



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>



UNIVERSITÉ
DE LORRAINE

SIMPPE



Université de Lorraine
Ecole doctorale SIMPPE Lorraine
IUT Henri Poincaré de Longwy
Laboratoire LERMAB (EA 4370 USC
INRA)

Université Abdelmalek Essaâdi
Centre d'Etudes Doctorales : Sciences et
Technologies
Faculté des Sciences de Tétouan
Laboratoire d'Energétique

THESE

Pour l'obtention du titre de :

Docteur de l'Université de Lorraine

Spécialité : Energétique

Et de

Docteur de l'Université Abdelmalek Essaâdi

Spécialité : Energétique

Présentée par : Mr.

Lahoucine OUHSAINÉ

Modélisation et simulation de l'intégration des systèmes combinés PV-thermiques aux bâtiments basée sur une approche d'ordre réduit en représentation d'état

Thèse soutenue publiquement le 03 Décembre 2018 devant les membres de jury composé
de :

Mr. Mohammed EL GANAOU	Professeur – Université de Lorraine : IUT de Longwy : IUT Henri Poincaré de Longwy	Directeur de thèse
Mr. Abdelaziz MIMET	Professeur – Université Abdelmalek Essaâdi et Directeur à l'ENS de Tétouan	Directeur de thèse
Mme. Monica SIROUX	Professeur – INSA Strasbourg	Rapporteuse
Mme. Latifa BOUTAT-BADDAS	Maitre de conférences – Université de Lorraine : IUT Henri Poincaré de Longwy	Examinatrice
Mr. Hamid EL QARNIA	Professeur – Université Cadi Ayyad Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech	Rapporteur
Mr. Mohammed Lhassane LAHLAOUTI	Professeur – Faculté des Sciences de Tétouan	Président- Rapporteur
Mr. Angel SCIPIONI	Maitre de conférences – Université de Lorraine : IUT Henri Poincaré de Longwy	Examineur

*Je dédie ce mémoire à mes parents, à ma tante paternelle et sa
famille, et à tous les membres de ma famille*

REMERCIEMENTS

J'adresse mes remerciements tout d'abord à mes directeurs de thèse Monsieur le Professeur-Dr. **Abdelaziz MIMET**, et au Professeur-Dr. **Mohammed EL GANAOU**. Sans eux, ce projet n'aurait été mené en terme. Je remercie également Madame Le Professeur-Dr. **Monica SIROUX** qui n'a ménagé aucun effort de m'accueillir dans son équipe de recherche du laboratoire ICUBE à l'INSA de Strasbourg.

Je tiens également à remercier Messieurs, et Madame le Professeur-Dr. **Mohammed Lhassane LAHLAOUTI**, Professeur d'enseignement supérieur à l'Université Abdelmalek Essaâdi, à la faculté des sciences de Tétouan, le Professeur-Dr. **Hamid EL QARNIA** : Professeur d'enseignement supérieur à l'Université Cadi Ayyad à la faculté des sciences Semlalia de Marrakech , et le Professeur-Dr. **Monica SIROUX**, Professeur des Universités à l'INSA de Strasbourg de leurs efforts et leur temps précieux consacré à rapporter ce travail, et d'avoir accepté être transcrit dans le Jury, sans oublier également les autres membres examinateurs ayant avoir aussi acceptés être transcrit dans la liste de jury, plus particulièrement, Dr. **Angel Scipioni** qui est Professeur Habilité à l'Université de Lorraine, et Madame Latifa BOUTAT-BADDAS qui est Maitre de conférences à l'Université de Lorraine.

Je tiens également à remercier mon ami Yassine KHARBAOUCH pour sa coopération proactive, ainsi que tous les collègues de l'IUT Henri Poincaré à l'Université de Lorraine, si j'en ai à retenir quelques noms, je citerai : le Dr. Soufiane OUKACH, Dr. Rabah DJEDJIG, Dr. Faiza M'NASRI, Dr. Yassine BOUKAL, Dr. Bessem BHERI, Dr. Sofiane BAHRIA, Dr. Mourad RAHIM, Dr. Ahlem SESSI, Dr. Noussaiba GASMI, sans oublier le Dr. Herie PARK de l'Université de Yeugnam les Professeurs : le Dr. Angel SCIPIONI, Dr. PH. Ali ZEMOUCHE, le Prof. Mohammed DAROUACH, le Prof. Michel ZASADZINSKI, le Prof. Harouna ALI SOULEY, le Prof. Latifa BOUTAT-BADDAS, le Prof. Rachid BENNACER sans oublier l'équipe du personnel, plus particulièrement, Mr. Gabriel DAUPHIN, Mme. Jocelyne FILIPUZZI, Mme. Valérie REUTERS, Mme. Pascal BOZZONI, ainsi que tous mes professeurs et collègues de l'Université Abdelmalek Essaâdi à la faculté des Sciences de Tétouan, pour leur soutien moral durant ma période de thèse, sans oublier tous mes collègues et mes élèves ingénieurs de l'INSA Strasbourg.

Table des matières

Avant-Propos	7
Nomenclature	8
Abstract	11
Résumé	13
Liste des tableaux	15
Liste des figures	16
Introduction Générale	20
Chapitre I : Contexte Géo-Environnemental et Energétique : Aperçu global	23
1. Introduction.....	23
2. Contextes d'intégration des systèmes solaires aux bâtiments	25
2.1. Contexte environnementale	25
2.2. Contexte énergétiques et confort thermique	30
3. Aspects de l'efficacité énergétique aux bâtiments	30
4. Bilan du chapitre	38
Chapitre II : Etat de l'art des systèmes solaires PV et thermiques	39
1. Introduction.....	39
2. Le solaire photovoltaïque.....	40
2.1. Typologie des cellules solaires	42
2.2. Effet de la température	45
3. Le solaire thermique : typologies et principes de fonctionnement	48
3.1. Capteurs solaires non-vitrés.....	48
3.2. Capteurs plans vitrés	49
3.3. Capteurs à tubes sous vide.....	50
4. Couplage PV/ (Solaire thermique) : les systèmes combinés PV/T	51
4.1. Aspects du principe PV/T.....	56
4.2. Caractérisation des capteurs combinés PV/T.....	61
4.3. Aspect Hydrodynamique	68
4.4. Paramètres de contrôle et de conception.....	69
5. Focus sur les brevets et la commercialisation du PV/T dans le monde	72
6. Bilan du chapitre	75
Chapitre III : Modélisation linéaire d'ordre réduit en représentation d'état des systèmes PV/T intégrés au bâtiment	76
1. Introduction.....	76

2.	Développement du modèle d'ordre réduit en représentation d'état et application aux PV/Ts	76
1.1.	Réduction du modèle thermique	78
1.2.	Application au système PV/T à air.....	84
1.3.	Système PV/T à eau.....	94
2.	Scénarios d'intégration des PV/T aux bâtiments.	103
2.1.	Configuration multi-étages.....	104
2.2.	Mur PV/Trombe (sans gains internes).....	118
2.3.	Mur PV/T-Eau avec et sans MCP	125
5.	Bilan du chapitre	140
Chapitre IV : Approche non-linéaire du système PV/T-Bâtiment		142
1.	Introduction.....	142
2.	Modèle multilinéaire	142
3.	Cas d'un système PV/T à concentration.....	143
3.1.	Aspect théorique	143
3.2.	Modèle énergétique.....	143
3.3.	Application.....	144
4.	Cas du couplage PV/T avec les MCP.....	153
5.	Bilan du chapitre	154
Chapitre V : Etude paramétrique des systèmes PV/T-Bâtiments.....		155
1.	Introduction.....	155
2.	Etude paramétrique des systèmes PV/Ts à air.....	156
2.1.	Les conditions aux limites.....	156
2.2.	Evaluation de l'écoulement d'air.....	157
2.3.	Le rendement électrique	158
2.4.	Le rendement thermique journalier.....	163
3.	Etude paramétrique des systèmes PV/T à eau	166
3.1.	Le rendement électrique.....	167
3.2.	Le rendement thermique	169
4.	Bilan du chapitre	171
Chapitre VI : Optimisation multi-objectif des PV/T-Bât.		172
1.	Introduction.....	172
2.	Optimisation multicritères des systèmes PVT-air	172
3.	Résultats et discussions.....	174
4.	Bilan du chapitre	177
Conclusion générale		178

Avant-Propos

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une thèse de doctorat en cotutelle entre l'université Abdelmalek Essaâdi au sein de son Laboratoire d'Energétique à la Faculté des Sciences de Tétouan au Maroc, et l'Université de Lorraine au sein de son laboratoire d'Etudes et de Recherche sur le Matériau Bois (LERMAB UMR.), Equipe Energétique des bâtiments à l'IUT Henri Poincaré de Longwy.

Ce travail a bénéficié du financement des deux projets de recherche :

1/ Bourse du Projet « Étude et simulation d'un couplage panneaux-pompe à chaleur-stockage en vue de la mise en place d'une plateforme habitat durable – financé conjointement par l'Institut Français du Maroc et le Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche Scientifique et de la Formation des Cadres (MESRSFC) dans le cadre des projets dédiés au pôle de compétences Énergie pour la période 2013-2016.

2/ Bourse du Projet « Étude d'un système de production d'énergie (froid et chaleur) et intégration dans un édifice (résidentiel ou industriel) dans le cadre du projet PHC Maghreb n°13 MDU 904 M pour la période 2013-2017.

Ce qui m'a permis, à travers des bourses octroyées dans ce cadre, d'effectuer des stages de recherches tout le long de mes séjours à LERMAB à l'Université de Lorraine.

Je tiens à remercier vivement l'Institut Français à Rabat, et le Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche Scientifique et de l'Education Nationale pour leur confiance et leur soutien moral et matériel.

Nomenclature

Matrices et vecteurs

A : Matrice d'état

B, B1, et B2 : Matrices d'entrée ou de commande

C : matrice d'observation

D : matrice d'action directe

F : matrice d'advection

X : Vecteur d'état

Y : Vecteur de sortie

Coefficients

A_c : Surface apparente du capteur solaire (m^2)

c, C_f ou c_p : Chaleur spécifique massique ($J.K^{-1}.kg^{-1}$)

D : Diamètre externe de tube (m)

D_i : Diamètre interne de tube (m)

D_h : Diamètre hydraulique (m)

e_i : Épaisseur de la couche i (m)

F : Rendement standard du capteur solaire à ailette droite

F' : Facteur du rendement thermique du capteur

F_R : Facteur d'évacuation thermique du système solaire

F_{s-ciel} :

G : Densité de rayonnement global (W/m^2)

\bar{G} : Densité de rayonnement solaire global adimensionnel

G_{ref} : Densité de rayonnement solaire de référence (W/m^2)

h_0 : Coefficient par convection en $x=0$ ($W/m^2.K$).

h_1 : Coefficient de transfert par convection en $x=l$ ($W/m^2.K$).

h_f : Coefficient de convection du fluide ($W/m^2.K$)

h_w : Coefficient de convection de l'eau ($W/m^2.K$).

$h_{conv,t}$: Coefficient de transfert par convection des pertes thermiques du capteur vers l'environnement ($W/m^2.K$).

h_{rad} : Coefficient de transfert équivalent par rayonnement ($W/m^2.K$).

hp_1 : Facteur de pénalité 1

hp_2 : Facteur de pénalité 2

I : Courant électrique (A)

I_{sc} : Courant électrique à court-circuit (A)

I_d : Courant de la diode de la cellule PV (A)

I_{PV} : Courant électrique de la cellule PV (A)

I_0 : Courant de saturation (A)

I_{sh} : Courant de la composante parallèle de la cellule PV (A)

k : Constante de Boltzmann (J/K)

L: Longueur du capteur (m)

e_c : Epaisseur de la cellule PV (m)

e_T : Épaisseur de Tedlar (m)

e_g : Épaisseur du vitrage (m)

\dot{m} : Débit massique (kg/s)

n : Nombre de tours de la pompe hydraulique

P: Pression (Pa)

P_{pompe} : Puissance mécanique de la pompe (W)

q_0 et \tilde{q}_0 : Densité de flux résultant et flux instantanée en $x=0$ (W/m²).

q_l et \tilde{q}_l : Densité de lux résultant et flux instantané en $x=l$ (W/m²).

q : Charge électrique (q)

Q , et δQ : Chaleur et chaleur élémentaire (J)

Q_u : Energie thermique utile provenant du fluide caloporteur (J)

R : Terme source de l'énergie (J)

R : Résistance thermique (K/W)

S : Densité de flux solaire (W/m²)

S : Terme source (W)

T : Températures (K)

T_{max} : Température maximale du système (K)

T_f : Température du fluide caloporteur (K)

$T_{f,in}$: Température d'entrée du fluide (K)

T_a : Température ambiante (K)

T_{PV} : Température moyenne du panneau PV (K)

T_{cell} : Température de la cellule PV (K)

T_{ref} : Température de référence (K)

$(T_{PV})_{eff}$: Température effective du panneau PV (K)

$T_{PV/T}$: Température moyenne du système PV/T (K)

T_{pm} : Température moyenne du système (K)

T^{LR} et \tilde{T}^{LR} : Température d'ordre réduit, et température d'ordre réduit instantanée (K)

t_c : Temps caractéristique maximale (s)

U : Energie interne (J)

u : Vitesse du fluide (m/s)

U^+ : Vitesse adimensionnelle

$\tilde{U}_{j,max}$: vitesse maximale j filtrée (m/s)

U_i : Coefficient de transfert thermique global de l'élément i (W.m⁻².K⁻¹)

U_L : Coefficient de pertes thermiques global du capteur (W.m⁻².K⁻¹)

U_t : Coefficient de transfert de chaleur global de cellule à l'atmosphère à travers le verre (W.m⁻².K⁻¹)

U_T : Coefficient de transfert de chaleur global de la cellule solaire vers l'eau à travers le tedlar (W/m².K)

U_{tf} : Coefficient de transfert de chaleur global du verre à l'air à travers la cellule et le Tedlar (W.m⁻².K⁻¹).

U_{TT} : Coefficient global de transfert de chaleur du verre au Tedlar à travers la cellule (W.m⁻².K⁻¹).

V : Tension (V)

V_{oc} : Tension à circuit ouvert (V)

$W, \delta W$: Travail et travail élémentaire (J)

W : Largeur d'une ailette de capteur à eau/ Largeur du capteur à air.

Abréviations

Bi, Bi_0 , et Bi_l : Nombre de Biot, nombre de Biot au voisinage du $x=0$, et de $x=l$.

Fo : Nombre de Fourier à $t = t_c$

MCP : matériau à changement de phase

ORRE : Ordre Réduit en Représentation d'Etat

PV/T : Photovoltaïque/Thermique

PV/T-Bât : Photovoltaïque/Thermique-Bâtiment

CPV/T : Concentrateur PV/T

STC « Standard Test Conditions » : Conditions de test standard : Conditions de test standards

Pr : Nombre de Prandtl

Ra : Nombre de Rayleigh

Re : Nombre de Reynolds

Nu : Nombre de Nusselt

Lettres Grecs

η_t : Rendement totale

η_{el} : Rendement électrique

η_0 : Rendement électrique de référence

η_{th} : Rendement thermique

η_{pompe} : Rendement hydrodynamique de la pompe

β : Coefficient de dilatation thermique (K^{-1})

γ : Coefficient d'incertitude

γ_{AC} : Incertitude du modèle réduit

δ : Inclinaison du capteur

$(\tau\alpha)_{eff}$: Facteur de transmittivité absorptivité effective

τ : Temps adimensionnel

τ_{EVA} : Transmittivité de la couche EVA

τ_g : Transmittivité du verre

α_{PV} : Absorptivité du PV

a_T : Diffusivité thermique turbulente

ε_P : Émissivité de la paroi

ε_g : Émissivité du verre

ρ : Masse volumique ($kg.m^{-3}$)

$\lambda, \lambda_c, \lambda_g$ et λ_T : Conductivité thermique, respectivement de la cellule PV, du vitrage, et de l'isolant ($W.m^{-1}.K^{-1}$)

θ : Température adimensionnelle

θ_e : Température adimensionnelle ambiante

$\tilde{\theta}$: Température adimensionnelle filtré

θ^{LR} : Température adimensionnelle d'ordre réduit

μ : Viscosité (N.m/s)

μ_T : Viscosité turbulente (N.m/s)

Abstract

Key words: *Solar Energy Systems, Reduced order mathematical model, Numerical simulation, Optimization, PV/T combined systems, Heat and mass transfer*

This thesis consists to develop a simplified model approach for Photovoltaic / Thermal (PV / T) combined solar system based on state-space reduced order model.

The building integrated solar systems are getting high attention in these last decencies, as well as their increasing performance which requires high numerical methods to improve the design and reducing the costs. In one hand, the CFD methods are useful tool to predict the energy (mechanical and thermal) of combined PV/T systems, but it requires an expensive computing capacities and exorbitant calculation times, On the other hand, the PV/T systems can generate both the electrical and thermal flows, and requires an easily and performant optimization model. An alternative is to develop methods that are adapted to the physical problem under consideration, treating the multi-physics aspect while remaining in a reasonable data size and reduced computing time.

The first part of the current thesis consists to develop a mathematical model which consists of reducing the dimensions of the governed equations. Based on the symmetry of the geometry, the system is subdivided into control areas which governed by the dimensionless Biot (Bi) and Fourier (Fo) numbers. The obtained results in dynamic mode can provide output key parameters, more particularly the electrical and thermal efficiencies and the dissipated hydrodynamic power. The advantage of this approach lies in the simplification of the resulting model, which is represented by a single state-space representation that groups all the physical elements of the system into dynamic mode, i.e. in continuous variation of the boundary conditions. This model groups the fundamental variable, which is the temperature, and two type parameters, which are the control parameters and the design parameters. In addition, the reduced order model can be integrated into real-time operation

of building-integrated PV / T (BIPV/T) systems in order to support the control and management of intervening flows.

In order to validate the use of our model, it is necessary to test it for several cases of Building Integrated PV/T systems (BIPV/T). For this reason, four major configurations were studied and discussed in a linear approach; the found results show a good agreement with experimental works. A second level has been developed as part of our thesis work, which is the non-linearity in combined PV / T and BIPV/T systems; in particular, bilinear models have been developed with the same strategy which best models the thermal behavior in BIPV/T systems.

The second issue, related to Multi-physics aspect. Furthermore, in order to evaluate the sensitivity of the parameters, a parametric optimization has been made with dimensionless numbers. However, parametric optimization studies remain limited and insufficient because of the single-objective resolution of the optimization problem, whereas our system manifests a mixed and multi-physics behavior with contradictory nature. To do this, a multi-objective optimization is introduced with three objective functions using the NSGA-II genetic algorithm. The originality of our method is to use the algorithm in dynamic mode in order to choose the design of the optimal system. The found results can contribute to the design of BIPV/T systems and optimize their operation.

Résumé

Cette thèse porte sur le développement d'une approche pratique de modélisation/simulation des systèmes solaires combinés Photovoltaïques/Thermiques PV/T. Il s'agit d'une approche basée sur un modèle d'ordre réduit en représentation d'état (ORRE). En effet, les systèmes solaires thermiques, électriques et combinés intégrés aux bâtiments possèdent des spécificités permettant de s'affranchir des méthodes numériques classiques (mécanique des fluides numérique et thermique numérique). Ces méthodes sont réputées dans le domaine de l'aérodynamique, de l'aéraulique...etc. Par contre, dans le domaine du mix-énergétique tels que celui considéré dans ce mémoire, l'application directe de ce modèle peut conduire à des dépassements des capacités mémoire ou des temps de calcul exorbitants. Une alternative est de développer des méthodes adaptées au problème physique considéré, en traitant l'aspect multi-physique toute en restant dans une taille de données raisonnable et du temps de calcul réduit. La méthodologie de modélisation consiste à réduire les dimensions des équations qui régissent le problème. En se basant sur la symétrie du système, puis en découpant le système en zones de contrôle basées sur une valeur moyenne gouvernée par les nombres adimensionnels de Biot (Bi) et de Fourier (Fo). Les résultats obtenus en fonctionnement dynamique pourront nous fournir des paramètres de sorties, plus particulièrement, les rendements électrique, thermique et la puissance de circulation du fluide caloporteur. L'avantage de l'approche proposée réside dans la simplification du modèle résultant, qui est représenté par un seul système d'équations algébriques en représentation d'état regroupant tous les éléments physiques du système en fonctionnement dynamique (conditions aux limites variables dans le temps). Ce modèle regroupe la variable fondamentale qui est la température, et les deux types de contrôle et de conception. De plus, le modèle d'ORRE est intégrable dans le fonctionnement en temps réel des systèmes PV/T intégrés aux bâtiments (PV/T-Bât) afin d'accompagner leurs régulation et gestion des flux mise en jeu. Le modèle ainsi proposé a fait l'objet d'une validation où les résultats numériques ont été comparés aux résultats

expérimentaux. En effet, quatre configurations ont été étudiées et évoquées dans une approche linéaire. Les résultats obtenus montrent une cohérence tolérable entre les résultats expérimentaux, et numériques. Cette cohérence a été évaluée en termes d'incertitude entre les résultats du modèle et le cas étudié expérimentalement. Le cas d'un système non-linéaire a été également abordé. En effet, rares sont les travaux qui ont été publiés mettant en valeur les phénomènes non-linéaires dans les systèmes complexes PV/T-Bât, Ainsi, on a développé avec la même stratégie, des modèles bilinéaires qui modélise le mieux possible le comportement thermique dans les systèmes PV/T-Bât. Une étude d'optimisation du système multi-physique en introduisant une étude paramétrique est menée en terme afin d'étudier la sensibilité des paramètres sur le rendement énergétique. Cependant, les études d'optimisation paramétriques restent limitées et insuffisantes à cause de la résolution mono-objectif du problème d'optimisation, alors que notre système manifeste un comportement combiné et multi-physique de nature contradictoire. Pour ce faire, une optimisation multi-objectifs est introduite avec trois fonctions objectif en employant l'algorithme génétique NSGA-II. L'originalité de notre méthode est d'employer l'algorithme en régime dynamique afin de choisir la conception du système la plus optimale. Les résultats trouvés peuvent contribuer à améliorer la conception des systèmes PV/T-Bât et l'optimisation de leur fonctionnement.

Liste des tableaux

Tableau 1: caractéristiques de différentes familles technologiques des cellules solaires.....	42
Tableau 2: Expression de différentes résistances et capacités déduites de l'analogie électrique ..	67
Tableau 3: Expression des coefficients de transfert de chaleur globale dans chaque milieu du système étudié	95
Tableau 4: Caractéristiques géométriques et thermo-physique du système PV/T à eau.....	99
Tableau 5: propriétés thermo-physiques du système	128
Tableau 6: Les paramètres de conception du système utilisés pour l'optimisation.....	174
Tableau 7: Les différentes valeurs sélectionnées à partir du modèle d'optimisation NSGA-II.....	176

Liste des figures

Figure 1: Contexte Géo-énergétique, environnemental, et économique liés par des contraintes coûts, qualité, et confort.....	25
Figure 2: Evolution de la réglementation thermique en France	35
Figure 3: Densité de puissance solaire en fonction de la longueur d'onde et l'énergie maximale absorbable.....	40
Figure 4: Evolution du rendement des cellules PV dans le monde rapporté par le Laboratoire américain NREL, 2018	41
Figure 5: Rendement de conversion normalisée à la valeur de 25 ° C en fonction de la température pour différentes technologies de cellules PV. Gamme de températures de fonctionnement. (données reportés par:[37]).....	45
Figure 6: Coupe transversale d'un capteur solaire thermique plan [44]	50
Figure 7: Capteur solaire thermique sous-vide.....	51
Figure 8: Coupe transversale de modèles expérimentaux PV / T pour le chauffage de l'eau et de l'air.....	52
Figure 9: Différentes configurations conçues pour les systèmes PV/T.....	52
Figure 10: Schéma équivalent d'un système PV, (a): courbe I-V, (b): circuit équivalent	57
Figure 11: caractéristique I(V) , (a) influence de la température à flux constant (1000W/m ²), et (b): Influence de flux solaire à température constante (25°C).....	58
Figure 12: Analogie électrique (ou approche RC) d'un capteur PV/T à eau, (a) : Schéma en régime dynamique, et (b) : en régime permanent.....	63
Figure 13: Exemple d'un capteur PV/T à eau	67
Figure 14: Propagation de la chaleur dans un modèle mur	80
Figure 15: Schéma électrique équivalent (méthode RC de type alpha et beta)	85
Figure 16: Modèle d'un capteur PV/T à air	86
Figure 17: Schéma d'équivalence en analogie électrique dans l'espace dimensionnel et dans l'espace adimensionnel.....	90
Figure 18: Représentation la méthode du réseau des coefficients substitutifs	90
Figure 19: Montage de caractérisation expérimentale de validation : chambre de conditionnement contenant un échantillon d'un mur composé d'une couche de béton+isolant.....	93
Figure 20: Profil de température de la face externe prédit numériquement comparé avec celui déterminé expérimentalement.....	94
Figure 21: Modèle transversale d'un capteur PV/T à eau.....	95
Figure 22: Donnée météorologique utilisé comme fichier source de conditions initiaux et aux limites du système. (a): Flux solaire globale, (b): Température ambiante horaire sur une année, et (c): vitesse du vent sur 30minutes dans une année.....	98
Figure 23: Profil de température dynamique sur chaque couche du système PV/T à eau	100
Figure 24: profil de la température de l'eau en fonction de l'axe d'écoulement pour différents instants calculés à partir de la condition initiale	101
Figure 25: profil de température de l'eau en fonction de la longueur du tube et de temps	102
Figure 26:profil de la température en fonction de la longueur du capteur PV/T-Eau et du temps	102

Figure 27: Rendement électrique instantané calculé pour différents instants du rayonnement solaire.....	103
Figure 28: Système PV/T-Air à double étage, configuration (a) PV au milieu du capteur, et configuration (b): PV à la surface du capteur.....	105
Figure 29: Différentes configurations possibles dans les systèmes PV/T-Air modélisable par le modèle d'ORRE.....	109
Figure 30: profil de la température de l'air le long de l'écoulement pour différents instant calculés à partir de la condition initiale	111
Figure 31: Représentation du profil thermique de différentes couches du système double-étage (a)	112
Figure 32: profil de température de l'air en fonction de la longueur du tube et du temps	112
Figure 33: Rendement thermique journalier du système (b) pour six jours.....	113
Figure 34: profil de la température en fonction de la longueur du système PV/T-Air double-étage (b) et du temps.....	113
Figure 35: Rendement électrique instantané sur une journée.....	114
Figure 36: profil de la température de l'air le long de l'écoulement pour différents instant calculés à partir de la condition initiale	115
Figure 37: Rendement thermique journalier du système (a).....	115
Figure 38: profil de température de l'air en fonction de la longueur du tube et de temps	116
Figure 39: Représentation du profil thermique de différentes couches du système double-étage (a)	116
Figure 40: profil de la température en fonction de la longueur du système PV/T-Air double-étage (a) et du temps.....	117
Figure 41: Représentation du profil thermique de différentes couches du système double-étage (a) avec les conditions aux limites (température ambiante+ rayonnement solaire).....	117
Figure 42: Rendement électrique instantané dans une journée	118
Figure 43: Modèle transversale du système PV/T-Mur Trombe étudié	120
Figure 44: Profil de température instantané de différentes couches du système PV/T-MT dans une journée claire du mois d'aout	122
Figure 45: profil de température en fonction de la longueur d'échange interne du système PV/T-MT pour différentes instants à partir de la condition initiale	123
Figure 46: Rendement thermique journalier du système PV/T-MT	124
Figure 47: Profile de température de la couche PV du système PV/T-MT	124
Figure 48 : Rendement électrique instantané du système sur 5 jours	125
Figure 49: Schéma transversale du système PV/T à eau intégrée dans la façade avec les plaques MCP Energin® à l'intérieur du building	127
Figure 50: Schéma de différents éléments du système PV/T-MCP-façade. (1): Panneau PV/T semi-transparent, (2): Lamme d'air, (3): Absorbeur métallique, (4): Tubes d'eau, (5) Isolant thermique, (6): Mur en brique réfractaire, (7) Plaque MCP Energin®	127
Figure 51:Chambre conditionnée pour caractériser la paroi passive + MCP.....	130
Figure 52: montage expérimental (chambre conditionnée avec des échantillons de taille 20X15 cm ²)	130
Figure 53: 3 étapes de conditionnement expérimental en régime dynamique	131
Figure 54: L'effet du volume de la pièce sur la température de l'air intérieur pendant les journées ensoleillées d'hiver.....	133

Figure 55: Profil thermique dynamique de différents composants du système sans intégration de la paroi MCP en période hivernale.....	134
Figure 56: L'effet du volume de la pièce sur la température de l'air intérieur pendant les beaux jours d'été	135
Figure 57: Profil thermique dynamique dans les différentes couches du système de mur solaire avec du MCP et sans gains internes, contribution en hiver	135
Figure 58: Comportement thermique dynamique d'un système solaire mural à fortes pertes thermiques	136
Figure 59: Comportement thermique dynamique du capteur solaire PV/T intégré au mur composite à haute performance.....	137
Figure 60: Variation thermique dynamique dans les différentes couches du système de mur solaire intégrée de la paroi MCP et ses contribution aux gains internes	138
Figure 61: Production (W) instantanée de la chaleur par du système PV/T et des gains solaires pour une période estivale du 1 ^{er} au 3 Juillet.....	139
Figure 62: la température de sortie calculée de l'eau et la température moyenne dans le capteur solaire.....	139
Figure 63: Schéma de principe de concentration solaire.....	144
Figure 64: mini-concentrateurs basé sur la technologie LGBC développé par Baig et al. 2013 [87]	145
Figure 65: Système CPV/T intégré dans une façade de bâtiments	146
Figure 66: Modèle présenté pour l'étude intégré dans un mur Trombe	146
Figure 67: Profile de température d'air pour différents instant à partir de la conditions initiale .	151
Figure 68: profil de température de l'air en fonction de l'axe de l'écoulement en temps réel.....	151
Figure 69: Profil de température de chaque couche du système prédits à l'aide du modèle d'ORRE	152
Figure 70: Profil de température du PV en fonction de la longueur de concentrateur en temps réel	152
Figure 71: Rendement électrique instantané du système CPV/T	153
Figure 72: Rendement thermique journalier	153
Figure 73: Représentation de la variation globale du rendement électrique en fonction des paramètres de conception et de contrôle du système qui varient simultanément dans une période journalière typique.....	159
Figure 74: Influence des nombres Fo à Bi constant en temps réel sur le rendement électrique dans des périodes journalières typiques	160
Figure 75: Profil du rendement électrique en fonction du nombre de Biu1 à Foi constants en temps réel	162
Figure 76: Profil du rendement électrique en fonction du nombre de Biu2 à Foi constants en temps réel	162
Figure 77: Représentation de la variation globale du rendement thermique journalier en fonction des paramètres de conception et de contrôle du système qui varient simultanément dans une période journalière typique	164
Figure 78: Profil du rendement thermique en fonction de la variation du nombre Biot en gardant les coefficients Fo constants en temps réel	165
Figure 79: Influence des nombres Fo à Bi constant en temps réel sur le rendement thermique journalier dans des périodes journalières typiques.....	166

Figure 80: influence du nombre de Biot de l'eau sur le rendement électrique en temps réel.....	167
Figure 81: Influence du nombre de Biot air sur le rendement électrique	168
Figure 82: Profil du rendement électrique en fonction du Bi air et de Bi eau	169
Figure 83: variation du rendement thermique journalier en fonction des paramètres de contrôle de l'écoulement interne du système	170
Figure 84: variation du rendement thermique journalier en fonction des paramètres de contrôle de la lame d'air et de l'écoulement interne du système.....	170
Figure 85: Influence des nombres Fo à Bi constant en temps réel sur le rendement thermique journalier dans des périodes journalières typiques.....	171
Figure 86: Paramètre.....	174
Figure 87: Variation de la température du système en fonction du temps, et la variation de flux solaire globale G.....	175
Figure 88: Variation de la température de l'air chauffé en fonction du temps et de la longueur de la conduite.....	176

Introduction Générale

Face au changement climatique, l'enjeu de réduire l'empreinte environnementale des activités humaines constitue un axe prioritaire. Le secteur du bâtiment, consommant environ 30 % de la consommation énergétique totale, et celle-ci représente une part très importante dans la balance environnementale.

L'axe du développement des énergies nouvelles manifeste un grand intérêt d'une large catégorie d'organismes gouvernementaux, non-gouvernementaux et tous autres types d'institutions. L'énergie solaire représente une part importante du marché du renouvelable. Tous les indices économiques montrent que ce marché connaît une croissance exponentielle. Plus particulièrement, le solaire photovoltaïque et thermique connaît une évolution expansive dans l'amélioration des performances et du rapport qualité/prix.

En parallèle, les efforts de recherche effectués constituent la base de toute évolution. C'est dans cet esprit, que le présent travail est proposé, en se focalisant sur l'aspect synergétique du couplage des systèmes solaires intégrés aux bâtiments. En d'autres termes, c'est une amélioration des performances énergétiques des systèmes solaires intégrés à l'enveloppe du bâtiment, à moindres coûts tout en respectant l'environnement et en préservant nos ressources.

Dans ce mémoire, une nouvelle approche de modélisation du couplage des systèmes solaires intégrés aux bâtiments est développée. L'intégration des systèmes solaires photovoltaïques et thermiques aux bâtiments abrégés (PV/T-Bât) représente le point central et le cœur de ce travail, qui vise à améliorer d'une part les performances des systèmes solaires et d'autre part, l'enveloppe thermique du bâtiment. Cette approche est basée sur la réduction des dimensions spatiales des équations régissant le comportement multi-physique du système. De plus, une méthode adimensionnelle a été développée, faisant ainsi apparaître des nombres classiques de Fourier maximale et de

Biot en tant que paramètres de conception et de contrôle de fonctionnement du couplage PV/T-Bât. Le système d'équations obtenu est présenté sous forme d'une représentation d'état. Cette formulation permet d'identifier les paramètres d'état (sous forme de matrice d'état) et des paramètres de contrôle (sous forme de matrice de commande), ainsi que des paramètres externes jouant le rôle de la source et des conditions aux limites. Le modèle générale général développé est dit d'ordre réduit en représentation d'état (ORRE).

Cette thèse est structurée en sept chapitres. Le premier chapitre aborde les considérations géo-environnementale et énergétiques ainsi que les lois qui régissent la gestion énergétique à l'échelle nationale marocaine et française bien qu'europpéen.

Le deuxième chapitre présente une synthèse bibliographique sur les systèmes PV et thermiques, et discute les différents aspects mises en jeu.

Le chapitre trois aborde la modélisation linéaire d'ordre réduit en représentation d'état des systèmes PV/T intégrés aux bâtiments. Il regroupe un aspect théorique de modélisation avec une nouvelle approche simplifiée, et un aspect appliqué sur le couplage du PV avec la thermique. Quatre systèmes ont fait l'objet d'une telle modélisation : système PV/T à air, système PV/T à eau, système PV/T-mur trombe et système intégrant un écoulement d'air dans un capteur PV/T à air à double-étage avec deux configurations différentes. Enfin, une étude de cas de l'intégration du système PV/T-Eau à l'enveloppe d'un bâtiment avec et sans matériau à changement de phase en vue d'améliorer les performances thermiques du système globale.

Le chapitre présente le développement d'une approche d'ordre réduit non-linéaire des systèmes PV/T. Dans une première étape, une étude sur un concentrateur solaire PV/T (CPV/T) intégré à l'enveloppe externe d'un bâtiment, en vue d'améliorer sa performance énergétique a été présentée. La non-linéarité du système se manifeste sous forme multilinéaire. L'intérêt de ce

modèle est de quantifier les termes non-linéaires dans le modèle thermique. Dans une deuxième étape, le couplage du PV/T-Bât avec des matériaux à changement de phase (MCP), constituant une bilinéarité à travers la variation de la capacité thermique du MCP, a été étudié et analysé. Le modèle d'ORRE est a été appliqué dans le but d'identifier et quantifier les termes non-linéaires.

Le chapitre cinq est consacré à une étude paramétrique visant l'étude de sensibilité des paramètres de contrôle (nombre de Biot, Bi) et de conception (nombre de Fourier, Fo).

Le dernier chapitre a fait l'objet d'une introduction à l'optimisation multicritère des systèmes PV/T. En effet, l'aspect multi-physique des systèmes PV/T-bât conduit à un conflit d'intérêt entre l'amélioration de la performance thermique et l'amélioration du rendement électrique. D'où une stratégie basée sur un algorithme d'optimisation multi-objectif est introduite.

Chapitre I : Contexte Géo-Environnemental et Energétique : Aperçu global

1. Introduction

La consommation énergétique aux bâtiments atteindra 50% d'ici 2050 [1], ce secteur consomme près d'un tiers de la consommation d'énergie finale mondiale¹, ce qui le rend responsable d'environ un tiers des émissions totales de dioxyde de carbone (CO₂) qui sont liées directement et indirectement² à l'énergie. Il a donc un rôle clé à jouer pour atteindre les objectifs énergétiques et environnementaux mondiaux. La demande d'énergie dans les bâtiments augmente de près de 50% entre 2010 et 2050. Suivre une voie efficace sur le plan énergétique et à faible teneur en carbone peut entraîner une réduction de 25% de la consommation totale d'énergie par rapport au scénario habituel. Cela représente des économies d'énergie de plus de 40 Exa-joules (EJ), ce qui équivaut à la consommation d'énergie actuelle en Inde et en Russie combinées. La consommation d'énergie et la réduction des émissions dans le secteur du bâtiment sont essentielles pour une stratégie à long terme visant à réduire l'intensité du carbone émis à l'atmosphère.

Avec plus de la moitié du secteur immobilier actuel qui devrait encore exister en 2050 et considérant que les bâtiments peuvent durer plus de 100 ans, les actions ne peuvent se limiter à des contrôles plus stricts sur les nouvelles constructions. Les investissements supplémentaires nécessaires à transformer le profil d'énergie et d'émissions des bâtiments sont estimés à 12 billions de dollars (USD) d'ici 2050. Les économies de coûts de carburant résultant de ces investissements compenseront largement les coûts d'investissement supplémentaires.

¹ La consommation finale d'énergie est la somme de la consommation par les différentes utilisations finales (bâtiments, industrie, transport et agriculture).

² Les émissions de CO₂ indirectes concernent uniquement les émissions en amont provenant de la production de chaleur et d'électricité.

Dans un contexte environnemental, des plans d'accès aux systèmes d'énergie solaire et renouvelables sont actuellement délivrés par la banque internationale pour les pays développés et aux pays en voie de développement afin de réduire l'empreinte environnementale. Le secteur du bâtiment utilise une variété de technologies qui sont intégrés à son enveloppe ainsi que des composantes actives, tels que les systèmes de chauffage et de refroidissement, l'eau chaude sanitaire, l'éclairage, les appareils électroménagers et d'autres produits de consommation, sans oublier les équipements de bureau et de service. Selon la banque internationale, de nombreuses mesures qui sont assumés rentables et devraient être appliqués. D'autres peuvent devenir rentables avec un soutien gouvernemental. Il existe également de nombreux domaines qui sont associés à des synergies du couplage et de l'intégration des systèmes énergétiques, se traduiront par des options à moindre coût et le plus grand potentiel d'économie d'énergie.

Dans ce chapitre, trois contextes (Géoéconomique, Géo-énergétique et Géo-environnementale abrégé « Géo-3E ») sont introduits dans une approche holistique. Afin de mettre en évidence le lien entre les trois vecteurs Energie, Environnement et Economie, on se focalise sur les différentes lois, et politiques d'états européens et nord africains selon leurs contextes énergétique et environnemental. Comme il est présenté par la Figure 1, les trois contextes géo-environnemental, énergétiques et économiques sont schématisés en équilibre, mais chaque contexte est soumis aux trois contraintes : coûts, confort humain, et qualité.

L'organisation du présent chapitre est la suivante : dans la première partie, les différents contextes environnementaux et énergétiques sont introduits sur l'intégration des systèmes solaires aux bâtiments en introduisant les différentes lois, labels et réglementation de différents pays. Ensuite, les différentes réglementations sur l'efficacité énergétique dans le l'Europe et dans les pays méditerranéens, plus particulièrement le Maroc sont discutés selon les avantages et les inconvénients que représente chacun.

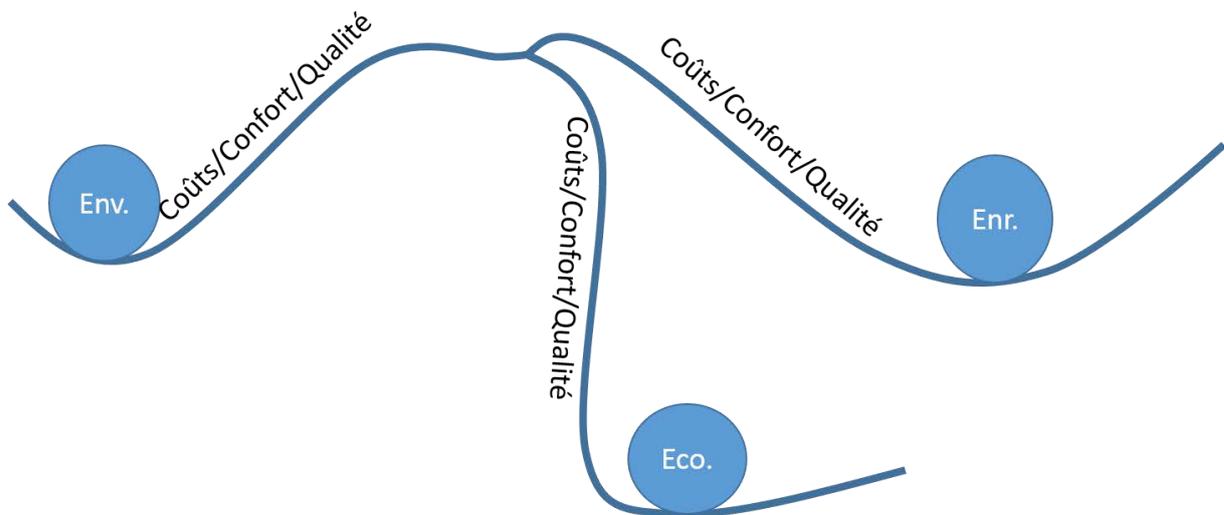


Figure 1: Contexte Géo-énergétique, environnemental, et économique liés par des contraintes coûts, qualité, et confort

Enfin, un bilan du chapitre qui ouvre une perspective vers le choix d'un système solaire intégrable au bâtiment.

2. Contextes d'intégration des systèmes solaires aux bâtiments

2.1. Contexte environnementale

L'énergie est un facteur essentiel à la richesse et au bien-être dans le monde, malgré cela, ses effets intrusifs à l'environnement par les processus de conversion et de la génération énergétique sont considérés dangereux. On adopte dans cette partie les notions des réglementations environnementales ainsi que les différents labels associés à la gestion de l'énergie.

2.1.1. Labels environnementaux

Les stratégies de la réglementation environnementale dans le secteur des énergies nouvelles et de l'efficacité énergétique aux bâtiments consistent sur l'établissement de nombreuses lois et décisions législatifs permettant la garantie d'une synergie entre la production de « l'énergie propre » et de la protection de l'environnement. Les différentes définitions, et réglementations qui existent dans ce cadre sont reportées ci-après :

- **Le crédit-Carbone**

Sur le marché du carbone, un crédit carbone est une unité correspondante à une tonne d'équivalent du dioxyde de carbone (CO_2). En effet, le marché du carbone concerne plusieurs types de gaz à effet de serre (GES), et pas uniquement le dioxyde de carbone. Chaque type de GES possède un potentiel de réchauffement global plus au moins important. Donc, pour connaître la contribution des émissions de chaque type de gaz, un coefficient spécifique est appliqué pour convertir la tonne en tonne d'équivalent CO_2 .

- **L'écolabel européen**

L'écolabel européen est institué par le règlement de la communauté économique européenne(CEE) no 880/92 du conseil du 23 mars 1991, peut être décliné dans tous les pays de l'Union Européenne et en Suisse, après négociation et adoption d'un cahier des charges (voté à la majorité qualifiée par les représentants des États membres).

L'objectif d'Ecolabel européen est de promouvoir la conception, la production, la commercialisation et l'utilisation de produits ayant une incidence moindre sur l'environnement pendant tout leur cycle de vie et à mieux informer les consommateurs sur les produits qu'ont des effets néfastes sur l'environnement, sans pour autant compromettre la sécurité du produit ou des travailleurs, ou influencer de manière significative sur les qualités qui rendent le produit propre à l'utilisation [2]. Il est basé sur une « approche globale », systématique, qui passe par une analyse du cycle de vie (ACV) du produit, de sa fabrication (incluant le choix des matières premières) à son élimination ou recyclage en passant par sa distribution et sa consommation et utilisation. Ainsi, chaque type de produit doit répondre à un cahier des charges précis qui prend en considération tout le cycle de vie du produit (matières premières, distribution, consommation et recyclage). À la demande des États membres, l'écolabel européen a exclu de son champ d'application : les produits agro-alimentaires, boissons et produits pharmaceutiques.

- **La certification HQE™**

La certification HQE™ pour le Bâtiments tertiaire qui s'applique aux logements neufs est un ensemble de procédures techno-législatives qui traduisent un équilibre entre le respect de l'environnement, la qualité de vie et la performance économique sous une approche globale. Quelque soit le lieu, HQE™ se base sur des grands principes, parmi lesquels on trouve une élaboration d'un référentiel scientifique qui s'enrichisse continument, une vérification sur site par des auditeurs indépendants assuré par des audits en « tierce partie intégrale » menés en présence des acteurs de l'opération assurent la transparence et la crédibilité du processus d'évaluation des performances, élaboration d'un système de management au cœur du dispositif dans la logique de démarche qualité qui permet l'obtention de la certification, et finalement, un processus qui permet aux équipes du projet cible de fixer des objectifs dans le contexte particulier de l'opération et fait ses propres choix de solutions architecturales et techniques.

- **La certification DGNB**

La certification DGNB « *Deutsches Gütesiegel für Nachhaltiges Bauen* », est un système allemand de certification environnementale, sa première version apparue en 2008 pour les bâtiments administratifs, ensuite s'élargie pour les autres secteurs de bâtiments en 2009 notamment le commercial, l'industriel et les écoles, ensuite en 2011 ce système élabore des certifications qui concerne des projets « *pilotes* » dans l'aménagement. Ses principaux buts sont de donner plus de valeur aux constructions dans la matière de confort, de valeurs économiques et d'exploitation, ainsi que la qualité de construction. Réduire les impacts environnementaux des chantiers et des bâtiments, mettre en place des éléments de classification et comparaison des bâtiments, le « *Check-list* » de bonne pratique pour la construction d'un bâtiment. La direction du regard au Cycle de Vie de Bâtiment. Ainsi que la minimisation des risques économiques (maîtrise du coût, stabilité de valeur, et maintenance améliorée...). Contrairement à la certification HQE™, La certification DGNB peut être appliquée pour les anciennes et les bâtiments neufs, il consiste sur sept démarches majeures :

- Un pré-Check qui vérifie la « *certificabilité* » du bâtiment.
- Une analyse des potentiels du projet (Efficacité énergétique du bâtiment, ratio surface nette/surface brute, flexibilité du bâtiment, les matériaux utilisés, et la revitalisation d'une friche industrielle, etc.)
- Une définition d'un niveau d'excellence (Or, Argent, Bronze)
- Un pré-certificat pour la vente/location des surfaces.
- Un accompagnement du projet par la certification DGNB.
- Une approbation des documents des projets par la DGNB
- La certification finale.

- **La certification LEED**

Développé par le conseil américain du bâtiment vert « Green Building Council », la certification LEED (*Leadership in Energy & Environmental Design*) est un système américain d'identification, de mise en œuvre et de mesure de la maintenance, la conception, et la construction des bâtiments verts. Les objectifs du système LEED est principalement d'accompagner le plan contre le changement climatique global, améliorer la qualité de vie et de confort humaine et de bien-être, de protéger et restaurer les ressources d'eau potable, de protéger, améliorer, et restaurer la biodiversité de l'écosystème, promouvoir la durabilité à travers la gestion et la régénération le cycle de vie des ressources de la matière, et finalement assuré la prospérité, l'équité sociale, la justice environnementale et la santé de la communauté. La certification LEED est basé sur un système de classification, un processus de sélection est d'abord créé entre le propriétaire du projet et les l'équipe de certification afin de choisir la catégorie des exigences et la taille de la demande liée au bâtiment. Ensuite, une documentation est soumise pour la certification, le projet passe par des examens de l'étape préliminaire jusqu'à une étape finale. L'examen préliminaire fournit des conseils techniques sur les crédits qui nécessitent des travaux supplémentaires pour la réalisation, et l'examen final contient un score final qui permet un niveau de certification du projet. La décision peut faire l'objet d'un appel si une équipe estime qu'une considération

supplémentaire est justifiée. La certification LEED possède quatre niveaux de certification, en fonction des seuils des points atteints :

- Certifié, 40-49 points
- Argent, 50-59 points
- Or, 60-79 points
- Platinum, 80 points ou plus

- **La certification BREEAM**

BREEAM (Building Research Establishment's Environmental Assessment Method) est un système de certification des bâtiments créé au US en 1990. En nombre de bâtiments certifiés, BREEAM est le système de certification le plus important au monde avec plus de 200 000 bâtiments certifiés et plus d'un million enregistré.

BREEAM a pour objectifs de :

- Apporter des connaissances du marché pour les bâtiments Ayant un faible impact environnemental ;
- S'assurer que les meilleures pratiques environnementales sont employées dans la préparation, la conception, la construction et l'exploitation des bâtiments et de l'environnement bâti au sens large ;
- Définir une norme de performance fiable et rentable, allant au-delà des exigences de la réglementation ;
- Inciter le marché à produire des solutions novatrices et rentables pour minimiser l'impact environnemental ;
- Permettre aux organisations de prouver leurs progrès par rapport aux objectifs environnementaux d'entreprise.

Tous ces objectifs cités, doivent être maintenus afin de respecter des principes fondamentaux qui se reposent sur la qualité environnementale, la récompense positive pour les mesures et les décisions prises par une approche flexible, utilisation d'une base scientifiques solide et de meilleurs pratiques afin de déterminer et quantifier les normes de performances rentables et rigoureuse permettant de définir la qualité environnementale, ainsi que de fournir un

cadre international commun d'évaluation conçu pour répondre au contexte local, notamment en terme de réglementation, de climat et de secteur.

- **L'ECO-CFC**

Les fiches de construction écologique selon le code des frais de construction (CFC) (ECO-CFC) sont des outils pour réaliser des études et des mises en soumission basées sur des critères écologiques et durables. Elles fournissent aussi des indications pour sélectionner les matériaux ou procédés de mise en œuvre adéquats. Il est recommandé d'utiliser les fiches ECO-CFC avant et pendant la mise en soumission ; il convient également de suivre les directives précisées dans ces fiches durant l'étude de projets déjà, et de les mentionner dans le devis général.

2.2. Contexte énergétiques et confort thermique

Aujourd'hui l'économie de l'énergie aux bâtiments est principalement et uniquement liée aux normes disponibles lorsque leurs performances sont décrites. Cette approche reste limitée en termes de qualification formelle pour répondre aux exigences des règles statutaires et donner confiance aux gens. Au-delà de ces faits, les bâtiments éco énergétiques d'aujourd'hui doivent être connus non seulement dans le contexte de la technologie existante, mais aussi dans l'évolution de l'équipement et du concept de conception utilisés en synchronisation avec la contemporanéité de la science.

3. Aspects de l'efficacité énergétique aux bâtiments

Le concept effectif de l'efficacité énergétique est un concept holistique qui regroupe plusieurs aspects interdisciplinaires et multi-physiques. Dans cette partie on est sensé à citer quelques aspects importants en prenant en considération le confort de l'être humain qui est le point focal de notre étude.

3.1.1. Aspect Architecturale

Conception des bâtiments basée sur la performance : La conception du bâtiment repart sur des aspects architecturaux permettant de maximiser les

profits naturels pour le rafraîchissement et le chauffage, ainsi que de minimiser les pertes. Cela, avec un design basé sur les performances pourra jouer une influence importante.

Le design passif : la configuration passive qui prend en considération dans un premier lieu la disposition géographique, l'enveloppe thermo-physique, la géométrie du bâtiment, ainsi que l'infiltration peut mettre une contribution importante pour le bâtiment à haute performance énergétique (HPE) et améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments. La stratégie passive demande non-seulement l'investigation sur l'impact individuelle de ces facteurs cités, mais aussi une approche holistique qui prennent en considération l'interaction des effets intervenants.

