une comparaison des mesures avec les valeurs du modèle calculées à l'aide des valeurs des paramètres estimés en 5 itérations.

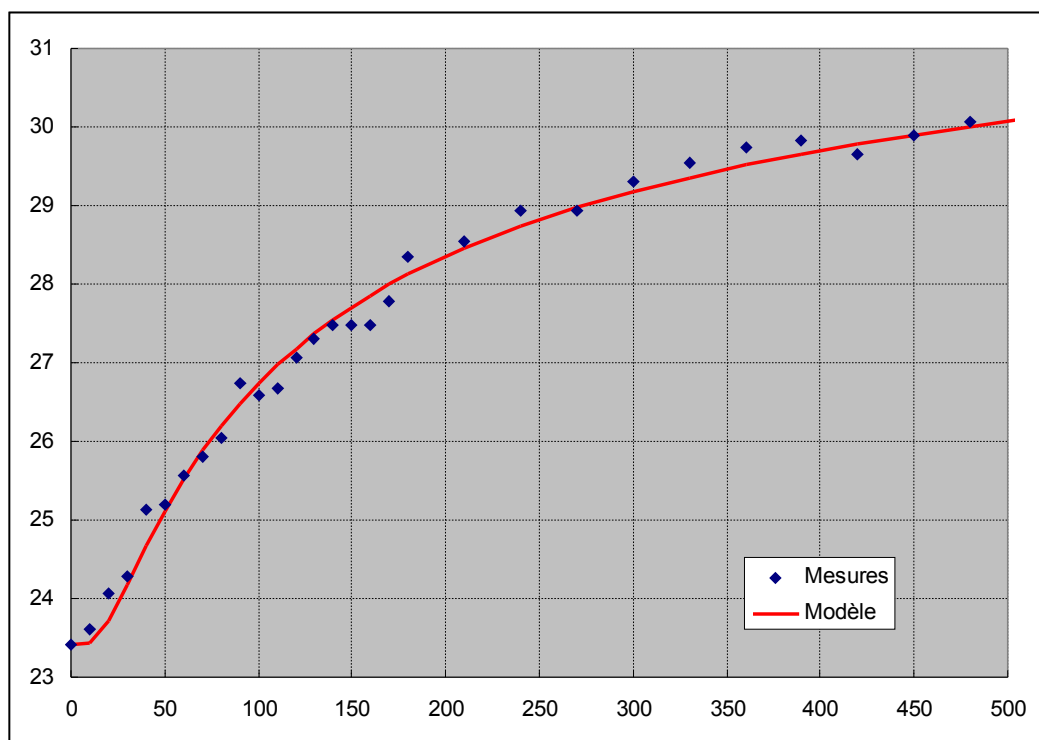


Figure 82
Estimation n°1, Comparaison mesures – valeurs du modèle

Estimation n°2 : intensité = 2 x 0,8 A et fréquence = 95161 Hz

Les valeurs initiales des paramètres sont :

$$e_0 = 4 \text{ mm},$$

$$T_{\max 0} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Les valeurs estimées et leurs incertitudes sont les suivantes :

$$e = 3,35 \text{ mm} \quad (146 \%)$$

$$T_{\max} = 82,5^{\circ}\text{C} \quad (66 \%)$$

Sur le graphe suivant, nous représentons une comparaison des mesures avec les valeurs du modèle calculées à l'aide des valeurs des paramètres estimés en 8 itérations.

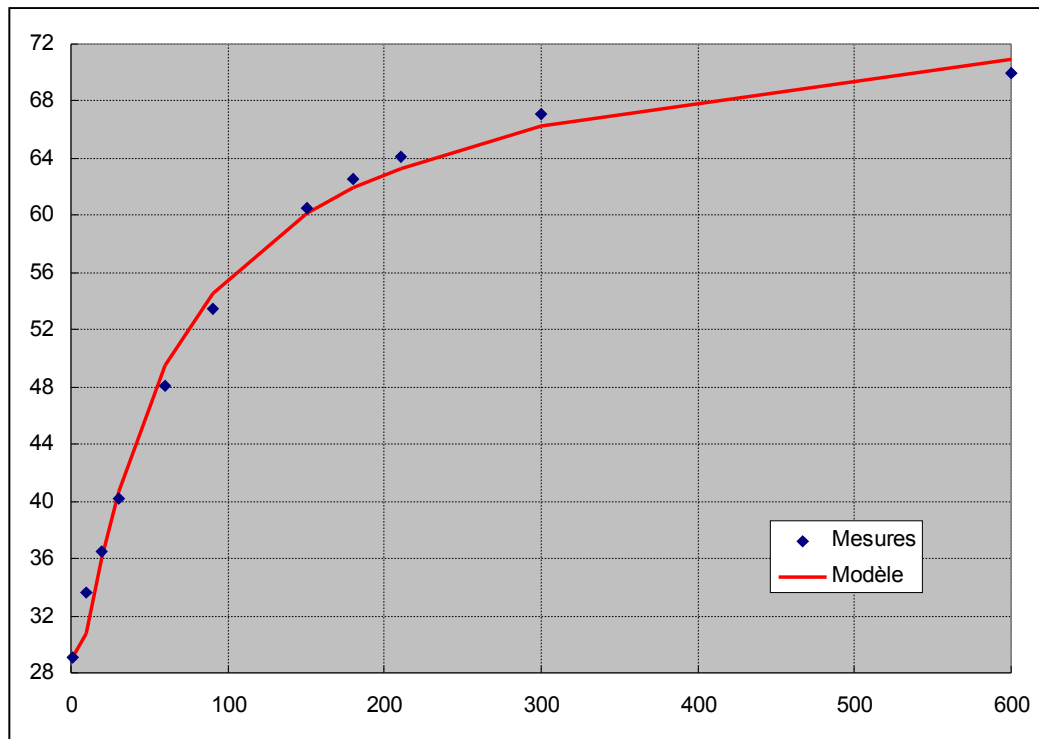


Figure 83
Estimation n°2, Comparaison mesures – valeurs du modèle

Pour les deux résultats présentés, on constate que :

- l'algorithme d'indentification converge rapidement (5 et 8 itérations) vers des valeurs cohérentes,
- les courbes reconstruites sont très proches des mesures effectuées, l'erreur relative moyenne des points calculés par rapport aux points de mesures est de 0,58 % pour l'estimation 1 et de 1,92 % pour l'estimation 2.

Néanmoins, les niveaux d'incertitudes sont très différents d'une estimation à l'autre. On peut y trouver plusieurs explications. Le nombre de points utilisés pour effectuer l'estimation 1 est bien supérieur à celui pour effectuer l'estimation 2. Il est donc normal que les niveaux d'incertitudes de l'estimation 1 soient inférieurs à ceux de l'estimation 2, l'intervalle de confiance étant inversement proportionnel au nombre de points de mesures (voir paragraphe III.2.2.b). Cependant, une telle différence ne peut pas s'expliquer par ce seul argument. Il semble que le modèle, bien que très proche des mesures, ne soit pas adapté dans le cas n°2. En effet, le modèle ne passe pas au plus près de tous les points de mesure mais oscille autour des points de mesures. Ceci devra être confirmé par l'ensemble des estimations.

Les deux tableaux suivants récapitulent l'ensemble des estimations faites à partir de toutes les configurations expérimentales (différentes fréquences et différentes intensités). Le premier présente la profondeur à laquelle la source est localisée, le deuxième la température maximale que devrait atteindre le condensateur, ainsi que les incertitudes associées aux deux estimations.

	2 x 0,4 A	2 x 0,8 A	2 x 1 A	2 x 1,4 A	2 x 2 A
25553 Hz	4,79 (6 %)	3,94 (14 %)	3,60 (24 %)		
34364 Hz	4,80 (1 %)	3,79 (8 %)	3,60 (10 %)		
47457 Hz	4,33 (4 %)	3,92 (15 %)	3,44 (23 %)	3,25 (20 %)	
71185 Hz	4,54 (3 %)	3,71 (25 %)	3,28 (46 %)	3,17 (28%)	2,73 (11 %)
95161 Hz		3,34 (146 %)	3,22 (85 %)		
105178 Hz		4,49 (13 %)	5,08 (34 %)		
124900 Hz		4,16 (6 %)	4,21 (13 %)		

Tableau xx
Estimation de la profondeur (en mm)

	2 x 0,4 A	2 x 0,8 A	2 x 1 A	2 x 1,4 A	2 x 2 A
25553 Hz	31,2 (2 %)	43,1 (5 %)	47,1 (9 %)		
34364 Hz	33,4 (1 %)	46,4 (3 %)	50,2 (3 %)		
47457 Hz	36,1 (1 %)	63,6 (8 %)	75,3 (11 %)	99,0 (9 %)	
71185 Hz	38,1 (1 %)	65,5 (11 %)	73,2 (23 %)	87,5 16 %)	104,2 (5 %)
95161 Hz		82,5 (66 %)	96,6 (49 %)		
105178 Hz		105,0 (10 %)	110,0 (22 %)		
124900 Hz		100,3 (4 %)	108,0 (8 %)		

Tableau xx
Estimation de la température limite (en °C)

C. Conclusions et perspectives - Couplage Electro-thermique

IV. Bibliographie

V. Co-Encadrements de thèses

Mathieu ROBA

« *Modélisation et caractérisation thermophysique de composants électroniques* », Université de Perpigna Via Domitia, Jury provisoire : C. Joubert, G. Rojat, JJ. Serrat, B. Claudet, O. Faugeroux, T. Talbert, soutenance prévue Septembre 2009

Benjamin PARIS

« *Diagnostic actif de sources à énergies renouvelables intégrées au bâtiment* », Université de Perpignan Via Domitia, Jury provisoire : S. Daoud, B. Peuportier, G. Despaux, M. Polit, T. Talbert, soutenance prévue Novembre 2009

Julien NOU

« *Modélisation et contrôle d'installations de mix-énergétiques : Application au solaire thermique et à la géothermie* », Université de Perpigna Via Domitia, soutenance prévue Novembre 2011

VI. Encadrements de stagiaires

Les sujets de stages que j'ai proposé et encadré sur les 4 dernières années, reflètent la mise en place et l'évolution des axes de recherches qui ont eu lieu lors de la transformation du laboratoire de Physique Appliquée et d'Automatique LP2A (précédent plan quadriennal) en laboratoire d'Électronique d'Informatique Automatique et Systèmes ELIAUS (plan quadriennal actuel). Ne sont pas donnés ici les 4 stagiaires que j'ai encadré lorsque j'étais en thèse à Montpellier.

