



HAL
open science

Etude du confort et de gestion d'un ensemble hétérogène de dispositif de collecte, de stockage et distribution d'énergie renouvelable pour l'habitat

Gérard Tchakblo Aboïna

► **To cite this version:**

Gérard Tchakblo Aboïna. Etude du confort et de gestion d'un ensemble hétérogène de dispositif de collecte, de stockage et distribution d'énergie renouvelable pour l'habitat. Autre. Université Paris-Est; Institut National Supérieur du Sahara et du Sahel d'Iriba, 2020. Français. NNT : 2020PESC0033 . tel-03255143

HAL Id: tel-03255143

<https://theses.hal.science/tel-03255143v1>

Submitted on 9 Jun 2021

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

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

THESE

Présentée en vue de l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE PARIS-EST CRETEIL

Ecole Doctorale SIE-UPE
Sciences, Ingénierie et Environnement

SPECIALITE : Science de l'ingénieur

Par :

ABOINA Gérard Tchakblo

**Etude du confort et de gestion d'un ensemble
hétérogène de dispositif de collecte, de stockage et
distribution d'énergie renouvelable pour l'habitat**

Thèse préparée au
Centre d'Etudes et de Recherche en Thermique, Environnement et Système (CERTES),
Soutenue le 29 janvier 2020 devant le jury composé de :

- Examinatrice : Pascale Chelin, Maitre de Conférence, HDR, Université Paris-Est Créteil
- Examineur : Mamadou Bailo Camara, Maitre de Conférence, HDR, Université du Havre
- Rapporteur : Cristian Nichita, Professeur, Université du Havre
- Rapporteur : Amadou Seidou Maiga, Professeur, Université Gaston Berger
- Directeur de thèse : Gilles Lefebvre, Professeur, Université Paris-Est Créteil
- Co-Directeur : Abakar Mahamat Tahir, Professeur, Université de Mongo
- Encadreur : Mahamadou Abdou Tankari, Maitre de Conférence, Université Paris-Est Créteil

REMERCIEMENTS

Au terme de mes travaux de thèse réalisés au laboratoire CERTES, il serait un sacrilège de me dérober à cette tradition, de remercier tous ceux qui ont rendu possible l'aboutissement de ce mémoire directement ou indirectement. A cet effet, j'adresse d'abord mes vifs remerciements au jury qui a bien voulu évaluer la synthèse de trois années de travaux. En particulier aux examinateurs Monsieur Mamadou Bailo Camara et Madame Pascale Chelin, aux rapporteurs qui ont décortiqué ce mémoire en vue de son amélioration et sans oublier, les autres membres qui ont sacrifié leur temps pour parcourir le document afin de relever d'éventuels manquements, erreurs et omissions.

Je formule mes chaleureux remerciements à mon directeur de thèse Gilles Lefebvre, à mon co-directeur Abakar Mahamat Tahir et à mon encadreur Mahamadou Abou Tankari qui ont eu confiance en moi, en m'acceptant comme doctorant et me donnant l'opportunité de travailler sur une thématique fort intéressante et d'actualité qu'est la consommation énergétique des bâtiments. Qu'ils trouvent ici, l'expression de ma profonde gratitude pour leur appui scientifique et leur disponibilité à mes diverses sollicitations. Je remercie la directrice du CERTES, Evelyne Géhin de m'avoir accepté dans son laboratoire et surtout pour ses efforts de faciliter l'intégration et l'implication des doctorants dans la vie du laboratoire.

Mes remerciements vont à l'endroit de ma famille et mes parents pour leur soutien inconditionnel et multiforme et ont supporté mes absences répétées et périodiques du carcan familial pour des séjours alternés entre le Tchad et la France pour mes travaux. C'est lieu ici aussi de remercier le Gouvernement français à travers le Service de la Coopération et d'Action Culturelle (SCAC) de l'ambassade de France au Tchad qui m'a octroyé la bourse, rendant possible le démarrage de mes travaux de thèse doctorale.

Sur le plan professionnel, je remercie toute la hiérarchie de mon Ministère de tutelle en général, les différents directeurs généraux de mon institution en particulier, de m'avoir souvent accordé des autorisations de formation dans le cadre de mes travaux doctoraux.

Je tiens à remercier particulièrement mon ami et frère, le cardiologue au centre hospitalier et universitaire d'Alençon Dr. Djita Ngardjibem et sa famille, pour leur hospitalité dont j'ai bénéficié. Que Dieu, le tout puissant les bénisse richement.

J'adresse un remerciement tout particulier à mon ami, Badawi Younous Mohammed qui a toujours fait preuve de compréhension envers moi lorsque je traversais de moments difficiles. Merci pour tes inconditionnels soutiens multiformes pour l'aboutissement de mes travaux. Je remercie également mon cousin et frère Yamtou Banangassou Isaac qui m'a rendu agréable mon séjour en Ile-de-France, par des moments de partage de ses riches expériences de la vie.

Pour finir, je n'oublie pas tout le personnel du laboratoire CERTES, en particulier la secrétaire Corine Costeaux, les docteurs et doctorants que j'ai eu à côtoyer et côtoie encore pour certains, je pense à Lyes Ait Ali Yahia, Rachid Ouaret, Zeinabou Nouhou Bako, Marou Garba, Olfà Gam, Jura Arkhangelski, Mohamed Moussa, Khamis Youssouf et bien d'autres personnes.

DEDICACE

*A vous mes parents,
Je vous dédie ce travail pour tous les sacrifices
Que vous avez consentis pour faire de moi,
Ce que je suis maintenant.*

RESUME

De nos jours, les enjeux énergétiques et environnementaux auxquels fait face l'humanité, sont accentués par la croissance démographique mondiale. A cet effet, on assiste inexorablement à l'épuisement des ressources énergétiques assorties des conséquences climatiques. Il ressort des études scientifiques que, dans le monde, le secteur des bâtiments est l'un des plus gros consommateurs d'énergie, avec un pourcentage situé entre 40 à 50% de la consommation annuelle. Afin de réduire ce gouffre énergétique que constitue le bâtiment avec tous ses corollaires que sont la pollution atmosphérique, le réchauffement climatique et autres, plusieurs normes régissant la construction des bâtiments ont été mises en place en France dont la dernière est la RT2012. Elle vise à accompagner les concepteurs à réaliser des bâtiments modernes garantissant le confort thermique et moins énergivores. Et donc, l'objectif final de cette réglementation thermique est de réaliser non seulement des bâtiments basse consommation mais des bâtiments zéro énergie à l'horizon 2050, intégrant du matériel solaire photovoltaïque et thermique renouvelable.

C'est dans cette optique que s'est inscrit notre sujet de thèse dont l'objectif est de développer des outils et techniques permettant de choisir des équipements appropriés au chauffage solaire de bâtiment d'une part, de gérer ces ressources solaires renouvelables d'autre part. Ainsi, les systèmes thermo-electriques couplés par une pompe à chaleur étudiés dans nos travaux, nous amènent à structurer notre mémoire de thèse en deux grandes parties : thermique et électrique.

Dans la première partie, il a été question de la conception d'un outil d'aide aux décisions. La conception de l'outil résulte de l'analyse des paramètres influençant la performance énergétique du bâtiment. Des recherches bibliographiques ont permis de développer et choisir des modèles pertinents des composants du système thermique de chauffage. L'agrégation et l'implémentation des modèles dans l'environnement Matlab/Simulink ont permis de réaliser cet outil de dimensionnement. La démarche d'optimisation multicritère de ce dernier est basée sur une approche statistique dont les fonctions « objectif » sont en corrélation avec le confort thermique et la consommation d'énergie électrique. Une méthode d'analyse des résultats mise en place a permis de trouver plusieurs solutions optimales dont une seule est retenue.

La seconde partie de la thèse traite du développement d'un algorithme de gestion visant à superviser et commander un système multi-sources d'énergies comprenant le photovoltaïque et l'éolien avec unité de stockage, batteries. C'est un algorithme intelligent réalisé à partir de la logique floue dont les variables d'entrées sont constituées de la puissance photovoltaïque, la puissance éolienne, l'état de charge des batteries et le profil de sollicitation de charges. Il est utilisé dans le cas d'étude aux sollicitations de la pompe à chaleur servant d'interface du système de chauffage du bâtiment

Mots clés : Energies renouvelables, Chauffage, Bâtiments, Confort, Optimisation multicritère du dimensionnement, Système, Logique floue, Méthodes de gestion, Matlab/Simulink.

ABSTRACT

Our days, the energy and environmental challenges facing humanity are accentuated by global population growth. Thereby, we are witnessing inexorably the exhaustion of energy resources with climatic consequences. Scientific studies show that the building sector in the world is one of the largest consumers of energy, with a percentage between 40% and 50% of annual consumption. In order to reduce this energetic chasm that constitutes the building with all its corollaries that are air pollution, global warming and others. Several standards governing the construction of buildings have been put in place in France, the last of which is RT2012. It aims to accompany designers to build modern buildings that guarantee thermal comfort and reduce energy consumption. And so, the ultimate goal of this thermal regulation is to achieve not only low-energy buildings but zero energy buildings by 2050, incorporating renewable solar photovoltaic and thermal equipment.

It is in this perspective that our thesis topic has been written, the objective of which is to develop tools and techniques allowing the choice of equipment suitable for solar heating of building on one hand, to manage these renewable solar resources of somewhere else. Thus, thermo-electric systems coupled by a heat pump studied in our work, leads us to structure our dissertation in two major parts : thermal and electrical. In the first part, we talked about designing a decision support tool. The design of the tool results from the analysis of the parameters influencing the energy performance of the building. Bibliographic research has led to the development and selection of relevant models of the components of the thermal heating system. The aggregation and implementation of the models in the Matlab/Simulink environment made this sizing tool possible. Its multi-criteria optimization approach is based on a statistical approach whose "objective" functions are correlated with thermal comfort and electrical energy consumption. A method of analysis of the results put in place made it possible to find several optimal solutions of which only one is retained.

The second part of the thesis deals with the development of a management algorithm to supervise and control a multi-source energy system including photovoltaic and wind turbine with storage unit, batteries. It is an intelligent algorithm based on fuzzy logic including input variables consisting of photovoltaic power, wind power, battery charge status and load profile. It is used in the study case to the solicitations of the heat pump serving as interface of the heating system of the building

Key words : Renewable energies, Heating, Buildings, Comfort, Multicriterion optimization of sizing, System, Fuzzy logic, Management methods, Matlab/Simulink.

LISTE DES FIGURES

Figure I-1: Profil de consommation de l'énergie primaire totale mondiale (en million de Tep) par source [8].....	7
Figure I-2: Consommation moyenne d'énergie primaire par habitant et par an [37].....	8
Figure I-3: Emission mondiale de gaz à effet de serre anthropique [38].....	8
Figure I-4: Température globale moyenne estimée (°C) [37]	9
Figure I-5: Evolution et répartition par secteur de la consommation finale d'énergie primaire en France [11]	11
Figure I-6: Modes de transmission de chaleur entre le corps humain et son environnement [18].....	15
Figure I-7: Echelle de sensation thermique [46]	17
Figure I-8: Courbe d'évolution de PPD	17
Figure I-9: Carte de zone climatique de France	19
Figure I-10: Découpage géographique en huit zones climatiques par la RT2012.....	20
Figure I-11: Comparaison de l'énergie primaire conventionnelle des bâtiments depuis 1975	23
Figure I-12: Capacité électrique basée sur les énergies renouvelables de l'UE27, des pays BRICS et des sept pays de tête en 2011 [27].....	25
Figure I-13: Capacité mondiale totale du photovoltaïque solaire en 1995-2011 [29].....	26
Figure I-14: Capacité cumulée éolienne installée dans le monde [29].....	27
Figure I-15: Maisons à énergie positive, (a) Fellbach et (b) Freiburg [49]	29
Figure II-1: Synoptique du fonctionnement d'un système du chauffage [64]	32
Figure II-2: Modèle électrique RC d'un bâtiment monozone.....	41
Figure II-3: Coupe d'une enveloppe d'un bâtiment.....	42
Figure II-4: Exemple schématique du bâtiment doté des équipements solaire	44
Figure II-5: Schéma de principe d'une machine thermique.....	50
Figure II-6: Flux solaire et température ambiante extérieure sur période de chauffage.....	53
Figure II-7: Schéma de principe de la régulation à boucle ouverte.....	55
Figure II-8: Schéma de principe de la régulation en boucle fermée.....	55
Figure II-9: Diagramme de commande de la pompe solaire et l'appoint électrique.....	57
Figure II-10: Diagramme de commande de la pompe à chaleur	57
Figure II-11: Modélisation Simulink du système énergétique étudié.....	59
Figure II-12: Schéma synoptique de fonctionnement du simulateur.....	60
Figure II-13: Courbes des paramètres du système pour de valeurs maximales de températures et de COP	62
Figure II-14: Courbes des paramètres du système pour de valeurs minimales de températures et de COP	63
Figure II-15: Courbes des paramètres du système pour de valeurs moyennes de températures et de COP	63
Figure II-16: Courbes de consommation énergétique en fonction de la variation de flux	63
Figure III-1: Schéma de principe de la simulation dynamique	77
Figure III-2: Graphe de détermination de la taille d'échantillon	80
Figure III-3: Démarche d'analyse des solutions	81
Figure III-4: Courbes d'évolution du COP des différentes solutions.....	83
Figure III-5: Courbes d'évolution de la température de sortie des capteurs	84
Figure III-6: Evolution de température de sortie du réservoir.....	84
Figure III-7: Courbes d'évolution des températures de l'air ambiant intérieur (T_{ai}) et extérieur (T_{a1}) et flux solaire E_s	85

Figure III-8: Courbes d'évolution des températures de sortie des capteurs solaires T_{c2} et du réservoir T_{rs}	85
Figure III-9: Courbes d'évolution de la puissance E_{hp} et du COP de la PAC	86
Figure III-10: Courbe de la puissance thermique dissipée par les radiateurs	86
Figure IV-1: Architecture du système en général.....	92
Figure IV-2: Synoptique de la structure de la supervision et de gestion du système	100
Figure IV-3: Organigramme d'algorithme flou de gestion	107
Figure IV-4: Réponse d'algorithme pour le cas d'un ciel ensoleillé	109
Figure IV-5: Chronogramme de commande des relais résultant des fonctions d'appartenance dans le cas d'un ciel ensoleillé	110
Figure IV-6: Consommation énergétique cas d'un ciel ensoleillé	110
Figure IV-7: Réponse d'algorithme pour le cas d'un ciel couvert	111
Figure IV-8: Chronogramme de commande des relais résultant des fonctions d'appartenance dans le cas d'un ciel couvert ensoleillé	112
Figure IV-9: Consommation énergétique cas d'un ciel couvert	112
Figure IV-10: Plateforme expérimentale utilisée au CERTES.....	114
Figure IV-11: Courbes d'évolution temporelle des puissances des batteries et du PV.....	115
Figure IV-12: Courbes d'évolution temporelle des puissances fournies et reçues du réseau	115
Figure IV-13: Courbes de sollicitation des charges.....	115
Figure IV-14: Profils d'évolution de l'ensemble du système avec différentes phases de fonctionnement	116

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1: Objectifs individuels de limitation de gaz à effet de serre fixés par le protocole de Kyoto [15]	12
Tableau I-2: Exigences minimales de la RT2005 concernant la consommation d'énergie primaire	20
Tableau I-3: Comparaison des limitations de consommations d'énergie RT2005/RT2012.....	21
Tableau II-1: Valeurs de résistance thermique d'un ensemble paroi et isolant [51].....	34
Tableau II-2: Facteurs de qualité des différents niveaux de modélisations [48]	38
Tableau II-3: Taux de vitrage des façades du bâtiment.....	45
Tableau II-4: Capacités thermiques des différents nœuds du modèle thermique.....	45
Tableau II-5: Caractéristiques thermo-physiques de l'enveloppe.....	45
Tableau II-6: Données d'entrées et de sorties de l'outil de calcul.....	58
Tableau II-7: Résultats de simulation pour le cas de chauffage C_1	64
Tableau II-8: Résultats de simulation pour le cas de chauffage C_2	65
Tableau II-9: Résultats de simulation pour le cas de chauffage C_3	66
Tableau II-10: Résultats de simulation pour le cas de chauffage C_4	66
Tableau II-11: Synthèse des résultats dans différents cas de chauffage.....	67
Tableau III-1: Synthèse des solutions optimales possibles retenues	82
Tableau IV-1: Différents modes de fonctionnement du système	102
Tableau IV-2: Paramètres d'entrées du contrôleur	102
Tableau IV-3: Base de règles du contrôleur pour les SOC Bas (a), SOC Moyen (b), SOC Haut (c) et Légende des commandes (d)	108

SIGLES ET ABBREVIATIONS

AC	: Alternative Current
ADEME	: Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie
ASHRAE	: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers
BBC	: Bâtiments Basse Consommation
Bbio	: Besoin bioclimatique
BMU	: Bundesministerium fur Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit,
CC	: Courant Continu
Cep	: Consommation de l'énergie primaire
CERTES	: Centre d'Etude et de Recherche en Thermique, Environnement et Système
CFD	: Computational Fluid Dynamics
CCNUCC	: Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
CO₂	: Dioxyde de Carbone
COP21	: Conference of Party 21, la 21 ^{ème} édition a eu lieu à Paris
DC	: Direct Current
ECS	: Eau Chaude Sanitaire
ELD	: Entreprises Locales de Distribution
HVAC	: Heating, Ventilation and Air Conditioning
ISO	: International Organization for Standardization
kWh	: kilowattheure
kWh_{ep}/m².an	: kilowattheure d'énergie primaire par mètre carré à l'année
MW	: Mégawatt
NOCT	: Normal Operating Cell Temperature
OCDE	: Organisation de Coopération et de Développement Economique
PAC	: Pompe à Chaleur
PID	: Proportionnel, Intégrateur et Dérivateur
PMV	: Predicted Mean Vote
PNUE	: Programme des Nations Unies pour l'Environnement
PPD	: Predicted Percentage Dissatisfied
PV	: Panneaux Photovoltaïques
RC	: Résistance Capacité
RT2012	: Réglementation Thermique 2012
RTE	: Réseau de Transport d'Electricité

SET	: Température Effective Standard
SOC	: State Of Charge
Tep	: Tonne équivalent pétrole
TH-BCE	: Méthode de calcul Thermique, Besoin - Consommation -Eté
Tic	: Température intérieure de confort
TOR	: Tout Ou Rien
TWh	: TéraWattheure
VMC	: Ventilation Mécanique Contrôlée
WWF	: World Wide Fund For Nature

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	i
DEDICACE.....	ii
RESUME.....	iii
ABSTRACT	iv
LISTE DES FIGURES	v
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
SIGLES ET ABREVIATIONS	viii
TABLE DES MATIERES	x
INTRODUCTION GENERALE.....	2
CHAPITRE I :..... ENJEUX ENERGETIQUES ET CLIMATIQUES DES BATIMENTS	
6	
I.1 - INTRODUCTION.....	6
I.2 - CONTEXTE ENERGETIQUE ET ENJEUX CLIMATIQUES	6
I.2.1 - Contexte énergétique mondial.....	6
I.2.2 - Impact de consommations énergétiques.....	8
I.2.3 - Contexte énergétique en France	10
I.2.4 - Engagements internationaux et nationaux.....	12
I.3 - BATIMENT	13
I.3.1 - Confort thermique	14
I.3.2 - Modèles de confort.....	16
I.3.3 - Incidences énergétiques du confort	18
I.4 - REGLEMENTATION THERMIQUE.....	19
I.4.1 - Règlementation thermique 2005.....	19
I.4.2 - Règlementation thermique 2012.....	20
I.4.2.1 - Principaux critères.....	21
I.4.2.2 - Quantifications de principaux critères.....	21
I.4.2.3 - Critères de moyens	23
I.5 - ENERGIES RENOUVELABLES.....	24
I.5.1 - Energie solaire photovoltaïque.....	25
I.5.2 - Energie solaire thermique.....	26
I.5.3 - Energie éolienne.....	27
I.6 - EXEMPLES D'APPLICATIONS.....	28
I.7 - SYNTHESE ET CONCLUSION	30
CHAPITRE II : MODELISATION ET SIMULATION DU SYSTEME ENERGETIQUE D'UN	
BATIMENT 32	

II.1 - INTRODUCTION.....	32
II.2 - FACTEURS DE LA PERFORMANCE DU BATIMENT	33
II.2.1 - Environnement extérieur	33
II.2.2 - Enveloppe, parois et inertie	33
II.2.3 - Renouvellement d'air	35
II.2.4 - Gestion des apports énergétiques	35
II.2.5 - Confort hydrothermique.....	35
II.3 - CHOIX DE LA METHODE DE MODELISATION DU BATIMENT	36
II.4 - ETAT DE L'ART DE MODELE RC	39
II.5 - MODELISATION DU BATIMENT.....	40
II.5.1 - Modèle RC du bâtiment.....	40
II.5.2 - Formulation mathématique	43
II.5.3 - Présentation du bâtiment d'application	44
II.6 - MODELISATION DES SYSTEMES ENERGETIQUES	46
II.6.1 - Modèle de capteur solaire thermique.....	46
II.6.2 - Modèle d'un réservoir de stockage.....	48
II.6.3 - Modèle d'une Pompe à Chaleur	48
II.6.4 - Modèle de radiateur à eau chaude	50
II.7 - MODELISATION DE DONNEES METEOROLOGIQUES.....	52
II.7.1 - Modèle de radiation solaire	52
II.7.2 - Modèle de température ambiante	53
II.8 - SYSTEMES DE REGULATION.....	54
II.8.1 - Présentation générale de la régulation utilisée	55
II.8.1.1 - Régulation de la température du bâtiment.....	55
II.8.1.2 - Régulation de la température du réservoir	56
II.8.2 - Diagrammes synthétiques.....	56
II.9 - SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE	58
II.9.1 - Description du simulateur.....	58
II.9.2 - Principe de fonctionnement du simulateur	60
II.10 - RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	61
II.10.1 - Scenarios de l'outil	61
II.10.2 - Données utilisées	61
II.10.3 - Résultats des simulations.....	62
II.10.3.1 - Etude du cas des apports extérieurs.....	62
II.10.3.2 - Etude du cas des apports thermiques intérieurs.....	64
II.10.3.2.1 - Cas du chauffage C ₁ (lumière & présence humaine).....	64
II.10.3.2.2 - Cas du chauffage C ₂ (éclairage uniquement)	65

II.10.3.2.3 - Cas du chauffage C ₃ (pas d'apports internes)	65
II.10.3.2.4 - Cas du chauffage C ₄ (uniquement présence humaine).....	66
II.10.4 - Analyse de la synthèse des résultats	67
II.11 - CONCLUSION	68
CHAPITRE III : OPTIMISATION MULTICRITERE DU DIMENSIONNEMENT D'UN SYSTEME DE CHAUFFAGE	70
III.1 - INTRODUCTION.....	70
III.2 - REVUE DES LOGICIELS UTILISES EN THERMIQUE.....	71
III.3 - ANALYSE DES METHODES D'OPTIMISATION MULTICRITERE	73
III.4 - OPTIMISATION DU DIMENSIONNEMENT	75
III.4.1 - Critères d'optimisation	75
III.4.1.1 - Température moyenne ambiante de l'air.....	75
III.4.1.2 - Ecart-type de températures ambiantes.....	75
III.4.1.3 - Energie consommée	76
III.4.2 - Formulation du problème	76
III.4.3 - Description de la procédure d'optimisation.....	76
III.4.3.1 - Principe	76
III.4.3.2 - Choix d'une méthode d'optimisation adaptée au problème	78
III.4.3.2.1 - Caractéristiques du problème à traiter.....	78
III.4.3.2.2 - Choix de la méthode d'optimisation	78
III.4.4 - Définition des variables d'optimisation.....	79
III.4.5 - Taille de l'échantillon.....	79
III.5 - RESULTATS D'OPTIMISATION.....	81
III.5.1 - Hypothèses de dimensionnement	81
III.5.2 - Démarche d'analyse des résultats.....	81
III.5.3 - Résultats de simulation.....	82
III.5.3.1 - Solutions optimales	82
III.5.3.2 - Solution unique retenue.....	83
III.6 - EVALUATION DE LA SOLUTION RETENUE	85
III.7 - SYNTHESE ET CONCLUSION	88
CHAPITRE IV : GESTION DES SOURCES D'ENERGIE DU BATIMENT PAR LA LOGIQUE FLOUE	90
IV.1 - INTRODUCTION.....	90
IV.2 - GENERALITES SUR LES SYSTEMES MULTI-SOURCES.....	90
IV.3 - MODELISATION ENERGETIQUE DE SOURCES.....	92
IV.3.1 - Modèle du générateur photovoltaïque	93
IV.3.2 - Modèle de l'éolienne	93
IV.3.3 - Modèle du dispositif de stockage	94

IV.3.4 - Charges domestiques	95
IV.4 - METHODE DE GESTION PAR LA LOGIQUE FLOUE.....	96
IV.4.1 - Etat de l'art sur la gestion floue.....	96
IV.4.2 - Introduction au formalisme flou.....	97
IV.4.2.1 - Eléments de base du formalisme.....	98
IV.4.2.2 - Fuzzification	99
IV.4.2.3 - Inférence floue	99
IV.4.2.4 - Défuzzification	100
IV.4.3 - Développement d'un contrôleur	100
IV.4.3.1 - Stratégie de gestion	101
IV.4.3.2 - Algorithme flou de gestion	102
IV.4.3.2.1 - Base de connaissance	103
IV.4.3.2.2 - Fuzzification	104
IV.4.3.2.3 - Règles d'inférence	106
IV.4.3.2.4 - Défuzzification.....	106
IV.5 - APPLICATION DU CONTROLEUR A LA PAC	109
IV.6 - TESTS EXPERIMENTAUX	114
IV.7 - CONCLUSION	117
CONCLUSION GENERALE	119
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	123
ANNEXE 1	134
ANNEXE 2	135
ANNEXE 3	136
ANNEXE 4	137

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Partout dans le monde, les hommes sont en quête du confort thermique et/ou fonctionnel afin de faire face, soit à l'adversité climatique ou soit améliorer leur mode de vie quotidien par usage de matériel et équipements électriques (électroménagers, éclairages ou autres). Ledit confort est l'expression de besoins énergétiques des hommes qui passent 90% de leur temps dans un milieu intérieur, en l'occurrence les bâtiments. Par ailleurs, d'après les statistiques des Nations Unies, les populations du monde ne font qu'augmenter, avec de nos jours 7milliards d'habitants pour atteindre 9milliards en 2050. Cette croissance démographique va de pair avec la consommation énergétique. Or, les énergies consommées sont majoritairement d'origines fossiles impactant négativement l'environnement : pollution atmosphérique par le dioxyde de carbone (CO₂), réchauffement climatique, pluies acides, fonte des glaciers, etc. C'est pourquoi pour faire face à cette menace climatique mondiale, la communauté internationale a mis sur pied plusieurs instruments (la CCNCC, la COP, le Grenelle en France, etc.) et signé plusieurs engagements internationaux (accord de Kyoto, accord de Rio de Janeiro, etc.) dont leur objectif est de réduire les émissions des gaz à effets de serre en vue de limiter la hausse de température climatique à 2°C d'ici 2050. Ainsi, l'Europe s'est engagée dans cette voie en lançant le programme « 3x20 » c'est-à-dire augmentation de 20% de l'efficacité énergétique, diminution de 20% des émissions de CO₂, et enfin couverture de 20% des besoins énergétiques par des énergies renouvelables [1].

A l'échelle du monde, les bâtiments sont l'un des plus gros consommateurs d'énergie de tous les secteurs économiques, responsables de 40% de la consommation annuelle, et jusqu'à 50% si l'on inclut la consommation énergétique lors de la construction [2]. Outre le coût que cela provoque, la part des émissions de gaz à effet de serre liée à la consommation énergétique des bâtiments est évaluée à 30% alors que dans le même temps, la demande d'énergie devrait doubler à l'horizon 2050 [3]. Par conséquent, réduire les émissions de CO₂ de moitié devient une nécessité afin de limiter le réchauffement climatique. Il faut désormais faire face au double enjeu économique et environnemental, de mieux et moins consommer. Car si les bâtiments sont parmi les plus gros consommateurs d'énergie et les plus gros producteurs de gaz à effet de serre, l'on reconnaît en eux les plus forts potentiels pour délivrer d'importantes réductions des émissions par des actions à coût bas ou positif. En France, le secteur des bâtiments est responsable de près d'un quart de ces émissions de gaz à effet de serre [4]. A cet effet, plusieurs réglementations ont été mises en place, pour limiter ces rejets et inciter à construire de manière plus efficace. Les normes techniques règlementant la construction des bâtiments se sont succédées depuis 1974 jusqu'à nos jours où la réglementation thermique en vigueur est la RT2012. Elle cèdera bientôt la place à la RT2020. L'objectif de la RT2012 est de réduire substantiellement la consommation énergétique de bâtiment en faisant de lui, un producteur d'énergie par intégration des équipements solaires renouvelables. Du coup, passer du bâtiment basse consommation actuel au bâtiment à zéro énergie voire à énergie positive d'ici 2050. Construire des bâtiments plus économes en énergie, sans réduire le confort des habitations et sans induire d'impact négatif sur climat et la facture d'électricité des particuliers deviendra une obligation à cet horizon.

C'est pourquoi, de nos jours l'intégration de la technologie et des énergies renouvelables s'effectue progressivement non seulement aux grands réseaux électriques mais également dans les bâtiments. Ces derniers sont plus modernes en faisant la part belle à la technologie. Les énergies renouvelables deviennent une partie intégrante d'un bâtiment qui comporte un chauffe-eau solaire thermique, des panneaux solaires photovoltaïques et/ou l'éolien urbain pour la production d'électricité avec une unité de stockage d'énergie. Bref, un bâtiment moderne est un bâtiment à énergie positive. C'est dans ce contexte de bâtiment à énergie positive que s'inscrit la problématique de cette thèse dont l'objectif est d'étudier le système énergétique d'un

bâtiment à travers l'optimisation du dimensionnement et la gestion des sources d'énergies renouvelables par la logique floue. De manière précise, l'objectif de ces travaux est de concevoir un outil d'aide aux décisions pour réaliser un dimensionnement d'un ensemble hétérogène destiné au chauffage d'un bâtiment. Lequel outil prend en compte les caractéristiques du bâtiment faisant partie du système étudié. En plus de l'outil, il est également question de développer un algorithme intelligent de gestion de sources d'énergies renouvelables alimentant une pompe à chaleur.

L'obtention du confort est la conséquence des consommations énergétiques dans les bâtiments. Ces derniers sont, par essence de constructions artificielles caractérisées leurs enveloppes extérieures leur conférant le rôle de filtre dont la forme, l'orientation et la composition des éléments constitutifs thermique permettent de recréer un microclimat intérieur indépendamment des aléas climatiques extérieurs. Ce filtre minimise les échanges thermiques entre les corps humains et les agressions du climat. Il ne donne pas toujours lieu aux ambiances intérieures répondant entièrement aux exigences du confort des occupants à cause des déperditions énergétiques liées aux mauvaises isolations, à la faible inertie du bâtiment ou au mauvais comportement des usagers. C'est pourquoi, la réponse du bâtiment est corrigée par des appareils de climatisation ou de chauffage agissant comme des sources contrôlées de chaleur ou de froid, et ayant d'effet sur le taux d'humidité.

Ainsi dans les pays froids, le chauffage est le seul moyen utilisé pour assurer le confort en hiver, grâce aux appareillages tels que chaudière gaz à condensation utilisée en majorité dans des bâtiments de logements collectifs et une faible part dans des habitations en secteur diffus. Pour ce type d'habitation, ce sont des poêles à bois qui sont les plus utilisés. Dans les bâtiments de bureaux, les pompes à chaleur viennent en tête, suivies de chauffage par chaudière gaz et des réseaux de chaleur. Précisons que les bâtiments tertiaires autres que les bureaux, font surtout recours aux chaudières à gaz, chaudières à bois et dans une moindre mesure aux pompes à chaleur. De tous ces émetteurs de chaleur, les plus utilisés dans les bâtiments sont les radiateurs, en particulier radiateurs à eau chaude et les planchers chauffants. D'après [5], sur environ 1000 bâtiments renseignés, 60% utilisent des radiateurs à eau chaude, 24% font appels aux planchers chauffants, 6% de ventilo convecteurs, 9% des émetteurs électriques et 1% de l'air soufflé. Ces émetteurs tirent leur source de chaleur des combustibles fossiles et fissiles (uranium) et dont les fossiles produisent des rejets de gaz à effet de serre.

Au regard du caractère énergétivore et polluant des émetteurs, l'intégration des énergies renouvelables dans les systèmes de chauffage des bâtiments est la solution la plus envisagée. A cet effet, il est plus qu'impérieux de développer des techniques et outils permettant de mettre en œuvre la solution intégrant les énergies renouvelables d'une part, de choisir la taille optimale des équipements qui garantissent le confort thermique en hiver sans augmenter nos factures d'électricité et sans beaucoup trop rejeter de dioxyde de carbone d'autre part. Le choix judicieux de ces technologies tiendra compte des caractéristiques architecturales du bâtiment, en l'occurrence de son enveloppe. Les lois de supervision et de commande seront développées en s'appuyant sur une méthode intelligente pour la gestion des sources renouvelables d'énergie, en l'occurrence la logique floue.

Pour mieux aborder les approches des solutions de cette problématique développées dans le mémoire, ce dernier est structuré en quatre chapitres selon le plan ci-dessous.

A travers le chapitre I, nous faisons une analyse sommaire du contexte de la consommation énergétique, tant au niveau mondial qu'au niveau français. Cette analyse nous permet d'éclaircir la complexité du contexte énergétique dans une phase transitoire pleine d'inquiétudes quant aux problèmes environnementaux. Il est question également dans ce chapitre, des différents engagements internationaux visant à réduire les émissions des gaz à effets de serre. Une

chronologie des différents traités a été établie en commençant par le processus ayant abouti à la création de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climats jusqu'à la COP21 de Paris en passant par le sommet de Kyoto. En outre, une analyse a établi une relation de dépendance du confort thermique du bâtiment et la consommation énergétique. Un panorama de quelques énergies renouvelable a été présenté à savoir le photovoltaïque, le thermique et l'éolien en vue de l'intégration dans le bâtiment. Enfin, la présentation des réglementations thermiques de bâtiment en vigueur est faite.

Le chapitre II commence par l'analyse des paramètres influençant la performance énergétique d'un bâtiment. Puis, un aperçu global des différentes approches de modélisations employées en vue de réduire la consommation énergétique du bâtiment est fait. En se basant sur les avantages et inconvénients de chacune des méthodes, un choix sera opéré sur le modèle RC. A partir de l'état de l'art, un modèle RC du bâtiment est réalisé en se basant sur un modèle de référence développé par Louis Laret. D'autres modèles des composants du système et de la météorologique issus de la littérature sont choisis. L'objectif premier de ce chapitre est de choisir des modèles du système énergétique de bâtiment, ensuite concevoir un outil de calculs intégrant des systèmes de régulation thermique. L'outil implémenté dans l'environnement Matlab/Simulink a été testé pour s'assurer de sa bonne fonctionnalité.

Le chapitre III traite la question de l'optimisation du dimensionnement. L'outil d'aide aux décisions sert de simulation thermique dynamique pour dimensionner notre système énergétique thermique. Le dimensionnement d'un système revient à déterminer la taille et les caractéristiques des différents composants du système. Il est réalisé en se basant sur la méthode d'optimisation multicritère qui prend en compte les contraintes appliquées aux fonctions « objectif » ainsi que les règles de décision pour une gestion optimale du système. La phase d'optimisation du dimensionnement du système complet tient compte des critères tels que : le confort thermique et la consommation énergétique journalier de la PAC. Donc, ce chapitre se consacre à la problématique de l'optimisation du dimensionnement. Il est structuré en outil logiciels de dimensionnement, puis une méthodologie d'optimisation présentée et enfin l'évaluation de la solution retenue.

Ce dernier chapitre, c'est-à-dire le quatrième présente d'abord un aperçu global sur les systèmes hybrides ensuite se focalise sur la modélisation du système énergétique, en particulier aux différents composants du système : le générateur photovoltaïque, le générateur éolien, le dispositif de stockage d'énergie et le profil de charge utilisé. Il est ensuite question du développement d'algorithme de supervision et de gestion des sources d'énergies basé sur la logique floue. Après une présentation du formalisme flou, un état de l'art sur un système de gestion floue est réalisé. Ce qui a permis de concevoir et développer cet algorithme de supervision et de gestion. Un cas d'application d'algorithme est réalisé pour un chauffage de bâtiment dont la PAC faisant partie du système. Deux situations météorologiques sont considérées pour ces cas d'application : un temps par ciel bien ensoleillé et un temps par ciel couvert. Enfin, pour clore le chapitre, une présentation des résultats de nos tests expérimentaux sur la plateforme du laboratoire est faite.

CHAPITRE I :
ENJEUX ENERGETIQUES ET
CLIMATIQUES DES BATIMENTS

CHAPITRE I : ENJEUX ENERGETIQUES ET CLIMATIQUES DES BATIMENTS

I.1 - INTRODUCTION

Le chapitre 1 fait une analyse sommaire du contexte de la consommation énergétique, en particulier l'énergie électrique, tant au niveau mondial qu'au niveau français. Cette analyse nous permet d'éclaircir la complexité du contexte énergétique dans une phase transitoire pleine d'inquiétudes quant aux problèmes environnementaux : changement climatique, épuisement des réserves d'énergie mondiales...Il est question également dans ce chapitre, des différents engagements internationaux visant à réduire les émissions des gaz à effets de serre. Une chronologie des différents traités a été établie en commençant par le processus ayant abouti à la création de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climats jusqu'aux différentes COP, en l'occurrence de la COP21 de Paris en passant par le sommet de Kyoto. En outre, une analyse a établi une relation de dépendance du confort thermique du bâtiment et la consommation énergétique. La trop grande consommation énergétique des bâtiments, pour des besoins de confort de manière générale, devient une nécessité d'intégration des énergies renouvelables à cet effet. Ainsi, un état de lieu a été dressé sur quelques énergies renouvelables à savoir le photovoltaïque, le thermique et l'éolien. Enfin, quelques aspects essentiels des réglementations thermiques RT2005 et RT2012 sont présentés afin de nous situer sur les exigences en vigueur, concernant la conception et réalisation des bâtiments modernes au moment actuel.

I.2 - CONTEXTE ENERGETIQUE ET ENJEUX CLIMATIQUES

I.2.1 - Contexte énergétique mondial

L'humanité dont la démographie mondiale ne cesse de croître et tendre vers un pic prévisionnel de 9milliards d'êtres humains en 2050 (pour 7milliards d'habitants actuels) pour se stabiliser aux environs de 7milliards vers 2100 après une lente décroissance, fait face aujourd'hui à trois défis majeurs : la crise énergétique, le changement climatique et le développement durable. Ces trois défis sont reliés entre eux par une problématique commune, l'énergie, car elle est au centre de toutes nos activités.

Cette croissance démographique du monde induit l'augmentation des besoins énergétiques de l'homme (pour se chauffer, se déplacer et développer ses activités), avec le risque d'hypothéquer les ressources de la planète. De plus, avec l'évolution de son mode de vie, l'homme, sans se soucier de l'épuisement des ressources de la planète ainsi que ses conséquences environnementales dont les gaz à effet de serre, se comporte comme si l'énergie était disponible à volonté sans prendre pleinement conscience de son tarissement et des effets qu'elle induit. Une des conséquences majeures est le réchauffement de la terre depuis la fin du 19^{ème} siècle. Il est donc évident que les activités humaines renforcent les phénomènes d'effet de serre et sont responsables du réchauffement climatique [6]. Ces rejets dans l'atmosphère, notamment des gaz à effet de serre proviennent en grande partie de l'utilisation des combustibles. Signalons que les études scientifiques ont quantifié des rejets annuels de carbone à 7milliards de tonnes, de nos jours, dont la planète n'a la capacité d'absorber que la moitié. Et que si cette tendance s'inverse dans les 20ans, la quantité des rejets aurait augmenté de 50%.

C'est ainsi, en voulant prendre en compte les impacts des activités anthropiques sur l'écosystème que la notion d'Empreinte Ecologique Mondiale, en anglais World Ecological Footprint a été créé par le World Wide Fund for nature (WWF) pour conscientiser l'humanité de la menace climatique des rejets de gaz à effet de serre. La notion d'empreinte traduit l'ensemble de surfaces exploitées ou consommées pour différents activités humaines. Le rapport 2010 du WWF confirme que les ressources naturelles consommées par l'humanité sont plus de 20% supérieures à celles que la terre peut produire par période donnée. L'énergie représente plus de 50% d'empreinte totale et augmente de manière continue [7]. Au regard de la consommation énergétique mondiale depuis 1970 (Figure II-1), elle n'a cessé de croître de manière quasiment exponentielle.

D'après [8], la consommation d'énergie primaire dans le monde en 2009, est estimée à $141,304.10^{12}$ kWh dont 89,8% de cette consommation mondiale provient de l'énergie non-renouvelable. Le pétrole, suivi du charbon, du gaz naturel et du nucléaire représentent respectivement 32,8%, 27,2%, 20,9% et 5,8%. Cette consommation d'énergie primaire est caractérisée par de fortes disparités mises en relief par la Figure II-2, entre les pays industrialisés et ceux en voie de développement [9]. En effet, si la consommation énergétique moyenne mondiale d'énergie primaire est d'environ 1,8Tep par habitant et par an, les 29pays membres de l'Organisation de Coopération et de Développement Economique (OCDE), soit environ 1/5 de la population, consomment près de la moitié de la production mondiale. A l'échelle des pays, des disparités en besoins d'énergie s'observent. C'est le cas des Etats-Unis avec environ 8Tep/an, la France environ 4,5Tep/an et de moins d'1Tep/an dans de nombreux pays d'Afrique. Enfin, un quart de la population mondiale soit près de 1,6milliards d'habitants n'ont pas toujours accès à une forme quelconque d'énergie commerciale autre que la biomasse traditionnelle.

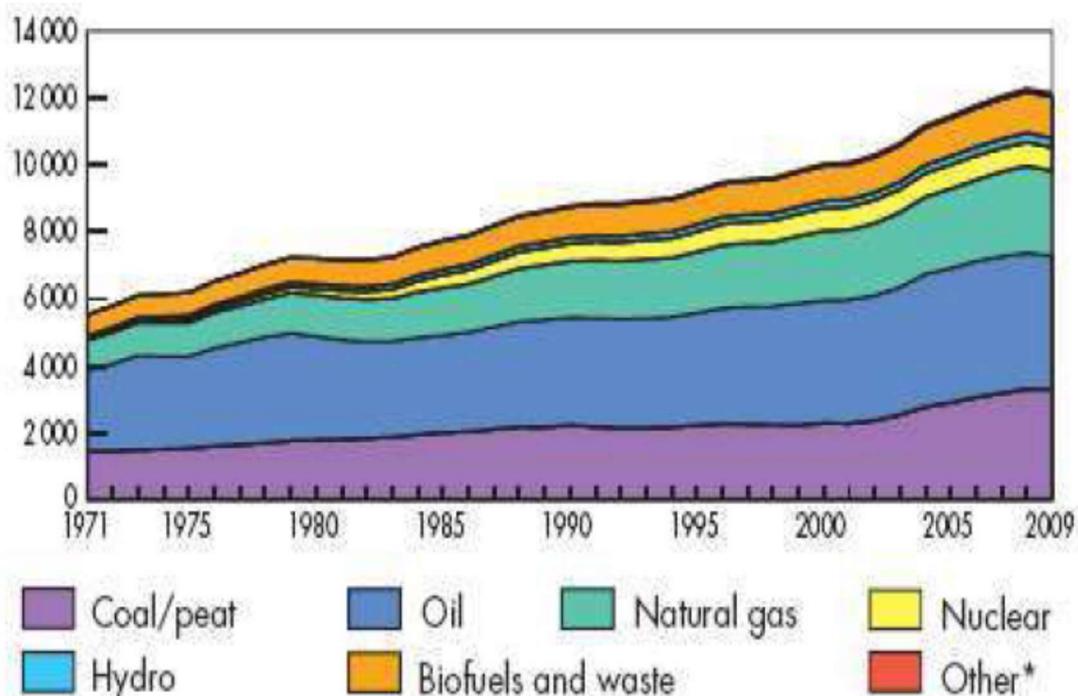


Figure I-1: Profil de consommation de l'énergie primaire totale mondiale (en million de Tep) par source [8]

tep/hab/an

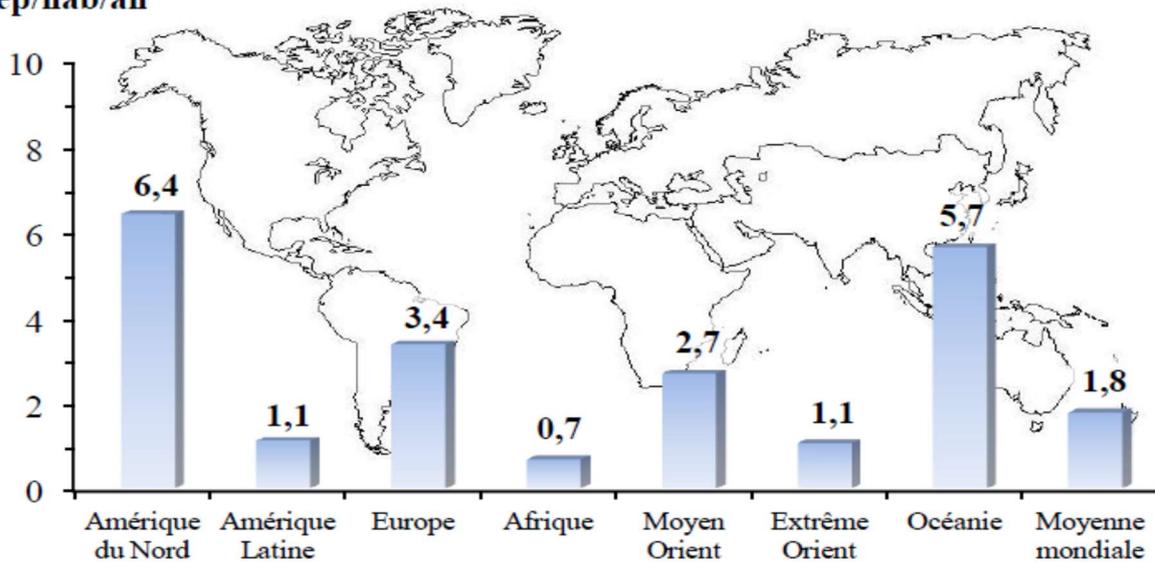


Figure I-2: Consommation moyenne d'énergie primaire par habitant et par an [37]

La consommation énergétique humaine disparate conduit non seulement à l'épuisement de précieuses ressources naturelles mais aussi à d'importants phénomènes de pollution dont les rejets de gaz à effet de serre.

I.2.2 - Impact de consommations énergétiques

La fin du XIX^{ème} siècle caractérisé par la révolution industrielle, a vu exploser, notamment depuis 1970 les émissions mondiales de gaz à effet de serre, avec une augmentation de 70% comme l'illustre la Figure I-3. Ces gaz émanent essentiellement des activités de l'homme.

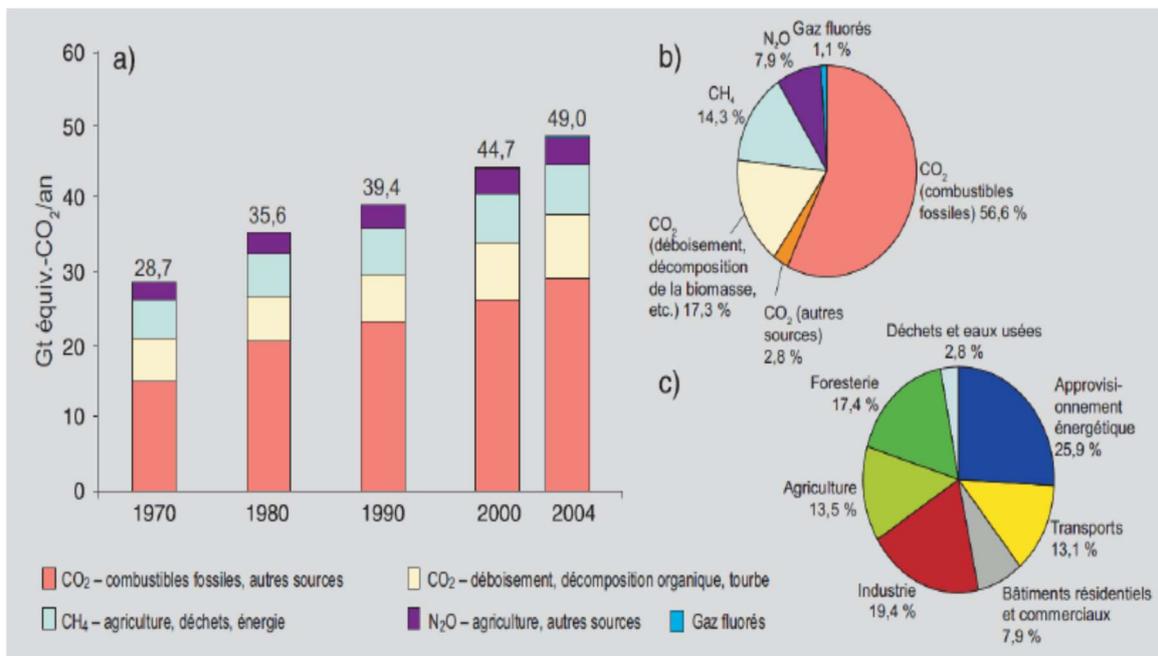


Figure I-3: Emission mondiale de gaz à effet de serre anthropique [38]

D'après la même Figure I-3, le taux élevé du dioxyde de carbone est dû principalement à l'utilisation des combustibles fossiles. Celui du méthane est consécutif à son emploi à la fois dans l'agriculture et l'utilisation des combustibles fossiles. Quant au protoxyde d'azote, l'accroissement de sa concentration se justifie par son emploi dans l'agriculture. Compte tenu de l'augmentation de la demande mondiale pour l'énergie primaire fossile, les émissions dues au charbon, au gaz et au pétrole continuent à grimper.

Bien qu'étant la deuxième énergie primaire la plus utilisée après le pétrole, le charbon demeure le premier en terme du rejet de carbone (42%) en raison de son facteur d'émission nettement supérieur à ceux du gaz et du pétrole.

La forte concentration des gaz à effet de serre dans l'air perturbe l'effet de serre naturel et par ricochet, provoque l'accélération du réchauffement climatique. Ainsi, on assiste à l'évolution globale de la température sur les deux derniers siècles, illustrée sur la Figure I-4. Le changement climatique a accru les risques de catastrophes naturelles, mettant en danger la vie sur la planète. Les premières traces ont déjà commencé à se manifester avec la disparition d'espèces animales et végétales, la fonte des glaciers, la sécheresse, la remontée du niveau des océans et les tempêtes de plus en plus violentes. Outre, les effets susmentionnés de la pollution due gaz carbonique, cette pollution constitue une véritable menace pour la santé publique et réduit l'espérance de vie de l'être humain.

La prise de conscience (exemple de la COP21 organisée à Paris en 2015) ainsi que la flambée des coûts des matières premières (cas du pétrole) conduira à changer de ressources pour se tourner vers les ressources moins conventionnelles c'est-à-dire d'origine renouvelable.

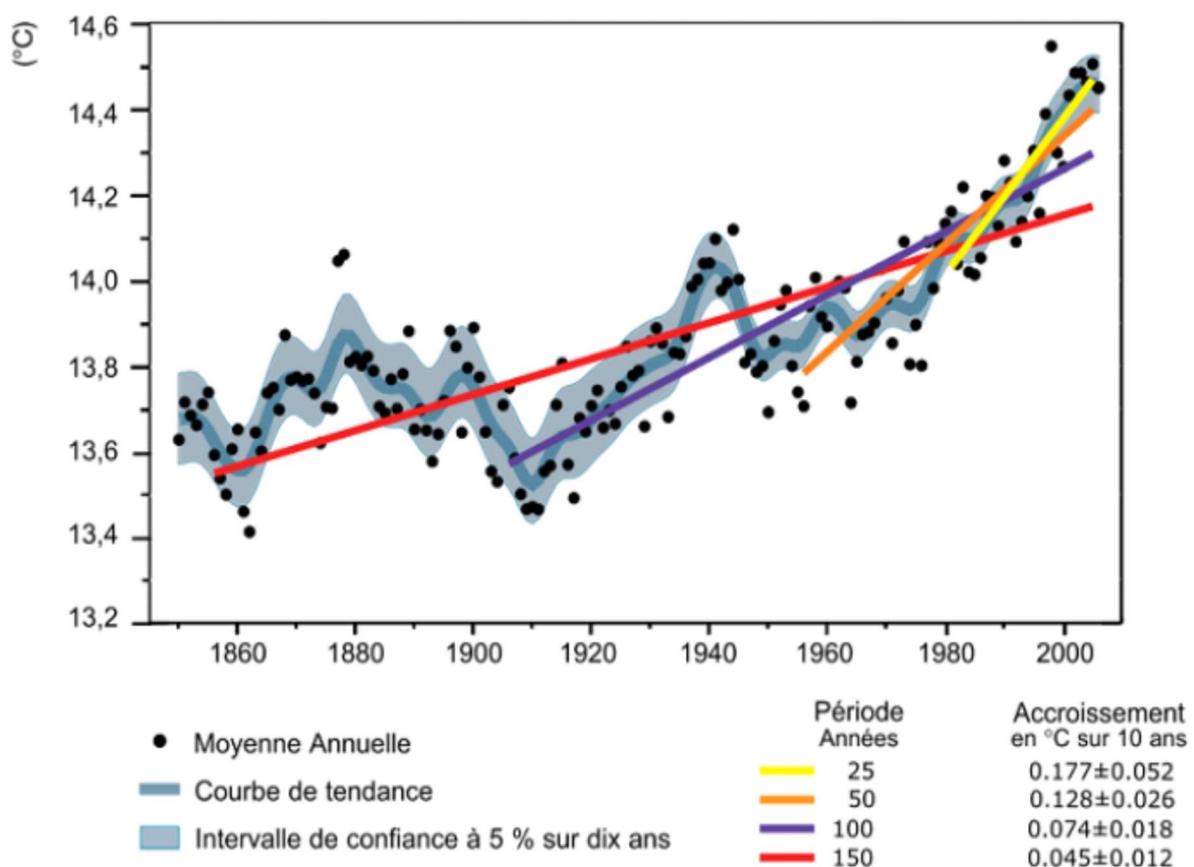


Figure I-4: Température globale moyenne estimée (°C) [37]

I.2.3 - Contexte énergétique en France

Pauvre en ressources énergétiques, la couverture partielle d'une grande partie des besoins de la France est assurée par des importations d'énergies. Dotée de parcs fortement nucléarisés, deuxième producteur d'énergie au monde [13], la France est moins dépendante que d'autres pays européens à l'évolution du coût des énergies fossiles. Toutefois, aux heures de pointes, la production électrique est majoritairement assurée par des centrales thermiques classiques. Cependant, notons que l'évolution du contexte mondial pourrait avoir des incidences sur les coûts d'approvisionnement en uranium. En effet, les Etats-Unis ont annoncé récemment la relance de leur programme nucléaire, tandis que certains pays émergents affirment leur volonté d'accéder à cette énergie. En France en 2003, sur les 547,7TWh produits, 10,4 ont été autoconsommés par les producteurs, 31,7 ont été « perdus » sur les réseaux de transport, de distribution et de répartition, et 73,1TWh ont été exportés [10].