Le NZEB [3]: « Net Zero Energy Buildings », ce concept été introduit depuis 2006 par la communauté internationale qui a pour objectif de soutenir stratégiquement tous les démarches qui mènent vers une consommation de 0 kW net dans les bâtiments. La directive européenne des performances énergétiques des bâtiments (EPBD) qui est met en place le mois de Mai 2010 engage des moyens stratégiques pour soutenir l'aspect passif aux bâtiments. Le programme EISA 2007 est un programme américain qui vise à assurer l'indépendance énergétique dans les bâtiments

3.1.2. L'hygrothermique

Plusieurs travaux récents ont été développés dans l'étude du comportement hygrothermiques dans les murs et les espaces conditionnées. Non seulement les investigations menées par les travaux de recherches [4] mais aussi les réglementations et les standards imposés aux constructeurs qui contribuent à lutter contre les problèmes de moisissure gênée par le transfert de masse aux milieux humides [5, p.]. Le problème lié à l'humidité cause le développement de moisissures et de l'allergie. A l'échelle d'une paroi, la majorité des matériaux de construction peuvent être considérés comme des milieux poreux ouverts – montrant une large gamme de rayons de pores, allant de 10^{-9} à 10^{-2} m – contenant un mélange d'eau, de vapeur et d'air dans les pores. Tous les constituants interagissent mais en raison de la structure complexe des pores

impliqués, une description précise au niveau microscopique reste plutôt difficile. Certains auteurs ont néanmoins pris ce niveau comme point de départ pour la description du transfert d'humidité et de chaleur dans les milieux poreux [4]. Une approche de moyenne donne alors la description macroscopique. D'autres auteurs [6] ont utilisé une approche phénoménologique, en partant directement du point de vue macroscopique. Les deux approches fournissent des équations macroscopiques pour l'humidité et le transfert de chaleur dans les milieux poreux. La technique de calcul de moyenne donne cependant plus de perspicacité dans les hypothèses requises. La description phénoménologique a cependant prévalu, et plusieurs modèles décrivant le transfert d'humidité et de chaleur dans les composants du bâtiment ont été développés sur cette base [7].

3.1.3. Apports et occupation internes

Les apports thermiques internes représentent la chaleur latente et sensible émissent d'un espace intérieur par différentes sources de chaleur, qui commencent par le métabolisme humain jusqu'au dispositif électroniques et électriques. Certains travaux de recherches [8]–[10] essaient de modéliser et comprendre le comportement de l'occupation internes dans les bâtiments.

3.1.4. L'aspect géo-réglementaire

- **Situation énergétique marocaine**

Le contexte énergétique actuel au Maroc prend une nouvelle directive depuis l'adoption de nouvelles stratégies qui ont particulièrement l'objectif de diminuer l'indépendance énergétique de l'extérieur. En 2010, le Maroc a lancé le projet de la plus grande centrale solaire au Monde d'une capacité de 500MW de mix-énergétique. Actuellement, le plan solaire marocain envisage installer une puissance de 2GWc électrique en 2020 qui sera accompagné par l'agence marocaine de l'énergie solaire (MASEN). En amont, d'autres mesures sont prisent en compte sur le plan de l'efficacité énergétique aux bâtiments. D'ailleurs, la stratégie énergétique nationale suggère de mesures dont certains ont été mis en œuvre, tandis que d'autres sont encore en cours. Le gouvernement s'est fixé comme objectif d'atteindre un gain d'efficacité

énergétique de 12% (contre un scénario de statu quo) d'ici 2020 et de 15% d'ici 2030.

En 2011, la loi sur l'efficacité énergétique (47-09) [11] a été promulguée, fixant des limites à la consommation d'énergie des équipements et appareils (appareils ménagers), bâtiments et véhicules, offrant des incitations énergétiques dans les transports routiers, les bâtiments et l'industrie, ainsi que prescrire des évaluations d'impact énergétique et des audits. Le règlement a été précisé par le décret 2-13-874 de 2014 qui définit les exigences d'efficacité énergétique pour les nouveaux bâtiments dans le secteur résidentiel et tertiaire en fonction des zones climatiques et définit un comité national sur l'efficacité énergétique dans les bâtiments dirigés par le ministère de l'énergie, des mines, de l'eau et de l'environnement.

Suite à la stratégie énergétique, le gouvernement a également pris des mesures immédiates [12] pour améliorer l'efficacité énergétique, notamment un programme d'installation de lampes à économie d'énergie (réduction de la demande de pointe de 173 MW et économies d'énergie de 700 GWh) et (à partir de 2008) modification de l'heure locale à GMT + 1 pendant l'été (conduisant à une réduction de la demande de pointe de 80 MW).

Situation énergétique européenne A l'échelle Européenne, la politique énergétique de l'UE envisage à l'horizon 2020 une stratégie qui entend favoriser la transition des ressources naturelles disponibles. En fait, le contexte est environnemental, car il permettra en même temps de réduire la facture énergétique ainsi que les émissions des GES et le réchauffement climatique. Dans ce cadre, l'UE s'est fixé d'ici à 2020 un triple objectif facile à retenir : 20-20-20 : (1) réduire de 20% la consommation d'énergie. (2) porter à 20% la part d'énergie consommée provenant de sources d'énergie renouvelable. Et (3) diminuer de 20% les émissions de gaz à effet de serre.

- **En France**

La consommation en France métropolitaine a atteint 260,5 Mtep en 2015. Près de 35% de cette énergie primaire est absorbée dans des opérations de transformation et de transport jusqu'au consommateur final. La quantité

d'énergie finale restante consommée en France s'est élevée à 162,2 Mtep. Sur ce total, près de 13 Mtep ne sont pas utilisées en réalité à des fins énergétiques mais pour leurs propriétés chimiques : plastiques, bitumes, etc.

Sur les 260,5 Mtep d'énergie primaire consommées en France, le ministère en charge de l'énergie considère(3) que près de 140 Mtep ont été produites sur le territoire national en 2015. Environ 90% de cette production française est convertie en électricité, avec des pertes de rendement importantes.

La réglementation thermique des bâtiments tient une partie importante dans la politique énergétique du pays depuis les années 70s.

RT74-RT2000 : La réglementation thermique française a débuté depuis le premier choc pétrolier de 1973. L'état français instaure la première réglementation thermique en 1974 (RT74). Visant à fixer un coefficient G ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$) de déperdition thermiques au travers les parois des bâtiments afin de réduire la consommation énergétique à 25%, par rapport à une estimation énergétique sur les bâtiments construits suivant les normes en vigueur entre les années 1950 et 1973 ($300 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{an}$). Ensuite, une longue série des RT, notamment, la RT1976, RT1980, RT1982, RT1988, RT2000, RT2005, et RT2012 ont été élaborée pour tous le type des bâtiments neufs et existants qui intégrant une approche globale, en tenant en compte de la production de l'eau chaude sanitaire (ECS), la ventilation, la climatisation, l'éclairage, le confort thermique, et l'intégration des énergies renouvelables. La figure 2 montre l'évolution de la consommation typique en ($\text{kWh/m}^2 \cdot \text{an}$) en fonction des RT développés sur chaque période durant les deux dernières décennies.

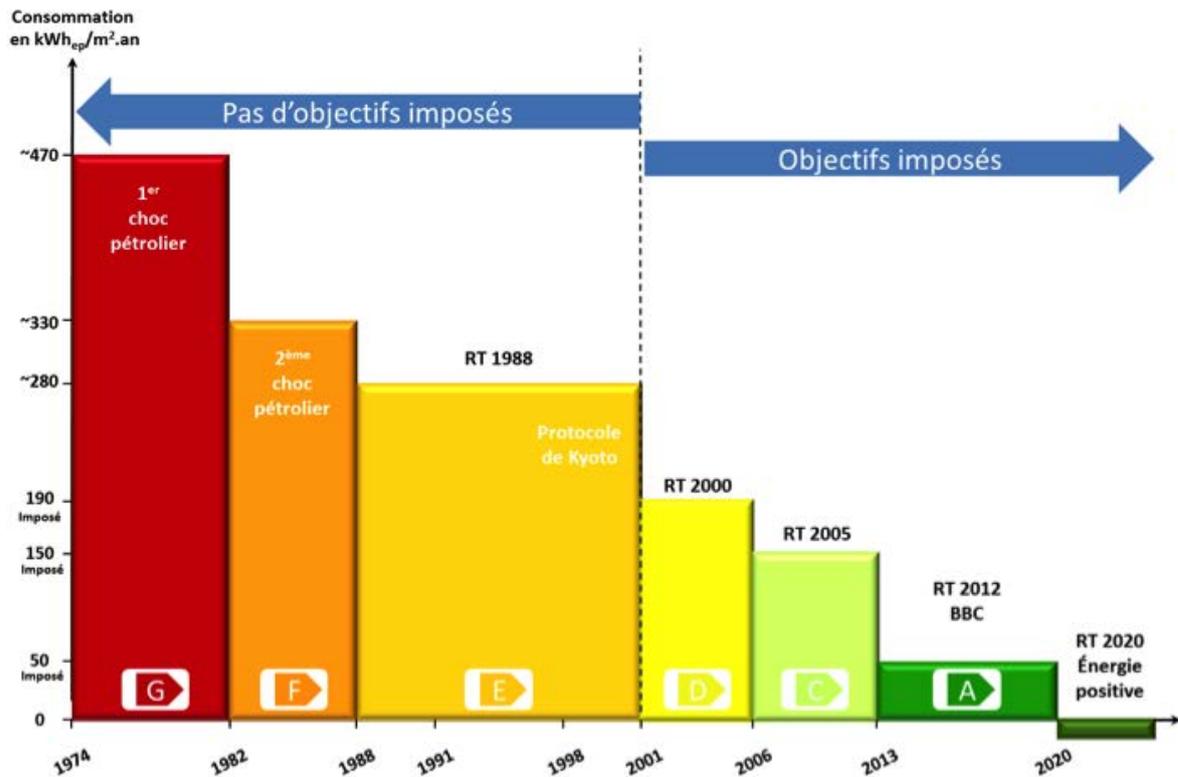


Figure 2: Evolution de la réglementation thermique en France

- **En Allemagne**

En Allemagne, les politiques énergétiques et environnementales sont étroitement liées. Le programme combiné de protection de l'énergie et du climat n'est qu'un exemple évident. Par le passé, de nombreuses autres réglementations visant à réduire l'utilisation de l'énergie visaient explicitement à réduire la pollution de l'environnement en même temps.

Dans le débat politique sur les coûts et les avantages de la promotion des technologies d'énergie renouvelable, les effets macro-économiques et de l'emploi de l'industrie des énergies renouvelables sont devenus une argumentation importante en faveur du cadre juridique établi par la loi sur les énergies renouvelables. Le ministère fédéral de l'Environnement (BMU) surveille régulièrement ces effets et signale que la contribution des énergies renouvelables à l'emploi a atteint 340 000 emplois en 2009.

Actuellement, la capacité installée des centrales électriques allemandes est de l'ordre de 143,3 GW. Cela signifie que si les facteurs de capacité étaient supposés être 100% (toutes les centrales électriques sont utilisées durant toute l'année), la production maximale d'électricité serait de 1255,3 TWh / an (143,3

GW x 8760h). Clairement, ceci est irréaliste en raison des coûts variables élevés des centrales électriques qui sont spécifiquement conçus pour servir uniquement des charges intermédiaires et de pointe. De plus, les centrales électriques dépendant des énergies renouvelables comme le vent ou le rayonnement solaire ne peuvent pas décider quand générer.

En réalité, la production d'électricité allemande s'est élevée à 597 milliards de kWh (= 597 TWh) en 2009, ce qui se situe dans la gamme des pays émergents comme le Brésil ou l'Inde. Cela montre que la vraie valeur du facteur de capacité moyen agrégé se situe autour de 50%. Alors que les centrales nucléaires, lignites et hydroélectriques fonctionnent pratiquement tout le temps pour alimenter la charge de base, d'autres centrales électriques (telles que le charbon et le gaz) ne servent qu'à des charges intermédiaires. La charge de pointe est principalement fournie par les centrales électriques à accumulation par pompage et les centrales électriques au mazout. Pour produire la quantité d'électricité mentionnée ci-dessus, des combustibles ayant une teneur en énergie de 5227 PJ ont été utilisés dans les centrales électriques allemandes (~ 39% de la consommation d'énergie primaire).

La production d'électricité en Allemagne repose encore dans une très large mesure sur le charbon. Le mix de production en 2009 était composé à 28% de centrales nucléaires, 26% de lignite, 18% de charbon, 11% de gaz et environ 16% d'énergies renouvelables. Le diagramme suivant donne un bref aperçu de la situation. Il convient de noter que la part des énergies renouvelables dans la production d'électricité est considérablement plus élevée que dans la consommation d'énergie primaire. Cela peut largement être attribué aux incitations créées par la loi allemande de 2000 sur l'énergie renouvelable.

- **En Suisse**

Hormis l'eau et le bois, la Suisse n'a pas de ressources naturelles énergétiques. Elle importe donc près de 77% de sa consommation sous forme fossile, de gaz naturel, de charbon, et de combustibles nucléaires. Il a été enregistré en 2015 que la production d'électricité indigène provient des centrales hydroélectriques représente 59,9% et des cinq centrales de pays qui apportent 33,5% de la production totale. Environ 6,6% de la production intermittente qui est générée

par les technologies des énergies renouvelables (éolien, solaire, biomasse, biogaz...etc.). Selon l'Office Fédérale de l'Energie (OFEN), les bâtiments consomment près de la moitié de l'énergie primaire en Suisse, à raison de 30% pour le chauffage, la climatisation et l'eau chaude sanitaire, 14% pour l'électricité, et environ 6% pour la construction et l'entretien.

L'exploitation du potentiel, encore considérable, de réduction de la consommation dans les bâtiments présente de nombreux intérêts du point de vue économique, d'autant plus que ces derniers portent une lourde part de responsabilité dans l'utilisation de matériaux, la production de déchets, et la pollution de l'environnement dans lequel nous vivons.

- **En Belgique**

En 2012, la consommation énergétique en Belgique est estimée à 56 Mtep, sachant que plus de 70% de ressources fossiles qui sont estimées à 22 Mtep qui est la première source énergétique consommée, suivi par le gaz naturel (14 Mtep). Une augmentation importante dans le profil de la consommation du pays depuis 1990 à 2000 avec un taux de +20%. Une réduction de consommation est ensuite enregistrée après l'année 2000 jusqu'à 2010, pour qu'elle remonte encore de 3% de 2010 à 2013 et commence diminué de 8% entre 2011 et 2013. Le secteur industriel représentait 24% de la consommation finale en 2012 sachant que sa contribution ne représentait que 12% entre 1990 et 2011. Durant cette même période le secteur bâtiment a enregistré une diminution de 10%. Cette diminution est due principalement aux plans nationaux de l'amélioration de l'efficacité énergétique aux bâtiments, mais aussi aux améliorations des techniques de construction moins énergivores. La politique énergétique en Belgique dans le secteur du bâtiment à commencer depuis les années 80s, plus particulièrement dans la région Wallonie en 1985. La première réglementation thermique est adoptée. Puis en 1992, la région flamande a aussi adopté sa première réglementation K65 et *U_{max}*, ces efforts alloués à réglementer la consommation énergétique au bâtiment belge continu légèrement jusqu'à l'année 2002, dont le gouvernement à décider de suivre la directive de la performance énergétique PEB des bâtiments, cette directive été traduit par plusieurs lois régionaux successives qui met en œuvre la PEB.

L'objectif de la PEB été de promouvoir l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments, cette directive a exigé vis-à-vis des réglementations à suivre en ce qui concerne : (1) la méthode de calcul des performances énergétiques (PE) qui sont exprimés en terme d'énergie primaire. (2) des exigences minimales en matière de PE des bâtiments neufs et existants avec plus de 1000 m² en rénovation lourde. (3) Une certification des bâtiments, et (4) une inspection régulière des chaudières et des systèmes de climatisation.

4. Bilan du chapitre

Le contexte actuel de l'énergie et de l'environnement permet d'aboutir à des réglementations et lois de l'efficacité énergétique bien à l'échelle européenne et méditerranéenne qu'à l'échelle national Marocain et Français. Dans cette optique il est donc important de développer de nouvelles technologies qui visent à accompagner ces lois dans une vision intelligente qui met en valeur la synergie du système.

Chapitre II : Etat de l'art des systèmes solaires PV et thermiques

1. Introduction

L'exploitation de l'énergie solaire est valorisable par plusieurs voies et flux énergétiques. On distingue dans ce chapitre deux types majeurs de flux solaires. Le flux solaire thermique, et le flux solaire électrique. Le flux solaire thermique est converti à partir du rayonnement solaire caractérisé par des longueurs d'ondes appartenant à la bande infrarouge, tant que l'énergie électrique est produite par l'effet photovoltaïque (comme nous allons détailler ci-après) à partir du rayonnement solaire avec des longueurs d'ondes appartenant à la bande du visible et ultra-violet. La Figure 3 montre l'énergie exploitable sur différentes longueurs d'onde en fonction de type du flux énergétique productible.

Dans un part, L'apparition industrielle de la cellule solaire PV en silicone lors des années 40s avec un rendement qui ne dépasse pas 6% a permet de connaitre une évolution incontournable jusqu'à présent. L'objectif de développement des cellules solaires ne réside pas seulement dans l'amélioration du rendement, mais aussi la minimisation des coûts de production et l'augmentation de la durée de vie. De plus, la variété dans la technologie PV requit un déploiement de l'utilisation radicale de l'énergie solaire pour un environnement propre.

D'un autre part, L'industrie solaire thermique est préconisée par la valeur de la température, bien entendu, l'exploitation à basse température, à moyenne température et à haute température.

Dans ces dernières décennies, la technologie combinés PV/T est apparue pour des fins technologiques et énergétiques, on introduit dans ce chapitre les différentes contraintes liées à cette technologie sans négligé l'aspect économique.

Ce présent chapitre est organisé comme suit :

Le système solaire PV est introduit d'abord avec une hiérarchie historique de l'évolution de cette technologie. Ensuite, les systèmes solaires thermiques sont aussi introduits et reportés par un état de l'art critique. Enfin, le couplage des deux technologies PV et thermique est aussi développé dans ce chapitre et classifiés selon leurs typologies avec leurs différentes aspects physiques et techniques en citant les avantages et les inconvénients de chaque technologie. De plus, une partie qui met en évidence l'évolution de la technologie PV/T dans l'industrie en citant quelques brevets pertinents développés le monde.

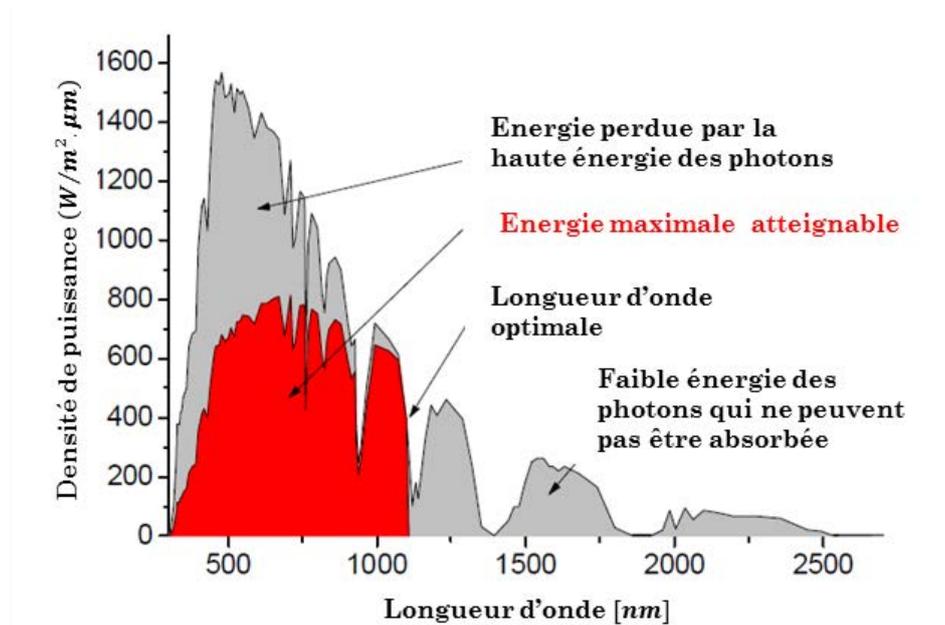


Figure 3: Densité de puissance solaire en fonction de la longueur d'onde et l'énergie maximale absorbable

2. Le solaire photovoltaïque

Le laboratoire américain NREL présente chaque année un état d'avancement sous-forme d'une charte qui décrit lieu à l'évolution du rendement de chaque type, la Figure 4 représente l'état de l'évolution du rendement électrique des technologies PV dans le monde rapporté par la NREL [13]. D'après cette figure, on peut citer l'existence de six familles de cellules PV qui sont rapporté par [14] et présumés par la partie 2.1.

Best Research-Cell Efficiencies

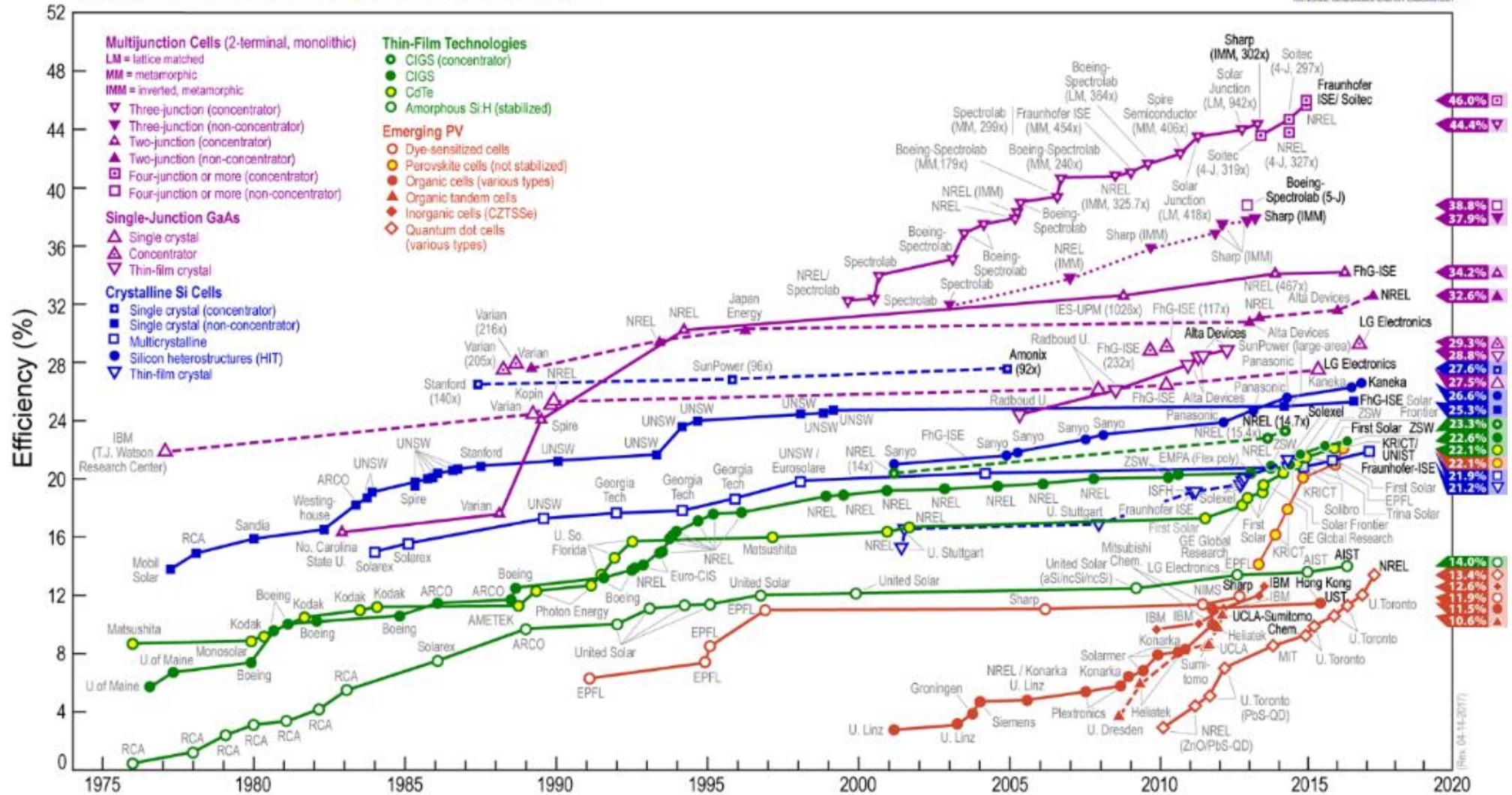


Figure 4: Evolution du rendement des cellules PV dans le monde rapporté par le Laboratoire américain NREL, 2018

2.1. Typologie des cellules solaires

Tableau 1: caractéristiques de différentes familles technologiques des cellules solaires

Famille technologique	Typologie	Caractéristiques Procédé de Fabrication	Rendement
Les matériaux cristallins	Le mono-c	Le rendement commercialisé le plus élevé par rapport au poly-cristalline, mais plus sensible à la température. Le processus de Czocharlski [15], [16] pour la fabrication caractérisée par la haute pureté de dopage du silicium semi-conducteur (en général le Quartz) en dopant les atomes impuretés comme le Br. Ou le Phosphore qui est rajouté au silicium	15-17%
	Le poly-c	Matériau parfait pour réduire les coûts de développement du Photovoltaïque, caractérisé par un rendement bas par rapport au Mono-C. Fabriqué en solidifiant le silicium liquide, sous certaines conditions de température et de pression, on produisant du Crystal sous formes de blocks de maille rectangulaire afin d'orienter le déplacement des ions.	12-15%
	Le Gallium d'arsénide (GaAs)	Caractérisé par une bande d'énergie de 1.43eV. Le GaAs à un rendement élevé avec une faible épaisseur, son rendement s'améliore en construisant un alliage certains matériaux comme l'Al, In, P, et le Sb. Le GaAs est utilisé pour les concentrateurs PV, et les applications spatiales. Une couche tampon métamorphique de GaAs épais est étalée sur un substrat de Si ç travers un faisceau de molécules (MBE). La température de croissance est souvent fixée à 390°C, qui correspond à une température assez basse pour l'alliage du GaAs afin de minimiser la différence de dilatation thermique entre GaAs et Si. Après la croissance du tampon GaAs, les couches de cellules solaires GaAs font croître par dépôt chimique en phase vapeur organométallique dite (MOCVD). La cellule solaire est composée de champ de surface de contact n GaAs n / InGaP / à base de GaAs n / émetteur de p-GaAs / champ de surface avant p-InGaP / p p GaAs couches de contact à partir du bas.	18-27%
Les cellules solaires à couches minces	L'amorphe	Cette technologie est très populaire en comparaison à d'autres matériaux comme le CIS/CIGS et le CdS/CdTe, l'amorphe est 40 fois plus absorbative à la lumière par rapport au monocristallin. Sa bande interdite d'énergie est de 1,7eV. L'inconvénient des cellules amorphe est la dégradation des cellules facilement par rapport à la technologie monocristalline. Le silicium amorphe (a-Si) est de forme non cristalline. Les panneaux de silicium amorphe sont fabriqués en utilisant le procédé par dépôt chimique en phase vapeur pour créer une couche mince de matériau de silicium d'environ de 1µm d'épaisseur déposé sur un matériau de substrat tel que le verre ou le métal. Le principal avantage dans ce procédé est la possibilité de déposer le silicium amorphe aux températures très basses. La structure de base consiste en l'empilement successif de trois couches : p-i-n. Au sein de la cellule p-i-n se trouve un champ électrique qui accélère les porteurs de charge créés par les photons absorbés ; en fait, le silicium amorphe a une mobilité très faible d'environ 1 cm ² /Vs [17] comparé à la mobilité de plus de 1000cm ² /Vs pour le silicium monocristallin.	15-19%
	Le CdTe et le CdS	Bande interdite idéale de 1.45eV. Le processus de fabrication de la cellule CdS/CdTe se fait par l'évaporation la couche mince de CdS	

		sur une surface de substrat de verre suivi par une autre couche d'évaporation de CdTe et déposé sur une couche de métal de contact pour compléter le processus initiale.	
	Copper indium gallium selenide	Ce matériau est encore dans sa phase de développement puisqu'il s'agit d'une nouvelle technologie et est en concurrence avec d'autres cellules solaires au silicium. Un rendement de 13% pour les modules et de 20% pour les cellules a été enregistré [18]. Sa bande interdite directe peut atteindre 1,68 eV avec une légère modification avec du sulfure (S). [19] avaient mené une expérience pour évaluer la performance et la durée de vie des cellules solaires CIGS. L'expérience avait été menée à l'intérieur (underSTC) et à l'extérieur pendant 4 mois. Il a été observé que les défauts sur le module conduiraient à une diminution de la collecte de courant. Meyer et van Dyk [20] ont également mené une expérience pour étudier les performances de CIS et d'autres matériaux en couches minces. Le résultat de l'expérience menée est que CIS ne se dégrade que de 10% par rapport aux autres films minces après une exposition extérieure de 130kWh/m ² . Le coefficient d'absorption de CuInSe ₂ est supérieur à 10 ⁵ cm ⁻¹ .	
L'organique et les cellules polymère	Cellule solaire organique	Une cellule solaire organique est une nouvelle technologie et est encore dans sa phase de développement comme CIS / CIGS. Bien qu'il ait une efficacité très faible, de l'ordre de 4-5%, d'autres avantages, tels que la flexibilité mécanique, la disponibilité et la rentabilité, ont suscité beaucoup d'intérêt pour ce matériau [21]. La vue en coupe transversale d'une cellule solaire organique. Gorter et al. [22] ont mené une étude expérimentale pour évaluer les performances de 15 polymères destinés à être utilisés dans des modules PV dans des bateaux à propulsion photovoltaïque. L'expérience était axée sur les propriétés des matériaux tels que la densité, la résistance, l'épaisseur, la stabilité aux UV, la température, etc. les polymères ont montré le potentiel élevé pour remplacer les modules PV de silicium dans le futur en considérant la réduction de coût et de poids. La plupart des matériaux organiques ont des tensions de circuit ouvert très basses. La plus haute tension à circuit ouvert pour les cellules organiques a été obtenue par la Molecular Solar Ltd. Pour cela, Peumans et al. [23] ont suggéré que, pour augmenter la tension de sortie de la matière organique, un matériau à large bande d'absorption doit être trouvé et produit.	
Les cellules solaires hybrides		Généralement, l'idée d'hybride est de combiner le silicium cristallin avec du silicium non cristallin [24]. Wu et al a évalué le rapport rendement / coûts. [25] en adoptant du silicium amorphe avec du silicium cristallin. L'un des plus grands fabricants de cellules solaires du Japon, Sanyo a développé une cellule solaire hybride avec une efficacité de 21%. Il est appelé HIT (combinaison d'hétérojonction et de cellules solaires à couches minces intrinsèques). La base de cette plaquette de silicium CZ de type n de cellules solaires fonctionne comme un absorbeur de lumière. Sanyo prévoit de commercialiser cette cellule solaire et plante la production est sur le chemin.	

<p style="text-align: center;">Dye-Cellules solaires à colorant</p>		<p>En raison de certains problèmes d'efficacité, de coût de production et de problèmes liés à l'environnement de certains matériaux de cellules solaires, les chercheurs ont trouvé des idées pour produire une nouvelle technologie matérielle appelée cellule solaire à colorant [26]. Généralement, ce type de matériau a cinq principes de fonctionnement qui sont (1) un support mécanique recouvert d'oxydes conducteurs transparents ; (2) le film semi-conducteur, habituellement du TiO₂ ; (3) un sensibilisateur adsorbé sur la surface du semi-conducteur ; (4) un électrolyte contenant du dioxyde médiateur, (5) un compteur électro décapable de régénérer le médiateur redox comme platine [26]. La cellule solaire à colorant sera un bon concurrent de la technologie matérielle existante dans la production de cellules solaires [43].</p>	
<p style="text-align: center;">La nouvelle technologie des cellules solaires</p>	<p>TNC</p>	<p>Les nanotubes de carbone (NTC) sont formés de carbone à réseau hexagonal [27]. Une équipe de recherche a inventé des cellules solaires à photodiode à partir de CNT et améliore avec succès l'efficacité et la production de courant de cette cellule solaire. Bien que l'efficacité des cellules solaires soit encore faible (3-4%), de nombreuses recherches seront menées dans cette technologie pour améliorer la production électrique.</p>	
	<p>Les points quantiques</p>	<p>Les points quantiques (QD) peuvent être décrits comme un matériau qui est construit avec de nombreuses formes de matériaux, ce qui en fait un système semi-conducteur spécial avec une capacité à contrôler la bande passante de l'énergie. La sortie de tension peut être augmentée à mesure que la taille de l'énergie de la bande interdite augmente, mais d'un autre côté, une bande interdite plus petite peut également augmenter la sortie de courant. En tant que solution, les QD sont utilisés car ils permettent de faire varier les spectres d'absorption lumineuse et d'émission de la lumière [28]. Aroutiounian et al. [29] ont développé un modèle mathématique pour calculer le photo-courant pour la cellule solaire qui est basée sur la QD. Le modèle développé est basé sur deux hypothèses où (1) les QD sont situés dans des couches in-substituées, qui sont périodiquement empilées M fois ensemble à une distance de d (2) $d \gg 0$, où un 0 est typique des QD. L'efficacité des cellules solaires basées sur QD sont facilement influencées par les défauts qui les affectent [30]. Chen et al. [31] dans leur expérience avait augmenté avec succès l'efficacité de point quantique sensibilisé cellule solaire en appliquant CdSe QD capsulés d'acide merca-ptopropionique (MPA) sur une solution aqueuse de film de TiO₂ et a conclu que la valeur de pH 7,0 est une valeur appropriée pour ajouter une quantité maximale de fils de TiO₂ CdSe QD film.</p>	
	<p>Cellule solaire à porteuse chaude</p>	<p>Le transporteur à chaud (HC) est une méthode difficile par rapport à CNT et QD car il a besoin de contacts énergétiques sélectifs pour convertir la lumière en énergie électrique sans produire de chaleur. Son efficacité atteint 66%, soit trois fois plus que la cellule existante en silicium [32]. Mais à ce jour, en raison du manque de matériel adapté pouvant diminuer les taux de refroidissement des porteurs, HC n'a jamais été commercialisé mais reste une technologie expérimentée [33]. La figure 12 montre le schéma de la cellule solaire HC. [34] dans leurs recherches discutées sur les principes, le matériau et la conception des cellules solaires HC et conclu que les matériaux comme Bbi, BiN, AlBi, BiP, Bi₂S₃, SiSn, BSb et InP sont bons comme matériau absorbant de transporteur à chaud.</p>	

2.2. Effet de la température

Dépendamment de la technologie, l'échauffement des cellules PV anticipe à l'excitation des molécules de silicium et favorise le déplacement des électrons qui augmente significativement le courant électrique. En revanche, la chute de la tension est plus importante que l'augmentation du courant I . Il en résulte que le rendement électrique diminue à chaque degré de variation thermique de la cellule PV. Cette diminution est supposée linéaire comme indiqué par la Figure 5. Les premières investigations sur la dépendance thermique au rendement de la conversion des cellules solaires ont mis en évidence l'importance de la bande interdite du semi-conducteur utilisé [35], [36]. En effet, les cellules solaires fabriquées à partir de différents semi-conducteurs présentent différentes sensibilités à la température (Figure 5). De plus, comme la bande interdite des semi-conducteurs n'est pas le seul paramètre impliqué, les cellules solaires fabriquées à partir du même semi-conducteur peuvent présenter des dépendances de température différentes. Ceci est illustré par la Figure 5 pour les cellules de silicium

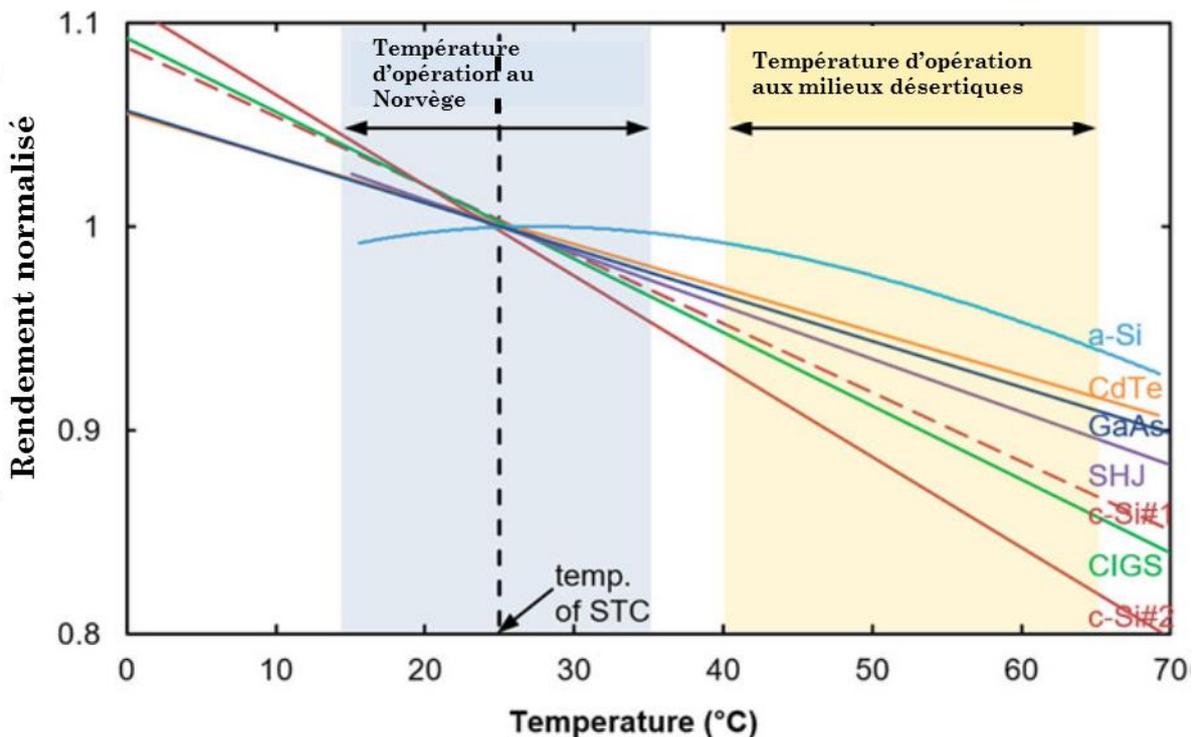


Figure 5: Rendement de conversion normalisée à la valeur de 25 °C en fonction de la température pour différentes technologies de cellules PV. Gamme de températures de fonctionnement. (données reportés par:[37])

La Figure 5 illustre la raison où la dépendance du rendement de conversion à la température du dispositif est particulièrement importante pour l'industrie photovoltaïque. Deux cellules ou modules différents ayant la même puissance nominale dans les conditions d'essai standard (STC), c'est-à-dire 1000 W m^{-2} d'illumination AM1.5 sur une cellule à $25 \text{ }^\circ\text{C}$, peuvent produire des puissances électriques différentes dans des conditions extérieures réelles. L'exemple de la plage de températures de fonctionnement en Norvège est exceptionnel car la température moyenne de fonctionnement en termes de production d'énergie est d'environ $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Cette température de fonctionnement moyenne basse est due au fait que le climat à l'emplacement du module (Norvège) est particulièrement froid. Dans la plupart des endroits où l'irradiation solaire est importante au cours de l'année, la température de fonctionnement moyenne est significativement supérieure à $25 \text{ }^\circ\text{C}$ et les STC ne sont pas représentatifs des conditions moyennes d'exploitation [38], [39]. Ainsi, la connaissance des coefficients de température (et des dépendances à l'irradiation) est cruciale pour estimer le rendement énergétique des installations photovoltaïques. Par conséquent, au cours des dernières décennies, des recherches ont porté sur le comportement thermique des cellules solaires visant à prédire les températures de fonctionnement des installations PV afin d'évaluer le rendement énergétique potentiel ou prévoir la production d'électricité des installations PV existantes. Et atténuer les pertes induites par la température en réduisant la température de fonctionnement.

2.2.1. La température et la dégradation des modules PV

Une « règle d'or » dans l'étude de toute réaction chimique est que, près de la température ambiante, les vitesses de réaction doublent souvent pour chaque augmentation de température de $10 \text{ }^\circ\text{C}$ (Pauling 1988). En supposant le comportement d'Arrhenius, cela correspond à une énergie d'activation dans la plage de 0,5 à 0,6 eV. En appliquant cette « règle empirique » au processus de dégradation déterminant la durée de vie d'un module solaire, la durée de vie du module pourrait être considérablement prolongée même avec une réduction modeste de sa température de fonctionnement. Une diminution de $1 \text{ }^\circ\text{C}$ de cette

température pourrait prolonger la vie du module d'environ 7%, soit 2 ans. C'est un avantage supplémentaire, peu pris en compte, des différentes stratégies qui réduisent la température de fonctionnement des dispositifs PV (voir sections 1.3 et 3.5).

Cette prédiction empirique peut être comparée aux résultats d'études plus détaillées. Un mode de dégradation de module spécifique qui attire beaucoup l'attention récemment est la dégradation induite potentielle [40]. Pour réduire les pertes et les coûts de câblage, les modules des grands systèmes photovoltaïques sont généralement exploités à des tensions continues élevées, avec 1000 VDC actuellement commun avec une tendance maintenant vers 1500 VDC fonctionnement. Alors que de nombreuses cellules dans le système seront à des potentiels proches de ces valeurs, les parties métalliques du système telles que les structures de modules et les structures de support doivent être maintenues au potentiel de la terre, pour des raisons de sécurité.

Par conséquent, de grandes différences de potentiel peuvent exister entre les parties du système qui sont proches physiquement. Pour un système vide, cela ne pose pas de problème puisque les cellules sont emballées dans des modules bien isolés électriquement comprenant, en général, une feuille de couverture en verre isolant. Cependant, sur le terrain, l'avant de la feuille de verre peut devenir partiellement conducteur, en particulier lorsque des dépôts se sont formés sur la surface du verre et que la surface est humide. Cela peut entraîner le transfert du potentiel proche de la terre à la surface du verre immédiatement au-dessus d'une cellule qui fonctionne à un potentiel positif ou négatif très élevé. La forte intensité du champ électrique correspondant résulte en des courants de fuite entre la cellule et le sol, ceux-ci étant supportés par un mouvement ionique dans les couches normalement isolantes séparant les cellules de la surface supérieure du verre. Ces ions peuvent endommager le module comme cela est bien documenté dans le cas des ions sodium, avec ceux-ci capables d'entrer dans la surface des cellules de silicium et de shunter la cellule [41].

Les taux de dégradation induits par le potentiel sont accélérés à la fois par la température élevée et l'humidité. Une étude contrôlée impliquant à la fois des données de laboratoire et de terrain fournit une caractérisation de leur effet

combiné. À humidité fixe, l'augmentation de la température augmente les courants de fuite responsables de la dégradation du module avec une énergie d'activation de 0,75 eV [40]. Ceci est légèrement supérieur à la plage typique mentionnée précédemment, correspondant à un doublement de la fuite pour chaque élévation de température de 7 ° C, bien que la dépendance en température du procédé ne soit toujours pas très éloignée de celle décrite par la règle empirique.

En ce qui concerne les autres modes de dégradation observés, le test d'acceptation le plus difficile pour les modules solaires est généralement le test de 85% d'humidité, 85 ° C, où moins de 5% de dégradation du module après 1000 h de test est nécessaire pour le module. Dans le cadre de cet essai, un mécanisme de dégradation des modules de silicium est l'infiltration d'humidité, entraînant la corrosion des contacts métalliques et / ou leur interface avec le silicium, en commençant aux extrémités de la métallisation [42]. A partir de mesures extensives des vitesses de dégradation sous différentes combinaisons de température et d'humidité, une énergie d'activation de 0,49 eV est déterminée dans [43]. Ceci est légèrement inférieur à la valeur « empirique », avec des vitesses de dégradation pour un taux d'humidité donné double pour chaque élévation de température de 12 ° C près de la température ambiante.

Les deux études spécifiques décrites ci-dessus suggèrent que la « règle empirique » peut être un point de départ raisonnable pour projeter les taux de dégradation des modules, quels que soient les détails du processus de dégradation. Des variations peuvent être attendues lorsque des changements de température introduisent des changements de phase dans un composant de module si, par exemple, ce composant fond.

3. Le solaire thermique : typologies et principes de fonctionnement

3.1. Capteurs solaires non-vitrés

Les capteurs solaires non vitrés sont les capteurs solaires thermiques les plus simples. Il se compose d'un absorbeur avec des canaux intégrés où le fluide circule. L'isolation n'est pas utilisée. Généralement, l'absorbeur et les tuyaux

sont réalisés dans des matériaux plastiques. Le principe de fonctionnement est très simple. Fondamentalement, le rayonnement solaire a un impact sur l'absorbeur qui le chauffe. Puisque l'absorbeur est traité avec des peintures spéciales, seule une très petite partie du rayonnement solaire est réfléchi dans l'environnement. La chaleur produite est ensuite transférée au fluide qui circule dans les tuyaux. L'efficacité est fortement affectée par les conditions extérieures, notamment par la température de l'air extérieur et le vent. En effet, à basse température de l'air, bien que l'irradiation solaire soit forte, les collecteurs non vitrés ne sont pas disponibles pour chauffer le fluide. Bien qu'ils ne soient pas capables d'augmenter la température du fluide jusqu'à 50 ° C (OCDE / AIE 2013), les capteurs non vitrés sont largement utilisés pour les applications de chauffage de piscine (IEA SHC).

3.2. Capteurs plans vitrés

Les capteurs plans vitrés ont une couverture en verre au-dessus de l'absorbeur, créant une cavité remplie de gaz (généralement de l'air), qui génère l'effet de serre. La couverture agit également comme une barrière contre le vent. Des verres perfectionnés, spécifiquement traités, sont utilisés comme matériau de recouvrement afin de réduire les pertes optiques. L'augmentation du nombre de revêtements de verre n'est pas productive en raison de l'augmentation des pertes optiques. L'absorbeur et les tuyaux sont faits de métaux avec des propriétés absorbantes améliorées. Tous ces composants sont encapsulés dans un cadre comme le montre la Figure 6. L'isolation est utilisée sur les surfaces arrière et latérales des collecteurs vitrés à plaque plate pour réduire les pertes de chaleur. Ainsi, le rayonnement solaire est absorbé à travers le verre par l'absorbeur de métal, chauffant le fluide qui circule dans les tuyaux.

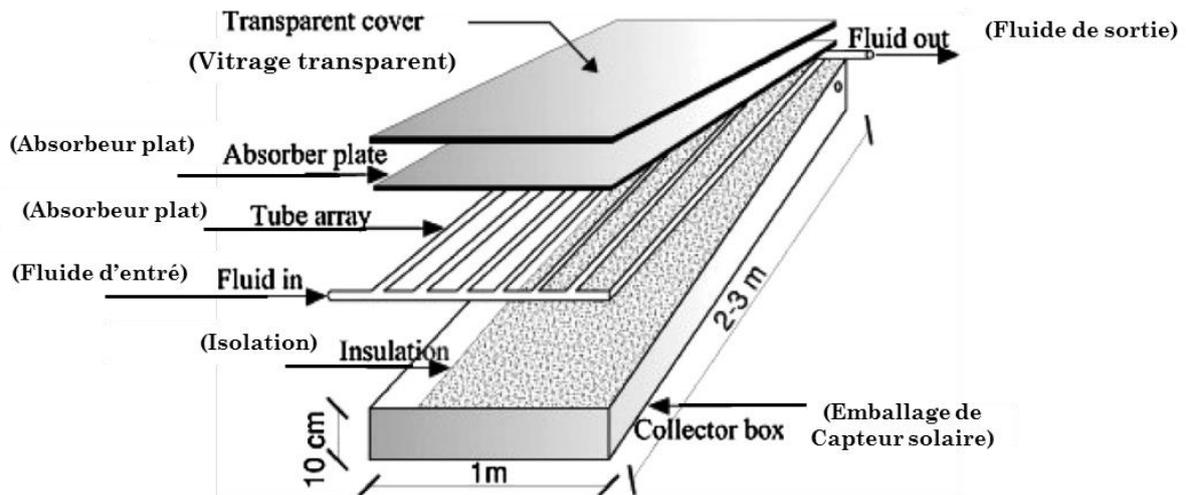


Figure 6: Coupe transversale d'un capteur solaire thermique plan [44]

3.3. Capteurs à tubes sous vide

Cette typologie de capteurs solaires se compose de deux parties principales : les tubes à vide et le collecteur (Figure 7). Le long du collecteur, un ensemble de tuyaux d'aspiration est installé.

En particulier, chaque tube à vide est constitué d'un tube interne et d'un tube externe ; entre eux, du vide est créé pour améliorer les caractéristiques thermiques du collecteur, en diminuant les pertes thermiques.

Il existe deux typologies de tuyaux : le tuyau à flux direct ou le caloduc [45]. Le premier a des principes de fonctionnement similaires à ceux des collecteurs décrits précédemment. En effet, à l'intérieur du tube à vide se trouve une feuille absorbante avec des tubes encastrés, où circule le fluide de travail. Au lieu de cela, le second a un principe de fonctionnement différent : chaque tube à vide contient un fluide qui s'évapore, lorsqu'il est chauffé par le rayonnement solaire. Ensuite, la vapeur monte dans le collecteur, où, en se condensant, elle libère de la chaleur latente au fluide de travail du système.

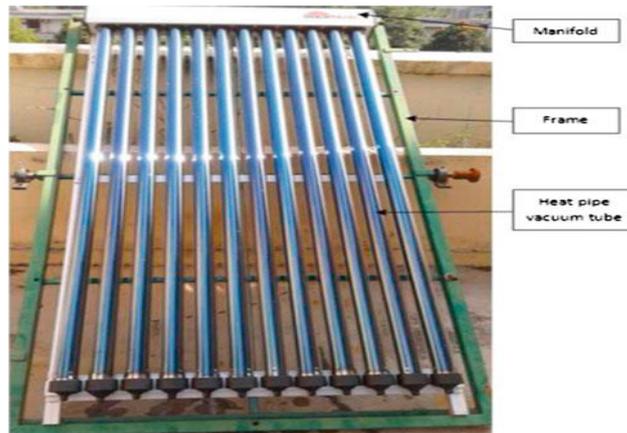


Figure 7: Capteur solaire thermique sous-vide

4. Couplage PV/ (Solaire thermique) : les systèmes combinés PV/T

Les systèmes PV/T peuvent être classifiés sous trois catégories selon une plage de température de fonctionnement, notamment les systèmes à basse température ($<50^{\circ}\text{C}$), à moyenne température ($<80^{\circ}\text{C}$), et à haute température ($>80^{\circ}\text{C}$). Les combi-systèmes PV/T à basse température sont conçus afin de préchauffer l'eau et l'air, ces systèmes sont les plus répandus des familles PV/T, pour les systèmes à moyenne et à haute température peuvent y subir facilement un problème de laminage, ce qui pose davantage la question d'amélioration des performances. Cependant, la maximisation de la productivité électrique et thermique dans des systèmes à basse température constitué l'enjeu des travaux réalisés en prenant en considération une température acceptable du fluide calo-récupérateur et un rendement électrique amélioré qui devront être affinés avec des applications convenables [46].

Les capteurs solaires PV / T plats peuvent être utilisés efficacement dans des secteurs domestiques et industriels, principalement pour le préchauffage de l'eau ou de l'air. Néanmoins, une large utilisation dans le bâtiment pour la production d'électricité et de chaleur avec une technologie du PV adaptées aux conditions élevées de rayonnement solaire et de température ambiante. La Figure 8 représente deux formes de base des capteurs PV / T, avec et sans vitrage. Dans ces dispositifs, de l'eau ou de l'air circule en contact thermique avec la partie PV. Dans le cas de l'air, le contact est en direct avec les cellules PV, tandis que le cas de liquides le contact se fait par un échangeur de chaleur.