2005/2006 Mise en place des axes de recherches « *Modélisation de composants* » et « *Intégration des énergies renouvelables aux bâtiments* »

- **Stéphane Bezold**, IUT GEII Toulouse, « *Conception et réalisation d'une station météorologique (girouette et anémomètre)* ». Durée du stage 10 semaines.
- **Lucas Ripoll**, IUT GEII Montpellier, « *Étude et réalisation d'un système embarqué de mesure de l'irradiation solaire. - Application aux énergies renouvelables dans le bâtiment et l'industrie.-* ». Durée du stage 10 semaines.
- **Benjamin Paris**, Master Spécialisé ENSAM Corse, « *Gestion optimale des échanges énergétiques dans un habitat individuel* ». Durée du stage 6 mois. Poursuite en **thèse** financée par le FUI (ex-FCE voir le §V.A.) sous la direction de **Monique Polit et Thierry Talbert**.
- **Mathieu Roba**, Master Énergie Solaire UPVD, « *Étude thermique de composants d'électronique de puissance* ». Durée du stage 6 mois. Poursuite en **thèse MNSR** sous la direction de **B. Claudet, O. Faugoux et T. Talbert**.

2006/2007 Développement de l'axe systèmes embarqués avec applications aux énergies renouvelables (réalisation de capteurs intelligents)

- **Anthony Deniau**, IUT GEII, Montpellier, « *Réalisation d'un système d'affichage et de prédiction des mesures collectées par une station météo* ». Durée du stage 10 semaines.
- **Ludovic Puttevils**, IUT GEII, Montpellier, « *Adaptation d'un système embarqué de mesure de l'irradiation solaire* ». Durée du stage 10 semaines.
- **Julien Nou**, Stagiaire Master STPI 1ère année, UM2, « *Conversion d'algorithmes neuronaux en C pour une utilisation en électronique embarquée* ». Durée du stage 10 semaines.

2007/2008 Développement de systèmes embarqués sur processeurs ARM et mise en place de l'axe de recherche « *Couplage de sources EnR* »

- **Yongyuth Kongdee**, IUT GEII, Montpellier, « *Système embarqué de mesure pour 3 installations géothermiques* ». Durée du stage 10 semaines.
- **Ali Zaher**, Master EAI 2ème année, UPVD. « *Modélisation d'une centrale de co-génération* ». Durée du stage 6 mois. Poursuite en thèse sous la direction de Monique Polit

et Frederick Thiery.

- **Julien Nou**, Master STPI 2ème année, UM2. « *Télédétection et Energie solaire : Estimation et prédiction de l'irradiation solaire par traitement d'images satellites* ». Durée du stage 6 mois. Poursuite en thèse financée par l'ANR (voir le §V.D.) sous la direction de **Monique Polit et Thierry Talbert**.

2008/2009 Couplage de processeurs ARM et FPGA pour une intégration de la commande sur les systèmes de supervision à EnR

- **Loïc Bechet**, IUT GEII, Montpellier, « *Réalisation d'un système d'affichage et de prédiction des mesures collectées par une station météo* ». Durée du stage 10 semaines.
- **Jean-Christophe Travers**, Master EAI 2ème année, UPVD. « *Système embarqué de monitoring et de contrôle d'une installation hybride* ». Durée du stage 6 mois.
- **Aymeric Quintane**, Master EAI 2ème année, UPVD. « *Système d'acquisition et de contrôle/commande ARM9/FPGA pour une maquette de bâtiment* ». Durée du stage 6 mois.

Contrats et Financements

I. Introduction

Les paragraphes qui suivent regroupent l'ensemble des demandes de financement que j'ai effectué lors de 4 dernières années. Ces contrats ont permis la mise en place et l'évolution des axes de recherches du laboratoire. Ils peuvent se classer en 2 groupes

- les programmes exploratoires (4 programmes),
- et les demandes de projets (2 financements).

Le financement **SolHélios** fait partie des programmes exploratoires. Son objectif a été de présenter l'intérêt du couplage de 2 sources EnR et leur complémentarité dans le cas de sources de natures différentes comme le solaire thermique et la géothermie. Ce contrat a permis l'obtention de l'ANR SolarGeotherm. Ce projet est actuellement suivi par 2 nouveaux programmes exploratoires, Système Embarqué de Monitoring et de Contrôle Modulaire (SEMCM) et System In Package (SIP), financés respectivement par OSEO-Anvar et par l'UPVD.

Le projet **SEMCM** est la suite « naturelle » de SolHélios et la généralisation du système de monitoring pour tous types d'installations géothermiques. Il a pour objectif de pérenniser l'expertise de notre laboratoire dans le monitoring d'installations géothermique. Mais aussi permettre à l'entreprise Dominguez-énergie de présenter ses capacités d'innovations.

Le projet **SIP** qui débutera fin 2009, début 2010, va regrouper les compétences des 2 équipes du laboratoire ELIAUS (EPROM et COSMOS), mais aussi l'équipe solaire concentré du laboratoire PROMES. Son rôle est l'intégration de règles de régulations complexes (commandes robustes, MPC) sur un FPGA dans le but d'optimiser la régulation d'une installation à EnR. S'ensuivra alors une étude pour une intégration sur des procédés photovoltaïques sous concentration.

Le programme **OptiEnR** avait pour objectifs (i) de présenter l'intérêt de l'utilisation de matériaux à changement de phases pour la gestion de chaufferies collectives et (ii) de mettre en place un système d'acquisition pour la modélisation de ce style d'installation. Le programme a été mené à terme cependant aucune demande de financement ANR n'a été faite pour cause de retrait de 2 partenaires.

Le financement **Monitoring THPE**, qui va s'achever fin Novembre 2009. Ce projet a regroupé 2 industriels (Pyrescom et Apex-BP Solar) et le CSTB. Le projet a permis la réalisation d'un système de monitoring temps réel de bâtiments. Il a aussi permis l'étude de régulations spécifiques (MPC) et le gain de ces régulations sur l'utilisation des EnR par rapport aux énergies fossiles.

Le financement **SolarGeotherm** a commencé en Décembre 2008, et va se dérouler jusqu'à la fin Novembre 2011. Cette ANR a pour but d'étudier l'effet du stockage de chaleur dans les massifs pour les installations couplées solaire thermique et géothermique pendant les inter-saisonnalités.

II. Monitoring THPE - Fonds de Compétitivité des Entreprises (ex-FCE, FUI) 2006

Objectifs

Il est important de proposer des concepts et solutions techniques associées pour pouvoir réaliser un monitoring et un diagnostic actif des consommations et productions énergétiques des bâtiments (individuels, tertiaires, neufs et existants), dans le but de quantifier les retombées environnementales de l'intégration au bâtiment de produits et systèmes innovants d'énergies

renouvelables.

L'objet de cette étude est de développer le concept de monitoring et de démontrer la faisabilité et la pertinence d'un « superviseur » qui intégrera un calculateur exécutant un ensemble d'algorithmes adaptés à l'affichage et à l'exploitation efficace des paramètres mesurés.

Dans ce cadre, deux axes de recherche sont prévus :

- La définition d'indicateurs de performance énergétique des bâtiments et l'identification de paramètres de contrôle/surveillance, pour en extraire après traitement et analyse des données, les recommandations d'un diagnostic énergétique global et les informations pour optimiser la gestion énergétique du bâtiment.
- La mise au point d'un prototype de monitoring actif avec le transfert des résultats ainsi récoltés par différents vecteurs (afficheur site Internet de suivi de performance, alarme SMS...). Ces solutions seront testées et évaluées sur des sites pilotes.

L'objectif finalement poursuivi est de pouvoir qualifier un bâtiment sous l'angle « Bâtiment à Très Haute Performance Énergétique (THPE) » et de proposer des questionnaires d'énergie capable d'intégrer ces diagnostics localement, et d'optimiser les flux énergétiques à l'intérieur d'un Bâtiment.

Planning

Le projet est prévu sur une durée de 30 mois. Ses phases sont dans l'ordre :

1. Établissement des principes du monitoring THPE
 - 1.1. Définition d'indicateurs et paramètres d'évaluation des performances énergétiques
 - 1.2. Définition d'un algorithme et des règles de gestion énergétique optimisée du bâtiment
 - 1.3. Définition d'un algorithme de détection de défauts des équipements énergétiques
 - 1.4. Simulation et évaluation des gains économiques et énergétiques générés par le monitoring THPE
2. Développement d'un prototype du monitoring THPE
 - 2.1. Qualification des systèmes de communication centrale / périphériques
 - 2.2. Développement de la centrale de monitoring
 - 2.3. Intégration des algorithmes définis en phase n°1
 - 2.4. Développement des composants périphériques (capteur, etc.)
3. Développement des IHM du monitoring THPE
 - 3.1. Boîtier de report d'information
 - 3.2. Développement d'une fonction serveur TCP/IP sur la centrale et d'un client TCP/IP (sur PC)
 - 3.3. Développement d'interfaces web pour l'affichage des informations et leur interprétation.
4. Test et validation du monitoring THPE
 - 4.1. Tests en Laboratoire (éléments séparés et système global)
 - 4.2. Tests sur sites pilotes (système global)
5. Diffusion des résultats et pré normalisation
 - 5.1. Publication sur le concept et ses produits
 - 5.2. Présentation et communication des résultats dans les comités normatifs

Informations diverses

Le projet comporte 4 partenaires :

- l'entreprise Pyrescom, coordinateur du projet,
- l'entreprise APEX-BP Solar,
- le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB),
- et le laboratoire ELIAUS.

Le projet a débuté au mois de Décembre 2006. Un doctorant a été recruté pour ce travail, Benjamin Paris sous la direction de M. Polit et T. Talbert. Un financement de 300 000€ a été obtenu pour l'ensemble des partenaires.

III. SolHelios - Languedoc-Roussillon 2006

Objectifs

L'objectif de l'installation qui est en cours d'étude à Saint Pierre del Forcats est d'observer et de modéliser le couplage de 2 sources EnR (solaire thermique et pompe à chaleur géothermique) utilisant le même support de stockage d'énergie qu'est le sous-sol.