Ainsi, les évolutions de consommations finales d'énergies primaires par secteur depuis 1973 en France, sont mises en évidence par la Figure I-5. Il en découle une prédominance des secteurs résidentiels et tertiaires pour une consommation d'énergie équivalente à un pourcentage de 43.39% en 2002. L'évolution de la consommation d'énergie dans le secteur des bâtiments est en train de s'accélérer rapidement. A cet effet, de 1973 à 1990 soit pendant 17 ans, on note une augmentation de la consommation de ce secteur de 4,8%. Mais en 2002, cette augmentation a déjà atteint 3%. Selon la prédiction [11], la consommation de ce secteur pourrait atteindre 85,29Mtep en 2030 (21,22% d'augmentation par rapport à celle de l'année 2002). Au regard de la voracité énergétique de ce secteur, il est impérieux de favoriser la réduction de la consommation énergétique dans ledit secteur.

C'est pourquoi, dès 2006 la France commence à mettre en place un nouveau dispositif appelé dispositif de certificats d'économies d'énergie. Il vise à réduire la consommation d'énergie dans l'habitat. Le dispositif s'inspire des exemples anglais et italiens, en se reposant sur l'obligation faite aux quelques 4000 vendeurs d'énergie (électricité, gaz, fioul domestique, chaleur, froid), dont EDF et Gaz de France, d'inciter leurs clients, particuliers et entreprises, à mieux isoler les bâtiments, à mieux utiliser des appareils à basse consommation. Bref, inciter les usagers d'énergie à réaliser des investissements conduisant à des économies substantielles d'énergie. En contrepartie, les fournisseurs d'énergie recevront des certificats attestant du nombre de kWh ainsi économisé.

En ce qui concerne la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables, la France vise le même objectif que celui de l'Union Européenne. Le livre blanc de 1997 fixe l'objectif de 12% d'énergie renouvelable pour l'Union Européenne en 2010. La France produit 6% de son énergie à partir de sources renouvelables, 4% provenant de la biomasse (essentiellement le bois) et 2% par l'hydraulique. En revanche, l'éolien est encore très peu développé bien que, dans des pays comme l'Allemagne et le Danemark, on observe aujourd'hui une forte augmentation depuis les dix dernières années [12].

De même, la France est classée très bas au niveau européen pour la surface solaire installée.

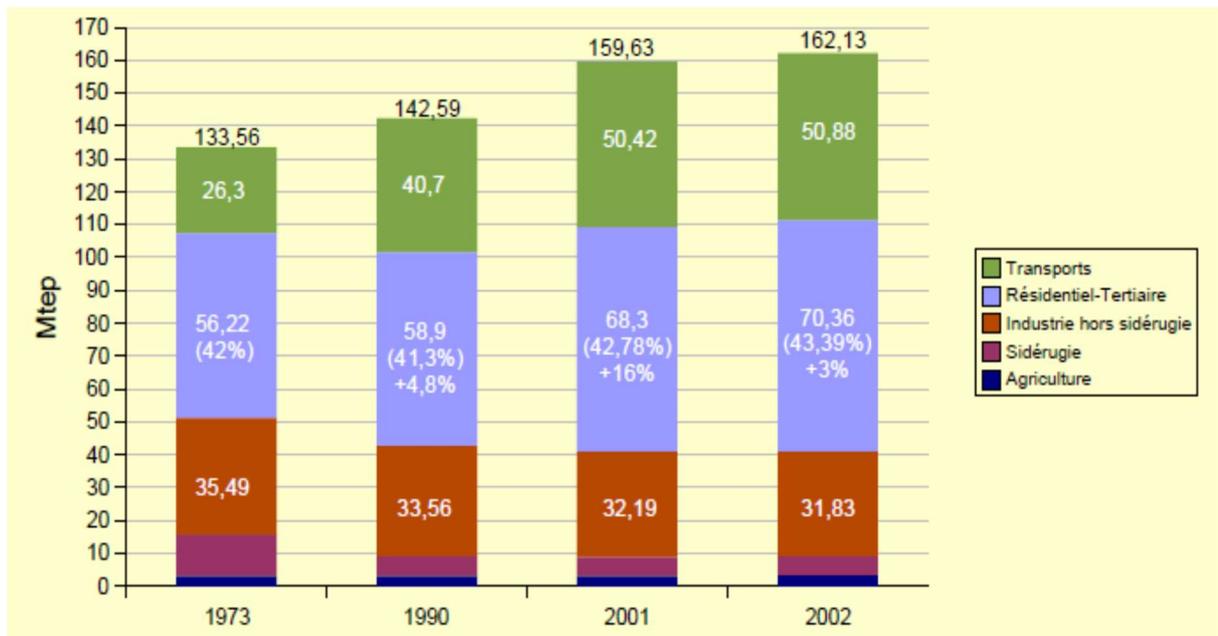


Figure I-5: Evolution et répartition par secteur de la consommation finale d'énergie primaire en France [11]

Un point d'actualité récente révèle la volonté du gouvernement français d'augmenter les tarifs de rachat de l'électricité photovoltaïque. L'augmentation des tarifs de rachats marque la volonté de la France à rattraper son retard du développement d'énergies renouvelables. Si l'on considère l'exemple allemand dont les tarifs de rachat très avantageux ont fortement profité au développement des installations des panneaux photovoltaïques, on peut s'attendre à un fort développement sur le territoire français.

En date du 30 juin 2019, la production de parcs renouvelables de la France métropolitaine s'est élevée à 52 225MW dont 26 132MW sur le réseau RTE, 24 037MW sur le réseau d'Enedis, 1 644MW sur le réseau des ELD et 396MW sur le réseau de SEI en Corse. Cette production renouvelable a couvert un quart de la consommation électrique de la France métropolitaine. Les filières hydraulique, éolienne et solaire représentent respectivement 49%, 30% et 17% des capacités de production d'électricité renouvelable en France. La progression du parc de production renouvelable en cette période de 2019 a été de 578MW (+10% par rapport au deuxième trimestre 2018), portant l'augmentation cumulée observée au premier semestre est de 963MW. Les filières solaire et éolienne représentent à elles seules 96% de la croissance observée au deuxième trimestre 2019. Cette proportion reste stable sur les douze derniers mois pendant lesquels le parc renouvelable a progressé de 2 558MW [44].

La gestion d'énergie constitue un problème assez complexe qui nécessite une considération au niveau international et la coopération de plusieurs acteurs. Les solutions recherchées doivent être pluridisciplinaires impliquant l'économie, la politique, la physique, les sciences d'ingénierie. Un point essentiel de la recherche de solutions pourrait se trouver dans une meilleure gestion des systèmes de production, de distribution et de consommation d'électricité. L'objectif serait d'affecter au mieux les ressources énergétiques aux équipements afin de répondre à la demande de l'utilisateur tout en respectant les critères essentiels permettant d'apprécier la qualité de la maîtrise de l'énergie : confort, coût et environnement.

I.2.4 - Engagements Internationaux et nationaux

Le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) créé en 1972, a pour mission d'assister et de coordonner la mise en œuvre de politiques environnementales des États membres de Nations Unies et d'encourager le développement durable. Selon Brundtland, le développement durable se définit comme un « développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs » [27]. Cette notion concilie le progrès économique, la justice sociale et la préservation de l'environnement qui est menacée depuis plusieurs décennies par les activités de l'homme.

Le premier traité international sur le changement climatique dénommé la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), fut adopté lors du sommet de la Terre en 1992 à Rio de Janeiro au Brésil, par 154 États [14]. Il vise à éviter les impacts des activités humaines sur le climat. Cette convention comporte trois grands principes majeurs. Il y a le principe de la précaution qui souligne que l'incertitude scientifique quant aux impacts du changement climatique ne justifie pas de différer l'action. Puis, le principe de la responsabilité commune mais différenciée, précise à son tour que toutes les émissions ont un impact sur le changement climatique, mais que les pays les plus industrialisés portent une responsabilité accrue de la concentration actuelle des gaz à effet de serre. Et enfin, le principe du droit au développement économique qui rappelle que les politiques mises en place devront tenir compte du droit au développement économique de chaque pays.

Cette convention met en place un cadre global d'unification de l'effort intergouvernemental en vue de faire face aux défis posés par le changement climatique. De plus, elle reconnaît que le climat est une ressource partagée dont sa stabilité se trouve menacée par les rejets atmosphériques émanant des émissions industrielles (dioxyde de carbone) et autres gaz piégeant la chaleur. Enfin, elle instruit aux gouvernements de :

- Rassembler et partager les informations sur les gaz à effet de serre, politiques nationales et meilleures pratiques ;
- Lancer les stratégies nationales pour faire face aux émissions de gaz à effet de serre et s'adapter aux impacts prévus, y compris la mise à disposition de soutiens financiers et technologiques aux pays en développement ;
- Coopérer pour se préparer à l'adaptation aux impacts des changements climatiques.

Conscient des limites de cette convention, les gouvernements entamèrent en avril 1995 un cycle de négociations en vue de décider des engagements plus solides et plus détaillés pour les pays industrialisés, gros pollueurs. Après deux années et demi, le Protocole de Kyoto au Japon fut adopté le 11 décembre 1997.

PAYS	OBJECTIF DE REDUCTION OU LIMITATION
Union Européenne, Bulgarie, Estonie, Lituanie, Liechtenstein, Monaco, Slovaquie, Suisse	-8%
Etats-Unis d'Amérique	-7%
Canada, Hongrie, Japon, Pologne	-6%
Croatie	-5%
Nouvelle Zélande, Russie, Ukraine	0%
Norvège	+1%
Australie	+8%
Islande	+10%

Tableau I-1: Objectifs individuels de limitation de gaz à effet de serre fixés par le protocole de Kyoto [15]

Après la CCNUCC vient le protocole de Kyoto qui partage le même objectif, ainsi que ses principes et institutions de ladite convention. Mais le protocole de Kyoto renforce de manière significative la Convention en engageant les pays industrialisés à des objectifs individuels (Tableau I-1), légèrement contraignants, en termes de réduction ou limitation de leurs émissions de gaz à effet de serre. Ces objectifs constituent une réduction totale d'émissions de gaz à effet de serre d'au moins 5% par rapport aux niveaux de 1990 durant la période d'engagement 2008-2012 [15].

Parmi les six gaz à effet de serre pris en compte dans ce protocole, le dioxyde de carbone CO₂ est le gaz contributeur majeur des émissions, à hauteur de 65%. Ce gaz fatal provient de la combustion de tous les combustibles fossiles. Précisons que le dioxyde de carbone généré par la combustion de la biomasse peut être considéré comme le CO₂ émis recyclable dans les plantes par le phénomène de photosynthèse. Autres sources d'émission du CO₂, le secteur des bâtiments, de par sa consommation importante d'énergie répondant aux besoins des usagers.

Par ailleurs, la CCNUCC a préparé les négociations pour le renouvellement des objectifs de limitations des gaz à effet de serre après 2012. A cet effet, la conférence de Bali en Indonésie fut le lieu de discussion d'un premier texte présentant des objectifs plus ambitieux que ceux du protocole de Kyoto : une réduction de 25 à 40% des émissions par rapport au niveau de 1990 d'ici 2020.

En décembre 2015, la conférence mondiale de Paris pour le climat COP 21 a réuni 195 pays. Un engagement de limitation de la hausse de la température « bien en deçà de 2°C » a été signé. De plus cette conférence a servi de rappel et d'encouragement des professionnels et des pouvoirs publics à se plonger dans les territoires intelligents de demain intégrant les réseaux et la construction intelligente. Après la COP 21, le Maroc a organisé la COP 22 à Rabat qui a réitéré les engagements de la précédente et il s'en est suivi de plusieurs autres COP : COP23 à Bonn en Allemagne, COP24 à Katowice en Pologne et COP25 prévue en Chili mais s'est tenue à Madrid en Espagne.

I.3 - BATIMENT

Rappelons que le secteur du bâtiment est un énorme gouffre énergétique pour répondre aux différents confort (thermique et fonctionnel) des usagers. Selon l'ADEME, en France, le bâtiment représente plus de 40% de la consommation d'énergie finale, devant les transports (25%) et l'industrie (23%). Il génère environ 123millions de tonnes de CO₂, plus de 20% des émissions de gaz à effet de serre par an. Face aux problèmes posés par ces émissions de gaz, différentes réglementations ont été mises en place, pour les limiter et inciter à construire des bâtiments économes. Les proportions d'énergie et de gaz à effet de serre dues aux consommations des bâtiments sont telles que les politiques activent tous les moyens possibles pour promouvoir la sobriété énergétique et le recours aux énergies renouvelables dans ce domaine.

C'est ainsi que la loi relative à la transition énergétique en France pour la croissance verte, publiée au Journal Officiel le 18juillet 2015, a fixé, dans le domaine du bâtiment, les objectifs suivants :

- Accélération de rénovation énergétique des logements avec « 500 000 rénovations lourdes de logements par an » ;
- Renforcement « des performances énergétiques de nouvelles constructions » avec un objectif de 100% de bâtiments basse consommation en 2020.

A cet effet, la recherche de performance et d'efficacité dans la consommation d'énergie du bâtiment ne doit pas perdre de vue l'objectif premier d'un logement : le confort.

Un bâtiment par essence, est une construction artificielle utilisée pour accueillir des personnes ou des activités devant garantir un confort. En effet, l'enveloppe externe (c'est-à-dire le sol, le toit et les murs extérieurs) entoure l'édifice et lui confère un rôle de filtre thermique permettant de recréer ainsi un microclimat intérieur indépendamment des aléas climatiques extérieurs [40]. La forme, l'orientation et la composition des éléments constitutifs déterminent les caractéristiques de ce filtre. Ce dernier minimise les échanges thermiques, c'est-à-dire de protéger le corps humain contre les agressions du climat ; ainsi le froid augmente les échanges par convection et par évaporation provoquant une sensation de froid. Mais aussi l'air chaud et humide réduit la possibilité d'évaporation passive de la peau, l'obligeant à transpirer [16].

I.3.1 - Confort thermique

Dans son rôle d'abri, un bâtiment marque une séparation physique de l'habitat de l'homme entre intérieur (espace de confort et de sécurité) et extérieur (un espace qui peut être parfois rude et inhospitalier). Mais hélas, cette séparation ne donne pas toujours lieu aux ambiances intérieures qui répondent entièrement aux exigences de confort des occupants. C'est pourquoi, la réponse du bâtiment est corrigée par des appareils de climatisation ou de chauffage agissant comme des sources contrôlées de chaleur ou de froid, et ayant d'effet sur le taux d'humidité. La quête de la satisfaction du bien-être exprimée vis-à-vis de l'ambiance thermique du milieu environnant appelée communément confort thermique dépend de plusieurs conditions. Selon [16], trois conditions doivent être réunies pour qu'une personne se sente confortable :

- Le corps humain doit maintenir une température interne stable ;
- La production de sueur ne doit pas être trop abondante et la température moyenne de la peau doit être confortable ;
- Aucune partie du corps ne doit être trop chaude, ni trop froide.

Le confort thermique est la conséquence des interactions fortes traduisant échanges thermiques entre l'occupant et le bâtiment (Figure I-6). Plusieurs configurations des échanges sont possibles :

- Le bâtiment influence ;
- L'occupant agit sur le bâtiment ;
- Le bâtiment et l'occupant s'influencent mutuellement.

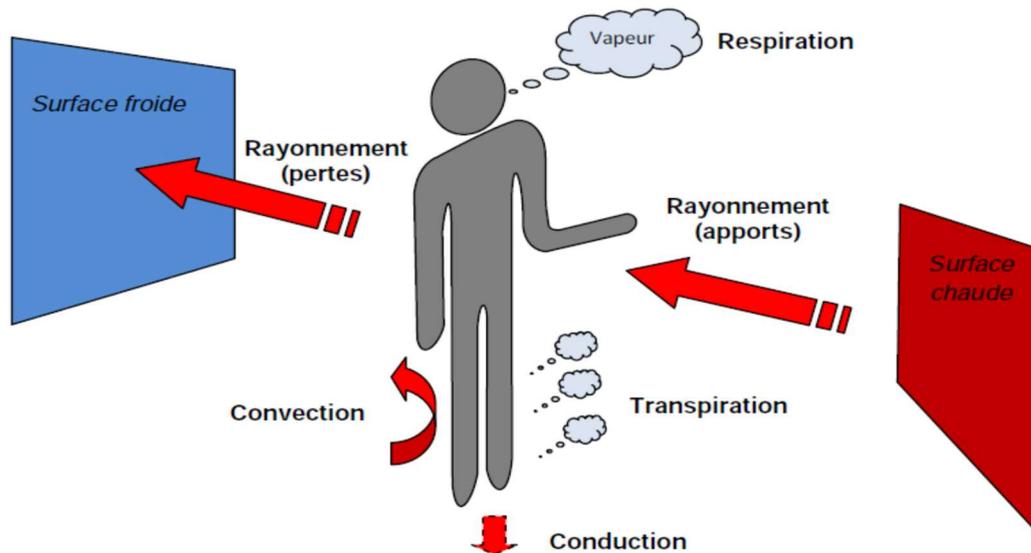


Figure I-6: Modes de transmission de chaleur entre le corps humain et son environnement [18]

L'investigation des conditions de confort conduit alors à étudier des phénomènes où interagissent multiples facteurs, et où se combinent des principes de régulation et de déséquilibre. D'après [16] toujours, les principaux facteurs qui régissent les échanges thermiques entre une personne et son environnement et qui ont une incidence sur le confort sont les suivants :

- Pour la personne :
 - ✓ Son activité physique (production de chaleur) ;
 - ✓ L'habillement qui est un moyen complémentaire d'adoption dont dispose l'homme pour maintenir son équilibre thermique.
- Pour l'environnement :
 - ✓ Le rayonnement solaire ;
 - ✓ L'humidité : les limites de l'humidité relative. Ces limites ont été établies pour prévenir l'assèchement de la peau, l'irritation des yeux et des voies respiratoires ;
 - ✓ La vitesse de l'air : aucun mouvement d'air minimum n'est nécessaire pour assurer le confort thermique lorsque les températures se situent dans la zone de confort ;
 - ✓ La température des objets avec lesquels la personne est en contact.

Ce concept dont l'appréciation n'est pas assez évidente, relève d'une grande part de subjectivité. En effet pour une même ambiance thermique, une première personne peut ressentir du confort alors qu'une autre peut ressentir de l'inconfort.

En raison de différences de perceptions d'une personne à l'autre, il est impossible de déterminer une ambiance thermique qui soit satisfaisante pour tous. Ainsi, l'American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE) spécifie les normes de confort dans son ensemble en termes de température opératoire. Cette température tient compte de la température de l'air, du rayonnement thermique et de la vitesse de l'air jusqu'à 0,15 à 0,2m/s. Les vêtements d'intérieur portés en hiver offrent un degré d'isolation thermique plus élevé que les tenues d'été. C'est pourquoi les températures opératoires de confort varient avec les saisons. A 50% d'humidité relative, ces températures s'étalent de 23 à 26°C en été, et de 20 à 23,5°C en hiver. Ces plages de températures sont légèrement déplacées pour un taux d'humidité supérieur ou inférieur à 50%, plages de température et d'humidité acceptables pour des personnes portant des vêtements d'été ou d'hiver habituels et effectuant un travail léger et sédentaire [17].

I.3.2 - Modèles de confort

De nombreuses recherches ont été menées sur le confort thermique aussi bien pour les bâtiments résidentiels que les moyens de transports et les lieux de travail sous des conditions extrêmes. Il en ressort deux approches majeures de modélisation de confort développées dans la littérature que sont les approches analytiques et adaptatives [45][46][47].

L'approche analytique a pour l'objectif de prédire la sensation thermique des occupants et ce, d'identifier les conditions du confort thermique. Elle est caractérisée par le calcul de bilan thermique du corps humain, basé sur des modèles physiques et physiologiques. Ces modèles physiques sont utilisés pour calculer les échanges de chaleur entre l'occupant et son milieu. Les variables d'entrée de ces modèles sont les grandeurs physiques de l'ambiance thermique (température de l'air, température du rayonnement, humidité de l'air et vitesse d'air) et les caractéristiques de l'individu (taille et poids de l'individu, production de chaleur métabolique, caractéristiques de vêtement, etc.). En sortie, sont proposés de nombreux indices qui prévoient la sensation thermique ou le niveau de confort pour les conditions étudiées.

Tous les modèles se différencient au niveau de la modélisation physique de la thermorégulation. Certains modèles, sous des conditions homogènes et stationnaires déterminent expérimentalement, dans des chambres climatiques avec des individus. D'autres modèles applicables dans les conditions instationnaires, découpent en plusieurs compartiments le corps humain pour le modéliser. Dans les bâtiments, le modèle de Fanger modélise le confort thermique par l'indice de vote moyen prévisible, (PMV- Predicted Mean Vote). Quant'à celui de Gagge utilise le SET (Température Effective Standard). Ce sont les deux modèles les plus utilisés. Le modèle de Fanger sert à la base de la norme internationale ISO 7730 et celui de Gagge pour la norme américain ASHRAE standard 55.

Sous les conditions thermiques homogènes et stationnaires, Fanger a déterminé expérimentalement les conditions physiologiques (température cutanée et sudation) nécessaires pour le confort thermique. A partir du bilan thermique, il a exprimé, à l'aide de l'indice PMV, la sensation thermique en fonction de l'écart du flux de chaleur cédé par le corps à l'environnement par rapport à celui qui correspond aux conditions de confort [45][47]. Cet indice traduit l'avis de sensation thermique moyenne éprouvée par un groupe important de personnes à l'échelle de sensation thermique de l'ASHRAE (Figure I-7). Donc, on considère que la zone de confort thermique s'étale de la sensation de légère froid à la sensation de légèrement chaud, soit de -1 à +1. En plus de cet indice qui n'est pas suffisant pour exprimer le confort, Fanger a défini un autre indice complémentaire, le pourcentage prévisible d'insatisfaits (PPD - Predicted Percentage Dissatisfied). Il prévoit le pourcentage des insatisfaits à une sensation donnée, en fonction de l'indice PMV. Connaissant PMV, la Figure II-7 ci-après permet d'évaluer directement PPD. Si par exemple, le PMV est de -1 ou +1, l'indice PPD montre que près de 25% de la population n'est pas satisfaite. Pour ramener le PPD à une valeur maximale de 10%, le PMV doit se situer entre -0,5 et +0,5. Et pour une valeur 0 de PMV, soit un état de confort thermique optimal, il y a encore 4% d'insatisfaits.

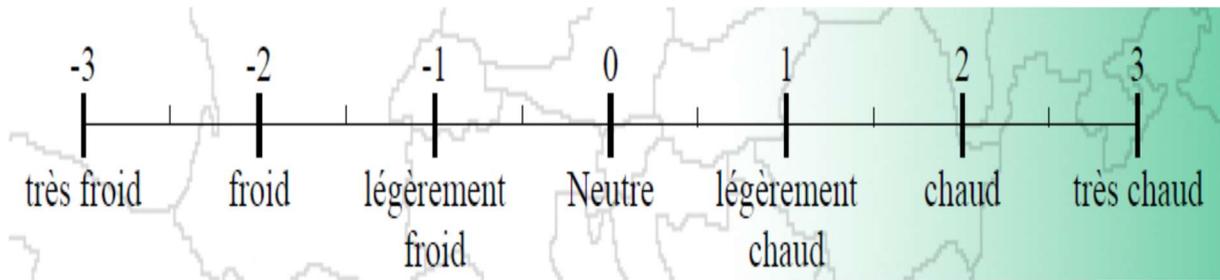


Figure I-7: Echelle de sensation thermique [46]

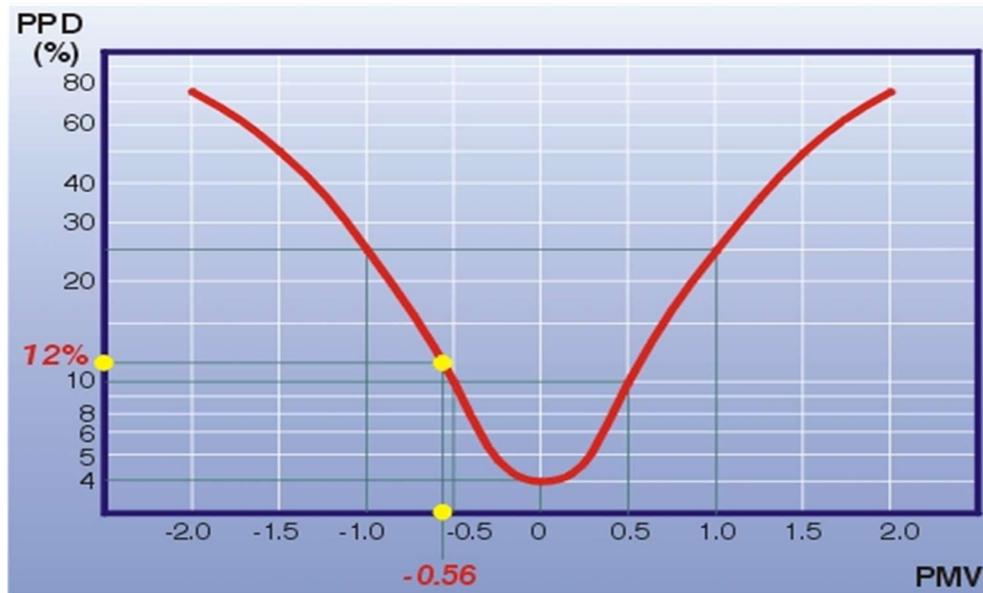


Figure I-8: Courbe d'évolution de PPD

Quant' au modèle de Gagge [45], il modélise le corps humain en le découpant en deux compartiments concentriques représentant le centre du corps et la peau. Gagge définit un modèle dynamique qui permet de prévoir les variables physiologiques sous des conditions instationnaires. En sortie du modèle, le calcul d'indice SET est réalisé en utilisant la température cutanée et la mouillure cutanée. L'indice SET est équivalent à une température dans une enceinte isotherme de 50% d'humidité relative, dans laquelle un individu portant de vêtement standard échangerait la même quantité de chaleur et aurait la même réponse physiologique que dans l'enceinte réelle dans laquelle il se trouve. Cet indice est associé au confort.

Contrairement à l'approche analytique cherchant à déterminer les conditions du confort thermiques par des modèles physiques et physiologiques en prévoyant l'état thermique du corps humain, l'approche adaptative est basée sur les constatations des investigations menées dans les bâtiments in situ. L'objectif de cette approche est de construire une large base de données sur les conditions thermiques régnant dans différents types de bâtiments selon différents climats et régions, par des mesures de grandeurs physiques de l'ambiance thermique. Ces mesures sont accompagnées simultanément par des réponses subjectives des occupants sur la qualité de leurs ambiances thermiques. Cette base de données est ensuite analysée par les méthodes statistiques afin de déterminer la température ou une combinaison de variables (température, humidité et vitesse) jugée neutre ou confortable par les occupants, ce qui permet de déterminer, par la suite les conditions de confort thermiques dans d'autres bâtiments dans les circonstances similaires [45].

I.3.3 - Incidences énergétiques du confort

Les besoins énergétiques dans les bâtiments sont de deux types. Le premier besoin est celui lié au confort thermique que l'on résumera ici essentiellement à la gestion de la sensation de froid ou de chaud pour les occupants : chauffage, refroidissement, eau chaude sanitaire et cuisson. Le second est lié au confort fonctionnel, c'est-à-dire l'alimentation des équipements électriques fournissant un service n'ayant pas trait au confort thermique, il s'agit principalement des électroménagers et l'éclairage. Ces besoins énergétiques font qu'en Europe, le bâtiment est un gouffre d'énergie primaire, responsable de 19% des émissions de CO₂. C'est donc un secteur où les mesures d'efficacité énergétique sont à mener en priorité.

Faut-il le rappeler selon l'ADEME, le bâtiment absorbe en France 46% de la consommation d'énergie devant le transport 25% et l'industrie 23%.

La consommation finale d'électricité est, dans le résidentiel (habitat), le premier poste de consommation à hauteur de 35%.

Au regard de la voracité en énergie du secteur résidentiel et tertiaire, l'intérêt d'agir sur ce secteur est nécessaire. Le secteur résidentiel et tertiaire s'articule autour d'un acteur majeur, les bâtiments dont il existe de nombreux leviers d'actions pour améliorer leur efficacité énergétique, par ricochet réduire la consommation dudit secteur. Plusieurs moyens sont à disposition parmi lesquels l'amélioration de la conception. Kampf [19] propose par exemple un algorithme afin d'améliorer l'architecture des bâtiments avec pour objectif de profiter au mieux de la radiation solaire, que ce soit de manière passive ou active. La modification de l'architecture pour répondre à un besoin énergétique est aussi discuté dans [20].

Des travaux ont été menés en tenant compte de l'occupant du bâtiment. Une méthode de réduction de la consommation énergétique du bâtiment en sensibilisant les occupants est développée par [19] dans ses travaux. La consommation électrique ainsi que la consommation en gaz leur sont indiquées. Ils prennent conscience de leur consommation et la réduisent. Ce travail n'agit pas directement sur le bâtiment mais sur le facteur humain, explorant un champ d'action différent. Le facteur humain dans la consommation du bâtiment a été pris en compte et étoffé par [21][22] dans leurs travaux. D'autres facteurs sociaux, financiers, énergétiques, environnementaux ou architecturaux sont susceptibles de contribuer à l'augmentation de l'efficacité énergétique. Une étude d'optimisation multi-objectif est indiquée pour identifier l'importance de ces facteurs.

De nos jours le bâtiment est de plus en plus moderne, car faisant la part belle à la technologie. Les énergies renouvelables deviennent aussi une part intégrante du fonctionnement d'un bâtiment. Le chauffe-eau solaire thermique, les panneaux solaires photovoltaïques ou l'éolien urbain pour la production d'électricité, tous ces matériels deviennent plus courants. Figueiredo [23] relève un système de contrôle un système de contrôle automatique, où la demande est totalement intégrée dans le système de production du bâtiment qui contient un ensemble de sources renouvelables et des moyens de stockage. Dans le même ordre d'idées, Yamamoto [24] compare quatre méthodes de pilotage pour un système avec une installation autonome photovoltaïque et diesel avec des batteries.

I.4 - REGLEMENTATION THERMIQUE

Les premiers textes de réglementation thermique datent de 1974 pour le secteur résidentiel (imposant un coefficient de déperdition G inférieur à un seuil de référence) et de 1976 pour le non résidentiel (imposant un coefficient de déperdition G, inférieur à un seuil de référence) [41]. Ainsi, le protocole de Kyoto et ses engagements internationaux ont pour objectif de diviser par quatre les émissions de gaz à effet de serre dans les pays industrialisés d'ici 2050, afin de limiter le réchauffement climatique à 2°C. C'est pourquoi l'Europe a voté le paquet Energie-Climat avec son objectif de 3x20 c'est-à-dire 20% d'économie d'énergies, 20% de réduction de gaz à effet de serre et 20% d'énergies renouvelables.

La France a traduit cet engagement européen par le Plan Climat National avec pour le bâtiment, la réglementation thermique (RT) qui évolue tous les cinq ans afin d'arriver en 2020 au bâtiment à énergie positive. De nos jours, la réglementation thermique en vigueur la RT2012, s'applique à tous les projets de bâtiments neufs des secteurs résidentiels, dont le dépôt de demande de permis de construire est déposé à partir du 1^{er} janvier 2013. Elle évoluera environ tous les cinq ans (future RT2020) pour atteindre l'objectif fixé par le gouvernement d'ici 2050, c'est-à-dire réduire par quatre les émissions de gaz à effet de serre [42].

I.4.1 - Règlementation thermique 2005

S'inscrivant dans la continuité de la réglementation thermique 2000, la réglementation thermique 2005 (RT2005) se base sur le principe de comparaison du bâtiment à construire au bâtiment théorique servant de référence. Ce bâtiment de référence a la même géométrie et respecte les exigences minimales de la réglementation thermique. L'objectif est de construire un bâtiment dont la consommation énergétique pour le chauffage, le refroidissement et l'ECS soit inférieure à celle de bâtiment de référence. Cette exigence est valable pour les maisons individuelles que collectives et dépend de la zone climatique et du type d'énergie utilisée pour le chauffage.

Le découpage défini par la RT2005 permet de distinguer les zones selon les besoins de chauffage en hiver (H1, H2, H3) et de confort en été illustré par la Figure I-9 ci-dessous dont les besoins énergétiques sont énumérés dans le Tableau I-2.

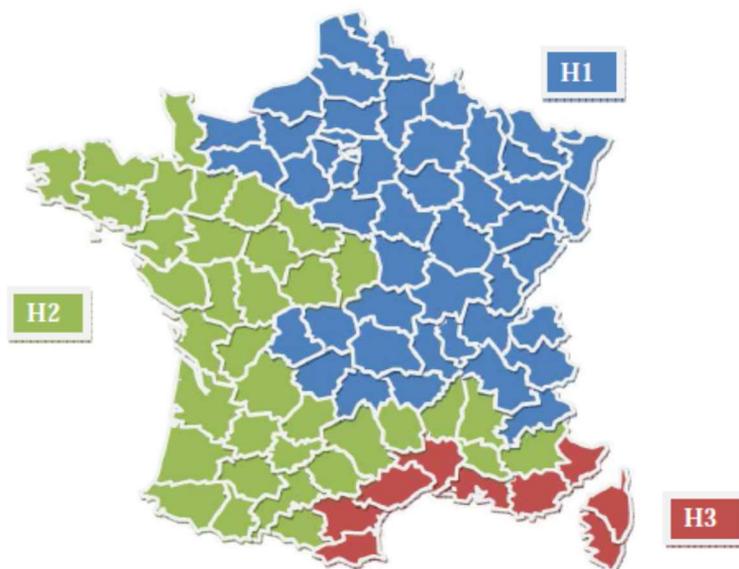


Figure I-9: Carte de zone climatique de France

Energie utilisée pour le chauffage	Zone climatique	Limite maximale de consommation (kWh/m ² /an)
Combustibles fossiles	H ₁	130
	H ₂	110
	H ₃	80
Electricité (dont PAC)	H ₁	250
	H ₂	190
	H ₃	130

Tableau I-2: Exigences minimales de la RT2005 concernant la consommation d'énergie primaire

Cette exigence est complétée par deux autres, les caractéristiques thermiques minimales à échelle globale U_{bat} et à l'échelle des matériaux ; de plus la température intérieure de confort d'été doit être inférieure à la température intérieure conventionnelle T_{ic} .

I.4.2 - Règlementation thermique 2012

Les améliorations apportées par la réglementation thermique 2012 (RT2012) n'affectent pas l'exigence sur le niveau de température intérieure de confort qui reste intact comme dans la RT2005. Ces exigences se regroupent en quatre aspects :

- Exigence sur l'efficacité énergétique du bâtiment en vue d'encourager la conception des bâtiments bioclimatiques : Besoin bioclimatique maximal $B_{bio_{max}}$;
- Exigence de la consommation maximale C_{max} ;
- Exigence de confort d'été T_{ic} ;
- Exigences minimales : utilisation des énergies renouvelables, traitement de la perméabilité d'air, traitement des ponts thermiques, comptage d'énergie par usage, etc.

Précisons dans cette réglementation, un sous-découpage de zones climatiques a été adopté. On a, à cet effet, huit zones au lieu de trois zones qui sont H1a, H1b, H1c, H2a, H2b, H2c, H2d et H3 (Figure I-10). Le tableau I-b compare les valeurs limites des consommations fixées par la RT2005 et la RT2012.

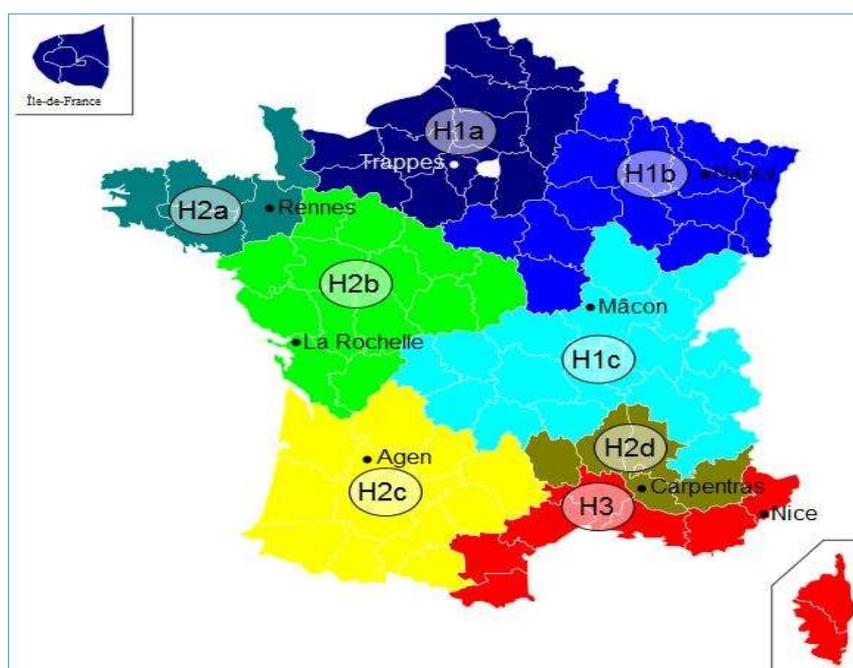


Figure I-10: Découpage géographique en huit zones climatiques par la RT2012

Zones climatiques	RT2005		RT2012
	3 usages : Chauffage, refroidissement et ECS		5 usages : Chauffage, Refroidissement, ECS, Eclairage et Auxiliaires
	Chauffage par combustibles fossiles	Chauffage électriques (dont la PAC)	Tout type de chauffage
H1*	180	250	60
H2**	130	190	50
H3	80	130	40
* Un sous-découpage en trois zones est adopté dans la RT2012 : H1a, H1b et H1c			
** Un sous-découpage en quatre zones est adopté dans la RT2012 : H2a, H2b, H2c et H2d.			

Tableau I-3: Comparaison des limitations de consommations d'énergie RT2005/RT2012

I.4.2.1 - Principaux critères

En rappel la RT est une norme de réglementation thermique française établie pour cadrer la thermique des bâtiments neufs. Son objectif principal est de réduire les consommations énergétiques totales des constructions neuves et d'en fixer des valeurs maximales, sans interférer au confort thermique et aux besoins énergétiques des occupants. Les critères définis de la RT portent sur les consommations de chauffage, de refroidissement, de ventilation, d'éclairage et de production d'eau chaude sanitaire. De nos jours, la RT2012 ayant succédé à la RT2005 est appliquée pour les bâtiments neufs, Cette RT fera place à son tour, à la RT2020. Avec la création de la RT2005, de nombreux labels ont été créés en parallèle tels que le label HPE (Haute Performance Energetique) ou encore BBC (Bâtiments Basse Consommation) permettant une amélioration constante par rapport à la RT2005 qui prévoyait notamment une consommation totale de 80 kWh_{ep}/m².an contre 50 kWh_{ep}/m².an pour la version de 2012. La RT2012 a défini clairement les exigences quantifiables et mesurables, et fixe toutes les conditions de son respect. Il y a donc trois exigences majeures à respecter [48][43][42] : l'exigence sur l'efficacité énergétique du bâtiment ($B_{bio_{max}}$), l'exigence de consommation maximale (C_{max}) et enfin l'exigence sur la Température intérieure de consigne (T_{ic}).

Ces trois critères ou ex sont calculés grâce à la méthode TH-BCE. C'est une méthode de calcul réglementaire utilisée obligatoirement pour vérifier la conformité d'un bâtiment vis-à-vis de la RT2012 (Figure I-7). En plus de contrôler que le bâtiment respecte la réglementation thermique RT2012, la méthode TH-BCE 2012 permet de calculer diverses données telles que les déperditions en période hivernale ou la surface de vitrage minimale exposée Sud.

I.4.2.2 - Quantifications de principaux critères

Le Besoin bioclimatique conventionnel (B_{bio}) regroupe l'ensemble des besoins d'un bâtiment comprenant le chauffage, la climatisation et l'éclairage artificiel. La réduction des besoins de chauffage dépend grandement de la limitation des déperditions thermiques à travers la paroi du bâtiment et la ventilation d'une part, et de la capacité à capter le maximum d'apports solaires d'autre part. En ce qui concerne les besoins de climatisation, il est important de limiter les apports internes dus au matériel électrique, en l'occurrence électroménagers et éclairage, et de réduire les apports solaires en été. Enfin, pour l'éclairage, il est capital de profiter au

maximum de la lumière naturelle, avec des surfaces vitrées plus élevées et des bâtiments moins profonds. Ainsi, le B_{bio} se calcule par la méthode TH-BCE de la manière suivante [43][42] :

$$B_{bio} = 2 \times (B_{chauffage} + B_{refroidissement}) + 5 \times B_{eclairage} \quad (1)$$

Où, $B_{chauffage}$, $B_{refroidissement}$ et $B_{eclairage}$ sont les besoins respectifs de chauffage, du refroidissement et d'éclairage.

Pour respecter des exigences de la RT2012, cette valeur de B_{bio} ne doit pas dépasser une valeur B_{biomax} calculée en fonction de la localisation géographique du bâtiment, de son altitude et de sa surface. En effet, la RT2012 a mis en place huit zones géographiques différentes correspondantes aux différents climats, et des coefficients modulateurs selon l'altitude du bâtiment.

La Consommation d'énergie primaire (C_{ep}) constitue la deuxième exigence de la RT2012 correspondant à la consommation d'énergie primaire du logement. A l'instar du B_{bio} , la valeur du C_{ep} est déterminée en fonction de la localisation du bâtiment, de son altitude et de sa surface. A cela, viennent s'ajouter la prise en compte de la catégorie d'utilisation du bâtiment (maison individuelle, hôpital, bureaux, école, etc.) et un coefficient modulateur permettant la prise en compte des gaz à effet de serre selon l'énergie utilisée (bois, fuel, gaz, etc.). La C_{epmax} se calcule par l'expression suivante [43][42] :

$$C_{epmax} = 50 \times M_{c.type} + (M_{c.geo} + M_{c.alt} + M_{c.surf} + M_{c.GES}) \quad (2)$$

Où,

- $M_{c.type}$: Coefficient de modulation selon l'usage ou de la partie du bâtiment et sa catégorie CE1/CE ;
- $M_{c.geo}$: Coefficient de modulation selon la localisation géographique ;
- $M_{c.alt}$: Coefficient de modulation selon l'altitude ;
- $M_{c.surf}$: Coefficient de modulation selon la surface moyenne de logement pour les maisons individuelles ou accolées et logements ;
- $M_{c.GES}$: Coefficient de modulation selon les émissions de gaz à effet de serre des énergies utilisées.

Pour respecter des exigences de la RT2012, la C_{epmax} doit en moyenne être inférieure à $50 \text{ kWhep/m}^2 \cdot \text{an}$ avant les modulations par des coefficients exprimés dans la formule ci-dessus.

Enfin, la dernière exigence principale est la température intérieure de consigne (T_{ic}). Elle correspond à la température intérieure atteinte au cours d'une séquence de cinq jours chauds, inférieure à 20°C . La T_{ic} de référence est également calculée selon le type de bâtiment et son utilisation, mais elle prend en compte l'inertie du bâtiment, les facteurs solaires des menuiseries ou encore les protections solaires mobiles. Sur les cinq jours les plus chauds, la T_{ic} ne doit pas dépasser la T_{ic} de référence. Ce paramètre a pour but de diminuer l'inconfort thermique (en été) dans le bâtiment, et d'assurer une température de vie intérieure à la température maximale de confort préconisée [43][42].

I.4.2.3 - Critères de moyens

Outre les trois principales énumérées ci-haut, la RT2012 impose d'autres exigences de moyens qui doivent concourir au respect de ladite réglementation dans l'objectif d'atteindre l'efficacité de moyens. Ainsi, on a des exigences telles que le traitement obligatoire des ponts thermiques, avec des valeurs quantifiables maximum à respecter. On fait recours, à cet effet aux énergies renouvelables (panneaux solaires) ou encore une surface minimum de baies vitrées (1/6 de la surface habitable). Une des exigences les plus importantes concerne le niveau d'étanchéité à l'air (réalisé à l'aide de tests sur chantier). En fonction du type d'étanchéité, la valeur change également. Elle ne doit pas dépasser $Q=0,6\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ de parois déperditives (Hors plancher bas) en maison individuelle et $Q=1\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ pour des immeubles collectifs. Autre élément non de moindre, le coefficient de déperdition thermique $U(\text{W}/\text{m}^2.\text{K})$. Plus il est faible, bon est la résistance thermique car élevée ($U=1/R$). La réglementation impose le respect des valeurs de coefficient de déperdition comme suit : $U < 0,20 \text{ W}/\text{m}^2.\text{K}$ pour les murs, $U < 0,17 \text{ W}/\text{m}^2.\text{K}$ pour les toitures et $U < 0,25 \text{ W}/\text{m}^2.\text{K}$ pour les planchers bas [43].

Au-delà des aspects réglementaires exigés par la norme des bâtiments, en l'occurrence la RT2012 insiste sur une bonne conception de l'ouvrage en amont et le travail de pérennisation du bâtiment lors son utilisation. Donc, la RT2012 a également pour but de sensibiliser les utilisateurs sur leurs consommations afin de faire prendre conscience des différents acteurs du gaspillage d'énergie qui a un coût économique mais aussi écologique. Par conséquent, il est un impératif de mettre en place des réglementations pour limiter ses consommations abusives.

La Figure I-11 met en évidence l'illustration comparative des consommations d'énergie primaire depuis l'année 1975 jusqu'à nos jours et en fait une projection sur un horizon lointain par les réglementations thermiques.

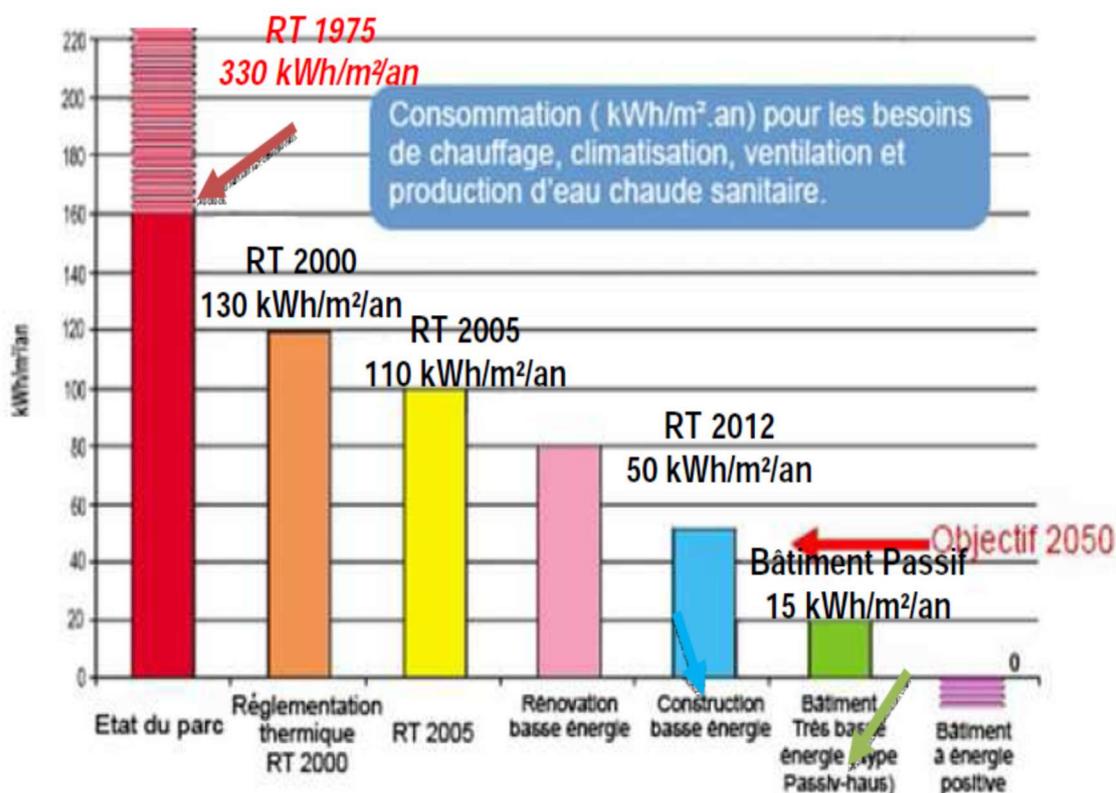


Figure I-11: Comparaison de l'énergie primaire conventionnelle des bâtiments depuis 1975

I.5 - ENERGIES RENOUVELABLES

La majeure partie de nos besoins énergétiques résidentiels et tertiaires sont satisfaits par des sources d'énergie d'origine fossile. Le caractère vorace de ce secteur en termes de consommation énergétique avec ses effets induits sur le climat et l'épuisement inéluctable des ressources énergétiques fossiles, nous contraignent à l'utilisation des énergies renouvelables. Le développement de ces énergies demeure des solutions pour un futur meilleur. Lesquelles solutions doivent être continuellement améliorées par les hommes des sciences d'une part, et vulgarisées et rendues accessibles à tous par les décideurs politiques d'autre part.

Les énergies renouvelables sont toutes les énergies issues du rayonnement solaire, directement (énergie solaire) ou indirectement (éolienne, hydraulique, biomasse), énergie issue du magma terrestre (géothermie) et l'énergie issue de la gravitation (énergie marémotrice). Les diverses énergies que l'on pourrait tirer des océans, telles que l'énergie de la houle, des courants marins ou du gradient thermique des mers sont également issues indirectement de l'énergie solaire et font partie du champ des énergies renouvelables [25]. Le Figure I-12 nous montre la capacité de production électrique des différentes énergies renouvelables à travers le monde entier.

Dans le monde, les statistiques révèlent que les énergies renouvelables représentent 13,3% de la consommation totale d'énergie comptabilisée dont 18% de la production mondiale d'électricité [26]. La plus grande partie de la production émane de l'hydraulique. Cependant, l'Observatoire des Energies Renouvelables montre que parmi les énergies renouvelables, la production d'électricité à base de l'éolienne a connu une plus importante croissance avec une augmentation de 28,4% par an en moyenne entre 1995 et 2005 [26]. La production d'électricité d'origine solaire est au deuxième rang avec une progression annuelle de 19,5%.

Au-delà de cette statistique illustrant une dynamique de progression et d'intégration des énergies renouvelables, son essor constitue l'un des objectifs majeurs fixé par le Grenelle de l'environnement de l'année 2007 en France. La réponse aux besoins du chauffage, d'eau chaude sanitaire ou d'électricité à partir d'énergies renouvelables va de pair avec une utilisation rationnelle de l'énergie liée à la performance des bâtiments d'une part, à la maîtrise de l'ensemble des énergies disponibles d'autre part.

L'article 4 du Grenelle affirme que la norme « bâtiment à énergie positive » sera applicable dès fin 2020 à tout bâtiment neuf. Ce dernier sera un bâtiment autonome qui produira plus d'énergie qu'il n'en consommera pour son fonctionnement. Afin d'atteindre cet objectif, l'intégration de moyens de production d'énergie locale à base du renouvelable est capitale. Selon [28], le bâtiment du futur est un bâtiment qui intègre des systèmes de production d'énergie à partir des énergies renouvelables à savoir pompe à chaleur en lieu et place du système de chauffage électrique. Ainsi, le bâtiment devenant autonome au niveau énergétique, il est producteur d'énergie au lieu d'être consommateur. Il fait de l'autoconsommation et peut vendre le surplus produit.

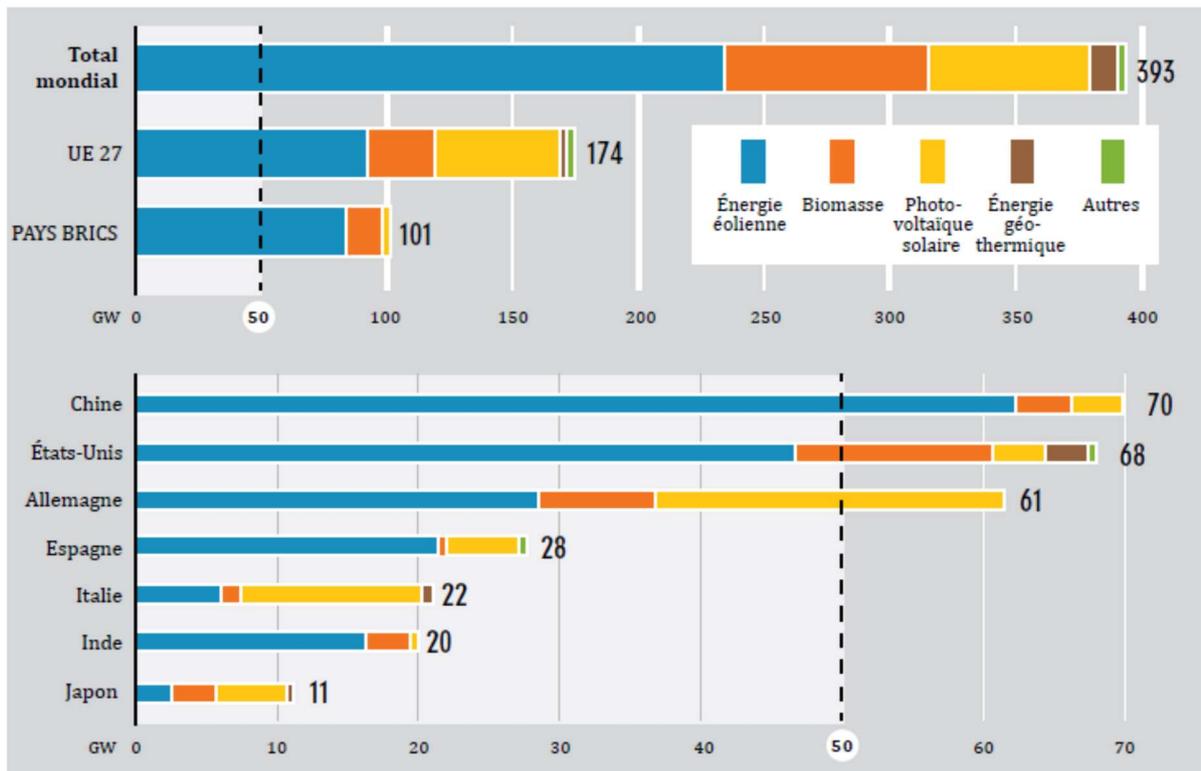


Figure I-12: Capacité électrique basée sur les énergies renouvelables de l'UE27, des pays BRICS et des sept pays de tête en 2011 [27]

I.5.1 - Energie solaire photovoltaïque

Très largement minoritaire à l'échelle mondiale, l'énergie solaire facilement exploitable est en nette progression dans les domaines photovoltaïque (voire Figure I-13) et thermique. Le photovoltaïque est la principale source d'énergie renouvelable du point de vue électrique pour le bâtiment. En effet, les systèmes de production d'électricité solaire photovoltaïque sont fiables, sans danger et d'une mise en œuvre très aisée. C'est une technologie adaptée aux enjeux énergétiques et environnementaux de l'heure, en ce qui concerne le bâtiment. L'intégration des systèmes photovoltaïques au bâtiment est devenue en 2010, une thématique forte avec deux dimensions connexes que sont le raccordement au réseau et les contraintes liées à l'intégration à l'environnement urbain.