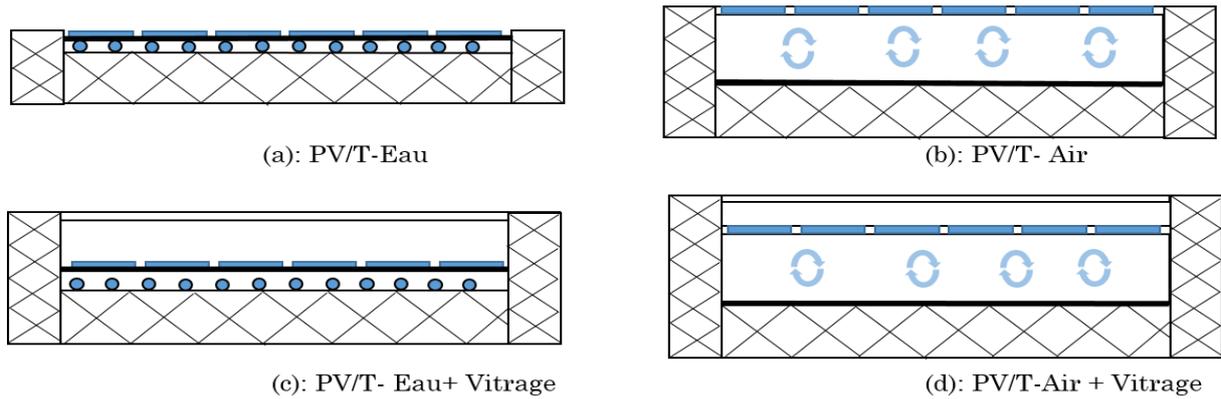


Figure 8: Coupe transversale de modèles expérimentaux PV / T pour le chauffage de l'eau et de l'air.

Les modules PV refroidis par l'eau (systèmes PV / T-eau) conviennent au chauffage de l'eau, au chauffage des locaux et à d'autres applications (figures 6 (a) et 6 (b)). Les modules PV refroidis par l'air (systèmes PV / T-air) peuvent être intégrés aux toitures et aux façades des bâtiments, et en plus de la charge électrique, ils peuvent couvrir les besoins de chauffage et de ventilation (Figures 6 (c) et 6 (d)). De plus, les capteurs PV / T intégrés sur les toits et les façades des bâtiments peuvent remplacer les installations des capteurs thermiques et PV, ce qui permet une meilleure rentabilité. La figure 7 représente plusieurs 9 configurations différentes qui peuvent être appliqués aux systèmes PV/T.

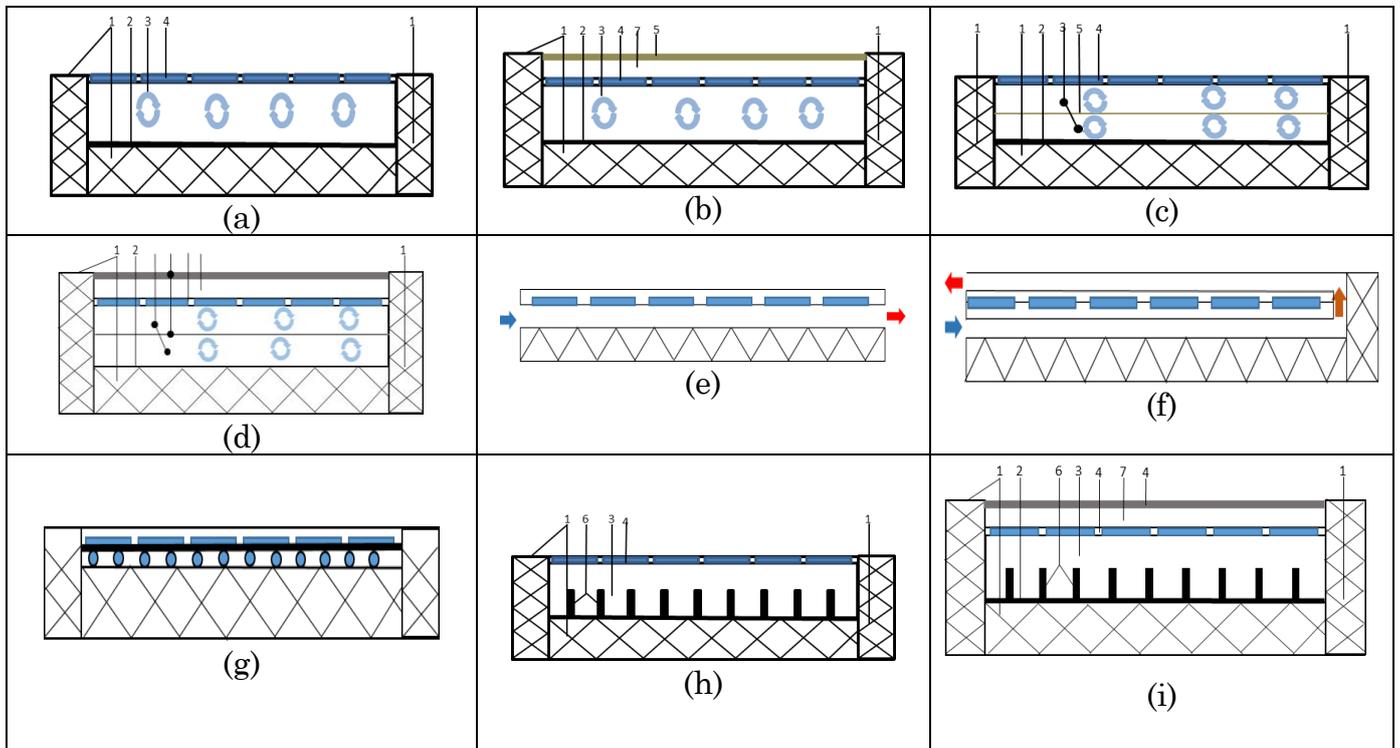


Figure 9: Différentes configurations conçues pour les systèmes PV/T

Afin d'augmenter la rentabilité et la température d'opération, un système de vitrage est proposé (cas du système de la figure (9-b), (9-d), et (9-i)).

Le résultat du rendement thermique aboutis par cette amélioration est délimité par la chute du rendement PV, à cause de la quantité importante du rayonnement absorbé et accumulé par l'effet de serre, qui engendre une augmentation de température des cellules. Malgré cela, en jouant sur l'angle d'incidence du rayonnement solaire, ces systèmes peuvent être plus efficaces en les intégrant dans les façades des hôpitaux, des hôtels et d'autres types de bâtiments afin minimiser l'effet de surchauffe du PV et répondre aux besoins du confort thermique. A cet effet, certaines techniques à double-étage comme présentés par la figure (9-c), (9-d), et (9-f) peuvent optimiser le compromis entre la productivité thermique et électrique. Par ailleurs, pour les systèmes à simple vitrage, l'introduction des ailettes ou des chicanes est proposée afin d'augmenter le rendement thermique et refroidir d'avantage les modules PV comme ainsi représenté par la figure (9-h) et (9-i).

Dans les applications à PV / T, la production d'électricité est prioritaire ; par conséquent, il est nécessaire de faire fonctionner les modules PV à basse température afin de maintenir le rendement électrique des cellules photovoltaïques à un niveau suffisant. Cette exigence limite la plage de fonctionnement efficace de l'unité PV / T aux basses températures ; ainsi, la chaleur extraite peut être utilisée principalement pour des applications à basse température telles que le chauffage des locaux, le préchauffage de l'eau ou de l'air et la ventilation naturelle dans les bâtiments. Les systèmes PV / T à refroidissement par eau sont des systèmes pratiques pour le chauffage de l'eau dans les bâtiments domestiques mais leur application est limitée jusqu'à maintenant. Des modules PV refroidis à l'air ont été appliqués dans des bâtiments, intégrés généralement sur leurs toits ou façades inclinés du sud. Dans les systèmes PV / T, la puissance électrique des modules photovoltaïques peut être augmentée en contribuant au chauffage des locaux pendant l'hiver et à la ventilation en été, évitant ainsi la surchauffe du bâtiment. Les systèmes PV / T-eau sont considérés prometteurs qui sont en cours de développement pour des

applications commerciales. Certains nouveaux systèmes ont été introduits sur le marché, mais avec une utilisation limitée jusqu'à présent.

La circulation naturelle ou forcée de l'air est un moyen simple et économique de retirer la chaleur des modules PV, mais elle est moins efficace aux basses latitudes où la température de l'air ambiant est supérieure à 20 ° C pendant plusieurs mois durant l'année. Dans les applications du PV intégré aux bâtiments, à moins que des précautions spéciales ne soient prises, l'augmentation de la température du module PV peut entraîner une réduction du rendement électrique et une augmentation du transfert de chaleur indésirable vers le bâtiment, principalement pendant l'été. Dans le cas de refroidissement par air, le canal d'air est généralement monté à l'arrière du module PV. Un air de température inférieure à celle des modules PV, généralement de l'air ambiant, circule dans le canal, et le refroidissement PV ainsi que la récupération d'énergie thermique peuvent être réalisés. De cette manière, le rendement électrique PV est maintenu à un niveau suffisant et l'énergie thermique collectée peut être utilisée pour les besoins thermiques du bâtiment. Pour la récupération des calories de l'eau, une circulation à travers des tuyaux en contact avec un capteur plan placé en contact thermique avec la surface arrière du module PV.

Les systèmes combinés PV / T peuvent être appliqués, en dehors du secteur du bâtiment, mais également aux secteurs industriels et agricoles, car de grandes quantités d'électricité et de chaleur sont nécessaires pour couvrir la demande en énergie dans des procédés de production. Dans la plupart des procédés industriels, il faut de l'électricité pour le fonctionnement des moteurs et autres machines et de la chaleur pour l'eau, l'air ou un autre fluide de chauffage et pour les procédés physiques ou chimiques ; ceci rend les systèmes PV / T prometteurs pour une utilisation prolongée dans ce domaine en adaptant plusieurs applications industrielles (telles que le lavage, le nettoyage, la pasteurisation, la stérilisation, le séchage, l'ébullition, la distillation, la polymérisation, etc.). Dans le secteur agricole, des formes typiques ou de nouveaux modèles de capteurs PV / T peuvent être utilisés comme couverture transparente de serres et appliqués pour les processus de séchage et de dessalement, fournissant la chaleur et l'électricité nécessaires. La combinaison de dispositifs de concentration de

rayonnement solaire avec des modules PV est une méthode viable pour réduire le coût du système, en remplaçant les cellules coûteuses par un système moins coûteux de concentration de rayonnement solaire. En outre, les systèmes photovoltaïques concentrés (CPV) présentent une efficacité supérieure à celle des systèmes typiques, mais ceci peut être réalisé de manière efficace en maintenant la température du module PV aussi faible que possible. Les systèmes solaires à concentration utilisent des dispositifs optiques réfléchissants (miroirs) et réfractifs (lentilles) et sont caractérisés par leur rapport de concentration C ou RC . Le système solaire CPVT se compose d'un simple réflecteur, correctement combiné avec les capteurs PV / T ; suivi de réflecteurs plats ; réflecteurs cylindro-paraboliques ; Lentilles de Fresnel ; et des réflecteurs de type plat. Dans les systèmes CPVT avec des valeurs de C moyennes ou élevées, le fonctionnement du système à des températures plus élevées élargit le champ d'application, mais nécessite des modules PV dont la température atteint environ $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, car il est possible de produire de la vapeur fluide d'extraction.

Outre l'utilisation individuelle des systèmes PV / T, peut également s'appliquer à des bâtiments combinés à d'autres sources d'énergie renouvelables, telles que la géothermie, la biomasse ou l'énergie éolienne. Lorsque l'énergie géothermique est utilisée pour le chauffage et le refroidissement de bâtiments résidentiels, de bureaux et des applications industriels, des installations géothermiques à faible profondeur peuvent être appliquées en couplage avec des pompes à chaleur. Dans ces installations, les PV peuvent fournir de l'électricité nécessaire au fonctionnement des pompes à chaleur, tandis que les calories qui peuvent augmenter la chaleur extraite du sol. Dans le cas de l'utilisation de la biomasse, des capteurs PV / T peuvent être utilisés pour préchauffer l'eau et la stocker dans un réservoir d'eau chaude, tandis que le chauffage principal est effectué par la chaudière à biomasse. En combinaison avec les PV, les petites éoliennes peuvent fournir de l'électricité. Les systèmes PV / T peuvent remplacer efficacement les modules PV typiques.

La méthodologie d'analyse du cycle de vie (ACV) et l'analyse des coûts pour les systèmes PV et PV/T typiques peuvent donner une idée sur l'impact environnemental et de l'utilisation pratique de ces systèmes. Ces analyses

devraient prendre en compte les matériaux utilisés et les aspects d'application, et comme les collecteurs PV / T remplacent à la fois l'électricité et la chaleur, les calculs confirment leur avantage environnemental par rapport aux modules PV standard. En ce qui concerne les applications du système PV / T, des outils de modélisation (tels que l'outil TRNSYS et d'autres) peuvent être utilisés pour avoir une idée claire des aspects pratiques, y compris leur rapport rendement/coût. Dans la littérature, plusieurs synthèses sur les collecteurs PV / T peuvent être tirés et parmi on trouve [47], [48] et [48], [49], le guide européen pour le développement et l'introduction sur le marché de la technologie PV-thermique, est l'une des brochures de base qui fournissent des informations sur la technologie de l'énergie solaire. En outre, dans le cadre de la tâche 35 de l'Agence internationale de l'énergie (AIE-SHC / Task35), des études sur la technologie et l'application des systèmes PV / T ont été réalisées et des réunions internationales ont permis d'enregistrer certains aspects de ces nouveaux systèmes.

4.1. Aspects du principe PV/T

4.1.1. Aspect électrique

Dans la partie PV, la courbe caractéristique (I-V) peut être décrite numériquement en considérant le circuit équivalent de la cellule solaire comme montre la Figure 10-b, avec la cellule solaire est modélisée par le courant source en parallèle avec la diode en représentant une jonction p-n. à partir de la Figure 10-b, le courant de sortie I , est égale à la différence du courant généré I_{pv} et le courant de la diode I_d .

$$I = I_{pv} - I_d \quad (1)$$

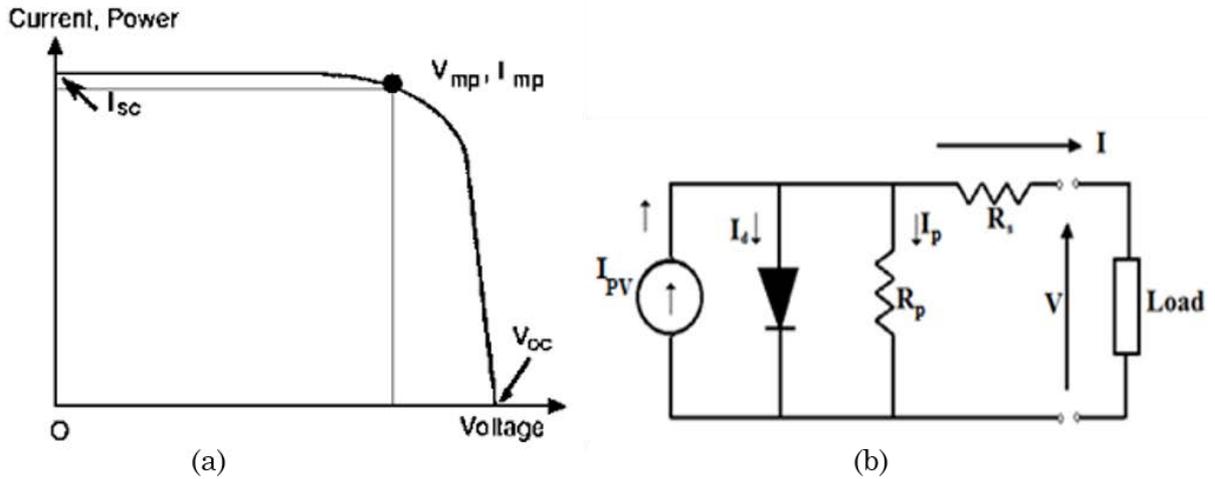


Figure 10: Schéma équivalent d'un système PV, (a): courbe I-V, (b): circuit équivalent

Le courant de la diode I_d est donné par :

$$I_d = I_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right) \quad (2)$$

En substituant l'équation par l'équation.

$$I = I_{PV} - I_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right) \quad (3)$$

avec I_0 , q , k et T (K) sont respectivement le courant de saturation de la diode, la charge électronique, la constante de Boltzmann, et la température absolue de la cellule. Par ailleurs, les équations qui décrivent le courant court-circuit et la tension circuit-ouvert sont données par :

$$I_{sc} = I_{sh} \quad (4)$$

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1\right) \quad (5)$$

Ainsi, l'équation V_{oc} et I_{sc} montrent respectivement que I_{sc} et V_{oc} sont directement proportionnelles à I_{PV} . Par ailleurs, la tension V_{oc} subit une variation logarithmique en fonction de I_{PV} , par conséquent une variation logarithmique en fonction du rayonnement solaire. La courbe I-V dépend paritairement du rayonnement solaire et de la température de la cellule (Figure 11), ceci provoque

une chute du rendement électrique en augmentant la température de la cellule PV, qui est dû principalement à une diminution de la tension V_{oc} . A titre de grandeur, pour le silicium mono-c. cette chute de tension est de 2-3 mV/°C. Par contre, le courant I_{sc} a tendance de croître en augmentant la température, mais cette croissance d'ordre ($6 \mu A/K.cm^2$) apparaît très faible par rapport à la chute de la tension. On peut expliquer ce phénomène d'un point de vue microscopique, lorsque la température de fonctionnement de la cellule augmente, la bande interdite d'un semi-conducteur intrinsèque se rétrécit, ce qui réduit la tension V_{oc} mais permet d'absorber davantage de lumière incidente, et augmentant ainsi le nombre de porteurs de charge mobiles créés, d'où l'augmentation du courant I_{sc} . Les porteurs photo-générés augmentent linéairement avec l'intensité solaire en raison de l'augmentation attendue de la probabilité de photons avec une énergie suffisante pour créer des paires électron-trou, ce qui augmente le courant généré par la lumière.

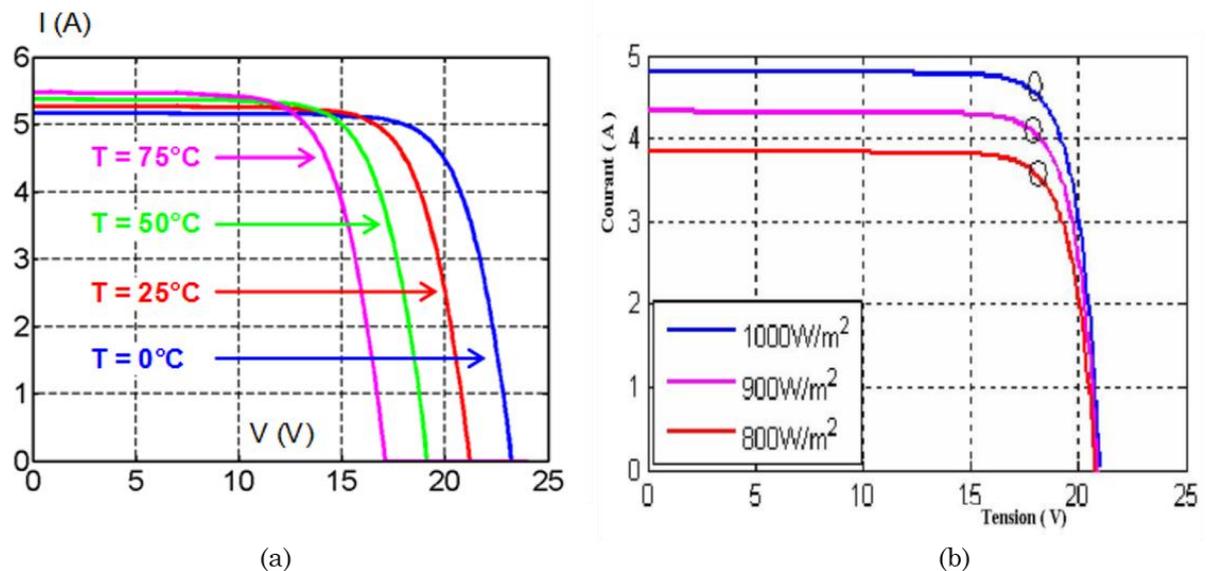


Figure 11: caractéristique $I(V)$, (a) influence de la température à flux constant ($1000W/m^2$), et (b): Influence de flux solaire à température constante ($25^\circ C$)

4.1.2. Aspect énergétique

Les systèmes solaires PV / T fournissent de l'électricité et de la chaleur, en réalisant également un refroidissement du PV et un taux de conversion d'énergie plus élevé du rayonnement solaire absorbé. Dans les modules PV / T, les cellules

PV sont placées en général au-dessus des plaques absorbantes où le module PV agit comme d'un absorbeur d'un capteur solaire thermique standard. De cette manière, la chaleur résiduelle du module PV est directement transférée dans l'air, l'eau ou les matériaux à changement de phase (MCP) qui peuvent stocker la chaleur à utiliser en cas de besoin. Les capteurs PV / T peuvent être analysés en ce qui concerne la conversion du rayonnement solaire entrant sur leur surface d'ouverture en électricité, avec un rendement électrique η_{el} et de conversion en chaleur, avec un rendement thermique η_{th} . En additionnant ces deux rendements, le rendement de conversion globale η_t peut être défini par [48] :

$$\eta_t = \frac{\eta_{el}}{\eta_{Tpower}} + \eta_{th} \quad (6)$$

Le rendement électrique calculé par :

$$\eta_{el} = \frac{\int V I dt}{A_c \int G(t) dt} \quad (7)$$

où V (Volts) est la tension générée par le capteur PV, I (A) est le courant électrique produit, A_c (m^2) est la surface apparente du captation, et $G(t)$ ($W.m^{-2}$) est la densité de flux solaire globale instantanée.

Le rendement thermique donné par l'équation (8)

$$\eta_{th} = \frac{\int Q_u dt}{A_c \int G(t) dt} \quad (8)$$

Q_u est la puissance thermique utile, elle représente la différence entre la quantité absorbée par le capteur et les pertes thermiques vers l'atmosphère qui peut être décrite par l'équation (9).

$$Q_u = A_c [S - U_L (T_{p,m} - T_a)] \quad (9)$$

avec S ($W.m^{-2}$) est la densité de flux solaire absorbée par le capteur donné par l'équation (10), U_L ($W.m^{-2}.K$) est le coefficient de pertes globales du capteur solaire, $T_{p,m}$ et T_a sont respectivement la température moyenne de surface du capteur et la température ambiante.

$$S = I_b R_b (\tau \alpha)_b + I_d (\tau \alpha)_d \left(\frac{1 + \cos \delta}{2} \right) + \rho_g (I_b + I_d) (\tau \alpha)_g \left(\frac{1 - \cos \delta}{2} \right) \quad (10)$$

Les différents termes explicités dans la densité de puissance S absorbée par le capteur sont décrits par :

$I_b R_b (\tau \alpha)_b$: La composante directe du flux solaire absorbé, dont I_b est l'irradiation solaire directe horaire, $(\tau \alpha)_b$ est le produit de transmittance-absorptance issue par la composante directe de flux absorbé.

$I_d (\tau \alpha)_d$: La composante diffuse du flux solaire absorbé, dont I_d est l'irradiation solaire diffuse horaire, $(\tau \alpha)_d$ est le produit de transmittance-absorptance issue par la composante diffuse de flux absorbé.

$\rho_g (I_b + I_d) (\tau \alpha)_g$: La composante réfléchie du flux absorbé globale, dont $(\tau \alpha)_g$ est le coefficient de transmittance-absorptance issue par la composante de flux globale absorbé.

$\left(\frac{1 + \cos \delta}{2} \right)$ et $\left(\frac{1 - \cos \delta}{2} \right)$ sont des facteurs liés à l'angle solide depuis le capteur au soleil.

Le rendement global ne correspond pas à un taux de rendement de conversion d'énergie bien défini, car elle comprend deux formes d'énergie de valeurs différentes. De point de vue thermodynamique, la transformation de la chaleur en énergie correspond à la différence de température entre le niveau « chaud » et le niveau « froid », tandis que l'électricité peut être convertie en électricité presque totalement. Ainsi, pour normaliser la chaleur avec l'électricité d'un capteur PV / T, il est nécessaire de prendre en compte la température du fluide caloporteur. Le fonctionnement efficace d'un capteur PV / T en ce qui concerne la sortie électrique est obtenu pour les basses températures de fonctionnement du module PV, afin d'éviter sa réduction en raison de l'augmentation de la température. D'autre part, le fonctionnement efficace d'un collecteur PV / T en ce qui concerne la puissance thermique est obtenu lorsque le système peut fonctionner à des températures plus élevées avec un rendement satisfaisant. En effet, pour de faibles températures de fonctionnement du PV / T, les rendements électriques et thermiques sont élevés mais la chaleur produite peut être considéré très faible thermodynamiquement, car elle correspond à un fluide caloporteur à basse température. Ainsi, dans les capteurs PV / T, on peut retrouver un conflit

entre le fonctionnement électrique et thermique, et dans le cas d'un fonctionnement du système à des températures plus élevées, la production d'électricité du système diminuera. Une formule qui peut être utilisée pour calculer la température du module PV en fonction de la température ambiante T_a et du rayonnement solaire entrant G et est donnée par [50]:

$$T_{PV} = 30 + 0.0175(G - 300) + 1.14(T_a - 25) \quad (11)$$

Cette relation est utilisée pour les modules PV poly-c standard. Pour les modules PV mono-c avec leur faible rendement électrique qui entraîné par une légère augmentation de la température du module PV par rapport aux modules PV poly-c. Pour cette raison, la formule suivante peut leur être appliquée [50] :

$$T_{PV} = 30 + 0.0175(G - 150) + 1.14(T_a - 25) \quad (12)$$

Dans les systèmes PV / T, la température PV dépend également des conditions de fonctionnement du système et principalement de la température moyenne du fluide caloporteur. Dans les systèmes PV / T, le rendement électrique PV η_{el} peut être considéré en fonction de la température effective du capteur PV $(T_{PV})_{eff}$, qui correspond à la température PV pour les conditions de fonctionnement des systèmes PV / T. Cette valeur effective peut être obtenue par:

$$(T_{PV})_{eff} = T_{PV} + (T_{PV/T} - T_a) \quad (13)$$

La température de fonctionnement $T_{PV/T}$ du système PV / T correspond au module PV et aux températures de l'unité thermique et peut être déterminée approximativement par la température moyenne du fluide. Cette formule modifiée correspond à l'augmentation de la température de fonctionnement PV due aux pertes de chaleur réduites à l'air ambiant du système PV / T.

4.2. Caractérisation des capteurs combinés PV/T

Plusieurs études ont été développées pour caractériser les panneaux solaires PV/T en régime permanent.

Le but de la caractérisation des combi-systèmes PV/T en régime permanent est de déterminer les performances du système, tels que le rendement dans les conditions standards ou normales, ainsi d'identifier les pertes thermiques en fonction de chaque type de capteur.

4.2.1. Capteurs PV/T-eau

Ils existent de nombreux travaux développés pour caractériser thermiquement les capteurs à eau. Quelle que soit sa géométrie, la méthode de l'analogie électrique demeure efficace pour déterminer les performances d'un PV/T-Eau. Le modèle thermique devrait évaluer les paramètres tels que la température de la cellule, le gain thermique, la température de l'eau à la sortie et le rendement thermique. Figure 12 représente un schéma équivalent d'un capteur hybride PV/T de la Figure 13. Le schéma (a) représente une approche de modélisation en régime dynamique avec des capacités thermiques C_i ($J.Kg^{-1}.K^{-1}$), des résistances thermiques R_i ($K.W^{-1}$), avec des flux entrants (densité de rayonnement solaire globale G ($W.m^{-2}$)), de flux gagné par le fluide par advection ϕ_g , ainsi que des flux échangés au milieu ambiant sous forme de puissances thermiques perdues. Le tableau X représente les formules explicité des valeurs de C_i et de R_i selon le type du milieu ou de la couche du système PV/T. La plupart d'études caractérisent les panneaux PV/T en régime permanent en supposant que les pertes termes stockés sont relativement faibles devant les flux résultant entre les nœuds et le milieu extérieur. Les expressions permettant de calculer la température de la cellule, la température de surface arrière du module et la température moyenne du fluide sur la longueur du tube en dessous du module PV sont obtenues à partir du bilan énergétique.

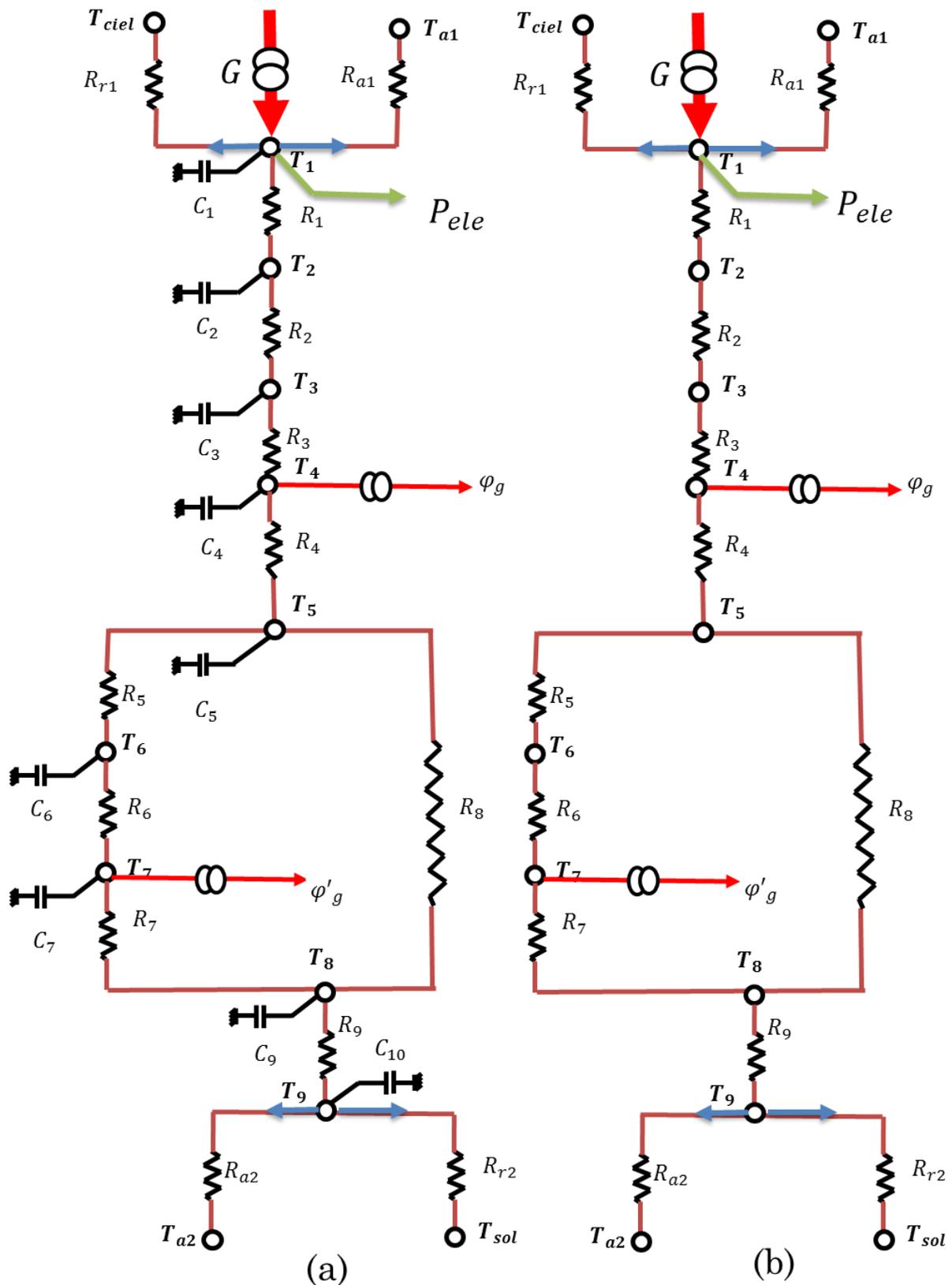


Figure 12: Analogie électrique (ou approche RC) d'un capteur PV/T à eau, (a) : Schéma en régime dynamique, et (b) : en régime permanent

La température de la cellule PV est donnée par l'équation (14) estimée par [51] en employant un bilan énergétique en régime quasi-stationnaire:

$$T_{cell} = \frac{(\alpha\tau)_{\text{eff}}(1 - \eta_{ele})G + U_T T_a + U_T T_{bs}}{U_t + U_T} \quad (14)$$

La température de la face arrière du panneau peut aussi être estimée par l'équation (15) par [51].

$$T_{bs} = \frac{hp_1(\alpha\tau)_{\text{eff}}(1 - \eta_{ele})G + U_T T_a + h_f T_f}{U_{tT} + h_f} \quad (15)$$

La température du fluide à la sortie du capteur peut également être estimée par:

$$T_f = \left(T_{amb} + \frac{hp_1 hp_2 (\alpha\tau)_{\text{eff}} (1 - \eta_{ele}) G}{U_L} \right) \left(1 - \exp\left(\frac{F'(W - D)U_L L}{\dot{m}C_f} \right) \right) + T_{f,\text{in}} \left(\frac{1 - \exp\left(\frac{F'(W - D)U_L L}{\dot{m}C_f} \right)}{\frac{(W - D)U_L L}{\dot{m}C_f}} \right) \quad (16)$$

Le rendement thermique est donné par :

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}C_f}{U_L A_c G} \left[1 - \exp\left(-\frac{U_L A_c}{\dot{m}C_f} F' \right) \right] \left(hp_1 hp_2 (\alpha\tau)_{\text{eff}} (1 - \eta) G - U_L (T_{f,\text{in}} - T_{amb}) \right) \quad (17)$$

Il est noté que le coefficient de transfert global de la cellule PV au fluide caloporteur U_L .

$$U_L = \left[\frac{e_c}{\lambda_c} + \frac{e_T}{\lambda_T} \right]^{-1} \quad (18)$$

De plus, le coefficient de transfert de chaleur par rayonnement (h_{rad}) par rapport au coefficient de transfert de chaleur global de cellule à l'atmosphère à travers le verre (U_t) est également pris en compte et est donné par :

$$U_t = \left[\frac{e_g}{\lambda_g} + \frac{1}{h_{conv,t}} + \frac{1}{h_{rad}} \right]^{-1} \quad (19)$$

En outre, le coefficient de transfert de chaleur par convection à l'intérieur du conduit d'eau (h_f) a été supposé constant dans la référence [52]. Cependant, dans cette recherche, (h_f) est également calculé en fonction du régime d'écoulement.

$(\alpha\tau)_{\text{eff}}$ est le produit effectif du facteur de transmission-absorption dans les équations. (1) e (3), hp_1 , hp_2 , et U_{tT} sont respectivement :

- Le facteur de pénalité dû à l'existence de l'étanchéité de la cellule (le Tedlar) à travers le verre, la cellule solaire et l'encapsulation.
- Le facteur de pénalité dû à l'interface entre le vitrage, la lame d'air, et le fluide caloporteur.
- Le coefficient global de transfert de chaleur du verre au Tedlar à travers la cellule et est calculé en utilisant les équations données par Duffie et Beckman [53].

Le coefficient de transfert de chaleur global du verre à l'air à travers la cellule et le Tedlar est donné par :

$$U_{tf} = \frac{1}{1/U_{tT} + 1/h_f} \quad (20)$$

Le taux d'énergie thermique utile obtenu à partir du système PV / T intégré est donné par

$$Q_u = F_R \left(hp_1 \cdot hp_2 (\alpha\tau)_{\text{eff}} \cdot G - U_L \cdot (T_{f,in} - T_a) \right) \quad (21)$$

F_R est le facteur d'évacuation thermique du capteur qui est donné par :

$$F_R = \frac{\dot{m}C_f}{A_c \cdot U_L} \left(1 - \exp \left(- \frac{A_c \cdot U_L \cdot F'}{\dot{m}C_f} \right) \right) \quad (22)$$

:

- **Le rendement électrique**

Dans le calcul du terme $(\alpha\tau)_{\text{eff}}$, la présence d'un rendement électrique (η_{ele}) montre que les analyses thermique et électrique dépendent les unes aux autres. Afin de calculer le rendement électrique, divers paramètres électriques tels que le courant de puissance maximal, la tension et la puissance doivent être

déterminés. Par conséquent, des modèles simplifiés linéaires de détermination du rendement électrique ont été proposés dans plusieurs études.

Le rendement électrique donné par:

$$\eta_{el} = \eta_0(1 - \beta(T_c - T_{ref})) + \gamma \log_{10} G \quad (23)$$

η_0, β et T_{ref} sont respectivement des et γ étant un facteur.

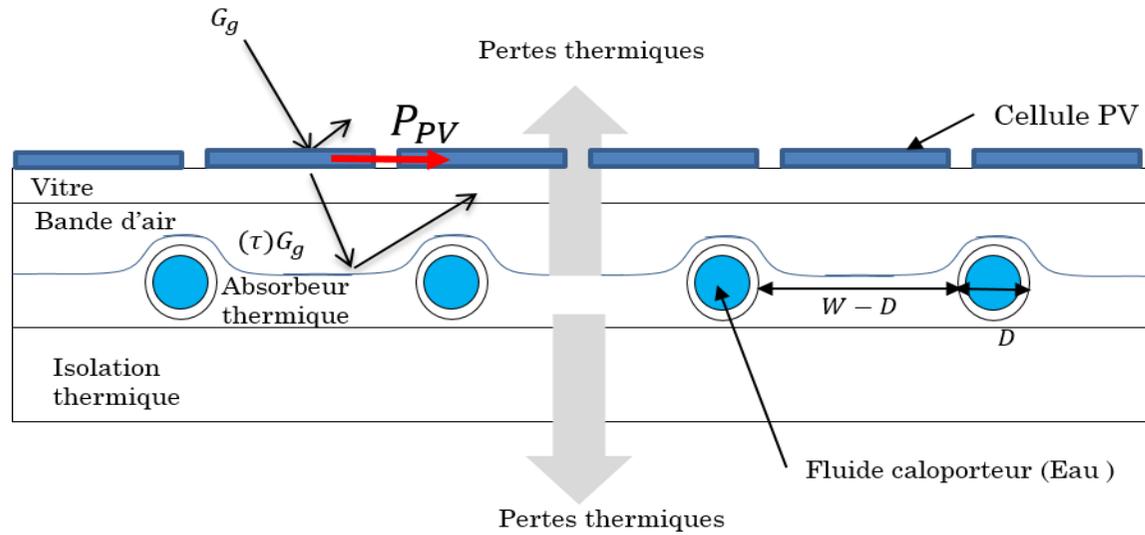


Figure 13: Exemple d'un capteur PV/T à eau

Tableau 2: Expression de différentes résistances et capacités déduites de l'analogie électrique

Résistance thermique de chaque sous-composante													
R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	Ra1	Ra2	Rr1	Rr2	
$\frac{e_1}{\lambda_1}$	$\frac{e_2}{\lambda_2}$	$\left(\frac{2\lambda_a}{e_a} + h_{air}\right)^{-1}$	$\left(\frac{2\lambda_a}{e_a} + h_{air}\right)^{-1}$	$\frac{e_{tube}}{\lambda_b}$	$\left(\frac{2\lambda_e}{D_i} + h_{eau}\right)^{-1}$	$\left(\frac{2\lambda_e}{D_i} + h_{eau}\right)^{-1}$	$\frac{e_b}{\lambda_b}$	$\frac{e_i}{\lambda_i}$	h_{a1}	h_{a2}	h_{r1}	h_{r2}	
Capacité thermique de chaque sous-composante													
C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10				
Cp_{PV}	Cp_V	Cp_{air}	Cp_{air}	Cp_b	Cp_b	Cp_{eau}	Cp_b	Cp_i	Cp_i				

où e_i sont les épaisseurs de chaque couche, λ_i représentent les conductivités thermiques, h_{air} et h_{eau} sont respectivement les coefficient de transfert par convection dans l'air et dans l'eau, h_{a1} , h_{a2} , h_{r1} , et h_{r2} sont respectivement les coefficients de transfert de chaleur par convection et par rayonnement avec le milieu ambiant de la surface haute et basse du capteur. Cp_{PV} , Cp_V , Cp_{air} , Cp_b , Cp_{eau} , et Cp_i représentent respectivement les capacités thermiques équivalentes des couches PV, vitrage, l'air, l'absorbeur métallique, l'eau, et l'isolant thermique.

4.2.2. PV/T-air

Pour caractériser les systèmes PV/T à air, la même approche en régime statique est souvent utilisée afin de conclure les différents rendements thermique, et électrique. Ils existent plusieurs expressions de rendement thermique dans la littérature suivant l'approche mathématique utilisée et le modèle physique.

En se basant sur le modèle thermique des capteurs solaires à air de [53], le rendement thermique instantané est déduit par l'équation (22) d'un système PV/T à air simple qui est schématisé par la Figure 16.

$$\eta_{th} = F_R((S \times \tau\alpha_{PV}) + (1 - S)\tau\alpha_T) - F_R U_L \times \frac{T_{fi} - T_a}{(\alpha\tau)_{eff}(1 - \eta_{ele})G_g} \quad (24)$$

avec $\tau\alpha_{PV}$ est le facteur de transmittance-absorptance de la partie PV, $\tau\alpha_T$ est le facteur équivalent de transmittance-absorptance du vitrage et de la composante d'encapsulation des couches PV, F_R est le facteur d'évacuation thermique du système. U_L ($W/m^2.K$) est le coefficient de pertes globales du système.

D'autres aspects et paramètres peuvent être déduits à travers l'étude des modèles thermiques en régime permanent des systèmes solaires PV/T existant dans la littérature, tels que le rendement électrique, la puissance hydrodynamique, et l'aspect hygrothermique.

4.3. Aspect Hydrodynamique

L'aspect hydrodynamique dans les panneaux PV/T se manifeste dans le dimensionnement des pompes de circulation du fluide caloporteur. Dans la modélisation des systèmes PV/T, l'aspect hydrodynamique est très important

dans l'estimation des pertes de charges du fluide, la puissance hydrodynamique d'une pompe de circulation.

$$P_{pompe} = \frac{n\dot{m} \times P}{\rho \times \eta_{pompe}} \quad (25)$$

avec n est le nombre de tours/minutes de l'hélice de la pompe, \dot{m} (kg/s) est le débit massique, P (Pa) est la différence de pression, ρ (kg/m^3), et η_{pompe} est le rendement de la pompe.

4.4. Paramètres de contrôle et de conception

Dans la présente thèse, deux types de paramètres sont distingués afin de mener les études de modélisation, de dimensionnement et d'optimisation des combi-PV/T en terme, les paramètres de contrôle et les paramètres de conception.

Les paramètres de conception sont des paramètres à optimiser afin de concevoir le système. On distingue par les paramètres de conception les suivants :

- **La taille et la forme de l'échangeur thermique**

Il est commode que la forme de l'échangeur joue un rôle très important dans le design et l'amélioration du rendement thermique, l'objectif est de maximiser le flux de chaleur transférer au fluide calo-récupérateur et minimiser les pertes vers le milieu ambiant. Comme expliqué par la figure. Le diagramme de flux qui représente montre l'intérêt de cette conception. Pour cela, plusieurs formes géométriques ont été développées pour atteindre cet objectif.

Ouhsaine et al., 2016 [54] ont proposé une forme géométrique fractale pour améliorer le rendement du système PV/T plan. La stratégie de refroidissement est basée sur une autonomie de chaque cellule PV, c'est-à-dire que chaque cellule est associée à un micro/mini-échangeur de chaleur car il permet de gérer d'une façon plus économique la distribution des fluides dans le réseau de distribution. Outre, la conception proposée a permet d'une façon significative d'améliorer le transfert de chaleur et de masse dans un réseau mini-fractal.

[55] Proposent l'application des capteurs solaires thermiques par le laboratoire Holmholtz dans la conception d'un couplage PV/T, les auteurs ont ramené une étude numérique, bien qu'expérimentale.

- **Le facteur d'emballage**

Le facteur d'emballage représente le taux (en %) d'occupation des cellules solaires dans un panneau. Dans des applications spécifiques telles que les bâtiments, [56] ont étudié les effets du facteur d'emballage sur l'énergie produite dans une configuration des panneaux PV semi-transparentes intégrés aux bâtiments. L'augmentation du facteur d'emballage n'augmente pas toujours le gain énergétique annuel. Si le facteur de remplissage est trop élevé, la température de sortie thermique augmentera en raison de l'absorption d'une grande quantité d'énergie thermique, ce qui augmentera la température de la cellule, ce qui entraînera une diminution du rendement électrique. Cependant, la diminution du facteur d'emballage diminuera le rendement électrique car la zone d'absorption du rayonnement solaire est faible. D'une manière générale, il n'existe pas encore de connaissances complètes sur la variation du facteur d'emballage et de ses effets sur différents fluides dans différents systèmes PV / T. Cela a ouvert la porte à l'optimisation de la conception du système.

- **La caractérisation thermique**

Dans la partie « taille et forme de l'échangeur » on a mis l'accent sur le rôle de la conception à l'amélioration du rendement du système en jouant sur une forme optimale. Dans certaines études, le résultat de cet aspect est très important, et peut être représenté par deux normes de caractérisation des capteurs solaires, la norme européenne, et la norme américaine.

- **Les paramètres de contrôles**

Les paramètres de contrôle sont des paramètres gérant au mieux possible le fonctionnement du système. Ils jouent le rôle d'une entrée contrôlable qui agit sur le comportement dynamique du système, prenant l'exemple d'un système PV/T à eau qui est étudié davantage dans le chapitre qui suit, on distingue les paramètres ci-après :

- **La température d'entrée de capteur**

Quel que soit la nature du capteur thermique ou combiné PV/T, la température d'entrée permet une valeur ajustable de sortie. Dans les installations en boucle fermée, un système de régulation qui ajuste la valeur de cette température. On

évite souvent la surchauffe par la diminution de la température d'entrée, et on valorise la sortie en s'appuyant sur la température de retour ou de stockage.

- **Le débit massique et le coefficient de convection**

Le débit massique permet un contrôle optimal de la productivité du système, il est envisageable un débit optimal pour maximiser le rendement qui est valoriser dans plusieurs études expérimentales et analytiques [57]–[64].

[62] Proposent un refroidissement actif des panneaux PV/T dans des conduites parallèles et concluent une corrélation entre l'évolution du rendement électrique des systèmes PV/T et le débit massique.

Par conséquent, la convection joue un rôle indispensable dans le processus, les corrélations de coefficient h sont distinguées selon le régime de l'écoulement et la nature de fluide.

Une troisième typologie de paramètres, qui est le flux solaire, la température ambiante, la vitesse du vent...etc. le type de ces paramètres est supposé externe et incontrôlable. Ainsi que L'aspect géométrique de l'installation telle que l'orientation, l'emplacement et l'inclinaison des capteurs PV/T.

- **Typologie des fluides**

Comme étudié dans le chapitre 2, deux types majeurs bien commercialisés de fluides utilisés aux PV/Ts sont bien entendu l'eau et l'air. Les nano-fluides et les fluides caloports représentent la nouvelle génération des fluides caloporteurs appliqués au domaine solaire. [65] présentent en détail un état de l'art sur le progrès réalisé de ces nano-fluides dans les applications solaires. [52] proposent une évaluation des modèles mathématiques et expérimentale des rendements électriques et thermiques des PV/T pour différents nano-fluides, combinés avec de l'eau, ils ont évalué deux configurations, un couplage sectoriel dont le système PV/T-Nano-fluide connecté au réseau, et une deuxième dont le système PV/T-NF non connecté, et avec une étude techno-économique il ont prouvé la rentabilité économique ainsi que la faisabilité technique en étudiant un retour sur investissement de l'installation d'un couplage sectoriel. [66] étudiés expérimentalement l'insertion des nano-fluides en rajoutant 3% de nanoparticules à l'eau qui cause une augmentation de la densité de fluide et de sa viscosité. En revanche, les auteurs ont remarqué une augmentation de la

conductibilité thermique. La stabilité du nano-fluide a été examinée à des intervalles de trois mois et il a été constaté qu'après six mois, la conductivité thermique diminuait jusqu'à $0,003 \text{ W / mK}$, indiquant que la solution était stable et utilisable pendant de longues périodes. L'utilisation de 3% en poids de nano-fluide de SiC augmente le rendement électrique jusqu'à 24,1% par rapport au système PV seul, tandis que le rendement thermique augmente jusqu'à 100,19% par rapport à l'utilisation de l'eau pour le refroidissement. Les résultats finaux ont indiqué que l'efficacité totale du système PV / T nano-fluide avait un rendement global plus élevé d'environ 88,9% par rapport au système PV séparé. Dans une autre étude [67], les auteurs ont testé expérimentalement trois configurations : Un réservoir rempli d'eau qui circule à travers les tuyaux de refroidissement, un réservoir rempli avec du MCP et de l'eau circule à travers les tuyaux de refroidissement, et un réservoir rempli avec de MCP / nano-SiC et de nano-fluide (eau-SiC) circule à travers des tuyaux de refroidissement. Les résultats trouvés montrent que les nanoparticules avec du MCP et le nano-fluide amélioraient le courant électrique de 3,69 à 4,04 A et le rendement électrique de 8,07% à 13,32%, comparativement au PV conventionnelle. [68] étudient le développement des caloducs dans plusieurs applications et processus industrielles et ils donnent un aperçu sur les applications solaires notamment le PV/T.

[69] ont développé un nouveau panneau PV / T à caloduc plat, constitué de neuf caloducs en cuivre assemblés à l'arrière d'une plaque d'aluminium, utilisant de l'eau comme fluide de travail. La section du condenseur des caloducs a été incorporée dans un échangeur de chaleur.

5. Focus sur les brevets et la commercialisation du PV/T dans le monde

Il existe actuellement plus de 160 000 brevets et applications développés et enregistrés et publié sur la plateforme Google patents dans le monde des systèmes combinés de PV/T.

[70]: **Pat. N° : US 2017/0040930 A1**

Il s'agit d'un dispositif photovoltaïque-thermique comprend une unité de logement, un panneau photovoltaïque, un stockage de collecteur de fluide, des plaques de réflecteur à angle réglable et une plaque d'absorption. Le panneau photovoltaïque est placé à l'intérieur de l'unité de logement et comprend une pluralité de cellules photoélectriques. Les plaques de réflecteur à angle réglable focalisent et répartissent la lumière du soleil sur les cellules photovoltaïques. Le stockage du collecteur de fluide se trouve dans l'unité de logement et est configuré pour stocker le fluide. La plaque absorbante se trouve à l'intérieur de l'unité de logement entre le panneau photovoltaïque et le stockage du collecteur de fluide et est configurée pour collecter la chaleur en absorbant les radiations électromagnétiques et pour transmettre la chaleur collectée au collecteur de fluide. Les réflecteurs peuvent être recouverts d'un capteur de lumière et peuvent se fermer automatiquement les nuits et les temps nuageux.

[71]: Pat. N° : US 2004/0055631 A1

Il s'agit d'un collecteur d'énergie solaire hybride possède un collecteur photovoltaïque qui génère de l'électricité et un collecteur thermique qui génère de la chaleur. Le collecteur photovoltaïque, qui est semi-transparent, utilise un rayonnement à plus courte longueur d'onde tout en transmettant sélectivement un rayonnement de longueur d'onde moyenne et longue au collecteur thermique. Les capteurs sont séparés par une barrière thermique.

Sichanugrist et al. [2008] Pat. N° : US 2008/0011289 A1

L'invention porte sur un assemblage de cellules solaires et de plaques de chauffe-eau qui peut être incorporé dans un collecteur PVT.

Cox [2009] : Pat. N° : US 2009/0223511 A1

Il s'agit d'un panneau solaire photovoltaïque / thermique est présenté qui ne contient aucun vitrage au-dessus du réseau photovoltaïque. L'absence de vitrage permet aux cellules photovoltaïques de fonctionner à plus basse température et donc à plus haut rendement. De plus, l'absence de vitrage permet au panneau PV / T de la présente invention d'être utilisé pour assurer le refroidissement

nocturne d'un bâtiment. Le panneau est construit en collant une plaque de transfert de chaleur en aluminium à l'arrière de la matrice PV dans le panneau en utilisant un adhésif de silicone. La tubulure PEX est insérée dans des canaux intégralement formés à l'arrière de la plaque de transfert de chaleur à l'aide de silicone ou d'un autre composé thermo-conducteur.