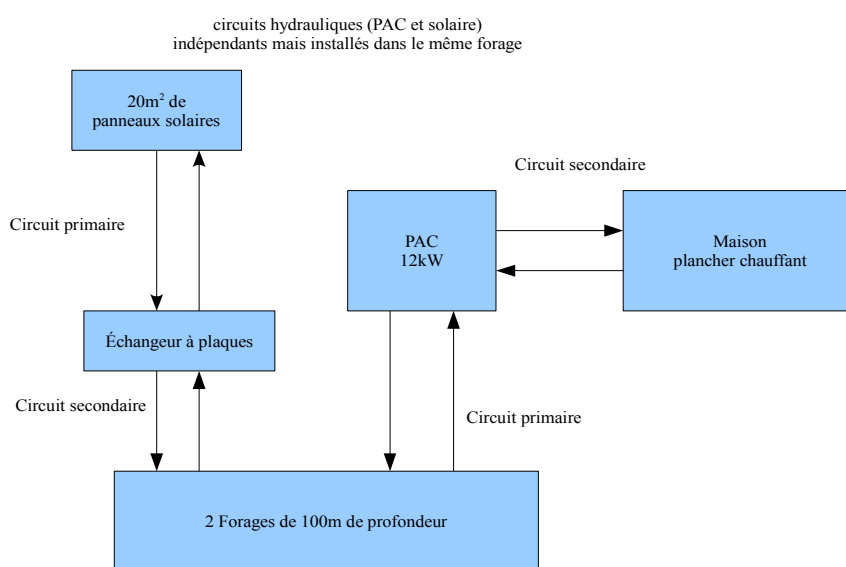
A partir des informations collectées, il est demandé de déterminer le(s) indicateur(s) énergétique(s) de l'installation complète.

Moyens mis en œuvre

- 2 forages de 100m de profondeur
- 1 pompe à chaleur de 12kW
- 20 m² de panneaux solaires thermiques
- 1 système d'acquisition de données
- 1 maison individuelle

Installation

L'installation utilisée pour effectuer les mesures est celle représentée sur le synoptique ci-dessous :



Informations à compléter avec la position des circulateurs (A ou R) et des vases d'expansion

Elle se compose de 2 circuits à eau indépendants Solaire et PAC.

Le circuit solaire se décompose en 2 parties isolées. La première relie les panneaux à un échangeur à plaques, et la deuxième est un circuit A/R qui se sépare en 2 parties à destination des 2 forages de 100m de profondeur.

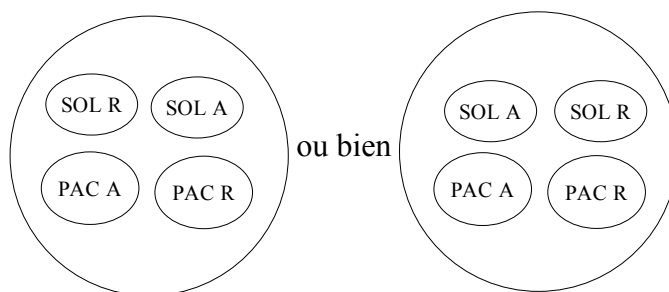
Le deuxième circuit est un circuit classique en géothermie. Une pompe à chaleur est connectée à 2 forages, et des planchers chauffants sont connectés à cette même PAC.

Par conséquent, à l'intérieur de chaque forage se trouve 2 circuits à eau distincts, le premier provenant du système solaire et le second de la pompe à chaleur. Les échanges de chaleurs possibles à destination de la PAC, peuvent venir soit de manière directe du circuit solaire, soit du sous-sol. Ce dernier fournissant naturellement les calories, ou alors redonnant à la pompe à chaleur les calories apportées puis stockées par les panneaux solaires.

Remarques diverses :

Le sous-sol est du granit gorgé d'eau.

La configuration des tuyaux dans chaque forage est indéterminée et surtout entièrement aléatoire.



- SOL = Solaire
- PAC = Pompe à chaleur
- A = Aller
- R = retour

4 pompes de circulation sont installées sur chacun des 4 circuits. Elles ont un débit fixe. La régulation utilisée est un TOR sur valeur de température.

Système de mesure

Le système d'acquisition est un système que nous utilisons au laboratoire, cad une carte composée d'un processeur ARM9 de 200MHz qui possède 8Mo de ROM, 16Mo de RAM, 8 entrées analogiques et 2 sorties analogiques, ainsi que la connectique réseau adéquate.

De manière à contrôler le fonctionnement de l'installation (solaire, PAC, sous-sol) la version initiale de l'installation « était » la suivante :

- entrée 0 : mesure de la température dans le forage à 100m de profondeur
- entrée 1 : mesure de la température dans le forage à 75m de profondeur
- entrée 2 : mesure de la température dans le forage à 50m de profondeur
- entrée 3 : mesure de la température dans le forage à 25m de profondeur
- entrée 4 : mesure de la température extérieure
- entrée 5 : mesure de la température entrée du circuit secondaire solaire
- entrée 6 : mesure de la température sortie du circuit secondaire solaire
- entrée 7 : mesure du courant absorbé par l'installation

Au jour d'aujourd'hui, seul les éléments suivants sont actifs :

- entrée 0 : mesure de la température dans le forage à 100m de profondeur

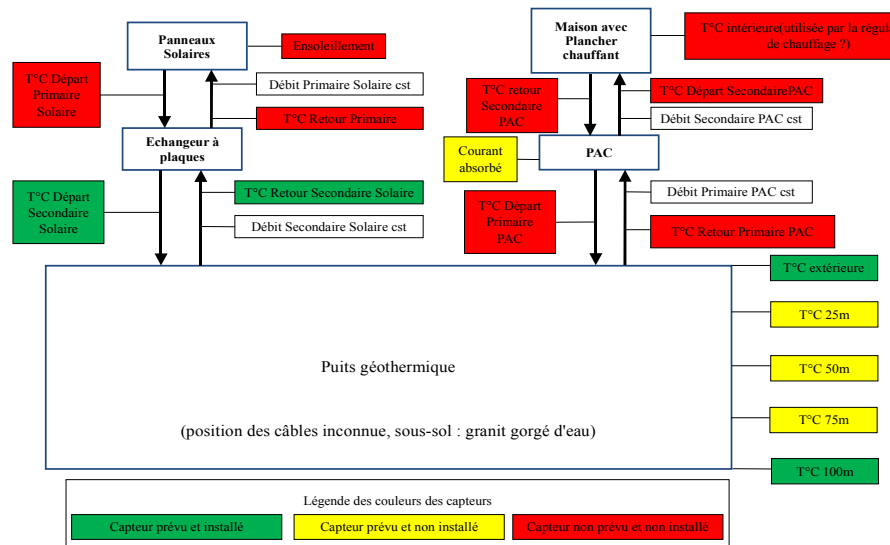
entrée 4 : mesure de la température extérieure

entrée 5 : mesure de la température entrée du circuit secondaire solaire

entrée 6 : mesure de la température sortie du circuit secondaire solaire

Suite à un problème de forage, il n'est pas possible d'insérer les 4 sondes donc pour l'instant seul une sonde a été placée. Il est peut-être envisageable d'en mettre une seconde mais pour l'instant ceci est hypothétique.

La liste des capteurs qui seront installés est donnée sur le graph suivant. Cependant, les capteurs ne seront pas tous actifs en même temps.



Accès aux données et résultats

Un système complet de téléchargement sécurisé des données a été mis en place entre Saint Pierre et l'université de manière à ce que le transfert soit automatisé. Ce système n'est accessible qu'à l'entreprise Dominguez-energie et aux personnes du laboratoire ELIAUS travaillant sur le système.

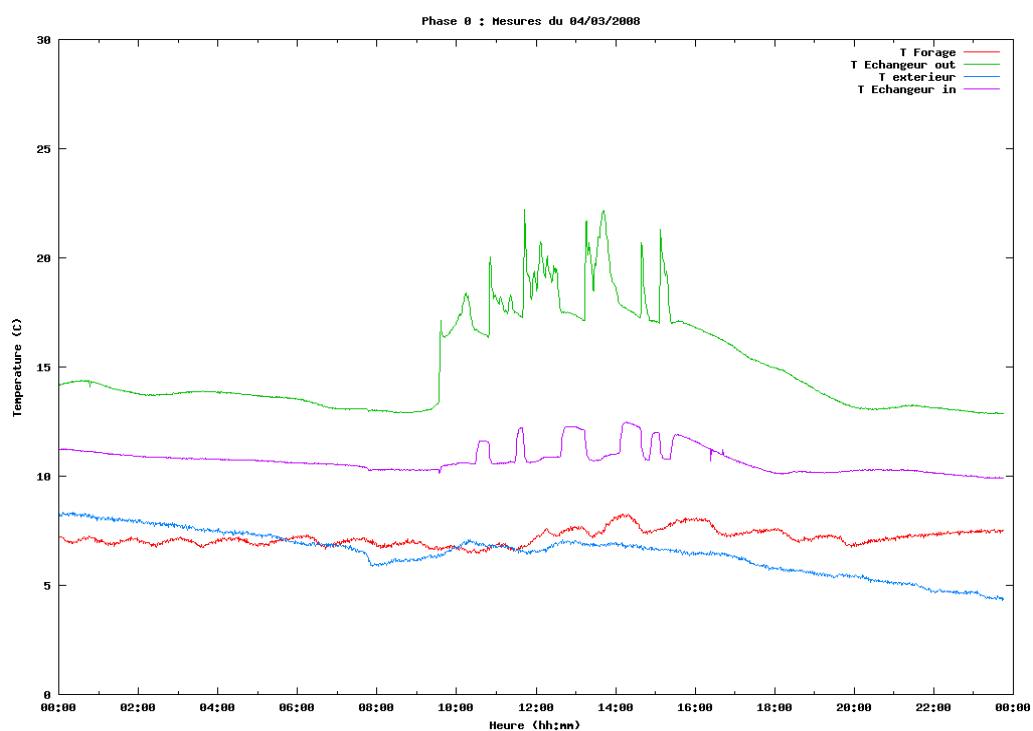
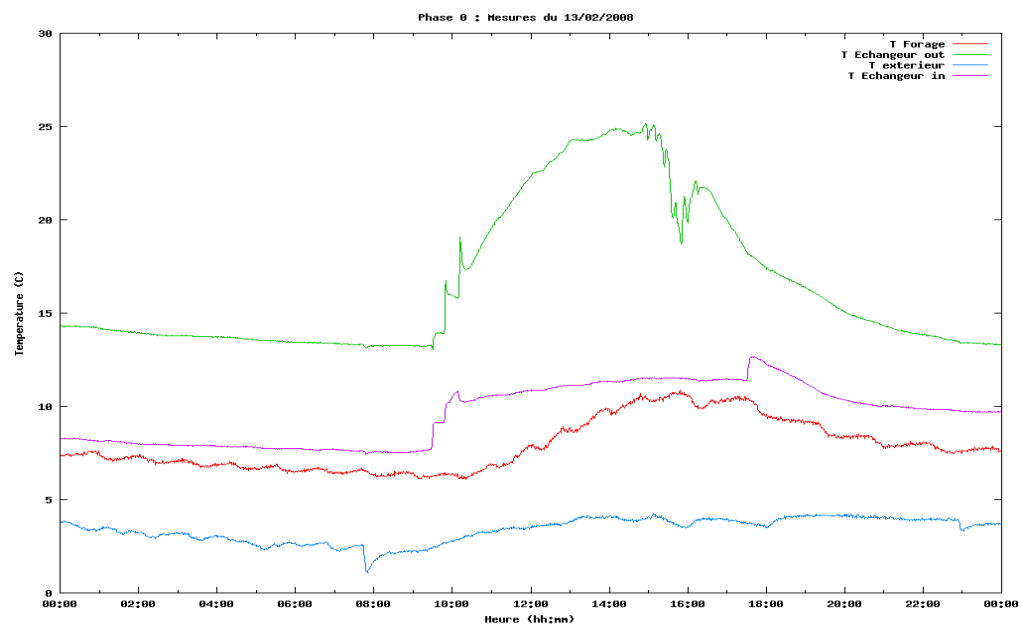
Ci-après vous trouverez les résultats préliminaires comprenant :