Le photovoltaïque intégré au bâtiment et raccordé au réseau produit de l'électricité sur son lieu de consommation. Cette électricité peut être partiellement ou totalement vendue au gestionnaire du réseau à un prix d'environ 150euro/kWh en France [30].

Le point de faible des systèmes photovoltaïques est leur rendement de 3 à 12% et leur rapport coût d'investissement/énergie produite. Selon le rapport de BMU en 2006 [31], les systèmes photovoltaïques ont besoin de 2 à 5ans pour amortir l'énergie consommée pour leur construction, incluant le coût de fabrication et le montage. Pour maximiser le rendement du collecteur d'énergie solaire, des collecteurs multifonctions ou systèmes photovoltaïques hybrides ont été mis au point. Ils consistent à récupérer l'énergie solaire en la transformant simultanément sous forme électrique et sous forme thermique. Cela permet d'améliorer considérablement le rendement du système.

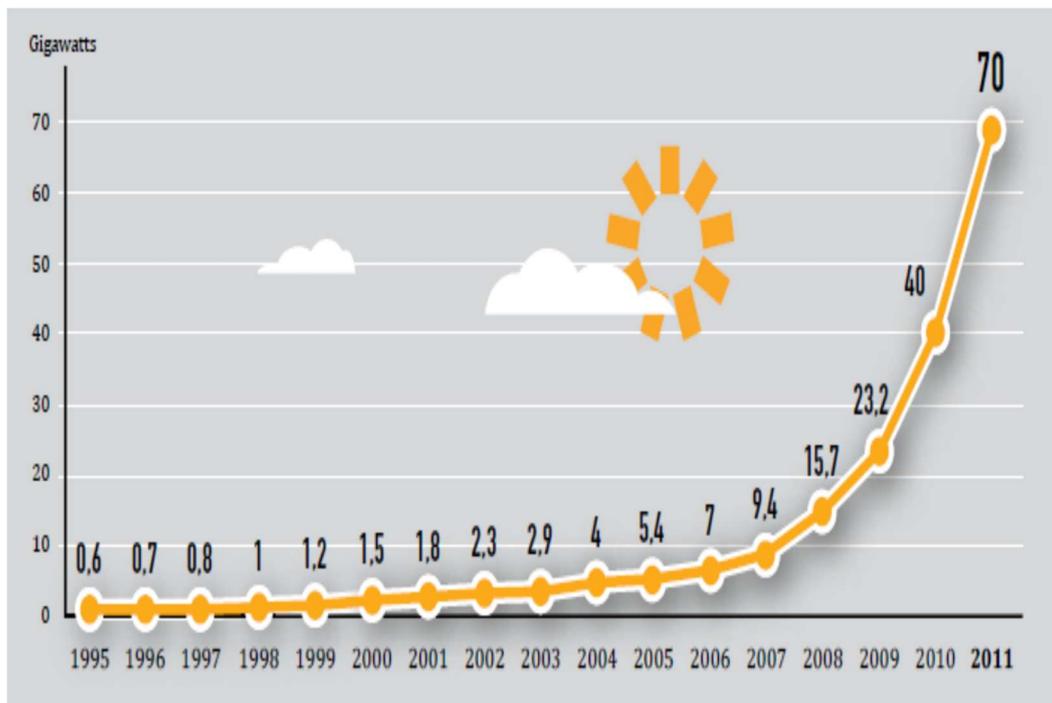


Figure I-13: Capacité mondiale totale du photovoltaïque solaire en 1995-2011 [29]

I.5.2 - Energie solaire thermique

C'est l'énergie récupérée à partir de la lumière du soleil grâce aux capteurs solaires thermiques vitrés. Le principe des capteurs est de concentrer les radiations solaires à un seul endroit, en l'occurrence l'absorbeur pour transformer ces radiations solaires en une énergie thermique pour assurer le chauffage direct de l'eau et des locaux.

Selon les statistiques de l'association professionnelle de l'énergie solaire ENERPLAN 2011[32], le marché solaire thermique en France métropolitain a connu une forte croissance de 40% par an de 1998 à 2006. 2007 se place en retrait avec seulement 16% de croissance. Cependant, ce marché est évalué en décroissance pour 2011 de 2% par rapport 2010. Le marché est composé de :

- Chauffe-Eau Solaire Individuels (CESI) ;
- Systèmes Solaires Combinés (SSC) ;
- Des capteurs ont été installés pour des installations d'eau chaude solaire collectives.

L'énergie solaire thermique est déterminante pour les objectifs du Grenelle d'environnement pour 2020 qui fixe au moins 23% la part des énergies renouvelables dans la consommation énergétique. Dans ce cadre, le solaire thermique passera de 27.000 Tep (Tonne équivalent pétrole) en 2006 à 900.000Tep en 2020, soit au total plus de 4millions de logements équipés [33].

I.5.3 - Energie éolienne

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique de la masse d'air déplacé dans l'atmosphère. Elle est induite de la chaleur du rayonnement du soleil.

L'une des plus anciennes formes d'énergies connues depuis l'antiquité, l'énergie éolienne peut être convertie en énergie mécanique pour déplacer des navires à voiles ou pomper de l'eau. Elle peut être également transformée en force motrice pour le pompage, la compression, etc. Elle est surtout convertie en énergie électrique par le biais d'un dispositif aérogénérateur ou éolienne. Dans ces cas, l'éolienne peut être reliée à un réseau électrique ou fonctionné d'une manière autonome en se couplant à un système d'appoint (générateur diesel, unités de stockage ou panneaux photovoltaïques).

Entre 1996 et 2011, le parc éolien mondial n'a cessé de progresser (Figure I-14). Cette progression s'est vue renforcée en 2014, d'une puissance de 51,473MW faisant un total des installations cumulées qui s'élèvent à 369 597MW [34].

A la manière du photovoltaïque, l'intégration d'éoliennes aux bâtiments est possible et permet, d'ailleurs de décentraliser la production d'énergie en se rapprochant des consommateurs. Cependant, ces petites éoliennes en milieu urbain sont des produits particulièrement nouveaux sur le marché. La structure du bâtiment peut remplacer le mat de l'éolienne dans le cas d'une installation urbaine. Il y a toutefois deux problèmes : la vitesse des vents réduite en milieu urbain, du fait de nombreux obstacles d'une part, les dimensions modestes de ces éoliennes d'autre part.

De nos jours, l'éolien est l'une des énergies renouvelables les plus matures pour produire de l'électricité. Techniquement au point, l'énergie éolienne est aussi rentable d'un point de vue économique. Elle est appelée à se développer fortement partout dans le monde comme l'indique la Figure I-14.

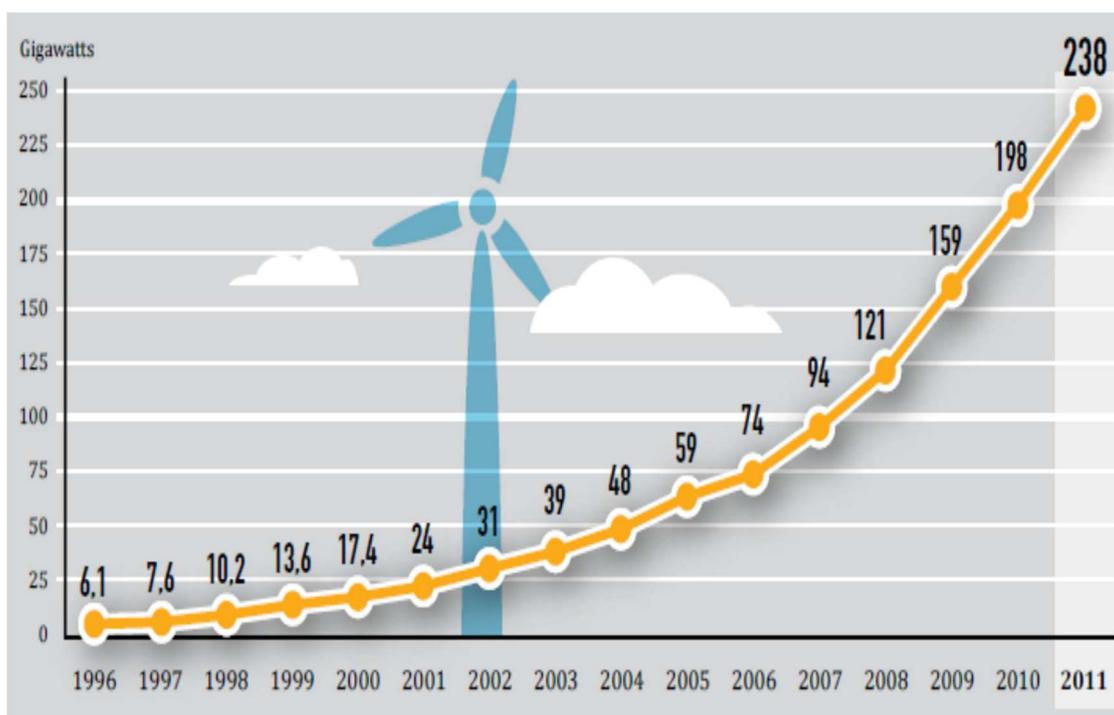


Figure I-14: Capacité cumulée éolienne installée dans le monde [29]

I.6 - EXEMPLES D'APPLICATIONS

Il ressort des analyses de différents paragraphes précédents qu'il est d'une nécessité de développer des solutions innovantes dans la construction des bâtiments avec intégration des énergies renouvelables et données climatiques. Afin de mettre en exergue un cas d'utilisation, la solution développée en Allemagne de bâtiments à énergie positive est présentée ici.

Un bâtiment à énergie positive est défini comme étant un bâtiment qui produit autant ou plus d'énergie qu'il n'en consomme. Ces bâtiments sont la combinaison de bâtiments basse énergie ou passifs avec des toits solaires photovoltaïques et parfois thermiques. Leur réalisation en France n'est pas possible aujourd'hui que via des subventions permettant de limiter le surcout lié aux systèmes photovoltaïques. Leur développement à large échelle nécessite des évolutions fortes en ce qui concerne le coût des systèmes photovoltaïques [49].

De nombreux programmes d'opérations concernant les bâtiments zéro énergie ou à énergie positive sont en cours à l'étranger, comme au Japon, Etats-Unis, Canada, Allemagne et Nouvelle-Zélande. A l'exception du Japon, ces opérations sont basées sur le même concept de bâtiment. Les besoins d'énergie pour le chauffage, le refroidissement et l'électricité sont réduits à travers une bonne conception de l'enveloppe et des équipements performants et économes. Le complément des besoins d'énergie est comblé par des sources d'énergie renouvelables comme le solaire photovoltaïque, thermique et l'éolien. Au Japon, une isolation thermique vraiment efficace, garantissant aux habitants le confort le plus élevé et la meilleure rentabilité, est plutôt l'exception que la règle. Il n'y a pas non plus de valeurs limites à respecter. Les maisons vendues au Japon comme « zéro énergie » sont des maisons avec une isolation conventionnelle utilisant les technologies solaires photovoltaïques et thermiques pour produire autant voire plus d'énergie que leurs besoins annuels [50].

La maison à énergie positive de Fellbach est une maison individuelle située dans la ville de Fellbach en Allemagne. Son principe est de réduire les besoins de chauffage en travaillant l'enveloppe, soit à environ $11\text{kWh}/\text{m}^2.\text{an}$, et d'assurer ces besoins à l'aide d'une pompe à chaleur réversible alimentée en électricité photovoltaïque. La maison est compacte avec la présence d'une véranda au sud, et une façade nord aveugle. La maison comprend un système double flux avec échangeur haute efficacité sur l'air extrait, une installation de puits climatique qui sert au préchauffage de l'air neuf en hiver et au rafraîchissement en été et un toit photovoltaïque assurant une puissance de pointe de 8kWp et produisant environ $7500\text{kWh}/\text{an}$. La production d'énergie électrique photovoltaïque est supérieure aux besoins des équipements et permet d'alimenter tous les usages. La consommation électrique pour le chauffage (pompe à chaleur et pompe de circulation) s'élève à 1500kWh , celle de la production d'ECS à 700kWh et celle de la ventilation à 600kWh .

Les maisons « Plusenergiehauss » de Freiburg sont de maisons solaires bioclimatiques ayant la caractéristique de produire plus d'énergie que nécessaire aux occupants. Les bâtiments sont conçus comme un système préfabriqué modulaire avec ossature métallique ou bois [49]. Le concept est une amélioration de la maison passive avec de larges baies vitrées au sud qui constituent la principale source de chaleur et assurent l'éclairage des pièces principales, ainsi qu'une toiture photovoltaïque. Les balcons sont en acier galvanisé et partiellement solidaires de la structure pour limiter les ponts thermiques. Le coefficient de transmission des parois opaques est de $0,12\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ et les baies vitrées sont constituées d'un triple vitrage. Les besoins annuels de chauffage varient entre 10 et $15\text{kWh}/\text{m}^2$. Les déperditions par ventilation sont réduites via un système de ventilation avec récupération de chaleur sur l'air extrait. Une toiture

photovoltaïque produit entre 3 et 12kWp suivant la taille du bâtiment. Le débord de cette toiture joue également le rôle de brise soleil.



(a)



(b)

Figure I-15: Maisons à énergie positive, (a) Fellbach et (b) Freiburg [49]

I.7 - SYNTHÈSE ET CONCLUSION

Au regard des enjeux énergétiques et environnementaux des bâtiments avec tous leurs corollaires, il est impératif aux décideurs politiques de respecter et de faire respecter les engagements et traités internationaux visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre. A cet effet, les chercheurs doivent être en avant garde de la lutte contre le changement climatique. De par leurs savoirs scientifiques et technologiques, il est un devoir pour eux de développer des solutions, en dehors des énergies fossiles et fissiles, basées sur les sources d'énergies propres et renouvelables. Il s'agit entre autres des énergies provenant des sources comme le soleil, le vent, la géothermie, la biomasse et l'océan. Ces sources d'énergie propre et durable sont favorables à l'environnement contrairement aux sources d'énergies conventionnelles. Toutefois ces sources d'énergies renouvelables varient en fonction du temps de la journée, de la saison et de l'année. Le caractère aléatoire de ces sources a orienté les chercheurs vers des systèmes hybrides, c'est-à-dire la combinaison deux ou plusieurs sources renouvelables avec ou sans sources conventionnelles. L'hybride apporte donc au système une disponibilité accrue et un approvisionnement constant des charges en énergie.

La combinaison de plusieurs sources d'énergies, en l'occurrence renouvelables permet d'optimiser au maximum la production de l'électricité, au point de vue technique qu'économique [35]. L'hybridation des sources renouvelables a un intérêt considérable par leur flexibilité incomparable, leur souplesse de fonctionnement et leur prix de revient attractif.

En outre, il permet de lisser la puissance délivrée par une source d'énergie et pallier pendant une durée limitée une indisponibilité partielle ou totale de source d'énergie.

Le développement des solutions hybrides de sources de production de l'énergie ne doit pas occulter les recherches de solutions pour les bâtiments qui, de ce fait constituent les charges à alimenter. Ainsi, les bâtiments modernes doivent se conformer aux exigences de la réglementation thermique RT2012, en assurant un confort thermique avec une consommation énergétique plus faible que la production. La mise en œuvre de ces solutions exige un processus laborieux de dimensionnement, préalablement basé sur une connaissance approfondie du gisement en énergies renouvelables du site d'implantation, une gestion rigoureuse de l'énergie électrique produite en aval. Mais il est à préciser que le dimensionnement de sources d'énergie ne fait pas l'objet de nos travaux. En revanche, on s'intéressera dans les chapitres suivants, au choix optimal de la taille des équipements de chauffage.

CHAPITRE II :
MODELISATION ET SIMULATION
DU SYSTEME ENERGETIQUE D'UN
BATIMENT

CHAPITRE II : MODELISATION ET SIMULATION DU SYSTEME ENERGETIQUE D'UN BATIMENT

II.1 - INTRODUCTION

Ce chapitre présente d'abord une analyse des paramètres influençant la performance énergétique du bâtiment puis donne un aperçu global des différentes approches de modélisations employées en vue de réaliser un modèle énergétique du bâtiment. En se basant sur les avantages et inconvénients de chacune des méthodes, un choix sera opéré sur la méthode boîte grise notamment le modèle RC (Resistance et Capacité) pour développer un modèle de bâtiment. Outre la modélisation du bâtiment, la revue bibliographique a permis de choisir les modèles des équipements constituant le système énergétique du bâtiment étudié à savoir : la pompe à chaleur, réservoir de stockage, les capteurs solaires thermiques, les radiateurs à eau chaude.

L'objectif premier de ce chapitre est donc de présenter les modèles développés ou choisis dans la littérature, des éléments constituant le système énergétique étudié y compris le bâtiment. Notre modèle de bâtiment a été développé à partir du modèle R3C2 élaboré par Louis Laret.

Outre ces modèles choisis, des modèles de données météorologiques sont présentés.

Une synthèse sur les systèmes de régulation thermique dans les bâtiments est faite où le régulateur classique Tout Ou Rien, en raison de sa simplicité à mettre en œuvre est choisi et une fonction programmation pour réguler la température du réservoir, seront utilisés dans cette étude.

Enfin, l'agrégation de l'ensemble de ces modèles formant le système étudié et leur implémentation dans Matlab/Simulink ont servi à développer un outil d'aide aux décisions.

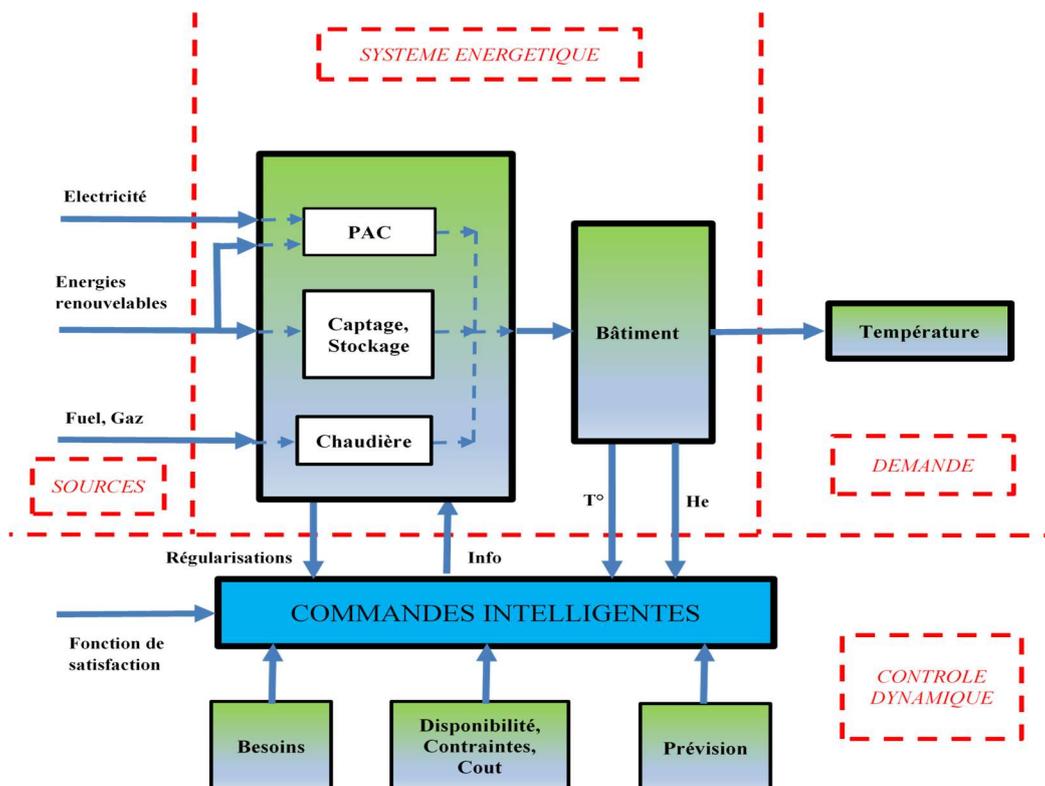


Figure II-1: Synoptique du fonctionnement d'un système de chauffage [64]

Cet outil de simulation thermique dynamique dont l'objectif est de dimensionner de manière optimale à la fois les équipements du chauffage et l'enveloppe du local, tient compte des caractéristiques dimensionnelles du bâtiment. Le simulateur développé dans Matlab/Simulink sera testé pour s'assurer de son bon fonctionnement en considérant différents cas d'apports thermiques extérieurs et intérieurs. Des résultats de simulation ont confirmé la fiabilité de l'outil.

II.2 - FACTEURS DE LA PERFORMANCE DU BATIMENT

Les bâtiments dans leur environnement d'existence sont sujets à plusieurs facteurs qui influencent leur performance énergétique. L'analyse de ces facteurs nous aidera dans la conception d'un outil de calcul.

II.2.1 - Environnement extérieur

Le milieu extérieur du bâtiment est caractérisé par les facteurs météorologiques tels que la température de l'air, l'humidité relative, l'ensoleillement solaire et la vitesse du vent. Tributaire de la localisation géographique, le bâtiment évolue librement dans le temps sans autre action extérieure. Ces facteurs agissent différemment sur des performances énergétiques du bâtiment.

La température extérieure est déterminante pour les échanges par conduction à travers l'enveloppe et par renouvellement d'air. Elle est unique pour le lieu considéré. Sur une même année, la température extérieure peut être inférieure ou supérieure aux seuils de confort. Si l'altitude du lieu d'étude diffère de la station météorologique de référence, il est possible de corriger ces températures au moyen de corrélations. Il y a ensuite l'humidité qui intervient dans les échanges par renouvellement d'air entre intérieur et extérieur. La condensation abîme les parois et favorise les pertes thermiques, on cherche donc à l'éviter au maximum. Avec les nouvelles normes constructives, il est de plus en plus rare d'observer ce phénomène.

Le vent joue un rôle capital dans les échanges convectifs superficiels entre l'enveloppe et l'air extérieur. Il permet d'estimer ces échanges et permet aussi d'estimer les échanges par infiltrations d'air. Le vent n'est pas toujours pris en compte, cela dépend du modèle choisi.

L'ensoleillement dont l'orientation dépendant de l'heure et du jour de l'année, est composé d'un rayonnement diffus, globalement isotrope et d'un rayonnement direct. Il constitue des sources d'apports thermiques extérieurs immenses. La position du soleil dans le ciel est définie par deux angles. Les effets des nuages sont pris en compte dans le rayonnement diffus et le rayonnement direct. Chaque paroi du bâtiment reçoit un ensoleillement différent selon son orientation. Il est possible que les données météorologiques ne comportent que les rayonnements reçus selon cinq orientations de base : nord, sud, est, ouest, horizontale.

II.2.2 - Enveloppe, parois et inertie

Composée des parois isolées différemment, l'enveloppe sépare le milieu intérieur de l'extérieur d'un bâtiment. Ils se trouvent dans ces enveloppes, en l'occurrence les murs des ouvertures servant des baies pour permettre le passage de la lumière, du rayonnement solaire et pour les portes. La conception de l'enveloppe dans son environnement est un facteur prépondérant dans la consommation énergétique d'un bâtiment. Les murs, les planchers hauts et bas sont des parois opaques, constitués le plus d'un matériau de structure (béton, brique, parpaing, etc.), d'un isolant (polystyrène, laine minérale, etc.) [52].

Des assemblages plus complexes existent, tels que la façade légère (utilisée pour les bâtiments tertiaires) ou l'ossature bois. Les matériaux mis en œuvre sont caractérisés par leur capacité

thermique et leur conductivité. Les murs sont donc constitués par l'assemblage de ces différents matériaux repartis en couches.

La constitution de la paroi détermine les déperditions de même que le comportement dynamique des bâtiments. La mise en œuvre influence aussi l'inertie globale du bâtiment : l'isolation par l'extérieur favorise l'inertie du bâtiment par rapport à une isolation par l'intérieur, ceci vient du fait que les éléments de structures ont une capacité thermique plus grande que les isolants.

Contrairement aux parois opaques, les parois vitrées sont constituées d'une partie transparente, le vitrage et d'une partie opaque, le cadre. Le cadre assure la liaison entre la baie et le vitrage. Idéalement, il ne doit pas être source d'infiltration d'air ou de déperditions thermiques. Sa surface et sa conductivité thermique sont donc essentiels.

Le vitrage est généralement en verre plat. Les caractéristiques des vitrages dépendent du nombre de vitrages (simple, double, triple), de l'épaisseur de chaque vitrage, de la nature et de la pression du gaz de remplissage (air, gaz rare, etc.) piégé entre deux vitrages, de traitements de surface ou de films collés en surface destinés par exemple à filtrer certaines longueurs d'onde (spécialement dans la gamme infrarouge).

On classe les parois internes en parois légères qui ont peu d'influence sur l'inertie du bâtiment et en parois massives qui jouent un rôle majeur. Les parois massives de l'enveloppe participent à l'inertie globale du bâtiment, cependant une isolation par l'intérieur aura pour effet de réduire cette participation, alors que l'isolation par l'extérieur la favorise.

L'inertie par définition, désigne la capacité d'une paroi à absorber puis à restituer la chaleur de manière différée. Elle caractérise un phénomène dynamique et représente par analogie électrique une capacité, bien que dans la réalité, la physique soit un peu plus complexe puisque chaque paroi peut avoir une résistance et une capacité différente suivant la mise en œuvre des matériaux. Une paroi est caractérisée par une grandeur appelée résistance thermique qui traduit la capacité du matériau à résister au chaud ou au froid. Selon les exigences de la réglementation thermique, la résistance thermique notée R d'une paroi doit être supérieure ou égale au niveau minimal réglementaire, qui dépend de la zone climatique.

Type de paroi opaque	Résistance thermique minimale d'un ensemble paroi +isolant en $m^2.K/W$		
	Zone climatique H ₁	Zone climatique H ₂ (à plus de 800m d'altitude)	Zone climatique H ₃ (à moins de 800m d'altitude)
Mur extérieur, toiture de pente >60°	2,9	2,9	2,2
Mur en contact avec un volume non chauffé	2	2	2
Plancher bas donnant sur l'extérieur ou sur un local non chauffé	2,7	2,7	2,1
Plancher de combles perdus	4,8	4,8	4,8
Toiture de pente <60°	4,4	4,3	4
Toiture terrasse	3,3	3,3	3,3

Tableau II-1: Valeurs de résistance thermique d'un ensemble paroi et isolant [51]

II.2.3 - Renouvellement d'air

Ce phénomène découle de la ventilation naturelle ou contrôlée et des infiltrations dont le but est d'assurer le renouvellement d'air en vue de satisfaire les conditions d'hygiène et de confort liées à l'occupation du bâtiment.

Dans la réalisation de bâtiment neuf, la ventilation naturelle par ouverture des fenêtres n'est plus employée car elle génère des sur-ventilations. De ce fait, on se focalise donc sur les ventilations contrôlées. La ventilation mécanique contrôlée dite VMC assure un renouvellement d'air minimal dans l'ambiance intérieure pouvant être variable dans le temps et selon les occupations. La VMC simple flux consiste le plus souvent à mettre le bâtiment par extraction de l'air dans les pièces humides. L'air extérieur pénètre alors, par des ouvertures réalisées dans les autres pièces. Quant à la VMC double flux en revanche, elle assure l'extraction et l'insufflation dans le bâtiment via deux circuits aérauliques séparées. La plupart des systèmes disposent d'un échangeur thermique air-air permettant de réchauffer l'air extérieur avec l'air extrait avant de l'insuffler dans le bâtiment. Les échangeurs peuvent avoir une efficacité atteignant 90% ce qui réduit considérablement les déperditions liées à la ventilation.

II.2.4 - Gestion des apports énergétiques

L'ambiance intérieure du bâtiment est influencée par les apports énergétiques qui sont soit, de rayonnement solaire et/ou soit, des apports internes du bâtiment en question.

Le rayonnement solaire incident transmis à l'intérieur du bâtiment constitue les apports solaires. Ces apports pénètrent dans le bâtiment à travers les baies. Ce rayonnement est absorbé par l'air et les parois de la pièce. Les vitrages, opaques au rayonnement infrarouge, piègent ainsi le rayonnement issu des parois intérieures. Le rayonnement ainsi piégé se répartit ensuite sur les différentes parois.

Il existe différents moyens, tels que les brise-soleils ou les casquettes, pour empêcher le soleil d'atteindre la baie, dans des périodes chaudes : ce sont des protections fixes. Elles doivent permettre un apport solaire en période froide et protéger du soleil en période chaude, tout en permettant un accès à l'éclairage naturel acceptable.

Les protections mobiles telles que les stores, sont généralement asservies au comportement de l'utilisateur en fonction de l'éblouissement. L'impact énergétique d'un store intérieur est très faible mais les stores extérieurs se comportent comme des brise-soleils et sont souvent difficilement pris en compte.

Outre les apports solaires, la chaleur du métabolisme humain et la dissipation thermique des équipements constituent des apports internes du bâtiment. Il est impossible de prévoir l'occupation précise d'un local, les simulations s'appuient donc sur des scénarii d'occupation fondés sur des relevés expérimentaux.

II.2.5 - Confort hydrothermique

Le confort hygrothermique est une exigence essentielle que le concepteur doit évidemment prendre en compte. Ce confort peut être défini de différentes manières :

- Une sensation de bien-être général ;
- L'absence de plainte inconfort [52] ;
- Les conditions pour lesquelles les mécanismes d'autorégulation du corps sont à un niveau minimum d'activité pour maintenir constante sa température corporelle.

Physiquement, le corps humain échange de la chaleur en permanence avec son environnement par plusieurs phénomènes (convection, conduction, rayonnement et évaporation). Il produit aussi de la chaleur par son métabolisme et son activité physique et régule sa température autour

de 37°C par divers métabolismes (transpiration, frissonnement, modification de vêtue, de son environnement local). Sauf pour les cas extrêmes, le corps humain est capable de compenser les pertes ou les gains de chaleur, il va par conséquent « s'adapter » et trouver un équilibre pour une large plage d'ambiance thermiques différentes.

L'environnement thermique de l'individu est caractérisé par quatre grandeurs physiques : la température de l'air, la température de rayonnement, l'humidité et la vitesse de l'air. Ces variables réagissent avec l'activité et la vêtue du corps humain pour établir son état thermique et constituent les six paramètres d'échanges thermiques entre l'homme et son environnement. En général, une situation de confort correspond à une situation où l'équilibre thermique est maintenu sans effort sur toutes les parties du corps. Il faut noter que pour garder une sensation de confort, deux parties du corps ne doivent pas être soumises à des conditions trop différentes, sans quoi l'asymétrie engendre une gêne. De même, une différence trop importante entre la température de l'air et la température de rayonnement ressentie (sensation locale de froid en hiver quand on se rapproche d'une fenêtre, sensation d'inconfort par rayonnement direct du soleil, différence trop importante entre la température de l'air et le plancher ou plafond).

II.3 - CHOIX DE LA METHODE DE MODELISATION DU BATIMENT

La littérature révèle plusieurs méthodes de modélisation du bâtiment. Ces méthodes dont leur construction demeure assez difficile, diffèrent selon le degré de finesse, la flexibilité et la réutilisabilité. Elles sont regroupées en trois catégories : boîte noire, boîte blanche et boîte grise.

Les modèles dite « boîte noire » sont construits sur la base de mesures effectuées sur les entrées et les sorties du processus à modéliser. La modélisation consiste alors à utiliser, pour représenter les relations entre les entrées et les sorties, des équations (algébriques, différentielles, ou récurrentes) paramétrées, et à estimer les paramètres, à partir des mesures disponibles, de manière à obtenir la meilleure précision possible avec le plus petit nombre possible de paramètres ajustables [53]. Ces modèles permettent à la résolution numérique de problèmes sans apporter aucune interprétation physique. Donc, ils ne sont pratiques que dans le cas d'une prédiction du comportement thermique du bâtiment pour un éventuel dimensionnement. Le manque de flexibilité de ces modèles constitue un inconvénient majeur.

Les modèles « boîte blanche » contrairement aux modèles « boîte noire », se basent sur la physique et décrivent de façon explicative le système. Ils sont issus des phénomènes qui régissent le processus à l'aide de connaissances théoriques. De ce fait, ils ont une valeur prédictive et explicative [54]. Ces modèles sont en général caractérisés par une discrétisation zonale du volume d'air et une résolution des équations de bilan d'énergie au sein des zones et à la surface des parois du bâtiment.

Selon [55][56][57], les modèles « boîte blanche » présentent deux avantages majeurs :

- Leur flexibilité : la structure du modèle est susceptible de modification et manipulation sans avoir à le modéliser de nouveau ;
- Leur réalisme : le système se comporte le plus proche de la réalité. Par conséquent des résultats plus précis sont générés.

De plus, ils permettent une analyse de sensibilité complète et une bonne compréhension de la physique du bâtiment. Toutefois, ils sont les plus complexes à réaliser, puisqu'ils contiennent très peu d'approximations et requièrent donc un grand nombre de paramètres. Par conséquent, ils nécessitent des temps de calcul importants et des ordinateurs performants [48].

Les modèles « boîte grise », situés à mi-chemin entre les modèles boîte noire et les modèles boîte blanche combinent le sens physique et l'esprit des modèles simples. Ils nécessitent, contrairement aux modèles boîte blanche, peu de moyen informatique et offrent une meilleure flexibilité. D'après [54], leur avantage comparativement aux modèles boîte noire est leur intégration de modèles se rapprochant davantage de la physique. Ainsi donc, selon [48] les principaux avantages des modèles boîte grise se résument à :

- Une compacité et une simplicité de construction du modèle vu le nombre réduit de paramètres ;
- Une analyse de sensibilité plus pratique ;
- Une meilleure flexibilité qui rend facile à manipuler le modèle et son niveau de modélisation.

Enfin, ces modèles minimisent le nombre de paramètres tout en gardant un haut niveau de précision. De plus, ils favorisent une plus grande réutilisabilité.

La méthode choisie dépend des facteurs de qualité mentionnés dans le Tableau II.1. Ces facteurs interviennent dans les modélisations multi-physiques tel que les échanges énergétiques au sein du bâtiment. Dans ce cas, le couplage de sous-modèle deviennent judicieux pour de raisons suivantes :

- Lorsque plusieurs phénomènes physiques (aérodynamique, thermique, hydraulique, etc.) sont mis en jeu ;
- Pour apporter plus de souplesse dans l'introduction de nouveaux composants ou sous-modèle ;
- Pour éviter la restructuration du modèle à chaque nouvelle modification.

[48] dans ses travaux de thèse doctorale a fait une étude comparative des trois grandes catégories de modèles susmentionnées dont la synthèse est résumée dans le Tableau II.2. Il en ressort que les facteurs de qualité les plus recherchés dans le choix de la méthode de modélisation sont la réutilisabilité, la visibilité et la flexibilité. Les modèles « boîte blanche » et « boîte grise » réunissent ces trois critères en offrant une modularité très appréciée. Ainsi, l'outil final est une combinaison de modules de sous-modèles qui échangent de l'énergie. En effet, la construction du modèle global consiste en une décomposition du bâtiment en plusieurs éléments, modélisés séparément, puis regroupés en un seul modèle global.

Néanmoins, la description mathématique des échanges énergétiques, entre les composants élémentaires, devient très abstraite dans la mesure où les interactions entre les phénomènes physiques deviennent importantes.

	Boîte noire	Boîte blanche	Boîte grise
Modèles	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Modèle de Givoni ▪ Méthode des plans d'expérience 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Modèle de connaissance (zonaux, CFD, etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Modèle systémique ▪ Méthode de Bond Graph ▪ Méthode nodale ▪ Méthode des analogies électriques
Facteurs de qualité			
Modularité			X
Flexibilité		X	X
Extensibilité			X
Réutilisabilité		X	X
Pérennité (robustesse)	X	X	X
Vérifiabilité		X	X
Convivialité	X		X
Visibilité		X	X
Encapsulation	X		X
Précision des résultats	X	X	X
Temps de calcul réduit	X		
Adaptation à l'analyse de sensibilité		X	X
Domaines d'application	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Prédiction du comportement thermique ; ▪ Diagnostic de performance énergétique. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pré-étude de la conception des bâtiments complexes ; ▪ Identification et localisation des points chauds et froids, phénomène de stratification, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Diagnostic de performance énergétique ; ▪ Audit énergétique ; ▪ Etude paramétrique ; ▪ Analyse de sensibilité ; ▪ Etude d'optimisation.

Tableau II-2: Facteurs de qualité des différents niveaux de modélisations [48]

II.4 - ETAT DE L'ART DE MODELE RC

De très nombreux travaux se sont attachés à développer des modèles de bâtiment en utilisant analogie électrique RC de différents ordres. L'ordre d'un modèle correspond au nombre de nœuds de températures reliées à une capacité. Parmi ces modèles, de nos jours, nombreux sont ceux qui prévoient les besoins de chauffage ou de refroidissement et la température intérieure. Mais il y a peu de discussions portant sur la recherche d'un bon compromis entre précision et simplicité des modèles ou sur les bonnes pratiques pour l'identification des paramètres.

A cet effet, Fux et al [58] compare des modèles d'ordre 1 à 4 sur leur capacité à prévoir la température intérieure. Il utilise une période d'inoccupation de 12 jours pour identifier les paramètres du modèle et montre qu'une équation différentielle d'ordre 1 est suffisamment performante.

Une étude réalisée par Bacher et al [59] compare 10 modèles RC d'ordre 2 à 5 sur leur capacité à prévoir la température intérieure. Il résulte de cette comparaison que la puissance de chauffage est une entrée qui est spécialement contrôlée pour solliciter le modèle sur un grand domaine fréquentiel. Les données d'apprentissage sont issues d'un immeuble inoccupé. Cette méthodologie n'est pas applicable sur la plupart des bâtiments réels. En effet, la puissance est une sortie du modèle et non une entrée, de plus l'identification doit pouvoir se faire en conduite habituelle du bâtiment et en période occupée.

Ensuite, Palomo et al [60] utilise des modèles simplifiés d'ordre 2 à 6 pour représenter une maison individuelle multizones. Elle arrive à la conclusion que, pour le bâtiment testé, l'ordre 2 est suffisant pour prévoir la consommation journalière et qu'un modèle d'ordre 4 est nécessaire pour obtenir une prévision fine de la puissance et de la température.

Mejri [61], dans ses travaux montre qu'à partir de l'ordre 2, il n'y a pas d'amélioration visible des prévisions et que les résultats peuvent même se dégrader. Ces travaux sont effectués sur un bâtiment de bureau d'un étage avec des modèles d'ordre 1 à 5 en prévision de puissance et de température. Il faut ajouter qu'à la différence des modèles « boîte noire », les modèles « boîte grise » permettent de prévoir simultanément la puissance et la température, les deux étant liées par des équations physiques.

Enfin dans le même esprit, Hudson et al [62][63] comparent des modèles RC du premier ordre et du second ordre mis sous forme de modèle d'état dans Matlab/Simulink pour des applications de contrôle à court terme. Ils arrivent à la conclusion qu'il n'y a pas besoin d'avoir un ordre plus élevé. Les modèles sont identifiés à partir de données provenant d'un bâtiment à forte inertie thermique. Le choix de ce type de modèles se justifie par le fait qu'ils sont transparents, facile à interpréter et peuvent être initialisés à partir de mesures. Les modèles RC, sont donc généralement d'ordre inférieur à trois pour des applications de contrôle, néanmoins il est possible de réaliser des modèles de grande taille.

Globalement un consensus se dégage autour des auteurs pour désigner l'ordre deux comme le modèle le plus simple pour prévoir la température et la puissance d'un bâtiment complexe.

II.5 - MODELISATION DU BATIMENT

Les besoins énergétiques d'un bâtiment dépendent fortement des déperditions thermiques à travers les parois, le plancher et le plafond. L'enveloppe est donc l'un des composants les plus influents sur l'efficacité énergétique du bâtiment. Par conséquent, la modélisation énergétique nécessite une description exacte du comportement thermique de l'enveloppe en vue de prédire la réponse du bâtiment face aux différentes sollicitations intérieures et extérieures [40].

II.5.1 - Modèle RC du bâtiment

La modélisation thermique du bâtiment s'intéresse à la représentation des températures de ce dernier. Malgré son inertie thermique, il subit l'impact de l'environnement extérieur à cause de la circulation de l'air et de l'échange thermique avec les parois et les façades. Le modèle thermique a pour mission de prédéterminer le comportement thermique d'un bâtiment. Il résulte de l'état de l'art qu'un modèle d'ordre deux est largement suffisant pour prédire le comportement d'un bâtiment lors de chauffage. Deux nœuds de température liés aux capacités sont considérés à savoir, la température de l'air ambiant intérieur du bâtiment et la température des murs. Le modèle développé découle du modèle de référence élaboré par Louis Laret.

Afin de développer notre modèle, un modèle de référence R3C2 est choisi dans la littérature. C'est un modèle d'ordre 2 et à cinq paramètres qui décrit le comportement thermique du bâtiment ne tenant pas compte de la régulation du système de chauffage. Ce modèle comprend des entrées constituées de données météorologiques (température extérieure et flux solaire) et de la courbe de charge électrique (chauffage et apports internes) et la sortie est la température intérieure du bâtiment.

Le choix de ce modèle de référence se justifie par l'ordre deux du modèle, c'est-à-dire le nombre de nœuds de températures capacitatives est deux. Ensuite, il prend en compte quelques données d'entrées similaires à celles qui seront prises en compte dans notre système d'étude.

Dans le cadre de cette thèse, en raison des paramètres à étudier, nous avons intégré au modèle de base, la ventilation mécanique qui est modélisée par R_f , les apports thermiques internes notamment les métabolismes humains présentés P_M , l'éclairage par P_E . Les flux solaires sont subdivisés en flux solaires nets modélisés par $\Phi_{s,N}$ représentant la partie du rayonnement solaire pénétrant dans le bâtiment à travers les baies et ouvertures vitrées. L'autre partie de flux solaires dit flux de structure est celle qui réchauffe directement la structure du bâtiment à travers ses parois. Elle est désignée par $\Phi_{s,S}$ dans le modèle.

Plusieurs hypothèses sont prises en compte dans le modèle par mesure de simplification de notre étude à savoir :

- Le bâtiment est monozone c'est-à-dire que l'on considère le bâtiment comme une seule zone ayant des propriétés physiques homogènes (température, pression, humidité relative, etc.). Un modèle monozone nécessite peu d'informations liées à l'enveloppe ou au système de chauffage, de refroidissement et de ventilation. Néanmoins, il permet d'avoir un ordre de grandeur sur la consommation énergétique [73]. Dans le cas de notre modèle, toutes informations nécessaires sont fournies ;
- La température de l'air ambiant intérieur est homogène ainsi que celle des murs ;
- L'isolation thermique du bâtiment est faite sur l'ensemble de ses parois et 10% de la capacité thermique de ces dernières sont prises en compte dans le calcul de la capacité thermique de l'air ambiant.

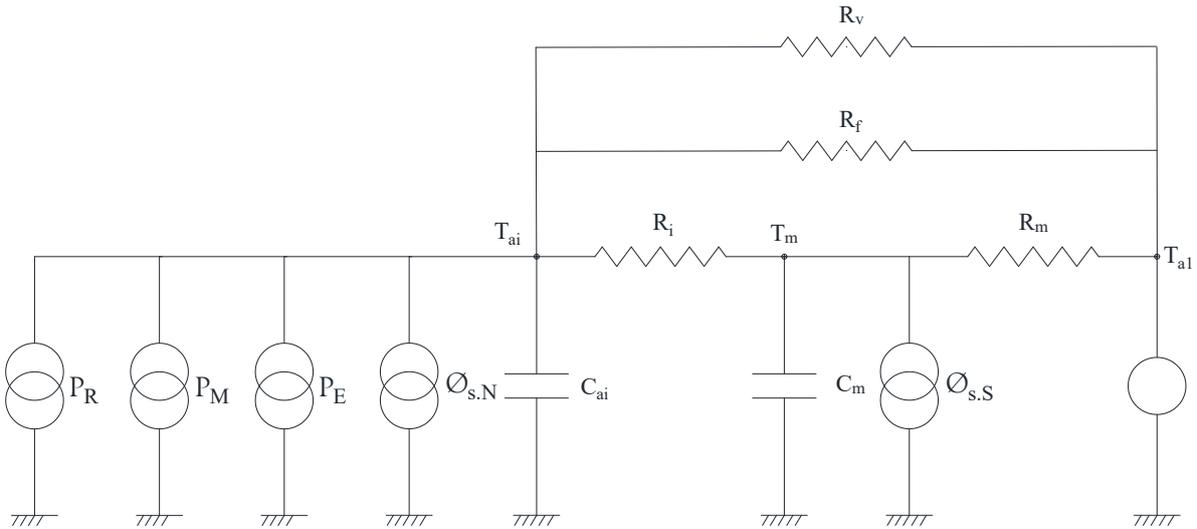


Figure II-2: Modèle électrique RC d'un bâtiment monozone

Où :

- R_i : résistance thermique de conduction intérieure (K/W) ;
- R_m : résistance thermique de conduction des murs (K/W) ;
- R_f : résistance thermique de conduction d'air par les fenêtres (K/W) ;
- R_v : résistance thermique équivalente à la ventilation mécanique (K/W) ;
- C_{ai} : capacité thermique de l'air ambiant intérieur (J/K) ;
- C_m : capacité thermique du mur (J/K) ;
- $\Phi_{s,N}$: flux solaire net (W/m^2) ;
- $\Phi_{s,S}$: flux solaire de structure (W/m^2) ;
- P_R : apport thermique des radiateurs à eau chaude (W) ;
- P_M : apport thermique dû aux métabolismes humains (W) ;
- P_E : apport thermique dû aux éclairages du bâtiment (W) ;
- T_{ai} : température de l'air ambiant intérieur (K) ;
- T_m : température moyenne des murs (K) ;
- T_{al} : température de l'air ambiant extérieur (K).

La capacité thermique du bâtiment (murs, plafond et plancher) C_m dépend de la capacité spécifique, de la densité des matériaux et de sa dimension. Elle est définie par la formule suivante [90] :

$$C_m = \sum_{k=1}^n c_{mk} V_{mk} \rho_{mk} \quad (1)$$

Où :

- C_m : capacité spécifique matériau (J/Kg.K) ;
- ρ_m : densité volumique (Kg/m^3) ;
- V_m : volume de matériau (m^3).

La capacité thermique de l'air ambiant C_{ai} s'écrit [90] :

$$C_{ai} = \sum_{k=1}^n c_{ak} V_{ak} \rho_{ak} \quad (2)$$

Où :

- C_a : capacité spécifique de l'air (1005 J/Kg.K) ;
- ρ_a : densité volumique (1,225 Kg/m³) ;
- V_a : volume d'air du bâtiment (m³).

Dans le calcul de la capacité thermique de l'air, on prend en compte 10% de la capacité thermique du plancher et du plafond et la capacité thermique des isolants sur les murs.

@ Calcul de flux solaire net utile et flux solaire de structure

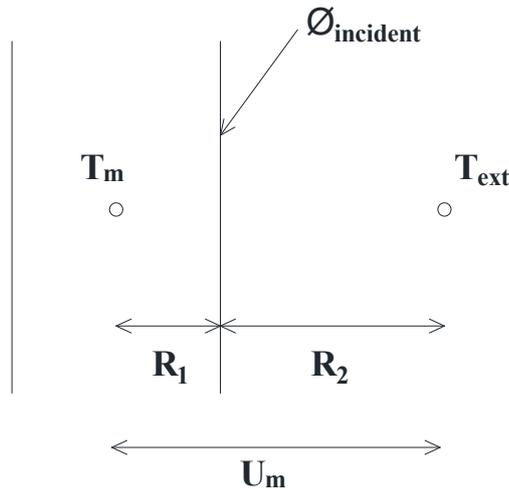


Figure II-3: Coupe d'une enveloppe d'un bâtiment

Le flux solaire net utile à ajouter au nœud T_m se détermine par [40] :

$$\Phi_{s.N} = \alpha \times \frac{U_m}{U_2} \times \Phi_{incident} \quad (3)$$

Avec

$$U_2 = 1/R_2 \text{ et } U_m = 1/(R_1 + R_2) \quad (4)$$

Où, α - le facteur d'absorption de la face extérieure ; h_e – le coefficient surfacique extérieur d'échange par convection.

Pour une couche plane parallèle homogène d'épaisseur e , de conductivité k , le flux solaire de structure est calculé par l'expression :

$$\Phi_{s.S} = \alpha \times \frac{1}{\frac{e}{2k} h_e + 1} \times \Phi_{incident} \quad (5)$$

Où, $\Phi_{s.S}$: flux solaire de structure (W/m^2); $\Phi_{incident}$: flux solaire incident (W/m^2); e est l'épaisseur du mur plan; k est la conductivité thermique du mur et h_e , le coefficient de convection surfacique extérieure.

II.5.2 - Formulation mathématique

La formulation du modèle mathématique résulte d'écritures des équations en application de la loi d'ohm et la loi de Kirchhoff traduisant la conservation de l'énergie à chacun des nœuds pour obtenir les équations différentielles décrivant l'évolution en température du bâtiment.

Au nœud T_{ai} :

$$C_{ai} \frac{dT_{ai}}{dt} = \frac{T_m - T_{ai}}{R_i} + \frac{T_{al} - T_{ai}}{R_v} + \frac{T_{al} - T_{ai}}{R_f} + P_R + P_E + P_M + S_f \Phi_{s.N} \quad (6)$$

D'où, en sommant les apports thermiques internes considérés, on obtient P_T défini par l'expression (7) et la détermination de la résistance équivalente R_{eq} (8) :

$$P_T = P_E + P_M \quad (7)$$

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_f} + \frac{1}{R_v} \quad (8)$$

Au nœud T_m :

$$C_m \frac{dT_m}{dt} = \frac{T_{ai} - T_m}{R_i} + \frac{T_{al} - T_m}{R_m} \quad (9)$$

$$\frac{dT_m}{dt} = \frac{1}{C_m} \left[\frac{T_{ai}}{R_i} - \left(\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_m} \right) T_m + \frac{T_{al}}{R_m} \right] \quad (10)$$

Les équations (6) et (7) des deux nœuds forment un système qui modélise le bâtiment étudié dont l'expression est ci-dessous :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dT_{ai}}{dt} = \frac{1}{C_{ai}} \left[- \left(\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_{eq}} \right) T_{ai} + \frac{T_m}{R_i} + \frac{T_{al}}{R_{eq}} + P_R + P_T + S_f \Phi_{s.N} \right] \\ \frac{dT_m}{dt} = \frac{1}{C_m} \left[\frac{T_{ai}}{R_i} - \left(\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_m} \right) T_m + \frac{T_{al}}{R_m} \right] \end{array} \right. \quad (11)$$

II.5.3 - Présentation du bâtiment d'application

Le bâtiment étudié situé à Villeneuve-Saint Georges est un bâtiment isolé à usage d'habitat à deux niveaux. Le premier niveau servant d'atelier et de garage et second niveau est composé de cinq pièces. Il a une dimension de longueur $L=10m$, de largeur $l=6,5m$ et de hauteur sous plafond $h=3m$. Sa surface de chauffage est de $65m^2$. Les valeurs des nœuds de températures ont été calculées en tenant compte des coefficients de convection intérieur et extérieur. Ces valeurs de coefficients ont été prises égales à $3,6W/m^2.K$ et $18W/m^2.K$ respectivement. Le système de chauffage comporte des équipements de captage, de production et d'émission de l'énergie thermique. Ce sont : des panneaux solaires thermiques, un réservoir de stockage d'eau chaude, une pompe à chaleur et des radiateurs à eau chaude. La température intérieure est contrôlée par un régulateur thermostatique ordonnant la marche et l'arrêt de la pompe à chaleur. La température de consigne est fixée à $19^\circ C$. A grâce à Météo France, les données météorologiques issu des modèles de Menguez, ont été développées.