[72]: Pat. N° : US 2011/0272003 A1

Appareil de production d'énergie comprenant : une unité de production d'énergie photovoltaïque ; un système de refroidissement pour l'unité de production d'énergie photovoltaïque, configuré pour fournir du liquide de refroidissement sur l'unité de production d'énergie photovoltaïque et pour extraire le liquide de refroidissement après utilisation ; et une unité de génération d'énergie de turbine, configurée pour fonctionner par un fluide au moins partiellement chauffé par un premier échangeur de chaleur utilisant ledit fluide de refroidissement extrait.

[73] Pat. N° : US 2012/0085094 A1

L'invention concerne un système photovoltaïque-thermique (PV-T) et un procédé de refroidissement de cellules photovoltaïques (PV) dans le système. L'énergie provenant d'une source d'excitation telle que le soleil frappe les cellules PV dans le système PV-T provoquant un chauffage qui réduit l'efficacité PV. Les cellules PV sont refroidies par un fluide dans un système de transfert de chaleur intact produisant un sous-produit de l'eau chauffée tandis que les cellules PV libèrent une forme d'énergie. En outre, le système PV-T peut être mis en œuvre dans une usine de dessalement pour récolter de l'énergie et de la chaleur pour les processus de dessalement. La présente invention comprend également des procédés pour transférer la chaleur des cellules PV vers la terre pour améliorer la performance PV et réduire le choc thermique des cellules PV.

[74] Pat. N° : US 2013/0160821 A1

L'invention concerne un procédé de production d'un module de conversion d'énergie solaire hybride de type PV / T ayant une unité thermique associée à une

unité photovoltaïque pour assurer le transfert de chaleur de l'unité photovoltaïque comprenant un certain nombre de cellules solaires. Le procédé consiste à stratifier l'unité photovoltaïque et l'unité thermique l'une avec l'autre par l'intermédiaire d'au moins une couche d'EVA (éthylène-acétate de vinyle) ou de PVB (polyvinylbutyral) ou une couche à base d'EVA ou de PVB.

Kroiß et Dr. Spinnler [2010] App N° : DE102010004874A1

L'invention concerne un système de dessalement d'eau comprenant un système photovoltaïque, dans lequel le système est configuré pour chauffer l'eau à dessaler par la chaleur perdue du système photovoltaïque. L'invention concerne également un procédé de dessalement de l'eau dans lequel l'eau à dessaler est chauffée avec la chaleur perdue d'un système photovoltaïque.

6. Bilan du chapitre

Dans ce chapitre, un état de l'art sur les différents aspects des systèmes solaires PV, thermiques, et combinés PV/thermiques sont abordés. Malgré, la diversité des systèmes PV/T et leurs développements, les modèles existés restent limités et restreints dans l'étude du comportement physique, à cause de la complexité du système ou à cause de sa taille qui manifeste un temps de calcul exorbitant. Donc il est important de trouver une nouvelle approche afin de réduire les efforts de modélisation et de simulation dynamique.

Chapitre III : Modélisation linéaire d'ordre réduit en représentation d'état des systèmes PV/T intégrés au bâtiment

1. Introduction

Ce chapitre fait l'office d'une synthèse bibliographique sur les systèmes PV et thermiques et discute les différents aspects mise en jeu.

Le chapitre trois aborde la modélisation linéaire d'ordre réduit en représentation d'état des systèmes PV/T intégrés aux bâtiments. Il regroupe un aspect théorique de modélisation avec une nouvelle approche simplifiée, et un aspect appliqué sur le couplage du PV avec la thermique sous forme de quatre modèles développés, le premier s'agit d'une modélisation d'un système PV/T à air, le deuxième sur un système PV/T à eau. Le troisième sur un système PV/T-mur trombe et le quatrième système sur un écoulement d'air à l'intérieur d'un capteur PV/T à air en double-étage avec deux configurations différentes. Enfin, une étude de cas de l'intégration du système PV/T-Eau à l'enveloppe d'un bâtiment avec et sans matériau à changement de phase dans l'optique d'améliorer les performances thermiques du système globale.

2. Développement du modèle d'ordre réduit en représentation d'état et application aux PV/Ts

D'après la première loi de la thermodynamique, La variation de l'énergie interne dU au cours d'une transformation vérifie l'équation (26):

$$dU = \delta Q - \delta W \quad (26)$$

La variation de l'énergie interne se traduit par la quantité de chaleur emmagasinée dans le corps physique $\frac{dU}{dt} = \rho c V \frac{dT}{dt}$.

Si le système physique est fermé au cours d'une transformation infinitésimale on obtient :

$$\frac{dU}{dt} = \frac{\delta Q}{dt} - \frac{\delta W}{dt} \quad (27)$$

Il en résulte :

$$\rho c V \frac{dT}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} \quad (28)$$

avec $\dot{Q} = -\lambda \text{grad}(T)$ et \dot{W} est la puissance échangée au cours de la transformation. Si le système est ouvert, la forme globale du premier principe qui est représenté par une intégrale des bilans des puissances sur un élément de volume fini dV peut prendre forme sous l'équation (29).

$$\int_V \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dV = \int_V R dV + \int_S \lambda \nabla T \cdot \mathbf{n} dS - \int_S \rho c T \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dS \quad (29)$$

avec R ($W \cdot m^{-3}$) représente le terme source volumique de l'équation, dV (m^3) est le volume de contrôle, S (m^2) est la surface élémentaire d'échange, \mathbf{n} est la normale à la surface d'échange, \mathbf{u} (m/s) est la vitesse de l'écoulement fluide, et ρc est la masse énergétique du volume de contrôle.

En utilisant le théorème de divergence, on obtient l'équation de l'énergie sous forme globale :

$$\int_V \left[\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\lambda}{\rho c} \Delta T + \nabla \cdot (T \mathbf{u}) - \frac{R}{\rho c} \right] dV = 0 \quad (30)$$

Sur un volume de contrôle choisi arbitrairement, si le fluide est incompressible ($\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$), on obtient :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T = a \Delta T + \frac{R}{\rho c} \quad (31)$$

avec a ($m^2 \cdot s^{-1}$) représente la diffusivité thermique du corps physique.

1.1. Réduction du modèle thermique

1.1.1. Théorie et principe

De nombreux modèles mathématiques modernes de processus réels posent des défis lorsqu'ils sont utilisés dans des simulations numériques ou dans les applications de commandes, en raison de leur complexité et de leur grande taille (dimension). La réduction d'ordre d'un modèle vise à réduire la complexité de calcul de tels problèmes, par exemple, dans des simulations de systèmes dynamiques et de systèmes de contrôle à grande taille. Par une réduction de la dimension d'espace d'état associée au modèle ou des degrés de liberté, une approximation du modèle original est calculée, ce qui est communément appelé modèle d'ordre réduit.

Les modèles d'ordre réduits sont utiles dans les contextes où il est souvent impossible d'effectuer des simulations numériques en utilisant le modèle d'ordre complète. Cela peut être dû à des limitations dans les ressources de calcul ou aux exigences du paramètre de simulation, par exemple des paramètres de simulation en temps réel ou des paramètres de plusieurs itérations nécessitant un grand nombre de simulations. Des exemples de paramètres de simulation en temps réel incluent des systèmes de contrôle dans l'électronique et la visualisation des résultats de modèle tandis que des exemples pour un paramètre de plusieurs sous-paramètres peuvent inclure des problèmes d'optimisation et d'exploration de conception. Pour être applicables aux problèmes du temps réel, les exigences d'un modèle d'ordre réduit sont souvent les suivantes [75]:

- Une faible erreur d'approximation par rapport au modèle complet.
- La conservation des propriétés et des caractéristiques du modèle complet (par exemple, stabilité et passivité en électronique).
- Techniques de modélisation des ordres réduits robustes et efficaces dans les calculs de simulation.

1.1.2. Formulation du problème

L'approximation de la capacité localisée de l'équation de la chaleur permet de réduire les dimensions spatiales en problème monodimensionnelle décrit par l'équation suivante :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)$$

Les manuels d'introduction de transfert de chaleur présentent généralement cette approximation comme une première méthode d'analyse de la conduction en régime transitoire, avec la règle empirique de Biot selon laquelle l'approximation est exacte pour les nombres de Biot inférieurs à 0,1 [76]. La méthode est souvent justifiée par l'exemple d'un petit objet très conducteur symétriquement refroidi par convection à un fluide environnant. Dans notre approche, on investigate si la règle empirique « $Bi \leq 0.1$ » s'étend aux situations asymétriques qui surviennent dans tous les systèmes physiques dynamiques (soumis à des conditions aux limites variables).

Pour explorer cette question, un mur unidimensionnelle uniforme représenté par la figure 1. Nous supposons que toutes les propriétés thermiques, y compris les coefficients de transfert de chaleur à chaque surface, sont spatialement uniformes et indépendants de la température. Les deux côtés du mur sont imposés par des températures T_0 et T_1 , l'échange de chaleur étant régi par les coefficients h_0 et h_1 ($W \cdot m^{-2} \cdot K$). Les surfaces gagnent ou perdent les flux \tilde{q}_0 et \tilde{q}_1 (W / m^2) par des mécanismes indépendants de la température, tels que le rayonnement à ondes courtes ou les sources ou puits de chaleur. Cela donne les flux de surface nets.

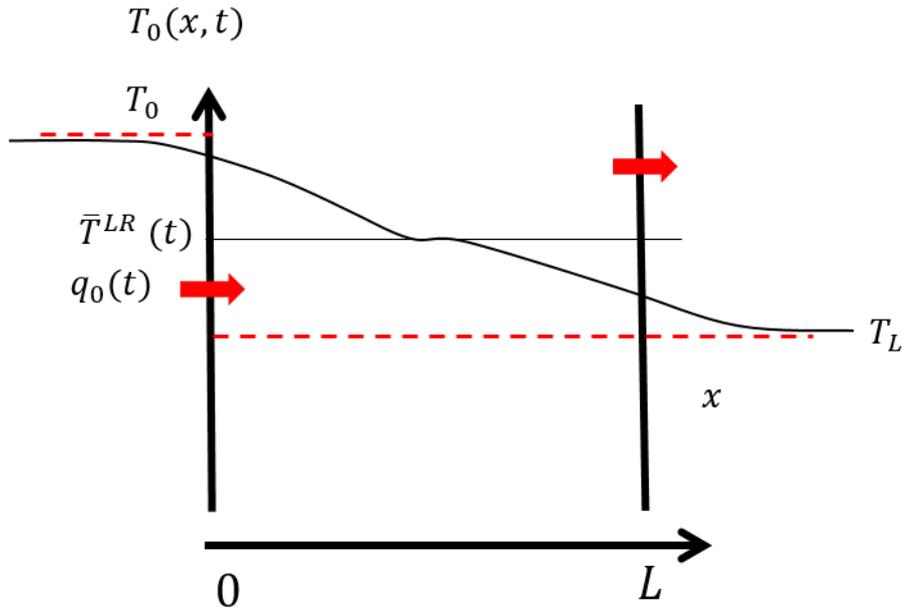


Figure 14: Propagation de la chaleur dans un modèle mur

Avec un flux de chaleur appliqué à l'extrémité compté positive vers la droite. On cherche à quantifier l'approximation de la capacité locale.

1.1.3. L'approximation de la réduction locale

L'équation de la chaleur dans le cas d'un mur peut s'écrire par :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad x \in [0, l], \quad t \geq 0. \quad (32)$$

L'intégration x de 0 à l :

$$\frac{d}{dt} = a \left(\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{l,t} - \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{0,t} \right), \quad (33)$$

La partie gauche de l'équation (33) découle de la règle intégrale de Leibniz et la partie droite découle du développement limité de la diffusion thermique en première ordre. On définit la température moyenne spatiale $\bar{T}(x, t) = (1/l) \int_0^l \frac{a}{\lambda} T(x, t) dx$. En utilisant la loi de Fourier, les termes à droite de l'équation (33)

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{0,t} = -\frac{q_0(t)}{\lambda}, \quad \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{l,t} = -\frac{q_l(t)}{\lambda}$$

Par ailleurs, l'équation (32) est équivalente à :

$$\frac{d\bar{T}}{dt} = \frac{a}{\lambda l} (q_0(t) - q_l(t)).$$

Étant donné les flux de chaleur dans l'Eq. (32) avec les conditions aux limites, la variation temporelle de la température moyenne spatiale satisfait :

$$\frac{d\bar{T}}{dt} = \frac{a}{\lambda l} [h_0(T_0 - T(0, t)) + \tilde{q}_0 - h_l(T(l, t) - T_l) - \tilde{q}_l] \quad (34)$$

Cette équation (34) est dérivée de l'équation de la chaleur avec les conditions aux limites, mais ne peut être résolue sans avoir utilisé sa forme générale avec les températures de surface imposées $T(0, t)$ et $T(l, t)$, et les températures des milieux environnants T_0 et T_l . Cependant, sous l'approximation de capacité localisée.

$$T(0, t) = \bar{T}(t) \text{ et } T(l, t) = \bar{T}(t) \text{ pour } t > 0 \quad (35)$$

L'équation (29) est réduite en :

$$\frac{d\bar{T}}{dt} \approx -\frac{a(h_0 + h_l)}{\lambda l} (\bar{T}(t) - T_{ref}) \quad (36)$$

Étant donné la condition initiale $T(x, 0) = T_i$ pour $x \in [0, l]$, la solution est donné par : $\bar{T}(t) = T^{LR}(t)$, avec :

$$T^{LR}(t) \equiv T_{ref} + (T_i - T_{ref})e^{-t/t_c} \quad (37)$$

$T^{LR}(t)$ est la température locale réduite approximative du mur. où $t_c = \frac{\lambda l}{a(h_0 + h_l)}$

est la constante du temps. La température de référence est définie par l'expression :

$$T_{ref} = (h_0 T_0 + \tilde{q}_0 + h_l T_l - \tilde{q}_l) / (h_0 + h_l).$$

1.1.4. Statistiques d'incertitude

Il existe plusieurs formulations pour l'évaluation de l'incertitude des modèles réduits, Alhama et Campo [77] proposent l'expression ci-dessous de l'incertitude équivalente:

$$\gamma_{AC}(t) = \frac{T_{max}(t) - \min\{T(0, t), T(l, t)\}}{T_{max}(t) - T_{ref}} \quad (38)$$

avec $T_{max}(t) = \sup\{T(x, t) \mid x \in [0, l]\}$. Cette méthode adopte trois hypothèses. La première, si $T_{max}(t) \rightarrow T_{ref}$, alors $\gamma_{AC}(t) \rightarrow \infty$, dans ce cas, on ne peut raisonnablement prédire que γ_{AC} devient négligeable. Ce qui permettra, par conséquent, de perdre son sens physique. La deuxième hypothèse réside dans la valeur de γ_{AC} qui est plutôt éloignée des grandeurs physiques intensives telles que la densité de flux et la densité d'énergie thermique sensible stockée. Troisièmement, γ_{AC} ne reflète qu'indirectement l'hypothèse de base de la capacité localisée, qui stipule que les températures de surface sont presque égales à la température moyenne, plutôt qu'à la température maximale figurant dans l'expression de γ_{AC} (38).

Pour résoudre ces problèmes, [78] ont proposé trois nouvelles mesures d'incertitude. Les deux premières quantifient directement la précision de l'hypothèse fondamentale de la capacité localisée. Les températures de surface déterminent les flux de chaleur de surface et donc le flux de chaleur net à travers le mur.

$$\gamma_0(t) \equiv \left| \frac{T(0, t) - T^{LR}(t)}{T_i - T_{ref}} \right|, \quad \gamma_l(t) \equiv \left| \frac{T(l, t) - T^{LR}(t)}{T_i - T_{ref}} \right| \quad (39)$$

. La troisième erreur, est définie par :

$$\bar{\gamma}(t) \equiv \left| \frac{\bar{T}(t) - T^{LR}(t)}{T_i - T_{ref}} \right| \quad (40)$$

Cette erreur quantifie la précision de l'approximation de la température moyenne spatiale. Ceci est intéressant dans les applications de stockage thermique, où les flux de chaleur à travers la frontière sont moins importants que l'énergie interne. Dans les définitions (39) et (40), nous avons normalisé par $T_i - T_{ref}$, (si l'approximation de la capacité localisée est précise) qui est l'écart maximum de la température d'équilibre T_{ref} . Le dénominateur est égale zéro seulement dans le cas trivial où $T_i = T_{ref}$, signifiant que le système commence et reste en équilibre.

Dans ce cas, l'approximation de la capacité localisée est exacte pour tous les temps.

1.1.5. La solution analytique

Pour simplifier notre analyse, on introduit la formulation adimensionnelle de l'équation de la chaleur. Soit :

- $\xi = x/l$: La dimension spatiale.
- $\tau = \alpha t/l^2$: est la dimension temporelle

Les températures adimensionnelles définies par :

$$\bullet \quad \theta(\xi, \tau) \equiv \frac{T(x,t)-T_{ref}}{T_i-T_{ref}}, \quad \theta_0 \equiv \frac{T_0+\tilde{q}_0/h_0-T_{ref}}{T_i-T_{ref}}, \quad \text{et} \quad \theta_l \equiv \frac{T_l+\tilde{q}_l/h_l-T_{ref}}{T_i-T_{ref}}$$

Sous ces transformations, la variable adimensionnelle locale réduite de la distribution de la température est $\tilde{\theta}(\tau) \approx \theta^{LR}(\tau) \equiv e^{-\tau/\tau_c}$, avec $\tilde{\theta}(\tau) = \int_0^1 \theta(\xi, \tau) d\xi$ est la température adimensionnelle moyenne et $\tau_c \equiv 1/(Bi_0 + Bi_l)$ est la constante de temps adimensionnelle. Les erreurs surfaciques de la température de l'équation (39) réduisaient à :

$$\gamma_0(t) \equiv |\theta(0, \tau) - \theta^{LR}(\tau)|, \quad \gamma_l(t) \equiv |\theta(1, \tau) - \theta^{LR}(\tau)| \quad (41)$$

La température adimensionnelle moyenne

$$\bar{\gamma}(t) \equiv |\bar{\theta}(\tau) - \theta^{LR}(\tau)| \quad (42)$$

La formulation adimensionnelle du problème devienne

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} &= \text{Fo} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2}, \quad \xi \in [0,1], \quad \tau \geq 0 \\ \theta(\xi, 0) &= 1, \quad \xi \in [0,1] \\ \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \Big|_{0,\tau} &= -Bi_0(\theta_0 - \theta(0, \tau)), \quad \tau \geq 0 \\ \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \Big|_{l,\tau} &= -Bi_l(\theta(l, \tau) - \theta_0), \quad \tau \geq 0 \end{aligned} \quad (43)$$

En appliquant le théorème de séparation des variables de Strum-Liouville du problème (42) la solution analytique est donnée par :

$$\theta(\xi, \tau) = \phi(\xi) + \sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{-\omega_n^2 \tau} X_n(\xi) \quad (44)$$

La composante de la solution en régime permanent est : $\phi(\xi) = a\xi + b$, avec $a = Bi_0(b - \theta_0)$ et $b = \theta_0 / (1 + 1/Bi_0 + 1/Bi_l)$. La même fonction propre de la composante transitoire est : $X_n(\xi) = \cos(\omega_n \xi) + (Bi_0 / \omega_n) \sin(\omega_n \xi)$, avec la valeur propre ω_n en résolvant l'équation transcendentale $\cos(\omega) = (\omega - Bi_0 Bi_l / \omega) / (Bi_0 + Bi_l)$. Le même coefficient est :

$$A_n = \frac{2\omega_n \sin(\omega_n)(Bi_0 + Bi_l)}{\omega_n^2 [Bi_0 + Bi_l - \sin^2(\omega_n)] + Bi_0 Bi_l \sin^2(\omega_n)} \quad (45)$$

1.2. Application au système PV/T à air

1.2.1. Technique de modélisation

La technique de modélisation comporte deux phases, la première phase repose sur un bilan énergétique local en régime dynamique sur chaque élément ou nœud. Pour cela, on distingue deux approches de la représentation nodale, la première consiste à déterminer la température aux frontières du domaine ou sous-domaine comme le cas (α) de la Figure 15, ce type de modélisation permet de définir une résistance thermique du domaine (N) qui lie le nœud (N) à (N+1), avec une capacité de stockage thermique qui est expliquée par l'inertie du corps (N). Le deuxième type, considère la température au milieu du domaine ou du sous-domaine sans avoir intérêt à la température de contact ou aux frontières. Dans ce type d'approche, on considère la somme des résistances en série qui relie respectivement les nœuds (N-1) avec (N), et (N) avec (N+1) comme le cas (β) de la Figure 15.

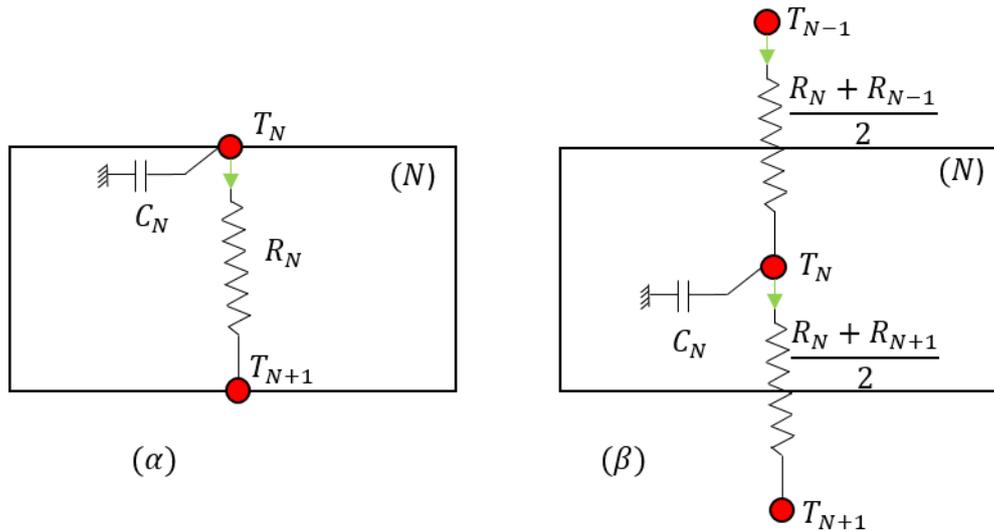


Figure 15: Schéma électrique équivalent (méthode RC de type alpha et beta)

On emploie dans ce travail, les deux types de représentation nodales selon la géométrie du système. La résistance du contact entre deux domaines est supposée négligeable pour les deux cas.

La deuxième phase repose sur une représentation d'état général du système étudiée après avoir regroupés les équations bilans sous formes d'un système.

On définit une représentation d'état d'un système linéaire continu invariant dans le temps avec p entrées, q sorties et n variables d'état par :

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX(t) + Bu(t) \\ Y &= CX(t) + Du(t) \end{aligned} \quad (46)$$

où $x \in \mathbb{R}^n$, $y \in \mathbb{R}^q$ et $u \in \mathbb{R}^p$ sont appelés respectivement le vecteur d'état, le vecteur de sortie et l'entrée ou le vecteur de contrôle. $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times p}$, $C \in \mathbb{R}^{q \times n}$, et $D \in \mathbb{R}^{q \times p}$ sont respectivement la matrice d'état, d'entrée, de sortie, et la matrice de traversée.

1.2.2. Système PV/T à air

Un système PV/T à air permet de récupérer de l'air chauffé par le panneau PV. La Figure 16 représente les différentes couches du panneau PV/T à air.

Afin de modéliser le comportement thermique du système, une approche d'ordre réduit en représentation d'état, précédemment décrite, a été adoptée. Les hypothèses suivantes ont été également prises en considération:

- Le problème physique est supposé monodimensionnel ;
- Le fluide est incompressible et newtonien ;
- Le transfert de chaleur dans le fluide (air) est supposé quasi-statique ;
- Les propriétés thermo-physiques des différentes couches du système ainsi que celle de l'air sont supposées homogènes et isotropes et indépendantes de la température ;
- Les contacts entre les différentes couches du système sont parfaits ;
- La conduction axiale dans le fluide est les différentes couches du système est supposée négligeable ;
- La dissipation visqueuse est supposée négligeable.

Ensuite, une réduction des équations régissant le problème aux équations adimensionnelles est développée, en posant :

$\tau = \frac{t}{t_c}$; $\theta = \frac{T - T_{\text{ref}}}{T_{\text{ref}} - T_{\text{max}}}$; $\xi = \frac{x}{L}$; $\bar{G} = G / G_{\text{ref}}$ et $U^+ = \frac{ut_c}{L}$. T_{ref} est la température de référence qui est la température ambiante et G_{ref} est la densité de flux solaire issue dans les conditions standards qui est de 1000 W/m^2 .

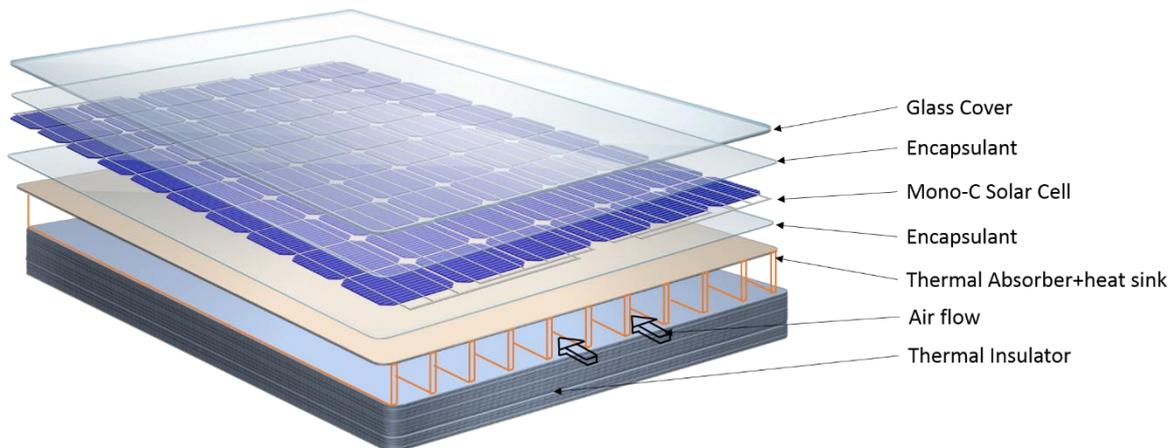


Figure 16: Modèle d'un capteur PV/T à air

Le bilan local de type (α) en régime dynamique s'établit sous forme adimensionnelle pour chaque composante du système par les équations (47)-

(53). Le bilan de la première couche de la vitre regroupe le flux solaire reçu, les échanges radiatifs et convectifs avec le milieu ambiant, ainsi que la quantité de chaleur transmise par conduction à la couche d'isolant électrique (EVA).

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_1(\xi, \tau)}{d\tau} = & \frac{t_c}{(\rho ce)_1} [-(h_{rad} + h_{ext} + U_1)\theta_1(\xi, \tau) + U_1\theta_2(\xi, \tau) \\ & + (h_{ext}\theta_{e1}(\tau) + h_{rad}\theta_{ciel})] + \frac{(1 - \tau_g)t_c G_{ref}}{(T_{max} - T_{ref})(\rho ce)_1} \bar{G}(\tau) \end{aligned} \quad (47)$$

Le deuxième élément est en général un isolant électrique EVA, qui est sous forme d'une couche transparente. Le comportement dynamique issu d'un bilan thermique est proposé peut-être formulé par l'équation (48).

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_2(\xi, \tau)}{d\tau} = & \frac{t_c}{(\rho ce)_2} [U_1\theta_1(\xi, \tau) - (U_1 + U_2)\theta_2(\xi, \tau) + U_2\theta_3(\xi, \tau)] \\ & + \frac{(1 - \tau_{EVA})\tau_g t_c G_{ref}}{(T_{max} - T_{ref})(\rho ce)_2} \bar{G}(\tau) \end{aligned} \quad (48)$$

La cellule PV reçoit des rayons solaires transmis à travers le vitrage et la couche EVA. Le bilan énergétique proposé par l'équation (49) regroupe les flux entrants/sortants de la cellule, la quantité stockée, en tenant compte le terme converti en énergie électrique, il peut être traduit par un rendement électrique caractéristique de la cellule PV η_e .

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_3(\xi, \tau)}{d\tau} = & \frac{t_c}{(\rho ce)_3} [U_2\theta_2(\xi, \tau) - (U_2 + U_3)\theta_3(\xi, \tau) + U_3\theta_4(\xi, \tau)] \\ & + \frac{(1 - \eta_e)\tau_{EVA}\tau_g t_c G_{ref}}{(T_{max} - T_{ref})(\rho ce)_3} \bar{G}(\tau) \end{aligned} \quad (49)$$

Après avoir modélisé la partie transparente du système, le processus de diffusion thermique est ensuite établi entre les cellules PV et les autres éléments du système, l'équation (50) traduit le bilan thermique du deuxième couche EVA opaque entre la cellule PV et l'absorbeur.

$$\frac{d\theta_4(\xi, \tau)}{d\tau} = \frac{t_c}{(\rho ce)_4} [U_3\theta_3(\xi, \tau) - (U_3 + U_4)\theta_4(\xi, \tau) + U_4\theta_5(\xi, \tau)] \quad (50)$$

La diffusion thermique dans l'absorbeur peut être modélisée par l'équation (51), les paramètres de contrôle et de conception interviendront dans cette équation seront développés par la suite. De plus, la récupération de fluide calorifique se fait au niveau du sixième élément décrit par l'équation de l'énergie (52).

$$\frac{d\theta_5(\xi, \tau)}{d\tau} = \frac{t_c}{(\rho ce)_5} [U_4\theta_4(\xi, \tau) - (U_4 + U_5)\theta_5(\xi, \tau) + U_5\theta_6(\xi, \tau)] \quad (51)$$

Ensuite, la quantité diffusée à travers de l'isolant est modélisée par les équations (45) et (46) par le même bilan.

$$\frac{d\theta_6(\xi, \tau)}{d\tau} + U^+ \frac{d\theta_6(\xi, \tau)}{d\xi} = \frac{t_c}{(\rho ce)_6} [U_5\theta_5(\xi, \tau) - (U_5 + U_6)\theta_6(\xi, \tau) + U_6\theta_7(\xi, \tau)] \quad (52)$$

$$\frac{d\theta_7(\xi, \tau)}{d\tau} = \frac{t_c}{(\rho ce)_7} [U_6\theta_6(\xi, \tau) - (U_6 + U_7)\theta_7(\xi, \tau) + U_7\theta_{e2}(\tau)] \quad (53)$$

Après avoir établi les différentes équations bilans du système, afin d'aider à la résolution de l'ensemble des équations différentielles, la condition initiale proposée s'écrit sous la forme suivante :

$$T(x, t = 0) = T_{\text{ref}} \text{ et } \theta(\xi, \tau = 0) = 0.$$

De plus, l'avantage de notre modèle, après avoir réduit les dimensions spatiales, il est nécessaire de signaler que le nombre des conditions aux limites se réduisent également, et on peut les intégrer sous formes de quantités de densité de flux aux frontières, comme indiqué dans le cas de l'équation (47) et (53). Pour la condition à la limite liée à la résolution du comportement thermique du système, on pose :

$T(z = 0, t) = T_{fi}$ et $\theta(\zeta = 0, \tau) = \theta_{fi}$, T_{fi} avec est la température de l'entrée du fluide. Dans le cas d'un système PV/T à air la température $T_{fi} = T_a$. Dans le cas du système PV/T à eau, on fixe la température de l'eau à l'entrée à une valeur de 18°C.

Enfin, Une forme matricielle est établie à partir de systèmes des équations (47)-(53) décrite par l'équation (54).

$$\dot{\theta}(\xi, \tau) = A\theta(\xi, \tau) + F\theta'(\xi, \tau) + B_1\theta_e(\xi, \tau) + B_2\bar{G}(\tau) \quad (54)$$

Où A étant la matrice d'état, F est la matrice d'entrée qui permet de contrôler, accéder, ou agir sur le comportement du système, et B_1 , et B_2 sont des matrices

liées aux conditions aux limites du système. Les expressions de matrices citées sont représentées par l'équation (55).

Il est à noter que les différents coefficients de transfert de chaleur $U_i (W/m^2.K)$ sont explicités suivant le milieu et la nature de transfert de chaleur par la suivante :

$U_1 = \frac{\lambda_1}{e_1}$, avec $\lambda_1 (W/m.K)$, et $e_1 (m)$ « à l'échelle de quelques millimètres » est l'épaisseur de la couche 1. En utilisant le même principe, les autres coefficients U_i $i = 1:7$, expriment la diffusion thermique par conduction dans les différentes couches solide avec des conductivités λ par rapport aux épaisseurs e_i . Dans le cas de la convection où $U_6 = h_f (W/m^2.K)$ représente le coefficient de transfert thermique par convection.

- **Schématisation du problème :**

En se basant sur l'équation (54) avec les termes de l'équation (55), le réseau thermique de la composante multicouche, peut être concrétisé par le schéma de la Figure 17 et la Figure 18. Dans le cas de la figure 17, le problème de transfert de chaleur en régime dynamique multicouches est représenté en espace réel par des résistances thermiques entre les nœuds avec des capacités thermiques aux nœuds. Ce schéma peut être transformé également en schémas adimensionnel en regroupant les résistances thermiques et les capacités en coefficients de Fourier dans le cas de la conduction pure, et en produit des nombres de Fourier et de Biot en cas d'échanges des composantes solides avec le milieu ambiant ou le fluide caloporteur. La méthodologie consiste à décrire le comportement thermique transitoire de chaque sous-élément du système par une variation temporaire de la température θ_i qui est égale au produit de coefficient de Fourier (ou FoBi pour le cas d'échange conduction/convection) à la différence de température entre deux nœuds. La figure 18, montre la technique de substitution des coefficients Fourier dans le bilan de chaque nœud, la raison de cette dynamique de substitution réside dans le facteur dénominateur dans chaque couche qui représente l'inertie thermique qui change dans chaque bilan énergétique aux différents nœuds.

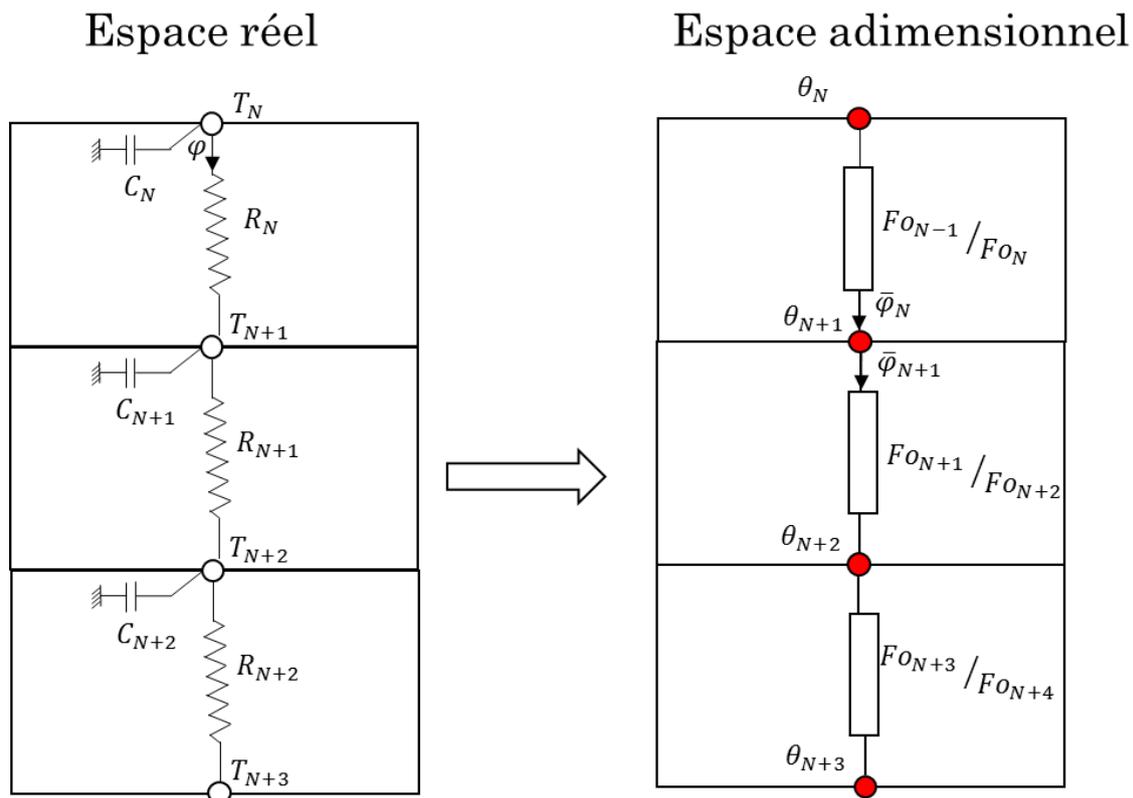


Figure 17: Schéma d'équivalence en analogie électrique dans l'espace dimensionnel et dans l'espace adimensionnel

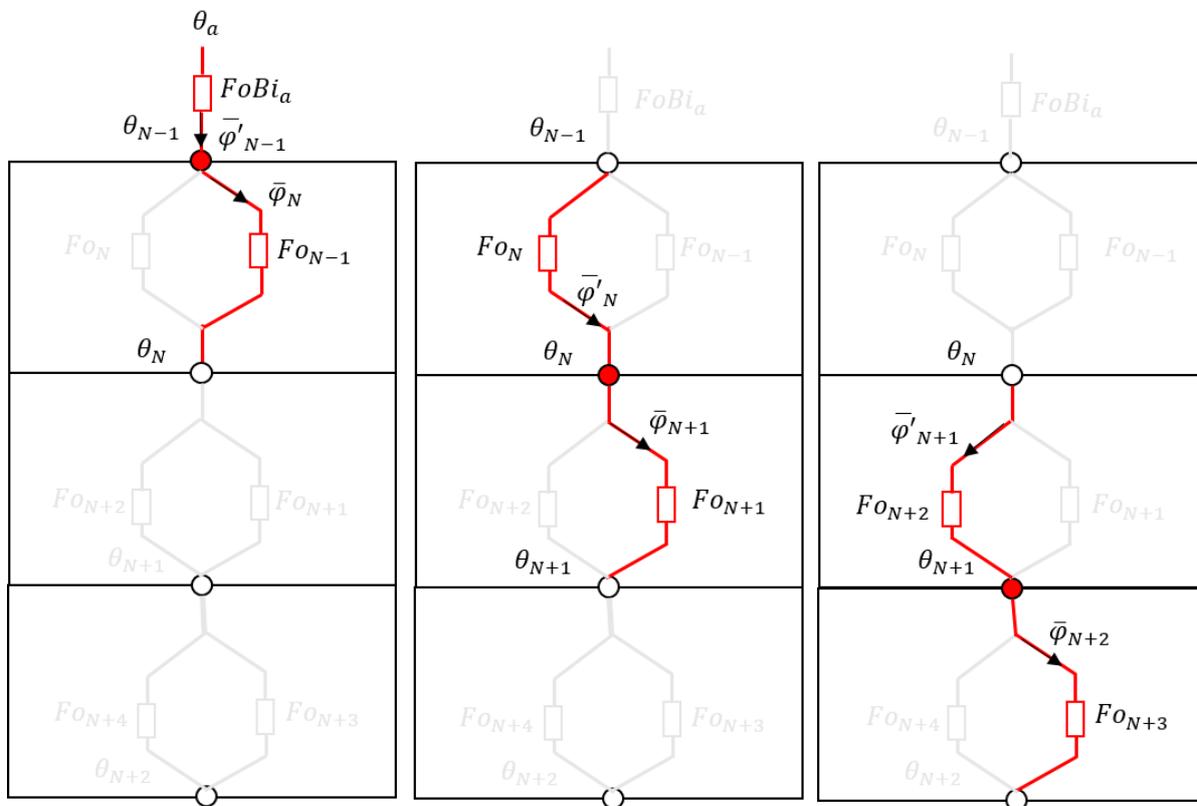


Figure 18: Représentation la méthode du réseau des coefficients substitutifs

$$\begin{aligned}
A = & \begin{bmatrix} -(FoBi_1 + FoBi_{r1} + Fo_1) & Fo_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Fo_2 & -(Fo_2 + Fo_3) & Fo_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Fo_4 & -(Fo_4 + Fo_5) & Fo_5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Fo_6 & -(Fo_6 + FoBi_2) & FoBi_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & FoBi_3 & -2FoBi_3 & FoBi_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & FoBi_4 & -(FoBi_4 + Fo_7) & Fo_7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Fo_8 & -(Fo_8 + FoBi_5) \end{bmatrix}; \\
B_1 = & \begin{bmatrix} FoBi_1 & FoBi_{r1} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ FoBi_6 & FoBi_{r2} \end{bmatrix}; \quad B_2 = \begin{bmatrix} \frac{\alpha_g t_c G_{ref}}{(T_{max} - T_{ref}) (\rho ce)_1} \\ \frac{\alpha_{EVA} \tau_g t_c G_{ref}}{(T_{max} - T_{ref}) (\rho ce)_2} \\ \frac{(\frac{\alpha_c - \eta_e}{\alpha_c}) \tau_{EVA} \tau_g t_c G_{ref}}{(T_{max} - T_{ref}) (\rho ce)_3} \\ \frac{\tau_{EVA}^2 \tau_c \tau_g t_c G_{ref}}{(T_{max} - T_{ref}) (\rho ce)_2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -Fo_a U^+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{55}$$

avec $Fo_i = \frac{a_i}{e_i^2} t_c$ est le nombre de Fourier à l'instant t_c correspondant à la couche i . $Bi_i = \left(\frac{he}{\lambda}\right)_i$ est le nombre de Biot correspondant à la couche i . $FoBi_i$ et le produit du nombre de Fourier est du nombre de Biot correspondant à la couche i . le produit $FoBi_{ri} = \frac{h_r t_c}{(\rho ce)_i}$ correspond au produit du nombre de Fourier de la couche i en contact avec son milieu adjacent transparent représenté par le nombre de Biot radiatif qui est défini par : $Bi_{ri} = \left(\frac{h_r e}{\lambda}\right)_i$, avec h_r est le coefficient d'échange radiatif [79].

1.2.3. Résolution et simulation numérique

Pour simuler le comportement du système et prédire sa performance thermique, les équations de modèle développé ont été discrétisées en faisant appel à une méthode numérique utilisant un schéma implicite. Les équations algébriques résultantes ont été ensuite résolues itérativement. Le pas de temps utilisé en simulation numérique est de 10 min. Quant au pas d'espace, il a été choisi égal à 0,1 m et 0.05m pour l'air et l'eau, respectivement.

Après discrétisation de l'équation d'état, on obtient la forme algébrique suivante :

$$\theta_{\xi}^{\tau+1} = \left(\mathbb{I} + \frac{\tau}{\xi} \left(\mathbb{I} - \tau A - \frac{\tau}{\xi} F \right)^{-1} \right)^{-1} \left(\mathbb{I} - \tau A - \frac{\tau}{\xi} F \right)^{-1} \left[\theta_{\xi}^{\tau} + \tau (B_1 \theta_e + B_2 \bar{G}) \right] \quad (56)$$

Validation :

Afin de s'assurer de la fiabilité et de la validité du modèle développé, une étude expérimentale a été effectuée. Les résultats numériques sont ensuite comparés à ceux expérimentaux.

Le montage expérimental utilisé lors des essais expérimentaux est schématisé par la Figure 19 montrant une chambre de caractérisation ayant un volume intérieur de 0,18 m³. Dans l'expérience réalisée, un échantillon composite formé d'une couche de béton armé juxtaposée à une autre couche du polystyrène. Comme le montre la Figure 19, la face du béton du côté chambre est soumise à une température (constante ou variable). Dans le cas d'une température constante, une température de 0°C a été imposée à l'air de la chambre. Dans le cas d'une température variable, dans une première étape, la température est augmentée de 2°C, chaque dix minute, à partir de sa valeur initiale de 0°C. Une fois la température maximale de 25°C est atteinte, la température est ensuite abaissée de 2°C chaque dix minutes jusqu'à ce qu'elle atteigne sa valeur initiale de 0°C. Durant les tests expérimentaux, la température de la face externe du polystyrène, en contact avec l'air extérieur, a été mesurée. Aussi, une étude de simulation, sous les mêmes conditions thermiques imposées à la face interne du béton et celle externe du polystyrène, a été menée. La Figure 20 illustre l'évolution de la température mesurée et celle prédite numériquement. Il est

constaté que les deux figures ont la même allure et tendance. Toutefois, une différence a été décelée. L'erreur relative donnée par l'expression de l'équation (59) et l'incertitude donnée par l'équation (60) ont été estimées à 12% et 0.95, respectivement. Cette différence est due à différentes raisons : les hypothèses adoptées, les erreurs causées par les mesures expérimentales, les corrélations adoptées pour estimer les coefficients de transfert de chaleur par convection, ainsi que la résistance de contact qui n'a pas été prise en considération.

$$e = \sqrt{\frac{\sum [100 \times (T_{sim,i} - T_{exp,i}) / T_{sim,i}]^2}{N}} \quad (57)$$

$$r = \frac{N(\sum T_{exp} T_{sim}) - (\sum T_{exp})(\sum T_{sim})}{\sqrt{N(\sum T_{exp}^2) - (\sum T_{exp})^2} \sqrt{N(\sum T_{sim}^2) - (\sum T_{sim})^2}} \quad (58)$$

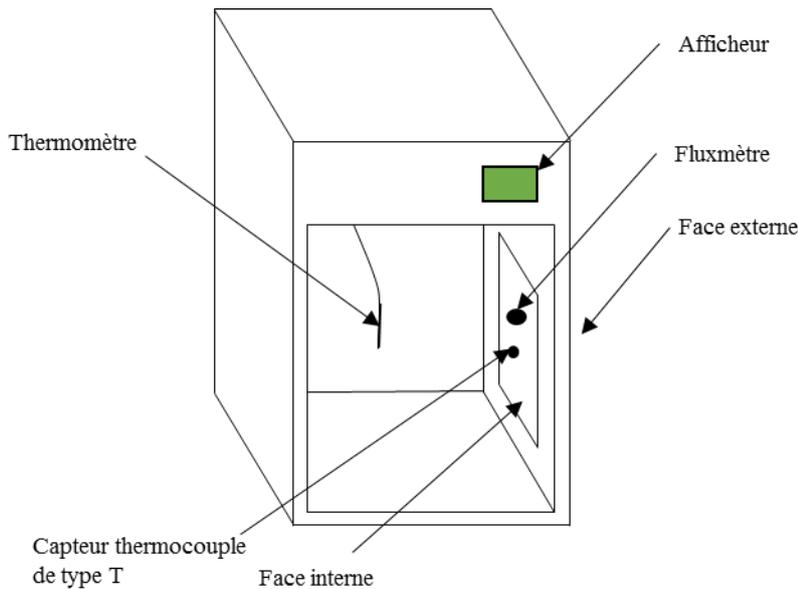


Figure 19: Montage de caractérisation expérimentale de validation : chambre de conditionnement contenant un échantillon d'un mur composé d'une couche de béton + isolant

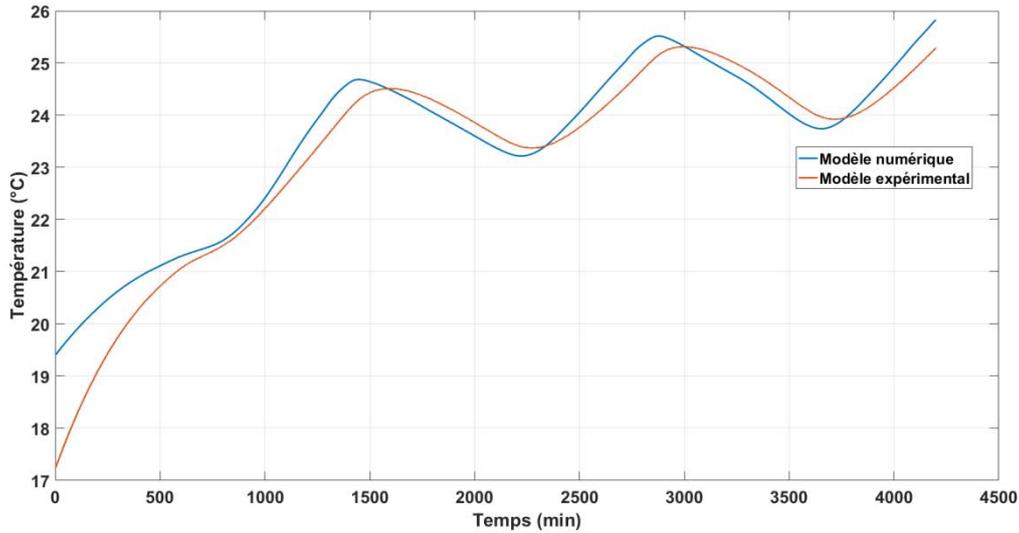


Figure 20: Profil de température de la face externe prédit numériquement comparé avec celui déterminé expérimentalement

1.3. Système PV/T à eau

Dans cette partie, un modèle du capteur PV/T à eau a été sélectionné pour étudier le comportement thermique mise en jeu. La partie PV est composée d'un module semi-transparent, permettant de transmettre une partie du rayonnement solaire non absorbé par la composante PV à l'absorbeur thermique via une lame d'air, Ce rayonnement transmis, se transformera en puissance thermique qui est absorbée par le fluide caloporteur (Eau) qui s'écoule dans les tubes de l'absorbeur métallique (Figure 21). Afin de mieux comprendre le comportement multi-physique, un modèle mathématique a été développé afin d'aboutir à une formulation d'ORRE. Le Tableau 3 donne l'expression de différentes propriétés

thermo-physiques.

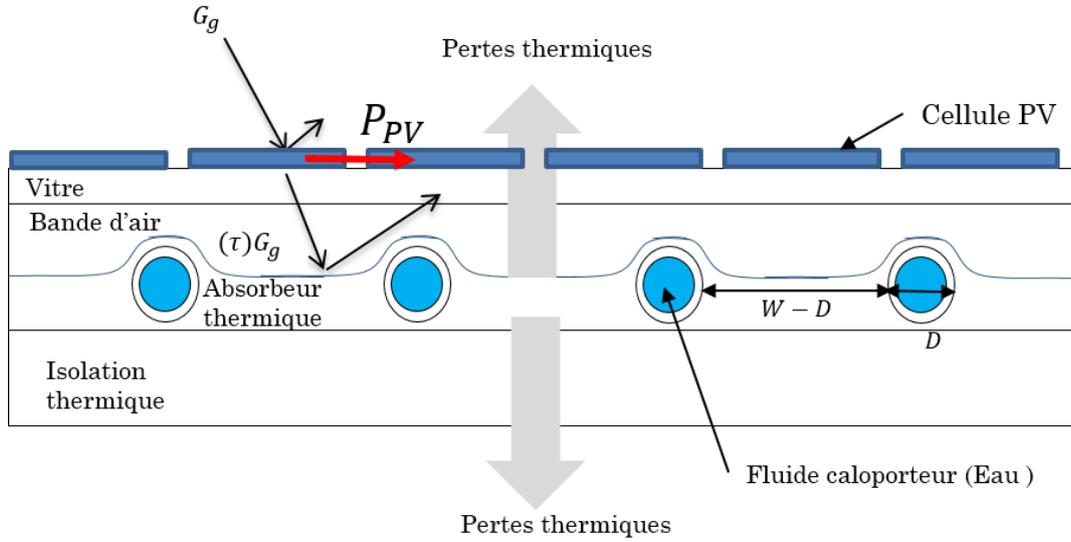


Figure 21: Modèle transversale d'un capteur PV/T à eau

Tableau 3: Expression des coefficients de transfert de chaleur globale dans chaque milieu du système étudié

U_1	U_2	U_b	U_{s1}	U_{s2}	U_{sb}	U_{s5}	U_{sf}	U_5	U_6
$\left(\frac{\lambda}{e}\right)_1$	$\left(\frac{\lambda}{e}\right)_2$	$\left(\frac{\lambda}{e}\right)_b$	$W.l \times \left(\frac{\lambda}{e}\right)_1$	$W.l \times \left(\frac{\lambda}{e}\right)_2$	$(W - D)l \times U_b$	$Wl \times U_b$	$\frac{\pi D_i}{2} l \times h_f$	$Wl \times \left(\frac{\lambda}{e}\right)_i$	$Wl \times h_a$

La première couche constituée du vitrage :

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_1}{dt} = & - \frac{(Wl(h_{ext} + \bar{h}_{rad}) + \frac{U_1 U_2}{U_1 + U_2}) t_c}{A_c(\rho ce)_1} \theta_1 + \frac{U_1 U_2}{U_1 + U_2} \frac{t_c}{A_c(\rho ce)_1} \theta_2 + \frac{A_c h_{ext} t_c}{A_c(\rho ce)_1} \theta_{aex} \\ & + \frac{A_c \bar{h}_{rad} t_c}{A_c(\rho ce)_1} \theta_{\infty} + \frac{(1 - \eta_e)(1 - \tau_{PV}) t_c G_{ref}}{(\rho ce)_1 (T_{max} - T_{ref})} \bar{G} \end{aligned} \quad (59)$$

La deuxième couche est la lame d'air entre le vitrage et l'absorbeur métallique.