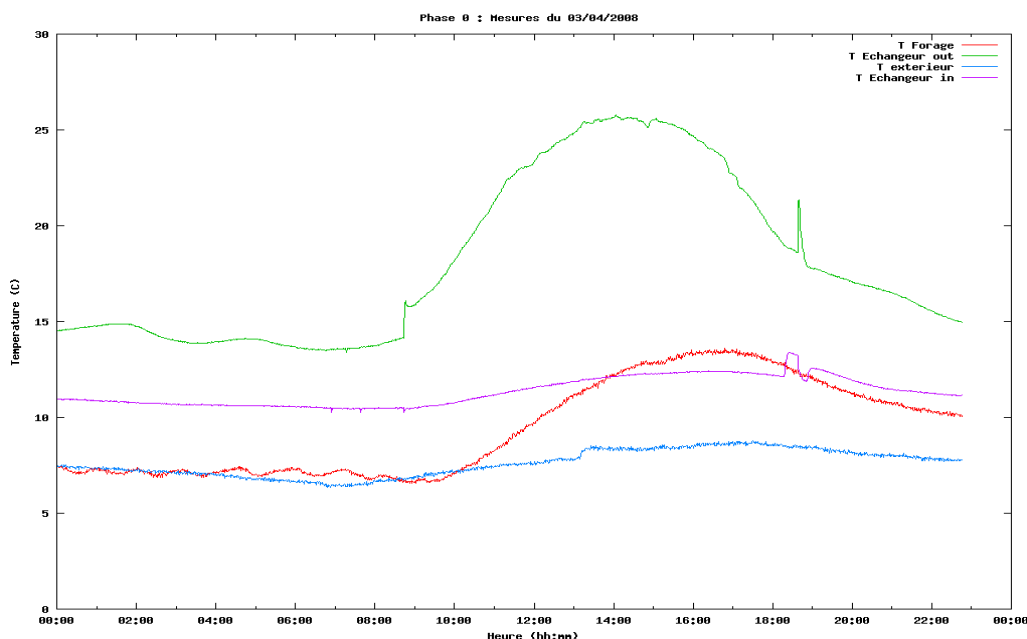
- les températures à l'entrée et à la sortie de l'échangeur,
- la température dans le forage,
- et la température extérieure.

Comme on peut le voir sur les courbes, les cycles de stockage et de dé-stockage de l'énergie sont parfaitement visible sur les mesures, reste maintenant à quantifier l'impact exact sur le fonctionnement du système.

Toute une étude vient de commencer concernant :

- la quantité d'énergie qu'il est possible de stocker,
- la durée de ce stockage,
- le calcul des indicateurs temps réel etc.





Informations diverses

Le projet a été déposé en 2006, mais a dû se synchroniser avec les travaux de rénovations de la maison qui nous a été prêtée, et qui fait partie de l'étude. Ces travaux (extensions, isolation, planché chauffant etc.) ont duré la quasi totalité de l'année. La mise en place de la pompe à chaleur, du champ solaire et les mises en marche respectives ont eu lieu pendant l'hiver 2007/2008. Ces premiers résultats ont servi de programme exploratoire pour le dépôt d'une ANR, qui a été acceptée en 2008 (voir le paragraphe D). 2 demandes de financements acceptées en 2008 (un OSEO-Anvar §E et un BQR §F) ont été faite pour améliorer le système et surtout permettre la mise en place d'un dispositif autonome de contrôle/commande de l'installation.

IV. Opti'EnR - Programme Énergie CNRS 2008

Objectifs

Le projet exploratoire proposé a pour objectif principal de consolider le consortium en cours de montage et de permettre d'obtenir les données et mesures préliminaires nécessaires au montage et au bon démarrage d'un projet ANR dans le cadre de l'appel d'offre ANR Stock-E.

Le contexte général relève de la problématique de la gestion et l'optimisation des chaufferies collectives mettant en œuvre différentes sources énergétiques complémentaires en hybridation (chaudière à énergie fossile, incinération, chaudière bois, géothermie, solaire thermique).

La demande énergétique, l'approvisionnement et le coût de certaines ressources ainsi que les conditions météorologiques présentent des variations importantes. Par ailleurs, les chaudières présentent quant à elles de fortes inerties inadaptées à ce type de contexte. Pour répondre à ces contraintes, les chaudières sont le plus souvent surdimensionnées et fonctionnent que rarement à leur régime nominal. En découlent des surcoûts d'investissement et de maintenance et une diminution du rendement global du système de chauffage collectif. Les sources énergétiques renouvelables sont quant à elles tributaires des conditions météorologiques et des intermittences solaires, elles vont donc souvent être considérées par l'opérateur comme à l'origine d'une complexité accrue de la gestion du système.

On peut répondre à l'ensemble de ces contraintes par la mise en œuvre d'une unité de stockage thermique intégrée (éventuellement hybride) incluant un système de gestion/commande optimisé

ainsi que par gestion anticipée des besoins. Les chaudières conventionnelles pourront alors être dimensionnées à leur charge nominale et la part du renouvelable augmenté.

Résultats obtenus

Le travail du laboratoire ELIAUS s'est déroulé suivant 3 étapes :

- l'instrumentation,
- la modélisation de la chaufferie collective,
- et la modélisation de la charge sur le réseau de SUEZ.

Afin d'obtenir une identification et une modélisation cohérente, une instrumentation spécifique a dû être réalisée. Contrairement à ce qui avait été prévu, l'instrumentation du site n'a pas été réalisée à partir de la centrale National Instrument (NI653), mais à partir d'un système entièrement développé au laboratoire. Le principe a été de réaliser une structure d'acquisition de données modulaire et adaptable à différents types d'installations (Elyo-Suez : chaufferie bois/gaz/cogénération de la Rochelle et bois de Mouthe, mais aussi des installations géothermiques), le tout s'interfaçant avec le progiciel de Suez. La structure développée est basée sur un cœur ARM9 de la société Freescale. Le système d'acquisition mis en place permet :

- l'acquisition de mesures températures, de débit etc.
- de stocker ces informations sur une carte Compact Flash,
- et permet la transmission de l'information sur un support entièrement sécurisé pour éviter tout type de modification de d'information pendant le transfert ou avant.

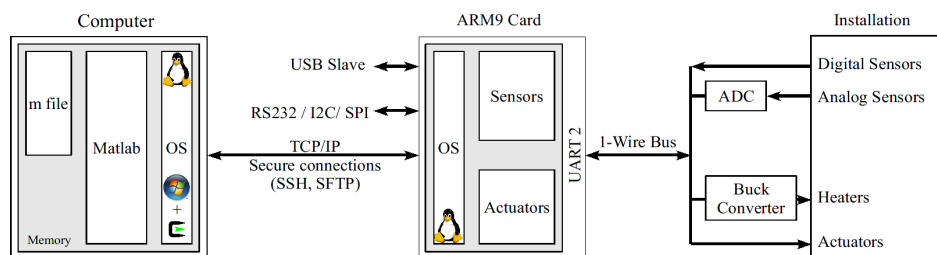


Fig 1: Synoptique du système d'acquisition

Ce système a été installé au mois de Novembre 2008 et connecté au système d'acquisition d'Elyo-Suez ALIENOR (fin Décembre 2008) à la chaufferie collective de la Rochelle. Cette installation se compose de

- 1 chaudière à bois (4,5 MW, Fig 5),
- 1 chaudière gaz-fioul (7 MW, Fig 5),
- 1 centrale de cogénération (2,5 MW, Fig 6),
- des panneaux solaires thermiques (1125 m²),
- 1 réseau de chaleur (eau) sur 12 km.

Notre objectif a été de modéliser le fonctionnement complet de la chaufferie. Pour cela environ 60 à 70 variables (Températures, débits, pression, etc. puissance, énergie consommée etc.) doivent être mesurées et modélisées. Cependant, il existe un certain nombre d'inconnues (règles de régulation internes des différents systèmes propriétaires, principes physiques liés à la structure interne de la/des chaudières etc.), ce qui nous a amené à utiliser la technique des boîtes grises et de l'identification paramétrique.

Les premiers résultats de cette modélisation sont représentés sur les figures 2 à 4. Ils concernent essentiellement la chaudière à bois :

- sorties fumées qui sont par la suite réutilisées pour le chauffage du circuit d'eau,
- les consignes d'enclenchements des bruleurs,
- les consignes provenant du réseau général, secondaire et du mélangeur (cascade).

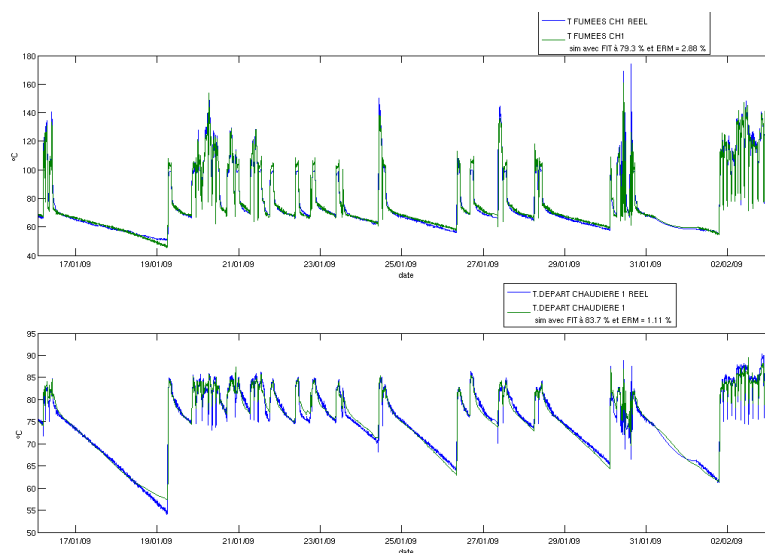


Fig 2: Température fumée et circuit d'eau mesuré et simulé.