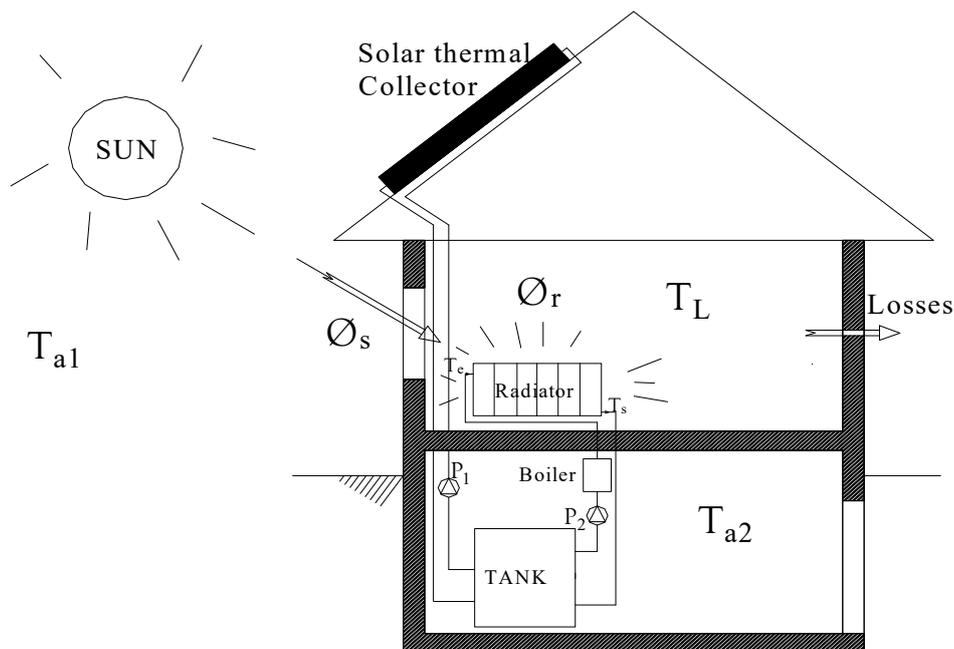


Figure II-4: Exemple schématique du bâtiment doté des équipements solaire

Vitrage façade Nord	Vitrage façade Sud	Vitrage façade Est	Vitrage façade Ouest
0%	0%	15%	10%

Tableau II-3: Taux de vitrage des façades du bâtiment

Nous présentons ici les coefficients caractéristiques des matériaux du bâtiment étudié situé, en rappel dans la ville de Villeneuve Saint-Georges dans le Val de Marne (Ile-de-France). Le premier Tableau II-3 définit les paramètres de taux de vitrage des façades. Le second quant'à lui, recense les valeurs de capacité thermique retenues pour les différents nœuds (Tableau II-4). Enfin, le dernier tableau II-5 présente les caractéristiques thermo-physiques de l'enveloppe.

	Nœud thermique	Volume (m ³)	Masse volumique ρ (kg/m ³)	Capacité thermique massique C_p (J/kg/K)	Capacité thermique $C=\rho V C_p$ (J/k)
Intérieur	Plancher	13	2200	880	$2,52.10^7$
	Air	162,5	1,2	1005	$1,96.10^5$
Toit	Façade	13	2200	880	$2,52.10^7$
Enveloppe Nord	Façade	2,44	2200	880	$4,72.10^6$
	Vitrage	0	2530	720	0
Enveloppe Sud	Façade	2,44	2200	880	$4,72.10^6$
	Vitrage	0	2530	720	0
Enveloppe Est	Façade	3.19	2200	880	$6,18.10^6$
	Vitrage	0.11	2530	720	2.10^5
Enveloppe Ouest	Façade	3,37	2200	880	$6,52.10^6$
	Vitrage	0,07	2530	720	$1,27.10^5$

Tableau II-4: Capacités thermiques des différents nœuds du modèle thermique

Elément	Matériau	Conductivité thermique k (W/m.K)	Epaisseur (m)	Coefficient de transmission thermique U (W/m ² .K)
Murs extérieurs	Béton	1,75	0,15	0.34
	Laine de verre	0,035	0,10	
Toiture	Amiante-ciment	0,95	0.08	0.32
	Laine de verre	0,035	0,10	
	Bardage de bitume	0,5	0.01	
Dalle	Béton	1,75	0.20	0.34
	Laine de verre	0,035	0,10	

Tableau II-5: Caractéristiques thermo-physiques de l'enveloppe

II.6 - MODELISATION DES SYSTEMES ENERGETIQUES

L'ensemble des systèmes produisant, transportant, transformant et consommant l'énergie dans le bâtiment constituent des systèmes énergétiques. A cet effet, le bâtiment lui-même est un système énergétique puisqu'il « consomme » l'énergie de chauffage fournie par les actionneurs de chauffage mais aussi tous les autres systèmes émettant leurs pertes énergétiques sous forme de chaleur. Après avoir défini précédemment le modèle du bâtiment, nous pouvons maintenant nous intéresser aux autres systèmes. Ces systèmes sont la pompe à chaleur, les capteurs solaires thermiques, le ballon de stockage et les radiateurs à eau chaude constituant tous les équipements de chauffage du bâtiment étudié de cette thèse. Les différents modèles utilisés sont choisis à cause de leur simplicité et leur caractère courant qu'on peut retrouver facilement dans la littérature scientifique.

II.6.1 - Modèle de capteur solaire thermique

De nos jours, la production de l'énergie thermique à partir de l'énergie solaire se fait, de plus en plus par le biais de capteurs solaires thermiques. Ces derniers emmagasinent les radiations solaires qui vont chauffer le fluide caloporteur, souvent de l'eau (éventuellement additionnée d'eau glycolée) contenu à son sein. Ce fluide va ensuite transmettre de l'énergie ainsi récupérée à l'eau stockée dans le réservoir par l'entremise d'un échangeur.

Selon les différentes technologies de fabrication, il existe toute une gamme de capteurs solaires pour répondre aux besoins de chauffage des liquides, à savoir les capteurs plans non vitrés, capteurs plans vitrés et les capteurs à tubes sous vide. Leur choix dépend du niveau de température souhaitée et des conditions climatiques pendant la période d'utilisation du système. Ainsi, le capteur plan non vitré est conseillé pour des basses températures de service (moins de 40°C). Le type plan vitré est recommandé pour des moyennes températures de service, comprises entre 30 et 80°C. Il est utilisé pour le chauffage de l'eau. Enfin, le capteur à tubes sous vide est conseillé pour des hautes températures, plus de 70°C. Il est appliqué pour le chauffage des locaux ou production de froid solaire.

En raison de la configuration de notre système d'étude et du niveau de température désirée dans le réservoir de stockage, les capteurs plans vitrés à eau (fluide caloporteur) seront utilisés. Une recherche bibliographique nous édifiera sur les différents modèles existant afin de choisir le modèle convenant au système étudié.

Le modèle le plus répandu de capteur plan est la méthode de rendement définie par l'équation générale obtenue à partir de l'équation de Hottel-Willier [76][77][78][79][80] :

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c G_T} = \frac{m C_p (T_{out} - T_{in})}{A_c G_T} = F_R (\tau \alpha) - F_R U_L \frac{(T_{in} - T_a)}{G_T} \quad (12)$$

Où :

- η : le rendement du capteur solaire thermique ;
- A_c : aire du capteur thermique en m^2 ;
- G_T : flux radiatif solaire total sur la surface du capteur en $kJ/h.m^2$;
- m : débit du fluide caloporteur en Kg/h ;
- C_p : chaleur massique du fluide en $kJ/kg.K$;
- T_{out} et T_{in} : température du fluide caloporteur respectivement en sortie et en entrée de l'échangeur du capteur ;

- T_a : température de l'air ambiant ;
- F_R : coefficient d'efficacité de récupération de la chaleur du capteur ;
- $(\tau\alpha)$: produit de la transmittance du couvercle et de l'absorbance de la plaque absorbante à incidence normale ;
- U_L : coefficient de perte thermique surfacique du capteur en $\text{kJ/h.m}^2.\text{K}$.

Le coefficient de perte n'est pas exactement constant. On peut le définir comme une variable linéaire de la valeur de $(T_i - T_a)$ ce qui donne pour l'expression du rendement :

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c G_T} = F_R (\tau\alpha) - F_R U_L \frac{(T_{in} - T_a)}{G_T} - F_R U_{L/T} \frac{(T_{in} - T_a)^2}{G_T} \quad (13)$$

On a donc une évolution quadratique du rendement en fonction de la différence de température entre le fluide en entrée du capteur et l'air ambiant.

$$\eta = a_0 - a_1 \frac{\Delta T}{G_T} - a_2 \left(\frac{\Delta T}{G_T} \right)^2 \quad (14)$$

Outre la méthode de rendement, plusieurs autres modèles de capteurs solaires existent dans la littérature dont le modèle issu du premier principe de la thermodynamique. A cet effet on a le modèle dynamique de [64][65] très utilisé aussi et se présente comme suit :

$$C_c \frac{dT_{cs}}{dt} = m_f c_f (T_{ce} - T_{cs}) + A_c \Phi_s - k_0 \left(\frac{T_{ce} + T_{cs}}{2} - T_{al} \right) \quad (15)$$

Où :

- C_c : capacité thermique du capteur solaire thermique (J/K) ;
- c_f : capacité thermique massique du fluide caloporteur (J/K/Kg) ;
- m_f : débit massique du fluide caloporteur (Kg/s) ;
- T_{ce} : température d'entrée du fluide caloporteur dans le capteur solaire thermique ;
- T_{cs} : température de sortie du fluide caloporteur dans le capteur solaire ;
- Φ_s : flux solaire (W/m^2)
- A_c : Surface de capteur solaire (m^2) ;
- K_0 : coefficient de déperdition thermique du capteur ($k_0=127\text{W/m}^2$) [64]

Le modèle de Hottel-Willier met en avant le calcul du rendement du capteur solaire. Le rendement n'est pas un paramètre a priori recherché dans l'étude. En revanche, le modèle de dynamique met en évidence les paramètres tels que les températures, la surface de capteur, le flux solaire, etc. Bref, c'est ce qui est modèle pertinent au système global d'étude.

II.6.2 - Modèle d'un réservoir de stockage

Le modèle d'un réservoir représente des échanges thermiques à son sein et qui doit prendre en compte la stratification existante. Ce modèle de stockage de chaleur est un compris réaliste entre le modèle idéalement brassé et le modèle idéalement stratifié. Outre ces modèles, on a le modèle à volumes variables, modèle zonal et le modèle multicouches. Certains travaux [81][82] rajoutent également le modèle CFD (Computational Fluid Dynamic), mais leur complexité interdit leur utilisation pour des simulations annuelles.

Le modèle zonal divise le réservoir selon un maillage 2D pour une meilleure prise en compte des recirculations induites par les ajouts de liquide. Mais l'avantage d'un maillage plus fin est compensé par l'inconvénient de devoir définir à priori les débits entre zones.

Le modèle à volumes variables, exemple du TYPE 38 utilisé par Trnsys fait varier la taille des mailles en fonction des variables du problème.

Le modèle multicouche s'appuie sur une stratification de la température d'eau, par découpage du volume en strates horizontales à température constante. Les flux d'énergie sont évalués aux interfaces de ces strates et les apports d'énergie par le ou les échangeurs (ou appoint électrique) sont vus comme des termes sources. Les flux verticaux d'énergie entre strate sont reliés à des phénomènes convectifs de mouvement de l'eau en bloc (liés à l'ajout et au retrait d'eau) et à des phénomènes diffusifs.

Le modèle brassé représenté par l'équation (13) est retenu.

En effet, le réservoir de stockage cumule l'énergie du capteur solaire thermique. La température du réservoir de stockage dépend de trois facteurs :

- Température et débit massique d'entrée : T_{re} et m_{re} ;
- Température et débit massique de sortie : T_{rs} et m_{rs} ;
- Capacité de stockage M .

En considérant ces trois paramètres, un modèle dynamique du réservoir développé par [64] dont l'expression ci-dessous, est utilisé :

$$Mc_p \frac{dT_{rs}}{dt} = m_{re} c_p T_{re} - m_{rs} c_p T_{rs} + Q \quad (16)$$

Où, Q est l'appoint électrique du réservoir de stockage.

II.6.3 - Modèle d'une Pompe à Chaleur

Une machine thermique est un système thermodynamique particulier permettant de transférer de la chaleur d'un milieu à une température inférieure où la chaleur est prélevée (source froide) vers un milieu à une température supérieure où elle est rejetée (source chaude). Ce système thermodynamique est dit machine frigorifique lorsqu'il s'agit de produire du froid, c'est-à-dire extraire de la chaleur à un corps, ou à un milieu, pour le refroidir ou le maintenir à une température inférieure à celle de l'ambiance. En revanche, ce système prend le nom de pompe à chaleur lorsque le but est la production de chaleur pour chauffer un milieu ou le maintenir à une température suffisamment haute à partir d'une chaleur gratuite récupérée à une température basse [66].

Une machine thermique dont le schéma de principe est représenté par la Figure II.8, se compose d'un :

- Condenseur (source chaude) : le fluide frigorigène libère sa chaleur au fluide secondaire (eau, air ...) en passant de l'état gazeux à l'état liquide ;
- Détendeur : il réduit la pression du fluide frigorigène en phase liquide ;
- Evaporateur (source froide) : la chaleur est prélevée au fluide secondaire pour vaporiser le fluide frigorigène ;
- Compresseur : actionné par un moteur électrique, il élève la pression et la température du fluide frigorigène gazeux en le comprimant.

Une machine thermique, en l'occurrence la pompe à chaleur est caractérisée par le coefficient de performance (COP) qui est un paramètre essentiel pour mesurer sa performance [66].

$$\text{COP} = \frac{\text{Puissance produite}}{\text{Puissance consommée}} \quad (17)$$

Une valeur du COP est donnée par un nombre qui indique graduellement l'efficacité du système. Il représente le rapport entre sa production et sa consommation énergétique. Plus ce chiffre est élevé plus l'efficacité est grande. En réalité, il est très difficile d'obtenir ce COP par modélisation du fait de la complexité du fonctionnement du système PAC. On utilise en général des modèles empiriques pour réduire le problème.

Pour cette étude, le modèle d'une PAC utilisé est le modèle développé par Jong et al [64][65].

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{COP} = k_1 \frac{0,5T_{co,e} + 0,5T_{co,s} + 273,13}{(0,5T_{co,e} + 0,5T_{co,s}) - (0,5T_{ev,e} + 0,5T_{ev,s})} \\ C_{co} \frac{dT_{co,s}}{dt} = m_{co,e} Cp (T_{co,e} - T_{co,s}) + \text{COP} \cdot \text{Ehp} \\ C_{ev} \frac{dT_{ev,s}}{dt} = m_{ev,e} Cp (T_{ev,e} - T_{ev,s}) - (\text{COP} - 1) \cdot \text{Ehp} \end{array} \right. \quad (18)$$

Où :

- K le rendement de la pompe à chaleur déterminé à partir des mesures sur le site d'essai ($K_1 = 0,4$) ;
- C_p (J/K) capacité thermique spécifique de l'eau ;
- C_{co} , C_{ev} (J/K) capacités thermiques respectives du condenseur et de l'évaporateur ;
- $T_{co,e}$, $T_{co,s}$ (°C) températures respectives de l'entrée et de la sortie du condenseur ;
- $T_{ev,e}$, $T_{ev,s}$ (°C) températures respectives de l'entrée et de la sortie de l'évaporateur ;
- Ehp (W) puissance électrique de la PAC.

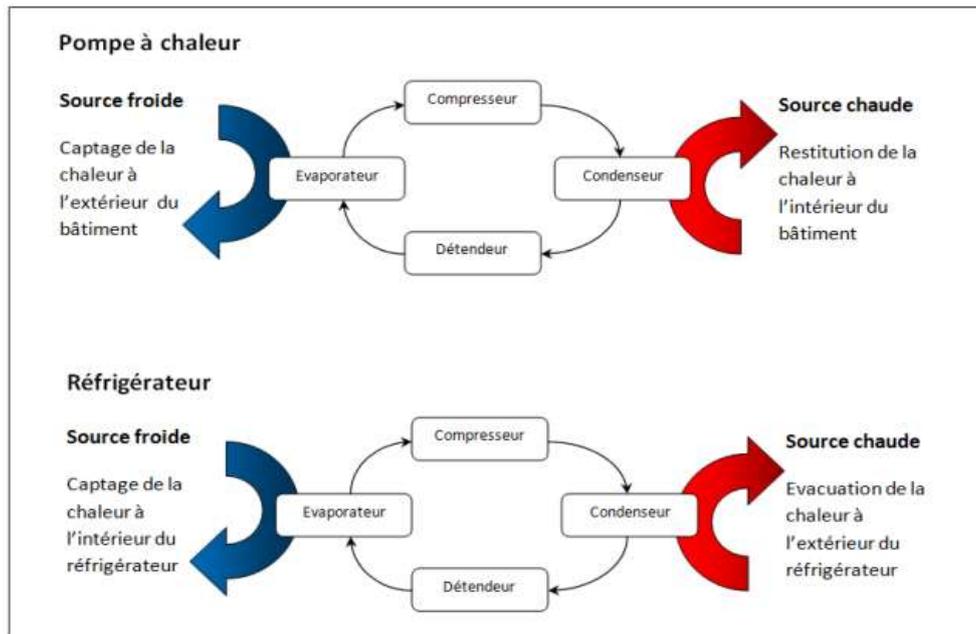


Figure II-5: Schéma de principe d'une machine thermique

II.6.4 - Modèle de radiateur à eau chaude

Un radiateur sert d'appareil de chauffage émettant de la chaleur par convection naturelle et rayonnement. Son fonctionnement est caractérisé par trois modes d'échanges thermiques consécutifs aux composantes du système, à savoir l'enveloppe métallique du radiateur, l'eau chaude et l'air ambiant. En effet, l'échange convectif se déroule entre l'enveloppe métallique et l'eau chaude d'une part, la conduction et la convection à travers la paroi métallique d'autre part et enfin un échange radiatif entre toujours la paroi métallique et l'air ambiant. Les échanges thermiques observés se traduisent par des équations de flux convectif ou radiatif [83].

Le flux de convection est défini par l'expression suivante :

$$Q_{\text{con}} = A (T_{\text{srad}} - T_{\text{am}})^n \quad (19)$$

Où :

- T_{srad} : température de la surface du radiateur ;
- T_{am} : température de l'air ambiant ;
- A et n : coefficient dépendant du type de radiateur.

L'expression du flux radiatif se décline en deux composantes selon la face avant (orientée vers la pièce) et la face arrière (orientée vers le mur du radiateur). Sur la face avant, on a l'expression suivante :

$$Q_{\text{radAV}} = S \frac{\varepsilon_{\text{rad}}}{\varepsilon_{\text{rad}}} (\sigma_0 T_{\text{srad}}^4 J_{\text{rad}}) \quad (20)$$

Le flux de la face arrière s'exprime par :

$$Q_{\text{radAV}} = S \frac{\epsilon_{\text{rad}} \epsilon_{\text{dos}}}{\epsilon_{\text{rad}} + \epsilon_{\text{dos}} - \epsilon_{\text{rad}} \epsilon_{\text{dos}}} \left(\sigma_0 T_{\text{srad}}^4 - T_{\text{sdos}}^4 \right) \quad (21)$$

Où :

- S : aire de la face du radiateur ;
- ϵ_{rad} : émissivité grande longueur d'onde du radiateur ;
- ϵ_{dos} : émissivité grande longueur d'onde de la paroi arrière du radiateur ;
- T_{srad} : température absolue de la surface de l'émetteur ;
- T_{sdos} : température absolue de la paroi arrière du radiateur ;
- J_{rad} : radiosité de la face avant ;
- σ_0 : la constante de Stefan-Boltzmann égale à $5,670374 \cdot 10^{-8} \text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$.

Un modèle de calcul de la variation de température de sortie de l'eau du radiateur est donné par l'expression mathématique ci-après [67][89] :

$$C_{\text{rad}} \frac{dT_s}{dt} = m_r c_p (T_e - T_s) + UA (T_{\text{ai}} - T_s) \quad (22)$$

Où :

- T_e : température d'entrée de l'eau chaude dans le radiateur, °C ;
- T_s : température de sortie de l'eau chaude du radiateur, °C ;
- T_{ai} : température de l'air ambiant intérieur, °C ;

La puissance thermique d'un radiateur est la quantité de chaleur cédée par la surface extérieure de l'enveloppe, par convection et rayonnement. Elle dépend de sa forme, de ses dimensions et de la différence de température du fluide chaud entrant et l'air ambiant local. De nos jours, tous les constructeurs de radiateurs définissent leur puissance calorifique suivant la norme européenne EN 442. Dans chaque catalogue, on peut voir les dimensions de radiateurs, mesure de l'émission de chaleur pour une température de départ 75°C, une température de retour et une température ambiante de 20°C.

Pour un radiateur à basse température, l'eau circule à 45-55°C en moyenne, au lieu de 65-75°C habituels pour un radiateur classique. Le problème pour l'emploi d'un radiateur en chaleur douce est de connaître la puissance développée à une différence de température ΔT différente de 50°C. Pour cela, il faut utiliser la formule suivante :

$$P = P_n \left(\frac{\Delta T}{50} \right)^n \quad (23)$$

Avec, ΔT la différence des températures qui est déterminée par l'expression ci-dessous :

$$\Delta T = \frac{T_e - T_s}{\ln\left(\frac{T_e - T_{ai}}{T_s - T_{ai}}\right)} \quad (24)$$

Où :

- P_n (W) est la puissance nominale émise par le radiateur ;
- n : la pente d'émission du dernier ;
- T_e (°C) : température d'entrée de l'eau chaude dans le radiateur ;
- T_s (°C) : température de sortie de l'eau chaude du radiateur ;
- T_{ai} (°C) : température de l'air ambiant intérieur.

II.7 - MODELISATION DE DONNEES METEOROLOGIQUES

II.7.1 - Modèle de radiation solaire

La radiation solaire sur une surface quelconque et sur un site donné peut être estimée par différents modèles pour pallier l'absence de moyen de mesures ou la non disponibilité de stations météorologiques à grande échelle. A cet effet, une revue bibliographique nous permet de présenter quelques modèles de rayonnement solaire ou radiation solaire.

Le modèle de Capderou [84][85][86] utilise le trouble atmosphérique pour calculer les composantes directes et diffuses du rayonnement reçu sur le plan. L'absorption et la diffusion causée par les constituants de l'atmosphère peuvent être exprimés par des facteurs de troubles à partir desquels, on peut exprimer les rayonnements solaires directs diffusés par le ciel clair. La connaissance de facteur de trouble atmosphérique est nécessaire pour déterminer les rayonnements par ciel clair. Ce facteur est le rapport entre l'extinction du rayonnement directe traversant une atmosphérique de référence constituée uniquement d'air pur et sec sous la même incidence. Dans ce modèle, le facteur de trouble atmosphérique de Linke T_L par ciel clair est la somme de trois troubles à savoir :

- Le trouble dû à l'absorption gazeuse tant par les constituants fixes de l'atmosphère que par l'ozone et surtout la vapeur d'eau ;
- Le trouble correspondant à l'absorption par les gaz de l'atmosphère (O_2 , CO_2 , O_3) et à la diffusion moléculaire de Rayleigh ;
- Le trouble relatif à la diffusion des aérosols.

Le modèle Liu Jordon est le plus convenable pour estimer le rayonnement global sur un plan incliné [84][85][86][88].

Dans le modèle de Perrin Brichambaut, on décompose le rayonnement solaire incident en plusieurs rayonnements variant en fonction de la hauteur du soleil, de l'angle d'incidence, des intempéries et de l'état de visibilité de l'atmosphère. Le modèle théorique des éclaircissements solaires est très compliqué car ces derniers l'expriment en fonction de variations climatiques et intempéries. Néanmoins, cette méthode donne de bon résultat pour l'estimation de l'énergie reçue sur un capteur solaire thermique d'orientation quelconque [87][85].

Angstrom-Prescott a développé un modèle permettant d'estimer le rayonnement solaire en absence de mesure d'irradiation. Il est largement utilisé et plus précis que les autres modèles. Il est limité par le manque de données sur la durée de l'insolation. C'est pourquoi divers autres modèles découlant du modèle Angstrom-Prescott ont été développés et améliorés par d'autres chercheurs [88].

Le modèle de Bernard-Menguez [68] est utilisé pour définir la fonction temporelle de l'ensoleillement à partir de sa valeur journalière fournie par la météo. Cette fonction suppose une répartition sinusoïdale du rayonnement solaire global.

Mais dans le cas d'espèce, l'ensoleillement est présenté par une demi-onde sinusoïde du fait que le soleil n'irradie que la moitié de la journée, de 7h à 19h. Donc, l'expression du modèle est :

$$\Phi_s = \Phi_M \sin \left[\frac{2\pi}{24 \times 3600} (t-7) \right] \quad (25)$$

Où, Φ_M (W/m²) est l'amplitude du flux solaire maximal observé et t est le temps en heures.

Il existe de nombreux modèles qui définissent la radiation solaire. La quasi-totalité requiert un nombre important de paramètres pour l'estimation du flux solaire. Face à complexité de la plupart des modèles étudiés en termes des paramètres exigés, nous portons notre choix sur le modèle de Bernard-Menguez qui modélise de manière simple le flux solaire sous la forme d'une demi-onde où le soleil se lève à 7h et se couche à 19h.

II.7.2 - Modèle de température ambiante

Selon toujours Bernard-Menguez [68], les variations de la température de l'air ambiant sont modélisées par la formule :

$$T_a = \left(\frac{T_{aM} + T_{am}}{2} \right) + \left(\frac{T_{aM} - T_{am}}{2} \right) \sin \left[\frac{2\pi}{24 \times 3600} (t-9) \right] \quad (26)$$

Où, T_{aM} (°C) est la température ambiante maximale, T_{am} (°C) est la température ambiante minimale du lieu en hiver et le temps en heures.

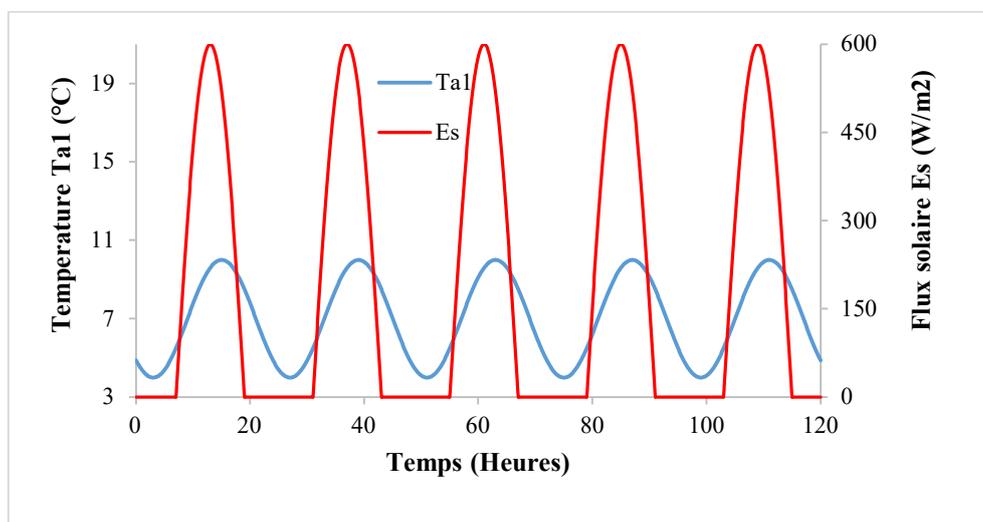


Figure II-6: Flux solaire et température ambiante extérieure sur période de chauffage

II.8 - SYSTEMES DE REGULATION

L'objectif recherché d'un système de régulation est de maintenir automatiquement une grandeur réglée soumise à des perturbations, à une valeur de grandeur désirée appelée consigne [70]. En général, le système comprend l'appareil de mesures de la grandeur souhaitée, en l'occurrence la température intérieure du local, par exemple et/ou aussi celle des appareils de mesure de grandeurs perturbatrices : température ambiante extérieure, vent, etc. Ainsi, en fonction de la valeur mesurée, le régulateur détermine la position de l'organe de réglage. Lorsque la grandeur de réglage est une puissance, par exemple, elle est alors ajustée de façon à réduire l'écart entre la grandeur réglée et la consigne.

De nos jours dans les bâtiments, la régulation doit à la fois satisfaire le confort thermique des occupants tout en respectant la température de consigne et en limitant le coût de la consommation énergétique par une gestion rigoureuse des apports et des déperditions énergétiques. Ces deux objectifs sont traités respectivement par les fonctions de régulation et de programmation. Le choix d'une régulation fonctionnant en boucle ouverte ou en boucle fermée est déterminant vis-à-vis de la consommation [69].

En régulation boucle ouverte, la commande est déterminée à partir de la ou des grandeurs perturbatrices, notamment la température extérieure constituant la principale perturbation (Figure II-7). En sus de la température extérieure, d'autres perturbations (le vent ou l'ensoleillement) peuvent y intervenir et donc, à être utilisées en complément. De ce fait, une loi de correspondance ou courbe de chauffe est ainsi définie entre la température extérieure et la puissance électrique disponible ou la température d'eau, dans le cas du chauffage à eau. Elle dépend de la loi d'émission de l'émetteur, du niveau de consigne souhaitée et du coefficient de déperditions thermique du bâtiment [71]. La régulation en boucle ouverte a l'avantage d'avoir une action rapide du fait de sa dépendance de la cause perturbatrice. Son inconvénient est que sa mise en œuvre nécessite de pouvoir mesurer cette grandeur perturbatrice d'une part, avoir défini au préalable une relation entre la perturbation et la grandeur de réglage d'autre part.

En régulation boucle fermée (Figure II-8), elle détermine la commande à partir de l'écart de réglage entre la grandeur réglée, température intérieure par exemple et la consigne. L'ordre de commande est envoyé à l'organe de réglage qui modifie la puissance émise par le corps de chauffe. L'organe se situe soit au niveau de la production de chaleur (brûleur), de la distribution (vanne) ou de l'émission (robinet thermostatique). Dans le cas du chauffage électrique, un thermostat est intégré à l'émetteur [71]. Il permet de mesurer la température intérieure et d'en déduire la puissance électrique nécessaire. Dans ce genre de régulation en boucle fermée, le régulateur agit en fonction de la grandeur réglée en comparant la valeur mesurée avec la consigne. C'est le cas par exemple du thermostat d'ambiance régulant la température d'un local. Ce mode de réglage, qui agit en fonction de l'effet et non plus de la cause présente l'avantage de compenser la variation de la grandeur réglée quelle que soit la perturbation. En revanche, l'action est tardive car l'effet n'est qu'une conséquence de la cause.

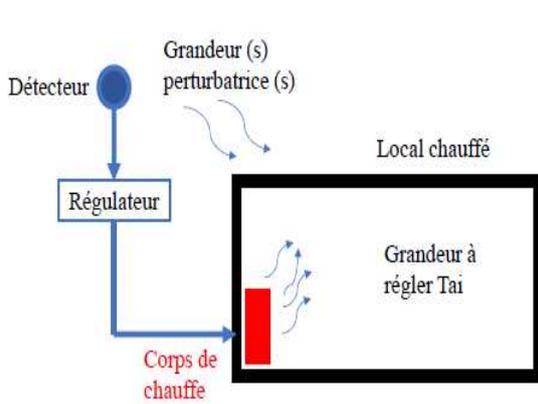


Figure II-7: Schéma de principe de la régulation à boucle ouverte

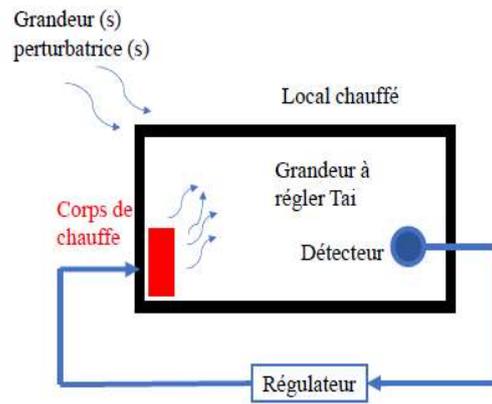


Figure II-8: Schéma de principe de la régulation en boucle fermée

II.8.1 - Présentation générale de la régulation utilisée

II.8.1.1 - Régulation de la température du bâtiment

En guise de rappel, le principe d'une régulation est d'assurer la température ambiante choisie (température de consigne) pour chaque pièce et en fonction du moment de la journée ou d'une période plus longue. Son objectif est non seulement de satisfaire le confort des occupants mais aussi de limiter les consommations d'énergie, à savoir trouver la meilleure adéquation entre la satisfaction des besoins thermiques et la dépense d'énergetique.

Ainsi, en des positions prises par l'organe de réglage sur sa plage de variation, l'action du régulateur peut être progressive ou non. A cet effet, on distingue le réglage non modulé ou Tout Ou Rien (TOR) et le réglage modulé (PID). Et donc, le régulateur agit soit d'une manière discontinue en définissant un niveau de marche et d'arrêt du chauffage selon la grandeur réglée par rapport à la consigne, soit progressivement en fonction de l'écart de réglage. Dans ce cas progressif, l'ordre correspond aux actions Proportionnelle, Intégrale et Dérivée.

En régulation Tout Ou Rien, c'est le système de régulation le plus élémentaire et le simple où l'organe de réglage ne peut occuper que deux positions extrêmes, selon l'écart entre la grandeur réglée et la consigne. Ce mode d'action convient aux systèmes inertes pour lesquels il est possible d'avoir un différentiel statique étroit. En effet, l'amplitude des oscillations de la grandeur réglée (le différentiel dynamique) limite sans risque d'oscillations fréquentes de l'organe de réglage. Le système TOR détermine à chaque instant l'écart entre la température de consigne et la température mesurée. Précisons qu'à la différence du régulateur TOR, le régulateur progressif dit proportionnel est équipé d'un connecteur muni d'un algorithme de calcul qui délivre un signal de commande à partir de la différence entre la consigne et la mesure. Par conséquent, en raison de la simplicité à mettre en œuvre, le régulateur TOR est utilisé dans notre cas d'étude pour une température de consigne de 19°C. Notre régulateur TOR se repose également sur le calcul de différence des températures (température ambiante intérieure et celle de la consigne). Son implantation sous Matlab/Simulink est matérialisée par une hystérésis « Relay » paramétré conformément aux règles ci-dessous, permettant alors d'attribuer à la sortie du régulateur (0 ou 1).

Son principe de fonctionnement est régi par les règles suivantes :

- Température maximale ambiante autorisée dans le local est 20°C ;
- Température minimale ambiante choisie dans le local est 18°C ;
- Lorsque la température du local est inférieure à la température minimale, le régulateur commande la mise en marche de la pompe à chaleur ;
- Lorsque cette température atteint la valeur maximale, le régulateur commande l'arrêt de la PAC.

Le régulateur assure le contrôle du fonctionnement dynamique de la pompe à chaleur, par ricochet, la pompe d'alimentation en eau chaude du radiateur. Il maintient la température de l'air ambiant intérieur dans les limites de consignes entre 18 et 20°C. Par conséquent, la régulation en général de la température devient une nécessité pour optimiser la consommation d'énergie dans un bâtiment.

II.8.1.2 - Régulation de la température du réservoir

La température de consigne est fixée à 10°C pour la température de sortie du fluide caloporteur du réservoir de stockage d'eau. Celle-là peut être chauffée à l'aide du circuit solaire ou à l'aide du chauffage électrique, l'appoint électrique intégré au réservoir d'eau.

Le chauffage de l'eau du réservoir se fait en priorité grâce au circuit solaire. Ainsi, lorsque la température en sortie des capteurs solaires est suffisamment élevée par rapport à celle dans le réservoir, la pompe du circuit solaire est mise en marche (indépendamment de la différence de température entre celle effective dans le ballon et la consigne) afin d'utiliser au maximum l'énergie apportée par le soleil et éviter ainsi l'utilisation de l'appoint électrique.

Lorsque la pompe solaire ne fonctionne pas, la mise sous tension de l'appoint électrique est déclenchée si la température dans le réservoir atteint une valeur trop basse, inférieure à la consigne. L'on cesse d'alimenter la résistance électrique une fois que la température de consigne à nouveau atteinte.

Précisons que le seuil bas ou la température de consigne du réservoir choisi à 10°C est fonction de la plage de températures de fonctionnement d'entrée du type de la pompe à chaleur utilisée. Il faut observer que selon les fabricants et leurs technologies, les PAC ont des caractéristiques de fonctionnement bien spécifiques, en ce qui concerne la température d'entrée du côté source froide. Par exemple, pour le fabricant de la PAC AVENIR-ENERGIE, les températures de service minimale et maximale admissibles se situent entre -11,3°C à 12°C [75].

II.8.2 - Diagrammes synthétiques

Les diagrammes représentés par les Figures II-9 et II-10 permettent de comprendre comment chacune des commandes de régulation utilisées dans le modèle de notre outil de calcul est conçu. Il suffit juste, à chaque fois de commencer par répondre à la question du cadre, suivre les questions suivantes et finalement arriver à l'un des cadres, où l'on connaît alors la valeur que prendra la commande à laquelle on s'intéresse.

Sous Simulink, l'ensemble des commandes de régulations est représenté par le « Relay » pour la commande de la PAC et une autre boîte à outil « MATLAB Function » pour la pompe solaire et l'appoint électrique servant de programmation des commandes.

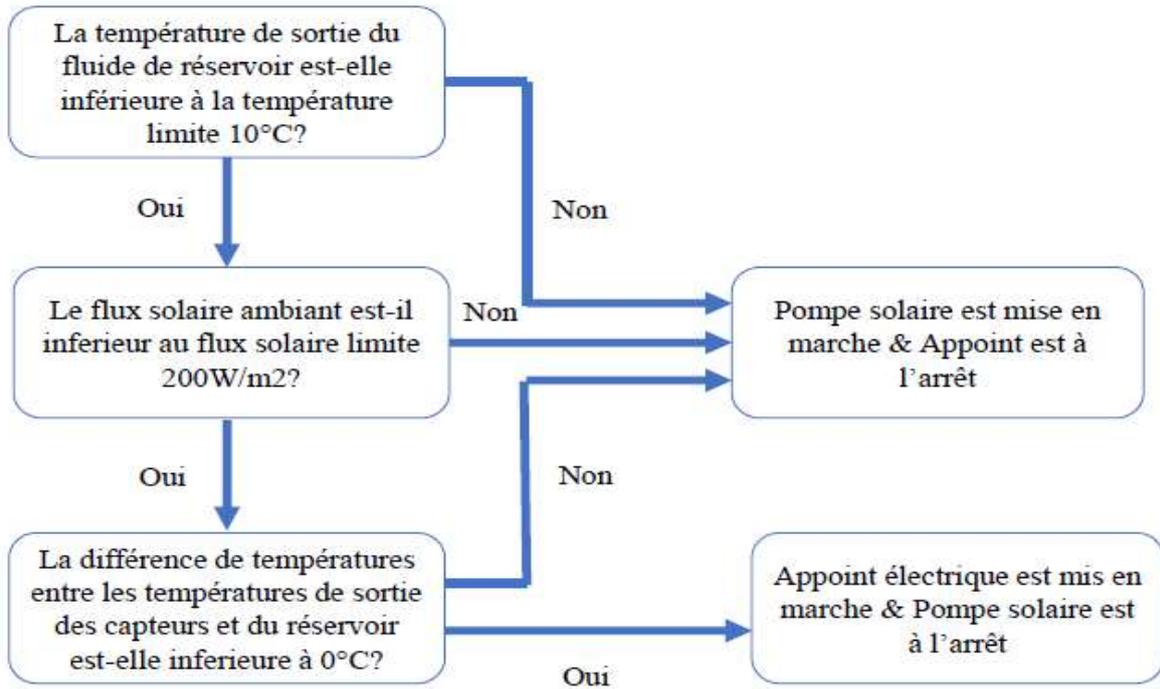


Figure II-9: Diagramme de commande de la pompe solaire et l'appoint électrique

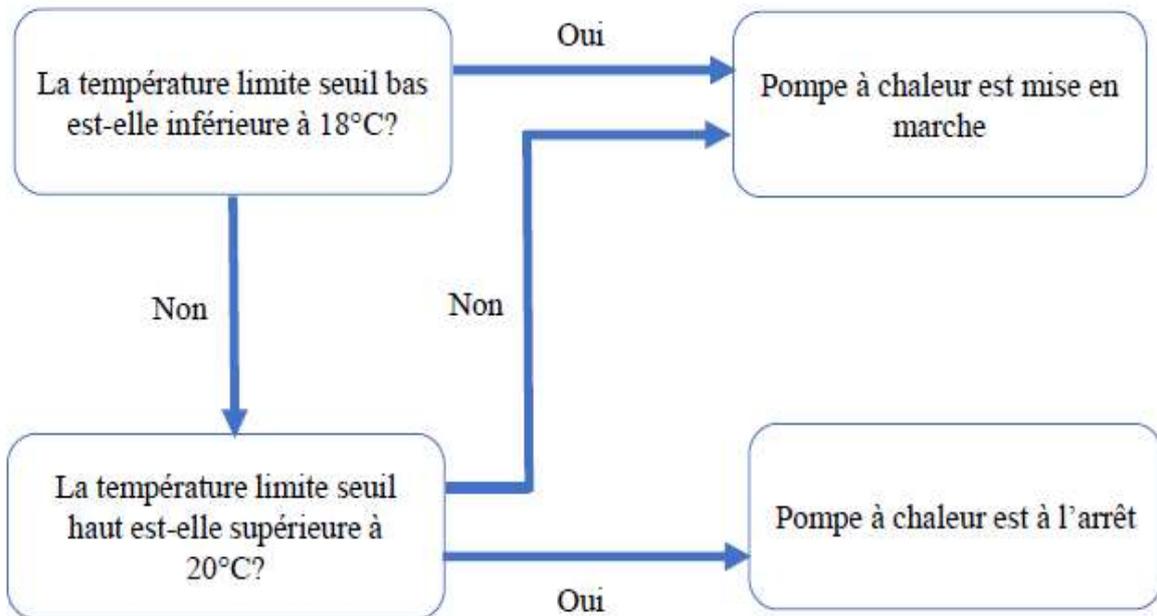


Figure II-10: Diagramme de commande de la pompe à chaleur

II.9 - SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE

Afin de simuler notre système énergétique thermique, nous avons choisi d'utiliser un modèle dynamique dans l'environnement Matlab/Simulink. Les avantages qu'offrent Simulink, ci-dessous nous ont motivé à l'utiliser :

- Des outils graphiques facilitant la programmation ;
- La possibilité de simuler l'évolution temporelle du système d'où l'appellation « simulation dynamique » grâce à l'interface graphique ;
- L'aptitude à intégrer des systèmes linéaires et non linéaires modélisés en continu ou en discret ;
- La génération automatique des codes ce qui garantit une exécution plus rapide ;
- La capacité d'incorporer des nouveaux composants.

Dans ce qui suit, nous décrivons le simulateur développé ainsi que son principe de fonctionnement.

II.9.1 - Description du simulateur

Le simulateur développé est un outil de simulation thermique dynamique qui permet d'effectuer le dimensionnement de notre système énergétique du bâtiment.

Il est constitué d'un modèle de capteurs solaires thermiques, d'un modèle de réservoir de stockage d'eau, d'un modèle d'une pompe à chaleur, d'un modèle de radiateurs à eau chaude, d'un modèle RC d'un bâtiment et de deux systèmes de régulation. L'un assure la régulation de la température de l'air ambiant du local chauffé par un régulateur TOR commandant de la marche ou de l'arrêt de la PAC en fonction du différentiel entre la consigne. Et, l'autre régulation est dédiée à la température du réservoir.

Il comprend des paramètres d'entrées et de sorties. Ces données d'entrées et de sorties sont résumées dans le Tableau II-6.

ENTREES	<ul style="list-style-type: none">▪ Données météorologiques (température de l'air ambiant extérieur et flux solaire) ;▪ Profil d'occupation du bâtiment ;▪ Nombre des occupants ;▪ Eclairage ;▪ Dimension du bâtiment (Longueur, largeur et hauteur) ;▪ Epaisseurs du mur et d'isolant ;▪ Capacité du réservoir de stockage ;▪ Nombre de radiateurs thermiques ;▪ Puissance nominale d'un radiateur.
SORTIES	<ul style="list-style-type: none">▪ Surface de capteurs solaires thermiques ;▪ Températures de sortie du fluide caloporteur des capteurs thermiques et de réservoir de stockage ;▪ Température ambiante de l'air intérieur du local chauffé ;▪ Coefficient de performance de la pompe à chaleur ;▪ Puissance électrique consommée par la PAC ;▪ Puissance thermique produite par les radiateurs.

Tableau II-6: Données d'entrées et de sorties de l'outil de calcul

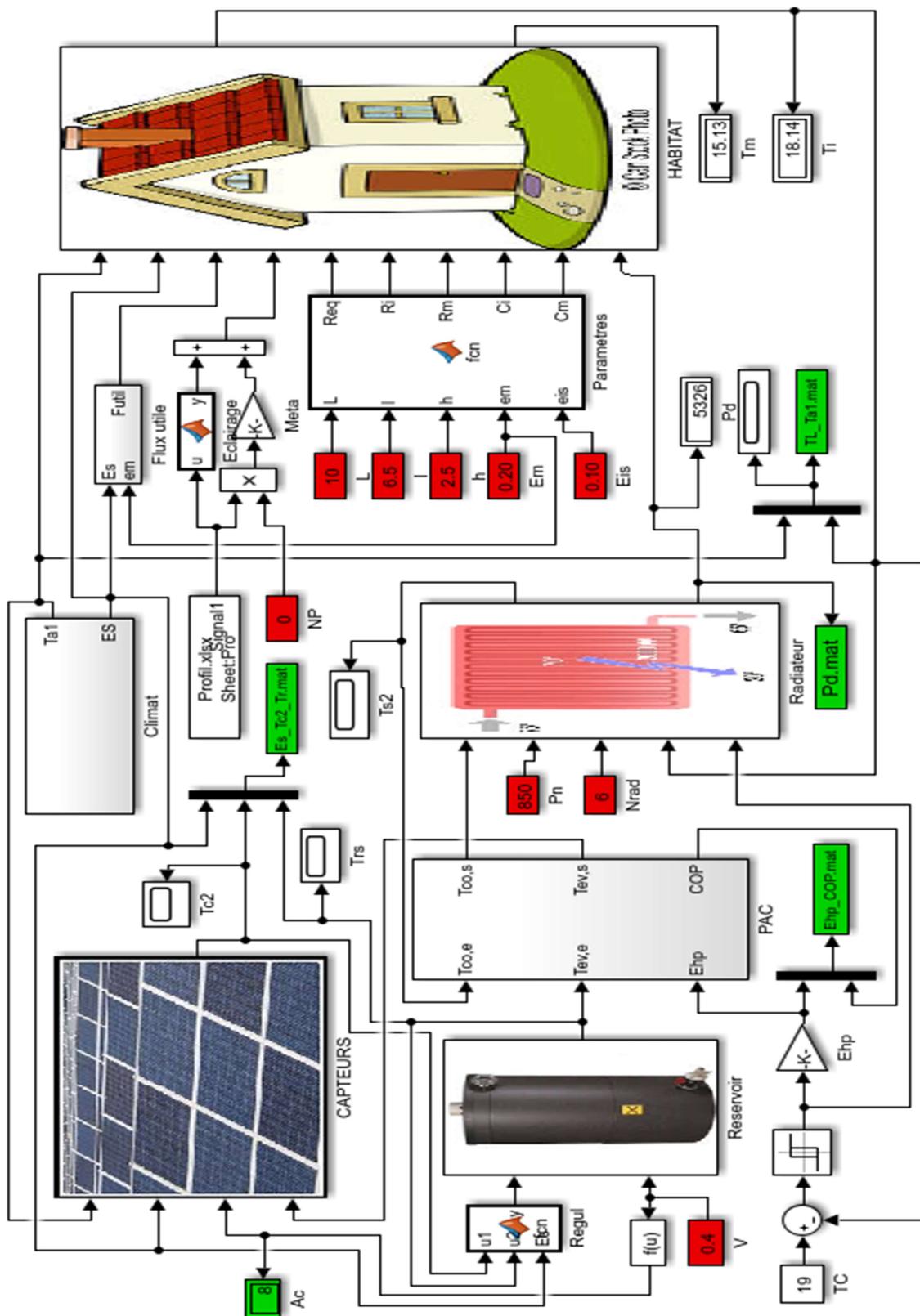


Figure II-11: Modélisation Simulink du système énergétique étudié

II.9.2 - Principe de fonctionnement du simulateur

Le principe du simulateur est marqué par deux phases de fonctionnement. Une première phase est celle d'initialisation où les données d'entrées du système sont fixées. Après l'initialisation, succède la phase de vérification des boucles itératives. Il s'en suit le calcul de données de sorties. Les résultats sont générés et enregistrés automatiquement sous forme de fichiers EXCEL. Enfin, l'outil va incrémenter le calcul de nouvelles valeurs au bout d'un temps équivalent au temps de calcul plus le pas de la simulation jusqu'à ce qu'à la dernière itération It_N soit atteinte.

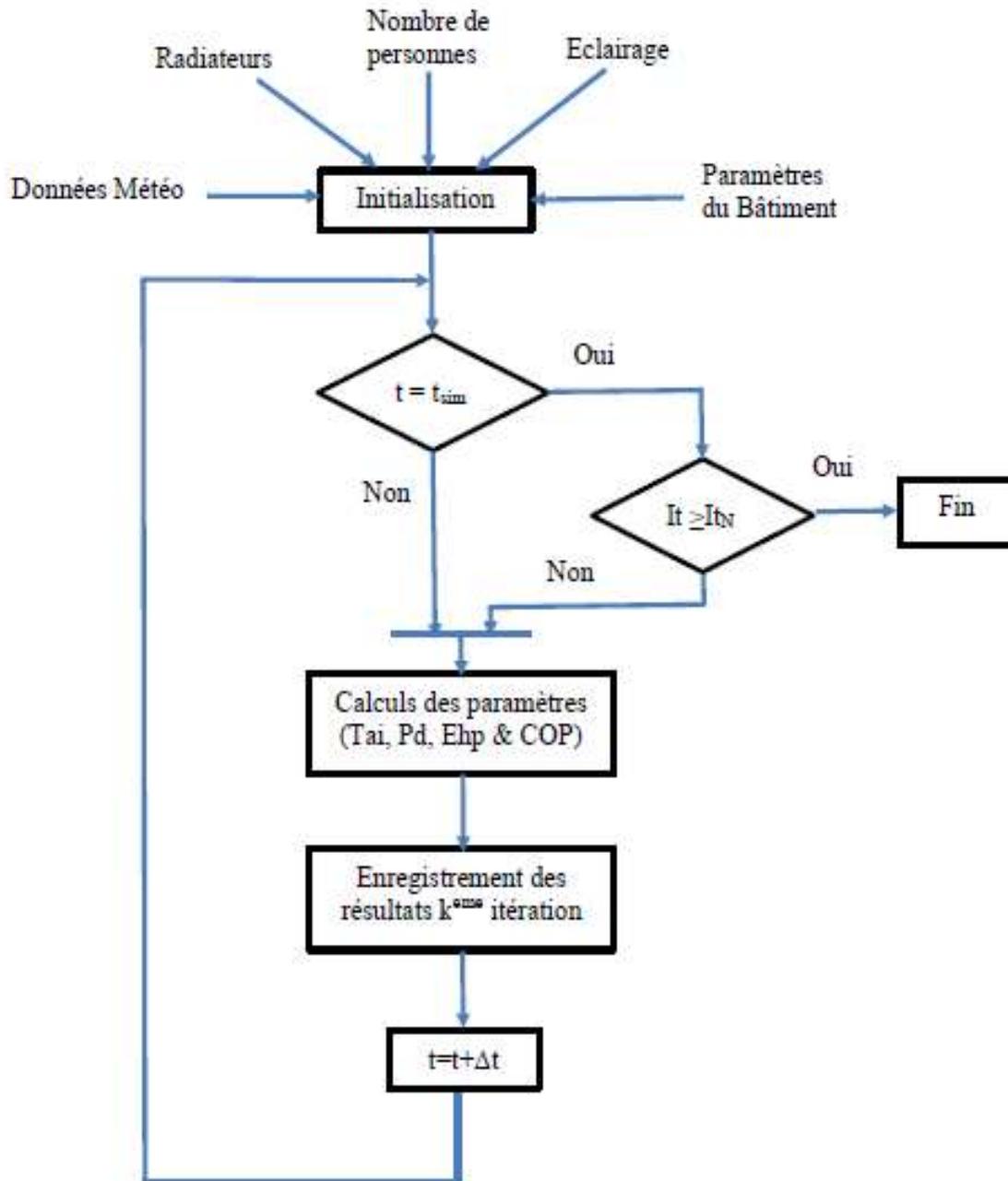


Figure II-12: Schéma synoptique de fonctionnement du simulateur

II.10 - RESULTATS ET DISCUSSIONS

Cette partie est consacrée à la prise en main du simulateur. L'objectif est de tester sa fiabilité dans différentes situations météorologiques et différents apports thermiques internes afin de valider son bon fonctionnement.

Notre système d'étude est tributaire des données climatiques, en l'occurrence le flux solaire. La pompe à chaleur utilisée constituant l'épine dorsale du système de chauffage du bâtiment, peut selon les variations climatiques journalières ou saisonnières, avoir des comportements thermiques et électriques différents. Outre, les apports thermiques extérieurs du soleil dans le chauffage, il est à considérer également les apports thermiques internes pour étudier le système.

II.10.1 - Scenarios de l'outil

Le simulateur propose divers scenarios d'utilisation : profil d'occupation, ventilation, consigne de température, apports thermiques internes de manière à détailler le fonctionnement futur du bâtiment de façon précise. Cependant, de nombreuses hypothèses doivent être prises en compte. Il est possible de créer des scenarios hebdomadaires (heures par heures du lundi au vendredi) mais aussi annuels correspondant à une succession de scenarios hebdomadaires sur l'ensemble d'une année. Les scenarios considérés dans le simulateur sont :

- Consigne de température : permet d'attribuer une température au bâtiment. La consigne est de 19°C.
- Profil d'occupation : il simule la présence de personnes dans le bâtiment à différents moments de la journée. Il est celui de la RT2012 définissant la présence de personnes dans l'habitat de 0 à 8h et 18 à 24h et son absence entre 8 à 18h, en jours hebdomadaires (lundi au vendredi) ;
- Apports internes (W) : ce sont des apports fournis par certains équipements, en l'occurrence l'éclairage d'une part, et les métabolismes humains dus aux personnes d'autre part. Pour l'éclairage, la valeur de la puissance surfacique utilisée est de 14W/m² [74] correspond à la puissance d'éclairage conventionnelle dictée par la méthode TH-BCE de la RT2012, en considérant 100% de points lumineux allumés. Le métabolisme humain est supposé à 100W/m² ;
- Ventilation : c'est le renouvellement d'air en volume par heure (m³/h) d'une pièce. Les seuils réglementaires sont fixés par la norme RT2012.

II.10.2 - Données utilisées

Pour cette étude, nous avons considéré les mêmes valeurs des paramètres (variables) pour les différents cas de chauffage. Ces données d'utilisation sont :

- Bâtiment chauffé de dimension : L=10m, l=6,5m et h=2,5m ;
- Nombre de radiateurs utilisés : 5x850W ;
- Nombre des personnes dans le bâtiment : 5 ;
- Capacité du réservoir d'eau : 400l ;
- Surface des capteurs thermiques plans : 8m² ;
- Epaisseur d'isolant en laine de verre (conductivité 0,035W/m.K) : 10cm ;
- Epaisseur du mur en béton (conductivité 1,75W/m.K) : 15cm.