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_2}{d\tau} = & \frac{\left(\frac{U_1 U_2}{U_1 + U_2}\right) t_c}{A_c(\rho ce)_2} \theta_1 - \frac{\left(\frac{U_1 U_2}{U_1 + U_2} + \frac{U_2 U_b}{U_2 + U_b}\right) t_c}{A_c(\rho ce)_2} \theta_2 + \frac{\left(\frac{U_2 U_b}{U_2 + U_b}\right) t_c}{A_c(\rho ce)_2} \theta_b \\ & + \frac{(\tau_{PV} \alpha_{air}) t_c G_{ref}}{(\rho ce)_2 (T_{max} - T_{ref})} \bar{G} \end{aligned} \quad (60)$$

La troisième couche contient un absorbeur métallique, qui est en contact direct avec le fluide caloporteur (l'eau) à travers une conductance thermique moyenne.

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_b}{d\tau} = & \frac{[(W - D)F + D]lt_c}{Wl(\rho ce)_b} \left[\frac{U_{sb}U_{s2}}{U_{sb}+U_{s2}} \theta_2 - \left(\frac{U_{sb}U_{s2}}{U_{sb}+U_{s2}} + \frac{U_{sb}U_{s5}}{U_{sb}+U_{s5}} + \frac{U_{sb}U_{sf}}{U_{sb}+U_{sf}} \right) \theta_b \right. \\ & + \frac{U_{sb}U_{s5}}{U_{sb}+U_{s5}} \theta_5 + \frac{U_{sb}U_{sf}}{U_{sb}+U_{sf}} \theta_f - \sigma Wl(\varepsilon_b T_b^4 - \varepsilon_1 T_1^4) \\ & \left. - \sigma Wl(\varepsilon_b \tau_1 T_b^4 - \varepsilon_a T_\infty^4) + \frac{(\tau_{air} \tau_{PV} \alpha_b) t_c G_{ref}}{(\rho ce)_b (T_{max} - T_{ref})} \bar{G} \right] \end{aligned} \quad (61)$$

La diffusion dans le milieu du fluide caloporteur est décrite par :

$$\begin{aligned} \left[\frac{d\theta_f}{d\tau} + U^+ \frac{d\theta_f}{d\xi} \right] \\ = \frac{[(W - D)F + D]lt_c}{(\rho c)_f \frac{\pi D_i^2}{4} l} \frac{U_{sb}U_{sf}}{U_{sb}+U_{sf}} \theta_b - \frac{[(W - D)F + D]lt_c}{(\rho c)_f \frac{\pi D_i^2}{4} l} \frac{U_{sb}U_{sf}}{U_{sb}+U_{sf}} \theta_f \end{aligned} \quad (62)$$

Le dernier élément est un système d'isolation thermique

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_5}{d\tau} = & \frac{[(W - D)F + D]t_c l}{Wl(\rho ce)_5} \frac{U_{sb}U_{s5}}{U_{sb}+U_{s5}} \theta_b \\ & - \left(\frac{[(W - D)F + D]t_c l}{Wl(\rho ce)_5} \frac{U_{sb}U_{s5}}{U_{sb}+U_{s5}} + \frac{t_c}{(\rho ce)_5} \frac{U_5 U_6}{U_5 + U_6} \right) \theta_5 \\ & + \frac{t_c}{(\rho ce)_5} \frac{U_5 U_6}{U_5 + U_6} \theta_e \end{aligned} \quad (63)$$

Enfin, en analogie avec le système à air, une forme matricielle est établie.

$$\dot{\theta} = A\theta + F\theta'(\xi, \tau) + B_1\theta_e + B_2\bar{G} \quad (64)$$

Avec

$$A = \begin{bmatrix} -(FoBi_1 + FoBi_{r1} + Fo_1) & Fo_1 & 0 & 0 & 0 \\ Fo_2 & -(Fo_2 + Fo_3) & Fo_3 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{(W-D)l}{A_c} Fo_4 - \left((Fo_4 + (1-F)Fo_5) \frac{[(W-D)]l}{A_c} + FoBi_2 \frac{A_f}{A_c} F \right) & \frac{A_f}{\pi D_i l} FoBi_3 & FoBi_2 \frac{A_f}{A_c} F & (1-F) \frac{[(W-D)]l}{A_c} Fo_5 \\ 0 & 0 & \frac{A_f}{\pi D_i l} FoBi_3 & -\frac{A_f}{\pi D_i l} FoBi_3 & 0 \\ 0 & 0 & (1-F) \frac{[(W-D)]l}{A_c} Fo_6 & 0 & -\left((1-F) \frac{[(W-D)]l}{A_c} Fo_6 + FoBi_4 + FoBi_{r2} \right) \end{bmatrix}$$

$$; B_1 = \begin{bmatrix} FoBi_1 & FoBi_{r1} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ FoBi_4 & FoBi_{r2} \end{bmatrix} ; B_2 = \begin{bmatrix} \frac{[(1-\eta_e)(1-\tau_g)t_c G_{ref}]}{(T_{max} - T_{ref})(\rho c e)_1} \\ \frac{(\tau_{PV} \alpha_{air}) t_c G_{ref}}{(T_{max} - T_{ref})(\rho c e)_2} \\ \frac{(\tau_{air} \tau_{PV} \alpha_b) t_c G_{ref}}{(T_{max} - T_{ref})(\rho c e)_b} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} ; F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -Fo_w U^+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(65)

- **Etude de cas**

La simulation dynamique sur le prototype d'un PV/T à eau basée sur le modèle d'ORRE est conduite pour une région de climat méditerranéen. Les données climatiques TMY Meteororm sont utilisées par la méthodologie suivante dans ce travail :

La Figure 22a montre les données de rayonnement sur une illustration quotidienne et annuelle afin d'observer plus clairement les périodes de forte densité de flux. De même, les Figure 22b et c montrent respectivement la variation de la température ambiante et de la vitesse du vent toutes les heures afin d'étudier de près l'effet des pertes thermiques convectives adaptées à la face externe de la paroi simulée. Les meilleurs jours du froid et les périodes chaudes de simulation numérique sont extraits et sélectionnés à partir de ces données météorologiques.

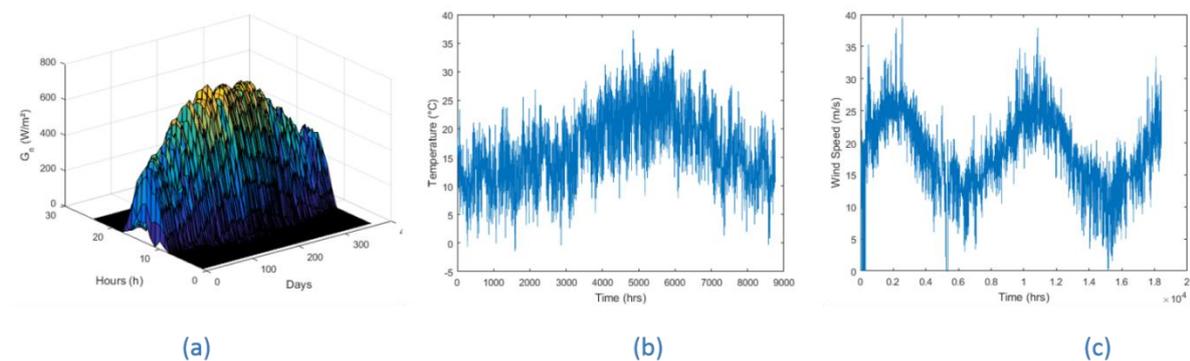


Figure 22: Donnée météorologique utilisé comme fichier source de conditions initiales et aux limites du système. (a): Flux solaire globale, (b): Température ambiante horaire sur une année, et (c): vitesse du vent sur 30 minutes dans une année

Les caractéristiques géométriques du système solaire sont représentées par le tableau, l'angle d'inclinaison est supposé optimale pour sur toute l'année (33° (« référence latitude » $+10^\circ$). En se basant sur le schéma numérique itératif que nous avons développé dans cette thèse, on a obtenu les résultats de notre modèle sous forme de :

- Profil dynamique de température en fonction de l'axe d'écoulement pour toutes les couches du système.
- Variation instantanée du rendement électrique

- Variation journalière du rendement thermique

Tableau 4: Caractéristiques géométriques et thermo-physique du système PV/T à eau

	Masse volumique $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	Conductivité thermique $(W/m.K)$	Capacité calorifique $\left(\frac{J}{Kg.K}\right)$	Epaisseur (mm)
Cellule PV	785	22	1200	0.5
Eau	1000	1.5	1800	D=15
Absorbeur thermique	890	155	1450	5
Vitrage	840	0.4	840	10

- **Profil de températures dynamique instantané de chaque couche du système** : La Figure 23 représente la variation dynamique des températures de chaque couche du système PV/T à eau, on constate que le profil dynamique est influencé par le rayonnement solaire pendant les périodes journalières, et la température ambiante lors de l'absence du flux solaire. Malgré le refroidissement via l'intermédiaire de l'eau, la température de la cellule reste élevée à cause de l'effet de serre causé par la lame d'air. Pour cela, une deuxième technique est proposée afin de réduire au mieux la température, c'est d'inclure la convection entre la partie PV et l'absorbeur thermique, mais l'introduction de ce processus, réduira les performances thermiques. De ce fait, une optimisation en temps réel est nécessaire pour la gestion des deux flux électriques et thermiques.

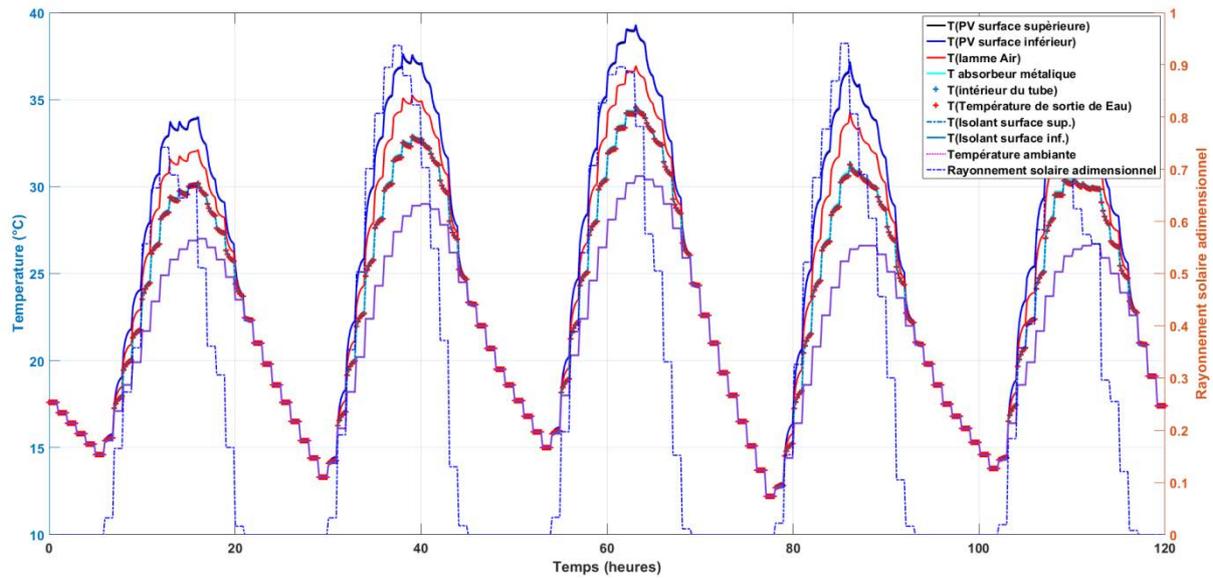


Figure 23: Profil de température dynamique sur chaque couche du système PV/T à eau

- **Le profil de la température de l'eau en fonction de la longueur des tubes** : la Figure 24 représente la variation de la température de l'eau pour différentes heures à partir de la première condition initiale. A partir de cette courbe, la variation de la température est estimée logarithmique. Afin d'améliorer les performances thermiques de ce système, il est nécessaire de mener une optimisation en fonction des paramètres de conception et de contrôle, cependant, d'après les résultats de ce système, la « *gestion du conflit* » entre la partie électrique et thermique est indispensable afin de trouver un compromis énergétique.

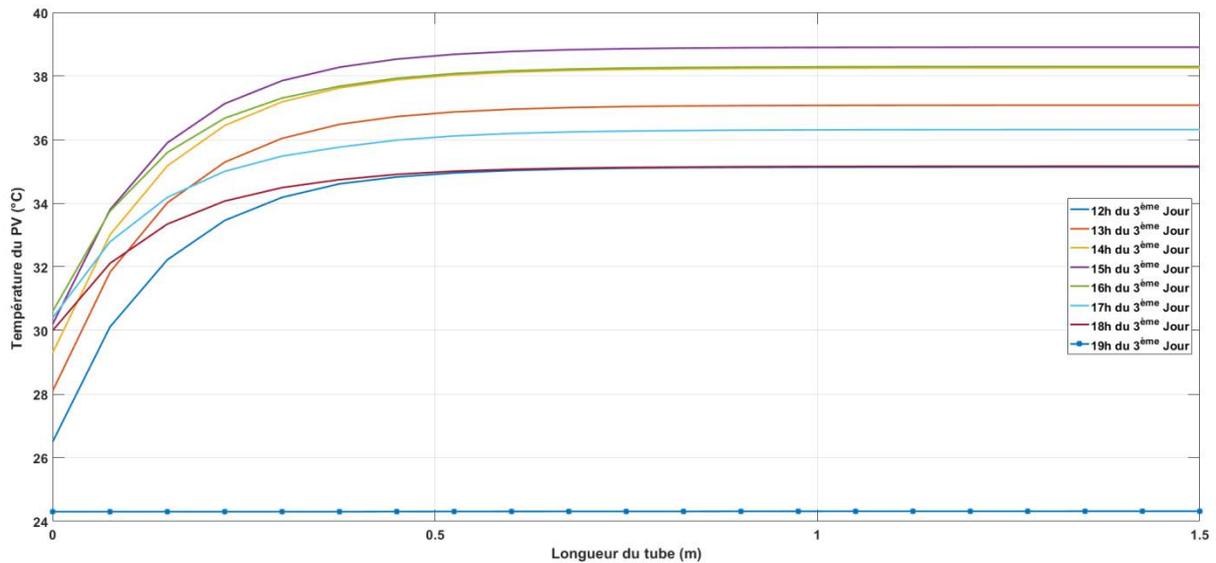


Figure 24: profil de la température de l'eau en fonction de l'axe d'écoulement pour différents instants calculés à partir de la condition initiale

- **Le profil de température de la couche Photovoltaïque en fonction du temps et de l'axe d'écoulement** : la Figure 25 représente le profil thermique de l'eau en fonction de l'axe de l'écoulement en temps réel, ce résultat montre la variation continue du profil de température, ce qui est intéressant pour la gestion des flux thermique et électrique en temps réel. De même le profil de température de la cellule PV est représenté par la Figure 26, on observe que la température du PV suit la même allure que la température de fluide caloporteur. On peut conclure, que les performances du système PV diminuer en fonction de la longueur du capteur. Dans ce cas, une optimisation de conception multicritère est nécessaire afin de gérer le comportement thermique dans les cellules PV et ainsi maximiser sa productivité électrique.

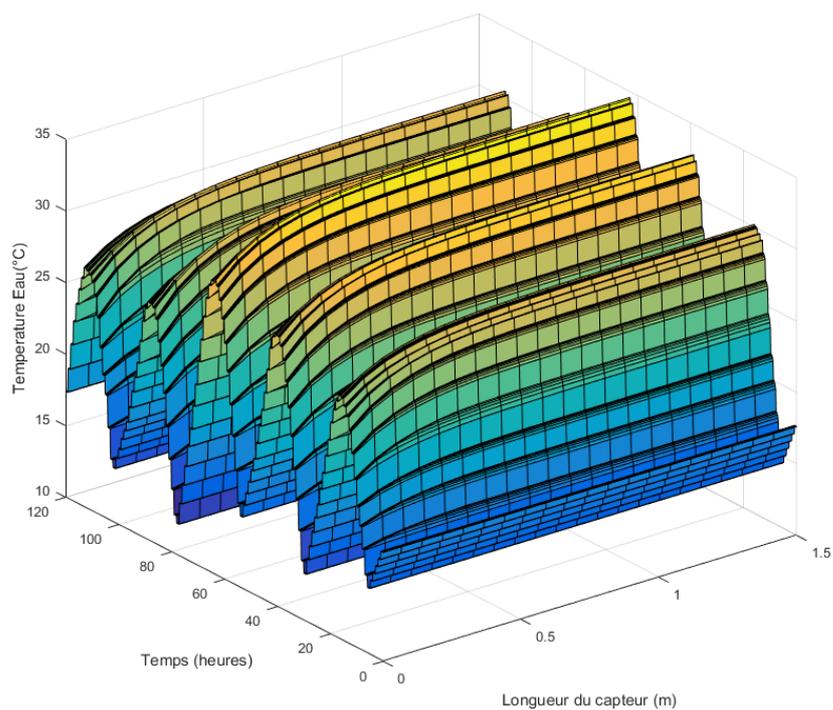


Figure 25: profil de température de l'eau n fonction de la longueur du tube et de temps

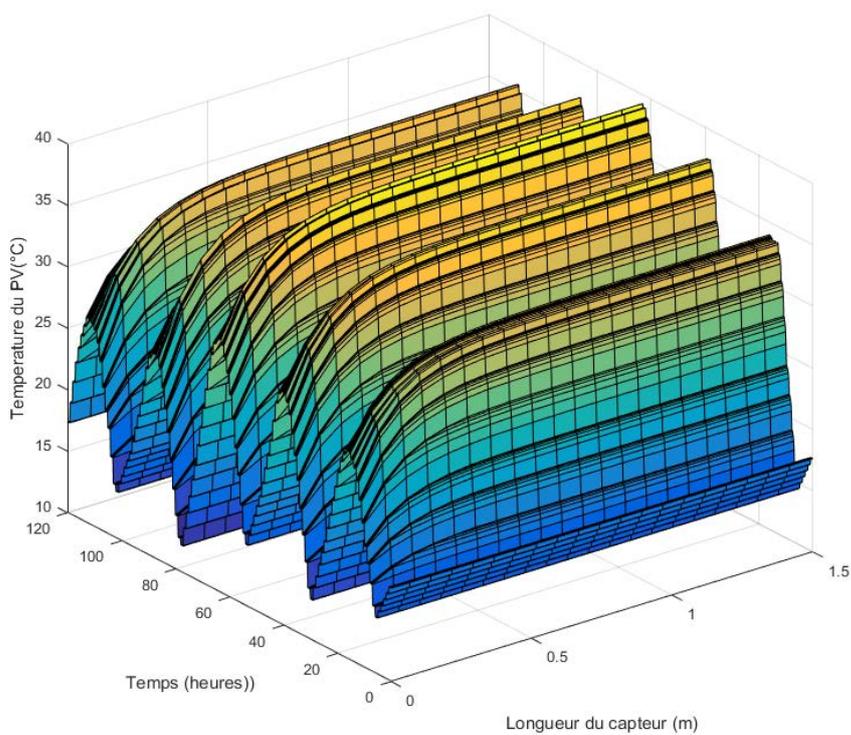


Figure 26: profil de la température en fonction de la longueur du capteur PV/T-Eau et du temps

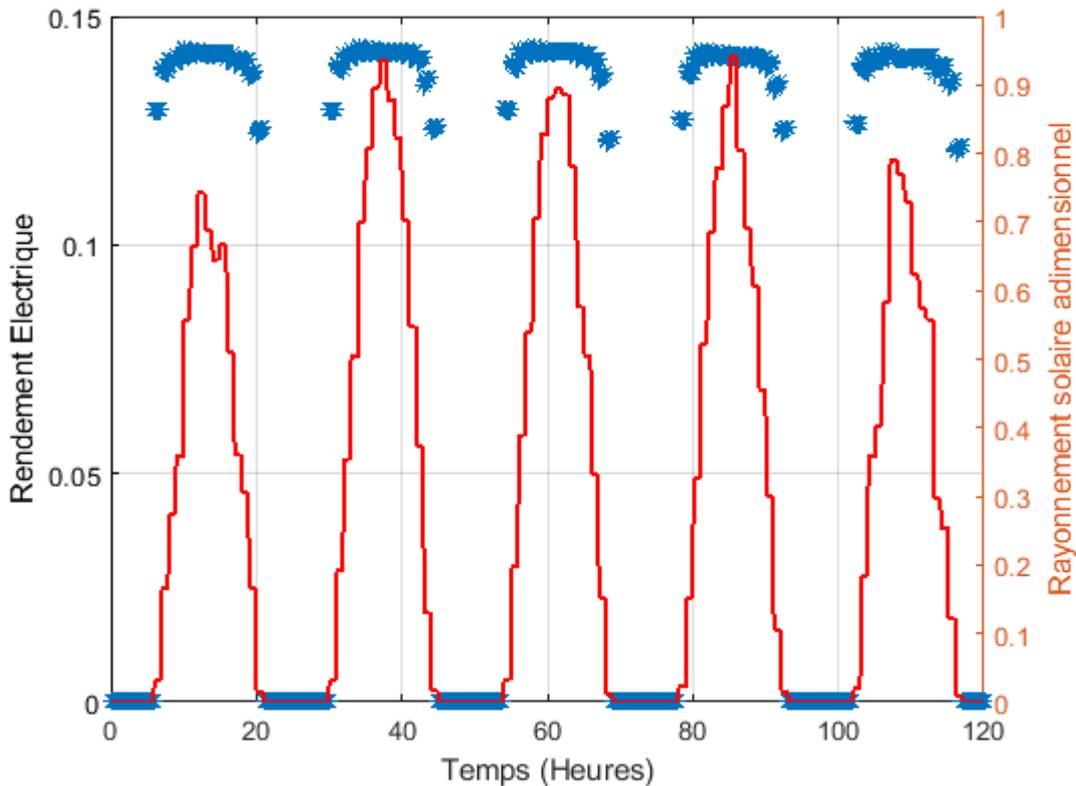


Figure 27: Rendement électrique instantané calculé pour différents instants du rayonnement solaire

La Figure 27 représente la variation instantanée du rendement électrique calculé à partir l'équation linéaire en fonction de la température et de flux solaire. Il est observé que le rendement augmente co-linéairement avec le flux solaire. Malgré la température des cellules qui atteint des valeurs entre 30 et 50°C en refroidissement durant ces journées claires, l'allure du rendement instantané de la Figure 27 ne semble pas trop influencée à cette augmentation. Il est à noter que le rendement instantané estimé dans cette courbe est calculé à partir de la valeur maximale de la température de la cellule obtenue (50°) afin d'évaluer la performance du système dans sa condition extrême.

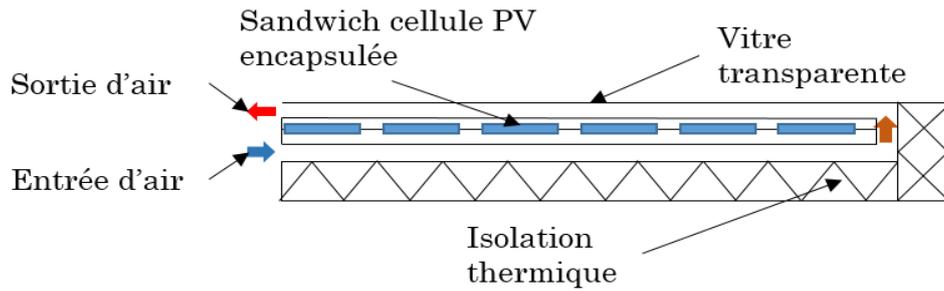
2. Scénarios d'intégration des PV/T aux bâtiments.

Après avoir effectué une étude de modélisation des deux configurations PV/T-Eau et PV/T-Air, dans cette partie, on va mettre en évidence la validité du modèle d'ordre réduit en représentation d'état (ORRE) et son adaptation à la conception du système PV/T et une configuration d'intégration dans une enveloppe de

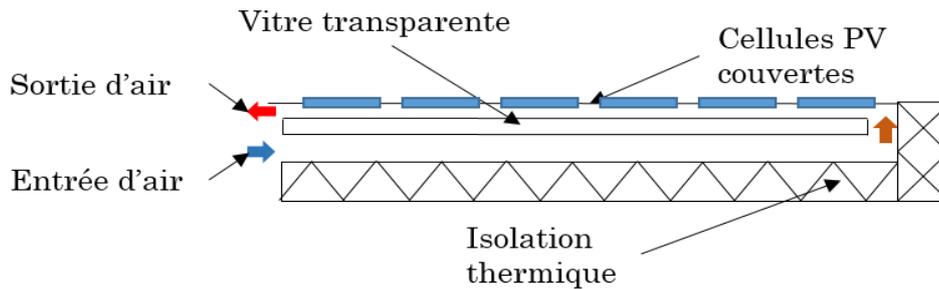
bâtiments. Deux types de configurations sont étudiés dans cette partie, une configuration à double-étage représenté par un système (a) consistant à passer l'écoulement du bas du capteur vers le haut. Et la deuxième, consiste à passer l'air du haut vers le bas.

2.1. Configuration multi-étages

Comme procédé dans les configurations PV/Ts à eau et à air (mono-étage), la même approche et procédure sera appliquée dans cette partie, dans la configuration multi-étage à air, le fluide caloporteur est circulé de l'entrée du capteur dans un premier canal en bas (Figure 28). Ensuite, le fluide est remonté pour circuler dans le deuxième canal. Il existe plusieurs types de cette conception, la Figure 29 représente les différentes possibilités existe dans la littérature des configurations multi-étages. On va mettre en évidence dans cette partie deux types de conception, Une conception (a) de la Figure 28 où le système PV est conçu à l'intérieur du capteur, et une conception (b) où les cellules PV sont couvertes à l'extérieur du capteur. La différence entre ces deux techniques comme sont expliqués dans le chapitre 2 et développés auparavant par [80].



(a): système PV à l'intérieur du capteur



(b): système PV à l'extérieur du capteur

Figure 28: Système PV/T-Air à double étage, configuration (a) PV au milieu du capteur, et configuration (b): PV à la surface du capteur

Après avoir explicité les équations bilans de transfert de masse et de chaleur, le sous-modèle proposer pour le système (a) respecte le modèle général d'ORRE développé pour le capteur à air.

Les équations bilan du système peuvent être transcrit par les équations (66)-(72) :

Comme procédé dans les parties du système à Eau et à air, Le changement de variable procédé dans ce modèle est donné par les formules ci-après :

- La température adimensionnelle :

$$\theta = \frac{T - T_{ref}}{T_{max} - T_{ref}}$$

- Le temps et l'espace adimensionnels

$$\tau = \frac{at}{e^2} = \frac{t}{t_c} \text{ Soit } t_c = \frac{e^2}{a} \text{ et } \xi = \frac{x}{L}$$

- La vitesse adimensionnelle et le nombre de Fourier :

$$\bar{U} = \frac{uL}{a_f} = \frac{u}{U_{max}} \text{ soit } U_{max} = \frac{a_f}{L} \text{ et } Fo_{a1} = \frac{a_f t_c}{eL}$$

Les équations bilan du système sont reformulées comme procédé auparavant en fonction des nombres de Fourier, Biot, et les autres paramètres et variables adimensionnels dans chaque sous-composante par les équations (66)-(72).

$$\frac{d\theta_1}{d\tau} = -(FoBi_{cv1} + FoBi_r + Fo_1)\theta_1 + Fo_1\theta_2 + \frac{(1 - \eta_e)\alpha_1 G_{ref}}{U_1(T_{max} - T_{ref})} \bar{G} \quad (66)$$

$$\frac{d\theta_2}{d\tau} = Fo_2\theta_1 - (FoBi_{a1} + Fo_2 + Fo_3)\theta_2 + FoBi_{a1}\theta_{a1} + Fo_3\theta_4 + \frac{(1 - \eta_e)\tau_1\alpha_1 G_{ref}}{U_2(T_{max} - T_{ref})} \bar{G} \quad (67)$$

$$\frac{d\theta_a}{d\tau} = FoBi_{a2}\theta_2 - (FoBi_{a2} + FoBi_{a3})\theta_a + FoBi_{a3}\theta_4 - \frac{Fo_a \bar{v}}{2} \frac{d\theta_a}{d\xi} + \frac{\tau_1\alpha_{a1} G_{ref}}{U_{a1}(T_{max} - T_{ref})} \bar{G} \quad (68)$$

$$\frac{d\theta_4}{d\tau} = Fo_4\theta_2 + FoBi_{a4}\theta_3 - (FoBi_{a4} + Fo_4 + Fo_5)\theta_4 + Fo_5\theta_5 + \frac{\tau_{a1}\tau_1\alpha_{pv} G_{ref}}{U_4(T_{max} - T_{ref})} \bar{G} \quad (69)$$

$$\frac{d\theta_5}{d\tau} = Fo_6\theta_4 - (Fo_6 + Fo_7)\theta_5 + Fo_7\theta_6 \quad (70)$$

$$\frac{d\theta_6}{d\tau} = Fo_8\theta_5 - (Fo_8 + Fo_9)\theta_6 + Fo_9\theta_7 \quad (71)$$

$$\frac{d\theta_7}{d\tau} = Fo_{10}\theta_6 - (Fo_{10} + FoBi_{cv2})\theta_7 + FoBi_{cv2}\theta_{a2} \quad (72)$$

En adaptant les équations selon le sens de l'écoulement, les différentes matrices du système (a) peuvent être représentés par l'équation (73) ainsi que pour le système (b) par l'équation (74).

Le système (a)

$$\begin{aligned}
 & \begin{matrix} A \\ = \end{matrix} \begin{bmatrix} -(FoBi_{cv1} + FoBi_r + Fo_1) & Fo_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Fo_2 & -(FoBi_{a1} + Fo_2 + Fo_3) & FoBi_{a1} & Fo_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & FoBi_{a2} & -(FoBi_{a2} + FoBi_{a3}) & FoBi_{a3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Fo_4 & FoBi_{a4} & -(FoBi_{a4} + Fo_4 + Fo_5) & Fo_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Fo_6 & -(Fo_6 + FoBi_{a5} + Fo_7) & FoBi_{a5} & Fo_7 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & FoBi_{a6} & -(FoBi_{a6} + FoBi_{a7}) & FoBi_{a7} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Fo_8 & FoBi_{a8} & -(Fo_8 + FoBi_{a8} + Fo_9) & Fo_9 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Fo_{10} & (Fo_{10} + Fo_{11}) & Fo_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Fo_{12} & -(Fo_{11} + FoBi_{cv2}) & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 \\
 & F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{Fo_{a1}}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{Fo_{a2}}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} U^+ ; B_1 = \begin{bmatrix} FoBi_{cv1} & FoBi_{r1} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ FoBi_{cv2} & FoBi_{r2} \end{bmatrix} ; B_2 = \begin{bmatrix} \frac{Fo_1 \alpha_1 G_{ref}}{U_1(T_{max} - T_{ref})} \\ \frac{Fo_2 \tau_1 \alpha_1 G_{ref}}{U_2(T_{max} - T_{ref})} \\ \frac{Fo_3 \tau_1 \alpha_{a1} G_{ref}}{U_{a1}(T_{max} - T_{ref})} \\ \frac{Fo_4 (1 - \eta_e) \tau_{a1} \tau_{pv} \alpha_{pv} G_{ref}}{U_4(T_{max} - T_{ref})} \\ \frac{Fo_5 \tau_1 \tau_{a1} \tau_{pv} \alpha_{pv} G_{ref}}{U_5(T_{max} - T_{ref})} \\ \frac{Fo_6 \tau_1 \tau_{a1} \tau_{pv} \alpha_{a2} G_{ref}}{U_6(T_{max} - T_{ref})} \\ \frac{Fo_7 \tau_1 \tau_{a1} \tau_{pv} \tau_{a2} \alpha_b G_{ref}}{U_7(T_{max} - T_{ref})} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{73}$$

Les matrices du système (b) sont données par :

$$\begin{aligned}
 & A = \begin{bmatrix} -(FoBi_{cv1} + FoBi_r + Fo_1) & Fo_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Fo_2 & -(FoBi_{a1} + Fo_2 + Fo_3) & FoBi_{a1} & Fo_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & FoBi_{a2} & -(FoBi_{a2} + FoBi_{a3}) & FoBi_{a3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Fo_4 & FoBi_{a4} & -(FoBi_{a4} + Fo_4 + Fo_5) & Fo_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Fo_6 & -(Fo_6 + FoBi_{a5} + Fo_7) & FoBi_{a5} & Fo_7 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & FoBi_{a6} & -(FoBi_{a6} + FoBi_{a7}) & FoBi_{a7} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Fo_8 & FoBi_{a8} & -(Fo_8 + FoBi_{a8} + Fo_9) & Fo_9 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Fo_{10} & (Fo_{10} + Fo_{11}) & Fo_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Fo_{12} & -(Fo_{11} + FoBi_{cv2}) & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 \\
 & F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{Fo_{a1}}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{Fo_{a2}}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} ; B_1 = \begin{bmatrix} FoBi_{cv1} & FoBi_{r1} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ FoBi_{cv2} & FoBi_{r2} \end{bmatrix} ; B_2 = \begin{bmatrix} \frac{Fo_1(1-\eta_e)\alpha_{PV}G_{ref}}{U_4(T_{max}-T_{ref})} \\ \frac{Fo_2\tau_{PV}\alpha_{PV}G_{ref}}{U_2(T_{max}-T_{ref})} \\ \frac{Fo_3\tau_{PV}\alpha_{a1}G_{ref}}{U_{a1}(T_{max}-T_{ref})} \\ \frac{Fo_4\tau_{PV}\tau_{a1}\alpha_2G_{ref}}{U_1(T_{max}-T_{ref})} \\ \frac{Fo_5\tau_2\tau_{a1}\tau_{PV}\alpha_2G_{ref}}{U_5(T_{max}-T_{ref})} \\ \frac{Fo_6\tau_2\tau_{a1}\tau_{PV}\alpha_{a2}G_{ref}}{U_6(T_{max}-T_{ref})} \\ \frac{Fo_7\tau_2\tau_{a1}\tau_{PV}\tau_{a2}\alpha_bG_{ref}}{U_6(T_{max}-T_{ref})} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{74}
 \end{aligned}$$

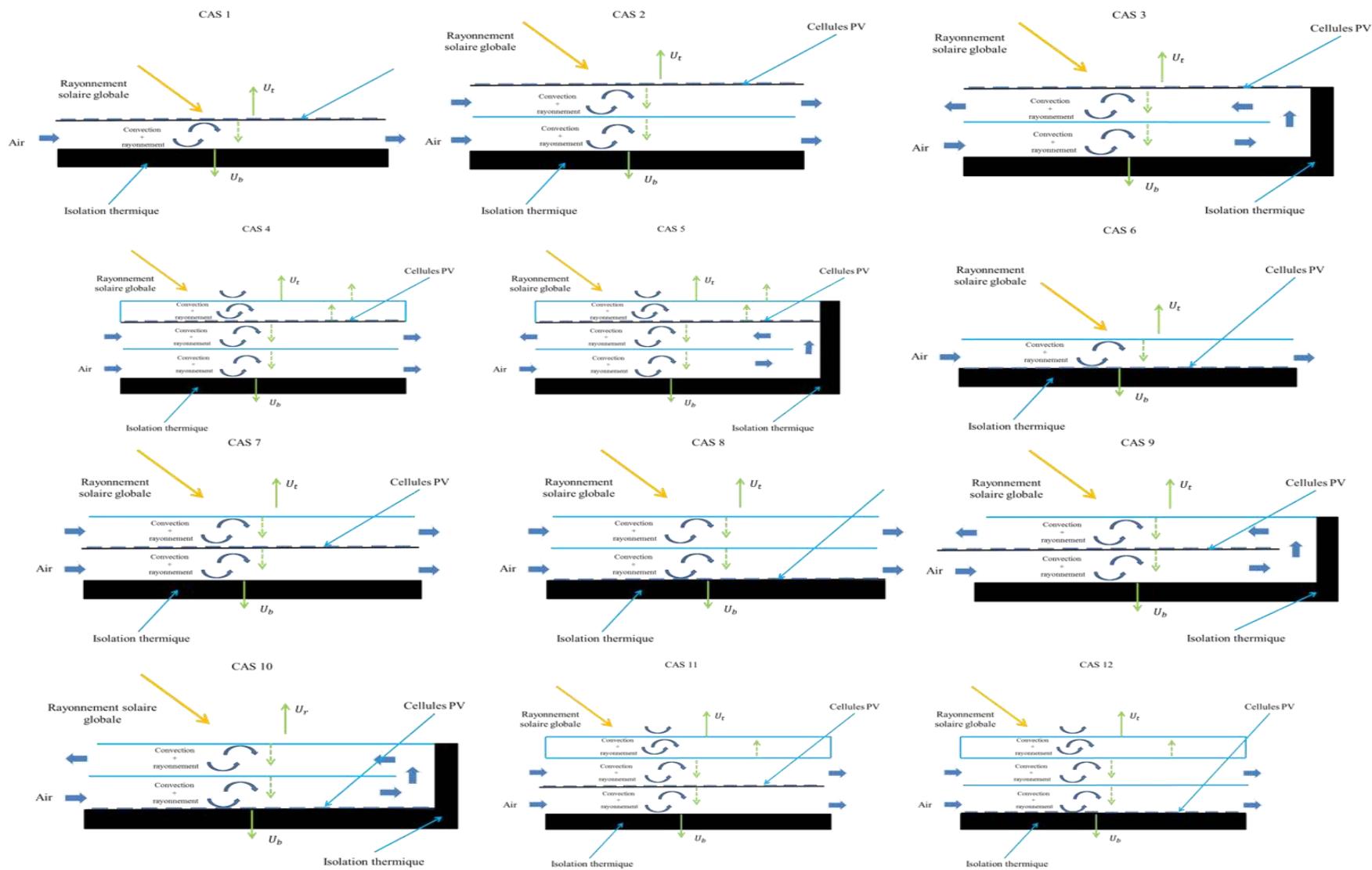


Figure 29: Différentes configurations possibles dans les systèmes PV/T-Air modélisable par le modèle d'ORRE

- **Système PV/T double-étage (PV-Middle)**

- **Système (b)**

Les représentations thermiques de différentes couches pour la période du 19 au 24 Septembre sont données par les figures ci-après :

La Figure 30 représente le profil de la température de l'air en fonction de l'axe de l'écoulement en fonction de la longueur totale de la conduite (Écoulement en bas de vitrage + écoulement en haut du vitrage au-dessous du PV). On constate qu'à cause de l'effet de serre, le profil de température est maximal au-dessous du vitrage, mais le système perd les performances thermiques dès que le système rentre en étage au-dessus du vitrage et au-dessous de la cellule PV. Cela est expliqué par les pertes thermiques aux bords et par la convection du vitrage avec l'extérieur.

En effet, dans le premier étage, l'avantage de l'effet de serre est important dans l'amélioration du rendement thermique, les gains thermiques sont jugés importants, dès que l'air rentre dans le deuxième étage, les pertes thermiques par convection deviennent très importantes par rapport aux gains d'une part. D'une autre part, la transmittivité du système PV au-dessus reste faible quelque soit le facteur d'emballage du panneau PV. Cependant, comme présenté par la Figure 35, les performances électriques sont améliorées, on remarque que le rendement électrique augmente en fonction du flux solaire, malgré l'augmentation de la température ambiante. Donc l'avantage de ce système réside dans l'amélioration des performances électrique que de celle thermiques. L'intégration de ces systèmes aux bâtiments peut être proposée dans le cadre d'un couplage avec les pompes-à chaleur à air afin de valoriser les deux flux et améliorer le rendement énergetique.

La Figure 31 représente le profil de la température de différentes couches du système, il est remarqué que l'effet de convection est important ce qui réduit davantage la température du système PV. La Figure 32 représente le profil de la température d'air instantané en fonction de l'axe de l'écoulement, ce profil est important dans l'estimation de l'état thermique du fluide afin d'optimiser en temps réel son fonctionnement.

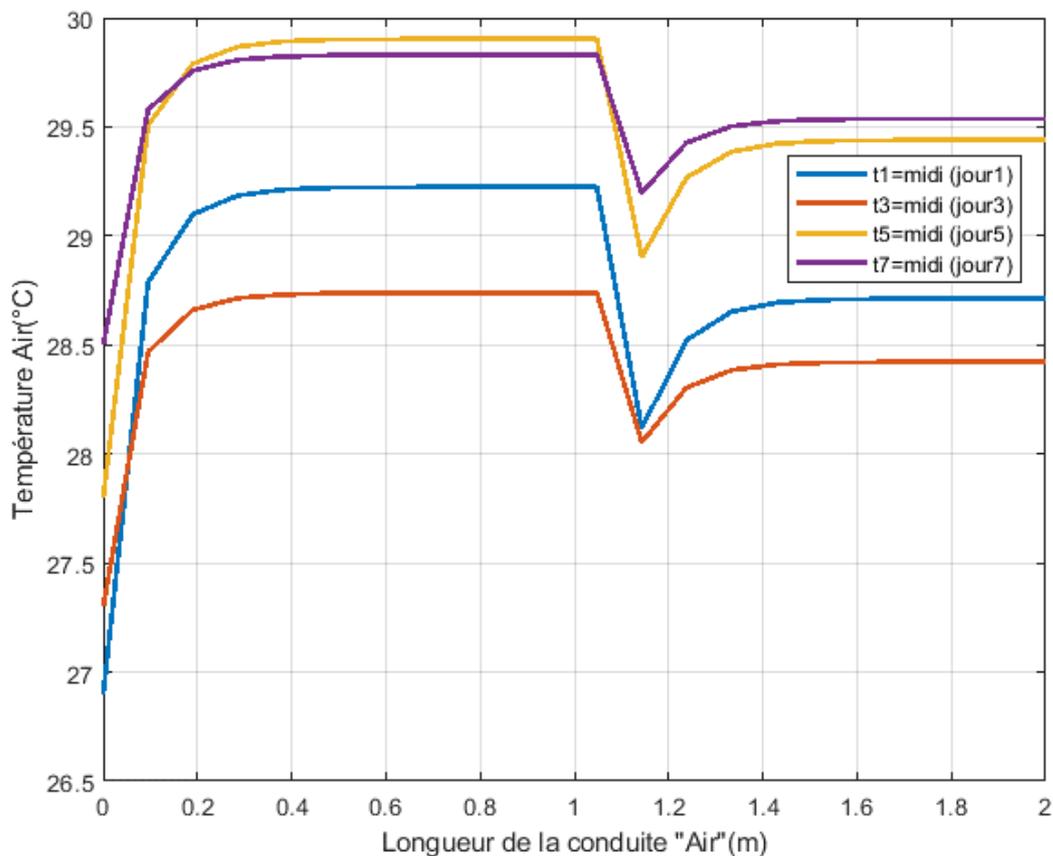


Figure 30: profil de la température de l'air le long de l'écoulement pour différents instant calculés à partir de la condition initiale

La Figure 33 représente de profil de la température de la couche PV en temps réel, il est remarqué que la distribution thermique le long de la longueur du capteur reste quasi-uniforme, l'avantage de ce résultat réside dans l'amélioration de la durée de vie de cellule PV et maximiser la productivité électrique.

Les Figure 33 et 34 représentent respectivement le rendement thermique journalier et électrique instantané du système. Comme constater par le profil de température, le productible thermique est très faible et ne représente au maximum que 25% du rendement thermique. Par contre, il est constaté que le rendement électrique est amélioré et n'est pas influencé par la température ambiante.

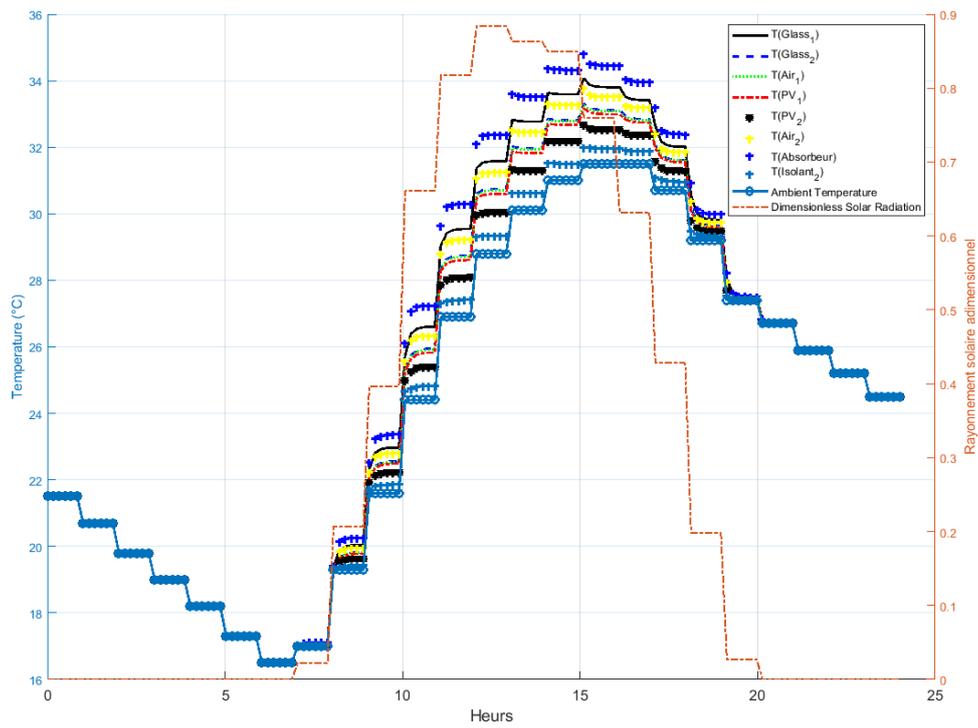


Figure 31: Représentation du profil thermique de différentes couches du système double-étage (a)

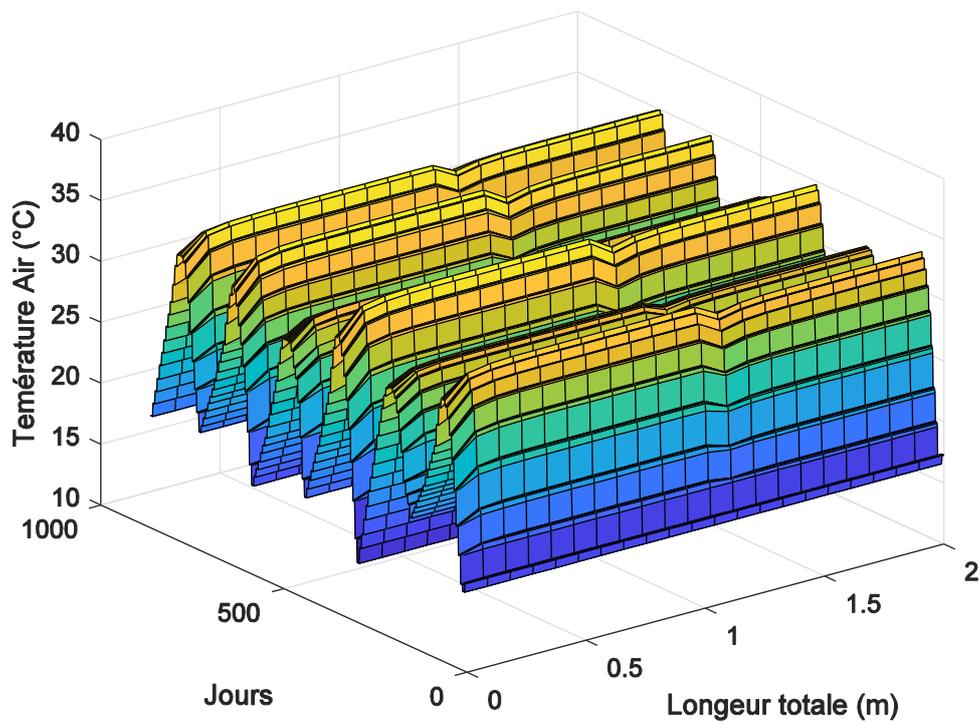


Figure 32: profil de température de l'air en fonction de la longueur du tube et du temps

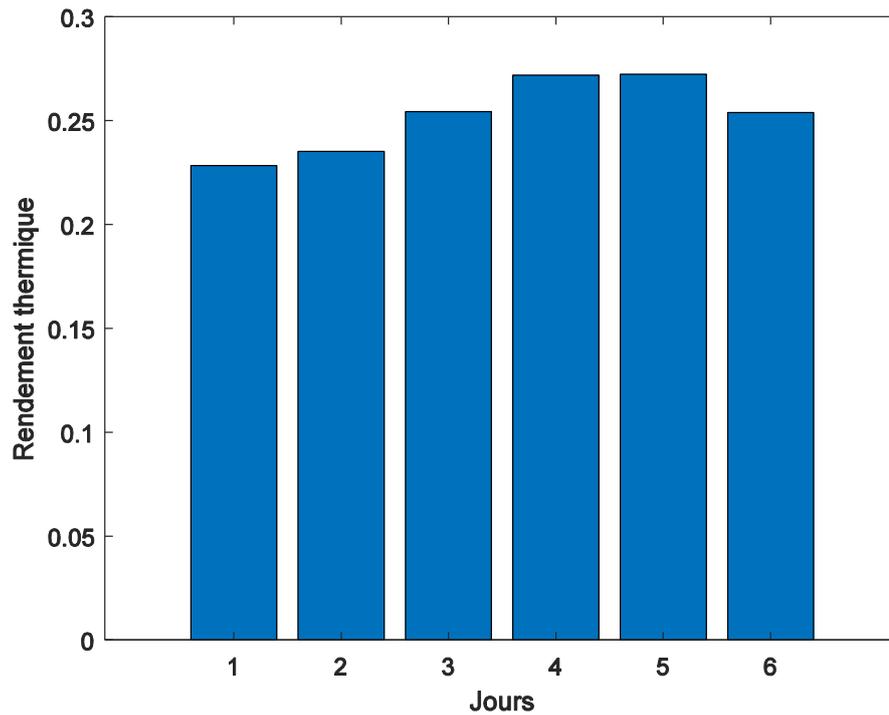


Figure 33: Rendement thermique journalier du système (b) pour six jours

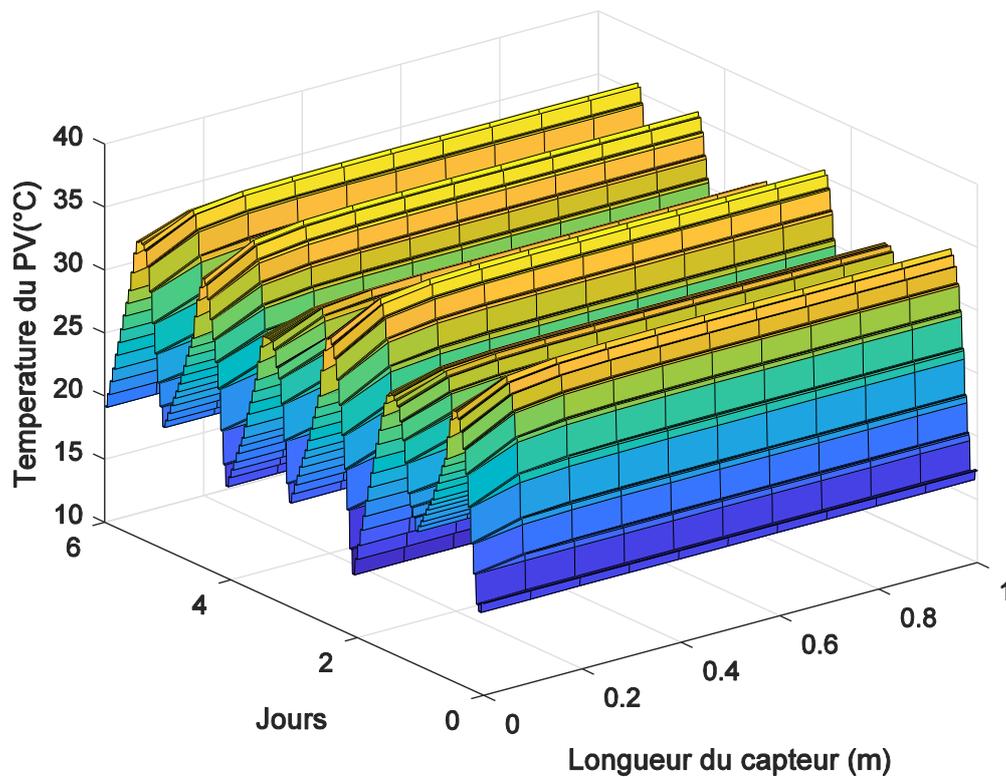


Figure 34: profil de la température en fonction de la longueur du système PV/T-Air double-étage (b) et du temps

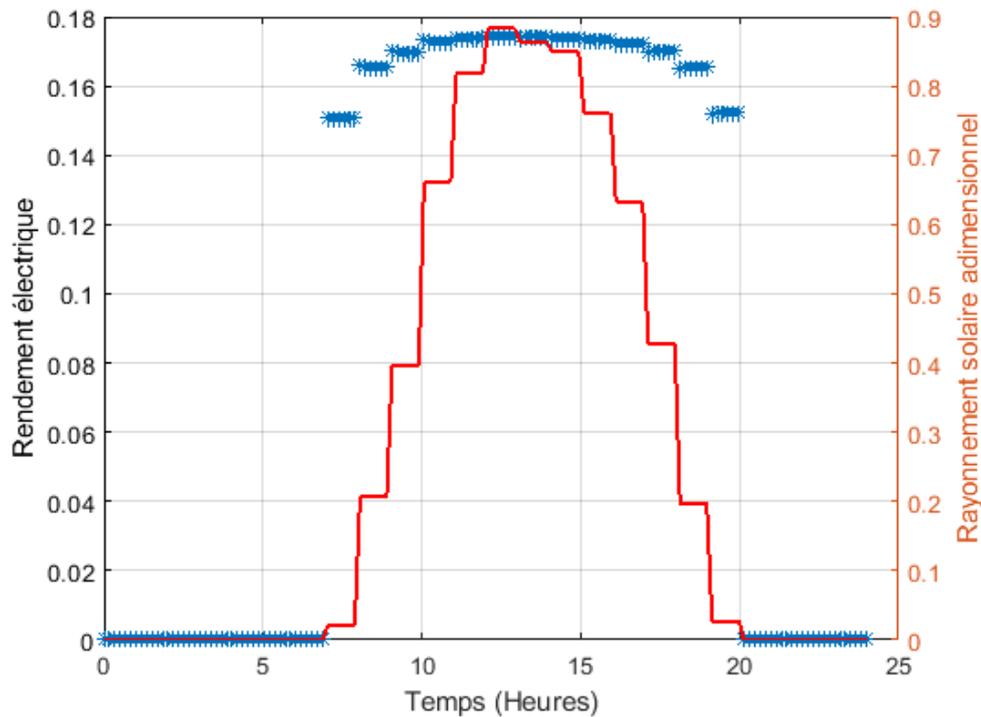


Figure 35: Rendement électrique instantané sur une journée

○ **Système (a)**

La configuration (a) représenté par la Figure 28 est étudiée en utilisant son modèle d'ORRE développé. En incluant les paramètres géométriques, et thermo-physiques du système, les résultats de simulation dynamique sont présentés comme suit :

Le profil de température de l'air en fonction de l'axe de l'écoulement est représenté par la Figure 36. Contrairement à la configuration (a) le comportement thermique est amélioré dans le deuxième étage du système, cela est expliqué par la chaleur transmise via le PV qui représente 50% (facteur de transmission du PV est de l'ordre de 0.5) qui est moins importante par rapport à la chaleur due à l'effet de serre du système. La chute brutale de la température est expliquée par le contact avec le milieu ambiant à travers les bords ainsi que le vitrage supérieur du système. Cependant, malgré les pertes par convection réalisés au deuxième étage, l'effet de serre causera une augmentation de la température du PV, ce qui est expliqué par le profil de la température du PV dans la Figure 39.