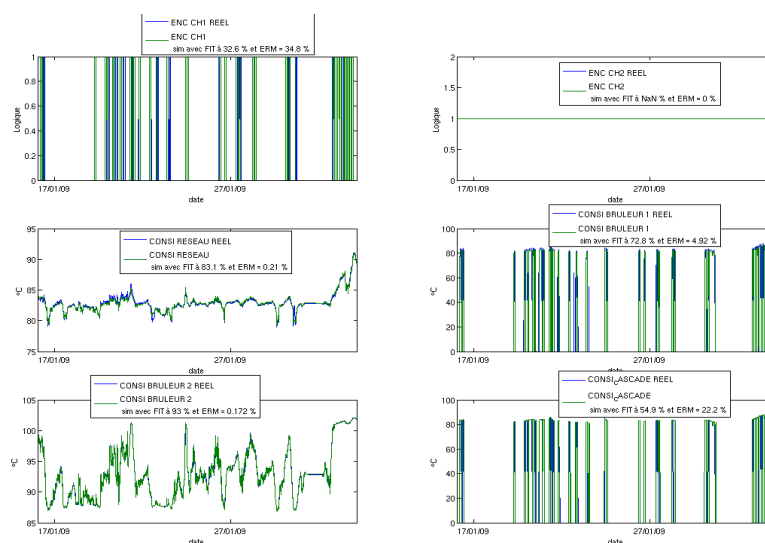


Fig 3: Consigne chaudière et réseau d'eau, enclenchement chaudière bois.

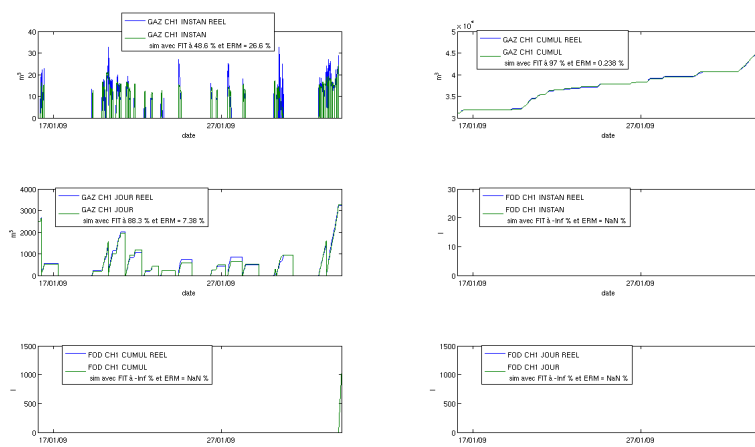


Fig 4: Mesure et simulation de la consommation instantanée et cumulée de la chaudière gaz

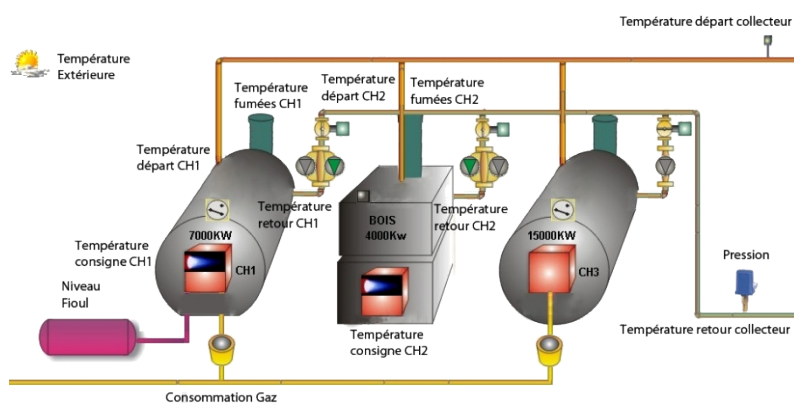


Fig 5: Connexion entre les 3 chaudières et le réseau principal.

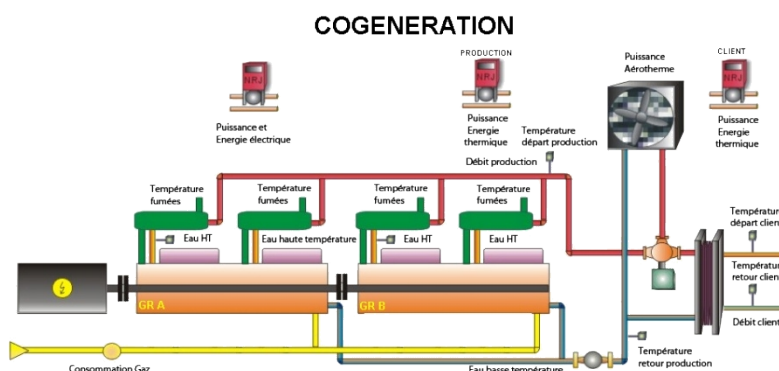


Fig 6: Connexion de la centrale de cogénération au réseau EDF et au réseau d'eau chaude.

Un des problèmes bloquant de ce projet est l'impact de la charge sur le réseau général de 12km. En effet la charge est composée d'environ 5000 habitations, et il paraît difficile d'effectuer un choix d'un système de stockage et d'une régulation adéquate sans être en mesure de quantifier (même approximativement) la variation de la demande en fonction de paramètre environnementaux. Pour cela, un outil de modélisation (TRNSYS) a été acheté. Suivi par le logiciel SIMBAD pour tester les

réglations.

L'objectif est de mettre en place un ensemble de modèles de bâtiments et de comportement, et de simuler leurs influences sur la « réserve » d'eau chaude qu'est le réseau de distribution de 12km. Le premier résultat donné ci-après d'une maison individuelle 4 faces (Fig 7), présente clairement la demande complémentaire d'énergie afin de satisfaire le « fonctionnement » normal de l'habitation. Comme on peut le voir, la demande est clairement identifiée et quantifiée dans le temps (Fig 8), ce qui va permettre de modéliser avec une erreur que l'on peut espérer « moyenne » la demande énergétique d'un des ensemble d'habitations.

Est en cours actuellement la modélisation d'un immeuble de 3 étages et 4 appartements d'environ 60m² par étage. Ces 2 ensemble de modèles devraient permettre d'avoir une modélisation d'environ 70% des différentes habitations qui se trouvent actuellement sur le site de la Rochelle.

Les prochaines étapes vont consister à :

- finaliser les modèles des différentes chaudières,
- mettre en place le couplage de fonctionnement,
- proposer un modèle global de la charge,
- modéliser le fonctionnement complet de l'installation (chaufferie+circuit+charge),
- proposer des pistes d'optimisation de l'installation que ce soit par l'intermédiaire d'un support de stockage ou par une régulation spécifique.

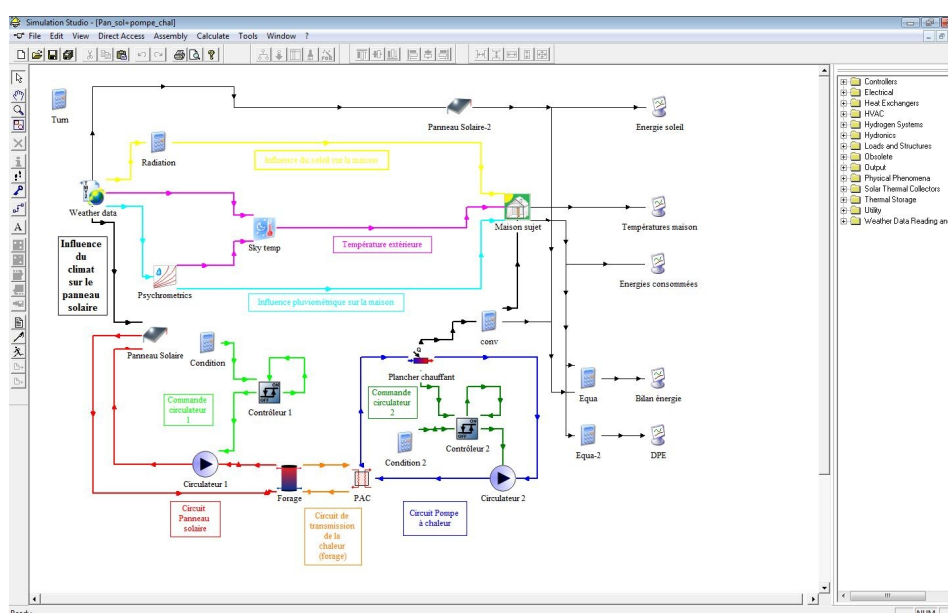


Fig 7: Schéma de principe (énergétique) d'une maison individuelle 4 faces.

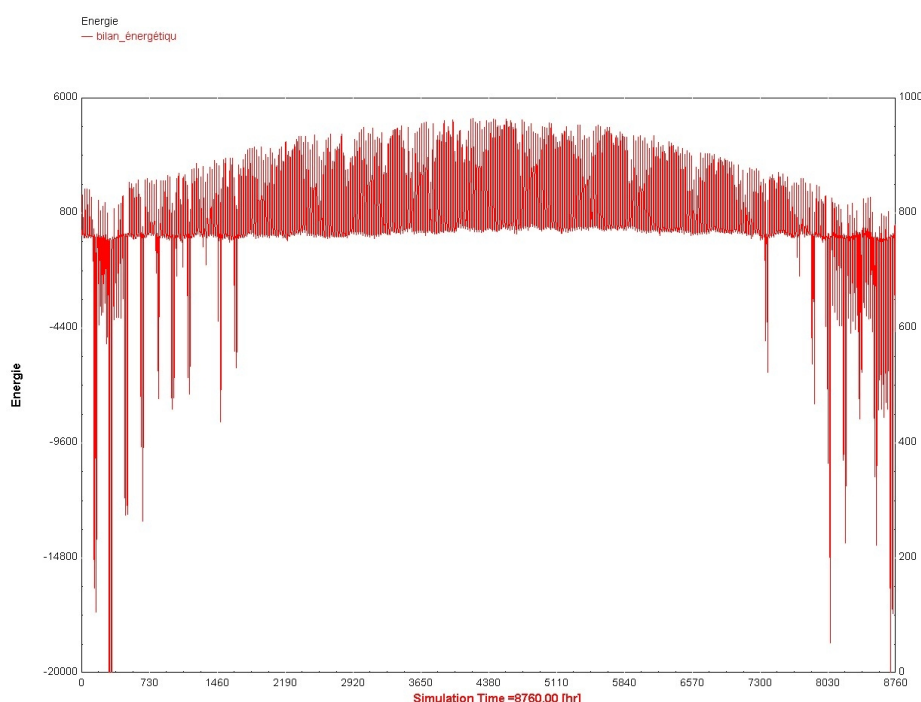


Fig 8: Bilan de performance énergétique simulée sur une année.