II.10.3 - Résultats des simulations

Rappelons-nous de l'analyse de performance énergétique d'un bâtiment que cinq facteurs influencent cette performance à savoir le milieu extérieur, la gestion des apports, le confort thermique, l'enveloppe du bâtiment et le renouvellement d'air. De ces facteurs, nous allons étudier le paramètre apports pour vérifier ses impacts sur le bâtiment et sur l'ensemble du système énergétique. Ainsi, le principe d'étude est basé sur la variation temporelle des apports extérieurs et les apports thermiques intérieurs pour le chauffage.

II.10.3.1 - Etude du cas des apports extérieurs

Les apports extérieurs dans notre système sont constitués uniquement de flux solaires. Pour mener cette étude, on considère différentes valeurs d'amplitude du flux solaire maximal allant de 0 à 800W/m^2 . Il s'en suit l'analyse des résultats de simulation.

Au regard des courbes des Figures II-14, II-15 et II-16, on note une tendance générale à l'évolution croissante des paramètres de sortie du système avec l'augmentation du flux solaire. Plus le flux solaire est élevé, la température de sortie des capteurs thermiques évolue de 0°C à 38°C , celle du réservoir oscille entre 10 et 30°C . Quant'à la PAC, son COP évolue de 2.37 à 3.29 . S'agissant du bâtiment, sa consommation électrique va décroissante lorsque le flux solaire augmente. La production thermique suit cette tendance du bâtiment.

On observe que sur la Figure II-14, il y a intersection de la courbe du COP et celle de T_{rs} pour de flux solaire d'amplitude maximale à 600W/m^2 et la même courbe du COP coupe celle de T_{c2} à 750W/m^2 . Cette remarque est valable aussi pour le cas de la Figure II-16 mais pas valable pour la Figure II-15. La valeur du flux solaire de 600W/m^2 est proche de valeurs moyenne habituelle de la zone que celle de 750W/m^2 . Ce flux de 600W/m^2 , on a de valeurs supposées optimales de sortie : $\text{COP}=3$, $T_{rs}=25.21^\circ\text{C}$ et $T_{c2}=30.49^\circ\text{C}$.

En somme, le flux solaire impacte nettement non seulement sur le bâtiment mais l'ensemble du système comprenant les capteurs thermiques, le réservoir de stockage, la pompe à chaleur, les radiateurs et le bâtiment lui-même. Sa valeur de 600W/m^2 sera utilisé pour la suite des études dans le prochain chapitre.

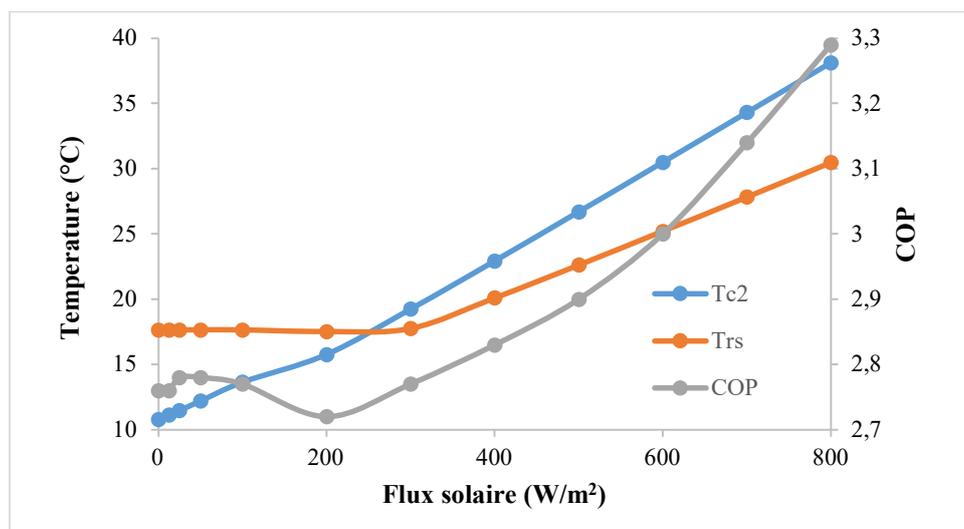


Figure II-13: Courbes des paramètres du système pour de valeurs maximales de températures et de COP

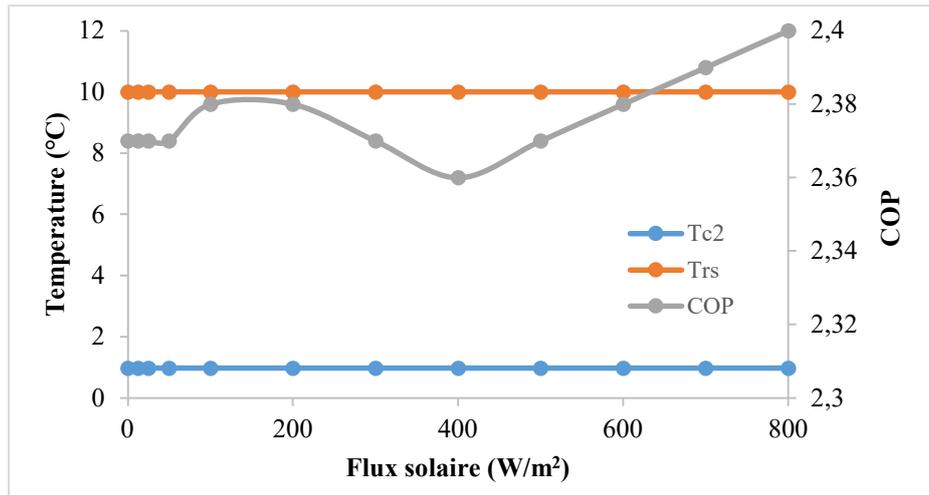


Figure II-14: Courbes des paramètres du système pour de valeurs minimales de températures et de COP

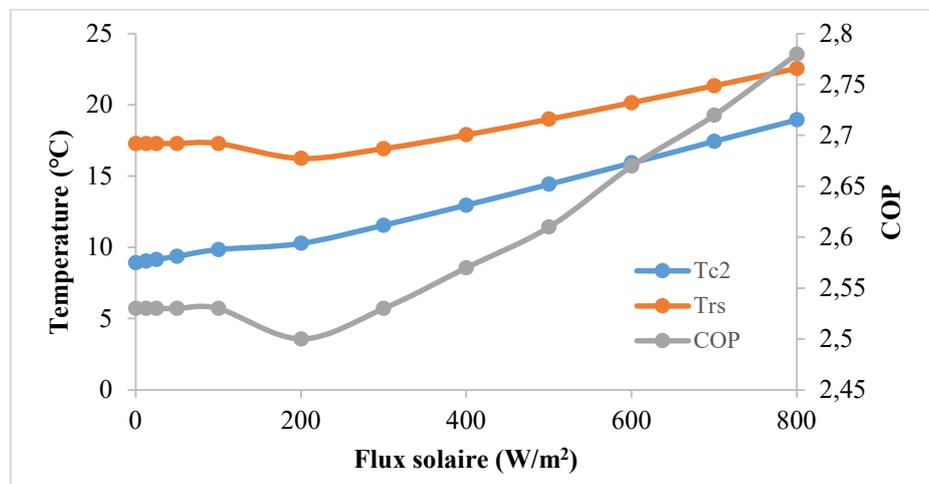


Figure II-15: Courbes des paramètres du système pour de valeurs moyennes de températures et de COP

Avec, T_{c2} - température de sortie des capteurs solaires, T_{rs} - température du réservoir et COP- Coefficient de performance de la PAC.

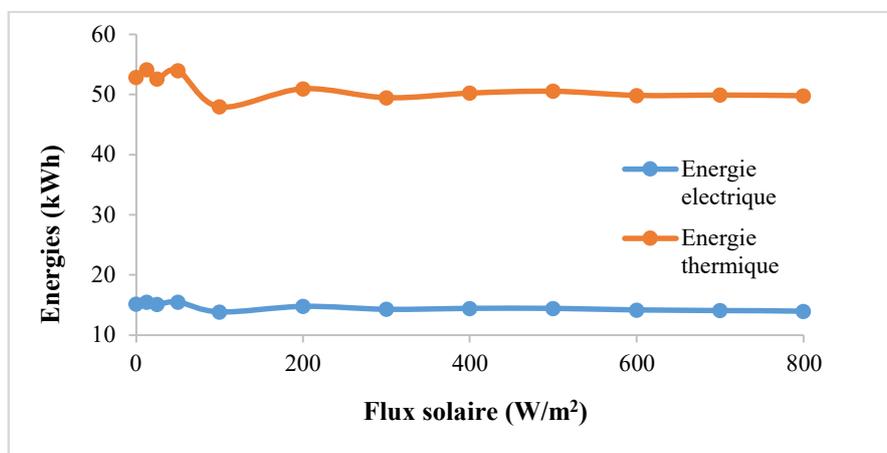


Figure II-16: Courbes de consommation énergétique en fonction de la variation de flux

II.10.3.2 - Etude du cas des apports thermiques intérieurs

Les apports thermiques internes sont un ensemble comprenant les apports d'équipements électriques de confort dans l'habitat (cuisinière, éclairage, ordinateurs, etc.) et les apports thermiques de métabolismes humains liés aux présences des personnes. On n'a considéré que les apports thermiques d'éclairage à cause de leur utilisation sur une durée relativement longue par rapport aux autres équipements de confort. Le métabolisme humain, de par le nombre de personnes est une source thermique non négligeable dans le chauffage.

Afin d'en étudier leurs impacts sur le système, quatre cas de chauffage sont testés. Le premier cas noté C_1 correspond au cas du chauffage de bâtiment où il y a tous les apports thermiques internes (éclairage est allumé et présence humaine). Le deuxième cas désigné par C_2 , c'est le cas du chauffage où les apports thermiques internes ne proviennent que de l'éclairage. Il n'y a personne dans l'habitat. Le troisième cas C_3 est celui du chauffage où les apports internes sont nuls. Enfin, le dernier cas noté C_4 , il équivaut au cas où l'éclairage est éteint mais il y a présence des personnes dans le bâtiment chauffé.

II.10.3.2.1 - Cas du chauffage C_1 (lumière & présence humaine)

Dans ce cas de chauffage, tous les apports provenant de l'éclairage et des métabolismes humains dont leur somme est égale à 1231W, sont pris en compte. Les flux solaires considérés sont d'amplitude maximale égale à 600W/m². Les résultats de simulation sont résumés dans le tableaux II-7. L'usage de tous les apports thermiques internes susmentionnés, contribue d'une bonne manière à la performance de la PAC, avec une consommation énergétique de 14,20kWh pour un ciel bien ensoleillé à 15,20kWh. Le confort thermique est assuré avec une température moyenne de l'air ambiante à 19,04°C. Malgré, ce temps bien ensoleillé, l'apport de la production énergétique thermique des radiateurs est nécessaire à hauteur de 49,87kWh pour ce confort.

Paramètres du système	Valeur
Température moyenne ambiante T_{ai} (°C)	19,04
Ecart-type de température T_{ai}	0,67
Energie électrique consommée (kWh)	14,20
Energie thermique produite (kWh)	49,87
COP journalier moyen de la PAC	2,67
COP journalier maximal de la PAC	3,00
COP journalier minimal de la PAC	2,38
Température max de sortie du fluide caloporteur T_{c2} (°C)	30,49
Température min de sortie du fluide caloporteur T_{c2} (°C)	0,98
Température max de sortie du fluide caloporteur T_{rs} (°C)	25,21
Température min de sortie du fluide caloporteur T_{rs} (°C)	10,00

Tableau II-7: Résultats de simulation pour le cas de chauffage C_1

II.10.3.2.2 - Cas du chauffage C₂ (éclairage uniquement)

Dans ce cas, les apports thermiques interne n'émanent que seulement d'éclairages (731W), les apports dus aux métabolismes humains sont nuls. La valeur maximale du flux solaire est de 600W/m². Les résultats de simulation sont donnés dans le tableau II-8.

La consommation électrique de la PAC est de 15,13kWh/j, pour un COP maximal de 3. Cette consommation est supérieure d'environ 1kWh que celle du cas C₁. Cela s'explique par la baisse des apports internes. Par conséquent, afin de garantir le confort thermique, la production thermique des radiateurs doit être plus importante que celle du premier cas. Ce qui est le cas, l'énergie thermique passe de 49,87kWh cas C₁ à 54,93kWh dans le cas C₂.

Paramètres du système	Valeur
Température moyenne ambiante T _{ai} (°C)	19,04
Ecart-type de température T _{ai}	0,76
Energie électrique consommée (kWh)	15,13
Energie thermique produite (kWh)	54,93
COP journalier moyen de la PAC	2,61
COP journalier maximal de la PAC	3,00
COP journalier minimal de la PAC	2,37
Température max de sortie du fluide caloporteur T _{c2} (°C)	30,51
Température min de sortie du fluide caloporteur T _{c2} (°C)	0,97
Température max de sortie du fluide caloporteur T _{rs} (°C)	25,24
Température min de sortie du fluide caloporteur T _{rs} (°C)	10,00

Tableau II-8: Résultats de simulation pour le cas de chauffage C₂

II.10.3.2.3 - Cas du chauffage C₃ (pas d'apports Internes)

En C₃, les tous apports thermiques internes sont supposés nuls dans le système de chauffage. L'amplitude maximale du flux solaire est toujours à 600W/m². L'ensemble des résultats de simulation sont regroupés dans le tableau II-9. Contrairement aux deux premiers cas (C₁ et C₂), C₃ présente une situation où la consommation énergétique de la PAC est la plus élevé, de facto, celle de la production des radiateurs aussi. A l'instar des autres, le confort thermique est aussi garanti. Le déficit d'apports internes est comblé par une consommation importante de l'énergie par la PAC. Par conséquent, la pompe à chaleur est beaucoup plus sollicitée pour produire l'énergie calorifique pour le chauffage du fluide caloporteur.

Paramètres du système	Valeur
Température moyenne ambiante T_{ai} (°C)	19,10
Ecart-type de température T_{ai}	0,94
Energie électrique consommée (kWh)	16,67
Energie thermique produite (kWh)	63,27
COP journalier moyen de la PAC	2,54
COP journalier maximal de la PAC	3,01
COP journalier minimal de la PAC	2,28
Température max de sortie du fluide caloporteur T_{c2} (°C)	30,54
Température min de sortie du fluide caloporteur T_{c2} (°C)	0,95
Température max de sortie du fluide caloporteur T_{rs} (°C)	25,27
Température min de sortie du fluide caloporteur T_{rs} (°C)	10,00

Tableau II-9: Résultats de simulation pour le cas de chauffage C_3

II.10.3.2.4 - Cas du chauffage C_4 (uniquement présence humaine)

Le dernier cas ou le cas C_4 du chauffage est caractérisé par les apports thermiques ne provenant que de métabolismes humains, soit environ 500W, c'est-à-dire des chaleurs produites par les présences humaines dans l'habitat lors du chauffage. Le chauffage est effectué en situation de rayonnement solaire d'amplitude égale à 600W/m². Les résultats de simulation sont donnés dans le tableau II-10.

Le chauffage avec apports dus aux métabolismes humains et flux solaires importants présentent de meilleurs résultats. La consommation électrique de la pompe à chaleur est de 15,93kWh, pour un COP maximale de 3. La consommation électrique va de pair avec la production thermique des radiateurs. Le confort thermique est garanti. Donc, le chauffage avec un flux solaire de 600W/m² est plus favorable aux performances des équipements thermiques, en l'occurrence la PAC.

Paramètres du système	Valeur
Température moyenne ambiante T_{ai} (°C)	19,05
Ecart-type de température T_{ai}	0,81
Energie électrique consommée (kWh)	15,93
Energie thermique produite (kWh)	58,65
COP journalier moyen de la PAC	2,59
COP journalier maximal de la PAC	3,00
COP journalier minimal de la PAC	2,34
Température max de sortie du fluide caloporteur T_{c2} (°C)	30,52
Température min de sortie du fluide caloporteur T_{c2} (°C)	0,96
Température max de sortie du fluide caloporteur T_{rs} (°C)	25,24
Température min de sortie du fluide caloporteur T_{rs} (°C)	10,00

Tableau II-10: Résultats de simulation pour le cas de chauffage C_4

II.10.4 - Analyse de la synthèse des résultats

Aux termes de cette étude de fiabilité sur l'outil de calcul conçu, on peut dire que les apports extérieurs, en l'occurrence les flux solaires sont de données qui ont une influence réelle et certaine sur l'ensemble du système énergétique étudié y compris le bâtiment.

Concernant les apports intérieurs, les différents cas (C_1 , C_2 , C_3 et C_4) de chauffage correspondant leur variation et quelle que soit l'amplitude du flux solaire, assurent le confort thermique à cause de l'appoint électrique. En revanche, la consommation électrique de la PAC varie en fonction des apports. Plus les apports sont importants, moins est la consommation de la pompe et les radiateurs produisent peu. En C_1 , la PAC a la plus faible consommation de tous les cas. Par contre, en C_3 correspond au cas où sa consommation est la plus élevée car il n'y a pas d'apports. Cette évolution énergétique dénote que les apports ont une influence sur le fonctionnement, par ricochet la performance de la PAC. Par conséquent, un système chauffage bénéficiant des apports thermiques internes est bénéfique pour les équipements de chauffage en général et la PAC en particulier. Par ailleurs, meilleures sont les températures du réservoir de stockage et des capteurs solaires thermiques lorsque les flux solaires sont importants.

Au regard des résultats obtenus et l'analyse faite, on peut valablement utiliser cet outil d'aide aux décisions pour le dimensionnement d'un système de chauffage hétérogène. Pour ce faire, une étude d'optimisation du dimensionnement sera menée au chapitre suivant. Un seul cas sera considéré avec un seul type de régulateur pour une période défavorable.

Paramètres	C_1	C_2	C_3	C_4
Température moyenne ambiante T_{ai} (°C)	19,04	19,04	19,10	19,05
Ecart-type de température T_{ai}	0,67	0,76	0,94	0,81
Energie électrique consommée (kWh)	14,20	15,13	16,67	15,93
Energie thermique produite (kWh)	49,87	54,93	63,27	58,65
COP journalier moyen de la PAC	2,67	2,61	2,54	2,59
COP journalier maximal de la PAC	3,00	3,00	3,01	3,00
COP journalier minimal de la PAC	2,38	2,37	2,28	2,34
Température max de sortie du fluide calo T_{c2} (°C)	30,49	30,51	30,54	30,52
Température min de sortie du fluide calo T_{c2} (°C)	0,98	0,97	0,95	0,96
Température max de sortie du fluide calo T_{rs} (°C)	25,21	25,24	25,27	25,24
Température min de sortie du fluide calo T_{rs} (°C)	10,00	10,00	10,00	10,00

Tableau II-11: Synthèse des résultats dans différents cas de chauffage

II.11 - CONCLUSION

Le travail développé dans ce chapitre avait pour objectif de présenter les différents modèles de composants du système énergétique. Le choix du modèle RC est issu de l'état de l'art des différentes méthodologies de modélisation. C'est ainsi, dans notre thèse, un modèle de bâtiment basé sur le modèle R3C2 de Louis Laret, est développé. C'est un modèle qui prend en compte les flux solaires nets utiles, les flux de structures et des apports thermiques internes. Le bâtiment faisant partie du système énergétique étudié comprend également des équipements de chauffage tels que les capteurs solaires thermiques pour préchauffer l'eau, un réservoir pour stocker l'énergie calorifique solaire, une pompe à chaleur prélevant de l'énergie calorifique et de radiateurs servant d'émetteurs de chaleur l'enceinte. Pour tous ces composants du système, leurs modèles ont été choisis dans la littérature du fait de leur simplicité et leur usage courant. Précisons que bien avant la présentation des modèles constituant le système énergétique, une analyse des paramètres influençant la performance énergétique du bâtiment est faite dont l'objectif est de déterminer les facteurs à prendre en compte dans l'outil d'aide aux décisions. A cet effet, des modèles analytiques choisis et développés, l'agrégation et l'implémentation dans l'environnement Matlab/Simulink, a permis de réaliser un simulateur, un outil de calcul. Un système de régulation est aussi intégré à cet outil. Le simulateur thermique dynamique a été présenté et testé avec différents scénarios de chauffage sous différentes conditions météorologiques à savoir, flux solaire non nul et température ambiante extérieure, flux solaire non nul bruité et température ambiante extérieure bruité, flux solaire nul et température ambiante extérieure, flux solaire nul et température ambiante extérieure bruitée. Les résultats qui en découlent, présentent une bonne performance de l'outil.

Enfin, le chapitre suivant est consacré à l'optimisation de dimensionnement multicritère d'un système de chauffage intégrant le bâtiment.

CHAPITRE III :

**OPTIMISATION MULTICRITERE DU
DIMENSIONNEMENT D'UN SYSTEME DE
CHAUFFAGE**

CHAPITRE III : OPTIMISATION MULTICRITERE DU DIMENSIONNEMENT D'UN SYSTEME DE CHAUFFAGE

III.1 - INTRODUCTION

Le concept d'optimisation est une terminologie vague et peu précise qui amène à la question suivante : que faut-il optimiser ? Les couts, les impacts environnementaux ou les performances énergétique ? L'obligation de définir les témoins et les variables d'essai du système à optimiser est nécessaire pour répondre à la question. En termes d'énergie, la performance des composants d'un système est importante mais leurs dimensions demeurent les domaines les plus critiques où l'optimisation peut avoir le plus d'impact. A cet effet, une étude portant sur le dimensionnement de notre ensemble de chauffage fait l'objet de ce chapitre. Ainsi, dans le chapitre précédent, différents modèles des composants du système ont été présentés. Il s'agit du bâtiment et son système énergétique comprenant des équipements de chauffage, de stockage et de distribution de l'énergie calorifique. Le couplage de ces modèles entre eux et associés aux régulations ont permis de développer un simulateur thermique dynamique. Ce dernier servant d'outil d'aide à des décisions est un instrument de dimensionnement de notre système énergétique thermique.

Précisons que par définition, le dimensionnement vise à déterminer la taille et les caractéristiques des différentes composantes d'un système. Dans notre cas d'étude, il ne suffit pas seulement de déterminer la taille du système mais la taille optimale de ce dernier. C'est pourquoi une étude d'optimisation sera menée en se basant sur la méthode d'optimisation analytique statistique prenant en compte les contraintes appliquées aux fonctions « objectif ». L'optimisation du dimensionnement du système tient compte des critères du confort thermique et la consommation énergétique de la pompe à chaleur. Donc, le chapitre est consacré à la problématique de l'optimisation du dimensionnement. Dans son organisation, le chapitre fait, de prime à abord une présentation de revue des logiciels dédiés aux systèmes thermiques, ensuite une analyse des différentes méthodes d'optimisation multicritère, l'étude d'optimisation multicritère du dimensionnement et enfin l'évaluation de la solution retenue.

Enfin rappelons que les données d'entrées ayant servi à l'étude d'optimisation multicritère du dimensionnement sont :

- Les données météorologiques : ensoleillement, températures ambiantes ;
- Les caractéristiques des composants : capteurs solaires, réservoir de stockage, radiateurs à eau chaude, dimension du bâtiment ;
- Le profil de présence humaine dans le local chauffé ;
- Et enfin, le profil des charges d'éclairage.

Parmi ces données d'entrées, certaines d'entre elles serviront de variables de décision du problème d'optimisation dont le principe, dans ce cas, est basé sur plusieurs simulations dynamiques puis les analyses des résultats qui en découlent. Ces analyses se focalisent sur des éléments de contraintes, basés sur les paramètres statistiques.

III.2 - REVUE DES LOGICIELS UTILISES EN THERMIQUE

Il existe de nombreux logiciels consacrés aux études des systèmes énergétiques thermiques de bâtiments pour diverses fins à savoir, analyse, modélisation, simulation, dimensionnement ou optimisation. Parmi ces logiciels, on a les principaux et les plus usuels : Trnsys, Pléiade-Confie, EnergyPlus, Modelica, Matlab, etc.

Codé en langage Fortran et développé par l'Université de Wisconsin-Madison aux Etats-Unis d'Amérique en 1975 [91], le logiciel Transient System Simulation, en abrégé Trnsys est un environnement de simulation dynamique le plus utilisé, permettant de simuler de manière très fine le comportement d'un système complexe tel que bâtiment et autres. Il est utilisé pour l'analyse et le dimensionnement d'installations HVAC, la conception de systèmes solaires passifs, l'analyse de performance thermique des bâtiments, etc. Il comporte un certain nombre de modules de base. D'architecture modulaire, il permet à la fois de décomposer des problèmes complexes en plusieurs problèmes moins complexes et de travailler dans un environnement « ouvert », permettant de rajouter des nouveaux composants. Du coup, il offre la possibilité à l'utilisateur de créer lui-même ses propres composants.

Le logiciel Trnsys couvre un large domaine d'applications dont la thermique du bâtiment. Outre le module du système thermique, Trnsys possède de modules des sous-programmes de gestion des résultats de simulations et de la base de données (Météo ou autres). Ces bibliothèques comportent des outils tels que Simcad, Trnflow, Favent, Meteonorm et Trnsed pouvant être connectés pour effectuer des études pluridisciplinaires. Leurs avantages sont [91][92][93] :

- Flexibilité pour modéliser un ensemble de système thermique à différents niveaux de complexité ;
- Possibilité de modifier ou d'ajouter des composants ne figurant pas dans la librairie d'origine, grâce à l'accès du code source ;
- Vaste documentation sur les sous-programmes y compris explication, usages usuels, équation de base ;
- Définition très souple de la période de simulation : choix du pas de temps, du début et à la fin de la simulation ;
- Connexions plus ouvertes vers d'autres outils et langages de programmation pour la version 16 ;
- Possibilité de couplage Trnsys à Matlab/Simulink et inversement.

Par contre, l'exécution d'une simulation nécessite des va-et-vient permanents d'un sous-programme donné à un autre, faisant ainsi de Trnsys un code gourmand en temps de calcul.

C'est le logiciel le plus utilisé en simulation de bâtiment, EnergyPlus est né de la volonté du gouvernement américain de se doter d'outils de simulation thermique plus puissants du fait des avancées en termes de méthodes et capacités de calculs [94][95].

Deux modules de calculs BLAST et DOE-2 forment cet outil. Le premier module permet d'effectuer les bilans de masse et de chaleur en associant un nœud d'air à chaque zone. Le second module ne prend en compte que les systèmes énergétiques. Il existe, en réalité un troisième module de gestion et contrôle des simulations. Il permet, éventuellement des connexions avec d'autres outils. Dans les travaux de [96], un contrôleur prédictif est développé, l'EnergyPlus est utilisé pour la simulation du bâtiment et Matlab/Simulink pour la partie optimisation. L'EnergyPlus est un logiciel gratuit et open-source. Ce qui lui permet d'automatiser des simulations comme le cas de la publication de Miller [97] avec Python.

Tout comme le logiciel EnergyPlus, Modelica est un langage libre, open-source et orienté objet qui permet de modéliser des systèmes complexes. Il dispose d'une bibliothèque « building » développée en 2007 par Lawrence Berkeley National Laboratory. Il décrit le comportement de systèmes physiques complexes à l'aide d'équations différentielles (mais pas des équations aux dérivées partielles), équations algébriques et des équations discrètes. Le simulateur associé a pour tâche de résoudre le système d'équations à chaque pas temporel. Il a une vocation, cependant plus généraliste que ses concurrents et bénéficie des avantages de son orientation objet. Ce langage dispose d'un environnement graphique (édition de schémas fonctionnels). Les composants physiques (résistance, pompe, ...) sont représentés par des icônes. Pour le logiciel, ce sont des équations ou bien un ensemble de sous-composants connectés. Les connexions représentent un couplage entre les blocs (fil électrique, canalisation,). Ses avantages sont [98][99] :

- Un langage libre à architecture ouverte, peut se définir comme un langage orienté objet et orienté-équation pour la modélisation de systèmes physiques complexes ;
- Il décrit directement en utilisant l'écriture formelle des équations, le fonctionnement des systèmes physiques à modéliser ;
- L'appropriation de la mise en équation est plus simple et rapide ;
- L'écriture sous forme textuelle d'équation facilite le repérage d'erreurs et minimise le temps imparti pour effectuer la mise en forme graphique et l'encapsulation de certaines parties du modèle ;
- Il comporte une bibliothèque de composants de base gratuite et disponible directement dans les environnements de développement pour divers domaines.

Les inconvénients de Modelica sont réels. Il ne supporte pas encore formellement la description de système à l'aide d'équations différentielles aux dérivées partielles. Modelica est limité aux équations différentielles uniquement par rapport au temps. Enfin, l'exportation des modèles n'est possible que dans le domaine continu. L'exportation vers Simulink de modèles dans le domaine discret n'est pas supportée.

Pléiade est un logiciel complet de conception et d'évaluation énergétique et environnementale d'un bâtiment, développé par Izuba Energies. Son module graphique Alcyone permet une saisie rapide de l'enveloppe du bâtiment, ses caractéristiques thermiques, des masques, des systèmes et informations relatives à son usage.

Le calcul thermique est basé sur le moteur de Confie développé par le Centre Efficacité Energetique des Systèmes de l'école de Mines de Paris. Quant'à l'éclairage naturel, son calcul est basé sur le logiciel Radiance. La modélisation des systèmes est effectué » selon les règles Th-BCE 2012, à l'exception des centrales de traitement d'air qui ne sont pas modélisées [100][101][102].

Matlab développé par l'entreprise MathWorks depuis 1984 est avant tout un logiciel de calculs mathématique mais aussi il a un caractère transversal à cause de son importante bibliothèque de boîte à outils de calcul et de modèles. Il offre un environnement de programmation qui permet de développer ses propres modèles ou algorithmes de calcul. Associé à Simulink, une interface graphique de programmation, il permet de modéliser, d'optimiser, de contrôler et d'analyser des systèmes de nature très diverse. En plus de l'ingénierie, Matlab/Simulink dispose également d'autres outils de modélisation et de simulation, conçus pour résoudre des problèmes d'ordre économétrique et financier notamment [103].

Ces logiciels passés en revue servant tous d'outils de modélisation et de simulation ont chacun, leurs avantages et inconvénients en dépit de leur caractère payant pour certains, gratuit pour d'autres. Trnsys et EnergyPlus semblent être les plus utilisés en proposant des versions plus évoluées. Tnsys, logiciel commercial se distingue par son interface graphique qui est facile d'utilisation. C'est une référence de simulation de système de chauffage, de ventilation et de climatisation complexe. En outre, il permet d'étudier le comportement d'un système. Bref, Trnsys réalise de modélisations, de simulations et dimensionnement des systèmes énergétiques. EnergyPlus se démarque de Trnsys par sa gratuité et sa capacité a accepté plusieurs modules. Ces derniers peuvent être développés par ceux qui les souhaitent, afin de lui apporter de nouvelles capacités. Cependant, EnergyPlus manque d'interface graphique officielle et efficace. Son interface d'utilisation est extérieure à lui. Ces interfaces sont soit payantes, soit gratuites. Il est plus utilisé en modélisation et simulation des bâtiments. Le logiciel dispose d'un environnement graphique contrairement à EnergyPlus, il facilite la conception des systèmes. Modelica, libre accès, a en commun avec tous les autres logiciels de modéliser et simuler les systèmes. Malgré, son environnement graphique les équations sont saisies de manière textuelle. Pléiade-Comfie est orienté plus vers la simulation des bâtiments. Enfin, Matlab/Simulink, logiciel payant offre plus d'avantages, de par son caractère transversal mais il est dédié à la fois à la conception, la modélisation, la simulation et l'optimisation.

Pour notre système, Matlab/Simulink constitue un outil idéal pour ses avantages, en raison notamment de sa flexibilité et de son ouverture, sa bibliothèque fournie en modèles et la possibilité à l'utilisateur de développer ses modèles. De plus, il comporte des outils d'optimisation. Il faut noter néanmoins que l'aspect optimisation dudit logiciel ne justifie pas son choix. Ce dernier se justifie par le fait qu'il est l'environnement le plus répandu dans le monde scientifique et les autres avantages susmentionnés.

III.3 - ANALYSE DES METHODES D'OPTIMISATION MULTICRITERE

L'optimisation est un outil mathématique qui modélise, analyse et résout analytiquement ou numériquement les problèmes. C'est donc un outil qui détermine les solutions satisfaisantes la ou les fonctions « objectif » quantitatives tout en respectant d'éventuelles contraintes. En d'autres termes, l'optimisation vise à déterminer les extrema d'une ou de plusieurs fonctions « objectif ». Ces derniers constituant des objectifs à atteindre pour un problème d'optimisation, servent de critères pour déterminer la ou les meilleures solutions dudit problème en faisant recours aux différentes techniques ou méthodes. A chaque problème d'optimisation, on peut associer un problème de décision dont le but est de déterminer, s'il existe des points de l'espace ou des solutions pour lesquelles la ou les fonctions « objectif » soient supérieures, inférieures ou égales à des valeurs données, soumis à un ensemble de contraintes. La difficulté d'un problème d'optimisation est implicitement liée au temps considérablement long et fastidieux pour la résolution d'un algorithme, défini dans un espace de recherche donné.

En fonction de leurs caractéristiques définies par la nature des variables, des domaines de définitions et des critères à optimiser, on distingue des problèmes d'optimisation mono-objectif et des problèmes d'optimisation multi-objectif ou multicritère.

Le problème d'optimisation mono-objectif se base sur la minimisation (ou la maximisation) d'une seule fonction « objectif » où le but est de trouver la meilleure solution appelée solution optimale, définie suivant une seule performance du problème. L'optimisation multicritère, en revanche optimise plusieurs critères qui sont souvent contradictoires, on cherche à trouver la meilleure solution suivant un ensemble de performance du problème. La solution d'un problème multicritère, contrairement à l'optimisation mono-objectif n'est pas une solution unique mais un groupe de solutions qui caractérisent l'ensemble des compromis entre les différents objectifs. L'ensemble de ces solutions est connu sous le nom de solutions Pareto optimales. Afin de résoudre un problème d'optimisation multicritère, les chercheurs ont proposé des méthodes performantes de résolution. La connaissance de ces méthodes est nécessaire pour le choix de l'une d'entre elles.

La littérature scientifique relève plusieurs méthodes d'optimisation réparties en deux classes : les méthodes déterministes ou exactes et les méthodes stochastiques [104][105][106]. Basées sur l'exploration de l'espace de recherche, les méthodes déterministes offrent la certitude d'obtenir un optimum local ou global. Elles requièrent de la fonction « objectif », la convexité, la continuité et la dérivabilité. Autrement dit, lorsque le nombre de variables et/ou contraintes deviennent importantes, elles sont inadaptées. Selon le type d'information fournie relative à la fonction « objectif » et les contraintes, on a les méthodes du gradient et les méthodes directes. A la différence des méthodes déterministes, les méthodes stochastiques ou encore appelées méthodes aléatoires explorent l'espace des solutions de manière probabiliste. Elles ne nécessitent ni continuité, ni différentiabilité, ni connaissance du point de départ. Elles sont globales et couvrent tout l'espace de recherche en opérant sur plusieurs candidats. Enfin, ces méthodes autorisent un meilleur compromis entre l'exploration et l'exploitation. Outre les atouts de ces méthodes, elles présentent également des inconvénients à savoir, la demande d'un nombre élevé d'évaluations de la fonction « objectif » pour atteindre l'optimum global d'une part, une maîtrise du jeu de paramètres conditionnant leur convergence. Les méthodes stochastiques les plus connues sont : le recuit simulé, la recherche de taboue et les algorithmes génétiques.

D'après ce qui précède, la résolution des problèmes d'optimisation multicritère peut être effectuée par des méthodes stochastiques qui se répartissent en méthodes métaheuristiques, méthodes non Pareto et méthodes Pareto [104][105][106][107][108].

Les méthodes métaheuristiques sont constituées de l'ensemble d'algorithmes d'optimisation comprenant le recuit simulé, la recherche de taboue, les algorithmes génétiques, les colonies de fourmis, l'optimisation par essaim de particule, les réseaux neurones artificiels, etc. Ces méthodes résolvent les problèmes d'optimisation difficiles et sont souvent inspirées par des systèmes naturels, qu'ils soient pris en physique, en biologie de l'évolution ou en éthologie.

Les méthodes non Pareto ne traitent pas le problème comme un véritable problème multicritère. Elles cherchent à ramener le problème initial à un ou plusieurs problèmes mono-objectifs. Parmi ces approches, on peut citer les méthodes agrégées, les méthodes lexicographiques et Vector Evaluated Genetic Algorithm (VEGA).

Les approches Pareto ne transforment pas les objectifs du problème, ceux-ci sont traités sans aucune distinction pendant la résolution.

III.4 - OPTIMISATION DU DIMENSIONNEMENT

III.4.1 - Critères d'optimisation

Dans le processus de dimensionnement optimal, un ou plusieurs critères entrent en ligne de compte afin d'apprécier les fonctions « objectif » fixées. Dans cette thèse, la garantie d'un confort thermique dans le local chauffé et la faible consommation d'énergie constituent les critères essentiels au dimensionnement du système. L'objectif du dimensionnement est de déterminer la meilleure configuration possible dudit système en termes de la surface de captation, de la capacité du réservoir, le nombre de radiateurs utilisés, les épaisseurs d'isolants et de mur. A cet effet, les critères mentionnés ci-dessous s'inscrivent dans l'atteinte des objectifs d'assurer le confort en réduisant la consommation énergétique.

III.4.1.1 - Température moyenne ambiante de l'air

La moyenne sert d'outil de calcul permettant de résumer une liste de valeurs numériques en un seul nombre réel, indépendamment de l'ordre dans lequel la liste est donnée. Par défaut, il s'agit de la moyenne arithmétique, qui se calcule comme la somme des termes de la liste, divisée par le nombre de termes. Elle peut être déterminée par la formule (1) ci-dessous [109]. La température moyenne est l'expression de la moyenne des températures instantanées régnant dans le local chauffé. Sa valeur nous situe sur le respect des valeurs limites du confort dans notre cas entre 18 à 20°C en été

$$T_m = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N T_k \quad (1)$$

Où, T_m est la température moyenne ambiante de l'air dans le bâtiment ; T_k est la température instantanée intérieure de l'air et N , le nombre de points de mesure thermique.

III.4.1.2 - Ecart-type de températures ambiantes

En mathématique, l'écart-type est une mesure de la dispersion des valeurs d'un échantillon statistique ou d'une distribution de probabilité. Il est défini comme la racine carrée de la variance ou simplement comme la moyenne quadratique des écarts par rapport à la moyenne. Il traduit une bonne ou mauvaise répartition de la température de l'air à l'intérieur du bâtiment. Une faible valeur de l'écart-type garantit un bon confort. En revanche, une grande valeur ne l'assure pas. Il se calcule par la formule statistique suivante [109] :

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (T_k - T_m)^2} \quad (2)$$

Où, T_k est la température instantanée de l'air ambiant intérieur ; T_m la température moyenne ambiante du local et N , le nombre de points de mesure thermique.

III.4.1.3 - Energie consommée

C'est l'énergie électrique moyenne journalière consommée par la pompe à chaleur. Elle est le produit de la puissance électrique instantanée par le temps durant la période de chauffage.

$$E_c = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N P_k \times \Delta \tau \quad (3)$$

Où, E_c est l'énergie électrique consommée par la PAC ; P_k est la puissance instantanée de la pompe à chaleur et $\Delta \tau$, le pas de simulation

III.4.2 - Formulation du problème

La formulation du problème est une étape essentielle dans le dimensionnement qui a pour objet la traduction du problème conceptuel en un problème mathématique équivalent. La définition de ce problème mathématique est caractérisée par la ou les fonctions « objectif », les variables de décision et éventuellement les conditions d'utilisations ou contraintes.

Ce problème d'optimisation du système peut être traité comme un problème d'optimisation multi-objective (PMO) visant à minimiser les différents coûts énergétiques du système.

Il est présenté par la formulation mathématique suivante :

$$\text{PMO} = \begin{cases} \min f_m(x) & , & m = 1 \dots M; \\ g_j(x) \leq 0 & , & j = 1 \dots K; \\ x_{i_{\min}} \leq x \leq x_{i_{\max}} & , & i = 1 \dots n. \end{cases} \quad (4)$$

$X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ représente le vecteur de n variables de décision avec x_i variables du problème et n le nombre de ces variables. Les $x_{i_{\min}}$ et $x_{i_{\max}}$ sont les bornes minimales et maximales de la variable x_i . Elles définissent l'espace de décision.

$F(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_M(x)]$ est le vecteur de fonctions objectifs avec les f_m objectifs ou critères de décision et M le nombre d'objectifs. Il s'agit de minimiser simultanément M objectifs $f_m(x)$, sous un ensemble de K contraintes $g_i(x)$.

III.4.3 - Description de la procédure d'optimisation

III.4.3.1 - Principe

Le principe de la procédure est illustré par la Figure III-1 ci-dessous. Il a été mis en place pour réaliser l'optimisation en reliant la simulation thermique dynamique de l'ensemble du système complexe sous l'environnement Matlab/Simulink.

Les données à fournir sont :

- Les données nécessaires à la simulation du système :
 - ✓ Les paramètres caractéristiques des modèles : volume du réservoir, nombre de radiateurs, dimension du bâtiment, épaisseurs du mur et d'isolant, etc.

- ✓ Les données climatiques : flux solaire et température ambiante extérieure ;
- ✓ Les apports thermiques internes : métabolisme humain et éclairage ;
- ✓ Les paramètres des coûts (économique et énergétique).
- Les données nécessaires à la méthode d'optimisation :
 - ✓ Les paramètres à optimiser ;
 - ✓ Les objectifs recherchés ;
 - ✓ Les contraintes.
- Un point de départ pour la procédure (Valeurs initiales).

La procédure d'optimisation est analytique, fait suite à la procédure de simulation itérative. A l'état initial, un ensemble de variables de décision utilisé pour évaluer, par simulation dynamique du système, un ensemble de données de sortie et les fonctions « objectif ». Tant que la condition d'arrêt des calculs n'est pas satisfaites, un nouveau jeu de paramètres est utilisé par simulation pour générer de nouveaux résultats. Ce dernier jeu de paramètres est utilisé pour définir les données de la simulation suivante et ainsi de suite jusqu'à ce que la condition soit satisfaite. Les résultats générés et enregistrés sous fichier Excel subissent un traitement d'optimisation par une approche statistique.

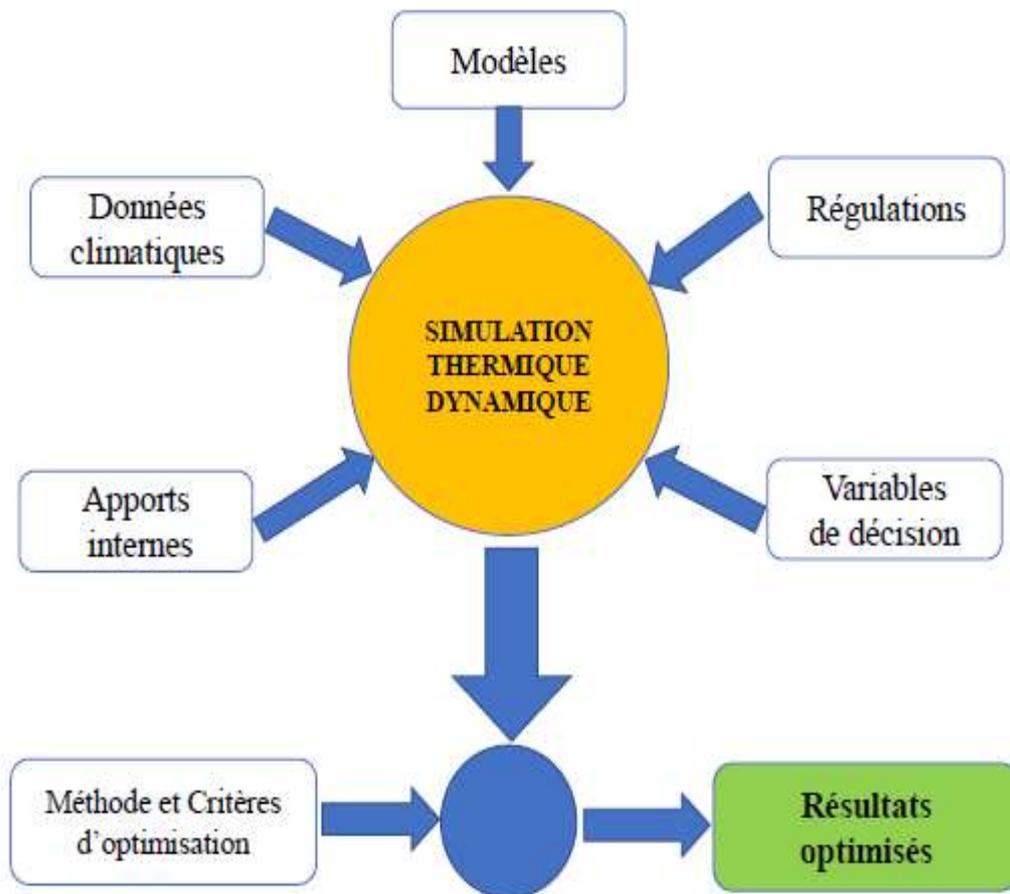


Figure III-1: Schéma de principe de la simulation dynamique

III.4.3.2 - Choix d'une méthode d'optimisation adaptée au problème

III.4.3.2.1 - Caractéristiques du problème à traiter

Dans nos travaux, plusieurs objectifs ont été choisis, différents types de variables significatives ont été identifiées puis sélectionnées et puis les fonctions « objectif » sont modélisées. Le problème d'optimisation multicritère de notre système peut être défini par l'équation (4) ci-haut. Les variables du problème sont hétérogènes. Certaines sont quantitatives continues telles que l'épaisseur du mur, l'épaisseur d'isolant ou la surface de captage, etc. D'autres sont quantitatives discrètes. Par exemple, le nombre de radiateurs utilisés... Ces variables hétérogènes induisent des fonctions « objectif » discontinues.

La conception multicritère du système de chauffage est alors un problème d'optimisation multi-objectifs à contraintes et à variables hétérogènes. Afin de résoudre ce problème, la méthode à appliquer doit posséder les caractéristiques suivantes :

- Prise en compte de variables hétérogènes ;
- Prise en compte de fonctions « objectif » non linéaires et discontinues ;
- Optimisation simultanée de plusieurs fonctions « objectif » contradictoires ;
- Capacité d'exploration globale d'un espace de solutions pouvant comporter plusieurs minimums locaux ;
- Détermination du front de Pareto des solutions optimales.

III.4.3.2.2 - Choix de la méthode d'optimisation

Selon les travaux de doctorat Dhaker, le choix de la méthode d'optimisation adéquate dépend des critères suivants [104] :

- La fiabilité qui est la capacité à déterminer un optimum global parmi plusieurs optimums locaux. La fiabilité d'une méthode dépend, en général, de la forme de fonction « objectif ». Rends propose de choisir la méthode d'optimisation selon le relief de la fonction à optimiser.
- La vitesse de convergence locale : les méthodes de programmation mathématique de second ordre présentent de vitesse de convergence plus élevée. L'usage de ces méthodes permet de réduire le nombre d'itérations, si initialement on se retrouve proche de l'optimum.
- La précision : les méthodes aléatoires sont en général, beaucoup moins précises que les méthodes de programmation pour un même nombre d'évaluations de la fonction. Elles sont donc à éviter si l'on souhaite une grande précision des résultats.
- La mise en œuvre : la mise en œuvre de méthodes aléatoires est plus facile car l'optimisation ne nécessite que de calculs directs de l'objectif.

En somme, la convergence des méthodes aléatoires et évolutionnaires est en général beaucoup moins bonne et ces méthodes nécessitent un très grand nombre d'évaluations de la fonction « objectif ». Elles seront donc pénalisantes si le calcul de la fonction « objectif » est long.

Par ailleurs, au regard de la structure de notre problème d'optimisation du système étudié, faisant intervenir des fonctions « objectif » non linéaires et discontinues, les méthodes déterministes basées sur la linéarité ou la dérivabilité desdites fonctions « objectif » ne répondent pas aux caractéristiques de la méthode recherchée. Les méthodes aléatoires ou stochastiques au contraire, semblent convenir car elles ont l'avantage d'être des méthodes directes et indépendantes de la dérivabilité des fonctions « objectif ». Seulement, elles ne garantissent pas l'obtention du minimum global ou de l'ensemble exhaustif des meilleurs

compromis au sens de Pareto dans le cas multi-objectif. Il s'agit alors, de choisir une méthode stochastique pour obtenir des solutions optimales en un temps de calcul raisonnable. Dans le cadre de cette thèse, nous choisissons la méthode Pareto qui a l'avantage d'optimiser de manière simultanée les objectifs contradictoires et se basant sur la notion de dominance dans la sélection des solutions générées. Ainsi, la mise en œuvre de cette méthode, on utilise une approche statistique c'est-à-dire une approche utilisant les paramètres statistiques.

III.4.4 - Définition des variables d'optimisation

Le système énergétique en question est un ensemble complexe comprenant, en rappel le bâtiment et les équipements de stockage et de chauffage à savoir : les capteurs solaires thermiques, le ballon de stockage de l'eau, la pompe à chaleur, les radiateurs à eau chaude. Il découle de ces composants du système plusieurs variables d'études. Pour les besoins d'études, ces variables sont définies comme suit :

- Surface des capteurs solaires x_1 en m^2
- Volume du ballon x_2 en litres ;
- Nombre de radiateurs à eau x_3 de puissance nominale unitaire donnée en W ;
- Epaisseur du mur x_4 en cm ;
- Epaisseur d'isolant x_5 en cm ;
- Dimension du bâtiment x_6 ;
- Puissance totale des lampes d'éclairage domestique x_7 en W ;
- Nombre des personnes occupant le bâtiment x_8 .

Toutes ces variables sont discrétisées et comptent entre deux à trois valeurs. La discrétisation nous permet de déterminer, dans le paragraphe suivant le nombre de cas possibles des calculs de simulations.

III.4.5 - Taille de l'échantillon

L'échantillonnage est un procédé utilisé pour choisir un échantillon et qui sert de base d'une enquête de sondage. Il consiste à sélectionner les individus que l'on souhaite interroger au sein de la population de base. Les méthodes d'échantillonnage se répartissent en méthodes probabiliste et en méthodes non probabiliste [110].

De cette définition, il ne s'agit pas ici de déterminer la taille d'un échantillon à des fins d'enquête mais de calcul des simulations itératives. L'échantillon en question renvoie à des terminologies désignant les cas de simulations possibles à partir de nos variables discrétisées. L'approche probabiliste de l'échantillonnage repose sur un choix d'unités dans la population fait au hasard. Elle a l'avantage de permettre la généralisation des résultats de l'échantillon à l'ensemble de la population en s'appuyant sur une théorie statistique reconnue. Seulement, son inconvénient est de posséder une liste de toutes les unités formant la population avant de procéder à la sélection de l'échantillon. De ce fait, un choix non probabiliste basé sur un calcul mathématique de la taille de l'échantillon (cas de simulation) semble judicieux.

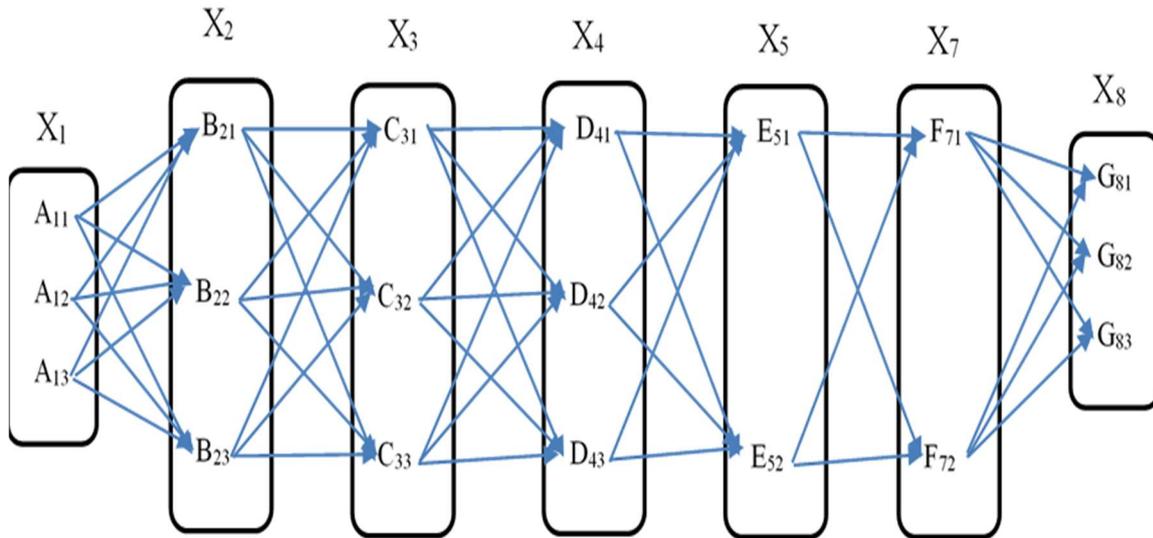


Figure III-2: Graphe de détermination de la taille d'échantillon

Donc, à partir du graphe de la Figure III-2, par un calcul mathématique relevant de l'analyse combinatoire dont la formule est ci-dessous, on peut déterminer la taille des échantillons correspondant au nombre total de simulations possibles à réaliser. Ce nombre total de calculs des simulations est défini par l'expression suivante :

$$T = C_{N.x_1}^1 \times C_{N.x_2}^1 \times \dots \times C_{N.x_k}^1 \quad (5)$$

Soit,

$$T = \prod_{k=1}^N C_{N.x_k}^1 \quad (6)$$

Où, $N.x_k$ est le nombre de valeurs prises par la variable de décision x_k , avec k varie de 1 à 8.

Il en résulte que le nombre total est égal à 972 échantillons. Ce qui équivaldrait à 972 simulations (itérations) à réalisées. C'est nombre assez élevé de calculs à mener sachant que chaque simulation prend un temps de calcul assez long. A cet effet, pour réaliser le dimensionnement de notre système, des hypothèses de calculs ont été émises. Ces hypothèses sont mentionnées dans le paragraphe suivant. Ainsi, en les considérant, un nouveau calcul détermine le nombre d'itérations à mener égal à 54.

III.5 - RESULTATS D'OPTIMISATION

III.5.1 - Hypothèses de dimensionnement

- L'amplitude maximale du flux solaire considérée égale à 600W/m^2 ;
- Par souci de réduire le volume de calculs, on contraint à faire cette hypothèse définissant un ratio entre la surface des capteurs solaires thermiques et le volume du réservoir stockage. Ainsi, selon de le programme « Energivie » : 1m^2 surface de captation correspond à 50 litres de besoin journalier [111] ;
- Energie calorifique dissipée par le métabolisme humain supposé constant et égal à 100W ;
- Le dimensionnement est fait en situation défavorable, c'est-à-dire la non-prise en compte des apports thermiques internes car supposés négligeables voire nuls.