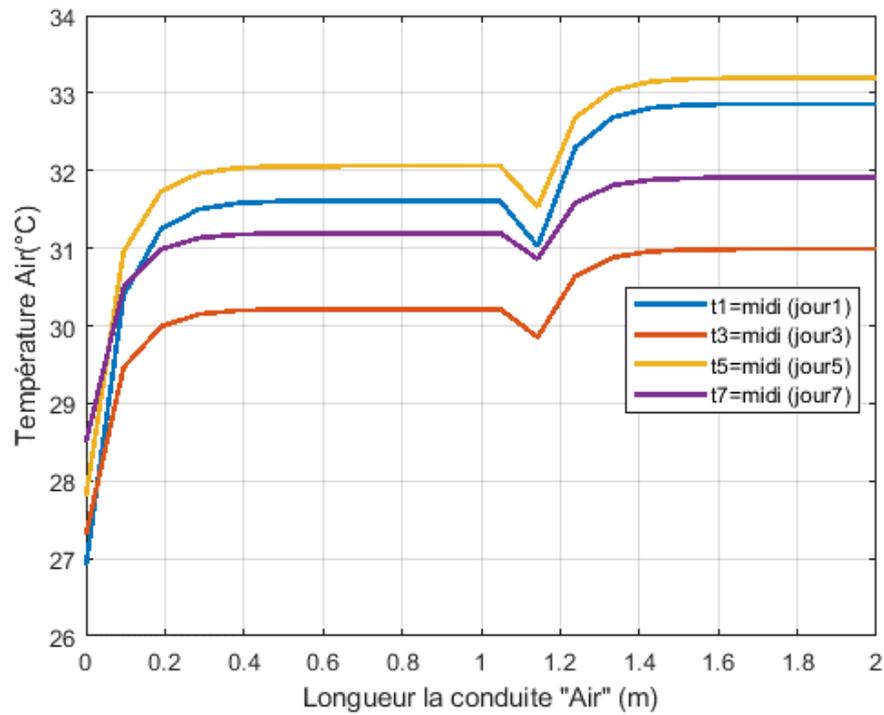


Figure 36: profil de la température de l'air le long de l'écoulement pour différents instant calculés à partir de la condition initiale

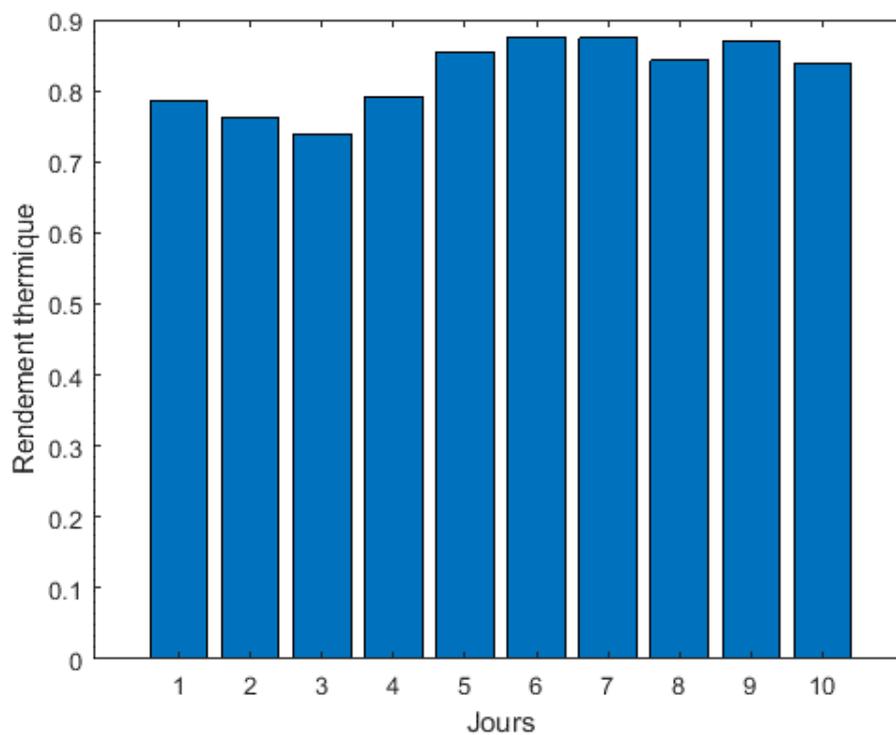


Figure 37: Rendement thermique journalier du système (a)

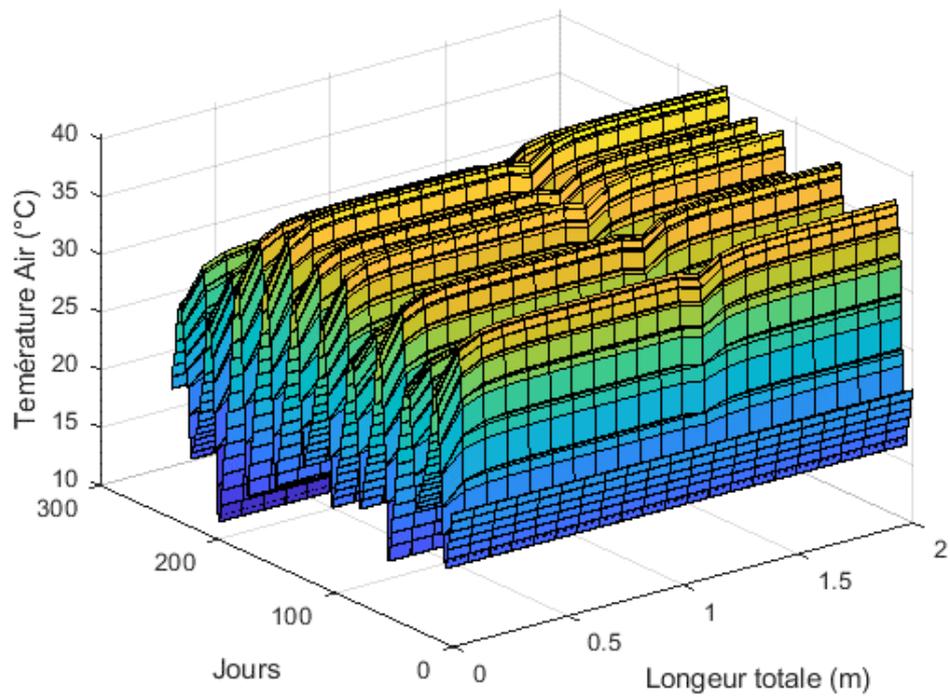


Figure 38: profil de température de l'air en fonction de la longueur du tube et de temps

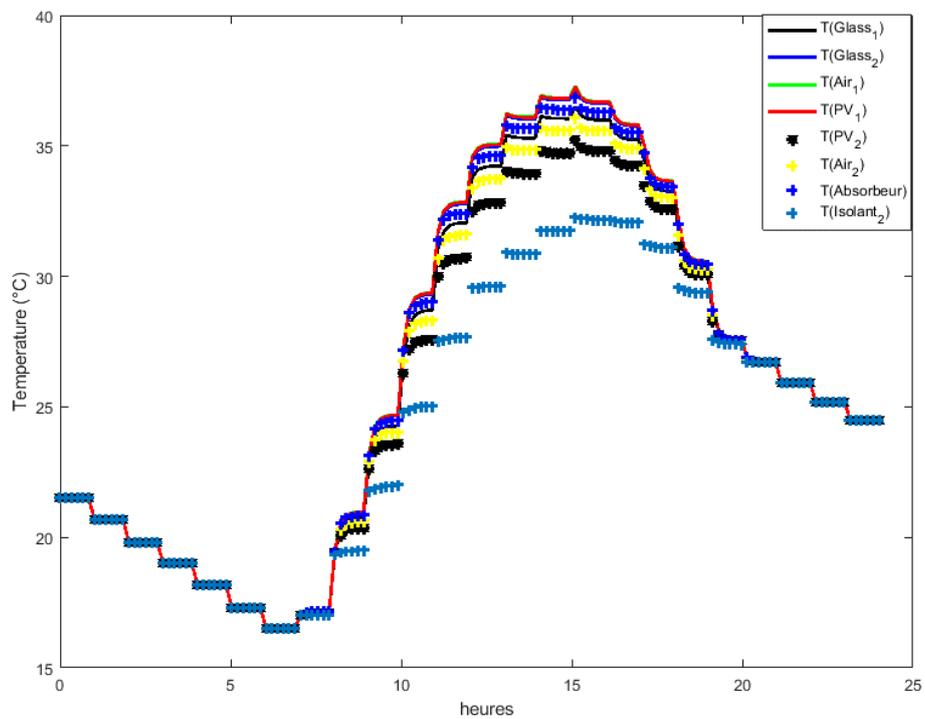


Figure 39: Représentation du profil thermique de différentes couches du système double-étage (a)

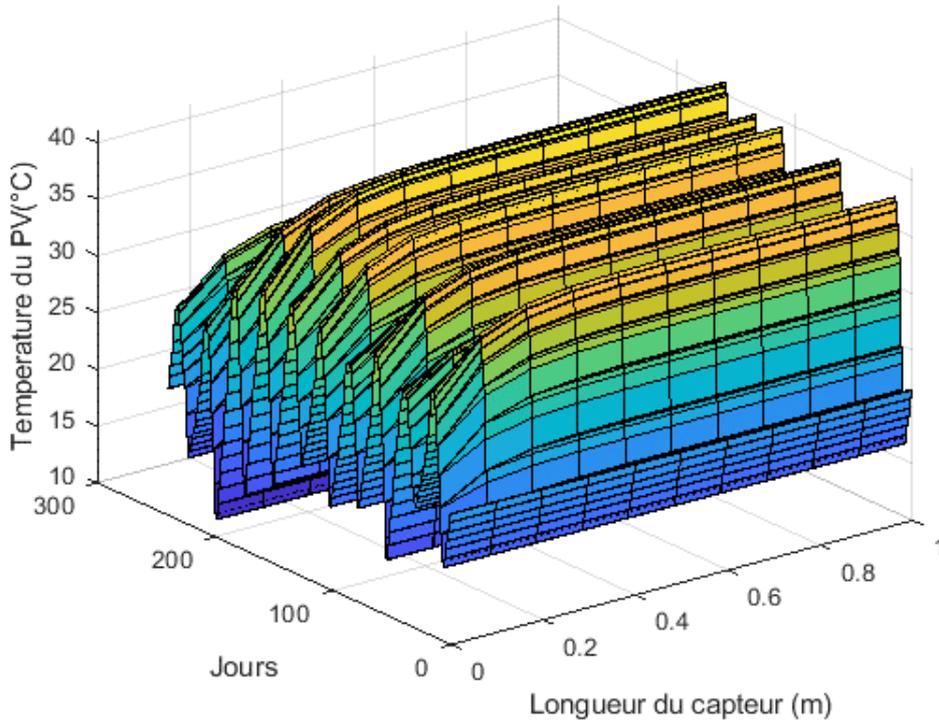


Figure 40: profil de la température en fonction de la longueur du système PV/T-Air double-étage (a) et du temps

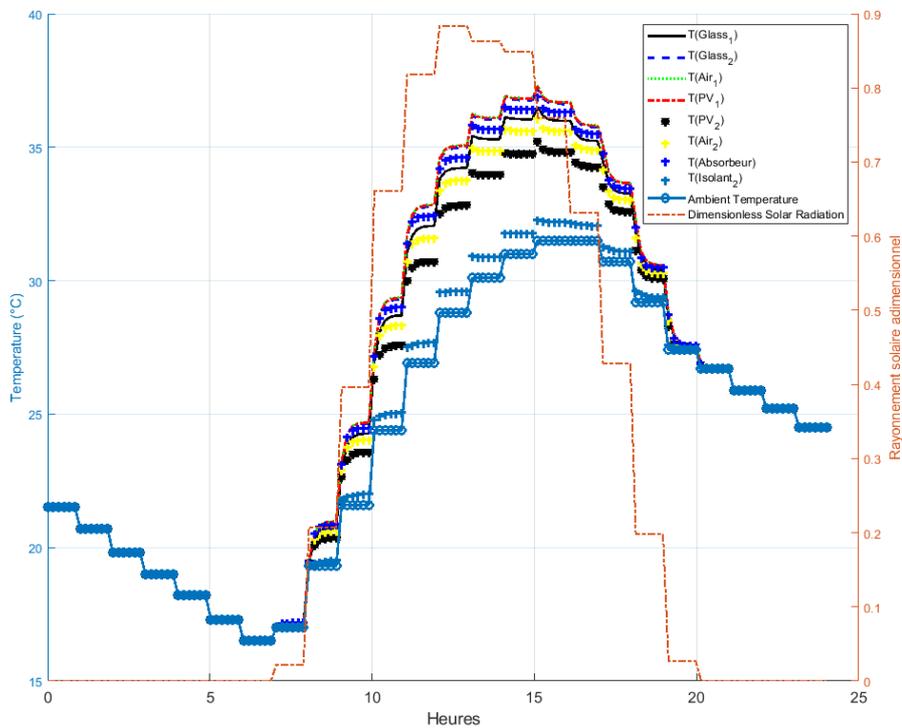


Figure 41: Représentation du profil thermique de différentes couches du système double-étage (a) avec les conditions aux limites (température ambiante+ rayonnement solaire)

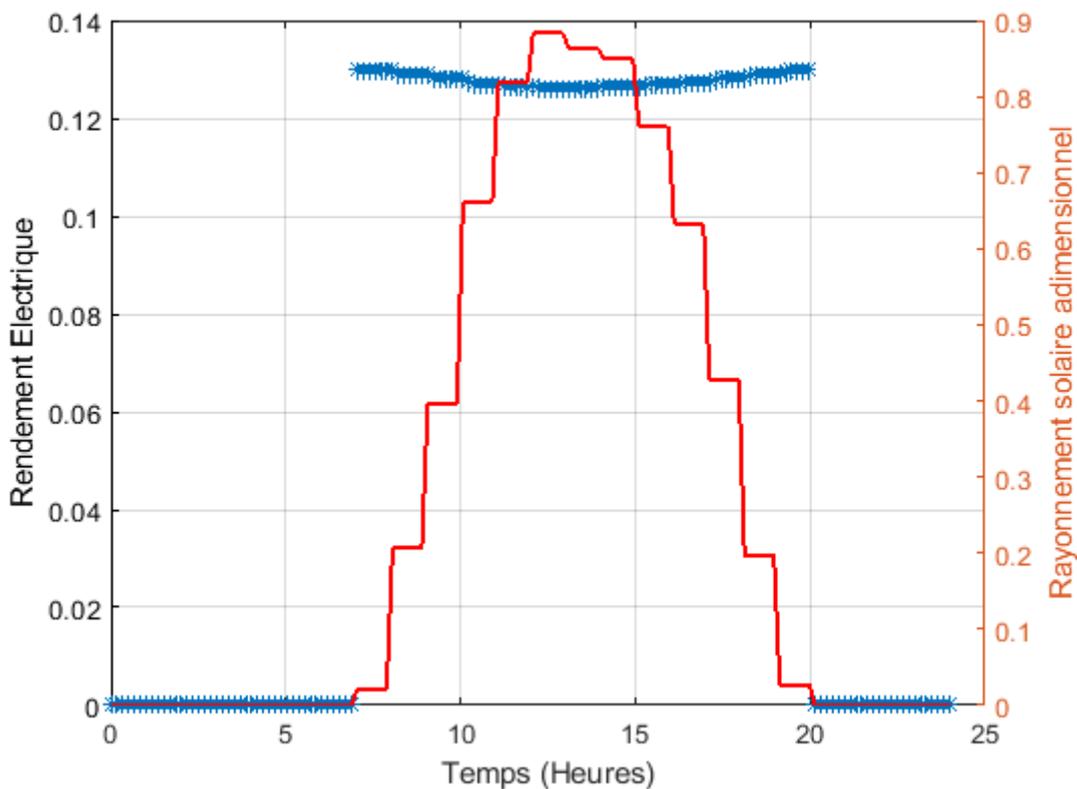


Figure 42: Rendement électrique instantané dans une journée

Il est constaté que le profil de la température du PV augmente en fonction de la longueur du $x = 0$ à $x = L$. Cependant, une distribution thermique non-uniforme est provoquée. D'où une qualité du productible électrique constatée est faible comme le prouve le résultat du rendement électrique instantané de la Figure 42. Pour le reste des autres journées, le profil de la température de l'air suit la même allure et le même comportement résolu par le modèle, comme le prouve la Figure 38.

2.2. Mur PV/Trombe (sans gains internes)

Le mur trombe est introduit par le professeur Félix Trombe et l'architecte Jacques Michel dans les années 1950-1970 qui sert à chauffer passivement les bâtiments en absorbant le maximum du rayonnement solaire à travers des murs orientés sud pour les zones d'hémisphère nord. Plusieurs travaux scientifiques ont été développés pour les murs Trombe. [81] a étudié expérimentalement le fonctionnement d'un mur Trombe en saison d'été pour refroidir un bâtiment en fonction du taux de ventilation, la surface intérieure du mur Trombe isolée, en

protégeant également le bâtiment contre la surchauffe due à la convection et au transfert de chaleur. [82] ont étudié l'analyse de performance de différents types de murs solaires basés sur la simulation et l'expérimentation, ainsi que la configuration du mur solaire en fonction des conditions météorologiques. [83] ont modélisé un mur Trombe avec une cellule photovoltaïque et ses performances électriques. Ils ont obtenu la différence de température entre des éléments avec et sans cellule PV. Dans leur cas, une valeur maximale de 13,4 ° C et 10,6 ° C est atteinte avec et sans paroi PV / Trombe avec un rendement électrique amélioré. [84] ont développé un modèle de simulation pour une pièce unique intégrée au mur photovoltaïque/Trombe (PV-MT) et ont évalués les performances en termes de température ambiante, de charge de refroidissement et d'efficacité du module PV pour différents types de vitrage PV-MT vitrage, double vitrage, double vitrage rempli avec du gaz (argon). Enfin, ils ont conclu que la réduction maximale de la température de l'air ambiant était obtenue en utilisant un double vitrage rempli d'Argon PV-MT. Le débit de circulation de l'air dans l'espace entre le module PV et le mur Trombe a également un effet significatif sur les performances du PVMT. L'objectif de cette présente partie, est de présenter le modèle d'ORRE développé pour un mur PV/Trombe, en évaluant ces performances thermiques à travers le résultat de l'étude du comportement thermique et électrique.

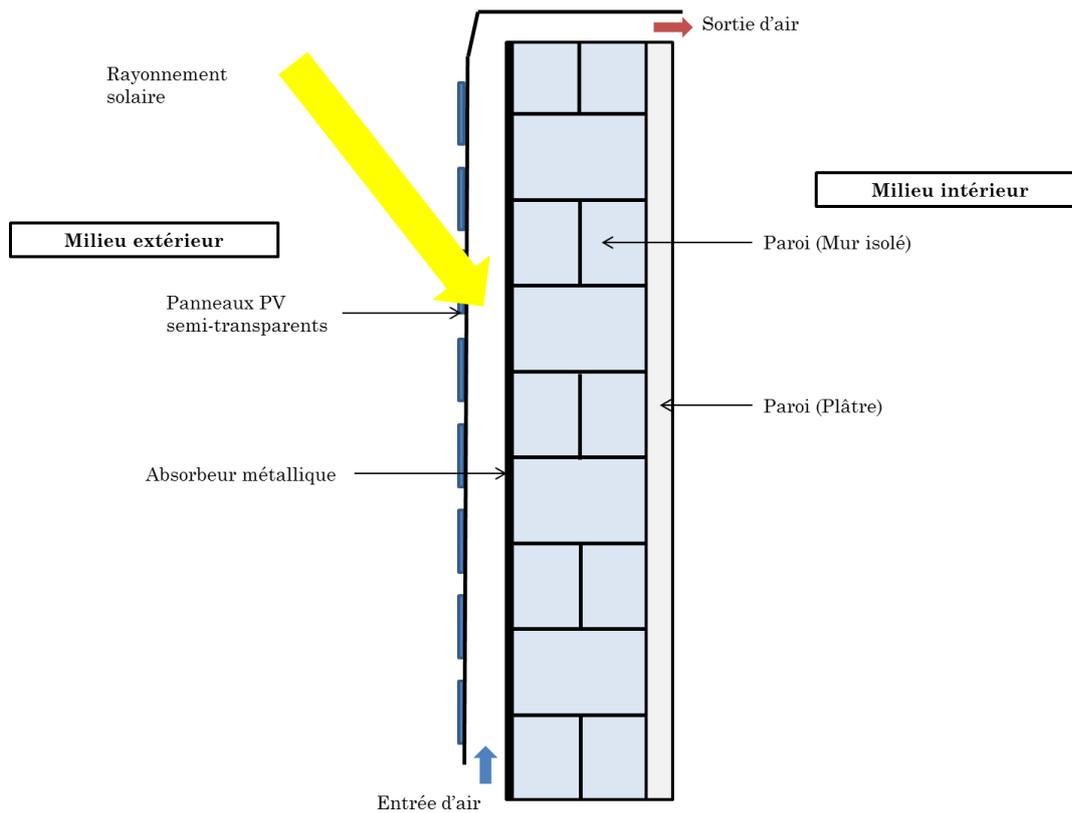


Figure 43: Modèle transversale du système PV/T-Mur Trombe étudié

Le modèle du système mur PV/T-MT de la Figure 43 est représenté par l'équation du modèle de base d'ORRE. Les matrices d'état et d'entrées sont données par l'équation (75) :

$$A = \begin{bmatrix}
-(FoBi_{cv1} + FoBi_r + Fo_1) & Fo_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
Fo_2 & -(FoBi_{a1} + Fo_2 + Fo_3) & FoBi_{a1} & Fo_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & FoBi_{a2} & -(FoBi_{a2} + FoBi_{a3}) & FoBi_{a3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & Fo_4 & FoBi_{a4} & -(FoBi_{a4} + Fo_4 + Fo_5) & Fo_5 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & Fo_6 & -(Fo_6 + Fo_7) & Fo_7 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & Fo_8 & -(Fo_8 + Fo_9) & Fo_9 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Fo_{10} & -(Fo_{10} + FoBi_{cv2}) & FoBi_{cv2}
\end{bmatrix}$$

$$F = \begin{bmatrix}
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & -\frac{Fo_{a2}}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
\end{bmatrix} \bar{V}; B_1 = \begin{bmatrix}
FoBi_{cv1} & FoBi_{r1} \\
0 & 0 \\
0 & 0 \\
0 & 0 \\
0 & 0 \\
FoBi_{cv2} & FoBi_{r2}
\end{bmatrix}; B_2 = \begin{bmatrix}
\frac{(1-\eta_e)\alpha_{PV}G_{ref}}{U_1(T_{max}-T_{ref})} \\
\frac{\tau_{PV}\alpha_{PV}G_{ref}}{U_2(T_{max}-T_{ref})} \\
\frac{\tau_{PV}\alpha_{a1}G_{ref}}{U_{a1}(T_{max}-T_{ref})} \\
\frac{\tau_{a1}\tau_{PV}\alpha_b G_{ref}}{U_4(T_{max}-T_{ref})} \\
0 \\
0 \\
0
\end{bmatrix} \quad (75)$$

$$\eta_{el} = \eta_0(1 - \beta(T_c - T_{ref})) + \gamma \log_{10} G \quad (76)$$

Le modèle du mur trombe est simulé en utilisant des valeurs standards des propriétés géométriques et thermo-physiques du tableau :

- **Variation dynamique des températures dans chaque couche du système :**

La Figure 44 illustre la variation dynamique de la température en fonction du temps dans une journée claire. La productivité thermique reste faible par rapport à un système PV/T d'air. Les conditions de fonctionnement de ce système sont en régime naturelle, le coefficient de convection de l'écoulement interne est calculé à partir du nombre de Nusselt développé dans le chapitre 5.

La Figure 45 représente le profil de la température de l'air sur plusieurs instants différents déterminés à partir de la condition initiale, l'allure de la courbe illustre une variation logarithmique de la température. Comme présenté par les différentes courbes, la capacité du système reste limitée à chauffer l'air au-delà de la longueur de 0.5 m.

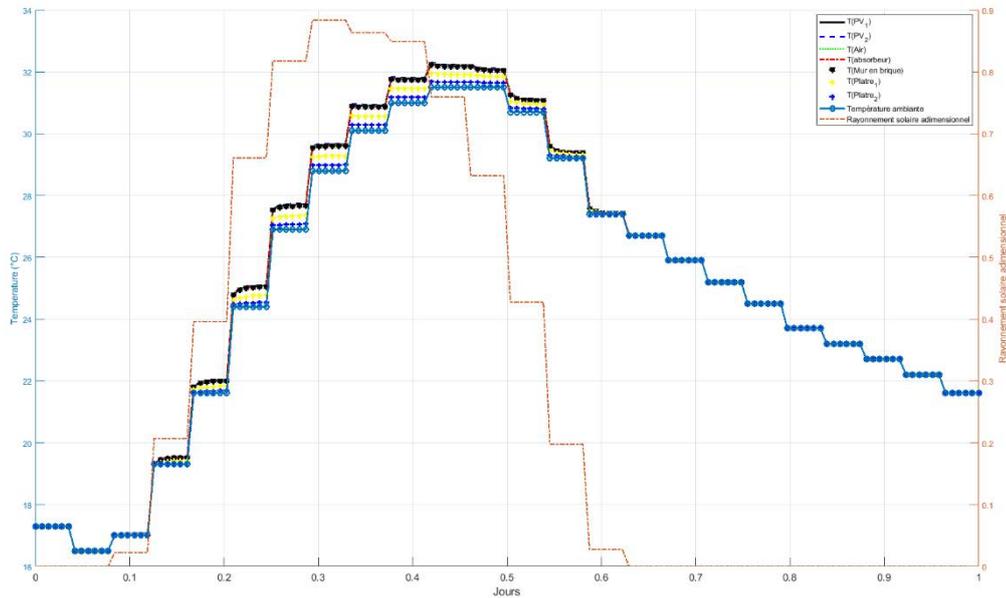


Figure 44: Profil de température instantanée de différentes couches du système PV/T-MT dans une journée claire du mois d'août

- **Rendement thermique :**

Le rendement thermique journalier présenté par la Figure 46 montre une productivité faible comme prouvé par l'allure thermique de la figure précédente.

Ce résultat montre l'incapacité du système à améliorer son rendement thermique, mais le modèle développé fournit le maximum d'informations pour les études d'optimisation de la conception et l'optimisation de la commande et du contrôle du système.

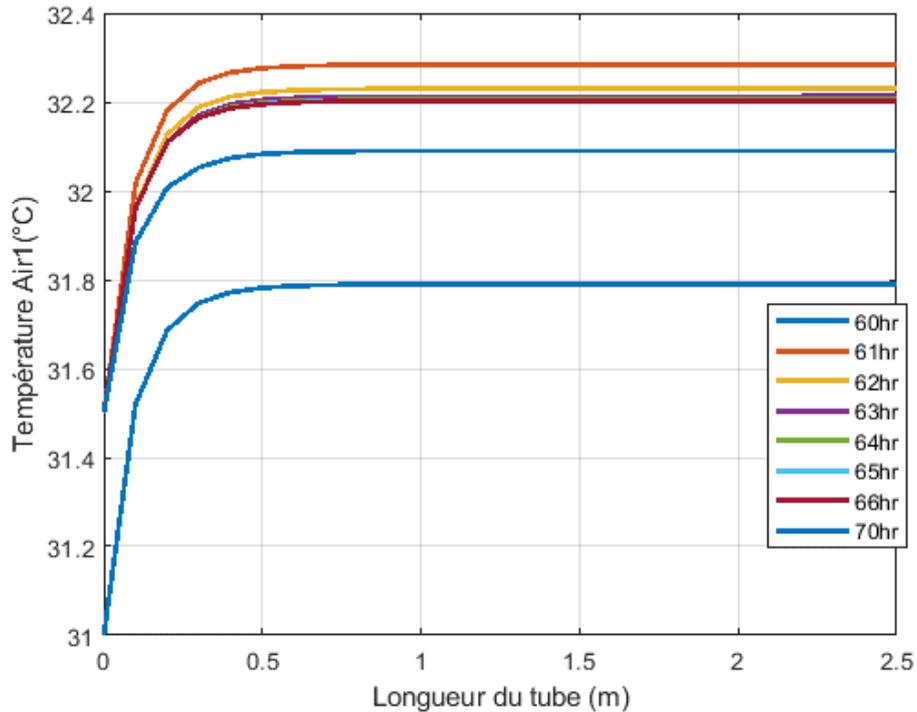


Figure 45: profil de température en fonction de la longueur d'échange interne du système PV/T-MT pour différentes instants à partir de la condition initiale

La Figure 47 illustre la distribution thermique de la partie PV du système, qui est uniforme le long de la longueur du panneau.

La Figure 48 montre la variation du rendement instantané en fonction du temps, la valeur maximale du rendement dans les conditions STC est de 15%. Il est remarqué par ce résultat que le rendement électrique reste encore influencé par la température de la cellule PV.

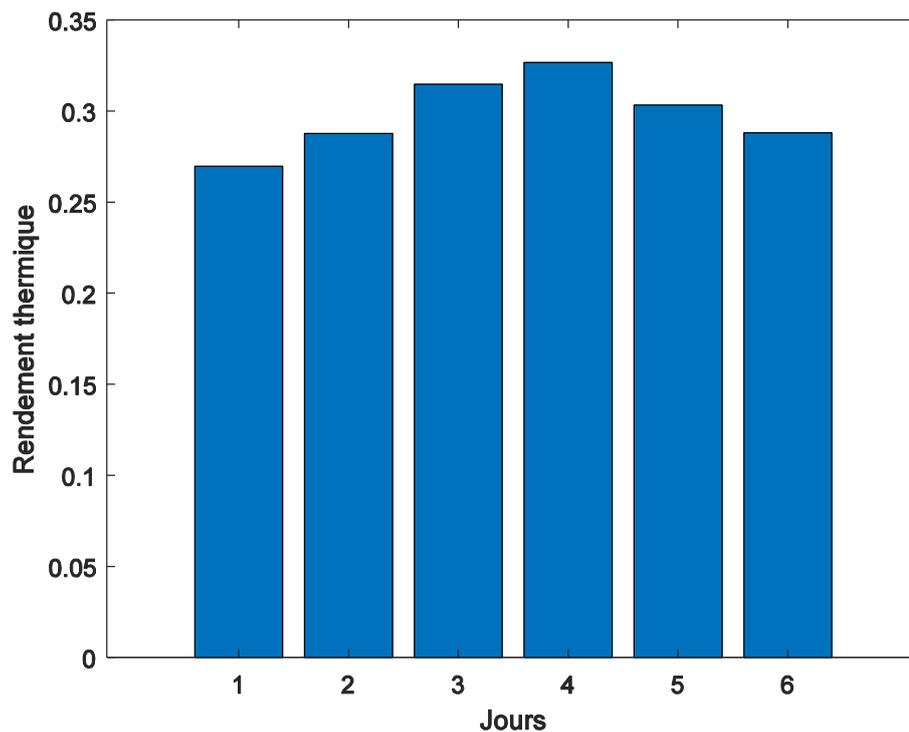


Figure 46: Rendement thermique journalier du système PV/T-MT

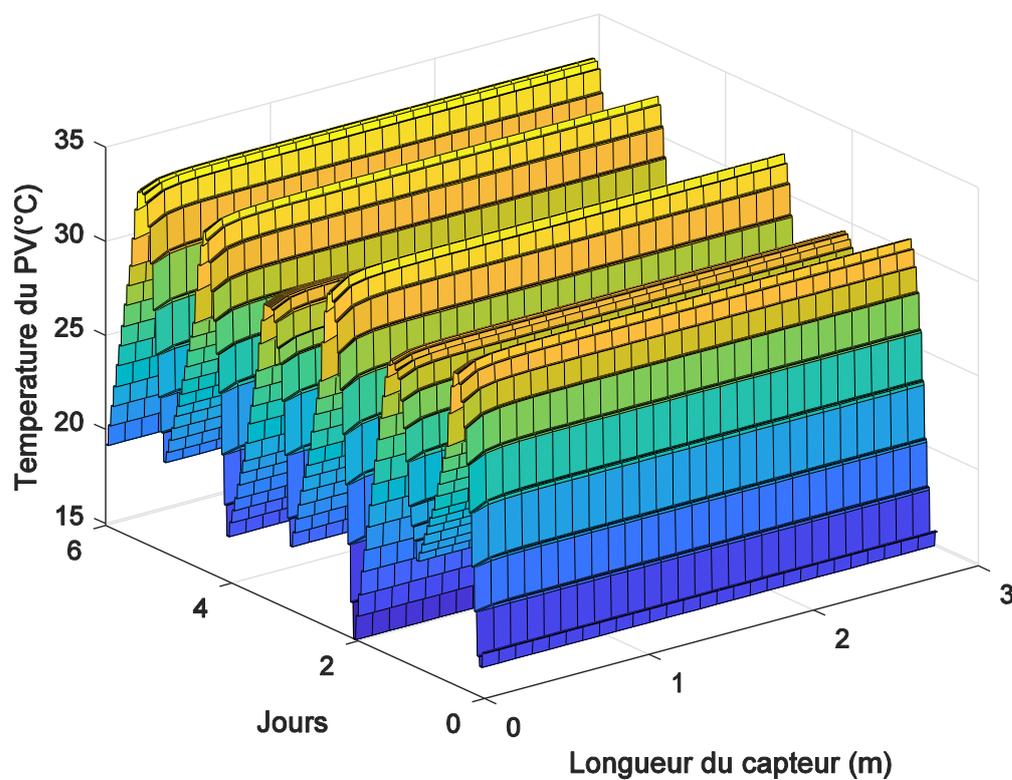


Figure 47: Profil de température de la couche PV du système PV/T-MT

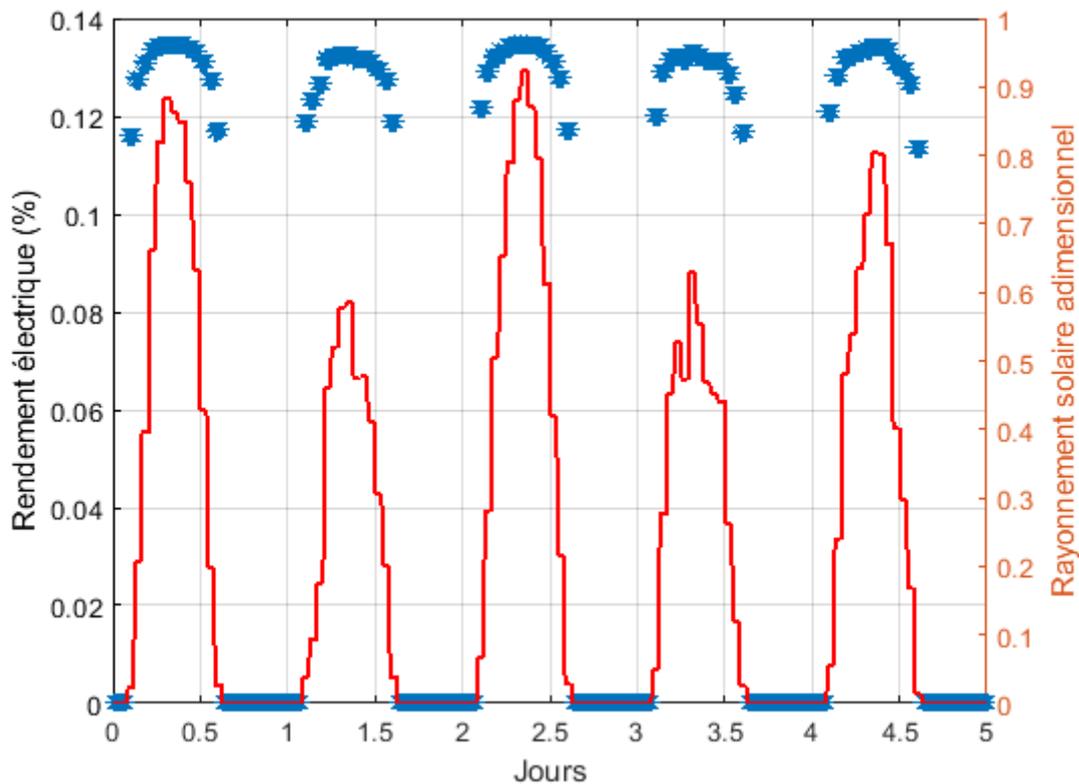


Figure 48 : Rendement électrique instantané du système sur 5 jours

2.3. Mur PV/T-Eau avec et sans MCP

Dans cette partie, une étude théorique sur l'incorporation des matériaux à changement de phase avec un système actif PV/T intégré à l'enveloppe d'un bâtiment a été développée dans le but d'améliorer l'efficacité énergétique du bâtiment, ainsi que d'amplifier les gains solaires et assurer un meilleur confort thermique.

Le but ultime de cette partie, c'est d'adapter le modèle d'ORRE à l'étude de ce système (PV/T-Eau avec et sans MCP) et comparer les performances énergétiques qui peuvent être résultées en temps réel de la simulation dynamique de ce système.

2.3.1. Composition du système

Les murs actifs incorporant des matériaux à changement de phase (MCP) sont considérés à plusieurs fins. D'une part, les MCPs assurent un stockage thermique des gains solaires via la chaleur latente dans les murs des bâtiments et offrent une inertie thermique élevée ; ceci peut être mesuré par un coefficient de déphasage thermique (DT) et un facteur de décroissance (FD). D'autre part, le

confort thermique intérieur est un problème important où les matériaux à changement de phase peuvent apporter des solutions de manière significative dans le but de stabiliser le profil du confort thermique et réduire les phénomènes de surchauffe.

Pour ce faire, il est nécessaire de développer un nouveau système capable de collecter simultanément le gain solaire maximal et d'assurer du confort thermique intérieur. Ainsi, la conception du système proposée dans ce travail peut être décrite comme suit :

La Figure 49 illustre une conception d'un système de paroi active, dans sa face extérieure, le panneau solaire PV/T est composé d'un système PV semi-transparent monocristallin qui peut absorber et transmettre une quantité de rayonnement solaire à la plaque d'absorbeur, afin de transférer le flux de chaleur au fluide caloporteur circulant dans les tubes. De l'autre côté, la composante passive constituée d'une isolation thermique en polystyrène suivie d'une paroi en briques et d'une face interne. Ici, nous considérons que la paroi MCP est intégrée dans la face interne pour stocker la fraction thermique excédentaire générée par différents dispositifs dans de l'espace intérieur. Dans cette partie, nous nous concentrons principalement sur la quantité de chaleur absorbable par les panneaux muraux PV/T avec et sans MCP ainsi que sa variation dynamique, mais pas sur la nature des dispositifs thermiques. Ensuite, sur la Figure 49 une illustration avec un organigramme des flux de chaleur à l'intérieur de notre système avec les gains solaires et internes échangés entre le système de stockage latent (paroi MCP) et l'espace ambiant. Nous présentons dans le Tableau 2 les différentes caractéristiques des matériaux considérés dans cette étude.

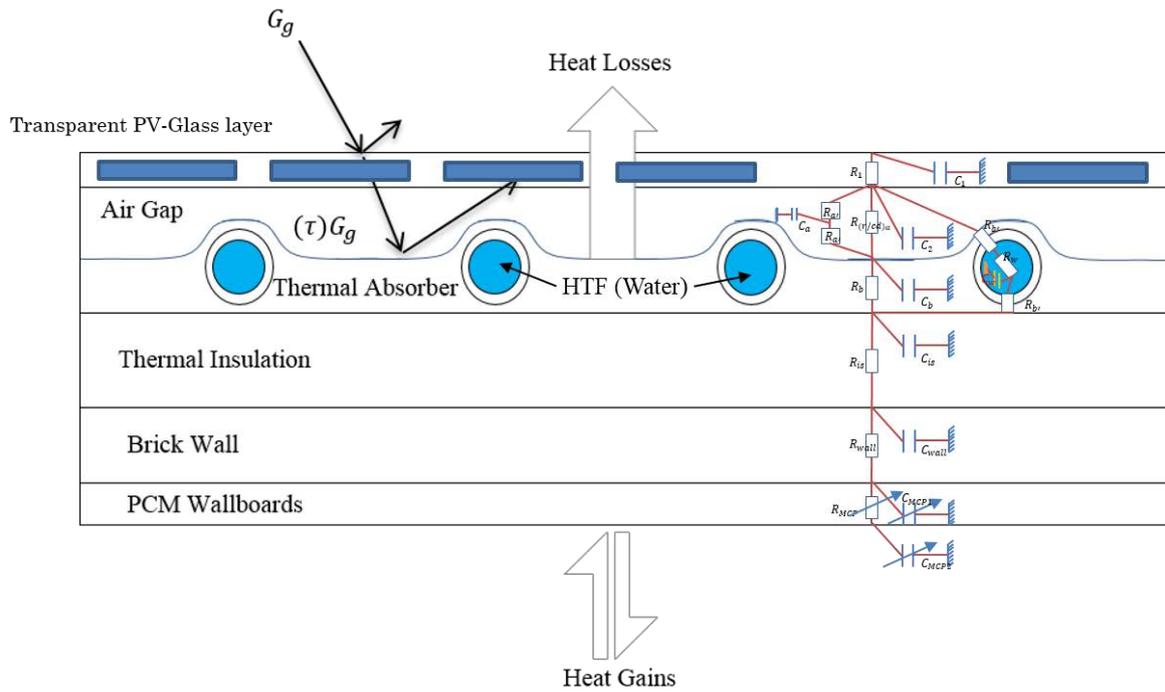


Figure 49: Schéma transversale du système PV/T à eau intégrée dans la façade avec les plaques MCP Energin® à l'intérieur du building

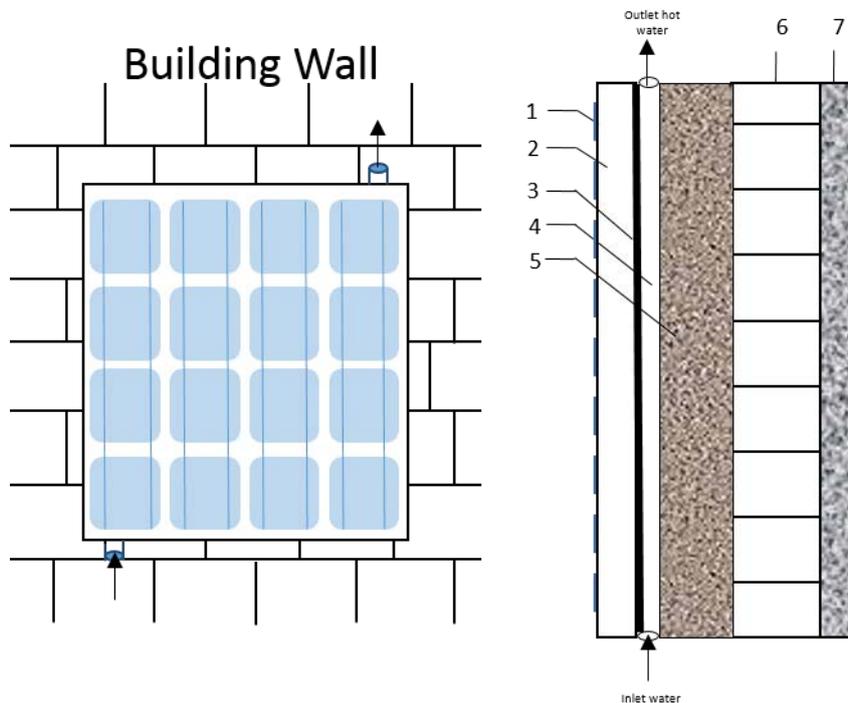


Figure 50: Schéma de différents éléments du système PV/T-MCP-façade. (1): Panneau PV/T semi-transparent, (2): lame d'air, (3): Absorbeur métallique, (4): Tubes d'eau, (5) Isolant thermique, (6): Mur en brique réfractaire, (7) Plaque MCP Energin®

Tableau 5: propriétés thermo-physiques du système

	Masse volumique $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	Conductivité thermique $(\frac{W}{m.K})$	Capacité thermique $\left(\frac{J}{Kg.K}\right)$	Épaisseur (mm)
Isolation thermique	720	0.01	460	150
Mur	1200	0.4	640	100
Paroi MCP	945	0.19-0.22	-	5
Absorbeur thermique	890	55	1450	5
PV Semi- transparent	840	0.4	840	10

2.3.2. Modèle d'espace d'état linéaire du système.

Dans cette partie, un modèle d'ORRE adapté au système proposé consistant principalement à améliorer l'inertie thermique par le stockage latent issue de la composante thermique du système PV/T et une composante MCP dans l'espace intérieur (Figure 50). Afin de simplifier le modèle, certaines hypothèses sont introduites :

- Le problème de transfert de masse et de chaleur est monodimensionnel.
- Les propriétés thermo-physiques du système sont considérés homogènes et isotropes.
- Le nombre de Biot a été évalué en premier lieu afin de déterminer les nœuds spacieux de la zone de variations de température moyenne.
- L'écoulement du fluide est évalué dans des conditions d'écoulement laminaire et les valeurs du coefficient de transfert h sont considérées en se référant aux corrélations de la littérature.
- Le phénomène de convection entre la composante PV et l'absorbeur métallique est négligeable.

2.3.3. Les équations bilan

Les équations qui décrivent le comportement thermique dans chaque sous-composante du système sont regroupées par la méthodologie suivie par le modèle d'ORRE :

- **La paroi MCP**

La paroi MCP est composée d'une plaque qui contient des μ -capsules du paraffine-wax.

La paroi MCP est modélisée en utilisant la méthode de la capacité thermique variable, où la capacité calorifique prend deux formes semi-identiques dans les phases de fusion et de solidification et approchée exponentiellement par des interpolations exponentielles [85]. L'équation de chaleur réduite de la couche de MCP est décrite par l'équation et développée pour une couche d'épaisseur soit de 7mm, par ailleurs ; la composante MCP est subdivisé en sous-couches afin de maintenir l'uniformité de la capacité calorifique dans chaque sous-couche.

2.3.4. Le montage expérimental

Les mesures expérimentales effectuées ont pour but de valider le comportement dynamique thermique de la partie passive du système dans une paroi composite d'isolant thermique en polystyrène ajoutée à des échantillons de la paroi MCP et de béton. L'expérience a été réalisée par une chambre conditionnée. La Figure 51 représente les différents composants et capteurs de la chambre climatique conditionnée.

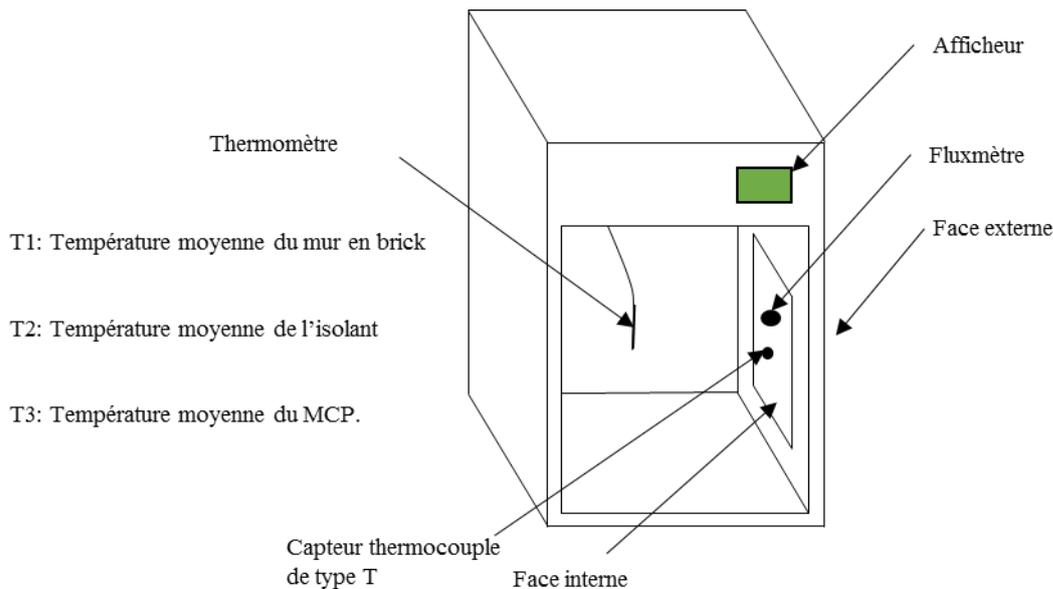


Figure 51:Chambre conditionnée pour caractériser la paroi passive + MCP

Le flux de chaleur est mesuré par un fluxmètre, comme indiqué sur la Figure 52; le fluxmètre est soigneusement placé à l'intérieur de la chambre climatique. La paroi MCP est placée à l'intérieur, et suivi par le panneau en béton, et enfin l'isolation thermique est placée dans la partie extérieure. Les surfaces de température dans les faces intérieure et extérieure sont mesurées instantanément par des thermocouples type K talonnées de 0.01% d'incertitude.