Informations diverses

Ce programme a débuté en Février 2008. 2 doctorants du laboratoire ont travaillé sur ce sujet (Julien Eynard et Julien Nou), sous la responsabilité de leur encadrant de thèse (S. Grieu et T. Talbert). Le premier pour la partie automatique et le second pour l'étude de bâtiments sous TRNSYS. Dans les 2 cas, ces travaux continuent dans leurs thèses respectives. Pour ce projet les 2 laboratoires (Promes et ELIAUS) ont obtenu un financement de 15 000€.

V. SolarGeotherm - Agence Nationale de la Recherche (ANR) 2008

Objectifs

L'objectif du projet est de quantifier, de façon expérimentale et par la modélisation, la capacité optimale d'un massif rocheux à constituer un réservoir thermique basse température : pour le stockage en été de l'énergie thermique générée par capteurs solaires thermiques, transfert de cette chaleur par des sondes géothermiques verticale de moyenne profondeur (200 mètres), et déstockage de cette énergie thermique pour satisfaire les besoins de chauffage l'hiver. Le projet se concentre sur l'étude du comportement thermique du massif rocheux et de l'interface sonde-massif vis-à-vis du stockage-déstockage d'énergie thermique issue de capteurs solaires, et regarde si l'exploitation de l'énergie thermique déstockée pourra être économiquement réalisée. Le projet étudie le déstockage thermique en conservant une liberté complète de paramétrage de ce processus afin de modéliser au mieux le comportement thermique du massif rocheux. Le projet lève le verrou scientifique et technique relatif à l'évaluation précise et modélisée des capacités d'un massif rocheux pour le stockage et le déstockage optimal de l'énergie thermique produite par une installation solaire. Le projet maîtrise complètement, par régulation, les paramètres de stockage et déstockage, en dehors de toute interférence d'utilisation parasite. Cette liberté de paramétrage

permet la réalisation de plans d'expérience afin de préparer dans les meilleures conditions la modélisation du comportement thermique du massif rocheux et des échanges sonde-massif. L'optimisation des échanges thermiques sonde-massif et l'équilibre dans le temps de ces échanges sont étudiés en paramétrant notamment les intervalles de stockage-déstockage non- nécessairement inter-saisonniers. Le caractère innovant du projet tient à la précision que l'on pourra obtenir dans la modélisation i) du comportement d'un massif rocheux dans la constitution d'un réservoir thermique pour l'injection d'énergie basse température issue de capteurs solaires thermiques, et ii) de sa capacité à restituer la chaleur stockée.

Programme de travail

Le projet envisage un site d'étude implanté sur les marnes sombres à intercalations gréseuses du synclinal du Bas-Agly (puissance de la formation d'ordre kilométrique), en dehors de tout aquifère ou de circulation d'eau dans des fractures. Le site d'étude est équipé de trois sondages géothermiques de 200 mètres de profondeur réalisés à proximité l'un de l'autre (pour approcher le comportement thermique du massif rocheux dans un champ de sondes), d'installations de capteurs solaires thermiques et d'aérothermes faisant fonction de dispositif de dissipation thermique. Le projet définit neuf tâches techniques principales, outre la tâche de coordination du projet : i) Identification du site d'étude, implantation et suivi des sondages, ii) Caractérisation détaillée de la fracturation du massif rocheux, iii) Instrumentation du massif rocheux et des sondes sur l'interface sonde-massif, iv) Dimensionnement et équipement des sondes géothermiques, des installations de circulation et instrumentation du fluide caloporteur, v) Equipement des capteurs solaires thermiques, des aérothermes et instrumentation, vi) Modélisation du comportement thermique du massif et du transfert thermique sonde massif, vii) Modélisation du stockage et déstockage de l'énergie thermique, viii) Suivi du stockage et déstockage thermique sur deux cycles annuels complets, ix) Valorisation et diffusion des résultats du Projet.

La durée totale du projet est de 36 mois. Le projet prévoit la tâche de suivi du stockage et déstockage thermique sur deux cycles annuels complets, et dispose d'une réserve de temps de près de deux mois calendaires pour la conduite de cette tâche. Cette marge de temps assure avec une quasi-certitude que deux cycles annuels complets seront bien observés pendant la durée du projet. Elle autorise également la possibilité d'acquérir un volume supplémentaire de mesures de terrain pour le cas où les tâches de modélisation le requerraient.

Le site d'étude, prévu dans les Pyrénées-Orientales, sera choisi à proximité d'installations publiques (mairies, écoles, etc.) afin que les sondes et les capteurs solaires thermiques puissent éventuellement être réutilisés par ces installations à l'issue du projet. Des collectivités où pourrait se localiser le projet ont montré dans le cadre de premiers contacts leur intérêt à accueillir le dispositif expérimental. Les forages ainsi que les capteurs solaires thermiques seront cédés aux propriétaires des terrains, ou feront l'objet le cas échéant d'une procédure d'abandon et de mise en sécurité. L'accord de cession des équipements sera établi pour permettre de poursuivre éventuellement un recueil des données de fonctionnement au-delà de la durée du projet.

Retombées scientifiques

A l'issue du projet, il est rédigé un guide de bonnes pratiques à destination des bureaux d'études précisant les caractéristiques optimales requises pour qu'un massif rocheux puisse être utilisé pour le stockage de l'énergie thermique produite par une installation solaire : nature géologique et volume de massif rocheux concerné, modélisation en fonction du contexte géologique, profondeur des sondes d'injection de l'énergie thermique, quantité d'énergie thermique pouvant être stockée puis récupérée, dynamique optimale de stockage et déstockage de l'énergie thermique. Les résultats expérimentaux sur la capacité d'un massif rocheux à stocker puis à déstocker de façon optimale l'énergie thermique basse température permettra de compléter l'information géologique pouvant être fournie aux concepteurs d'installations géothermiques. Solargeotherm va permettre également de faire évoluer un savoir-faire sur la gestion des systèmes à énergie renouvelable mono-source vers des systèmes hybrides (solaire et géothermie), et de mettre en place de nouveaux algorithmes de gestion de l'énergie dans le secteur du mix-énergétique en plein développement. Les résultats du projet pourront par ailleurs être en partie transposés dans le cadre des procédés de stockage dans un milieu naturel de l'énergie thermique pour les centrales électriques solaires, permettant une valorisation des résultats du projet dans un autre champ d'application du secteur économique en plein expansion. Enfin, Solargeotherm permettra à l'entreprise Dominguez-Energie de se spécialiser en temps que bureau d'études pour le chauffage et le rafraîchissement par géothermie, et participera au développement de l'entreprise et à la création de nouveaux emplois.

Informations diverses

Le projet comporte 4 partenaires :

- le Bureau de Recherche Géologique et Minière, coordinateur du projet,
- le Laboratoire Procédés et matériaux pour l'Energie Solaire (PROMES),
- l'entreprise Dominguez-Energie,
- et le laboratoire ELIAUS.

Le projet a débuté au mois de Décembre 2008. Un doctorant a été recruté pour ce travail, Julien NOU sous la direction de M. Polit et T. Talbert. Un financement de 500 000€ a été obtenu pour l'ensemble des partenaires.

VI. Système Embarqué de Monitoring et de Contrôle Modulaire - OSEO-Anvar 2009 -

Objectifs

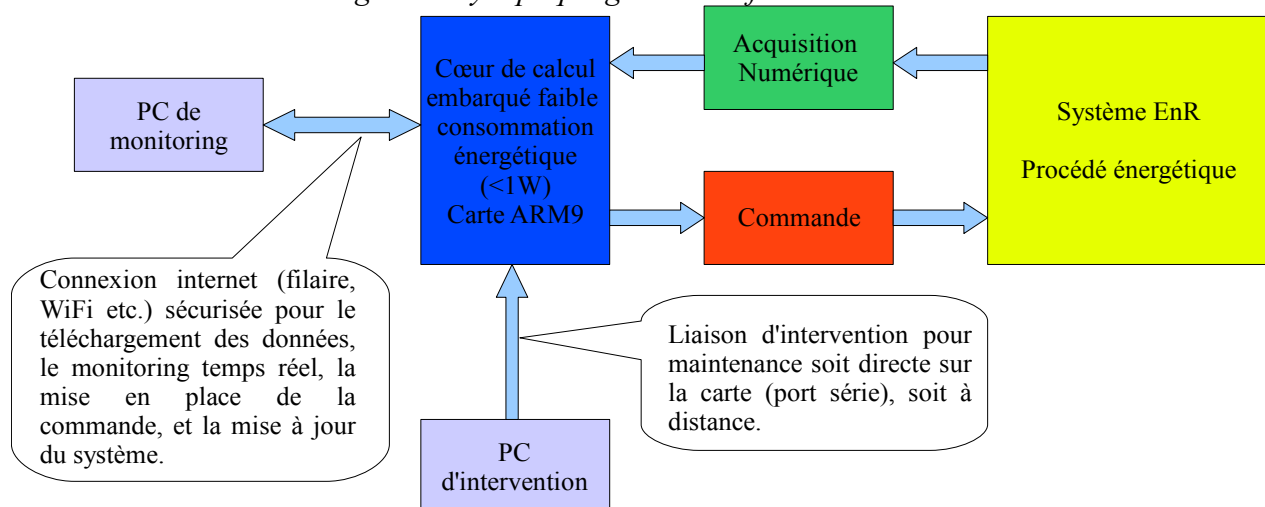
Mon travail sera de mettre en place ce dispositif, qui devra inclure par défaut les points suivants :

- l'acquisition de données,
- la mesure temps réel,
- la commande d'actionneurs (interrupteurs, moteurs, vannes, etc.),
- la télégestion sécurisée (permettant la protection du système vis à vis de toutes interventions extérieures malveillantes),
- la stockage des informations mesurées et calculées,
- l'utilisation de composants faible consommation.