III.5.2 - Démarche d'analyse des résultats

La démarche utilisée pour analyser les résultats est présentée par l'algorithme illustré par la Figure III.3 ci-dessous. Elle consiste à présenter sous forme de tableaux Excel, la synthèse des résultats de simulation obtenus en fonction des variables de décision. A cet effet, trois tableaux de synthèse correspondant aux différentes surfaces de capteurs solaire utilisés, sont présentés. Ensuite, un code sous Excel est développé pour choisir et retenir des solutions optimales en tenant compte d'un triplet de critères de contraintes d'optimisation à savoir l'écart-type, la consommation électrique d'une part, de température de l'air ambiant respectant la température de consigne d'autre part. Enfin, le choix de la seule solution retenue parmi les solutions optimales est réalisé par les analyses graphiques portant sur les courbes d'évolution des paramètres de sorties tels que le COP, les températures de sortie des capteurs et du réservoir dans différentes situations.

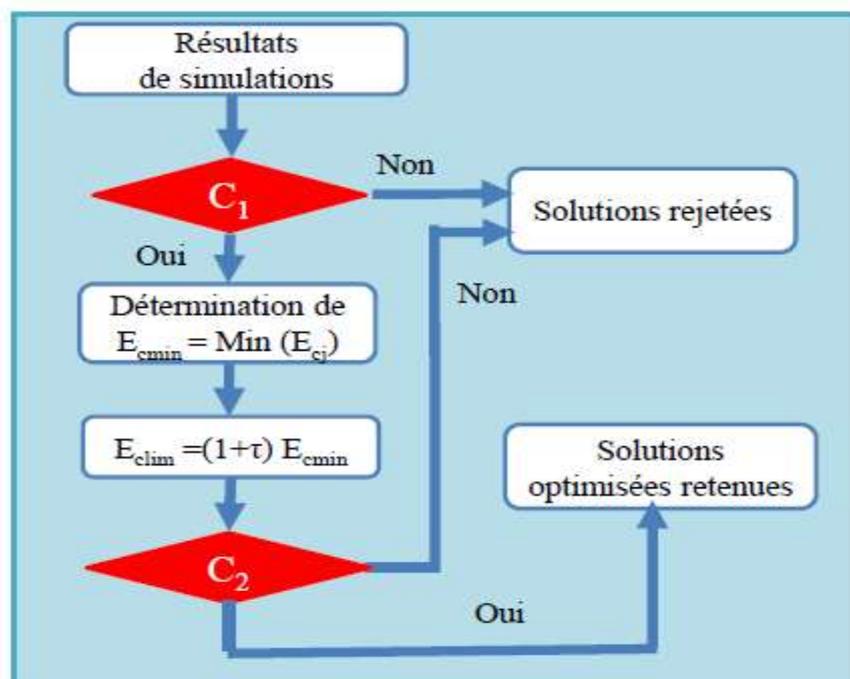


Figure III-3: Démarche d'analyse des solutions

Les deux conditions C_1 et C_2 utilisées dans l'algorithme en fonction des contraintes sont définies comme ci-dessous :

$$C_1 \begin{cases} \text{Si } 18 \leq T_{ai} \leq 20 \\ \text{et } \sigma \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

$$C_2 \{ E_c = E_{clim} \quad (8)$$

III.5.3 - Résultats de simulation

III.5.3.1 - Solutions optimales

L'usage de quatre radiateurs ne garantit pas un bon confort thermique, certes la température moyenne de l'air ambiant intérieur T_{ai} oscille dans les limites de consigne et de mais au regard de valeurs de l'écart-type comprise entre 1,03 à 1,15. Cela traduit une forte variation des températures observées autour de la température moyenne ambiante qui varie autour 18,40°C. La température moyenne est dans les limites de consigne de chauffage, c'est-à-dire comprise entre 18 et 20°C. Cette forte dispersion autour de la consigne nous amène à écarter le nombre de quatre radiateurs pour assurer un bon confort thermique. De ce fait, l'utilisation de quatre radiateurs pour ce bâtiment est à proscrire.

Lorsqu'on utilise, en revanche cinq ou six radiateurs, le confort thermique est bien assuré au regard de température ambiante de l'air et l'écart-type et ce, quelle que soit la surface de captation en usage. Aux vues des écart-types de valeurs 0,53 et 0,60 correspondant respectivement à cinq ou six radiateurs utilisés pour le chauffage. Ces nombres assurent un confort thermique dans le bâtiment avec des consommations électriques de la PAC moins élevées que dans le cas utilisant quatre radiateurs. Mais pour une surface de captation de 4m², les températures moyennes de sortie des capteurs et du réservoir sont en deçà de 10°C et oscillent entre 7 et 8°C ; leurs valeurs maximales sont de 15°C et minimales à 0°C voire négatives. De ce fait, une surface de 4m² ne convient pas pour une bonne solution.

Lorsque, le système utilise cinq radiateurs, la consommation électrique minimale de la PAC est de 16,13kWh. Il offre une meilleure distribution thermique dont l'écart-type est compris entre de 0,53 et 0,59. De plus, une température moyenne de réservoir de 15°C pour une surface de 8m².

Enfin, en utilisant six radiateurs, plusieurs solutions s'offrent avec de consommation électrique minimale de 13,93kWh et un meilleur confort.

N°	Surface de captation (m ²)	Capacité du ballon (litres)	Nombre de radiateurs	Épaisseur de mur (cm)	Épaisseur d'isolant (cm)	Écart-type T_{ai}	Énergie consommée (kWh)
1	4	400	6	10	5	0,59	13,93
2	8	300	6	10	5	0,60	14,00
3	8	400	6	20	5	0,58	14,27
4	8	400	6	20	10	0,58	14,20

Tableau III-1: Synthèse des solutions optimales possibles retenues

De ce qui précède, il en résulte le tableau.III-4 suivant proposant plusieurs solutions optimales. Quatre solutions présentent toutes un meilleur confort thermique au regard de leur écart-type oscillant entre 0,58 à 0,60. La solution à retenir fera l'objet d'une étude comparative de ces solutions optimales retenues en tenant compte de la consommation énergétique de la PAC sur une longue période c'est-à-dire un à plusieurs mois.

III.5.3.2 - Solution unique retenue

Les études de profil des courbes de températures et du COP se basent sur leurs valeurs maximales qu'elles présentent. C'est ainsi qu'il découle de la Figure.III-4 que, la pompe à chaleur présente des meilleures performances lorsque la surface de captage solaire est importante. La surface de capteurs solaires de 8m² donne un COP plus important que les autres surfaces de capteurs 4 et 6m². Il va de 2,98 pour une surface de 4m² à 3,16 pour la surface de 8m². En outre, plus le COP est élevé, la consommation de la PAC est basse. Par ailleurs d'après la Figure.III-5, une surface de captage élevée garantit un niveau de température positive à hauteur de 30°C alors que les surfaces inférieures à 8m² n'offrent que des températures faibles de 25°C. Enfin, la Figure III-6 présente de températures de réservoir, d'une différence pas trop importante, quel que soit la surface de captage utilisée. Par conséquent, dans ce cas d'étude, une surface des capteurs de 8m² est choisie.

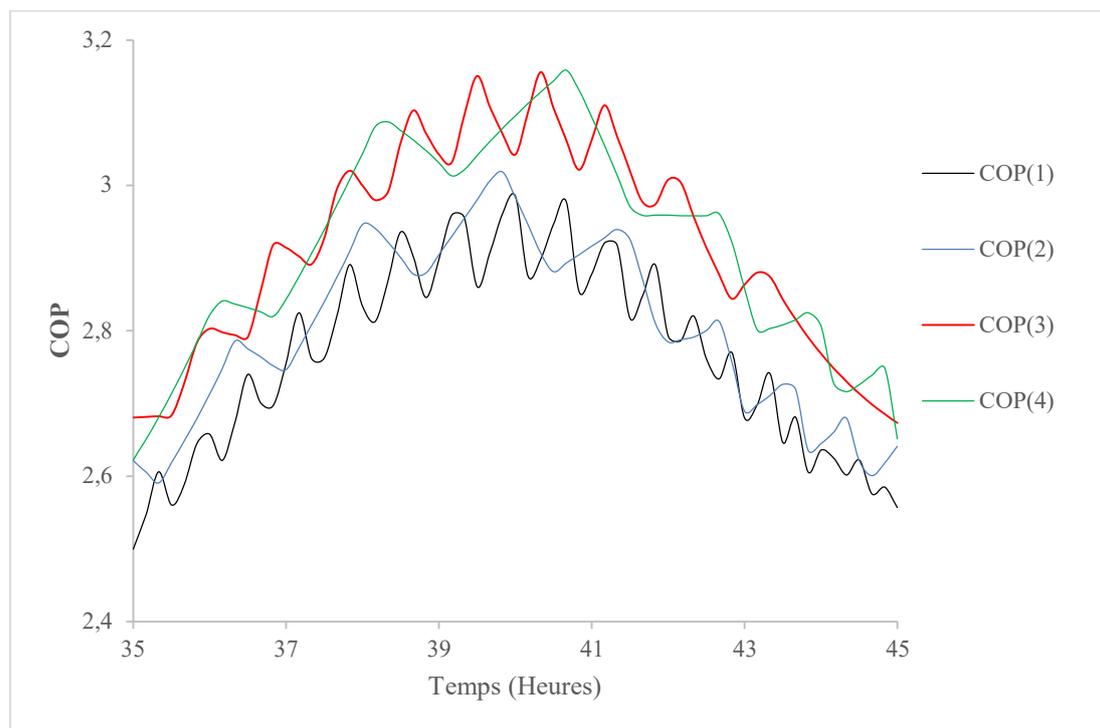


Figure III-4: Courbes d'évolution du COP des différentes solutions

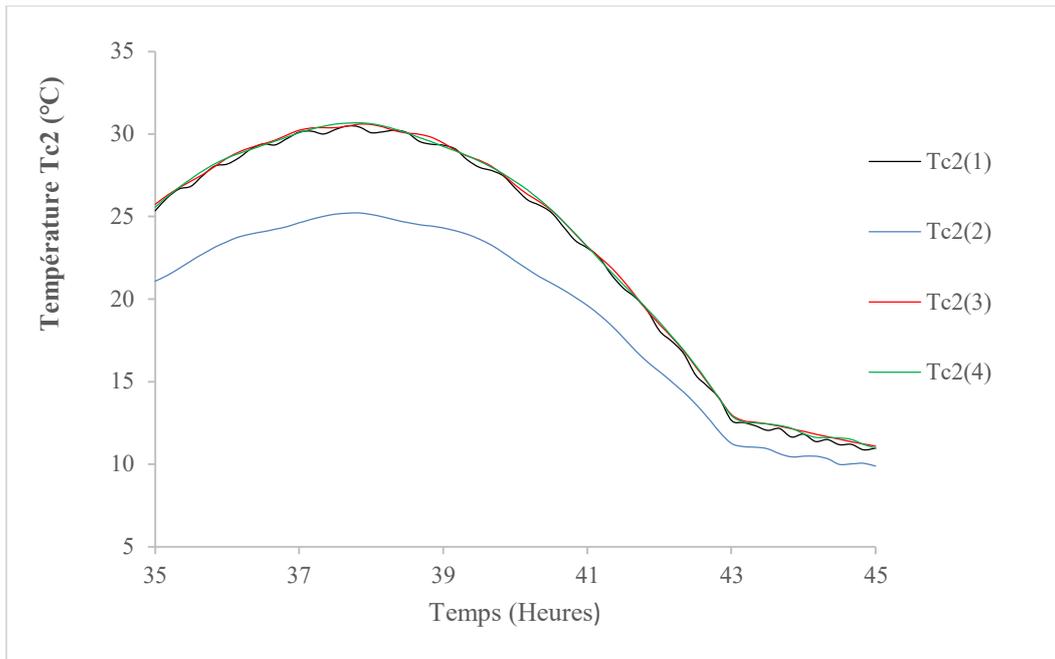


Figure III-5: Courbes d'évolution de la température de sortie des capteurs

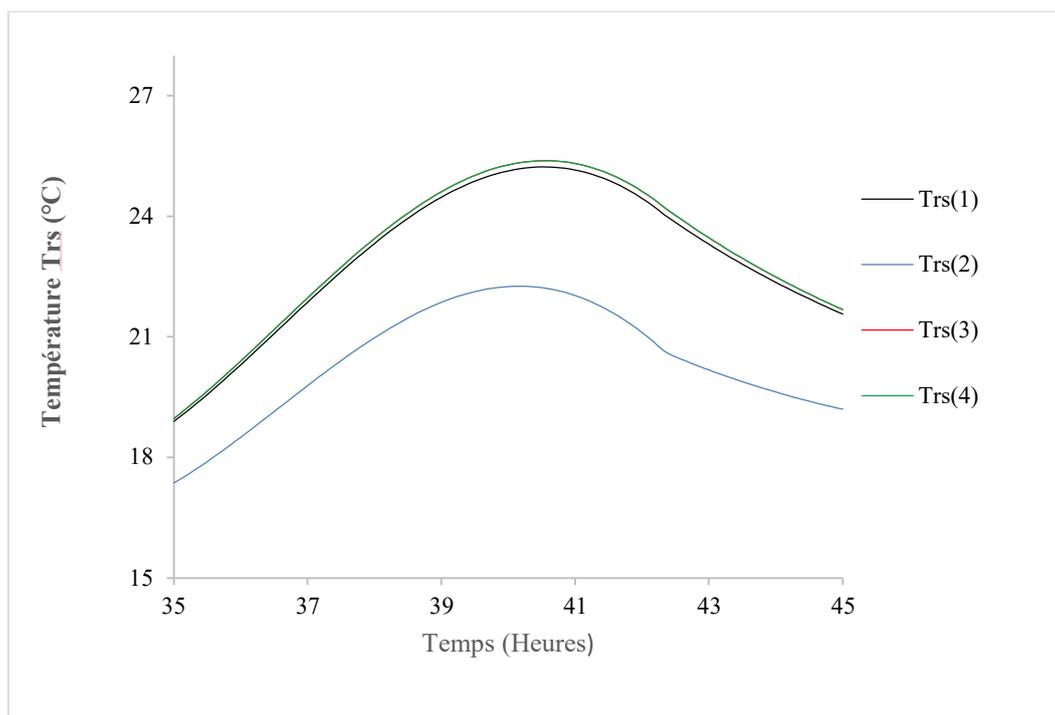


Figure III-6: Evolution de température de sortie du réservoir

De ce qui précède la solution optimale parmi les quatre est la solution 4. Cette dernière offre non seulement une consommation énergétique optimale mais assure une bonne évolution thermique dans le bâtiment. Par conséquent, un meilleur confort thermique. Cette solution fera l'objet de l'étude d'évaluation énergétique au paragraphe suivant.

III.6 - EVALUATION DE LA SOLUTION RETENUE

L'un des objectifs recherchés de l'optimisation du dimensionnement est d'arriver à faire un choix optimal d'équipements de chauffage qui assurent un confort thermique et en réduisent la facture de la consommation électrique, de par la PAC. A travers ce paragraphe, l'évaluation des performances de la solution retenue nous présente les différents profils de paramètres de sortie du système. Les analyses qui en découlent pourront mieux nous situer sur le comportement du système durant sa période de chauffage.

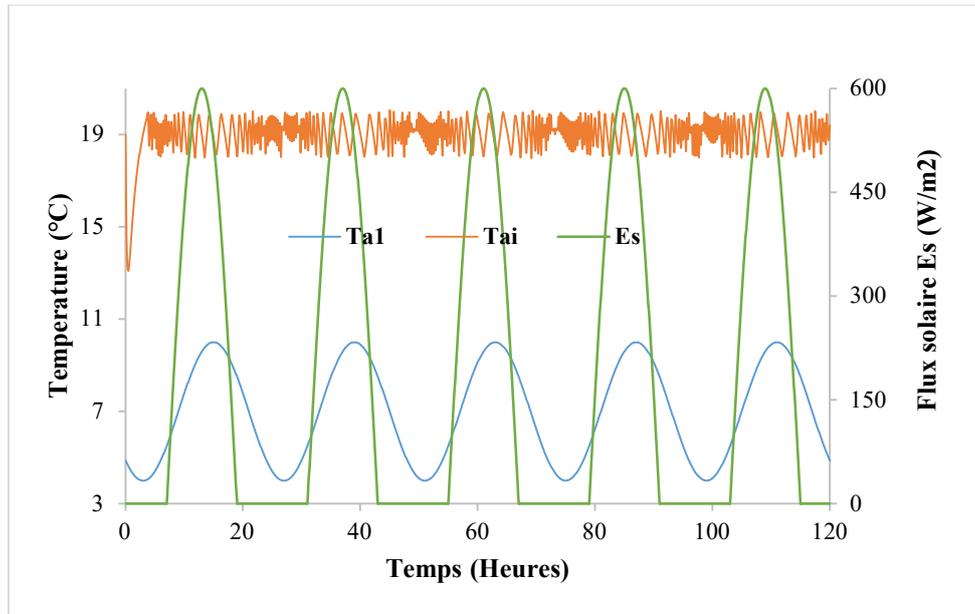


Figure III-7: Courbes d'évolution des températures de l'air ambiant intérieur (T_{ai}) et extérieur (T_{a1}) et flux solaire E_s

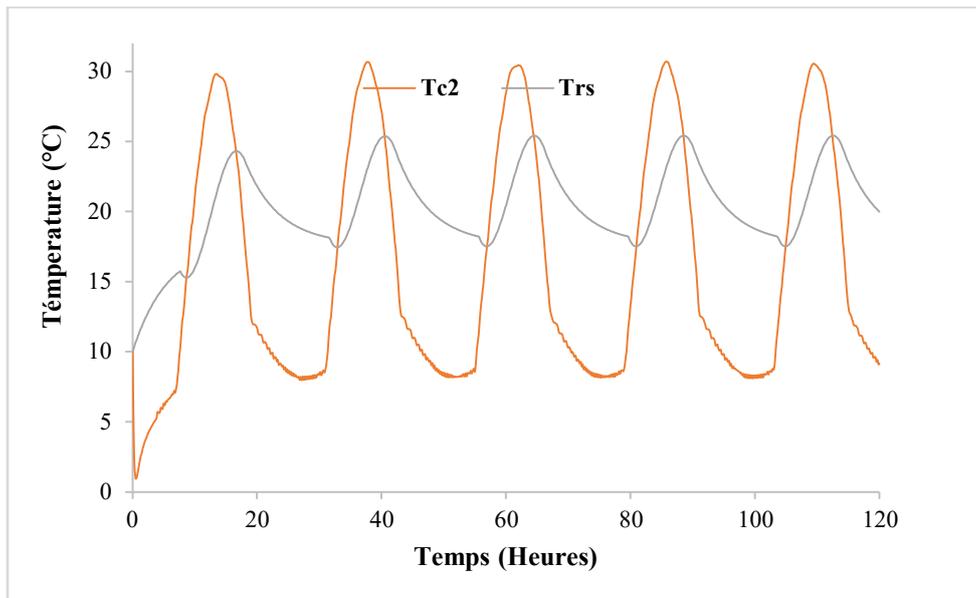


Figure III-8: Courbes d'évolution des températures de sortie des capteurs solaires T_{c2} et du réservoir T_{rs}

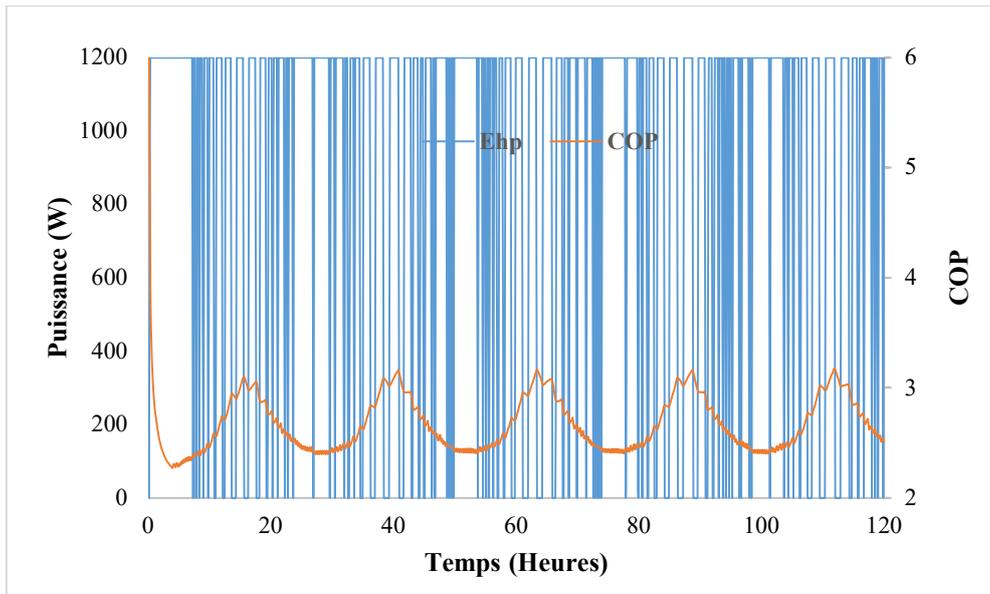


Figure III-9: Courbes d'évolution de la puissance E_{hp} et du COP de la PAC

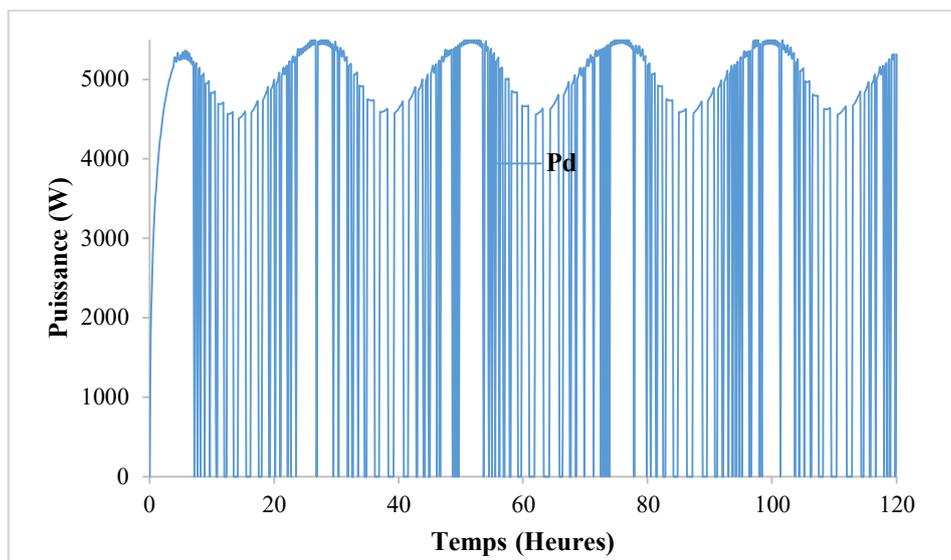


Figure III-10: Courbe de la puissance thermique dissipée par les radiateurs

La Figure III-7 nous présente l'évolution de la température ambiante de l'air intérieur. Cette température oscille dans la limite de consigne entre 18 et 20°C. Au début du chauffage, la température du locale est bien inférieure à 18°C. Ce qui oblige la PAC et les radiateurs à fonctionner longtemps pour atteindre la zone de consigne.

Les évolutions de températures de sortie du fluide des capteurs thermiques et du réservoir d'eau sont illustrées par la Figure III-8. Grâce à l'appoint électrique intégré au réservoir, la température du réservoir varie entre 10 à 24,3°C. Quant'à celle des capteurs, elle se situe entre 8 à 30°C en pleine journée.

La Figure III-9 illustre par des courbes, les paramètres électriques de la PAC lors de son fonctionnement durant la période de chauffage. La courbe de puissance traduit le profil de demande énergétique consécutive aux sollicitations thermiques afin de garantir le confort. Plusieurs phases de fonctionnement sont constatées, caractérisées par des phases d'arrêt et de phases de marche. Cela s'explique par la bonne marche du système de régulation Tout Ou Rien. Au démarrage du chauffage, le PAC fonctionne longtemps. Ensuite, en milieu de la journée plusieurs arrêts sont marqués de durées qui varient entre 10minutes à 60minutes. Elles sont plus courtes la nuit (10minutes environ) et plus longues la journée (60minutes).

Les puissances thermiques produites et dissipées par les radiateurs sont illustrées par la Figure III-10. On note une forte influence du flux solaire sur la demande énergétique thermique. La production thermique est importante et atteint son pic de 5,5kW la nuit et retombe à 0kW lorsque la consigne du chauffage est respectée. Cela s'explique par l'apport solaire qui diminue la demande énergétique thermique interne du bâtiment.

III.7 - SYNTHÈSE ET CONCLUSION

Le travail développé dans ce chapitre avait pour objectif de dimensionner et optimiser le système énergétique de chauffage d'un bâtiment.

Nous avons tout d'abord, fait une présentation d'outils logiciels utilisés pour la modélisation et la simulation en thermique, particulièrement pour les bâtiments. Il ressort de l'analyse réalisée que tous les outils logiciels étudiés ont en commun la modélisation et simulation des systèmes. Outre ce point, ils présentent des avantages et inconvénients différemment l'un de l'autre. Cependant, Matlab/Simulink offre plus d'avantages, en raison de sa flexibilité et de son ouverture et sa bibliothèques fournies en modèles. Il offre la possibilité à l'utilisateur de développer ses propres modèles. Bref, c'est un environnement le plus utilisé et transversal.

Une analyse de méthodes d'optimisation multicritère est réalisée. Il se dégage deux catégories clés des méthodes : les méthodes déterministes et les méthodes stochastiques. Au regard de la structure de notre problème d'optimisation à résoudre, la catégorie des méthodes stochastiques est indiquée pour le choix de la méthode à utiliser. Car les méthodes stochastiques ont l'avantage d'être des méthodes directes et indépendantes de la dérivabilité des fonctions « objectif » quand bien même qu'elles ne garantissent pas l'obtention du minimum global. C'est ainsi que la méthode Pareto est choisie. Elle permet d'optimiser de manière simultanée les objectifs contradictoires et se basant sur la notion de dominance dans la sélection des solutions générées. La méthode Pareto est mise en œuvre par approche statistique.

L'optimisation du dimensionnement multicritère du système est réalisée grâce au simulateur dynamique. Les résultats générés par les simulations sont analysés en considérant un triplet de critères comprenant l'écart-type, la température de l'air et la consommation énergétique de la pompe à chaleur. Des solutions optimales retenues après les analyses, une solution optimale est retenue après analyses graphiques de solutions initiales.

Enfin, des études d'évaluation de performances et d'évaluation économique sont menées dont l'objectif est de déduire le prix du kilowattheure d'énergie consommée sur la période de durée de la vie de l'installation.

CHAPITRE IV :
**GESTION DES SOURCES D'ENERGIES
DU BATIMENT PAR LA LOGIQUE FLOUE**

CHAPITRE IV : GESTION DES SOURCES D'ÉNERGIE DU BATIMENT PAR LA LOGIQUE FLOUE

IV.1 - INTRODUCTION

Ce dernier chapitre donne un aperçu sur les systèmes multi-sources puis présente les modélisations de sources d'énergies renouvelables utilisées constituées du générateur photovoltaïque et d'une génératrice éolienne. Il y a également des unités de stockage d'énergie chimique, en l'occurrence des batteries. Ensuite dans ce chapitre, des lois de gestion des sources d'énergie sont définies pour répondre aux sollicitations de charges, en utilisant la logique floue. Ces lois de supervision et de gestion assurent la meilleure commande possible des composants, permettant de satisfaire la demande à tout moment. L'algorithme de pilotage du système permettra de gérer le fonctionnement de l'ensemble. Pour ce faire, la logique floue sera utilisée comme outil de modélisation de la commande. La commande est implémentée dans Matlab/Simulink, grâce à la boîte d'outil « Fuzzy logic ». Après un état de l'art sur la gestion floue, une introduction à la logique floue est faite pour une meilleure appréhension de cette technique intelligente utilisée dans plusieurs domaines. Un algorithme flou de gestion développé sera présenté. Une application de cet algorithme est faite dans le domaine de chauffage résidentiel. La charge est supposée constituer uniquement de la pompe à chaleur. Suivant les besoins thermiques du local consécutivement à la variation du flux solaire dans la journée, la PAC présente un profil de charge variable. La variation climatique et la charge jouent un rôle prépondérant dans les paramètres de commande du dispositif de la gestion d'énergie. Les résultats découlant de cette application sont présentés. Enfin, de tests expérimentaux de l'algorithme sont réalisés sur la plateforme du laboratoire CERTES.

IV.2 - GENERALITES SUR LES SYSTEMES MULTI-SOURCES

Un système multi-sources ou hybride est la combinaison de plusieurs systèmes de production d'énergie électrique. Le système associe des sources d'énergies renouvelables et/ou combinées aux sources conventionnelles, générateur diesel avec ou sans unités de stockage [112].

En général, les consommateurs situés dans les zones éloignées du réseau électrique sont alimentés par des systèmes de production d'énergie électrique basés sur les sources d'énergies renouvelables. Ces sources ont des caractéristiques de productions différentes telles que les changements de débits d'eau dans la rivière en fonction des saisons, l'irradiation solaire qui est supérieure en été qu'en hiver et plus élevée dans la journée et nulle la nuit. De même, la vitesse du vent est plus élevée en été, etc. Voilà, pourquoi les sources renouvelables sont utilisées généralement en configurations de systèmes hybrides. De tels systèmes sont de taille variable allant de petits systèmes capables de fournir une puissance pour une maison à des grands systèmes qui peuvent alimenter un village ou une île.

Les systèmes hybrides ou multi-sources sont pensés pour fournir l'énergie à un grand nombre de collectivités éloignées. En particulier, dans les pays en développement où le raccordement au réseau national n'est économiquement et techniquement pas viable. Ils offrent plusieurs avantages suivants [113] :

- L'intégration des ressources d'énergies renouvelables dans le système de production est basée sur les potentiels locaux ;
- Absence d'émission des gaz à effets de serre ;
- Modulaire, facile à installer et la majorité des cas, n'a pas besoin de conception pour l'usage domestique ;
- Système mieux adapté pour l'électrification hors réseau ;
- Source est abondante, gratuite et inépuisable. Donc l'énergie électrique produite est indépendante du prix du carburant.

Les systèmes multi-sources peuvent fonctionner en mode autonome mais aussi en mode connecté aux réseaux électriques. Dans ce dernier cas, on parle de génération ou production distribuée. A cet effet, les énergies renouvelables sont transformées sous la forme électrique transportable via les lignes vers le réseau. La production énergétique hybride est, alors centralisée et mise en réseau entre plusieurs sites de production et de consommation. La connexion des sources hybrides aux réseaux électriques doit respecter certaines normes qui ne sont pas forcément spécifiques au domaine d'énergies renouvelables. Les normes existantes s'appliquent à des générateurs ou à des convertisseurs statiques dans le cadre des normalisations françaises ou européennes. Les centrales hybrides, majoritairement de faible puissance (inférieure à 10MW) sont soumises à la réglementation pour le raccordement des systèmes de micro-génération. Ainsi, au sein de la commission électrotechnique internationale, plusieurs groupes travaillent sur cette question de la normalisation des systèmes utilisant les énergies renouvelables. Aux Etats-Unis, les normes imposent des exigences sur la qualité de l'énergie produite en termes de tension, de fréquence et d'harmoniques. Ces contraintes imposent l'implantation de boucles de régulation spécifiques avec des dispositifs de filtrage dans les systèmes hybrides. Il existe dans les systèmes hybrides, un nœud électrique permettant de connecter et de distribuer de l'énergie entre les différents composants du système. Selon le type électrique et le convertisseur qui lui est associé, on distingue deux architectures : à bus commun AC et bus commun CC [114]. Les systèmes hybrides avec un couplage des sources autour d'un bus AC sont plus adaptés à une génération distribuée (raccordée au réseau électrique) et sont fréquemment utilisés dans le cas d'une distribution de plus grande puissance. Les systèmes en revanche, à architecture bus commun CC, sont plus adaptés à une génération ilôtée de petite puissance. La majorité de ces systèmes sont utilisés en sites isolés où l'énergie est produite et directement consommée en courant continu sur place ou à proximité des générateurs.

La mise en œuvre d'unités de production d'énergie électrique, sur site isolé à partir de ressources renouvelables, n'est pas chose aisée. En effet, en raison de la diversité des composantes, et surtout du caractère très imprévisible de la ressource (vent, rayonnement, solaire, température, etc.), l'opération peut s'avérer délicate. La méthodologie de gestion du système pour un habitat sur un site donné consiste à prendre en compte :

- Le profil de charge consécutif aux besoins énergétiques des utilisateurs ;
- Les ressources énergétiques disponibles sur le site ;
- L'état de charge d'unité de stockage d'énergie.

IV.3 - MODELISATION ENERGETIQUE DE SOURCES

L'ensemble hétérogène complexe constituant le système étudié de cette thèse, outre la partie thermique captage, stockage, production et diffusion de l'énergie calorifique pour le confort thermique, comprend une partie électrique assurant le confort fonctionnel et l'alimentation de la pompe à chaleur. La partie électrique constitue en elle un système hybride de production d'énergie, combinant et exploitant plusieurs sources disponibles facilement mobilisables. Le système qui nous intéresse dans ce chapitre, regroupe deux parties : la production de l'énergie électrique et le stockage électrochimique (Figure IV-1). Dans notre cas précis, on s'intéresse au système de petite puissance produisant du courant continu facilement convertible en courant alternatif grâce à l'intégration des convertisseurs, onduleurs.

Le système étudié comprend :

- Un générateur photovoltaïque ;
- Un générateur éolien ;
- Un dispositif de stockage d'énergie, les batteries ;
- Un bus alternatif de connexion aux charges ;
- Des convertisseurs permettant d'ajuster les tensions à celle du bus alternatif ;
- Des charges, supposé être dans notre cas que la PAC

Tous les composants, excepté les charges sont connectés au bus alternatif par l'intermédiaire de convertisseurs (CC/CC pour le photovoltaïque et l'éolien et bidirectionnel pour le pack de batteries). Pour la gestion du système, on considère l'algorithme réalisé pour alimenter sur le bus AC.

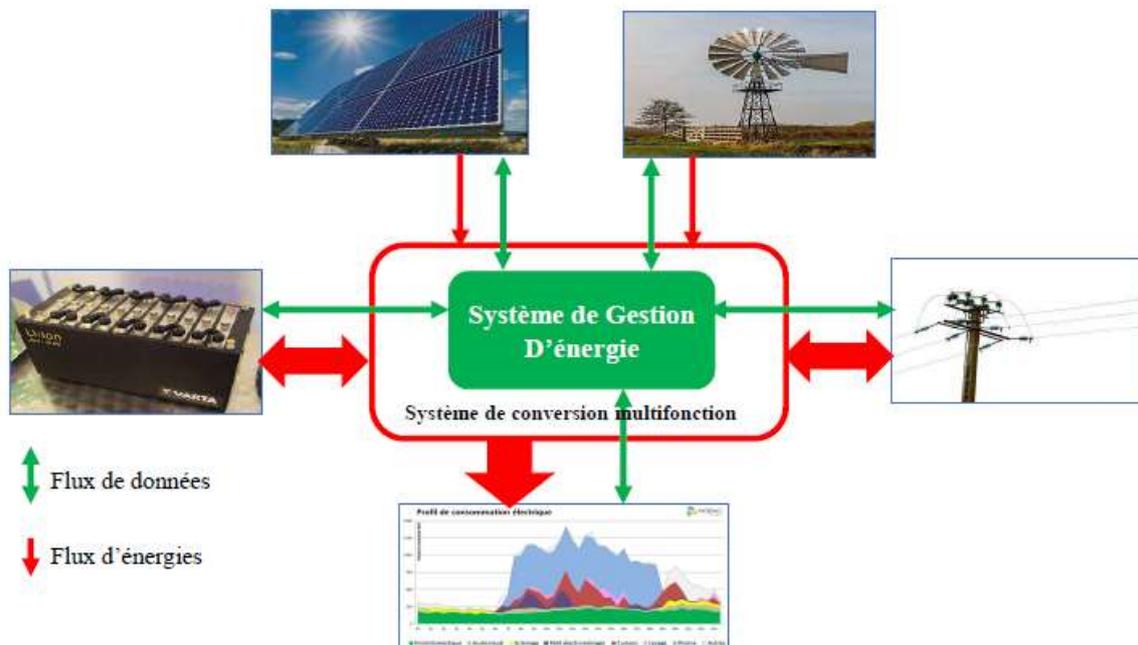


Figure IV-1: Architecture du système en général

IV.3.1 - Modèle du générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque de notre étude est un champ de modules photovoltaïques dont l'énergie d'entrée du système est le rayonnement solaire normal et diffus qui dépend de la position du soleil et de la période de l'année. Nous nous intéressons uniquement à la puissance P_{pv} (kW) produite par le système photovoltaïque. Elle est exprimée en fonction de la superficie du système A_{pv} (m^2), son efficacité η_{pv} et du rayonnement solaire incident G_T (W/m^2) [104][115] :

$$P_{pv} = \eta_{pv} A_{pv} G_T \quad (1)$$

Où, A_{pv} (m^2) représente la surface du générateur photovoltaïque, G_T (W/m^2) est l'éclairement et η_{pv} représente le rendement global de ce dernier et il est donné par [115] :

$$\eta_{pv} = \eta_r \eta_{pc} \left[1 - \beta (T_c - T_{cref}) \right] \quad (2)$$

Où, η_r est le rendement de référence du module PV. Il est choisi égal à 13% pour des modules polycristallins au silicium. η_{pc} représente le rendement caractérisant l'influence de la charge (facteur de dégradation). Ici il sera égal à 0,9 [116]. β est le coefficient de l'influence de la température des cellules photovoltaïques sur le rendement du générateur compris entre 0,004 et 0,006 par degré Celsius.

La température de la cellule est donnée par l'expression ci-dessous [115][131] :

$$T_c = T_a + \left(\frac{T_{cref} - T_{anoct}}{G_{noct}} \right) \times G_T \quad (3)$$

Où, T_a ($^{\circ}C$) est la température ambiante, T_{anoct} ($^{\circ}C$) représente la température des cellules dans les conditions NOCT (Normal Operating Cell Temperature : $G_{noct} = 800W/m^2$, $T_{anoct} = 20^{\circ}C$, Spectre AM = 1,5). T_{cref} est la température de référence de la cellule. Elle est définie comme la température qu'atteint la cellule dans son module en circuit ouvert, sous un ensoleillement de $800W/m^2$, avec une température ambiante de $20^{\circ}C$ et un vent de 1m/s. Les valeurs couramment rencontrées sont comprises entre 40 et $50^{\circ}C$.

IV.3.2 - Modèle de l'éolienne

De nombreux auteurs ont développé des modèles de prévision de la performance d'une turbine éolienne. Faut-il le rappeler, une éolienne permet de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Grâce à la force du vent, l'hélice d'une éolienne entre en rotation et cette énergie mécanique, par le truchement d'une génératrice est convertie en énergie électrique. De ces nombreux modèles, il se dégage deux catégories : les modèles basés sur des équations fondamentales de la puissance disponible dans le vent et les modèles basés sur le concept de la courbe de puissance de l'éolienne.

Par une approche globale, le modèle utilisé dont la puissance électrique générée par une éolienne, étant proportionnelle à l'aire balayée par le rotor de la turbine l'exprime par [117][130][136][137] :

$$P_e = \frac{1}{2} C_p \eta_m \eta_g \rho A v^3 = \frac{1}{2} \eta A v^3 \rho \quad (4)$$

Où ρ (Kg/m³) est la densité de l'air, A (m²) l'aire balayée par le rotor, v (m/s) la vitesse du vent, C_p est le coefficient de puissance et dépend des caractéristiques aérodynamiques de l'éolienne : β est l'angle de calage des pales et λ le rapport de vitesses, lequel est défini par [118] :

$$\lambda = \frac{R\Omega}{v} \quad (5)$$

Où R est le rayon de l'hélice, Ω la vitesse de rotation de l'éolienne (rad/s), $R\Omega$ vitesse linéaire périphérique en bout des pales.

Le rendement global du système éolien est calculé par :

$$\eta = C_p \eta_m \eta_g \quad (6)$$

Où, η représente le rendement global du système éolien ; η_g est le rendement de la génératrice ; η_m est le rendement mécanique correspondant au multiplicateur de vitesse et C_p est le coefficient de puissance (rendement de la turbine). Le rendement global du système éolien est supposé égal à 30% pour une éolienne tripale à axe horizontale [119].

IV.3.3 - Modèle du dispositif de stockage

Les énergies renouvelables produites peuvent être stockées dans des unités stockage telles que les batteries. Ces dernières demeurent un meilleur compromis entre coût et performances pour des petits (quelques kWh) aux grands (plus de 100kWh) systèmes utilisant des énergies renouvelables dans les régions isolées [120]. Les batteries au plomb-acide sont la forme de stockage la plus courante, en raison de leur coût relativement faible et de leur large disponibilité. En revanche, les batteries nickel-cadmium sont plus chères, elles sont utilisées pour des applications où la fiabilité a un caractère vital [121]. Dans le cadre de cette étude, nous avons fait notre choix sur des accumulateurs plomb-acide au regard des avantages qu'ils offrent pour des systèmes isolés de production d'énergie.

Afin d'améliorer ses performances, l'intégration d'un dispositif de commande est impérieuse. C'est pourquoi la modélisation de la batterie devient très nécessaire.

On retrouve dans la littérature trois principaux modèles de batterie :

- Le modèle énergétique, le plus couramment utilisé, se concentre sur la modélisation sur l'état de charge, qui est le paramètre le plus important dans le suivi de systèmes hybrides.
- Le deuxième type est un modèle de tension qui estime la tension aux bornes de la batterie. Il est utilisé dans la modélisation du système de gestion de la batterie et permet un calcul plus détaillé des pertes dans l'accumulateur.
- Le troisième type de modèle est celui du vieillissement utilisé pour évaluer l'impact d'un régime d'exploitation particulier sur la durée de vie attendue de batterie.

Par ailleurs, les batteries servent à répondre à la demande de charge dans les moments d'indisponibilité ou d'insuffisance de l'énergie, dans le système de production d'énergies renouvelables. La dynamique de fonctionnement de batteries est caractérisée par de cycle de charge et de décharge [133]. Lorsque la production des générateurs photovoltaïque et éolien est supérieure à la demande de charge, la capacité du banc de stockage disponible à l'instant t se charge. En revanche, lorsque la demande des charges est supérieure à l'énergie disponible générée, le banc des batteries est en état de décharge. Par conséquent, le modèle d'un dispositif de stockage est caractérisé par le paramètre appelé taux de charge ou State of Charge (SOC) qui est utilisé pour notre étude et se détermine par l'expression [121] :

$$SOC(t) = SOC_0 + \int_{t_0}^t \frac{I_{bat}(t) dt}{Q_{bat}} \quad (7)$$

Où, SOC est l'état de charge des batteries (%), SOC_0 l'état de charge initiale des batteries (%), Q_{bat} est la capacité maximale des batterie (Wh). Dans ce système, la batterie est modélisée en fonction des caractéristiques des batteries plomb-acide à cycle profond avec une efficacité de décharge supposée être de 100%.

IV.3.4 - Charges domestiques

Le dimensionnement, l'optimisation et la gestion d'un système de génération d'énergie électrique à partir des sources renouvelables sont à la fois tributaires des données climatiques et aussi des charges rendant utiles la production de ladite électricité. Ce profil de charge n'étant pas fixe, il varie au cours de l'année. Par conséquent, les horaires de sollicitation du système énergétique par la charge varient selon les saisons suite aux variations de la durée du jour.

La charge globale est la somme de toutes les charges à savoir la charge primaire, qui présente la consommation électrique des utilisateurs, elle inclue l'éclairage domestique et le fonctionnement des appareils électriques, ainsi que la charge destinée à l'éclairage extérieur et celle attribuée à l'énergie électrique consommée pour le pompage d'eau, etc.

Les caractéristiques de charge permettent de spécifier le type d'application, raccordé au réseau, hors réseau, pompage d'eau et de caractériser les besoins en énergie électrique.

Dans notre cas l'étude d'application supposée hors réseau, l'objectif est d'alimenter une installation autonome en énergie par un système hybride. Le profil de consommation électrique journalière est celui d'une pompe à chaleur. Il faut remarquer que la charge quotidienne varie au cours de la journée. La sollicitation électrique de la PAC oscille entre une valeur maximale de 1200W et une valeur minimale de 0W suivant le besoin thermique du local.

IV.4 - METHODE DE GESTION PAR LA LOGIQUE FLOUE

Plusieurs méthodes de gestion des systèmes énergétiques existent dans la littérature. Voici quelques-unes rencontrés dans lesdites littératures à savoir : la méthode Analytic Hierarchy Process (AHP), la méthode Demand-Side Management (DSM), la méthode réseaux de Petri (RdP), la méthode State-flow, la méthode floue et bien d'autres.

Toutes ces méthodes présentent chacune des avantages et inconvénients dont l'objectif n'est pas de mener une étude comparative de ces méthodes énumérées.

Aussi, on peut dire que la méthode AHP utilisée pour gérer les biens et services, permet d'exprimer des préférences de choix parmi plusieurs critères possibles. Son principe est basé sur le paramétrage des critères et le classement des solutions. Cette méthode gère des commutations des différentes sources d'énergies renouvelables [132][134].

La méthode DSM assure la gestion de l'énergie sur demande. Son objectif est de réduire la consommation électrique par la programmation et la planification des demandes. Elle aménage des charges utilisatrices pour imposer des contraintes d'économies.

La méthode RdP est basée sur l'outil graphique de modélisation de systèmes complexes appelé réseau de Petri. Cet outil est utilisé pour la gestion des systèmes en de fonction leur état fini.

La méthode State-flow s'appuie sur l'outil graphique de Simulink, modélisant et simulant des machines à état fini, des systèmes qui réagissant à des événements. Outre, les interactions que l'outil permet, il assure la supervision et la génération des signaux de consignes.

La méthode floue prend en compte les règles de la logique floue qui est une branche de mathématique traitant de la théorie des ensembles classiques intégrant des situations intermédiaires autres que les situations 0 ou 1, vrai ou faux, etc. Cette logique a l'avantage de modéliser des phénomènes ou systèmes comme pense l'être humain. C'est une approche intelligente contrairement aux autres. Sa proximité au langage humain et sa flexibilité nous amènent à choisir cette méthode pour gérer nos sources d'énergies renouvelables pour desservir les charges de notre bâtiment, en l'occurrence la PAC.

IV.4.1 -Etat de l'art sur la gestion floue

De nombreuses études [122][123][124][125][126][127][128][129] ont porté sur la gestion floue de flux énergétiques dans les systèmes hybrides pour des diverses applications à savoir : domestique, pompage d'eau, agriculture, etc. Ces études font mention des différentes méthodes de gestion parmi lesquelles la méthode floue qui nous intéresse. En rappel, le choix de cette technique se justifie par son caractère flexible et ses règles basées sur la connaissance humaine. Bref, c'est une technique intelligente qui donne de très bons résultats comme en illustrent les études ci-dessous. De plus, notre particularité est d'appliquer cette méthode de gestion, à une charge dont les sollicitations énergétiques sont tributaires du confort thermique.

L'étude menée par [122] sur la gestion d'énergie d'une installation photovoltaïques de pompage d'eau d'irrigation goutte-à-goutte des tomates, intègre un contrôleur flou. Un algorithme de gestion flou a été développé pour décider de la commutation des relais qui connectent les composants de l'installation (panneaux, batteries et pompe). Des résultats satisfaisants ont été obtenus en assurant la demande d'irrigation et l'autonomie énergétique pendant toute la saison végétative en tenant compte des contraintes avec une utilisation réduite des batteries.

[123] a traité de la conception et du développement d'un contrôleur flou multi-entrées et sorties, pour gérer le flux énergétique d'un système multi-sources à énergies renouvelables d'un habitat

résidentiel, intégrant les modules photovoltaïques et une éolienne avec batteries de stockage. L'étude a mis en évidence une bonne intégration de taux des énergies renouvelable dans un habitat.

L'article [126] présente une stratégie de gestion d'énergie d'une habitation située dans une région côtière en Algérie, équipée d'un système photovoltaïques connecté au réseau. Un algorithme de gestion d'énergie basé sur la logique floue a permis d'économiser respectivement 26,49% et 25,54% d'énergie en été et en hiver.

Il ressort des résultats de l'étude [127] que le maintien quasi-constant de la tension des batteries doit avoir lieu à la fin de la phase de charge. Il était question dans cette étude d'optimisation de la gestion et du stockage d'énergie par approche floue d'une installation photovoltaïque. Outre la constance de la tension, l'algorithme a permis d'assurer une gestion optimisée, une durée de vie longue de batteries et une distribution disponible d'énergie.

Des algorithmes intelligents pour la gestion optimale d'énergie renouvelables appliqués à un système hybride multi-sources autonome pour le pompage d'eau sont présentés dans [129]. Le système étudié combine une éolienne avec modules photovoltaïques comme sources d'énergie, stockant l'énergie dans un banc de batteries. Trois algorithmes TOR, flou et génétique sont étudiés pour décider du raccordement du banc de batteries et les différentes sources au micro-réseau local. Ces trois techniques ont été comparés à l'aide d'un système de pompage d'eau simulé, montrant qu'elles optimisent efficacement l'utilisation de l'énergie renouvelable pour répondre à la demande de charge et pour assurer un fonctionnement sûr du banc des batteries.

Il résulte de cet état de l'art que l'utilisation de la logique floue dans la gestion et la supervision permet de maintenir l'état de charge de batteries dans une bonne plage de fonctionnement. Par conséquent, cette méthode améliore la durée de vie des batteries. De plus, elle améliore et optimise le fonctionnement et la gestion du système.

IV.4.2 -Introduction au formalisme flou

La logique floue est une branche de mathématique résultant de la théorie des ensembles classiques. Elle a été formalisée, grâce aux travaux de Lofti Zadeh en 1965, professeur d'électronique à l'université de Berkeley (USA), par une théorie mathématique des ensembles flous qui présente une extension de la théorie des ensembles classiques aux ensembles définis de façon imprécise. Ce formalisme n'a pas eu un succès immédiat mais connu un développement en Europe et au Japon [130].

L'idée de base de la logique floue est de modéliser des phénomènes ou des procédés comme le fait l'être humain, c'est-à-dire en algorithmes, composés essentiellement par des règles de type (Si...alors...), le raisonnement humain. En effet, l'homme a tendance à tirer des conclusions sur certaines situations à partir des données imprécises ou incomplètes et à agir en fonction d'un ensemble de règles implicites au raisonnement. A titre d'exemple, une personne qui est prête à prendre une douche peut savoir si l'eau a une température appropriée à cet effet au moment d'ouvrir le robinet. Si cette personne trouve que l'eau est très froide, sa réaction naturelle sera de bouger le robinet pour réguler la température. Si l'eau devient très chaude, alors elle devra bouger le robinet dans le sens inverse et ainsi de suite jusqu'à trouver la température de l'eau qui lui convient. La personne en question ne connaît pas forcément la température de l'eau, ses capteurs corporels lui donnent une information que son cerveau transforme en une sensation de confort et c'est à partir de cela qu'elle prend des décisions [131] [135].

Ainsi, un algorithme qui peut traduire le raisonnement de la personne de l'exemple ci-dessus pourrait être le suivant :

Si l'eau est froide alors ouvrir le robinet vers le chaud. Si l'eau est très chaude ouvrir le robinet vers le froid... Si l'eau a une température appropriée alors laisser le robinet fixe et prend la douche.

Si l'idée de mettre en algorithme le raisonnement humain est considéré dans le cas de phénomènes ou procédés plus complexes qui font intervenir plusieurs machines et opérateurs, toute la connaissance empirique des experts peut être exploitée en vue d'une meilleure maîtrise de ces procédés complexes. Pour cela, il faut suivre la méthodologie de la logique floue qui divise un système en trois éléments principaux à savoir, un module de fuzzification, un module de déduction des règles, nommé aussi base de connaissance et un module de défuzzification.

- La fuzzification est l'étape qui permet de transformer la grandeur mesurée sur un processus en un ensemble flou ;
- Le mécanisme de décision permet de calculer les ensembles flous associés à la commande ;
- La défuzzification est l'étape qui permet de transformer l'ensemble flou, obtenu par le calcul précédent, en une grandeur de commande appliquée au processus.

Avant de s'intéresser aux éléments principaux, un bref aperçu sur les éléments de base de la logique floue nous situe mieux sur ce formalisme.

IV.4.2.1 - Éléments de base du formalisme

Les éléments de base de la logique floue sont les variables linguistiques, les ensembles flous et les fonctions d'appartenance.

Contrairement aux variables binaires caractérisés par deux états « vrai » ou « faux », les variables linguistiques floues présentent toute une graduation entre la valeur « vrai » et la valeur « faux ». Elles n'ont pas de valeurs numériques mais symboliques en termes de mots ou d'expression du langage naturel. Elles décrivent une certaine situation, un phénomène ou un procédé, en général par des qualificatifs tels que :

- Peu, Beaucoup, Enormément ;
- Rarement, Fréquemment, Souvent ;
- Froid, Tiède, Chaud ;
- Petit, Moyen, Grand ;
- Etc.

Si l'on désire par exemple, classer un groupe d'individus par leur taille en définissant la catégorie des petits par une taille en dessous de 160cm, la catégorie des moyens par une taille comprise entre 160cm et 180cm et la catégorie des grands pour une taille supérieure à 180cm, alors les trois variables floues définies sont : « petit », « moyen » et « grand ».

Dans la théorie des ensembles classiques, il n'y a que deux situations acceptables pour un élément, appartenir ou ne pas appartenir à un sous-ensemble. Le mérite de Zadeh a été de tenter de sortir de cette logique booléenne en introduisant la notion d'appartenance pondérée : permettre des graduations dans l'appartenance d'un élément à un sous-ensemble, c'est-à-dire d'autoriser un élément à appartenir plus ou moins fortement à ce sous-ensemble.