Figure 52: montage expérimental (chambre conditionnée avec des échantillons de taille 20X15 cm²)

Les conditions de la configuration expérimentale sont décrites comme suit :

- **la face interne** : comme décrit ci-dessus, la paroi MCP est situé dans la face interne ; l'air de la chambre est conditionné avec deux scénarios principaux, le premier considère principalement l'effet du climat froid, tandis que le second prend en compte l'effet du comportement du climat chaud.

- **La face externe** : la face externe étant conditionnée par l'environnement de travail nous avons mesuré sa température ambiante instantanément, puis une analyse effectuée de la température met de flux instantanément mesurés.

La Figure 53 montre le premier scénario réalisé visant à étudier le comportement thermique dynamique de la paroi passive composite. Premièrement, le régime transitoire est conditionné par l'augmentation de la température à l'intérieur de la chambre avec une valeur constante de HR = 15%. Ensuite, le régime de transition non conditionné est atteint. Le processus continu jusqu'à ce que le régime dynamique non conditionné soit atteint là où les conditions externes permanentes régissent le système.

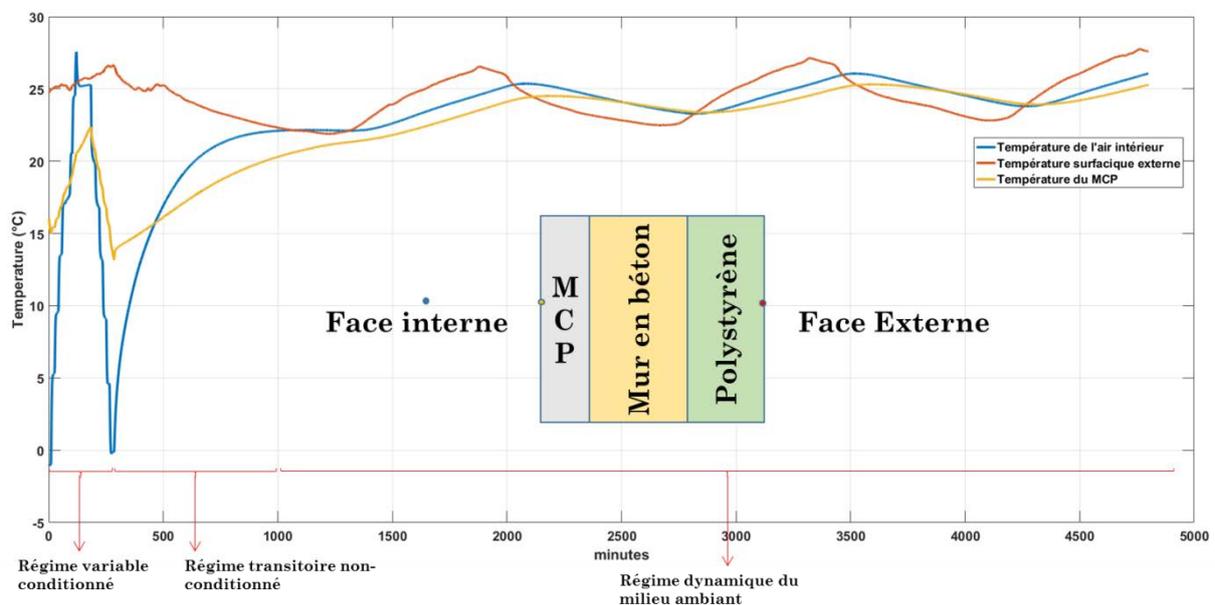


Figure 53: 3 étapes de conditionnement expérimental en régime dynamique

De plus, les résultats expérimentaux sont utilisés pour valider la diffusion thermique dans la paroi MCP à travers le mur et l'isolant.

2.3.5. Analyse des performances thermiques

Dans cette section, une analyse de différents scénarios a été faite. Le tableau ci-après montre un scénario de besoins et de gains thermiques, ce scénario est ensuite insérer dans le modèle de la façade orientée située à un climat méditerranéen (le nord du Maroc selon notre cas).

- **Mur de bâtiment actif solaire sans MCP.**

○ **Journées hivernales claires**

Comme il est évident, dans l'hémisphère nord, la période journalière est plus courte par rapport aux périodes nocturnes de la saison froide. Par conséquent, les besoins en chaleur prennent de plus en plus d'importance et les gains thermiques restent faibles. Cependant, dans le climat méditerranéen, où il est caractérisé par un froid moins sévère vis-à-vis d'autres pays du nord, notre système est développé en fonction de ces conditions climatiques spécifiques et le climat de la ville de Tétouan est trouvé plus adapté à notre application.

La Figure 55 présente le rayonnement reçu par la façade, la variation de température pour différentes couches en temps réel du système sans gains internes ainsi que la température moyenne de l'eau dans le capteur solaire. Comme observé, les températures internes de la pièce et de l'air sont significativement influencées par la composante solaire installée. En outre, afin d'évaluer l'apport d'énergie solaire qui en résulte, pour un jour d'hiver clair, deux paramètres principaux ont été calculés : le déphasage thermique (DT) et les facteurs de décrémentation (FD). Le DT comme son nom l'indique décrit le délai entre la valeur la plus basse de la température extérieure et la valeur de la surface intérieure. Le facteur de décrémentation (DF) décrit le rapport entre la température intérieure et la température extérieure.

Le facteur FD est trouvé égal à 0,23 et le DT est d'environ 16,166 heures dans la configuration avec MCP et DF = 0,13 et TL = 14 heures pour le mur du système avec MCP. La Figure 54 représente les températures de l'air intérieur pour différents volumes de pièce (de 1 : à 46 m³) avec un taux de renouvellement d'air fixe de 1Volume / h sans apport de gain interne pendant la période du 11 au 15 janvier. Le facteur de décrémentation et le déphasage thermique sont évalués pour chaque situation.

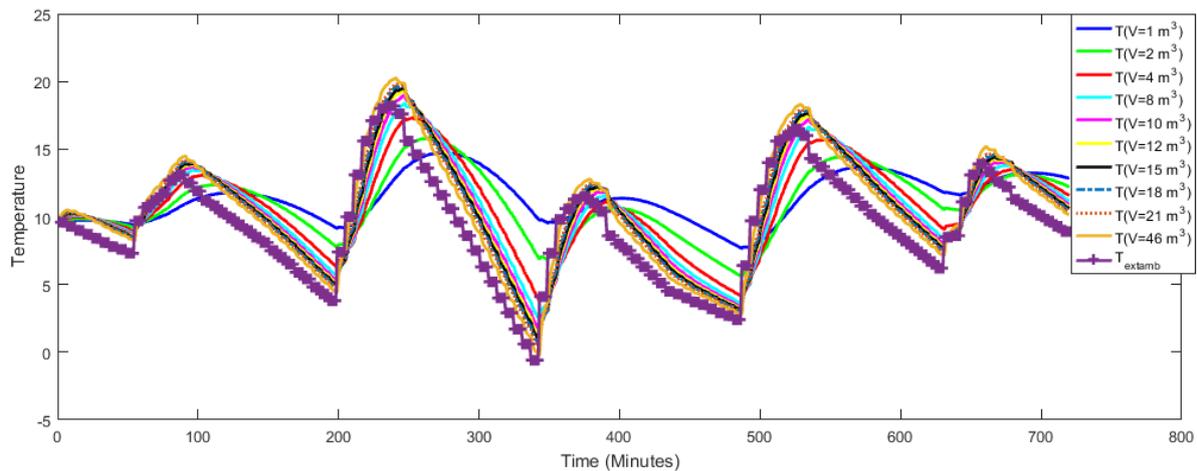


Figure 54: L'effet du volume de la pièce sur la température de l'air intérieur pendant les journées ensoleillées d'hiver

Journée Estivales claires

En été, les gains de chaleur naturelle conduit à la diminution du confort thermique du corps humain. Le bâtiment isolé affecte avec des gains internes élevés l'approvisionnement en climatisation et donc la surchauffe des espaces de construction intérieurs. Les panneaux solaires fournissent à haute température l'eau chaude sanitaire, mais avec un faible profil d'utilisation. Par conséquent, l'optimisation de l'approvisionnement en énergie est très intéressante afin de réduire l'apport d'énergie mécanique à la composante solaire. Cependant, le système proposé peut être dimensionné d'un côté en optimisant le taux de volume de la pièce. De l'autre côté, en se référant à l'inertie du mur, qui joue un rôle crucial en termes d'amélioration du déphasage qui contribue significativement à réduire l'apport de la charge de climatisation et permettre de rééquiper la basse température aux jours d'été. Dans le cas de notre climat, la Figure 56 représente les différentes valeurs de température de l'air intérieur en se référant à la température ambiante. On conclut que les performances du système diminuent (faible déphasage et facteur de décrétement élevé) avec des taux d'espace qui augmentent. Par conséquent, la conception du système sans panneau MCP améliore son efficacité de manière synchrone avec des débits faibles. De plus, afin de répondre aux besoins d'eau chaude sanitaire, notre modèle prédit également la chaleur récoltée par le système. Par la suite, la Figure 62 représente la température de sortie et la température moyenne du panneau solaire dans la

même période d'été, il est montré que le système peut produire une quantité importante d'eau chaude sanitaire et se synchroniser avec le profil des besoins. Le système nécessite suffisamment de stratégies d'optimisation et de contrôle en temps réel qui ne peuvent être systématiquement garanties par des modèles thermiques conventionnels et des travaux antérieurs.

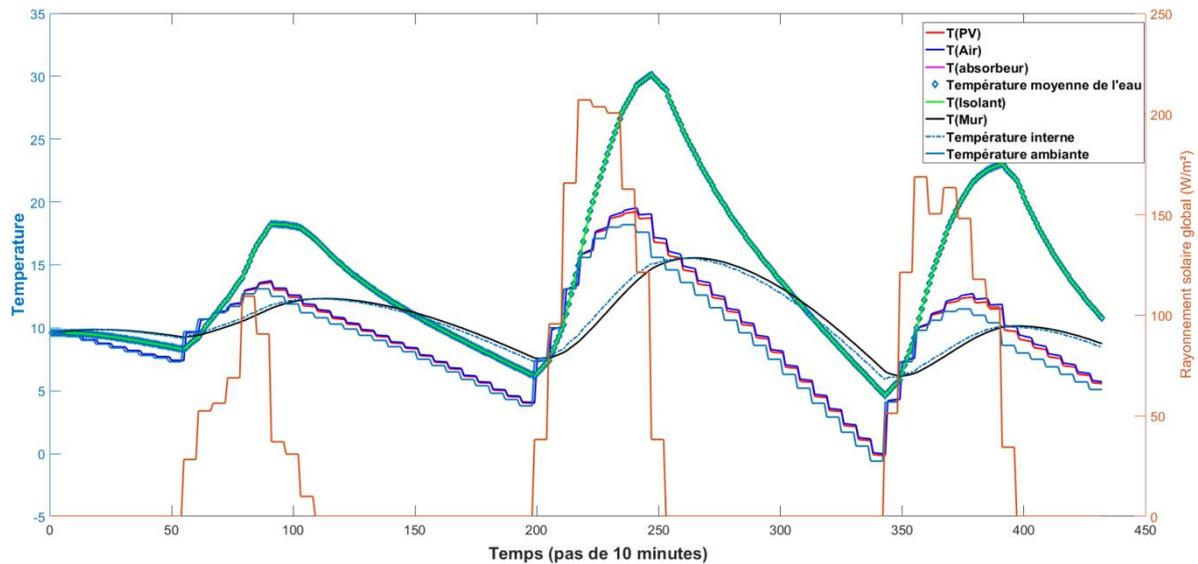


Figure 55: Profil thermique dynamique de différents composants du système sans intégration de la paroi MCP en période hivernale

Mur de bâtiment actif solaire avec MCP.

Journées hivernales claires

Dans les climats de l'espace intérieur, l'apport de chaleur est assuré par des systèmes de chauffage conventionnels tels que des radiateurs électriques, des systèmes de plancher chauffant...etc. De nos jours, le concept de l'habitat passif obtient plus de crédibilité en particulier avec le développement des matériaux requis qui contribue à limiter les pertes de chaleur par l'enveloppe des bâtiments. De plus, le système plâtre + MCP permet d'économiser une quantité importante de gains de chaleur à l'intérieur et de le restituer dans les périodes nécessaires. La Figure 57 représente dans l'axe de coordonnées gauche les différentes températures calculées du système avec du MCP incorporé dans la face interne, et par la coordonnée droite, la variation du rayonnement solaire incident au mur. Les résultats présentés dans cette figure sans apport de chaleur interne montrent que le MCP maintient approximativement une forme stabilisée de la température intérieure indépendamment de la température extérieure. De plus,

la quantité d'énergie solaire collectée par le circuit d'eau installé est évaluée dynamiquement, et peut recueillir à basse température une chaleur considérable pour l'utilisation de l'eau chaude sanitaire.

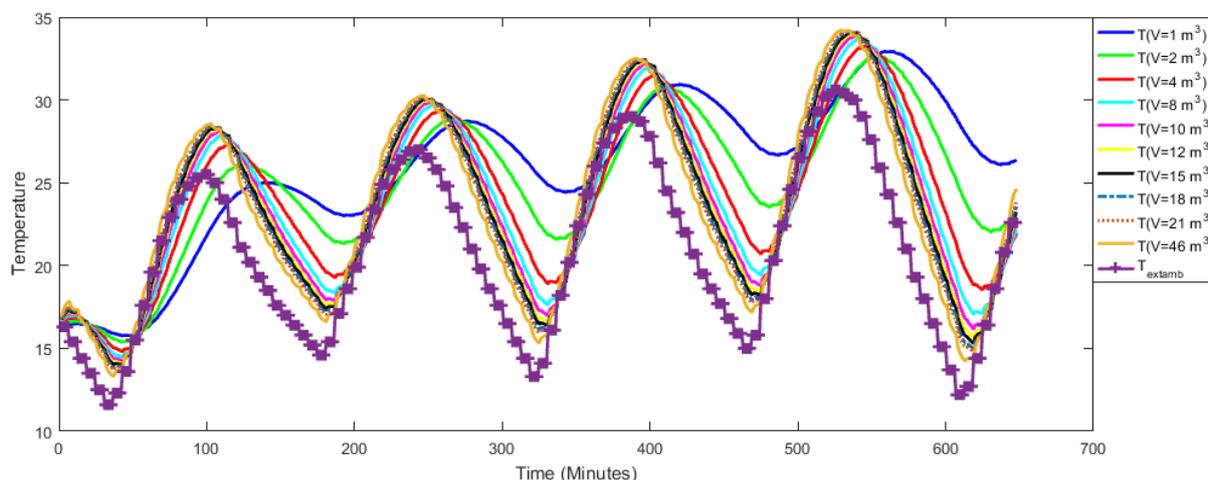


Figure 56: L'effet du volume de la pièce sur la température de l'air intérieur pendant les beaux jours d'été

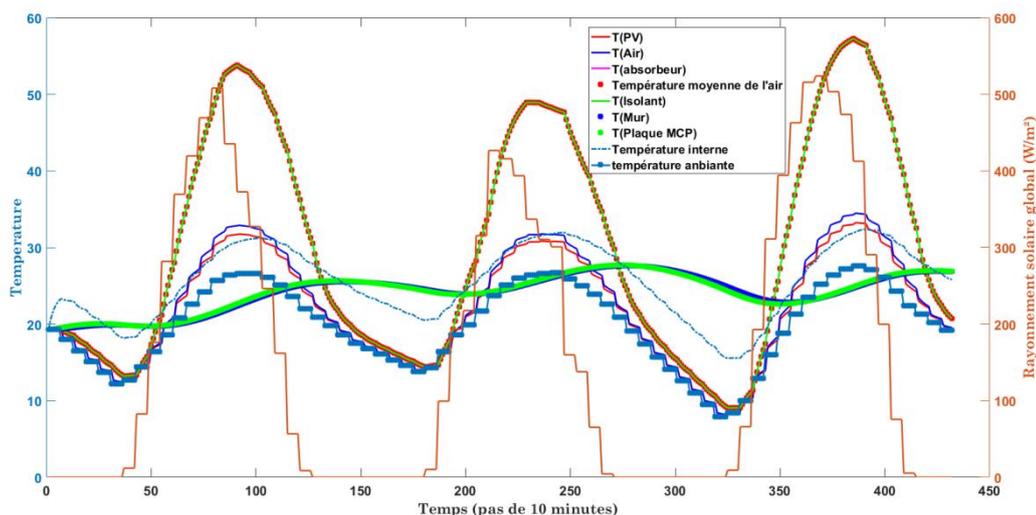


Figure 57: Profil thermique dynamique dans les différentes couches du système de mur solaire avec du MCP et sans gains internes, contribution en hiver

La Figure 58 représente le comportement thermique dynamique la multicouche du mur avec le système PV/T, le système conçu avec une quantité élevée de pertes thermiques. Comme on peut le constater, les pertes thermiques de la partie avant peuvent réduire considérablement les rendements du système et jouer un rôle important dans le rendement total ainsi que dans les performances thermiques. La Figure 59 fournit des différences thermiques considérables entre les différentes couches du système en raison des faibles pertes de chaleur de la

face avant, le système est alors parfaitement conçu pour améliorer les hautes performances thermiques et contribuer au confort thermique en intégrant la paroi MCP dans le côté intérieur du local.

Le gain thermique horaire produit par la composante solaire est donnée dans la Figure 61. La quantité d'énergie thermique simulée produite sans stockage est compatible avec les gains solaires.

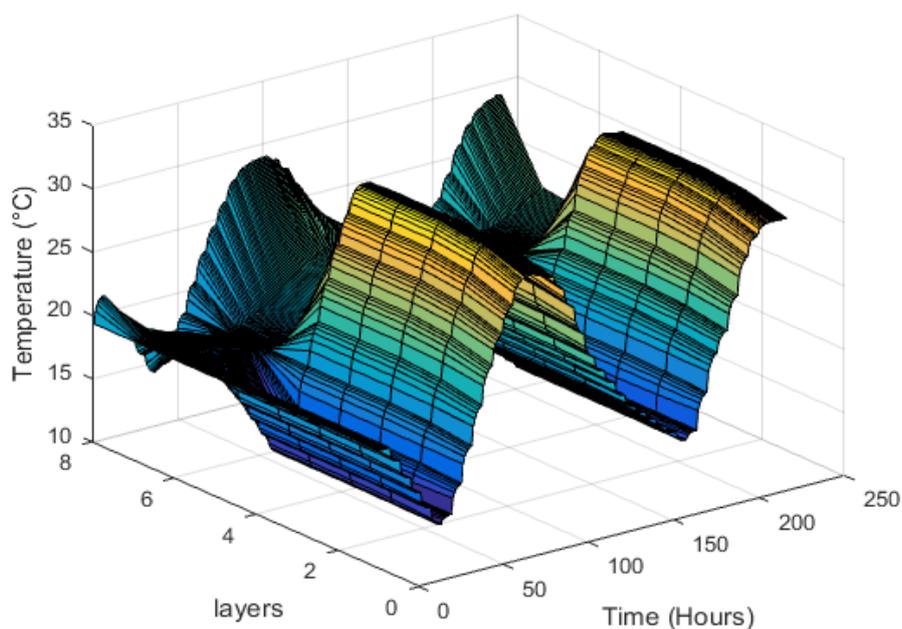


Figure 58: Comportement thermique dynamique d'un système solaire mural à fortes pertes thermiques

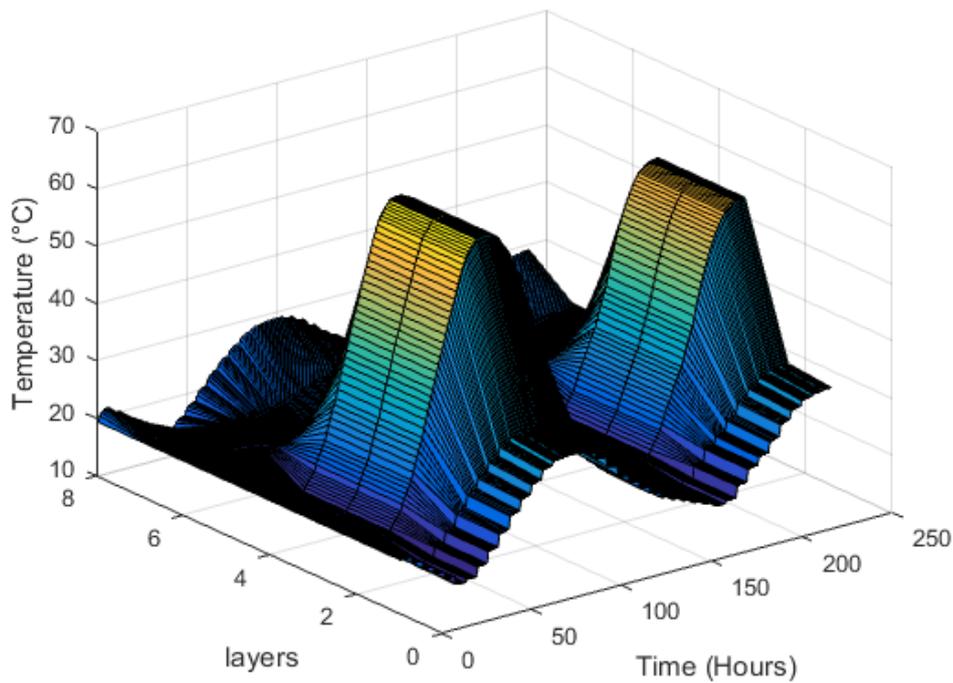


Figure 59: Comportement thermique dynamique du capteur solaire PV/T intégré au mur composite à haute performance

L'effet bénéfique qui représente dans les périodes chaudes où il peut stabiliser les conditions thermiques dans les locaux. Par conséquent, afin d'améliorer le rendement du système, il serait primordial de faire évoluer la configuration du système vers un système en boucle fermée dans les saisons froides afin de bénéficier directement des gains solaires et de les stocker dans les panneaux muraux MCP.

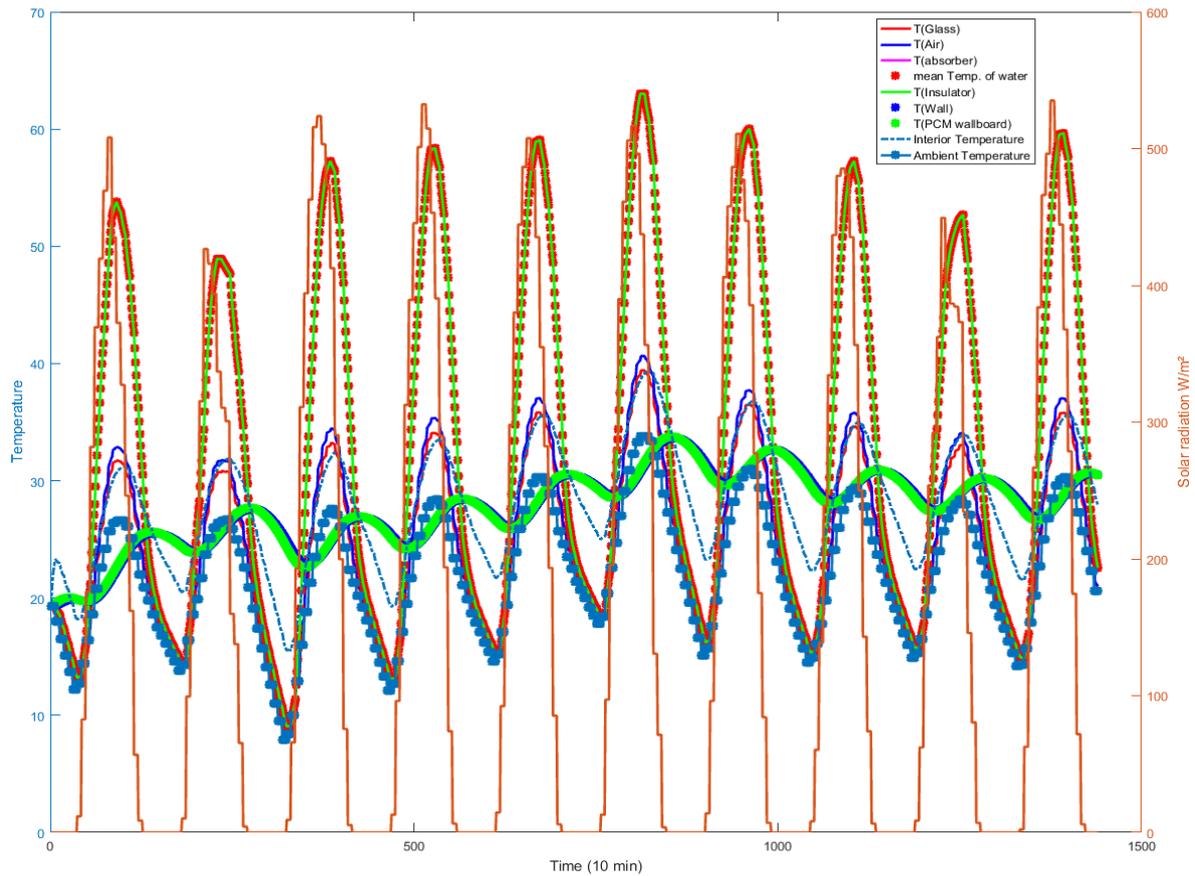


Figure 60: Variation thermique dynamique dans les différentes couches du système de mur solaire intégrée de la paroi MCP et ses contribution aux gains internes

2.3.6. Validation du modèle numérique

Le modèle numérique développé prend en compte le profil de la température du fluide caloporteur long l'axe de l'écoulement. La différence entre la température de sortie et les températures moyennes de l'écoulement.

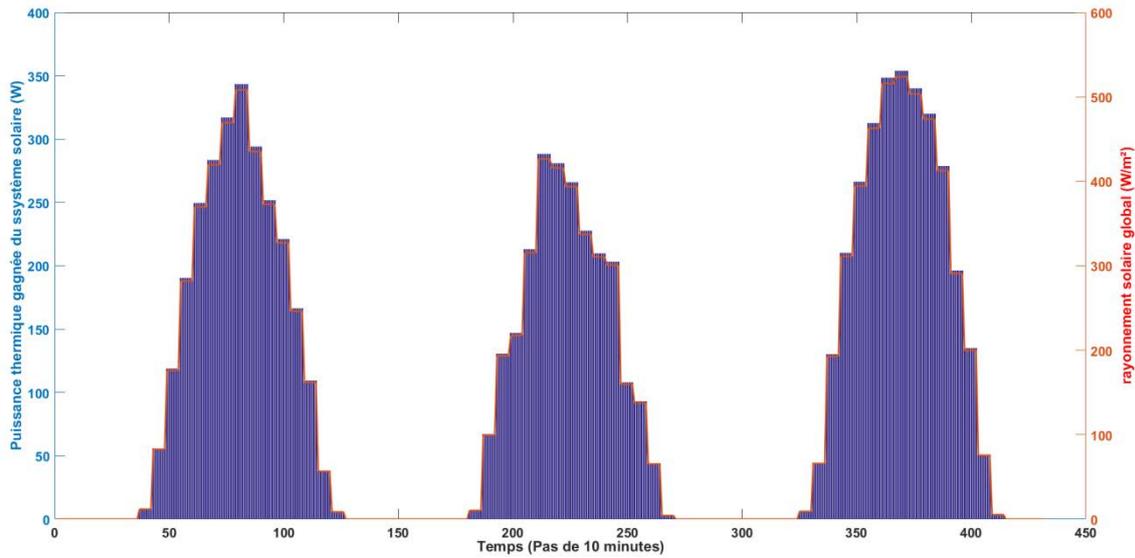


Figure 61: Production (W) instantanée de la chaleur par du système PV/T et des gains solaires pour une période estivale du 1^{er} au 3 Juillet

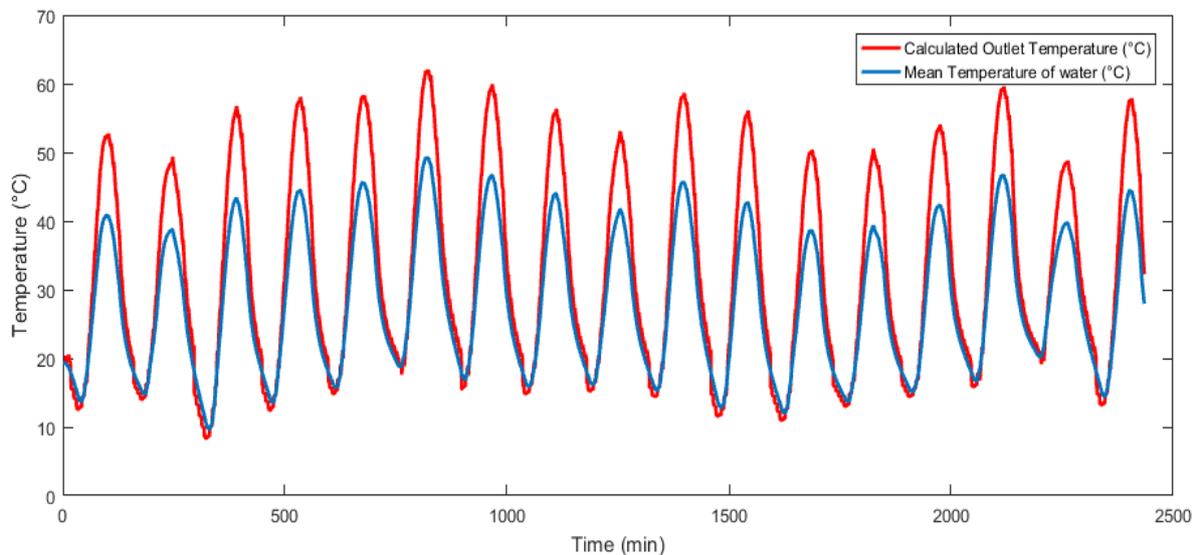


Figure 62: la température de sortie calculée de l'eau et la température moyenne dans le capteur solaire

La validation du modèle numérique résulte également de l'évaluation de deux paramètres principaux ; le coefficient de d'incertitude r , ainsi que l'écart type moyen de l'erreur (e), exprimés respectivement par les équations (11) et (12). La Figure 20 représente un bon accord entre les mesures expérimentales dynamiques et le modèle numérique dont lequel on trouve $e = 13,4\%$ pour la partie MCP, et $r = 0,98$. Alors que dans la partie du mur, $e = 8,4\%$ et $r = 0,94$. Le taux de différence dans la partie MCP peut s'expliquer par la difficulté d'estimer le coefficient de convection h dans la partie externe, ainsi que l'effet d'hystérésis MCP.

2.3.7. Discussions

Dans ce scénario, les résultats représentés mettent en évidence l'importance du modèle dynamique en représentation d'état pour garantir avec précision la stabilité du comportement thermique du système proposé. La différence entre les deux principaux paramètres FD, et les facteurs DT sont calculées, les valeurs trouvées sont relativement approximatives et justifient les hautes performances du mur. L'ajout du composant MCP est justifié dans le but de réguler la température d'ambiance. Dans ce travail, l'ensemble du modèle est considéré comme quasi-linéaire et discrétisé numériquement en utilisant explicitement la méthode des différences finies. L'effet du volume occupé par rapport au système de mur solaire installé reste important. Le modèle proposé peut, par conséquent, garantir une optimisation paramétrique et géométrique valable sans se référer au processus CFD. La quantité de chaleur produite peut être délivrée instantanément à chaque instant désiré, ainsi le système est contrôlable et peut être géré avec un profil souhaité qui respecte les gains et les demandes de chaleur. L'avantage supplémentaire du modèle repose également sur la complexité du traitement thermique des différents composants liés en ajoutant, soustrayant ou modifiant les différents paramètres. L'effet du système de stockage sensible n'est pas pris en compte dans cette étude, mais en se référant à ces résultats, une conception particulière est requise pour adapter l'eau chaude stockée avec la capacité installée dans le mur actif.

5. Bilan du chapitre

Dans ce chapitre, le modèle d'ORRE représente un schéma simplifié de modélisation et de simulation dynamique. Les cas étudiés représentent une application directe de ce modèle, tout en permettant d'interpréter les résultats du régime dynamique. Cependant, les systèmes PV/T ne manifestent pas qu'un comportement multi-physique, mais aussi une interdépendance entre le rendement électrique et le rendement thermique, ce qui permet dans certaines applications à la température du système PV d'influencer le comportement linéaire du système et l'affiner à des non-linéarités. De plus, le cas du MCP,

présente-lui aussi un comportement bilinéaire dont la capacité thermique dépend fortement de la température du milieu. Pour cela, une investigation sur la non-linéarité du système assume importante à traiter.

Chapitre IV : Approche non-linéaire du système PV/T-Bâtiment

1. Introduction

L'interdépendance entre le comportement électrique et thermique des systèmes PV/T peut influencer les résultats de simulation. Si la température du PV augmente, le rendement électrique chute. Cette chute de rendement dans les systèmes classiques PV/T n'influence pas significativement les estimations d'état du système. Cependant dans les systèmes à concentration où le flux solaire dépend de la variable d'état (température) et d'un facteur (de concentration) très supérieur à 1, la variation du rendement électrique et de flux solaire dépend fortement de la température de la cellule PV d'où sa productivité. Dans ce chapitre, un modèle de concentrateur CPV/T est développé avec une approche multilinéaire. La multi-linéarité se manifeste dans l'interdépendance des variables d'état à d'autres variables ou paramètres. Si le système est interdépendant deux fois, c.à.d. la variable d'état dépend directement du débit massique ou du flux, on dit que le comportement physique est deux fois linéaire ou bilinéaire. De plus, le comportement thermique d'autres dispositifs passifs couplés avec le PV/T peuvent manifester de leur tour un comportement non-linéaire comme le cas du MCP où la capacité thermique dépend aussi de la température dynamique du corps. Pour cela un modèle thermique spécifié à ce type d'application développé dans ce chapitre.

2. Modèle multilinéaire

On s'intéresse par un modèle bilinéaire de type présentation d'état défini par l'équation (77) et (78).

$$\dot{\theta} = A\theta + Bu + \sum_{k=1}^K N_k \theta u_k \quad (77)$$

avec $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $\theta \in \mathbb{R}^n$, $u \in \mathbb{R}^m$

$$\dot{\theta} = \left(A + \sum_{k=1}^2 N_k u_k \right) \theta + Bu \quad (78)$$

3. Cas d'un système PV/T à concentration

Plusieurs travaux de concentrateurs PV/T ont été développés dans la littérature. Les systèmes photovoltaïques à concentration classiques comprennent un élément de concentration optique grande taille, une cellule solaire de petite taille et un système de dissipation thermique. L'éclairement incident sur l'élément optique est automatiquement concentré sur la cellule solaire. Une étude sur les différents systèmes à concentration a été présentée par [86].

En associant la récupération de la chaleur aux CPV par des échangeurs comme dans le cas de la technologie PV/T constitué un axe synergétique important. Ils existent plusieurs techniques de récupération de la chaleur selon le type de l'utilisation.

3.1. Aspect théorique

Dans cette section, un modèle de performance de la puissance électrique et thermique d'un collecteur CPVT est développé. La dérivation présentée vise à décrire les puissances de sortie respectives sous la forme d'une combinaison linéaire de grandeurs ou de combinaisons de mesure standard, similaire au modèle dynamique des systèmes PV/T ordinaires.

3.2. Modèle énergétique

Le bilan énergétique de base d'un capteur CPVT est illustré à la Figure 63 décrite par l'équation (77). Le produit de l'éclairement énergétique G_{eff} par de l'aire d'ouverture A_a définit la puissance de rayonnement incidente. P_{abs} désigne la puissance absorbée par le récepteur solaire (à la température de l'absorbeur T_{abs}) après les pertes optiques, P_{el} est la puissance électrique émise, P_{th} la puissance thermique transmise au fluide (à la température moyenne $T_m = (T_{in} +$

Tout) / 2), et P_{loss} est la perte de puissance dans l'environnement à température ambiante T_a .

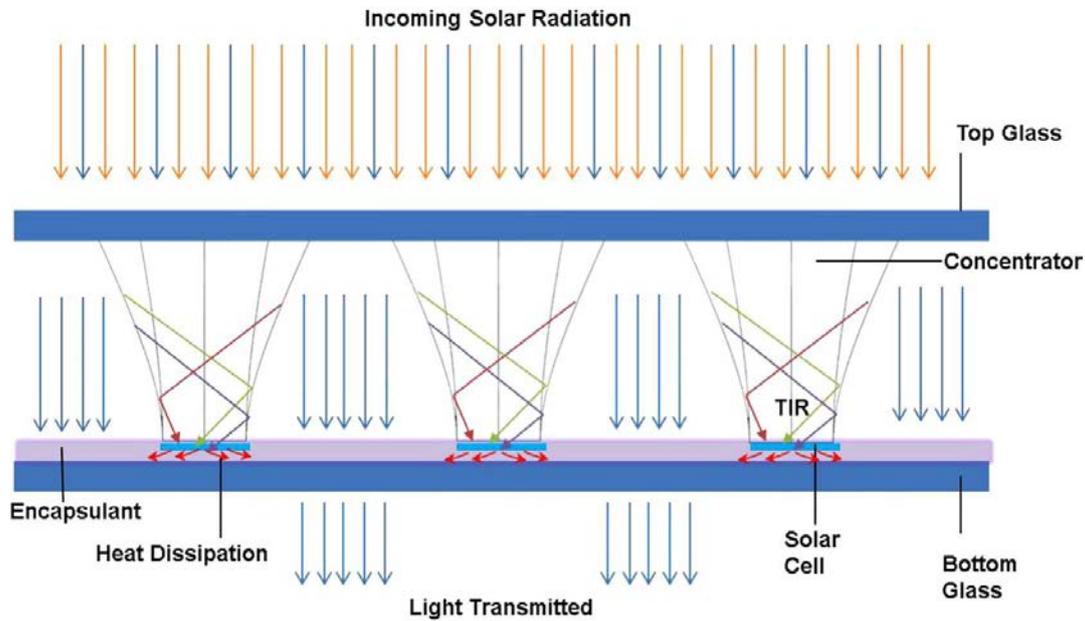


Figure 63: Schéma de principe de concentration solaire

La densité de puissance absorbée liée à l'aire de réception A_{rec} est donnée par l'expression suivante :

$$\frac{P_{abs}}{A_a} = (\tau\alpha)_e C G_{eff} \quad (79)$$

3.3. Application

Dans le cas d'un mur intégré des systèmes solaires, on prendra un système étudié par [87] et [88]. La figure représente le modèle du CPV/T intégré à la façade sud d'un bâtiment dans des conditions simulées de la zone de Tétouan. Le concentrateur est fabriqué en polyuréthane et possède de bonnes propriétés de transmission et diélectrique. Ce système utilise des cellules solaires LGBC (*Laser Groove Buried Contact*) optimisées pour un maximum de concentration lumineuse 10 x. Le système est conçu en fixant la cellule solaire derrière le concentrateur. Un matériau d'encapsulation est utilisé entre la cellule solaire et l'élément optique afin de protéger la cellule solaire et de connecter le concentrateur à la cellule solaire.

L'élément optique (concentrateur SEH) a une concentration géométrique de 6 ; les dimensions du système étudié comme montrée dans la Fig. 2a sont caractérisés par une surface supérieure de forme elliptique avec un demi-axe, 13,16 mm, 9,75 mm, ce qui donne une ouverture totale de 600 mm². La hauteur de l'élément est de 25 mm et la base est un carré de 10 mm de côté relié par des branches hyperboliques formant les surfaces latérales. Les détails des équations utilisées pour concevoir la géométrie sont présentés ailleurs [21].

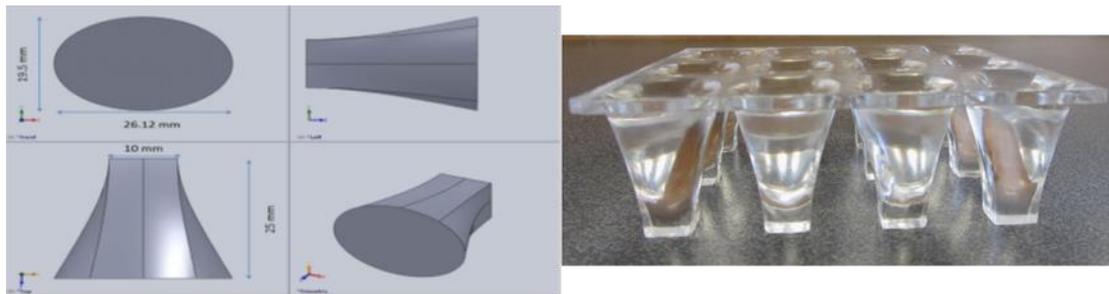


Figure 64: mini-concentrateurs basé sur la technologie LGBC développé par Baig et al. 2013 [87]

La lumière incidente sur la surface est réfracté à travers la couche du verre supérieure ; l'élément optique présent sous la surface concentre la lumière par réflexion interne totale et frappe de manière non uniforme la cellule solaire. La cellule solaire convertit une partie du rayonnement incident en électricité, tandis que le reste se dissipe sous forme de chaleur. Le concentrateur rase un peu l'espace entre eux pour permettre la transmission directe de la lumière, ce qui peut être utile pour éclairer l'intérieur du bâtiment. Comme le montre la Figure 64, des ensembles de ces unités de concentration peuvent être préparés en utilisant un cristal de polyuréthane transparent en utilisant de simples moules en acier inoxydable. Ces moules sont attachés aux cellules solaires en utilisant un matériau encapsulant. Les cellules solaires au silicium basées sur la technologie LGBC [89] sont utilisées dans ce système comme le montre la Figure 64. La cellule a une surface d'absorption de 1 cm². La cellule est constituée de 13 doigts de 35 mm de largeur ayant un pas de 965 mm pour acheminer le courant généré vers le connecteur.

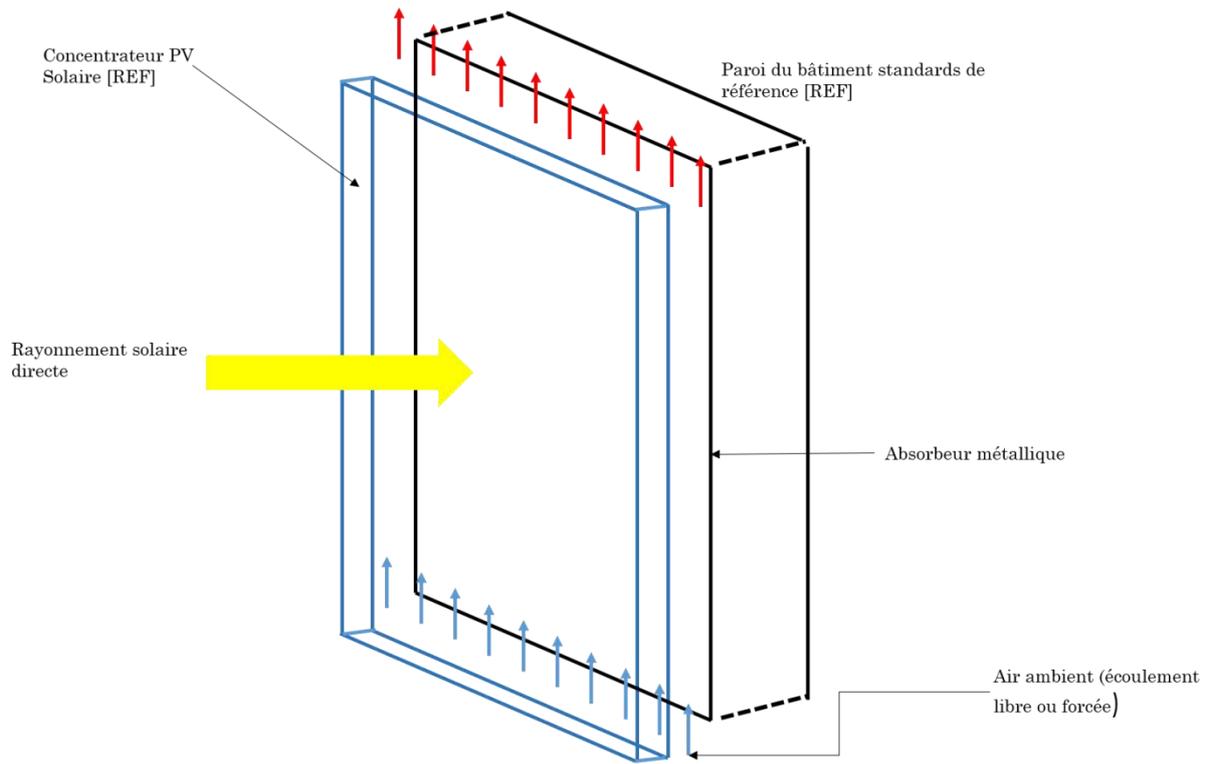


Figure 65: Système CPV/T intégré dans une façade de bâtiments

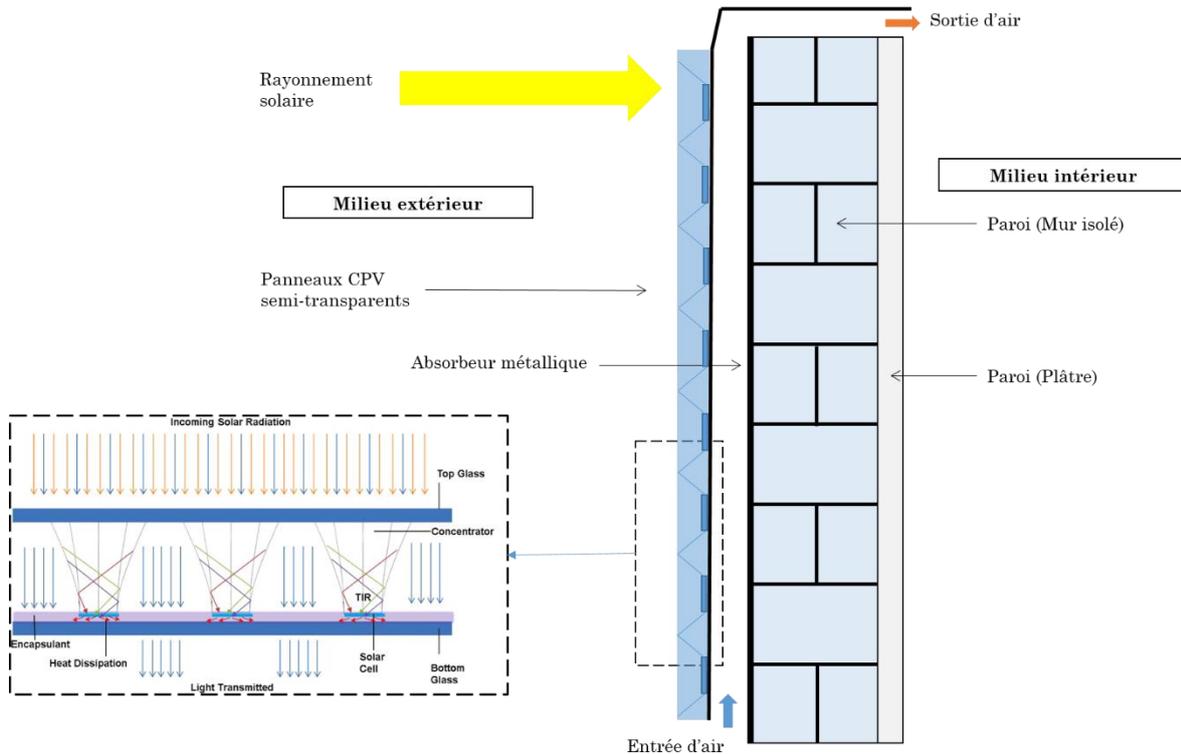


Figure 66: Modèle présenté pour l'étude intégrée dans un mur Trombe

Le modèle réduit peut être décrit bi-linéairement par le système d'équation(78). Cependant, la variation de paramètre rendement électrique en fonction de la

température de la cellule PV dans ce cas joue un impact important dans l'estimation de la puissance électrique générée. Si on suppose dans le cas des systèmes CPV que le rendement varie linéairement en fonction de la température de la cellule comme présenté par l'équation (83), alors cette variation peut influencer exorbitamment le comportement dynamique qui est deux fois linéaire. Après avoir identifié un ordre multilinéaire de système on démontre que le comportement du CPV/T est décrit par l'équation (80).

$$\begin{aligned}
\dot{\theta} = & \left(\begin{bmatrix} -Fo_1 & Fo_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Fo_2 & -(Fo_2 + Fo_3) & Fo_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Fo_4 & -Fo_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -Fo_5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -Fo_6 & Fo_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Fo_8 & -(Fo_8 + Fo_9) & Fo_9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Fo_{10} & -Fo_{10} \end{bmatrix} + \left(\begin{bmatrix} -Fo_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -Fo_{10} \end{bmatrix}^T Bi_e \right)^T \\
& + \left(\begin{bmatrix} -Fo_{r1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -Fo_{r2} \end{bmatrix}^T Bi_r \right)^T + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\beta\eta_0 \tau_1 \alpha_2 G_{ref}}{U_2(T_{max} - T_{ref})} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} C\bar{G} + \left(\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -Fo_4 & Fo_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Fo_5 & -Fo_5 & Fo_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Fo_6 & -Fo_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T Bi_u \right)^T \theta \\
& + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -Fo_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \bar{v}\theta' + \begin{bmatrix} \frac{\alpha_1 G_{ref}}{U_1(T_{max} - T_{ref})} \\ \frac{(1 - \eta_0 - \gamma \log_{10} G) \tau_1 \alpha_2 G_{ref}}{U_2(T_{max} - T_{ref})} \\ \frac{\tau_1 \tau_2 \alpha_3 G_{ref}}{U_3(T_{max} - T_{ref})} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} C\bar{G} \\
& + \left[\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\beta\eta_0 \tau_1 \alpha_2 G_{ref}}{U_2(T_{max} - T_{ref})} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} C\bar{G} + \left(\begin{bmatrix} -Fo_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -Fo_{10} \end{bmatrix}^T Bi_e \right)^T \theta_e + \left(\begin{bmatrix} -Fo_{r1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -Fo_{r2} \end{bmatrix}^T Bi_r \right)^T \theta_r
\end{aligned} \tag{80}$$

L'équation (80) peut s'écrire sous forme générale par l'équation (81):

$$\dot{\theta} = [A + (A_1^T Bi_e)^T + (A_2^T Bi_r)^T + (A_3^T Bi_u)^T + B_3 \bar{G}] \theta + (F\theta')^T u + [B_1 \bar{G} + ((A_1^T Bi_e)^T + B_2 \bar{G}) \theta_e + (A_2^T Bi_r)^T \theta_r] \quad (81)$$

avec les matrices Bi_r , Bi_e , et Bi_u représentent respectivement les nombres de Biot liées au échanges radiatifs avec la face supérieur et inférieur du système, au échanges convectifs avec les faces supérieurs et inférieurs du système. Et aux échanges internes liées à l'écoulement dans la conduite d'air. Ces trois matrices sont données par les formules suivantes :

$$Bi_r = \begin{bmatrix} Bi_{r1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Bi_{r2} \end{bmatrix}; Bi_e = \begin{bmatrix} Bi_{e1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Bi_{e2} \end{bmatrix}; Bi_u = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Bi_{u1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Bi_{u2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Bi_{u3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

La formulation numérique du problème est développé afin d'aboutir à la formule générale de l'équation (82)

$$\begin{aligned} \theta_{\xi+1}^{\tau+1} = & \left(\mathbb{I} + \frac{\tau}{\xi} \left(\mathbb{I} - \tau \left[[A + (A_1^T Bi_e)^T + (A_2^T Bi_r)^T + (A_3^T Bi_u)^T + B_3 \bar{G}]^{\tau} - \frac{\tau}{\xi} Fu^{\tau} \right]^{-1} \right)^{-1} \left(\mathbb{I} \right. \\ & - \tau \left[[A + (A_1^T Bi_e)^T + (A_2^T Bi_r)^T + (A_3^T Bi_u)^T + B_3 \bar{G}]^{\tau} - \frac{\tau}{\xi} Fu^{\tau} \right]^{-1} \left[[\theta_{\xi}^{\tau} \right. \right. \\ & \left. \left. + \tau [B_1 \bar{G} + ((A_1^T Bi_e)^T + B_2 \bar{G}) \theta_e + (A_2^T Bi_r)^T \theta_r] \right] \right) \end{aligned} \quad (82)$$

L'expression du rendement électrique est définie par l'équation (83) et réinjecter dans l'équation d'état (80).

$$\eta_{el} = \eta_0 (1 - \beta(T_c - T_{ref})) + \gamma \log_{10} G \quad (83)$$

avec $Bi_{u1} = \frac{h_{air}e_3}{\lambda_3}$; $Bi_{u2} = \frac{h_{air}e_4}{\lambda_4}$; et $Bi_{u3} = \frac{h_{air}e_5}{\lambda_5}$

$Bi_{r1} = \frac{h_{r1}e_1}{\lambda_1}$; et $Bi_{r2} = \frac{h_{r2}e_7}{\lambda_7}$

$Bi_{e1} = \frac{h_{cv1}e_1}{\lambda_1}$; et $Bi_{e2} = \frac{h_{cv2}e_7}{\lambda_7}$

Le nombre de fourrier maximale à t_c est donné pour chaque sous-élément par : $Fo_i = \frac{\alpha_i t_c}{e^2}$,
avec α_i (m²/s) étant la diffusivité thermique de la couche i.