Ma première tâche sera la réalisation d'un nouveau cahier des charges pour un système entièrement numérique : communication, capteurs etc. ajout de plus d'une trentaine d'entrées/sorties etc. afin d'offrir une flexibilité plus grande au niveau de la connectique mais aussi au niveau de l'adaptabilité logicielle (Figure 7). Ce système s'articule autour d'un cœur numérique basse consommation. Les processeurs ARM offrent une solution faible coût pour les systèmes électronique embarqués. Commercialisés sous forme de kits de développement, les cartes à bases de processeurs ARM9 correspondent parfaitement à nos applications.

Architecture du dispositif

Figure 7: Synoptique général de fonctionnement.



Ce noyau numérique permet de faire l'acquisition des capteurs suivant plusieurs protocoles de communication (I2C, SPI, CAN etc), et notamment le bus 1-wire. De nombreux capteurs (température, humidité, pression etc.) et actionneurs utilisent ce protocole, ce qui permet un large choix d'applications. Il sera nécessaire par la suite que le système embarqué puisse communiquer les données récupérées. Le protocole TCP/IP sera choisi, en plus des transferts RS232 nécessitant un déplacement physique sur le lieu où les cartes seront installées.

Cette communication devra se faire à l'aide de protocoles sécurisés afin d'assurer une intégrité des informations transmises et celles stockées sur la carte. Des options de mise à jour complète (OS et programmes) et partielle devra être intégrée par défaut dans le système pour assurer une pérennité à long terme des applicatifs. L'ensemble logiciel sera développé à l'aide de briques logicielles libres pour assurer : (i) un « time to market » le plus court possible, (ii) une longévité du code, et (iii) un transfert facilité en cas de migration sur un autre système plus moderne.

5 prototypes vont être étudiés et réalisés, pour démontrer la faisabilité et l'adaptabilité du système proposé :

- 1 système autonome sur plus d'un mois du point de vue énergétique,
- 1 système embarqué sous contraintes sévères (pression, corrosion etc.),
- 1 système de monitoring temps réel,
- 1 système de régulation autonome

- et 1 système de configuration à distance et sécurisé.

L'entreprise Dominguez-énergie a proposé 2 sites d'essais pour valider le concept (tâche 1c).

Si les résultats de cette partie sont concluant :

- des adaptations seront effectuées pour des installations géothermiques spécifiques (tâche 2) et des installations sous contraintes (tâche 4),
- et le suivi correspondant sera mis en place pour une durée de 24 à 36 mois.

Si cette action est concluante, la plateforme développée permettra de :

- servir d'interface avec les équipes de R&D des entreprises (si elles existent),
- proposer une plateforme de développement commune aux projets afin de minimiser les coûts de développement et le « time to market »,
- servir de transfert de technologie.

Planning

Tâche	Début	Durée	Description
1	T_0	6 mois	<i>Design électronique et Prototypage</i> Réalisation de 5 prototypes
1a	T_0	3 mois	<i>Étude et conception électronique</i>
1b	$T_0 + 3$ mois	3 mois	<i>Élaboration des prototypes</i>
1c	$T_0 + 5$ mois	1 mois	<i>Essais sur site</i> 2 sites sont en cours d'évaluation pour un test en grandeur nature.
2	$T_0 + 5$ mois	4 mois	<i>Installation sur site géothermique</i> Adaptation du système précédant (adaptation du logiciel) pour l'entreprise Dominguez-Énergie (Partenaire de l'ANR SolarGeotherm). 7 installations ont été choisies avec notre partenaire, représentant un ensemble hétérogène et permettant un aperçu de la quasi-totalité des installations géothermiques qu'il est possible de mettre en œuvre.
3	$T_0 + 5$ mois	24-36 mois	<i>Suivi des installations</i> Le suivi des installations permettra à l'entreprise Dominguez-Énergie et au laboratoire de mettre en place un bureau d'étude pour les installations géothermiques.
4	$T_0 + 7$ mois	4 mois	<i>Installation marine</i> Adaptation du système (ajout d'entrées/sorties spécifiques) pour un laboratoire marin. Collaboration avec le laboratoire CNRS Arago de Banyuls-sur-Mer.
5	$T_0 + 7$ mois	24-36 mois	<i>Suivi du système</i> Suivi de la bouée et ré-calibration du système (hardware et software) en fonction de l'usure.
6	$T_0 + 7/12$		Suite aux demandes des entreprises Selecom et Ensto, une étude sera

	mois		menée pour utiliser le socle développé à la tâche 1 et couplé à une série de capteurs, actionneurs et système de communication spécifiques.
--	------	--	---

Informations diverses

Ce projet a débuté au mois de Juin 2009 et a obtenu de la part d'OSEO-Anvar un financement de 3 000€.

VII. System in Package - Bonus Qualité Recherche (BQR) 2009

Objectifs

L'objectif est de permettre une intégration complète de la mesure à la commande dans un « Système in Package » sur une installation de mix-énergétique (solaire et géothermie). Le dispositif développé doit permettre :

- l'acquisition de données
 - de températures dans le forage à partir d'un OTDR (Optical Time-Domain Reflectometer). Le support d'acquisition et de transmission de l'information utilisé est la fibre optique.
 - de température, de paramètres environnementaux et de consommation électrique tant au niveau de la pompe à chaleur (PAC) que de la consommation énergétique de l'habitation.
- Le stockage (sur plusieurs mois) et le transfert de l'information.
- Le calcul de paramètres inhérents à une installation de mix-énergétique (calcul de COP et de performance énergétique en temps réel).
- L'intégration directe de la commande (correcteur et prédiction de charge).

le tout disponible dans un seul et unique « package ».

La problématique à résoudre est

- de placer sur un seul support l'ensemble des éléments précédents,
- d'intégrer sur un processeur l'algorithme de commande tout en disposant d'une « puissance » équivalente à celle utilisée au laboratoire (processeur double cœur),
- et d'avoir un système faible consommation électrique.

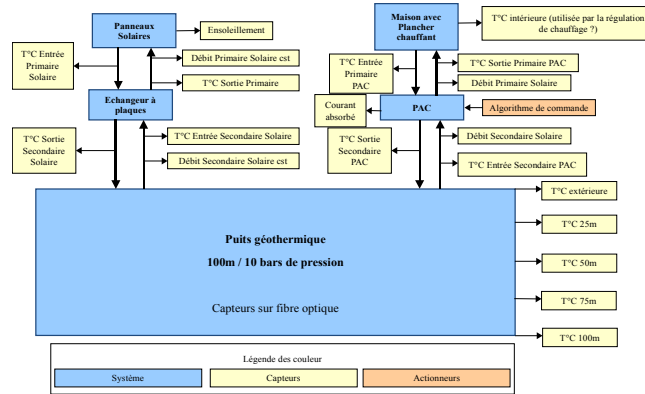
Pour cela va être mené en parallèle 2 développements

- le premier matériel : choix du/des processeurs et des interfaces à utiliser. Pour cela le choix se porte sur un couple processeur ARM9 (série i.MXL ARM920T) et FPGA (Field Programmable Gate Array). Le rôle de l'ARM9 sera (i) la communication (Web, ssh), (ii) l'acquisition et le stockage de données, (iii) le calcul temps réel du COP de la pompe à chaleur (PAC) et les indices de performances énergétiques, (iv) la commande d'actionneurs en particulier sur la PAC et (v) l'interface homme/machine sur écran tactile. Celui du FPGA, en tant que processeur spécialisé, sera les calculs (i) des déconvolutions provenant de l'OTDR et (ii) de la commande prédictive (MPC), RST, IA, ou par modes glissants. Ces choix devront prendre en compte le fait que l'enveloppe thermique doit être la plus faible possible (<10W) tout en garantissant une discrétion énergétique importante.
- le deuxième « logiciel » : A l'intérieur du FPGA sera généré 2 cœurs de calculs spécialisés pour (i) la déconvolution et (ii) la commande. La génération de ces 2 cœurs va nécessiter la collaboration étroite des 2 groupes du laboratoire (électronique embarquée et automatique), afin d'obtenir des performances de calcul les plus proches d'un processeur généraliste (style double cœur) mais à fréquence plus faible.

Le système ainsi réalisé sera mis en place sur l'installation présentée ci-après.

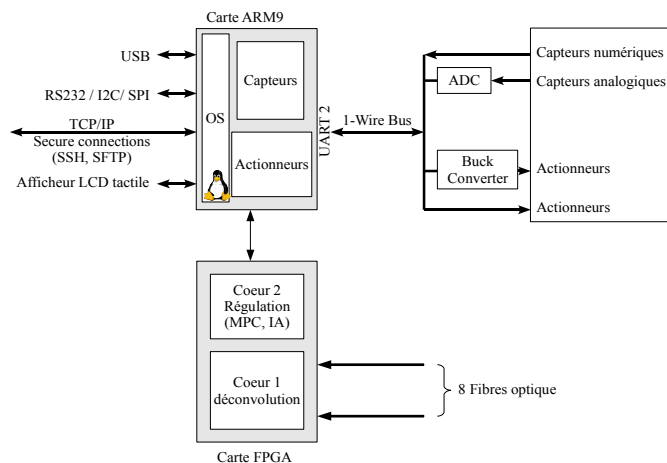
Installation à EnR

L'installation à superviser et à contrôler se situe à St Pierre dels Forcats. Elle est suivie depuis plus de 18 mois par le laboratoire ELIAUS. Cette installation va nécessiter une « rénovation » complète de l'électronique pour assurer les nouveaux critères de supervision et les développements futurs.



Synoptique du prototype SiP à réaliser

Le synoptique de fonctionnement est donné ci-dessous. Le SiP doit satisfaire un certain nombre de règles comme (i) le faible encombrement, (ii) la faible consommation en fonctionnement (<10W) comme en veille (<2W) et (iii) la possibilité d'une installation fixe ou portable.



Planning du projet

Le planning du projet (donné à titre indicatif) est le suivant :

- **phase 1** (T_0) : Modification de l'installation de St Pierre pour une acquisition tout numérique
- **phase 2** ($T_0 + 2$ mois) : Prototypage du SIP
 - *phase 2a* : Choix et intégration des actionneurs
 - *phase 2b* : Développement de l'HIM sur un écran LCD tactile
 - *phase 2c* : Couplage avec la carte FPGA.
 - *phase 2d* : Développement du cœur n°1 déconvolution.
- **phase 3** ($T_0 + 2$ mois) : Étude de l'installation
 - *phase 3a* : Modélisation de l'installation.
 - *phase 3b* : Mise en place de règles de régulation.