Soit X un ensemble de référence et soit x un élément quelconque de X. Un sous-ensemble flou A de X est défini comme l'ensemble de couples :

$$A = \{ (x, \mu_A(x)), x \in X \}, \text{ avec } \mu_A : X \rightarrow [0, 1] \quad (8)$$

Ainsi un sous-ensemble flou A de X est caractérisé par une fonction d'appartenance $\mu_A(x)$ qui associe, à chaque point x de X un réel dans l'intervalle [0,1] ; $\mu_A(x)$ représente un degré d'appartenance de x à A. On observe les trois cas possibles suivants :

$$\begin{cases} \mu_A(x) = 0 \\ 0 < \mu_A(x) < 1 \\ \mu_A(x) = 1 \end{cases} \quad (9)$$

Où, $\mu_A(x)=0$ si x n'appartient pas à A ; $0 < \mu_A(x) < 1$ si x appartient partiellement à A ; $\mu_A(x)=1$ si x appartient entièrement à A. La fonction d'appartenance $\mu_A(x)$ inclut ou exclut donc à ses extrémités tout élément x de sous-ensemble A. Entre les valeurs extrêmes, le degré d'appartenance varie à proportion de la proximité de l'ensemble.

La fonction d'appartenance permet d'établir une relation entre le degré de vérité de la variable et la grandeur d'entrée correspondante. Il existe différentes formes de fonction d'appartenance dont on peut signaler quelques-unes : triangulaires et trapézoïdales, les plus utilisées.

IV.4.2.2 - Fuzzification

C'est la première opération qui entre en compte dans la structure d'un système. Elle vise à transformer des variables physiques réelles sur des ensembles flous caractérisant les valeurs linguistiques prises par ces variables. Elle consiste à donner un degré d'appartenance à une valeur réelle d'entrée en fonction des ensembles flous. Etape très importante dans le processus de mise en œuvre d'un système flou, la fuzzification des variables est caractérisée par des étapes déterminées par les experts ou personnes qualifiées travaillant sur un processus et recourant souvent à leurs connaissances. De plus, la performance d'un système flou est influencée par la fuzzification. Les étapes de fuzzification se résument à l'établissement de variables linguistiques, à l'établissement des quantificateurs flous (nombre de valeurs linguistiques) et l'attribution une signification à chaque quantificateur flou : fonction d'appartenance.

Le choix de la forme des fonctions d'appartenance (triangulaires, trapézoïdales, exponentielles, gaussiennes, sigmoïdes...) est arbitraire. Les formes triangulaires facilitent la programmation ce qui explique qu'elles soient les plus fréquemment utilisées. Quant 'au nombre de fonctions d'appartenance, il est généralement impair car elles se répartissent autour de zéro.

IV.4.2.3 - Inférence floue

C'est le processus d'élaboration de relations qui existent entre les variables d'entrées (exprimées comme variables linguistiques) et la variable de sortie (exprimée également comme variable linguistique). Ces relations fournissent ensuite la base des règles à partir de laquelle les décisions peuvent être prises. Le processus d'inférence implique les fonctions d'appartenance, les opérateurs de logique floue (ET, OU et NON) et les règles de type (Si...alors...).

La première étape consiste à créer des règles dont la syntaxe est très stricte bien que les termes utilisés paraissent naturels. Rappelons que la création des règles de contrôle linguistique fait souvent recours aux connaissances d'experts ou personnes qualifiées travaillant sur le

processus. Le réglage découle donc à priori des connaissances du fonctionnement du système. La représentation linguistique des règles est la suivante :

Si antécédent 1 ET antécédent 2 ALORS consequent1.

Où, Antécédent : variable d'entrée

Conséquence : variable de sortie

Et : opérateur de base (parfois pour certains applications opérateur est OU)

IV.4.2.4 - Défuzzification

La défuzzification consiste à transformer l'ensemble flou résultant de la désagrégation des règles en une grandeur de commande précise. Il s'agit en d'autres termes de convertir de l'information floue en une grandeur physique. Plusieurs façons de faire peuvent être envisagées mais, en pratique, on utilise surtout les deux méthodes suivantes : calcul du centre de gravité et calcul du maximum.

IV.4.3 - Développement d'un contrôleur

Faut-il le rappeler, un système hybride est la combinaison de plusieurs sources d'énergies renouvelables et/ou conventionnelles constituant une solution d'alimentation des localités non desservies par le réseau électrique. C'est une solution dont la gestion demeure un défi majeur à relever au regard de la diversité des sources. En effet, la puissance issue des sources renouvelables étant intermittente et dépendante de plusieurs conditions non contrôlables, un système de gestion efficace est nécessaire pour prendre des décisions pour une meilleure utilisation d'énergie. L'objectif principal de la stratégie de gestion d'énergie est de répondre aux sollicitations de charges de manière efficace et optimale à tout moment. Etant très vaste et assez étoffée, la littérature scientifique fait mention de plusieurs méthodes de gestion d'énergie selon différentes configurations des systèmes multi-sources. Une revue de cette littérature ci-dessus nous a édifié sur quelques méthodes. La méthode basée sur la logique floue est retenue.

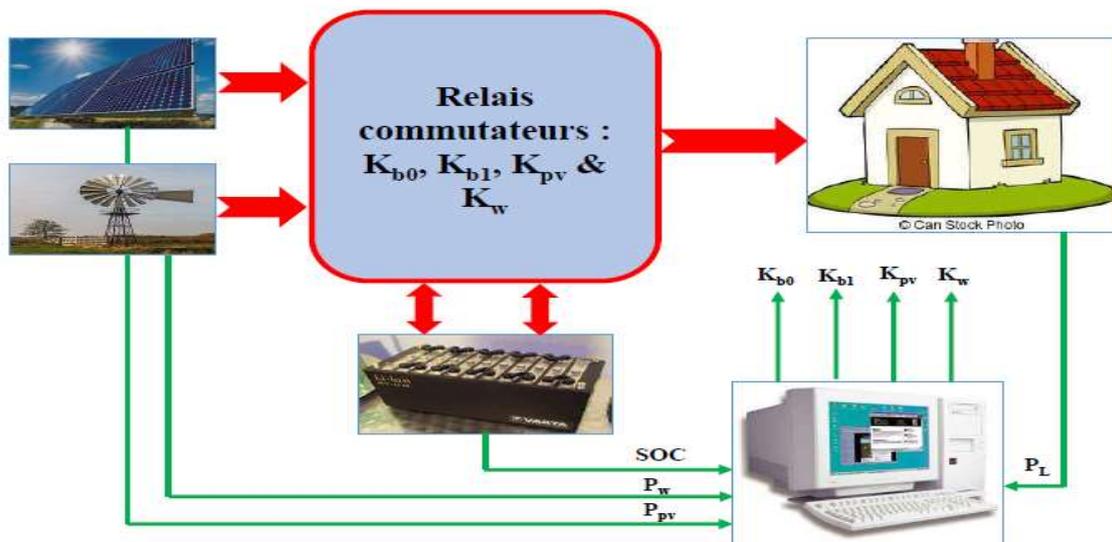


Figure IV-2: Synoptique de la structure de la supervision et de gestion du système

IV.4.3.1 - Stratégie de gestion

La stratégie de gestion du système hybride est de satisfaire la demande énergétique des charges dans de conditions météorologiques variables et de gérer le flux de puissance tout en assurant un fonctionnement efficace du système, et un maintien de tension de bus DC constante. Cette stratégie s'appuie sur l'utilisation des puissances générées et stockées dans les batteries pour répondre à la demande de charge.

Pour une meilleure fonctionnalité des systèmes de productions et de stockage, il a été conçu un système de supervision et de gestion basé sur la logique floue. Un contrôleur intelligent flou à multi-entrées et sorties est développé dans l'environnement du logiciel Matlab/Simulink. Il comprend quatre entrées et quatre sorties fournissant des signaux aux commutateurs électroniques à la charge et aux batteries de stockage.

Le contrôleur est configuré pour établir des règles telles que déterminées par tous les modes possibles de fonctionnement du système avec des contraintes initialement fixées au système. L'énergie photovoltaïque est la source prioritaire à l'alimentation de charge et que lorsque l'énergie photovoltaïque est en baisse, les batteries seront sollicitées pour alimenter les charges. Les différents états (ON/OFF) des commutateurs définissent huit modes de fonctionnement présentés dans le Tableau.IV-1, et génèrent un ensemble des règles pris en compte par le contrôleur flou.

Le bilan global des puissances en prenant compte de ces états de fonctionnement et en négligeant les différentes pertes de puissances, peut s'écrire :

$$P_L(t) + P_{Bat}(t) \times K_{Bati} = P_{PV}(t) \times K_{PV} + P_w(t) \times K_w \quad (10)$$

Où, P_L , P_{PV} , P_w et P_{Bat} sont respectivement les puissances de charges, du générateur photovoltaïque, du générateur éolien et des batteries.

- $P_{Bat} > 0$: Puissance des batteries en charge ;
- $P_{Bat} < 0$: Puissance des batteries en décharge ;
- K_{PV} , signal de commande du commutateur du générateur photovoltaïque ;
- K_{Bati} est le signal de commutateur des batteries. Il est égal à $K_{Bati} = K_{b0}$ pour la charge et $K_{Bati} = K_{b1}$ pour la décharge des batteries.

MODE 0	La charge est déconnectée. Aucune source ne fournit de l'énergie
MODE 1	L'alimentation entière des charges est réalisée par les générateurs photovoltaïques. Le générateur éolien est à l'arrêt car l'énergie photovoltaïque seule suffit ou le potentiel ne permet pas la production. Les batteries sont déconnectées car elles sont chargées. Ce mode est fréquent par jour ensoleillé.
MODE 2	Dans ce cas, l'énergie éolienne est la seule source fournissant l'énergie à toutes les charges, ce qui est observé en hiver ou pendant la nuit avec une bonne vitesse de vent. La production du photovoltaïque est nulle.
MODE 3	Toutes sources renouvelables ne sont pas disponibles, seules les batteries sont utilisées pour répondre aux sollicitations énergétiques des charges.
MODE 4	Les batteries et le générateur éolien assurent la production de l'énergie. La production photovoltaïque est nulle.
MODE 5	Dans ce mode, ce sont les batteries et le générateur photovoltaïque qui alimentent les charges. Le générateur éolien est à l'arrêt.
MODE 6	L'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne sont les principales sources utilisées. Ainsi ces deux sources fournissent simultanément de l'énergie pour alimenter les charges. L'excédent est utilisé pour la charge des batteries de stockage.
MODE 7	Le photovoltaïque, l'éolien et les batteries de stockage sont mis à contribution pour alimenter les charges via le convertisseur DC/DC pour les systèmes éolien et solaire au bus DC et via DC/AC aux charges AC.

Tableau IV-1: Différents modes de fonctionnement du système

IV.4.3.2 - Algorithme flou de gestion

Les puissances produites par les sources renouvelables respectivement photovoltaïque P_{pv} et éolienne P_w , la puissance consommée par les charges P_L et l'état de charge des batteries SOC constituent les quatre variables d'entrée de notre algorithme flou. Son implémentation repose sur quatre éléments principaux : la base de connaissance, la fuzzification, les règles d'inférences et la défuzzification.

Ces variables d'entrée sont subdivisées en ensembles flous selon leur ordre de grandeur résumée dans le Tableau IV-2 ci-dessous.

SOC (%)	Bas	Moyen	Haut
	0 – 30	30 – 90	90 – 100
P_{pv} (W)	Faible		Fort
	0 - 300	300 – 1400	
P_w (W)	Faible		Fort
	0 – 300	300 – 1400	
P_L (W)	Petit		Grand
	0 – 600	600 – 6500	

Tableau IV-2: Paramètres d'entrées du contrôleur

IV.4.3.2.1 - Base de connaissance

La base de connaissance est générée sur la base de l'analyse des spécifications :

- Etat de charge des batteries SOC

Il est composé de trois ensembles flous qui couvrent l'intervalle $S = [0, SOC_{max}]$ à des niveaux de productions Bas, Moyen et Haut, respectivement et vérifient :

$$\forall s \in S, \mu_{sB}(s) + \mu_{sM}(s) + \mu_{sH}(s) = 1 \quad (11)$$

Où, $\mu_{sB}(s)$, $\mu_{sM}(s)$ et $\mu_{sH}(s)$ sont respectivement les fonctions d'appartenance Bas, Moyen et Haut du SOC s .

- Puissance photovoltaïque P_{pv}

La puissance photovoltaïque générée est périodiquement mesurée et partitionnée en deux ensembles flous qui couvrent respectivement l'intervalle $X = [0, P_{pvmax}]$ aux niveaux de génération Faible et Fort.

$$\forall x \in X, \mu_{xFa}(x) + \mu_{xFo}(x) = 1 \quad (12)$$

Où, $\mu_{xFa}(x)$ et $\mu_{xFo}(x)$ sont respectivement les fonctions d'appartenance Faible et Fort du P_{pv} .

- Puissance éolienne P_w

La puissance éolienne générée tout comme la puissance photovoltaïque est subdivisée en deux ensembles flous qui couvrent respectivement l'intervalle $Y = [0, P_{wmax}]$ aux niveaux de génération Faible et Fort.

$$\forall y \in Y, \mu_{yFa}(y) + \mu_{yFo}(y) = 1 \quad (13)$$

Où, $\mu_{yFa}(y)$ et $\mu_{yFo}(y)$ sont respectivement les fonctions d'appartenance Faible et Fort du P_w .

- Puissance de charges P_L

La puissance des charges est partitionnée en deux ensembles flous qui couvrent respectivement l'intervalle $Z = [0, P_{Lmax}]$ aux niveaux de génération Petit et Grand.

$$\forall z \in Z, \mu_{zP}(z) + \mu_{zG}(z) = 1 \quad (14)$$

Où, $\mu_{zP}(z)$ et $\mu_{zG}(z)$ sont respectivement les fonctions d'appartenance Petit et Grand du P_L .

- Relais

Pour décider de la commutation des relais K_{b0} , K_{b1} , K_{pv} et K_w en fonction des variables floues s et x , deux ensembles flous sont prévus $O = (On, Off)$. Ils couvrent le domaine $O = [0, 1]$ et vérifient quel que soit l'élément o appartenant à l'ensemble O :

$$\begin{aligned}
\mu_{\text{off } K_{b0}}(o) + \mu_{\text{on } K_{b0}}(o) &= 1 \\
\mu_{\text{off } K_{b1}}(o) + \mu_{\text{on } K_{b1}}(o) &= 1 \\
\mu_{\text{off } K_{pv}}(o) + \mu_{\text{on } K_{pv}}(o) &= 1 \\
\mu_{\text{off } K_w}(o) + \mu_{\text{on } K_w}(o) &= 1
\end{aligned} \tag{15}$$

Où, les commandes de commutations données aux relais sont fournies par les fonctions d'appartenance correspondant respectivement à K_{b0} , K_{b1} , K_{pv} et K_w , évaluées en o .
Sur la base de cette structure, les règles floues pour le changement de relais sont classées selon quatre intervalles de SOC.

IV.4.3.2.2 - Fuzzification

- Etat de charge des batterie SOC

Les fonctions d'appartenance de $\mu_{sB}(s_{ok})$, $\mu_{sM}(s_{ok})$ et $\mu_{sH}(s_{ok})$ correspondant à SOC sont exprimées sont :

$$\mu_{sB}(s_{ok}) = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 < s < s_{sBmin} \\ \frac{s_{ok} - s}{\epsilon_{s_{ok}}} & \text{si } s_{sBmin} < s < s_{sBmax} \\ 0 & \text{autrement} \end{cases} \tag{16}$$

$$\mu_{sM}(s_{ok}) = \begin{cases} \frac{s - s_{ok}}{\epsilon_{s_{ok}}} & \text{si } s_{sMmin1} < s < s_{sMmin2} \\ 1 & \text{si } s_{sMmin2} < s < s_{sMmax1} \\ \frac{s_{ok} - s}{\epsilon_{s_{ok}}} & \text{si } s_{sMmax1} < s < s_{sMmax2} \\ 0 & \text{autrement} \end{cases} \tag{17}$$

$$\mu_{sH}(s_{ok}) = \begin{cases} 1 & \text{si } s > s_{sHmax} \\ \frac{s - s_{ok}}{\epsilon_{s_{ok}}} & \text{si } s_{sHmin} < s < s_{sHmax} \\ 0 & \text{autrement} \end{cases} \tag{18}$$

- Puissance photovoltaïque P_{pv}

Les fonctions d'appartenance $\mu_{xFa}(x)$ et $\mu_{xFo}(x)$ correspondant à P_{pv} sont exprimées comme suit :

$$\mu_{x_{Fa}}(x_{ol}) = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 < x < x_{xFamin} \\ \frac{x_{ol} - x}{\varepsilon_{ol}} & \text{si } x_{xFamin} < x < x_{xFamax} \\ 0 & \text{autrement} \end{cases} \quad (19)$$

$$\mu_{x_{Fo}}(x_{ol}) = \begin{cases} 1 & \text{si } x > x_{xFomax} \\ \frac{x - x_{ol}}{\varepsilon_{ol}} & \text{si } x_{xFomin} < x < x_{xFomax} \\ 0 & \text{autrement} \end{cases} \quad (20)$$

▪ Puissance éolienne P_w

Les fonctions d'appartenance $\mu_{y_{Fa}}(y)$ et $\mu_{y_{Fo}}(y)$ correspondant à P_w sont exprimées comme suit :

$$\mu_{y_{Fa}}(y_{om}) = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 < y < y_{yFamin} \\ \frac{y_{om} - y}{\varepsilon_{om}} & \text{si } y_{yFamin} < y < y_{yFamax} \\ 0 & \text{autrement} \end{cases} \quad (21)$$

$$\mu_{y_{Fo}}(y_{om}) = \begin{cases} 1 & \text{si } y > y_{yFomax} \\ \frac{y - y_{om}}{\varepsilon_{om}} & \text{si } y_{yFomin} < y < y_{yFomax} \\ 0 & \text{autrement} \end{cases} \quad (22)$$

▪ Puissance des charges P_L

Les fonctions d'appartenance $\mu_{zP}(z)$ et $\mu_{zG}(z)$ correspondant à P_L sont exprimées comme suit :

$$\mu_{zP}(z_{on}) = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 < z < z_{zPmin} \\ \frac{z_{on} - z}{\varepsilon_{on}} & \text{si } z_{zPmin} < z < z_{zPmax} \\ 0 & \text{autrement} \end{cases} \quad (23)$$

$$\mu_{zG}(z_{on}) = \begin{cases} 1 & \text{si } z > z_{zGmax} \\ \frac{z - z_{on}}{\varepsilon_{on}} & \text{si } z_{zGmin} < z < z_{zGmax} \\ 0 & \text{autrement} \end{cases} \quad (24)$$

▪ Commande de commutation des relais

Les fonctions d'appartenance des relais $\mu_{offK_{b0}, K_{b1}, K_{pv}, K_w}(0oz)$ et $\mu_{onK_{b0}, K_{b1}, K_{pv}, K_w}(0oz)$ correspondants aux relais K_{b0} , K_{b1} , K_{pv} et K_w sont exprimées comme suit :

$$\mu_{offK_{b0}, K_{b1}, K_{pv}, K_w}(o_{oz}) = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 < o < o_{offmin} \\ \frac{o_{oz} - o}{\varepsilon_{o_{oz}}} & \text{si } o_{offmin} < o < o_{offmin} \\ 0 & \text{autrement} \end{cases} \quad (25)$$

$$\mu_{onK_{b0}, K_{b1}, K_{pv}, K_w}(o_{oz}) = \begin{cases} 1 & \text{si } o > o_{onmax} \\ \frac{o - o_{oz}}{\varepsilon_{o_{oz}}} & \text{si } o_{onmin} < o < o_{onmax} \\ 0 & \text{autrement} \end{cases} \quad (26)$$

IV.4.3.2.3 - Règles d'Inférence

Sur la base des entrées fluidifiées, le jeu de règles sert à déterminer le contrôle de commutation des relais, qui est déduit des modes expliqués précédemment. Les signaux de commande de relais sont donnés ci-après :

$$k_{b0,b1,PV,W} = \frac{\int_0^1 k_{on} \mu_{b0on} dk_{on}}{\int_0^1 \mu_{b0on} dk_{on}} \quad (27)$$

IV.4.3.2.4 - Défuzzification

Le contrôle des relais est déduit par :

$$\begin{aligned} \text{Si } k_{b0,b1,PV,W} < 0,5 & \text{ alors } K_{b0,b1,PV,W} \text{ est Off} \\ \text{Si } k_{b0,b1,PV,W} > 0,5 & \text{ alors } K_{b0,b1,PV,W} \text{ est On} \end{aligned} \quad (28)$$

Le principe de règle d'inférence du contrôleur flou repose sur l'application à l'entrée du contrôleur quatre variables physiques qui seront converties en variables linguistiques selon

leurs subdivisions respectives. La priorité d'utilisation des sources est donnée au photovoltaïque. Si l'irradiation est forte générant une forte puissance photovoltaïque et que la puissance éolienne l'est aussi, on utilise prioritairement le photovoltaïque. En cas d'irradiation solaire faible, la batterie est sollicitée si son SOC le permet, sinon le générateur éolien prend le relai si cela est possible c'est-à-dire s'il y a du vent pour produire de l'énergie éolienne. Donc, lorsque l'irradiation est forte, la PAC est alimentée uniquement par la puissance photovoltaïque. En revanche, quand elle s'affaiblit et que le SOC de batteries est supérieur à 30%, l'alimentation de la PAC n'est assurée que par les batteries et/ou un appoint énergétique émanant de l'éolienne si sa puissance est différente de zéro. Lorsque le SOC de batteries est inférieur à 30%, elles ne peuvent être sollicitées et sont automatiquement mode charge via l'une ou les deux autres sources disponibles. Par conséquent, la PAC est alimentée par l'une ou à la fois deux autres sources, selon leur disponibilité. Toutes les sources ne sont pas utilisées forcément en même temps. Cela dépend de la sollicitation de la charge, en l'occurrence la PAC et des sources elles-mêmes.

De ce qui précède, il résulte de règles d'inférence résumées dans le Tableau.IV-3 ci-dessous montrant la base de règles du contrôleur flou où les entrées de la matrice sont des ensembles flous de SOC, P_{pv} , P_w et P_L . La sortie de cette table est l'état des quatre commutateurs K_{b0} , K_{b1} , K_{pv} et K_w .

Finalement, l'algorithme de supervision et de gestion floue des sources d'énergies hybrides renouvelables se résume à l'organigramme ci-dessous (Figure.IV-3).

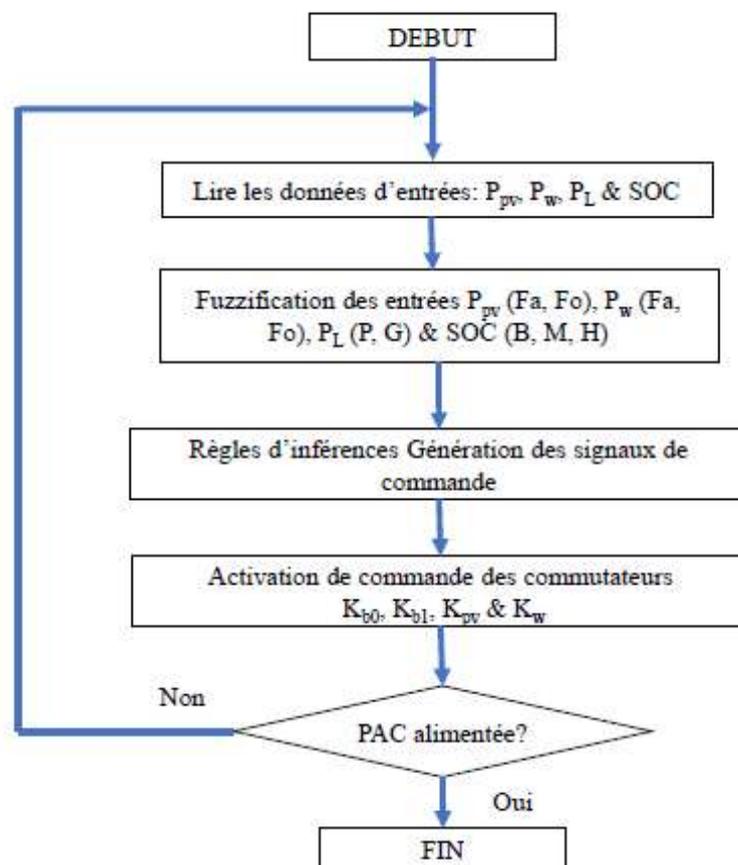


Figure IV-3: Organigramme d'algorithme flou de gestion

SOC Bas		P _{pv} Faible	P _{pv} Faible	P _{pv} Fort	P _{pv} Fort
		P _w Faible	P _w Fort	P _w Faible	P _w Fort
P _L	Petit				
Grand	Petit				

-(a)-

SOC Moyen		P _{pv} Faible	P _{pv} Faible	P _{pv} Fort	P _{pv} Fort
		P _w Faible	P _w Fort	P _w Faible	P _w Fort
P _L	Petit				
Grand	Petit				

-(b)-

SOC Haut		P _{pv} Faible	P _{pv} Faible	P _{pv} Fort	P _{pv} Fort
		P _w Faible	P _w Fort	P _w Faible	P _w Fort
P _L	Petit				
Grand	Petit				

-(c)-

K _{b0} est ouvert	K _{b0} est fermé	K _{b1} est ouvert	K _{b1} est fermé	K _{pv} est ouvert	K _{pv} est fermé	K _w est ouvert	K _w est fermé

-(d)-

Tableau IV-3: Base de règles du contrôleur pour les SOC Bas (a), SOC Moyen (b), SOC Haut (c) et Légende des commandes (d)

IV.5 - APPLICATION DU CONTROLEUR A LA PAC

L'algorithme est appliqué à la pompe à chaleur dans différentes conditions de chauffage. Le premier cas est celui du chauffage lorsque le flux solaire est important ($600\text{W}/\text{m}^2$), le ciel est bien ensoleillé. Le second cas d'application correspond aux conditions où le ciel est couvert, le flux solaire est faible (par exemple de $20\text{W}/\text{m}^2$).

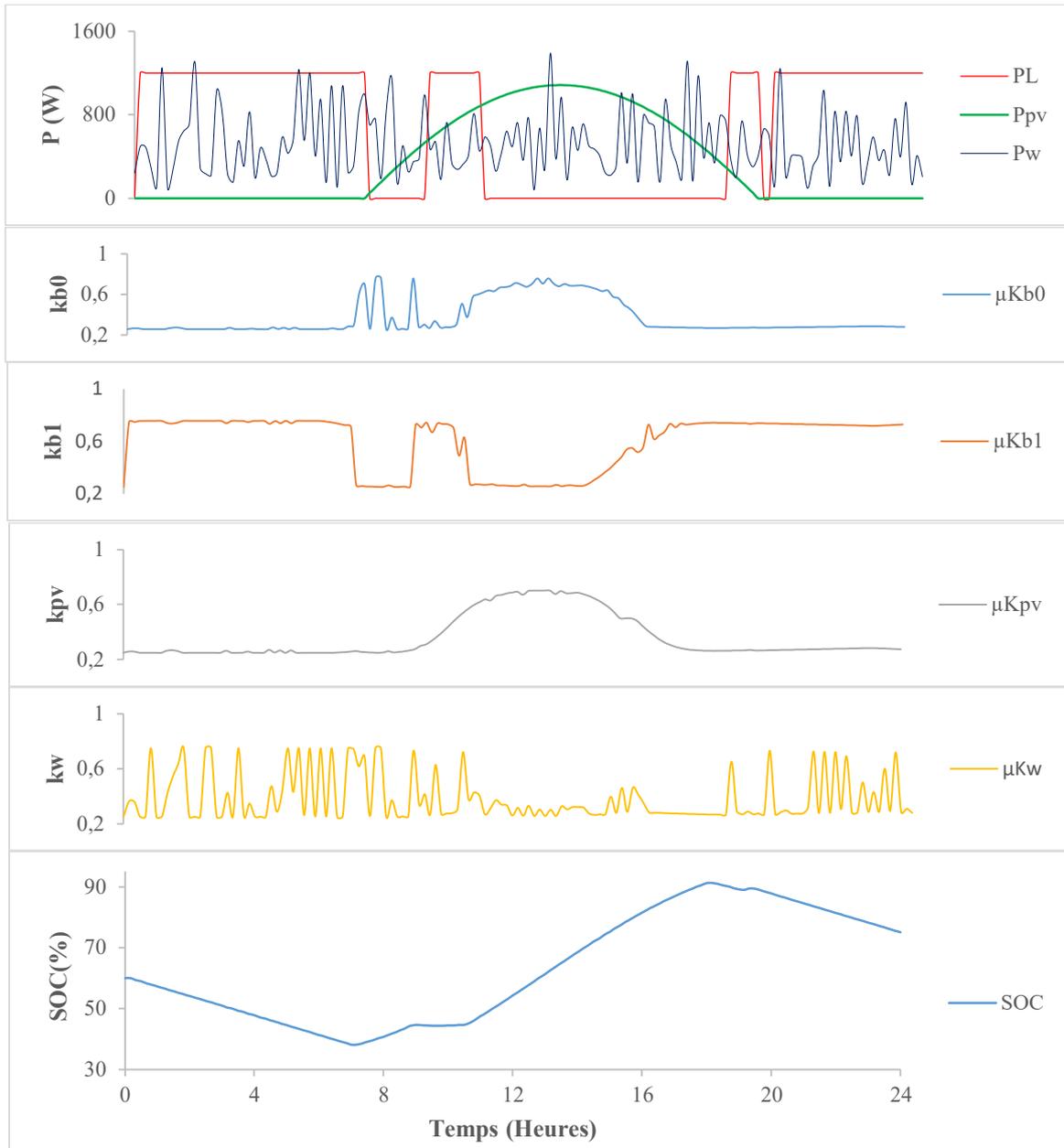


Figure IV-4: Réponse d'algorithme pour le cas d'un ciel ensoleillé

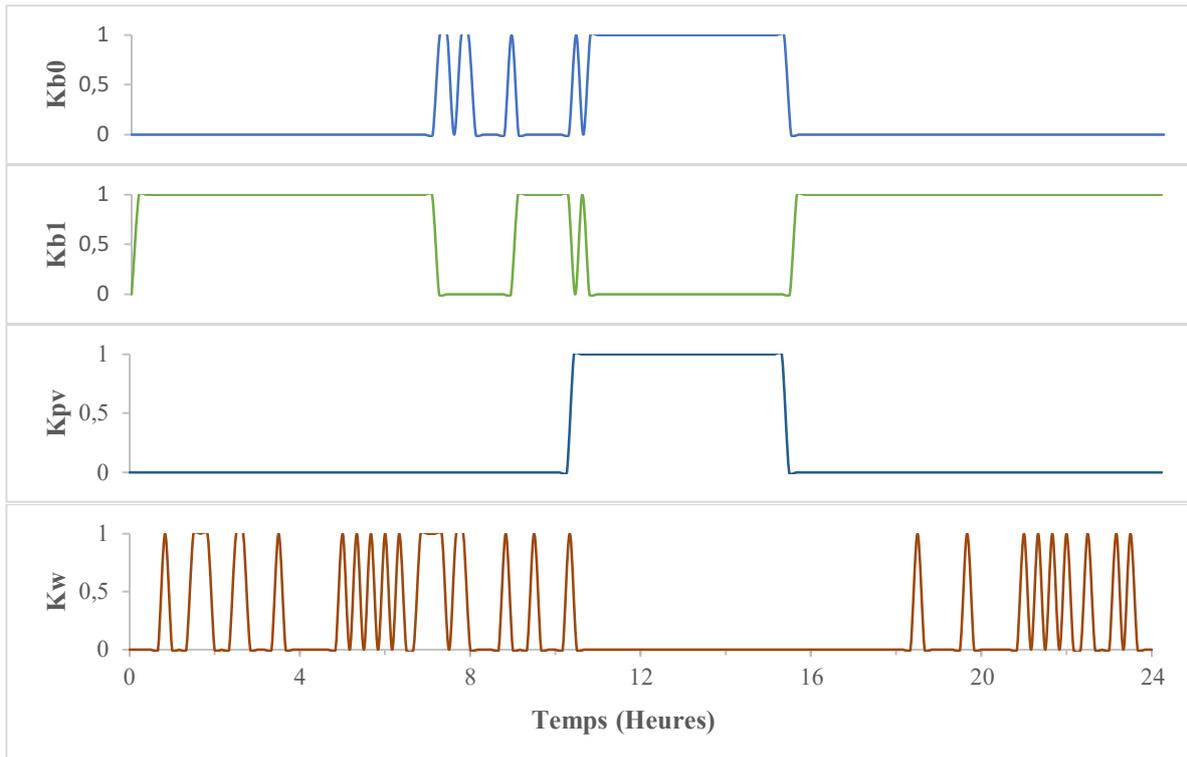


Figure IV-5: Chronogramme de commande des relais résultant des fonctions d'appartenance dans le cas d'un ciel ensoleillé

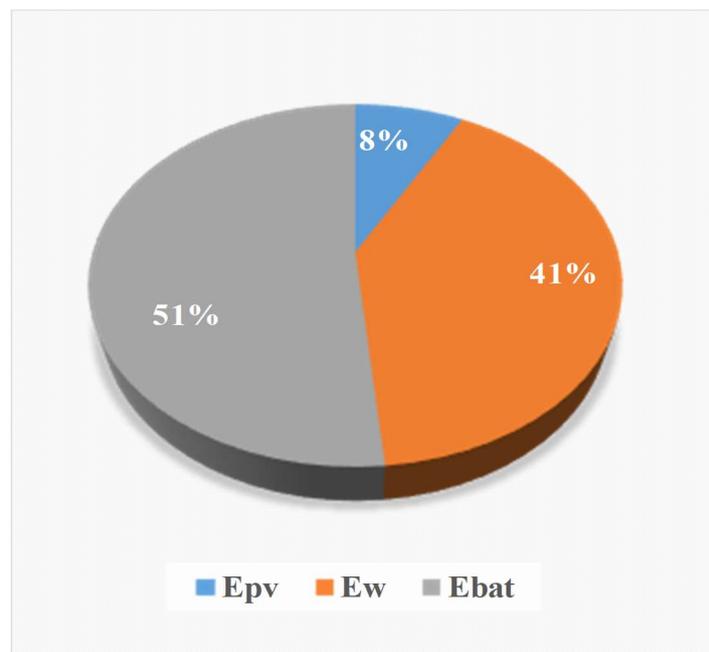


Figure IV-6: Consommation énergétique cas d'un ciel ensoleillé

Avec :

- E_{pv} : Energie produite par le photovoltaïque ;
- E_w : Energie produite par l'éolienne ;
- E_{bat} : Energie produite par les batteries.

Précisons que ce sont des parts d'énergies produites par les différentes sources, consommées par la pompe à chaleur.

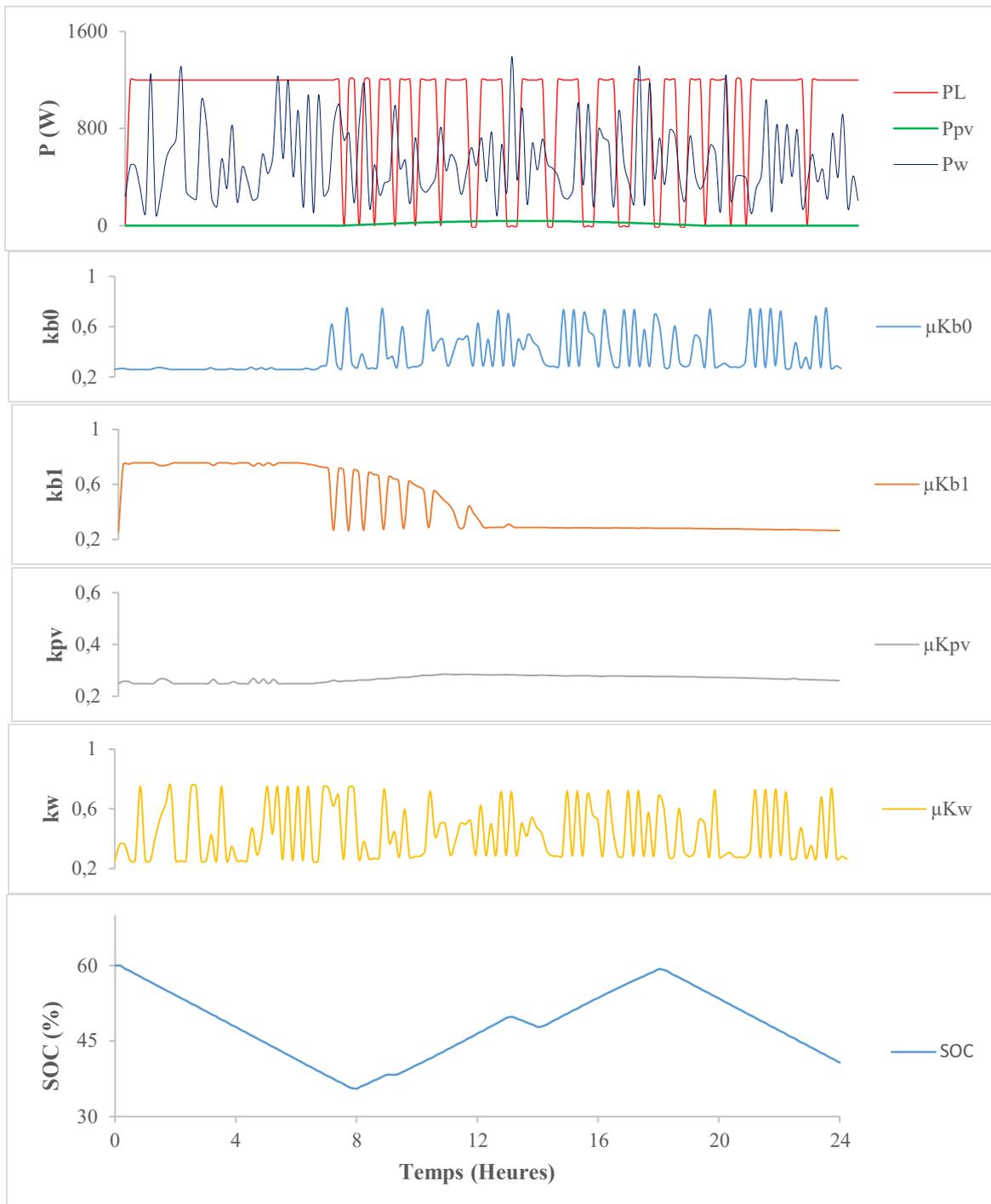


Figure IV-7: Réponse d'algorithme pour le cas d'un ciel couvert

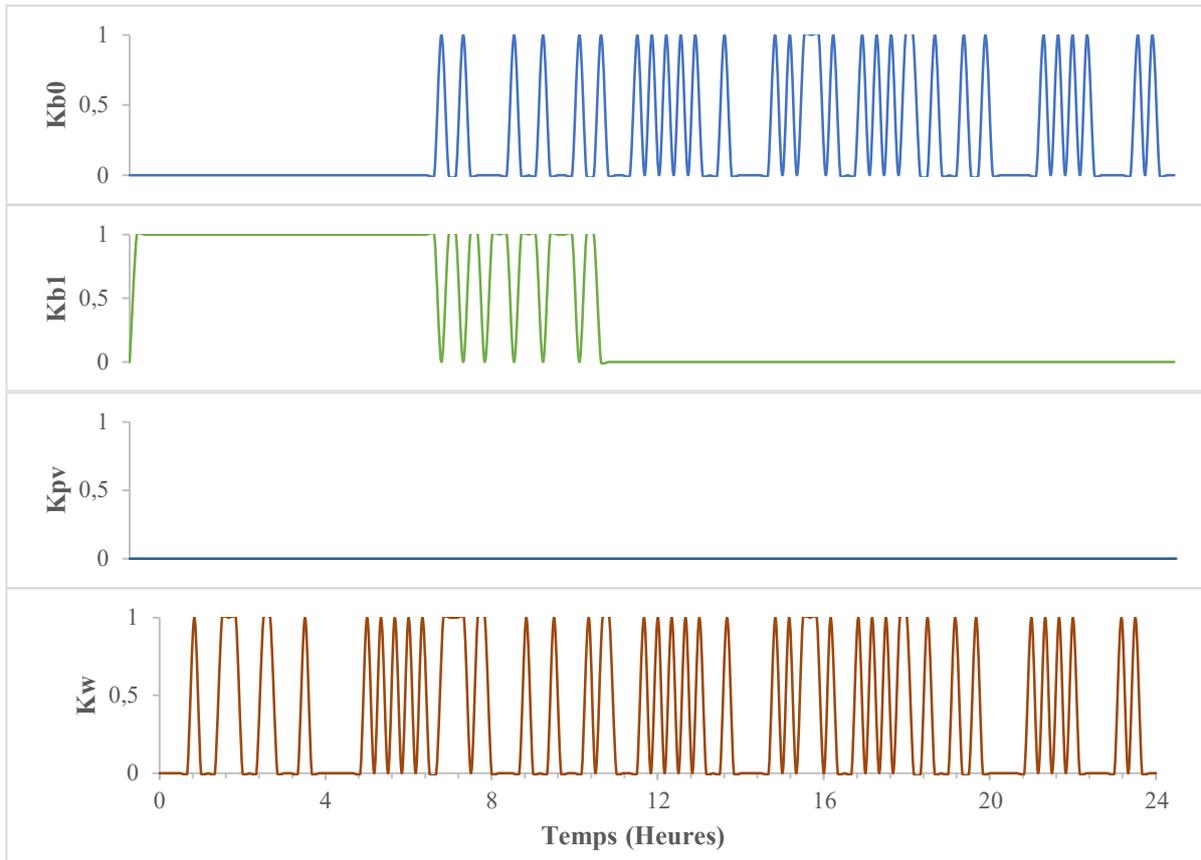


Figure IV-8: Chronogramme de commande des relais résultant des fonctions d'appartenance dans le cas d'un ciel couvert ensoleillé

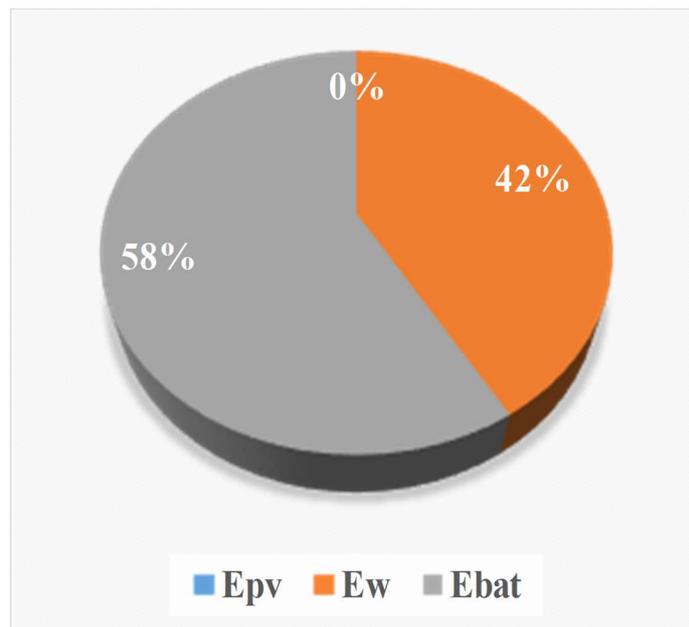


Figure IV-9: Consommation énergétique cas d'un ciel couvert

La Figure IV-4 traduit de manière graphique les résultats de simulation dans le cas où l'ensoleillement est important. Les fonctions d'appartenance qui en sont issues, présentent tous de profils différents variant entre 0 et 1. Ces fonctions sont fortement influencées par les variables d'entrée dépendant en grande partie des conditions climatiques (flux solaire et vent) et aussi des sollicitations de charge, la pompe à chaleur. Les batteries jouent le rôle d'appoint énergétique en cas d'insuffisance ou absence des sources renouvelables. Ces fonctions d'appartenance génèrent des signaux analogiques qui sont convertis en signaux carrés donnant des impulsions de commande des relais. Pour ce cas ensoleillement, les impulsions sont illustrées par la Figure IV-5. Au regard de la Figure IV-5, la source photovoltaïque ne fournit qu'en journée entre 10h et 15h, à la pompe à chaleur. Or, en ce moment la PAC est très sollicitée pour le chauffage. La majeure partie de la production photovoltaïque est utilisée pour la charge des batteries. Ces dernières sont beaucoup plus sollicitées entre 0 h à 7h, 16h à 24h et un peu moins dans la journée entre 9h20 à 11h00. L'éolienne, en revanche ne fournit pas pendant que le photovoltaïque produit. Donc, entre 10h50 à 18h40, l'éolienne est à l'arrêt car il n'y a aucune impulsion de commande de fourniture d'énergie. Le reste du temps, son rythme de fonctionnement est rythmé par des régimes de marche et d'arrêt consécutifs aux demandes. De ce système de supervision et commande, la consommation énergétique journalière de la PAC qui est de 17,20kWh, résulte des sources renouvelables et des batteries dont les pourcentages de chaque source est donnée sur la Figure IV.6. La moitié de la consommation de la PAC est fournie par les batteries. Pour réduire cette fourniture élevée des batteries, il faut remplacer l'éolienne par une autre de diamètre de rotor supérieur à 1,91m.

La Figure IV-7 illustre le cas d'ensoleillement faible. Le besoin de chauffage de chauffage est important, par conséquent, la PAC présente un profil de fonctionnement sur toute la journée avec des 17 arrêts de durée variant entre 10 à 30minutes. Les fonctions d'appartenances kb0, kb1 et kpV ont, au cours de leurs évolutions journalières, un profil constant et plat de valeur oscillant autour de 0,2. Ce qui s'explique par la faiblesse du flux solaire. Les impulsions de commande correspondant à ces fonctions d'appartenances sont représentées par la Figure IV-8. L'impulsion de commande pour la source photovoltaïque est égale à zéro (0). Cela signifie qu'en période de faible flux solaire, il n'y a pas de production photovoltaïque et que cette source n'est pas commandée. Les batteries fonctionnent sur une moitié de la journée de 0h à 11h, avec un fonctionnement perlé de 4arrêts entre 8h et 11h. De 11h à 24h, les batteries ne sont pas en mesure satisfaisante aux besoins énergétiques de la PAC. Seule, l'éolienne qui fonctionne dans cette tranche de temps marque des arrêts. Les batteries sont chargées uniquement par l'éolienne. En de temps pareil où il n'y a pas production du photovoltaïque, la pompe à chaleur est alimentée uniquement par l'éolienne et les batteries. La Figure IV.8 illustre bien les proportions de ces sources où l'éolienne fournie à 42%, les batteries à 58% et le photovoltaïque à 0%. La consommation journalière de la PAC est bien supérieure qu'au cas précédent, 24,21kWh. Une fois de plus, les batteries sont plus sollicitées. Donc, il faut réajuster la taille de l'éolienne.

IV.6 - TESTS EXPERIMENTAUX

Afin de valider notre algorithme, des tests expérimentaux ont été menés sur notre plateforme expérimentale du laboratoire CERTES. En rappel, l'algorithme de supervision et de gestion des sources d'énergies renouvelables est développé en faisant usage de la logique floue. Le manque de certain matériel (l'éolienne et autres) ne nous a pas permis de réaliser notre système tel que décrit ci-haut (Figure IV-1). C'est pourquoi, l'installation expérimentale illustrée par la Figure IV-10, comprend :

- Une source DC assimilée à la résultante de la somme de deux sources d'énergies renouvelables comme mentionnées dans notre étude, d'une puissance de 5kWc ;
- Une charge variable permettant de présenter différents profils de sollicitations énergétiques ;
- Le Dspace, un matériel qui sert d'implémentation de modèles et d'algorithmes de commande. Il est l'interface de communication avec l'armoire de commande à qui, les commandes provenant du Dspace lui sont transmis pour exécution. De plus, c'est à partir du Dspace que les données de sorties sont récupérées.
- Une armoire de commande contenant deux batteries, d'un convertisseur onduleur multifonctions de 5kW et des automates de commande en langage ladder. Le convertisseur assure les transferts énergétiques entre les panneaux photovoltaïques, les batteries, les charges et le réseau électrique. Il a une plage de tension d'entrée DC variant entre 120 et 500V pour une sortie AC de 230V-50Hz.
- Des capteurs de mesures de courants et de tension ;
- Enfin, un ordinateur faisant office d'Interface Homme-Machine (IHM) pour afficher les courbes, modifier ou corriger les commandes, etc.

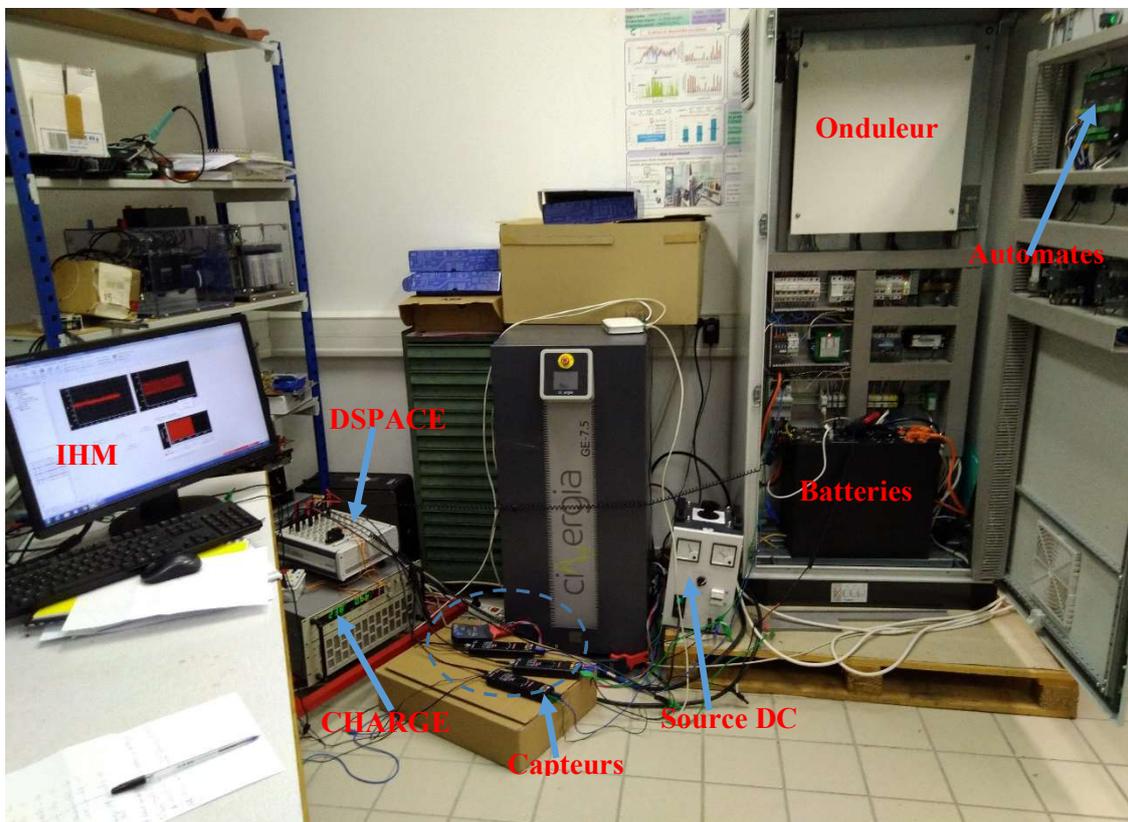


Figure IV-10: Plateforme expérimentale utilisée au CERTES

L'objectif est d'implémenter l'algorithme développé afin de voir comment réagit le système en fonction des différentes sollicitations.

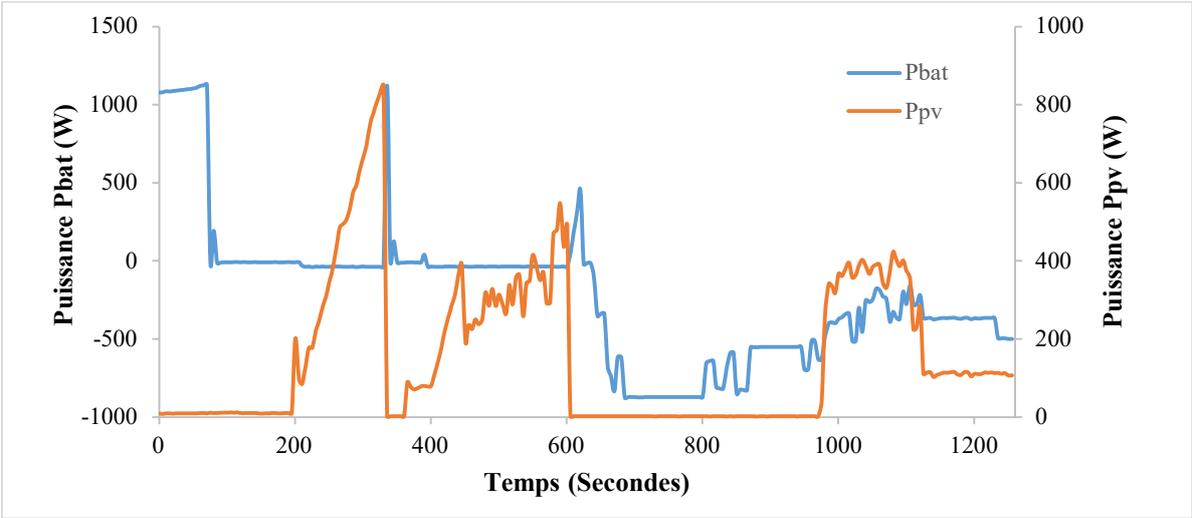


Figure IV-11: Courbes d'évolution temporelle des puissances des batteries et du PV

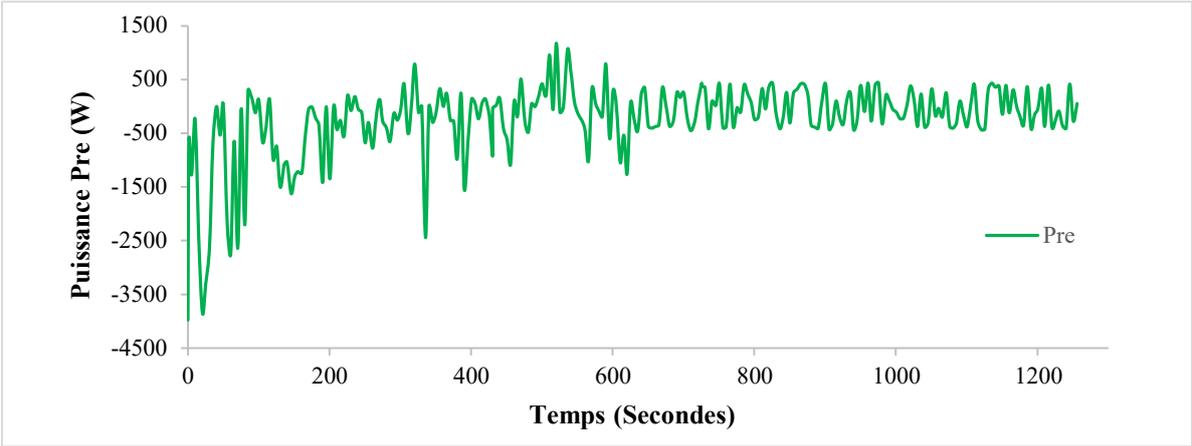


Figure IV-12: Courbes d'évolution temporelle des puissances fournies et reçues du réseau

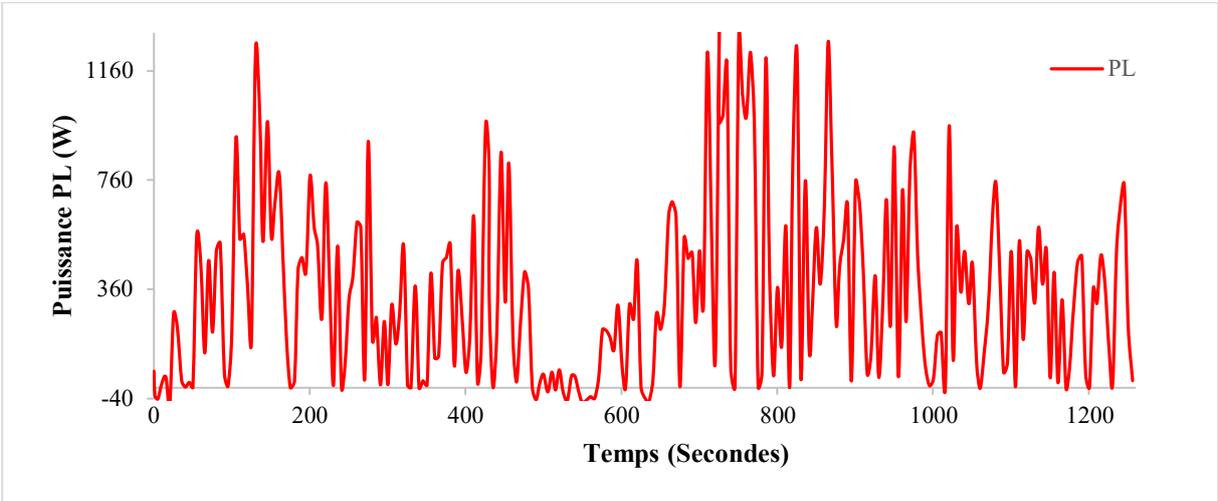


Figure IV-13: Courbes de sollicitation des charges

La configuration du système étudié est celle où la charge sollicite de manière permanente (Figure IV-13) de l'énergie provenant des sources (réseau, PV ou batteries) durant toute la période de test.

Le réseau quant'à lui, répond pendant toute cette période aux demandes énergétiques de la charge et des batteries pour les charger à 100%. Les batteries sont configurées de tel sorte que, tant que le SOC n'atteigne pas le seuil de 100% de la charge, elles continuent à emmagasiner de l'énergie. De plus, le réseau ne fournit non seulement de l'énergie au système mais il en reçoit également lorsqu'il y a surproduction de PV et batteries et la demande de la charge est faible. La Figure IV-12 illustre bien de fortes variabilités du réseau en fourniture et en réception de puissances par l'ensemble du système.

Le profil de production photovoltaïque comme le montre la Figure IV-11 se caractérise par deux régimes de fonctionnement du générateur photovoltaïque : régime de production énergétique et un régime d'absence de production (arrêt). Le régime de production correspond dans notre étude aux périodes de fort ensoleillement permettant de produire et fourniture de l'énergie au système. En revanche, l'autre régime est celui correspondant aux moments des passages nuageux, par exemple où la production est nulle. Les batteries en revanche, ont trois modes de fonctionnement : charge, décharge et standby (pas de charge ni décharge).

Il en découle de l'analyse de comportements du système expérimental étudié plusieurs phases de régime illustrées par la Figure IV-14 :

- Phase 1 (P1) : seul le réseau alimente la charge et les batteries ;
- Phase 2 (P2) : le réseau et le PV alimentent la charge ;
- Phase 3 (P3) : le réseau et les batteries alimentent la charge ;
- Phase 4 (P4) : le réseau, PV et les batteries alimentent les charges.

Dans la phase 1, la production photovoltaïque est nulle et les batteries se chargent. Seul le réseau prend en compte les sollicitations. A la phase 2, le générateur photovoltaïque produit de l'énergie qu'il met en contribution avec celle du réseau pour supporter les charges. Les batteries étant en pleine charge, le surplus de puissance est injecté au réseau ou alimentent les charges flexibles consécutives aux pertes dans le système. Puis dans la phase 3, le générateur photovoltaïque cessant de produire par ciel couvert lié aux passages nuageux, par exemple, ce sont les batteries qui contribuent aux coté du réseau à l'alimentation du système. Et enfin, la dernière phase, nous avons à la fois les panneaux photovoltaïques, les batteries et le réseau qui fonctionnent. Leur production assure l'alimentation des différentes charges.

Globalement le système répond bien aux commandes conformément aux règles souhaitées et établies.

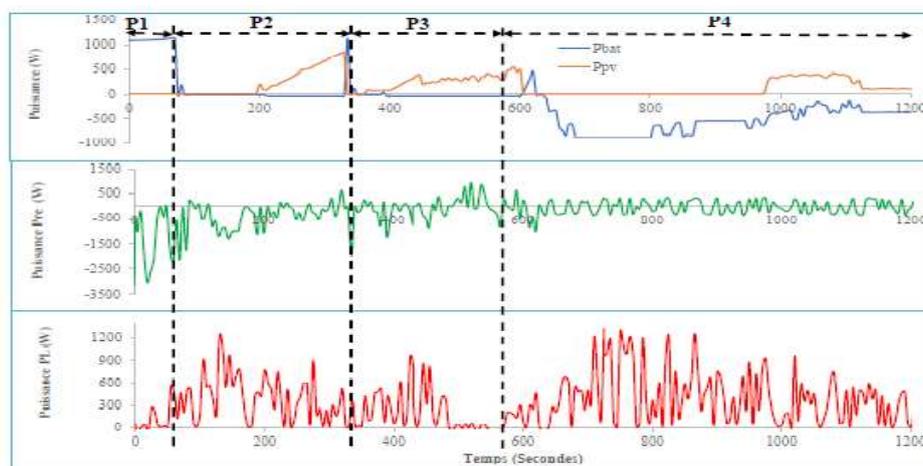


Figure IV-14: Profils d'évolution de l'ensemble du système avec différentes phases de fonctionnement

IV.7 - CONCLUSION

Au cours de ce chapitre, il a été consacré à une brève présentation des généralités sur les systèmes hybrides. Il s'en est suivi de la modélisation énergétique des sources renouvelables utilisées, en l'occurrence modèle du générateur photovoltaïque, modèle de l'éolienne et de dispositif de stockage, batteries. A cet effet, des modèles de ressources renouvelables sont présentés. Un état de l'art sur les méthodes de gestion d'énergie a permis de choisir la méthode intelligente, communément appelé la méthode floue.

Après avoir fait une introduction sur le formalisme flou, en particulier son principe, un algorithme basé la logique floue est développé. Il a pour objet de superviser et gérer les sources d'énergies renouvelables et les batteries dédiées à l'alimentation des charges domestiques, précisément pour le cas d'étude, à la pompe à chaleur. La gestion de ce système hybride au cœur du chapitre, tient compte des variations de la charge et de ressources renouvelables disponibles pour maximiser leur utilisation. Dans cet algorithme, les variables d'entrées utilisées se composent de la puissance photovoltaïque P_{pv} , de la puissance éolienne P_w , l'état de charge du banc de stockage SOC et de sollicitations de la PAC consécutives aux besoins thermiques de l'habitat.

Pour cela, nous avons utilisé l'algorithme flou implémenté dans l'environnement Matlab/Simulink, grâce à la boîte à outils « Fuzzy logic » où les règles de base de décision y sont générées. L'algorithme est mis en application cas de chauffage domestique selon différentes conditions climatiques. Les résultats obtenus sont conformes aux règles de base établies. Il en résulte que la consommation énergétique de la PAC est moins importante en temps ensoleillé qu'en temps couvert. Dans les deux situations climatiques, les batteries sont sollicitées à plus de 50% de la consommation totale de la PAC. De ce fait, ces résultats nous permettent de réajuster la taille de nos équipements de productions d'énergie électrique.

De tests expérimentaux d'algorithme flou ont été mené afin de voir et d'analyser les comportements du système comprenant le réseau, les charges, les batteries et les PV. Les tests ont donné de bons résultats en réagissant aux commandes comme souhaitées.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Les travaux menés dans cette thèse portant sur la problématique du confort thermique et/ou fonctionnel, conséquence de la consommation énergétique de bâtiment, notamment celle de chauffage, nous ont amené à étudier la question de détermination de la taille des équipements de chauffage basé sur les ressources solaires renouvelables d'une part, la gestion intelligente de sources solaires, par l'entremise d'un dispositif de supervision et de commande en s'appuyant sur la logique floue d'autre part.

L'étude s'est avérée complexe car multi-énergie et multicritère. Elle a débuté par une analyse contextuelle de la consommation énergétique mondiale puis au niveau français. Elle a permis d'établir une corrélation entre la consommation énergétique et les problèmes climatiques qui en sont leurs corollaires. Ainsi, il a été présenté les différents accords et protocoles dont l'objectif est la réduction des émissions de gaz à effets de serre. Lesquels accords et protocoles se sont traduits par la mise en vigueur des réglementations thermiques incitant à construire des bâtiments à moindre consommation d'énergie, en France par exemple. Cette réduction passe par la conception et la réalisation des bâtiments basse consommation voire bâtiment à énergie positive d'ici 2050. Le bâtiment à travers le chauffage, est le secteur le plus consommateur d'énergie pour répondre à la quête des confort thermique et fonctionnel.

L'analyse des paramètres de performances énergétiques du bâtiment a permis d'identifier cinq facteurs sensibles influençant ces performances, parmi lesquelles on a l'environnement extérieur, la gestion des apports, l'enveloppe, l'isolation et le renouvellement d'air. Cette analyse est la base de la conception d'un outil de calcul. Elle a permis de relever les éléments constitutifs du système dont l'élément central est le bâtiment. Afin de développer un modèle de ce dernier, l'état de l'art sur les méthodes et les modèles RC ont permis de développer un modèle du bâtiment en partant du modèle de référence élaboré par Louis Laret. Notre modèle tient compte du flux solaire de structure, les apports thermiques internes à savoir, l'éclairage et les métabolismes humains. D'autres modèles d'éléments formant le système étudié ont été choisis de manière judicieuse dans la littérature.

L'agrégation de ces modèles dans l'environnement Matlab/Simulink nous a donné un outil de calcul. Il intègre plusieurs scénarios d'utilisation : profil d'occupation de l'habitat, consigne de température, ventilation et apports thermiques internes. Outre les différents scénarios, l'outil comporte deux parties de commande. Une première partie de commande gère la régulation thermique du bâtiment à travers un « Relay » thermostat qui ordonne la mise en marche ou l'arrêt de la pompe à chaleur. La seconde partie de commande assure la régulation la température de l'eau dans le réservoir. Ce système commande la mise en marche ou l'arrêt de la pompe solaire et/ou la mise sous tension ou non de l'appoint électrique en cas de faiblesse de température du réservoir ou de l'ensoleillement. Afin de valider le bon fonctionnement de l'outil, des tests ont été menés en considérant les apports thermiques extérieurs et intérieurs. Le principe de test est la variation de ces apports et l'analyse de leurs impacts sur le système. Ainsi, pour les apports extérieurs, on a considéré des valeurs de flux variant de 0 à 800W/m². Pour les apports intérieurs, quatre cas de chauffage pris en compte à savoir : C₁ correspond au cas du chauffage de bâtiment où il y a tous les apports thermiques internes (éclairage est allumé et présence humaine), C₂ est le cas du chauffage où les apports thermiques internes ne proviennent que de l'éclairage. Il n'y a personne dans l'habitat. Le cas C₃ est celui du chauffage où les apports internes sont nuls. Enfin, le C₄ équivaut au cas où l'éclairage est éteint mais il y a présence des personnes dans le bâtiment chauffé. Aux termes de cette étude de fiabilité sur l'outil de calcul conçu, il en résulte que les apports extérieurs et intérieurs en l'occurrence les flux solaires, les métabolismes humains et les éclairages sont de données qui ont une influence réelle et certaine sur l'ensemble du système énergétique étudié y compris le bâtiment.

L'outil a servi à une étude d'optimisation multicritère du système de chauffage du bâtiment équipé de capteurs solaires thermiques, d'un réservoir de stockage, d'une pompe à chaleur, des radiateurs à eau chaude. Ce fut en fait, un outil simulation thermique dynamique développé dans l'environnement Matlab/Simulink. Ce dernier offre une grande souplesse de modélisation, présente une interface graphique permettant de visualiser les résultats et dispose des outils intégrés facilitant la simulation et l'analyse. Les critères d'optimisations sont focalisés sur les critères de confort thermique et de consommation énergétique. Une démarche méthodologique est définie en quatre étapes pour réaliser l'optimisation du système. Elle commence par la présentation de la synthèse des résultats sous forme de tableaux tenant compte des variables d'optimisation, ensuite l'analyse des tableaux en vue de la rétention des solutions optimales, analyse graphique des solutions optimales selon les critères de performance des équipements et enfin, choix d'une solution optimale. L'évaluation de la solution illustre de manière graphique les performances de notre système.

Enfin, pour la supervision des sources d'énergies renouvelables du système, un algorithme de gestion intelligente utilise la logique floue. La modélisation du système hybride comprenant un générateur photovoltaïque, un générateur éolien et les dispositifs de stockage d'énergie est présentée. Après avoir effectué un état de l'art la gestion floue et présenté le formalisme flou, un système de supervision et de gestion des sources d'énergies a été conçu et développé en usant ce formalisme. L'application de cet algorithme est faite aux sollicitations de la PAC dans différentes conditions climatiques dans le cas du chauffage domestique.

Au terme de ces travaux de thèse, nos contributions apportées à la communauté scientifique se traduisent par les innovations se situant à plusieurs niveaux à savoir :

- Développement d'un modèle RC de bâtiment intégrant les flux solaires nets utiles et les flux de structure ;
- Conception et réalisation d'outil simulation thermique dynamique, prenant en compte plusieurs paramètres : des épaisseurs du mur et d'isolant, le profil d'usage des occupants du bâtiment, éclairage ;
- Approche analytique et statistique pour optimiser les résultats de calculs ;
- Développement d'un algorithme de supervision et de gestion globale des sources renouvelables basé sur une méthode intelligente, en particulier la logique floue appliqué à un système de chauffage.

En dépit de nos contributions scientifiques, en raison des difficultés matériel et contraintes professionnelles dues aux charges d'enseignement, certains aspects du sujet de la thèse n'ont pu être abordés. C'est pourquoi, nous laissons en aiguisé des perspectives les points suivants à être poursuivis dans plusieurs directions :

- Evaluation de l'impact environnement du système quand bien même, le système n'utilise que les énergies renouvelables. Ces impacts doivent tenir compte des rejets de gaz à effet de serre produits lors des processus de fabrication du matériel composant le système ;
- Prise en compte dans l'outil d'autres scénarios d'usage tels que les masques du bâtiment, l'eau chaude sanitaire, etc.
- Etude de cas des pays en voie en développement où le besoin de refroidissement est plus prépondérant que le chauffage. Il s'agira de développer des techniques et outils visant également à réduire la consommation énergétique dans ces milieux ;

- La continuation des tests expérimentaux intégrant tous les manquants, en l'occurrence l'éolienne afin d'en étudier les comportements pour de plus système complexe encore. Et ce, en palliant le phénomène de saturation rencontré au cours de nos tests lié à la capacité du système à stocker des données générées.

BIBLIOGRAPHIE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] http://ec.europa.eu/news/energy/080123_1_fr.htm
- [2] <https://www.wbcasd.org/work-program/sector-projects/buildings/eeb-manifesto.aspx>
- [3] https://www.unenvironment.org/sbci/pdfs/sbci_2pager_french_Feb2011.pdf
- [4] <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Batiment-et-Ecohabitat,1503.html>
- [5] ADEME. Les bâtiments basse consommation en France. Bilan 2007- 2012 des appels à projets régionaux du Prebat. <https://www.prebat.net/IMG/pdf/prebat2007-2012hd.pdf>
- [6] Multon.B, Gergaud.O, Robin.G. Ressources énergétiques et consommation humaine d'énergie. Technique de l'ingénieur, d3900, 2003.
- [7] Living Planet Report 2010. Technical report, World Wildlife fund.
http://awsassets.panda.org/downloads/1_lpr_2012_online_full_size_single_pages_final_120516.pdf
- [8] Key World Energy Statistic IEA 2011.
http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2011/key_world_energy_stats.pdf
- [9] Association Française de l'Hydrogène. Situation mondiale de l'énergie. Fiche révisée 2.1, www.afh2.org
- [10] Réseau de Transport de l'Electricité. Rapport d'activité et de développement durable 2003.https://www.rte_france.com/sites/default/files/rapport_activite_et_de_developpement_durable_2017.pdf
- [11] Direction Générale de l'Energie et des Matières Premières. Scenarii de référence énergétique pour la France jusqu'en 2030. Rapport technique, 2004.
- [12] Direction Générale de l'Energie et des Matières Premières. La production d'énergie d'origine renouvelable en France en 2005. Rapport technique, 2005.
- [13] Direction Générale de l'Energie et des Matières Premières. La situation énergétique de la France. Rapport technique, 2007.
- [14] Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques. <http://unfccc.int>
- [15] Protocole de Kyoto, 1999.
- [16] Commission de la Santé et de la Sécurité du Travail. Confort thermique à l'intérieur d'un établissement. Guide 2004.
- [17] American Society of Heating, Refrigerating, Air Conditioning Engineers. Thermal environmental humans for occupancy. Norme 55-1992 et son addenda 1995.

- [18] La Guay.M. Confort thermique dans les lieux de vie.
- [19] Kampf.J.H, Robinson.D. Optimisation of building form for solar energy utilisation using constrained evolutionary algorithms. *Energy and Buildings* 42 (2010) 807-814.
- [20] Znouda.E, Ghrab-Morcos.N, Alhadj-Alouane.A. Optimization of Mediterranean building design using genetic algorithms. *Energy and Buildings* 39 (2007) 148–153.
- [21] Wood.G, Newborough.M. Dynamic energy consumption indicators for domestic appliances: environment, behaviour and design. *Energy and Buildings* 35 (2003) 821–841.
- [22] Wood.G, Newborough.M. Energy-use information transfer for intelligent homes: Enabling energy conservation with central and local displays. *Energy and Buildings* 39 (2007) 495–503.
- [23] Figueiredo.J, Martins.J. Energy production system management – renewable energy power supply integration with building automation system. *Energy Conversion and Management*, 51 (2010) 1120-1126.
- [24] Yamamoto.S, Sumi.K, Nishikawa.E, Hashimoto.T. An operating method using prediction of photovoltaic power for photovoltaic-diesel hybrid power generation system. *Electrical Engineering in Japan* 151 (3) 2005.
- [25] Bal.JL, Chabot.B. Les énergies renouvelables. Etat de l’art et perspective de développement. *Académie des Sciences Series IIA - Earth and Planetary Science*, 333 (2001) 827-834.
- [26] La production d’électricité d’origine renouvelable dans le monde. Huitième inventaire, 2006.
- [27] Brundtland.G.H. Notre avenir à tous. Rapport de la commission mondiale sur l’environnement et le développement de l’ONU, avril 1987.
- [28] Menezo.C, Saulnier.J.B, Lincot.D, Guarracino.G. Energy domotics, materials welcome to the home to the future. *CNRS International Magazine* 5 (2007) 18-27.
- [29] Renewable Energy Policy Network for the 21st century. Rapport Mondial sur les énergies renouvelables 2012.
- [30] Agence de l’Environnement et de Maitrise de l’Energie. Electricité solaire photovoltaïque dans le bâtiment. Retour d’expérience en France du projet européen Hip Hip avancé et réalisation.
- [31] German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety. Renewable energies innovation for the future. Technical report, 2006.
- [32] Barbara.A. Le marché du solaire thermique française enregistre une légère baisse en 2011. La progression du collectif compense la baisse en individuel. *ENERPLAN*, 06 février 2012.

- [33] Syndicat des énergies renouvelables. Le solaire thermique en France. Novembre 2008. http://www.enr.fr/docs/2009122917_SERKitCommunicationsolairethermiqueLDRGB02France.pdf
- [34] GWE Council. Global wind energy. Global Wind Energy Council and Greenpeace, 2014.
- [35] Ibrahim.H, Ilinca.A, Perron.I. Investigations des différentes alternatives renouvelables et hybrides pour l'électrification des sites isolés. Laboratoire de Recherche en Energie Eolienne LREE- 03 septembre 2008.
- [36] Ueno.T, Inada.R, Saeki.O, Tsuji.K. Effectiveness of an energy consumption information system for residential buildings. *Applied Energy* 83 (2006) 868–883.
- [37] Ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement. Chiffres clés du climat, France et Monde. Rapport technique, 2012.
- [38] GIEC. Bilan 2007 des changements climatiques- Rapport de synthèse.
- [39] Diakaki.C, Grigoroudis.E, Kolokotsa.D. Towards a multi-objective optimization approach for improving energy efficiency in buildings. *Energy and Buildings* 40 (2008) 1747-1757.
- [40] Lefebvre.G. Comportement dynamique des bâtiments : Simulation et analyse. Technique de l'ingénieur TI-be2041 (1994).
- [41] CERTU. Memento technique du bâtiment - Le confort thermique. Juillet 2003
- [42] Charrier.S. La RT2012 - Présentation aux professionnels de la construction. Janvier 2012
- [43] Mignot.R, Nouvelot.S. Etude thermique d'un EHPAD. Rapport d'un projet de fin d'étude - 2016. Université de Lorraine.
- [44] Panorama de l'électricité renouvelable. Rapport 30 juin 2019. <https://www.enedis.fr/sites/default/files/field/documents/Panorama-electricite-renouvelable-T2-2019.pdf>
- [45] Cantin.R, Moujalled.B, Guarracino.G. Complexité du confort thermique dans les bâtiments. Article au 6^e Congrès Européen des Sciences de Système, Paris 2005.
- [46] International Standard ISO 7730. <https://www.sis.se/api/document/preview/907006/>
- [47] Smir.F. Simulation des paramètres du confort thermique d'hiver en Algérie. Thèse de doctorat, Université de Mentouri - Constantine, 2008
- [48] Merabtine.B. Modélisation Bond Graph en vue de l'efficacité énergétique du bâtiment. Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2012.
- [49] Chlela. F. Développement d'une méthodologie de conception de bâtiments basse consommation d'énergie. Thèse de doctorat, Université La Rochelle, 2008.

- [50] Comparaison internationale Bâtiment Energie. Rapport final. <https://www.prebat.net/IMG/pdf/a-total-2008.pdf>
- [51] ADEME. Travaux de rénovation dans le logement. Règlementation thermique, 2018. <https://www.ademe.fr/travaux-renovation-logement-reglementation-thermique>
- [52] Thiers.S, Ladevie.B, Fudym.O et al Analyses multicritères et méthode inverse en simulation énergétique du bâtiment. Rapport technique final 2012, Agence Nationale de la Recherche.
- [53] Oussar.F. Réseaux d'ondelettes et réseaux de neurone pour la modélisation statique et dynamique de processus. Thèse de doctorat, soutenue le 6 juillet 1998. Université Paris 6.
- [54] Marachlian.J. Modélisation et gestion de la thermique globale d'un véhicule en vue de réduire les émissions de CO₂. Thèse de doctorat. Université Henri Poincaré Nancy-1, 2006.
- [55] Mora.L. Prédiction des performances thermo-aérauliques des bâtiments par association de modèles de différents niveaux de finesse au sein d'un environnement orienté objet. Thèse de doctorat. Université de La Rochelle, 2003.
- [56] Woloszyn.M. Modélisation hygro-thermo-aéraulique des bâtiments multizones : proposition d'une stratégie de résolution du système couplé. Thèse de doctorat, soutenue en 1999. INSA de Lyon.
- [57] Wurtz.E, Mora.L, Inard.C. An equation based simulation to investigate fast building simulation. *Building and Environment* 41 (2006) 1571- 1583.
- [58] Fux.S, Ashouri.A, Benz.M, Guzzela.L. EKF based self-adaptive thermal model for a passive house. *Energy and Buildings*, 2012.
- [59] Bacher.P, Madsen.H. Identifying suitable models for the heat dynamics of buildings. *Energy and Buildings*, Issue 43, pp.1511-1522, 2011.
- [60] Palomo Del Barrio.E, Lefebvre.G, Behar.P, Bailly.N. Using model size reduction techniques for thermal control application in buildings. *Energy and Buildings*, Issue 33, pp.1-14, 2000.
- [61] Mejri.O, Palomo Del Barrio.E, Ghrab-Morcos.N. Energy performance assessment of occupied buildings using model identification technique. *Energy and Buildings*, Issue 43, pp.285-299, 2011.
- [62] Hudson.G, Underwood.C.P. A simple building modelling procedure for Matlab/Simulink, *Proceedings of BS1999*, (1999).
- [63] Zayane.C. Identification d'un modèle de comportement thermique de bâtiment à partir de sa courbe de charge. Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure des mines de Paris, 2011.
- [64] Van Schnijndel.A.W.M,De Wit.M.H. Advanced simulation building system and control with Simulink. 8th international IBPSA Conference Eindhoven, Netherland 2003.

- [65] Lu.S, Ha.D, Zamai.E, Bacha.S, Mani Cat.A. Simulation de performance d'un système multi-sources d'énergie en utilisant le plancher chauffant pour chauffer un bâtiment. Conférence IBPSA, Lyon -France 2008.
- [66] Pictou.J. Modélisation de la régulation d'une machine de climatisation. Mémoire de DEA de l'INSA, soutenu le 19 septembre 2014.
- [67] Zeghib.I, Chaker.A, Modeling and Simulation of a Solar Thermal System for Domestic Space Heating Using Radiators Low Temperature, International Journal of Renewable Energy, 2015.
- [68] Menguy.A, Bernard.R, Schwartzk.M. Le rayonnement solaire – Conversion thermique et Application. Edition, 1980.
- [69] Fraisse.G. La régulation thermique des bâtiments tertiaires : Application de la logique floue à la régulation centrale du chauffage en régime intermittent. Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 1997.
- [70] Cyssau.R. Manuel de la régulation et de la gestion technique. Paris : PYC Edition, Association Confort Régulation, 1995. 377p
- [71] Fraisse.G, Virgogne.J. Commande floue et thermique du bâtiment. Proposition d'une loi de chauffe adaptée à la régulation des bâtiments de type tertiaire occupation discontinue. RevGenTherm (1996) 35, 359- 372 @Elsevier, Paris.
- [72] La régulation industrielle, régulateurs PID, prédictifs et flous. Paris : Hermès,1994. 348p.
- [73] Mora.L. Prédiction des performances thermo-aérauliques des bâtiments par association de modèles de différents niveaux de finesse au sein d'un environnement orienté objet. Thèse de doctorat, Université de La Rochelle.
- [74] IEEF. Efficacité énergétique de la climatisation en région tropicale. Tome 1, Conception des nouveaux bâtiments. <http://www.ifdd.francophonie.org/docs/prisme/eeTOME1.PDF>
- [75] AVENIR-ENERGIE. Manuel d'installation de la pompe à chaleur Sol-Eau. http://www.avenir-energie.com/pdf/pdf_529df30fa476c.pdf
- [76] Kalogirou.S.A. Solar thermal collectors applications. Progress in Energy and Combustion Science 30 (2004) 231-295 (capteurs solaires)
- [77] Kiyani.M, Bingol.E, Melikoglu.M, Albostan.A. Modelling and simulation of a hybrid solar heating system for greenhouse applications using Matlab/Simulink. Energy Conversion and Management 72 (2013) 147 -155
- [78] Mosallat.F, ELMekkawy.T, Friessen.D.L, Molinski.T, Loney.S, Bibeau.EL. Modeling, simulation and control of flat panel solar collectors with thermal storage for heating and cooling applications. Procedia Computer Science 19 (2013) 686-693

- [79] Duffie.J.A, Beckùan.W.A. Solar engineering of thermal processes. 4^e ed. New York : John Wiley and Sons
- [80] Deng.J, Xu.Y, Yang.X. A dynamic thermal performance model for flate-plate collectors based on the thermal inertia correction of the steady-state test method. *Renewable Energy* 76 (2015) 679 – 686
- [81] Blandin.D, Krauss.G, Bouia.H, Riederer.P, Caccavelli.D. Etude de la stratification dans les ballons d'eau chaude sanitaire. Colloque interuniversitaire franco-quebecois, Montréal, Canada-2006
- [82] Johannes.K. Optimisation des installations solaires collectives d'eau chaude sabitaire : application des techniques des faibles debits et du stockage divisé. Thèse de doctorat, Université de Savoie, 2005.
- [83] Raffenel.Y. Optimisation du contrôle thermique dans une habitation multi sources. Thèse de doctorat, Université de Lyon, Ecole Centrale de Lyon, 2002.
- [84] Yaiche.M.R, Bekkouche.S.M.A. Conception et validation d'un programme sous Excel pour l'estimation du rayonnement solaire incident en Algérie. Cas d'un ciel totalement clair. *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 11 N°3 (2008) 423-436.
- [85] Moumami.A, Hamani.N, Moumami.N, Mokhtari.Z. Estimation du rayonnement solaire par deux approches empiriques dans le site de Biskra. <http://researchgate.net/publication/264781835>
- [86] Yettou.F, Malek.A, Haddadi.M, Gama.A. Etude comparative de deux modèles de calcul du rayonnement solaire par ciel clair en Algérie. *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 12 N°3 (2009) 331 – 346
- [87] Bekkouche.S.M. Modélisation de comportement thermique de quelques dispositifs solaires. Thèse de doctorat, Université Abou-Bakr Belkaid Tlemcen, 2009.
- [88] Bako.N.Z. Contribution à la mise en œuvre d'une méthodologie de conception d'une micro-centrale multi-sources multi-villages : cas de la région du sahel. Thèse de doctorat, Université Paris-Est Créteil, 2018.
- [89] Aboina.G, Tahir.A.M, Abdou Tankari.M, Lefebvre.G. Modelling bond graph of a thermal solar water heater for thermal comfort in a building. 17th IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering, Milan - 2017 <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2017.7977479>
- [90] Le.K. Gestion optimale des consommations d'énergie dans les bâtiments. Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble et de l'Université de Danang, 2008.
- [91] Ebert.R. Développement d'un environnement de simulation de systèmes complexes. Application aux bâtiments. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1993.

- [92] TRNSYS 17. A TRaNsient SYstem Simulation program. <https://sel.me.wisc.edu/trnsys/features/t17updates.pdf>
- [93] Rachid.B. Conception et régulation des systèmes fermés de distribution et de circulation de chauffage/climatisation. Mémoire de Master, Université de Tlemcen -Algérie, 2013.
- [94] EnergyPlus Documentation. Getting started with EnergyPlus https://energyplus.net/sites/default/files/pdfs_v8.3.0/GettingStarted.pdf
- [95] Software Tools for Building Envelopes : EnergyPlus : New, Capable and Linked <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.453.450&rep=rep1&type=pdf>
- [96] Zhao.J, Lam.K.P, Ydstie.B.E. EnergyPlus model based predictive control (EPMPC) by using Matlab/Simulink and MLE+. Proceedings of BS2013 (2013). http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2013/p_1168.pdf
- [97] Miller.C, Hersberger.C, Jones.M. Automation of common building energy simulation workflows using python. Proceedings of BS2013 (2013). https://www.academia.edu/3410150/Automation_of_common_building_energy_simulation_workflows_using_Python
- [98] Bois.J, Mora.L, Wurtz.E. Energy saving analysis of a solar combi-system using detailed control algorithm modeled with modelica. Energy Procedia 78 (2015) 1985-1990
- [99] Wetter.M, Zuo.W, Nouidui.S.T. Modeling of heat transfer in rooms in the modelica « buildinds » library, Proceedings of BS2013 (2011). <https://simulationresearch.lbl.gov/wetter/download/2011-ibpsa-BuildingsLib.pdf>
- [100] <https://www.izuba.fr/logiciels/outils-logiciels/>
- [101] Pleaides Tutorial. http://www.planete-sciences.org/enviro/archives/rnste6/logiciels/pleiade-comfie/manuel_pleiades.pdf
- [102] Caciolo.M, Goczkowski.M, Hamri.A, Millet.J.R. Revue pratique des logiciels de simulation énergétique dynamique (SED). APOGEE juin 2015
- [103] <https://www.mathworks.com/>
- [104] Dhakes.A. Contribution au dimensionnement et à l'optimisation des systèmes hybrides éoliens – photovoltaïques avec batteries pour habitat résidentiel autonome. Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 2012.
- [105] Etude des méthodes d'optimisation multicritères. <https://fr.scribd.com/document/372420179/Etude-des-methodes-d-optimisation-Multicriteres>
- [106] Aboulaich.R, Habbal.A, Moussaid.N. Optimisation multicritère : une approche par partage des variables. Revue ARIMA Vol 13 (2010) 77-89

- [107] Semassou.C. Aide à la décision pour le choix de sites et systèmes énergétiques adaptés aux besoins du Benin. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1, 2011.
- [108] Ribault.C. Méthode d'optimisation multicritère pour l'aide à la conception des projets de densification urbaine. Thèse de doctorat, Université de Lyon, 2017.
- [109] https://fr.wikipedia.org/wiki/Écart_type
- [110] Méthodes d'échantillonnage.
<http://fmp.um5.ac.ma/sites/fmp.um5.ac.ma/files/L'ECHANTILLONNAGE.pdf>
- [111] EnergiVie. Conception et dimensionnement des chauffe-eau solaires collectifs.
https://www.effnergie.org/web/images/attach/base_doc/1440/fiche-technique-chauffe-eau-solaire-collectif.pdf
- [112] Thiaux.Y. Optimisation des profils de consommation pour minimiser les couts économiques et énergétiques sur cycle de vie des systèmes photovoltaïques autonomes et hybrides - Evaluation de la technologie Li-ion. Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2008.
- [113] Feddaoui.O. Contribution à l'étude des systèmes hybrides de génération : Application aux énergies renouvelables. Mémoire de Magister. Université Mohamed Cherif Messaadia de Soukh-Ahras (Algérie), 2014.
- [114] Mladjao.M. Contribution à la modélisation et à l'optimisation de systèmes énergétiques multi-sources et multi-charges. Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2016.
- [115] Skoplaki.E, Palyvos.J.A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. Solar Energy 83 (2009) 614–624.
- [116] Messenger.R.A, Ventre.J. Photovoltaic system engineering. CRC, Press, 2005.
- [117] Nelson.D,Nehrir.M, Wang.C. Unit sizing and cost analysis of stand-alone hybrid wind/PV/fuel power generation systems. Renewable Energy, 31 (2006) 1641–1656.
- [118] Suvire.G.O, Mercado.P.E. Dynamic modelling of a wind farm and analysis of its impact on a weak power system. INTECH Open Access Publisher, 2010.
- [119] Belhadj.M. Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome. Mémoire de Magister. Centre Universitaire de Bechar (Algérie), 2008.
- [120] Bajracharya.Q. Dynamic modeling, monitoring and control of energy storage. Master's program in electrical engineering. University of Karlstads, 2013.
- [121] Traoré.AK. Gestion d'un système autonome hybride photovoltaïque éolien pour les applications agricoles. Mémoire de l'Université du Québec Trois-Rivières, soutenu en juillet 2016.

- [122] Yahyaoui.I, Tadeo.F, Segatto.M.V. Energy and management for drip-irrigation of tomatoes in a semi-arid district. *Agricultural Water Management* 183 (2017) 4 -15
- [123] Derrouazin.A, Aillerie.M, Mekkakia-Maaza.N, Charles.J.P. Multi input-output fuzzy logic smart controller for a residential hybrid solar-wind-storage energy system. *Energy Conversion Management* 148 (2017) 238 -250
- [124] Kyriakarakos.G, Dounis.A.I, Arvanitis.K.G, Papadakis.G. A fuzzy logic energy management system for polygeneration microgrids. *Energy Renewable* 41 (2012) 315 -327
- [125] Roumila.Z, Rekioua.D, Rekioua.T. Energy management based fuzzy logic controller of hybrid system wind/photovoltaic/diesel with storage battery. *International Journal of Hydrogen Energy* 42 (2017) 19525 -19535
- [126] Chekired.F, Mahrane.A, Samara.Z, Chikh.M, Guenounou.A, Meflah.A. Fuzzy logic energy management for a photovoltaic solar home. *Energy Procedia* 134 (2017) 723 -730
- [127] Chekired.F, Chikh.M, Smara.Z. Optimization of energy management of photovoltaic system by the fuzzy logic technique. *Energy Procedia* 6 (2011) 513 – 521
- [128] Khiareddine.A, Ben Salah.C, Mimouni.M.F. Power management of a photovoltaic/battery pumping system in agricultural experiment station. *Energy Solar* 112 (2015) 319 -338
- [129] Ouachani.I, Rabhi.A, Yahyaoui.I, Tidhaf.B, Tadeo.T.F. Renewable energy management algorithm for a water pumping system. *Energy Procedia* 111 (2017) 1030 -1039
- [130] Mercki.A. Etude comparative des chaines de conversion dédiées à une éolienne de petite puissance. These de doctorat. INP Toulouse 2005.
- [131] Hocaoglu.FO, Gerek.O.N, Kurban.M.A novel hybrid (wind–photovoltaic) system sizing procedure. *Solar Energy* 83 (2009) 2019–2028
- [132] Oumar.F, Naamane.A, Pujo.P, M’Sirdi.N.K. Pilotage multicritère d’un système energetique multi-sources et multi-utilisateurs. Congrès Internatioanle en Genie Industriel et Management des Systemes, Fès- 2012.
- [133] Z.N.Bako, M.A.Tankari, G.Lefebvre, A.S.Maiga. Lead-acid battery behavior study and modelling based on the Kinetic Battery Model approach. In 2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2016, p. 673-677
- [134] A.Tani, M.B.Camara, B.Dakyo. Energy Management in the Decentralized Generation Systems Based on Renewable Energy—Ultracapacitors and Battery to Compensate the Wind/Load Power Fluctuations. In *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol 51 N°2 (2015), 1817 – 1827.
- [135] Aboina.G, Tahir.A.M, Abdou Tankari.M, Lefebvre.G. Application of fuzzy logic for the management of electrical energy consumed by a heat pump for classroom heating. *SSRG International Journal of Mechanical Engineering (IJME)*, Vol 6 N°12 (2019), 15-22.

- [136]** R.Belfkira, C.Nichita, P.Reghem. Modeling and optimal sizing of hybrid renewable energy system. In 2008, 13th International Power Electronics and Motion Control Conference. <https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2008.4635532>
- [137]** R.Belfkira, O.Hajji, C.Nichita, G.Barakat. Optimal sizing of stand-alone hybrid wind/PV system with battery storage. In 2007, European Conference on Power Electronics and Applications. <https://doi.org/10.1109/EPE.2007.4417586>

ANNEXES

ANNEXE 1

Nombre de radiateurs	Epaisseur d'isolant (cm)	Paramètres	Epaisseur du mur (cm)		
			10	15	20
4	5	Température moyenne T_{ai} (°C)	18,43	18,41	18,43
		Ecart-type de température T_{ai}	1,11	1,12	1,15
		Energie électrique (kWh)	18,13	18,00	18,53
		Energie thermique (kWh)	56,92	56,61	58,22
		Température moyenne T_{c2} (°C)	11,20	11,19	11,19
		Température moyenne T_{rs} (°C)	16,71	16,70	16,70
	10	Température moyenne T_{ai} (°C)	18,42	18,39	18,37
		Ecart-type de température T_{ai}	1,14	1,13	1,12
		Energie électrique (kWh)	18,40	18,33	18,20
		Energie thermique (kWh)	57,82	57,61	57,23
		Température moyenne T_{c2} (°C)	11,19	11,19	11,19
		Température moyenne T_{rs} (°C)	16,70	16,70	16,70
5	5	Température moyenne T_{ai} (°C)	19,27	19,28	19,26
		Ecart-type de température T_{ai}	0,54	0,53	0,53
		Energie électrique (kWh)	16,47	16,67	16,67
		Energie thermique (kWh)	60,96	61,93	61,89
		Température moyenne T_{c2} (°C)	11,43	11,43	11,43
		Température moyenne T_{rs} (°C)	16,85	16,85	16,85
	10	Température moyenne T_{ai} (°C)	19,22	19,26	19,26
		Ecart-type de température T_{ai}	0,54	0,55	0,53
		Energie électrique (kWh)	16,80	16,47	16,40
		Energie thermique (kWh)	62,42	61,20	60,75
		Température moyenne T_{c2} (°C)	11,43	11,43	11,42
		Température moyenne T_{rs} (°C)	16,85	16,85	16,85
6	5	Température moyenne T_{ai} (°C)	19,13	19,14	19,03
		Ecart-type de température T_{ai}	0,59	0,57	0,58
		Energie électrique (kWh)	13,93	14,87	14,60
		Energie thermique (kWh)	57,72	61,50	60,40
		Température moyenne T_{c2} (°C)	11,61	11,61	11,61
		Température moyenne T_{rs} (°C)	16,95	16,94	16,94
	10	Température moyenne T_{ai} (°C)	19,10	19,09	19,11
		Ecart-type de température T_{ai}	0,58	0,57	0,58
		Energie électrique (kWh)	14,53	14,47	14,93
		Energie thermique (kWh)	60,15	59,83	61,84
		Température moyenne T_{c2} (°C)	11,61	11,61	11,61
		Température moyenne T_{rs} (°C)	16,94	16,94	16,94

Tableau A-1 : Résultats des simulations dans le cas de la surface de captation de $4m^2$

ANNEXE 2

Nombre de radiateurs	Epaisseur d'isolant (cm)	Paramètres	Epaisseur du mur (cm)		
			10	15	20
4	5	Température moyenne T_{ai} (°C)	18,46	18,45	18,42
		Ecart-type de température T_{ai}	1,08	1,09	1,09
		Energie électrique (kWh)	18,13	18,00	18,07
		Energie thermique (kWh)	57,68	57,33	57,56
		Température moyenne T_{c2} (°C)	13,57	13,57	13,57
		Température moyenne T_{rs} (°C)	18,73	18,73	18,73
	10	Température moyenne T_{ai} (°C)	18,42	18,48	18,46
		Ecart-type de température T_{ai}	1,06	1,12	1,13
		Energie électrique (kWh)	17,47	17,87	18,27
		Energie thermique (kWh)	55,75	57,00	58,17
		Température moyenne T_{c2} (°C)	13,56	13,56	13,57
		Température moyenne T_{rs} (°C)	18,73	18,72	18,72
5	5	Température moyenne T_{ai} (°C)	19,27	19,26	19,28
		Ecart-type de température T_{ai}	0,56	0,55	0,54
		Energie électrique (kWh)	16,53	16,27	16,47
		Energie thermique (kWh)	62,09	61,10	61,88
		Température moyenne T_{c2} (°C)	13,81	13,81	13,80
		Température moyenne T_{rs} (°C)	18,87	18,87	18,87
	10	Température moyenne T_{ai} (°C)	19,29	19,26	19,26
		Ecart-type de température T_{ai}	0,53	0,53	0,55
		Energie électrique (kWh)	16,47	16,67	16,73
		Energie thermique (kWh)	61,83	62,67	62,97
		Température moyenne T_{c2} (°C)	13,80	13,81	13,80
		Température moyenne T_{rs} (°C)	18,87	18,87	18,87
6	5	Température moyenne T_{ai} (°C)	19,08	18,99	19,09
		Ecart-type de température T_{ai}	0,60	0,60	0,57
		Energie électrique (kWh)	14,40	14,60	15,53
		Energie thermique (kWh)	60,27	61,30	65,20
		Température moyenne T_{c2} (°C)	13,99	13,99	13,99
		Température moyenne T_{rs} (°C)	18,96	18,96	18,96
	10	Température moyenne T_{ai} (°C)	19,09	19,07	19,10
		Ecart-type de température T_{ai}	0,59	0,59	0,58
		Energie électrique (kWh)	14,47	14,40	14,67
		Energie thermique (kWh)	60,60	60,48	61,56
		Température moyenne T_{c2} (°C)	13,99	13,99	13,99
		Température moyenne T_{rs} (°C)	18,96	18,96	18,96

Tableau A-2 : Résultats des simulations dans le cas de la surface de captation de 6m²

ANNEXE 3

Nombre de radiateurs	Epaisseur d'isolant (cm)	Paramètres	Epaisseur du mur (cm)		
			10	15	20
4	5	Température moyenne T_{ai} (°C)	18,51	18,52	18,50
		Ecart-type de température T_{ai}	1,03	1,04	1,06
		Energie électrique (kWh)	18,33	17,60	18,27
		Energie thermique (kWh)	59,04	56,87	58,91
		Température moyenne T_{c2} (°C)	15,87	15,86	15,86
		Température moyenne T_{rs} (°C)	20,59	20,59	20,59
	10	Température moyenne T_{ai} (°C)	18,52	18,50	18,48
		Ecart-type de température T_{ai}	1,05	1,06	1,05
		Energie électrique (kWh)	17,93	17,93	18,13
		Energie thermique (kWh)	57,91	57,92	58,53
		Température moyenne T_{c2} (°C)	15,86	15,86	15,86
		Température moyenne T_{rs} (°C)	20,59	20,59	20,59
5	5	Température moyenne T_{ai} (°C)	19,26	19,26	19,29
		Ecart-type de température T_{ai}	0,57	0,59	0,56
		Energie électrique (kWh)	16,80	15,93	15,73
		Energie thermique (kWh)	63,66	60,78	59,99
		Température moyenne T_{c2} (°C)	16,11	16,10	16,09
		Température moyenne T_{rs} (°C)	20,73	20,73	20,73
	10	Température moyenne T_{ai} (°C)	19,29	19,26	19,25
		Ecart-type de température T_{ai}	0,56	0,56	0,57
		Energie électrique (kWh)	16,13	16,67	16,20
		Energie thermique (kWh)	61,39	63,27	61,66
		Température moyenne T_{c2} (°C)	16,10	16,10	16,10
		Température moyenne T_{rs} (°C)	20,73	20,73	20,73
6	5	Température moyenne T_{ai} (°C)	19,03	19,09	19,10
		Ecart-type de température T_{ai}	0,60	0,58	0,58
		Energie électrique (kWh)	14,00	14,40	14,27
		Energie thermique (kWh)	59,47	61,14	60,54
		Température moyenne T_{c2} (°C)	16,29	16,29	16,28
		Température moyenne T_{rs} (°C)	20,82	20,81	20,81
	10	Température moyenne T_{ai} (°C)	19,08	19,08	19,08
		Ecart-type de température T_{ai}	0,60	0,59	0,58
		Energie électrique (kWh)	14,53	14,53	14,20
		Energie thermique (kWh)	61,81	61,81	60,39
		Température moyenne T_{c2} (°C)	16,29	16,29	16,28
		Température moyenne T_{rs} (°C)	20,81	20,81	20,81

Tableau A-3 : Résultats des simulations dans le cas de la surface de captation de $8m^2$

Où, T_{c2} est la température du fluide caloporteur sortant des capteurs solaires thermiques, T_{rs} , la température du même fluide caloporteur sortant du réservoir de stockage, T_{ai} est la température de l'air ambiant intérieur.

ANNEXE 4

CALCULS DE DEUX INDICATEURS CLES ET LEURS SIGNIFICATIONS

Les textes de la RT 2012 fixent les exigences de performance énergétique des nouvelles constructions et proposent trois exigences principales, axées sur les résultats dont les deux principales sont :

1. Efficacité énergétique minimale du bâti

Pour la première fois dans une réglementation thermique, l'exigence est posée sur l'efficacité énergétique du bâti dans son ensemble et non uniquement sur le niveau d'isolation de l'enveloppe. En effet, en plus de celui-ci, la RT 2012 valorise la conception bioclimatique du bâti : maximisation des apports solaires en hiver, de l'éclairage naturel, etc.

L'efficacité énergétique du bâti est caractérisée par le coefficient de besoin bioclimatique (Bbio, exprimé en nombre de point). Il permet de mesurer la capacité d'un bâti à limiter simultanément les besoins en énergie pour le chauffage (Bch), le refroidissement (Bfr) et l'éclairage artificiel (Becl), et ce indépendamment des systèmes énergétiques et équipements choisis (ventilation, chauffage, refroidissement, eau chaude sanitaire, éclairage artificiel...).

$$Bbio=2\times(Bch+Bfr)+5\times Becl$$

Bbio doit être le plus petit possible. Les besoins en énergie pour l'éclairage doivent donc être fortement réduits car ils sont multipliés par un facteur 5 contre un facteur 2 pour les besoins de chauffage et de refroidissement.

Ce coefficient doit obligatoirement être inférieur à une valeur maximale (Bbiomax) qui varie d'un bâtiment à l'autre selon la localisation géographique, l'altitude, la surface et l'utilisation du bâtiment.

$$Bbiomax=Bbiomaxmoyen\times(Mbgeo+Mbalt+Mbsurf)$$

Les catégories CE1 et CE2

Les logements de catégories CE2 sont les logements considérés comme ne pouvant se passer de système de refroidissement. Ce sont les logements munis de système de refroidissement, situés en zone H2d ou H3 à une altitude inférieure à 400m et exposé au bruit BR2 ou BR3 (donc ne pouvant pas ouvrir leurs fenêtres à volonté pour ventiler). Tous les autres bâtiments d'habitation sont de catégorie CE1.

Mbgeo varie en fonction de la zone géographique. Il permet de compenser les différences météorologiques entre les différentes régions françaises. Réduire les besoins de chauffage et d'éclairage artificiel est en effet plus simple à Montpellier qu'à Strasbourg. La RT 2012 est donc moins exigeante pour les Alsaciens.

La RT 2012 découpe la France en 8 zones climatiques.

Zones climatiques	Mbgeo
H1a	1,2
H1b	1,4
H1c	1,2
H2a	1,1
H2b	1,0
H2c	0,9
H2d	0,8
H3	0,7

Le coefficient Mbalt module le Bbiomax en fonction de l'altitude du bâtiment. Ce coefficient compense la difficulté liée à la baisse de température en altitude.

Altitude	Mbalt
0 à 400m	0
401 à 800m	0,2
801 m et plus	0,4

Le calcul du coefficient Mbsurf est plus complexe à appréhender. L'expérience des précédentes réglementations a montré qu'il était plus simple d'obtenir de bonnes performances pour les grandes surfaces que pour les petites.

Pour éviter de pénaliser les ménages faisant construire de petits logements, la RT 2012 corrige ses exigences en fonction de la surface.

Srt	Mbsurf
0 à 120m ²	$\frac{30-0,25 \times Srt}{Bbiomaxmoyen}$
121 à 140m ²	0
141 à 200m ²	$\frac{70 - \frac{Srt}{6}}{Bbiomaxmoyen}$
200m ² et plus	$\frac{-10}{Bbiomaxmoyen}$

Pour les immeubles collectifs, Mbsurf=0.

2. Consommation conventionnelle d'énergie maximale

La consommation conventionnelle des bâtiments pour les usages en éclairage artificiel, chauffage, ventilation, refroidissement, production d'eau chaude sanitaire, et leurs auxiliaires est déterminée par le coefficient Cep. Il est exprimé en kWh/m².an. Le coefficient Cep doit être inférieur à une valeur maximale (Cepmax).

$$\text{Cepmax} = 50 \times M_{\text{c.type}} + (M_{\text{c.geo}} + M_{\text{c.alt}} + M_{\text{c.surf}} + M_{\text{c.GES}})$$

Comme le Bbiomax, le Cepmax varie d'un bâtiment à l'autre. Il dépend de la localisation géographique, l'altitude, la surface, d'énergie utilisée et de l'utilisation du bâtiment.

Le niveau d'exigence moyen pour le résidentiel est de 50kWh/m².an.

Mctype module le Cepmax en fonction du type de logement. Pour les locaux de catégorie CE1, Mctype=1. Pour les locaux de catégorie CE2, Mctype=1,2.

Mcgeo varie en fonction de la zone géographique pour compenser les disparités météorologiques en France.

Zones climatiques	Mcgeo
H1a	1,2
H1b	1,3
H1c	1,2
H2a	1,1
H2b	1,0
H2c	0,9
H2d	0,9
H3	0,8

Le coefficient Mcalt module le Cepmax en fonction de l'altitude du bâtiment.

Altitude	Mcalt
0 à 400m	0
401 à 800m	0,2
801 m et plus	0,4

Le coefficient McGES fait varier le Cepmax en fonction des émissions de gaz à effet de serre du bâtiment. Concrètement, ce coefficient est directement lié à l'énergie utilisée et permet de valoriser l'utilisation du bois et le raccordement à des réseaux de chaleur utilisant des énergies propres.

Dans le cas de l'utilisation locale de bois comme énergie principale, la production de chauffage et/ou d'eau chaude sanitaire, McGES=0,3.

Pour le raccordement à un réseau de chaleur, McGES dépend des émissions de CO₂ du réseau de chaleur (Données par l'exploitant). Dans ce cas, McGES varie entre 0 (beaucoup d'émission de CO₂) et 0,3 (Peu d'émission de CO₂).

Pour tout autre type d'énergie, McGES=0.

Comme pour le Bbio, le Cepmax est corrigé selon la surface des logements.

Srt	Mcsurf
0 à 120m ²	$\frac{0,6-0,035 \times \text{Srt}}{\text{Mctype}}$
121 à 140m ²	0
141 à 200m ²	$\frac{7}{15} \frac{\text{Srt}}{300 \times \text{Mctype}}$
200m ² et plus	$\frac{-0,2}{\text{Mctype}}$

Pour les immeubles collectifs, Mcsurf dépend de la Srt et du nombre de logement NL.

Srt/NL	Mcsurf
0 à 39m ²	$\frac{31}{25} \frac{\text{Srt}}{40 \times \text{NL}} \times \text{Mctype}$
40 à 80m ²	$\frac{740-3 \times \frac{\text{Srt}}{\text{NL}}}{500 \times \text{Mctype}} -1$
81 à 100m ²	0
101 à 150m ²	$\frac{350-3 \times \frac{\text{Srt}}{\text{NL}}}{250 \times \text{Mctype}} -1$
151m ² et plus	$\frac{-0,2}{\text{Mctype}}$