- **phase 4** ($T_0 + 8$ mois) : Installation des fibres optiques dans les forage et de l'OTDR
- **phase 5** ($T_0 + 10$ mois) : Mise en place des algorithmes de régulation du système (cœur n°2 régulation) et implantation sur l'installation du système temps réel.
- phase 6** ($T_0 + 12$ mois) : Optimisation et miniaturisation du système. Éventuellement installation sur d'autres sites.

Informations diverses

Ce projet débutera au second semestre de 2009 (Octobre/Novembre) et à obtenu un financement de 15 0000€ de l'UPVD.

Publications

Revues internationales avec comité de lecture

- J. Eynard, J. Nou, **T. Talbert**, S. Grieu, A. Dominguez, « *Coupling of renewable energy sources: Application to a geothermal and thermal solar installation* », Renewable energie Elsevier, Article soumis
- **T. Talbert**, B. Paris, F. Thiery and D. Gachon, « Remote building mock-up for energy efficiency », IEEE transaction on Learning Technologies, Article soumis
- B. Paris, **T. Talbert**, J. Eynard, S. Grieu, « *Heating controls for energy management in buildings* », Control Engineering Practice Elsevier, Article soumis.
- **T. Talbert**, C. Joubert, N. Daudé, T. Martiré, L. Nativel, M. Marchetti, D. Gasquet, M. Castagné, P. Falgayrettes, « *Near-Field Electromagnetic Tomography Applied to Current Density Reconstruction in Metallized Capacitors* », Janvier 2005, V20 N1, IEEE Transaction on Power Electronics
- **T. Talbert**, L. Nativel, T. Martiré, S. Faucher, C. Joubert, N. Daudé , « *Application of inverse problems to current density reconstruction inside components* » Janvier 2005, Lett. 86, 044104, Applied Physics Letters
- **T. Talbert**, C. Joubert, N. Daudé & C. Glaize, « *High frequency model of stacked film capacitors* », European Physical Journal of Applied Physics Novembre 2001, p105-112.

Congrès internationaux avec comité de lecture

- J. Eynard, B. Paris, S. Grieu, **T. Talbert** et F. Thiery, « *Control strategies for managing energy in a building mock-up* », 11th International Building Performance Simulation Association Conference and Exhibition BS 2009, Glasgow, Ecosse, 27-30 Juillet 2009.
- B. Paris, **T. Talbert**, J. Eynard, S. Grieu, A. Traoré et M. Polit, « *On-line monitoring station for energy diagnosis in buildings* », 11th International Building Performance Simulation Association Conference and Exhibition BS 2009, Glasgow, Ecosse, 27-30 Juillet 2009.
- B. Paris, **T. Talbert**, M. Caussanel, « *Monitoring system for energy managment in buildings* », 4th Canadian Solar Building Conference, 25-27 June 2009, Toronto, Canada.
- **T. Talbert**, B. Paris, J. Eynard, S. Grieu, O. Fruchier, « *Lab-scale prototype for on-line monitoring and energy diagnosis in buildings* », Conférence internationale Renewable Energies and Eco-Design in Electrical Engineering iREED08, Montpellier, Décembre 2008.
- B. Paris, J. Eynard, F. Thiery, A. Traoré, **T. Talbert**, S. Grieu « *Fuzzy-PID control for multisource energy management in buildings* », Conférence internationale Renewable Energies and Eco-Design in Electrical Engineering iREED08, Montpellier, Décembre 2008
- B. Paris, J. Eynard, G. François, **T. Talbert**, M. Polit. « *A prototype for on-line monitoring and control of energy performance for renewable energy buildings* », ICINCO 2008, 5th International Conference on Informatics in Control, Automation & Robotics, Funchal, Portugal, Mai 2008.
- L. Nativel, **T. Talbert**, M. Marchetti, D. Gasquet, M. Castagné, P. Falgayrettes, C. Joubert, N. Daudé, C. Glaize, « *Near-Field Electromagnetic Tomography* », ICONIC 2003, Rouen.
- **T. Talbert**, L. Nativel, C. Joubert, N. Daudé, D. Gasquet, M. Castagné, C. Glaize, « *Current density computation inside a capacitor by inverse problem* », Electrimacs, Août 2002,

Montreal.

- **T. Talbert**, C. Joubert, N. Daudé & C. Glaize, Circuits, Systems, « *Low frequency model of stacked film capacitors inductance* », Communications and Computers Juillet 2000, Athènes, p194-199, ISBN : 960-8052-17-3.

Revue nationale avec comité de lecture

- B. Paris, J. Eynard, F. Thiery, A. Traoré, M. Polit, **T. Talbert**, « Travaux pratiques sur la gestion énergétique optimale d'un bâtiment EnR », J3eA 8, 1006 (2009) DOI: 10.1051/j3ea:2008047
- A. Chaehoi, S. Grieu, **T. Talbert**, B. Claudet and C. Joubert « *Utilisation de Maple V dans l'enseignement de l'automatique* », J3eA 5, (2006) DOI: 10.1051/j3ea:200618
- T. Talbert, « Le calcul formel en Traitement du signal avec Maple V », J3EA Vol. 3 (2004) 2, référence électronique : <http://dx.doi.org/10.1051/bib-j3ea:2004002>

Congrès nationaux avec comité de lecture

- B. Paris, J. Eynard, F. Thiery, A. Traoré, M. Polit, **T. Talbert**, « Travaux pratiques sur la gestion énergétique optimale d'un bâtiment EnR », Colloque sur l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes, Bruxelles, Novembre 2008
- O. Faugeron, B. Claudet, **T. Talbert**, « *Initiation aux techniques inverses -Application à la caractérisation thermique d'un matériau* », Colloque sur l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes, Bruxelles, Novembre 2008
- B. Paris, J. Eynard, G. François, **T. Talbert**, F. Thiéry, M. Polit, « *Gestion des ressources énergétiques d'un bâtiment : contrôle neuroflou* », Conférence francophone IBPSA France 2008 (International Building Performance Simulation Association), Lyon, France, 6 & 7 Novembre 2008.
- B. Paris, **T. Talbert**, M. Polit, « *Système de gestion énergétique multi-sources dédié au bâtiment* », 6ème colloque Capteurs, Bourges, Mars 2008
- **T. Talbert**, M. Caussanel, A. Perona, M. Polit, J. Boibessot, N. Colombain, « *L'électronique embarquée des systèmes EnR en enseignement* », Colloque sur l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes, Bordeaux, Novembre 2007
- M. Roba, JM. Banus, **T. Talbert**, O. Faugeron, B. Claudet, S. Benet, JJ. Serra, « *Etude de fiabilité de composants électroniques par microscopie photothermique* », C2i 07, Colloque Interdisciplinaire en Instrumentation, Nancy, Novembre 2007
- M. Roba, B. Claudet, **T. Talbert**, O. Faugeron, S. Benet, JJ. Serra, « *Caractérisation thermophysique et étude de fiabilité de composants électroniques* », Société Française de Thermique, Mai 2007
- **T. Talbert**, L. Nativel, C. Joubert, N. Daudé, D. Gasquet, M. Castagné, C. Glaize, « *Utilisation de la tomographie électromagnétique pour la détermination de la densité de courant à l'intérieur d'un condensateur* », Electrotechnique de Puissance du Futur, Novembre 2002, Montpellier, p173-178.
- T. Martiré, C. Joubert, **T. Talbert**, C. Glaize, B. Rouvière, « *Système modulaire de*

conversion d'énergie au fil du soleil pour le pompage et l'injection réseau », Electrotechnique de Puissance du Futur, Novembre 2002, Montpellier, p287-292.

- T. Martiré, C. Joubert, **T. Talbert**, C. Glaize, B. Rouvière, « *Modélisation statique et dynamique d'un système de pompage au fil du soleil* », Génie Electrique Vie et Qualité, Juin 2002, Marseille, p55-59.
- **T. Talbert**, « *Le calcul formel en Traitement du signal avec Maple V* », Colloque sur l'Enseignement des Technologies et des sciences de l'information et des systèmes 2001 à Clérmont-Ferrand, p345-348, ISBN : 2-9517528-0-6.
- A. Chaehoi, **T. Talbert**, C. Joubert, « *Le calcul formel avec Maple V, un complément pour l'enseignement des asservissements* », Colloque sur l'Enseignement des Technologies et des sciences de l'information et des systèmes 2001 à Clérmont-Ferrand, p105-108, ISBN : 2-9517528-0-6.
- **T. Talbert**, « *Modèle haute fréquence des condensateurs métallisés bobinés aplatis* », Jeunes Chercheurs en Génie Electrique 2001, Avril 2001, Nancy, p239-243.
- **T. Talbert**, C. Joubert, N. Daudé & P. Merle, « *Modèle basse fréquence de l'inductance parasite des condensateurs CMS* », Electronique de Puissance pour le Futur, Novembre 2000, Lille, p121-126, ISBN : 2-9512309-2-3.

Éditeur

- M. Polit, **T. Talbert**, B. Lopez, J. Meléndez, « *Artificial intelligence Research and development* », Septembre 2006, IOS Press, ISBN : 1-58603-663-7

Conférences nationales sans comité de lecture

- **T. Talbert**, « *Optimisation de condensateurs pour l'électronique de puissance* », Journées des Doctorants 2001, Montpellier, p66-69.

Publications/Présentations invitées

- **T. Talbert**, « *Systèmes combinés -solaires, géothermie, méthanisation, bois énergie- Quel avenir pour la multi-génération?* », Conférence DERBI, Perpignan, 11-12 Juin 2009
- **T. Talbert**, « *Étude, DPE et potentiel d'énergies renouvelables d'un site* », URIS-LR (Union Régionale des Ingénieurs et des Scientifiques du Languedoc – Roussillon), Journée de l'Ingénieur et du Scientifique, Perpignan, 23 janvier 2009
- **T. Talbert**, G. François, « *Gestion de l'énergie pour les bâtiments et l'industrie* », Séminaire PROMES-ELIAUS, 20 juin 2008.
- **T. Talbert**, L. Nativel, N. Daudé, D. Gasquet, P. Falgayrettes, M. Castagné, C. Joubert, « *Tomographie électromagnétique de condensateurs* », Association ECRIN action CRIN, Janvier 2003.