C : est le rapport de concentration qui est estimé égale à 8 dans ce cas.

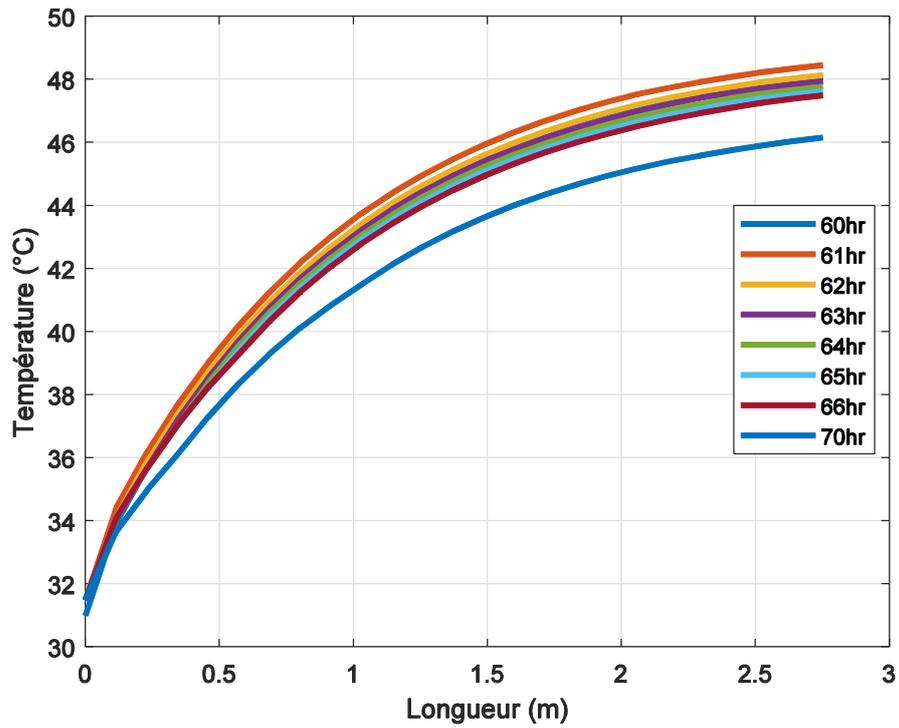


Figure 67: Profile de température d'air pour différents instant à partir de la conditions initiale

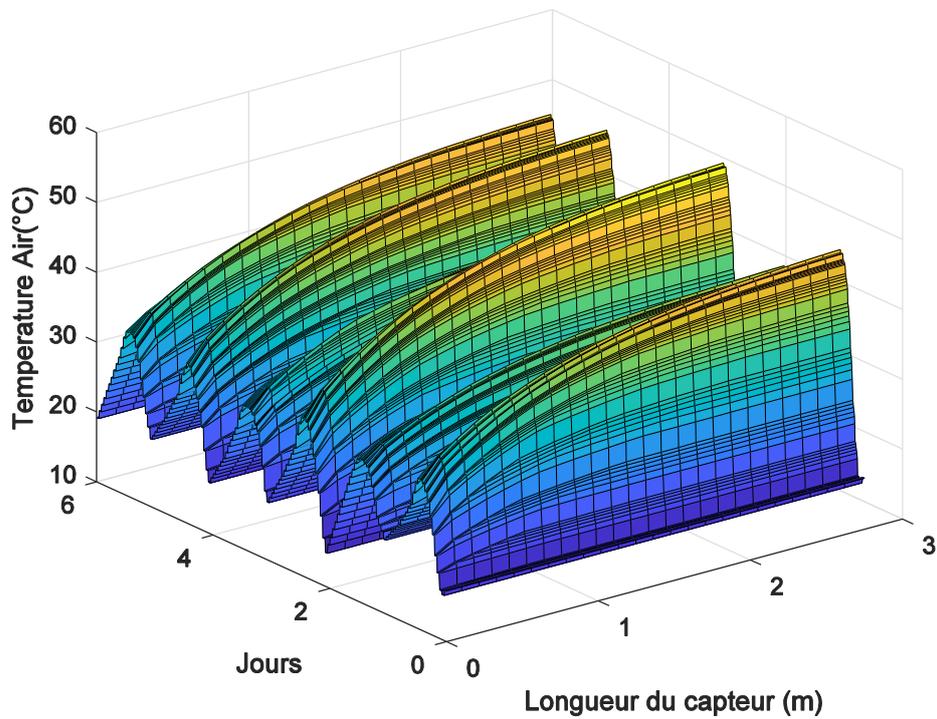


Figure 68: profil de température de l'air en fonction de l'axe de l'écoulement en temps réel

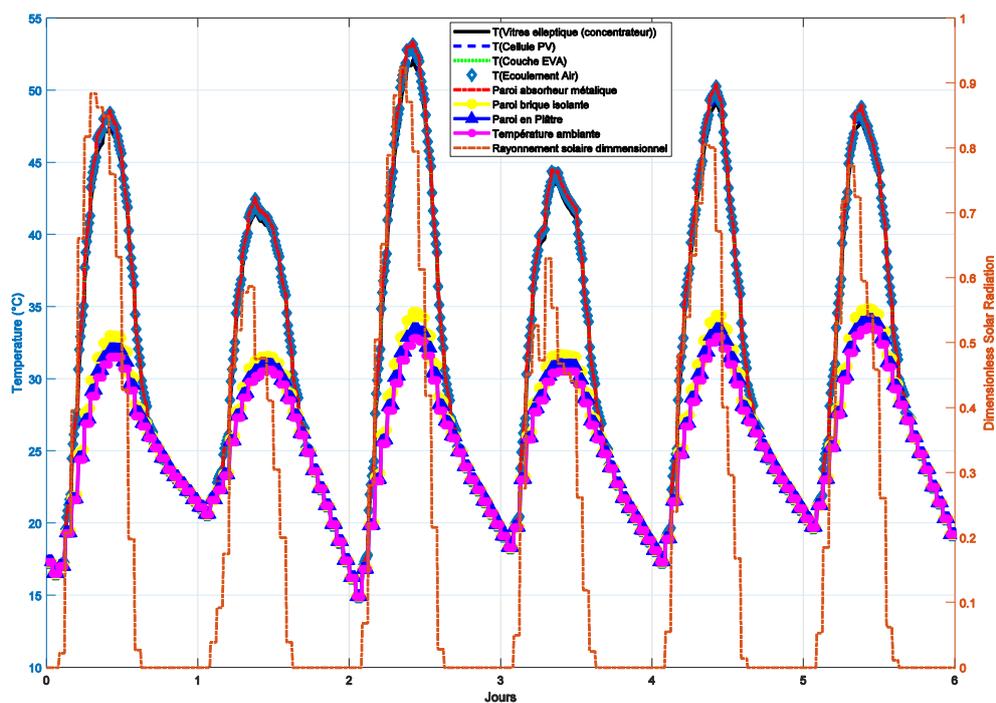


Figure 69: Profil de température de chaque couche du système prédits à l'aide du modèle d'ORRE

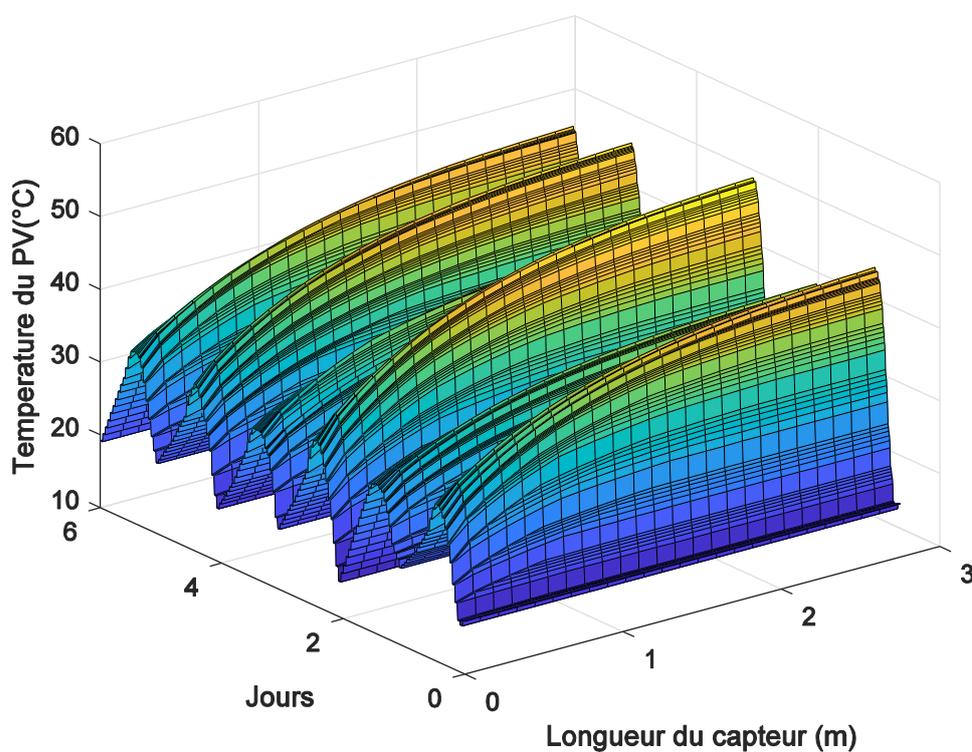


Figure 70: Profil de température du PV en fonction de la longueur de concentrateur en temps réel

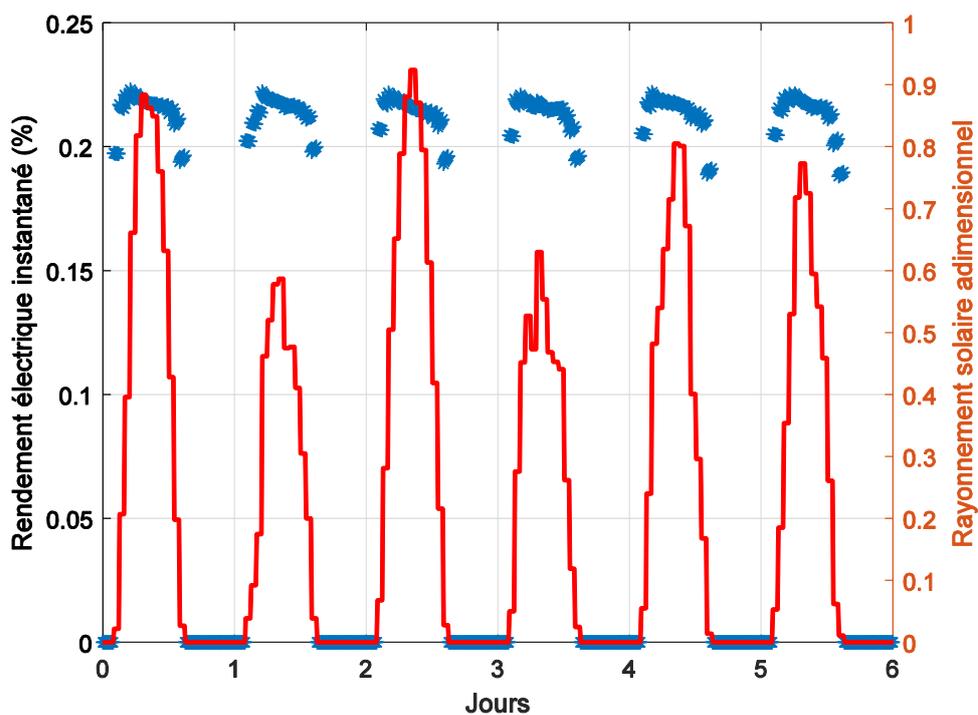


Figure 71: Rendement électrique instantané du système CPV/T

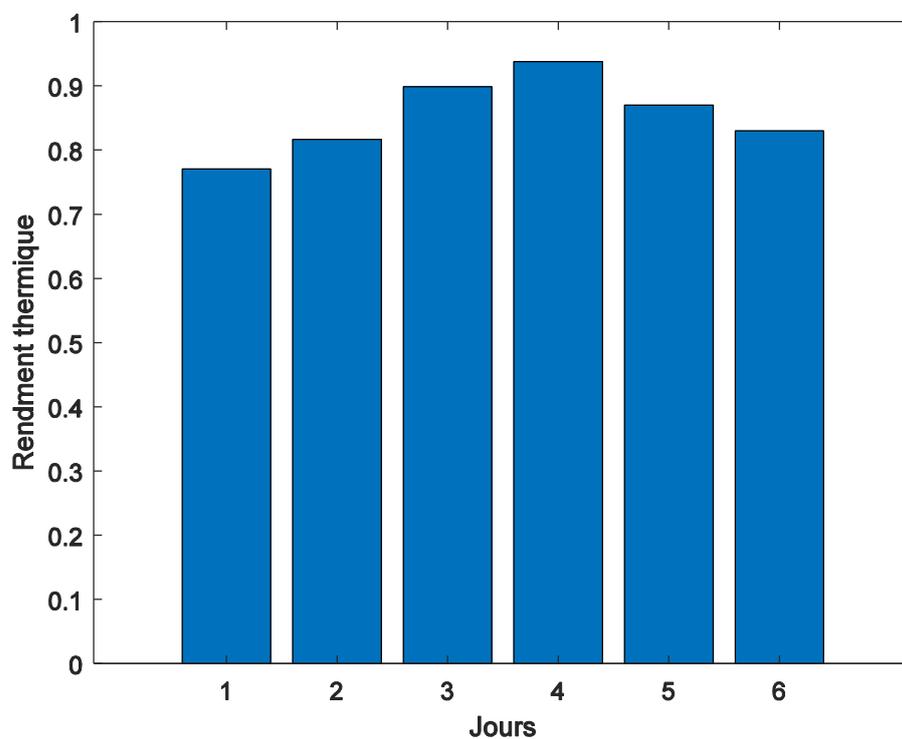


Figure 72: Rendement thermique journalier

4. Cas du couplage PV/T avec les MCP

Comme le cas des systèmes à concentration, l'incorporation des MCP aux bâtiments avec les systèmes solaire représente un cas de non-linéarité, en reprenant l'étude de cas de la partie Mur PV/T-Eau avec et sans MCP. Nous nous intéressons à déduire reformuler le problème en couplage avec MCP car il représente un comportement bilinéaire à travers la variation de sa capacité thermique.

$$\dot{\theta} = (A + C)\theta + (F\theta')^T u + B_1 \bar{G} \quad (84)$$

5. Bilan du chapitre

Dans ce chapitre, un modèle non-linéaire d'un CPV/T intégré dans une enveloppe du bâtiment est développé. Les résultats montrent une cohérence en fonction du rapport de concentration. En revanche, une étude d'optimisation des paramètres est primordiale afin de développer le modèle d'ORRE.

Chapitre V : Etude paramétrique des systèmes PV/T-Bâtiments.

1. Introduction

Deux types de paramètres ont été introduits dans le chapitre 2, les paramètres de conception et de contrôle. Dans ce chapitre une étude plus généralisée sur la sensibilité de l'intégration des PV/T au bâtiment.

La conception et le dimensionnement des systèmes PVT-Bât sont très importants pour la performance du bâtiment. L'air dans la conduite affecte le système, la surchauffe des PV diminue l'efficacité des PV mais également la surchauffe du bâtiment. Gan (2009) a utilisé une méthode de « *Computational Fluid Dynamics (CFD)* » pour évaluer l'effet de la lame d'air entre les modules photovoltaïques et l'enveloppe du bâtiment sur les performances du système en termes de température de la cellule pour une gamme de hauteurs de toit et de longueurs de panneaux. La détermination de l'espace d'air minimum requis pour minimiser la surchauffe de la PV. Initialement, les modèles de flux d'air et les images de la répartition de la température autour du module montrent que, si l'inclinaison du toit augmente, la vitesse de l'air augmente, mais la température PV diminue.

Divers chercheurs ont tenté de comprendre le transfert de chaleur et le flux d'air des systèmes PV intégrés aux façades de bâtiments. De nombreuses études ont abordé l'analyse des performances expérimentalement [90]–[93] ou numériquement [81], [94]–[96].

Les études peuvent également être classées entre ceux qui ont étudié les systèmes de ventilation forcée et ceux qui ont étudié les systèmes de ventilation naturelle. [97] ont passé en revue les différentes études réalisées sur les systèmes BIPV séparés en systèmes à ventilation naturelle et mécanique, ainsi que des études ayant analysé le système de manière expérimentale ou théorique. Il a été conclu que la plupart des chercheurs avaient étudié les systèmes à ventilation mécanique en raison de leur souplesse permettant d'ajuster le débit d'air dans le conduit afin d'évacuer l'air chauffé ou de l'entraîner dans le bâtiment. De plus, les systèmes de ventilation naturelle sont plus complexes en termes de

comportement du flux d'air dans le conduit, ce qui est difficile à prédire. [98] a réalisé des simulations pour un modèle BIPV et les résultats ont montré que la circulation de l'air derrière les modules PV dans un intervalle ventilé et les températures des cellules sont compliquées en raison de la compilation de l'espace interne de l'entrefer et de la dynamique du transfert de chaleur.

Dans ce chapitre, une étude d'optimisation paramétrique est conduite du système PV/T intégrés aux bâtiments. Tout d'abord, nous avons regroupé les paramètres de conception, comme prouvé dans le chapitre trois en nombre adimensionnel représenté par le nombre de Fourier, et les paramètres de contrôle représentés par le nombre Biot. Ensuite, une étude sur l'effet de ces paramètres a été menée pour les systèmes V/T à eau et à air intégré au bâtiment. L'avantage de cette méthode est de réduire le degré de liberté afin de réduire l'effort d'optimisation de la conception du système et de son contrôle en temps réel. Pour cette fin, en introduira d'abord la modélisation des conditions aux limites et l'effet des pertes thermiques, ensuite une étude détaillée sur les paramètres de l'écoulement interne. Enfin, l'étude de sensibilité des paramètres adimensionnels sur le système étudié.

2. Etude paramétrique des systèmes PV/Ts à air

2.1. Les conditions aux limites

2.1.1. Les pertes par convection

Comme décrit dans les équations du modèle au chapitre 3, les pertes par convection sont proportionnelles à la différence de température entre l'air et la température superficielle du module PV/T qui sont intégrés directement aux systèmes d'équation, on rappelle la définition de ce flux par l'équation :

$$q_{cv} = h_{cv}(T_1 - T_a) \quad (85)$$

La détermination du coefficient de convection h_{ext} dépend de la vitesse du vent et de l'emplacement du panneau et son intégration. Deux modes de convections libre et forcée sont évalués. Afin de procéder à la détermination du. Il est nécessaire de connaître les propriétés thermo-physique de la couche d'air adjacente au panneau, ces propriétés (conductivité, capacité thermique, masse volumique et viscosité cinématique) sont classiquement déterminés à partir de la température moyenne décrite par :

$$T = \frac{T_1 + T_a}{2} \quad (86)$$

Le coefficient h_{cv} dans le cas d'un capteur installé verticalement sur un mur est estimé par l'équation (87)

$$h_{cv} = 2.8 + 3.0 \times V \quad (87)$$

Avec V (m/s) est la vitesse du vent.

2.1.2. Les pertes par rayonnement

Le coefficient de pertes par les échanges radiatifs entre la surface des capteurs et le ciel est estimé par :

$$h_r = \frac{\varepsilon_s F_{s-ciel} \sigma (T_s^4 - T_{ciel}^4)}{(T_s - T_{ciel}) \left(\frac{1}{\varepsilon_s} + \frac{1}{\varepsilon_g} - 1 \right)} \quad (88)$$

2.2. Evaluation de l'écoulement d'air

2.2.1. Coefficient de convection

Afin de déterminer le régime de coefficient h par convection des corrélations de détermination du nombre de Nusselt ont été utilisé en fonction de type de fluide et de la configuration géométrique interne ainsi que le régime de l'écoulement, en supposant que l'écoulement est développé.

A titre d'exemple, le régime d'écoulement dans un anneau PV/T intégré verticalement dans une enveloppe, la procédure utilisée dans ce travail est basé sur un organigramme de conditionnement intégré au modèle afin de déterminer le régime d'écoulement, le nombre de Nusselt local est donnée par l'équation (91)

$$Nu(x) = f(Ra, Pr) \quad (89)$$

Le nombre de Nusselt moyenne est donné par :

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (90)$$

Avec le nombre de Rayleigh moyen est donné par :

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} Pr \quad (91)$$

La même procédure est étudiée en détail pour les autres types de capteurs.

2.3. Le rendement électrique

Comme définissait dans les chapitres précédents, le rendement électrique représente un paramètre important dans l'estimation des performances globales du système. Une corrélation linéarisée a été utilisée pour un panneau PV/T. La même corrélation linéaire est aussi utilisée pour un panneau CPV/T à basse concentration. Dans cette partie, une étude de sensibilisation sur les paramètres influençant le rendement électrique. La problématique consiste à trouver le maximum de la productivité en fonction des paramètres de conception et de contrôle, dans notre modèle développé, les deux paramètres sont respectivement traduits dans l'espace adimensionnelle réduit par les deux nombre Bi, Fo ou FoBi. Le rendement peut-être exprimé par une fonction de ces nombres.

$$\eta_e = f(T_c(C_p; D_p)) = f(\theta_c(Bi_i; Fo_i)) \quad (92)$$

avec $Fo_i \in [0, Fo_{\max}]$, $FoBi_i \in [0, FoBi_{\max}]$, $\eta_e \in [\eta_{emin}, \eta_{e0}]$, et $\eta_{th} \in [0, \eta_{th0}]$; $Bi_i \in [0, 0.1[$ sauf dans le cas bilinéaire où le nombre de biot représente le taux de du flux de convection par rapport à la conduction $Bi_{cv} \in [0, Bimax[$

2.3.1. Influence globale des paramètres Bi et Fo

Dans ce processus, nous avons procéder à l'étude de sensibilité des paramètres de conception Fo, et de contrôle Bi et FoBi par la méthode suivante :

Le choix des nombres de fourrier est limité entre le nombre minimale qui peut avoir, on admette que la valeur minimale de Fourier est de 0 (le nombre 0 signifie une très faible inertie ou un matériau hautement isolant), et la valeur maximale est choisie en fonction des matériaux intégrable dans la conception du système, dans le cas de ce travail, on a choisi le nombre 1000.

Le vecteur de nombres de Biot liée aux conditions aux limites est supposés réel dans le sous-domaine adimensionnel.

Le vecteur des nombres de Biot liés à l'écoulement du fluide sont supposés semi-réels dans le sous-domaine adimensionnel, ce vecteur dépend indirectement du débit de fluide et principalement du coefficient de convection, ainsi que les caractéristiques géométriques et thermiques du système, d'où on admet la décomposition suivante du nombre de Biot local liée à l'écoulement :

$$Bi(x) = Nu(x) \times \frac{e_i}{x} \times \frac{\lambda_{air}}{\lambda_i} \quad (93)$$

Le nombre de Biot globale est donc estimé en calculant l'intégrale de $Bi(x)$:

$$Bi = \frac{\lambda_{air} e_i}{\lambda_i L} \int_0^L \frac{Nu(x)}{x} \times dx \quad (94)$$

En reprenant l'exemple du concentrateur PV/T intégré verticalement dans une façade, l'analyse de sensibilité des paramètres de conception et de contrôle est fournie dans un premier temps par une représentation globale de la variation du rendement électrique en fonction de tous les nombres Fo et Bi existaient dans le modèle dans une période journalière typique (milieu d'une journée-type).

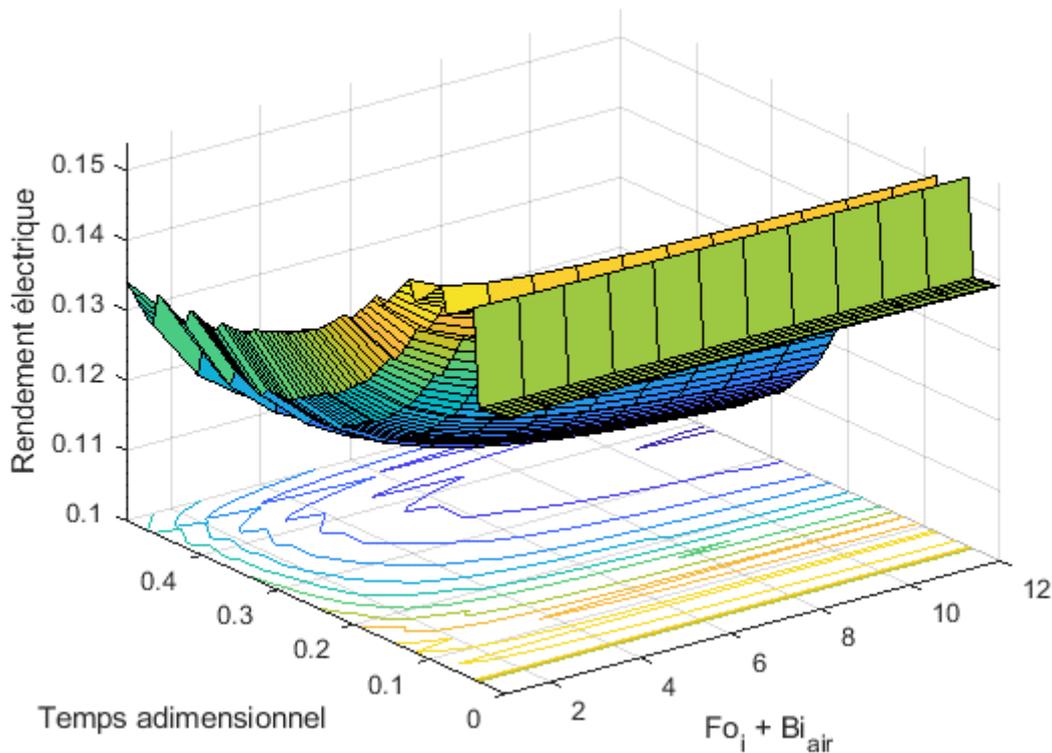


Figure 73: Représentation de la variation globale du rendement électrique en fonction des paramètres de conception et de contrôle du système qui varient simultanément dans une période journalière typique

La Figure 73 représente le rendement électrique en fonction des paramètres Fo et Bi lorsqu'ils varient simultanément en temps réel. Le résultat de cette figure montre l'influence globale du rendement électrique en augmentant simultanément les nombres de Fourier et de Biot. Il est évident que cette variation ne représente aucun sens physique, mais il permet dans un premier temps de déterminer une corrélation cohérente du rendement en fonction des paramètres intervenant en temps réel. Pour ce faire, il est indispensable d'étudier l'influence de chaque paramètre adimensionnel à part, nous avons procédé 13 simulations dynamiques afin d'investiguer la sensibilité des chaque paramètre.

2.3.2. Influence des nombres Fourier

A Biot constant, on étudie l'influence de nombre de Fourier pour chaque couche du système, le nombre de fourrier représente un paramètre qui intègre les paramètres de conception, tels que les caractéristiques thermo-physiques du système, et ses caractéristiques géométriques. Dans ce cas, 12 nombre de fourrier qui représentent chaque élément du système CPV/T sont analysés.

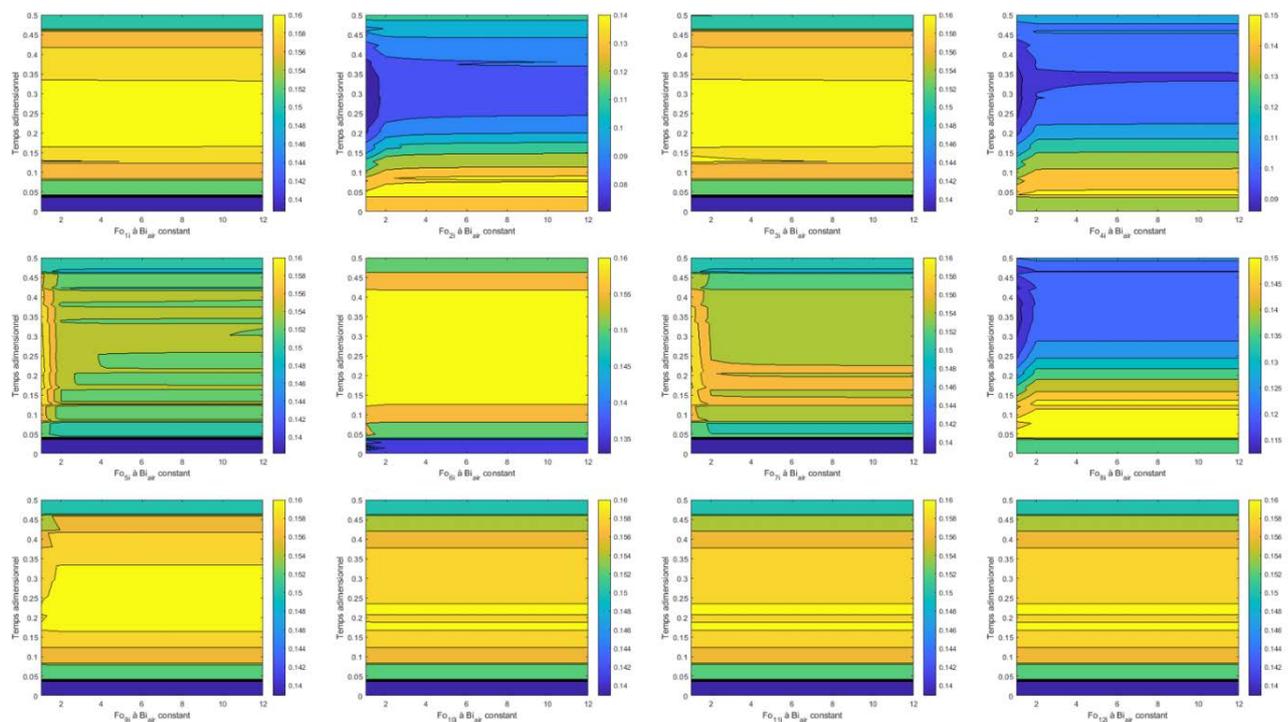


Figure 74: Influence des nombres Fo à Bi constant en temps réel sur le rendement électrique dans des périodes journalières typiques

La Figure 74 représente la variation du rendement électrique en fonction des nombre Fo à Bi constant. On constate généralement pour les nombres de Fourier impaires que le rendement électrique est moins sensible à Fo et le rendement peut atteindre jusqu'à 16% à faible nombre de Biot d'écoulement interne, sauf pour les nombre Fo_5 et Fo_7 tels que le nombre de Fourier est associé directement au fluide dont les termes d'advection sont influencé par la géométrie du système, par conséquent à la température de la cellule et son rendement. Cependant, le rendement électrique est fortement sensible aux nombres de Fo paires, mais avec un rendement maximal qui ne peut pas dépasser 15%. Cela est expliqué par le réseau des coefficients substitutifs sachant que les nombres impairs de Fo ici représentent le rapport de diffusion de la couche N par le rapport de stockage de la couche N+1, dans ce cas, toute augmentation de Fo engendre une augmentation de la diffusion thermique davantage ce qui explique l'augmentation de la température des couches, donc de la cellule PV qui cause une faible valeur du rendement électrique.

2.3.3. Influence du nombre Biot

La variation du nombre Biot représente la variation de la convection par rapport à la conduction du milieu solide adjacent. Dans cette partie, l'étude de sensibilité des nombres Biu_1 et Biu_2 sont étudiés. Les nombres Biu_1 et Biu_2 représentent respectivement les paramètres de contrôle de l'écoulement interne, liées à la partie en contact avec les couches PV, et la partie liées à l'absorbeur thermique. La Figure 75 représente la variation du rendement électrique en fonction du paramètre de contrôle liée au contact du fluide en écoulement interne avec le milieu PV en gardant tous les autres paramètres dans des valeurs constantes. On constate que le rendement thermique est insensible à la convection en contact avec le milieu PV, ceci est dû aux caractéristiques thermiques de la couche PV.

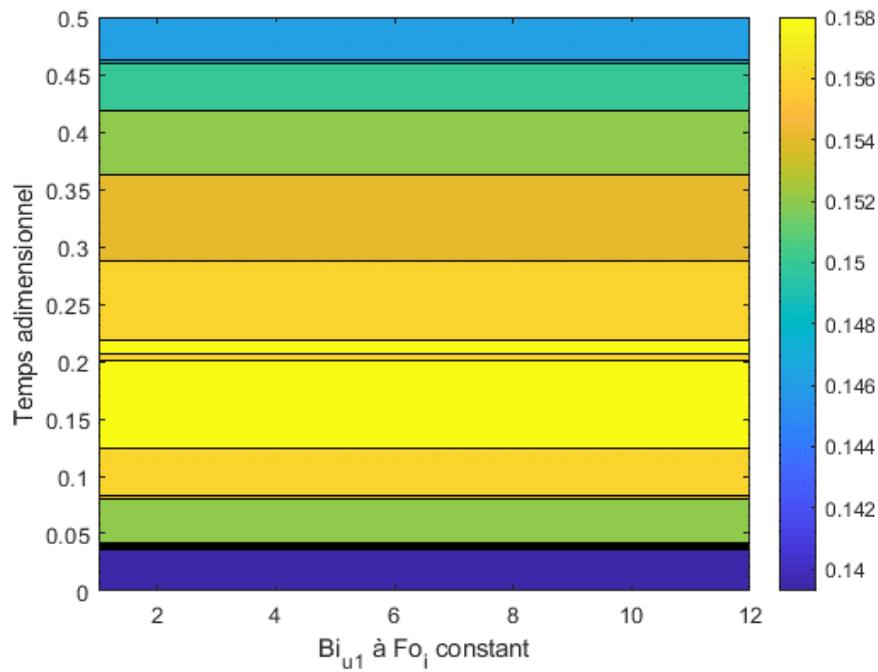


Figure 75: Profil du rendement électrique en fonction du nombre de Bi_{u1} à Fo_i constants en temps réel

La Figure 76 représente la variation du rendement électrique en fonction du paramètre de contrôle liée au contact du fluide en écoulement interne avec le milieu absorbeur en gardant tous les autres paramètres dans des valeurs constantes. On constate que le rendement électrique est fortement lié aux caractéristiques de l'absorbeur et le système peut être optimisé en fonction de ce paramètre.

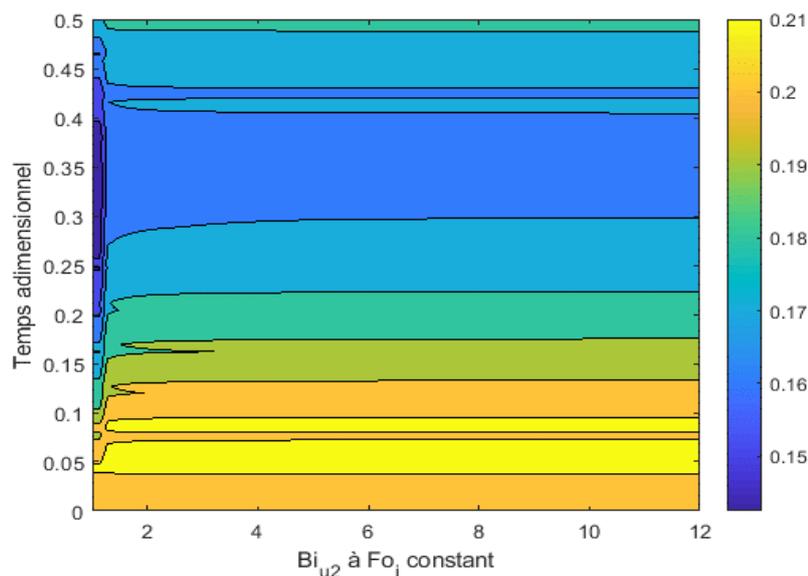


Figure 76: Profil du rendement électrique en fonction du nombre de Bi_{u2} à Fo_i constants en temps réel

2.4. Le rendement thermique journalier

Le rendement thermique journalier est sensible aux paramètres de conception et de contrôle, pour étudier cette sensibilité on représente la variation du rendement par rapport à la variation des nombre de Bi_{ui} qui représente la variation du paramètre de contrôle de l'advection par rapport à la conduction dans les couches solides adjacentes, $FoBi_i$ qui représente les paramètres hybrides de conception et de contrôle de différentes éléments dans le système CPV/T. afin d'investiguer le comportement globale de la sensibilité des paramètres, une variation du rendement thermique en fonction des variations simultanées des nombres $FoBi_i$ est représenté par la Figure 77. Contrairement au rendement électrique, cette figure montre que les performances thermiques augmentent linéairement en augmentant les paramètres hybrides $FoBi_i$ jusqu'à une valeur maximale du rendement thermique de 0.6. En revanche, cette variation linéaire, ne peut pas fournir une explication suffisante pour la sensibilité des paramètres de conception et de contrôle vu l'absence d'un sens physique convaincu. Pour résoudre ce problème, l'étude de sensibilité de chaque paramètre adimensionnel est effectuée.

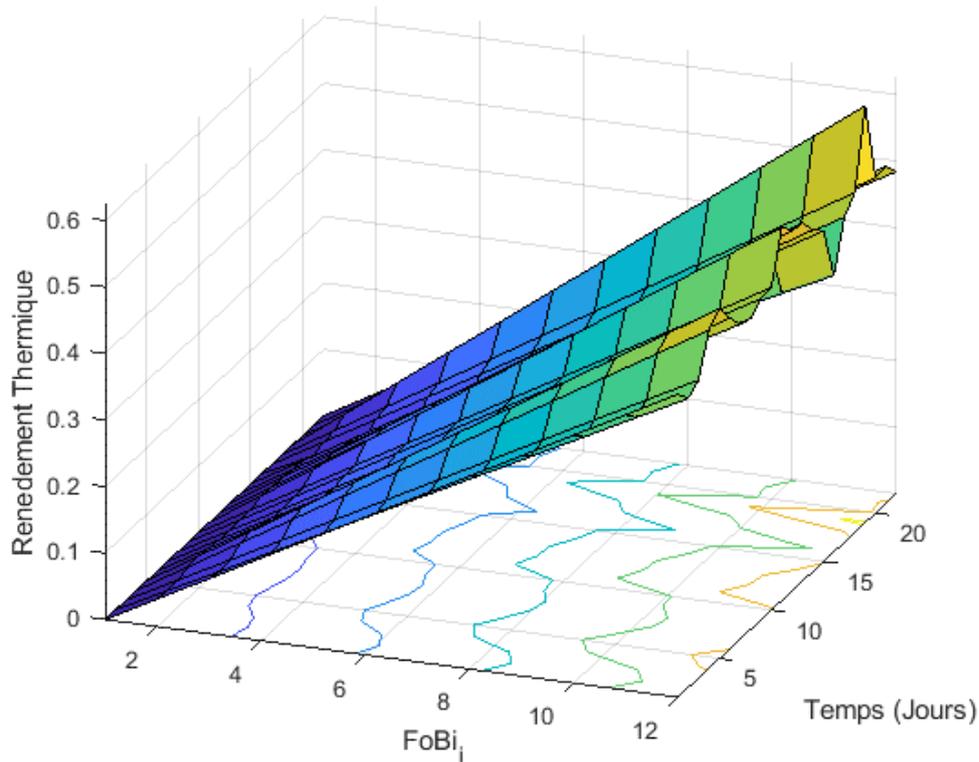


Figure 77: Représentation de la variation globale du rendement thermique journalier en fonction des paramètres de conception et de contrôle du système qui varient simultanément dans une période journalière typique

2.4.1. Influence du nombre Biot

La variation du nombre Biot représente la variation de la convection par rapport à la conduction du milieu solide adjacent. Dans cette partie, l'étude de sensibilité des nombres Biu_1 et Biu_2 sont étudiés. Les nombres Biu_1 et Biu_2 représentent respectivement les paramètres de contrôle de l'écoulement interne, liées à la partie en contact avec les couches PV, et la partie liées à l'absorbeur thermique. Afin de simplifier le problème, on regroupe Biu_1 et Biu_2 dans un seul nombre unique de Bi . La Figure 78 représente le profil du rendement thermique journalier en fonction de l'écoulement représenté par le nombre Bi . On constate que le rendement thermique augmente en augmentant le paramètre de contrôle Bi , ceci est expliqué par le fait d'augmenter davantage le coefficient h de l'écoulement par rapport à l'effet de la conduction.

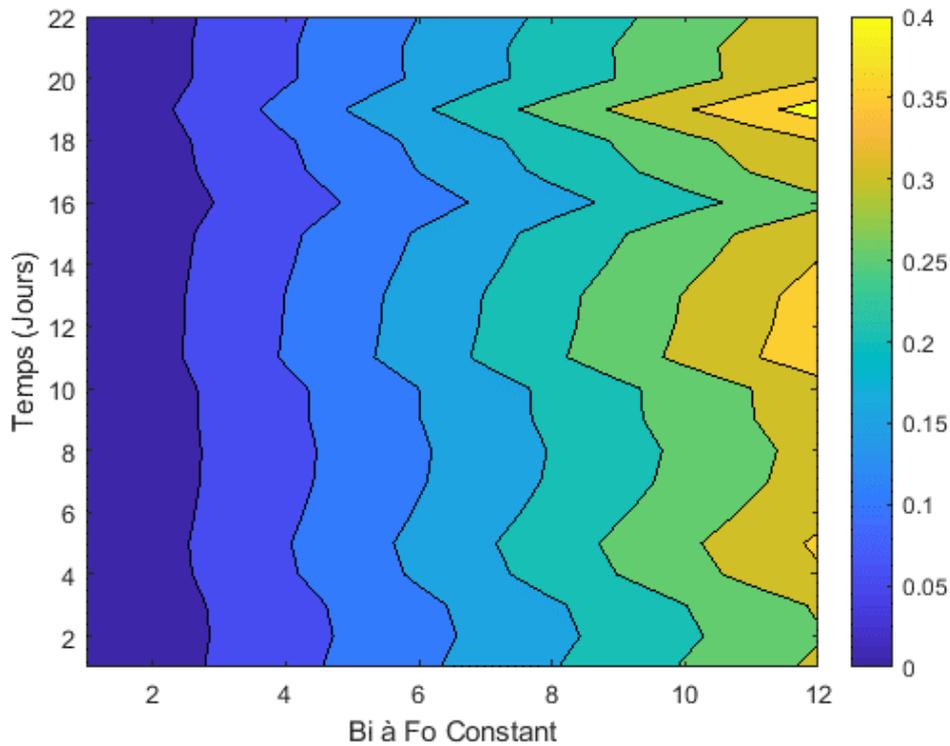


Figure 78: Profil du rendement thermique en fonction de la variation du nombre Biot en gardant les coefficients Fo constants en temps réel

2.4.2. Influence du nombre Fourier

A Biot constant, on étudie l'influence de nombre de Fourier pour chaque couche du système, le nombre de fourrier représente un regroupement des paramètres de conception, tels que les caractéristiques thermo-physiques du système, et ses caractéristiques géométriques. Dans ce cas, 12 nombre de fourrier qui représentent chaque élément du système CPV/T ont été analysés. Comme illustré par la Figure 79, on constate que la sensibilité du rendement thermique varie dispersement en fonction de chaque élément, mais il manifeste un comportement constant en fonction du nombre de Fourier dans les différents éléments sauf dans le cas de la première et la dernière couche qui sont en contact avec l'environnement du système. Dans ce cas, le rendement thermique diminue au fur et à mesure à l'augmentation du nombre Fo de la couche du verre de concentrateur ce qui est expliqué par l'augmentation de la diffusibilité dans le matériau par rapport à sa stockabilité qui permet l'augmentation des pertes thermiques vers le milieu ambiant. Idem pour la dernière couche, on constate que

les performances thermiques diminuent avec l'augmentation des caractéristiques de la diffusivité dans le milieu du plâtre à l'intérieur du bâtiment.

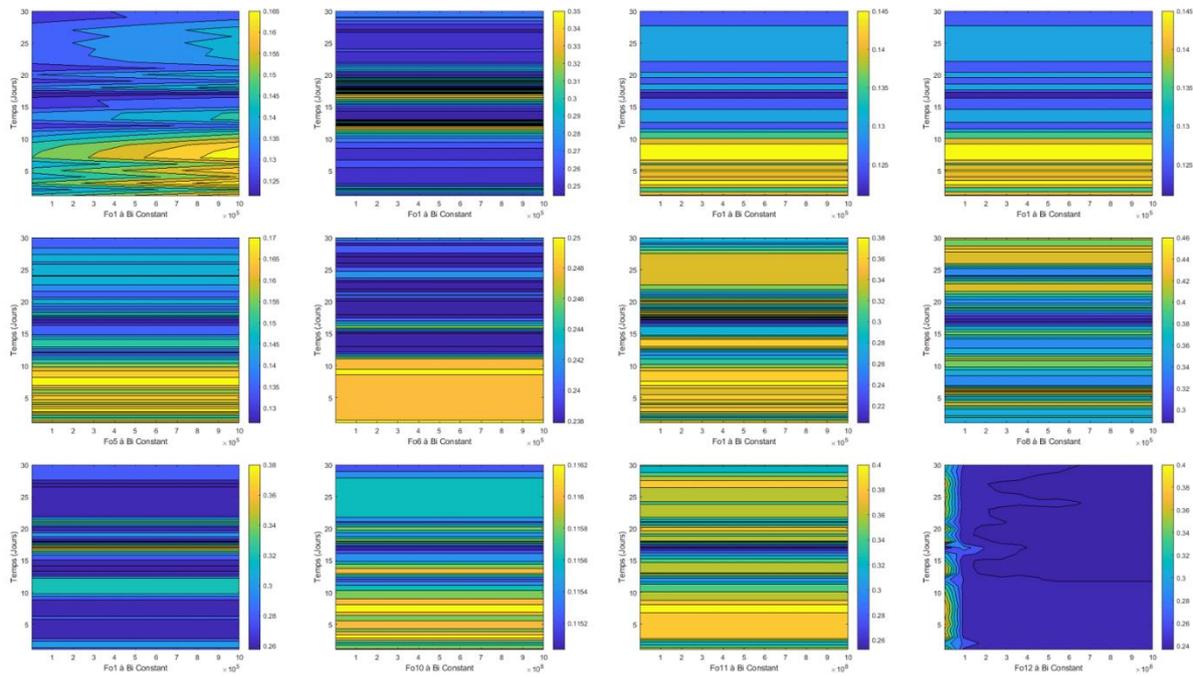


Figure 79: Influence des nombres Fo à Bi constant en temps réel sur le rendement thermique journalier dans des périodes journalières typiques

3. Etude paramétrique des systèmes PV/T à eau

Idem pour le système PV/T à eau, l'approche d'étude de sensibilité est développée afin de quantifier la variation de la rentabilité par rapport au choix des paramètres de conception et de contrôle.

Le système choisi dans cette étude est un capteur PV/T à eau développé dans le chapitre trois et représenté par la Figure 21 . Dans ce système deux types de paramètres sont également évalués qui sont les nombres Fo_i de chaque couche du système, ainsi que deux nombres de contrôle Bi_{air} et Bi_{eau} liée aux écoulements internes de la lame d'air (supposée en convection entre l'absorbeur métallique et la couche PV semi-transparente) et celui du fluide caloporteur qui de l'eau circulant à l'intérieur des tubes. Afin de mener une étude de sensibilité, l'influence de ces paramètres sur les rendements électrique et thermique ont été étudiés.

3.1. Le rendement électrique

Le fonctionnement des systèmes PV/T à eau manifeste un intérêt de refroidissement de la composante PV. L'influence de dites paramètre Bi_{air} et Bi_{eau} sur le rendement électrique sont étudiés dans cette partie.

3.1.1. Influence du paramètre Biot

Le nombre de Bi_{eau} représente le contrôle de transfert de chaleur dans le fluide secondaire (l'eau). la Figure 80 illustre la variation des performances électrique en fonction du Bi_{eau} , on constate pour des valeurs de Bi_{eau} proche de 0. Le rendement électrique diminuera jusqu'à une valeur de 13,2% au cours des périodes éclairées. Et augmentera pour des nombre de Bi_{eau} proche de 0.02 où le rendement commence à diminuer en fonction de Bi_{eau} .

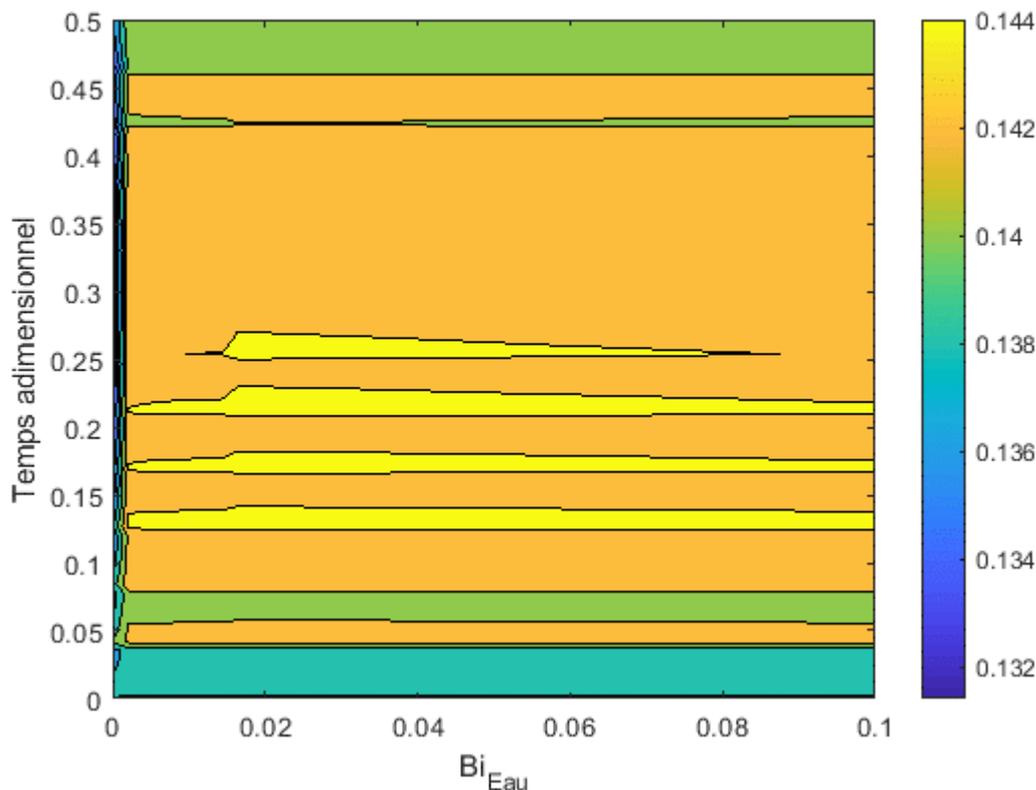


Figure 80: influence du nombre de Biot de l'eau sur le rendement électrique en temps réel

La Figure 81 illustre la variation du profil du rendement électrique en fonction du nombre Bi_{air} . Ce nombre représente le contrôle de transfert de chaleur de la lame d'air. Si $Bi_{air} = 0$ le transfert de chaleur par convection est nul. Et si $Bi_{air} > 0$ ceci implique l'existence du phénomène de convection entre la couche

PV et l'absorbeur. Dans cette figure on remarque que le rendement électrique reste pratiquement constant en fonction du Bi_{air} pour des valeurs entre 13.7% et 14% jusqu'à des valeurs de Bi_{air} proches de 0.1 où le rendement augmentera jusqu'à 14.4%, on conclut que le rendement est influencé par le refroidissement directe des cellules PV lorsque la part du phénomène de la convection est proche 10% de la conduction au cours de la composante PV.

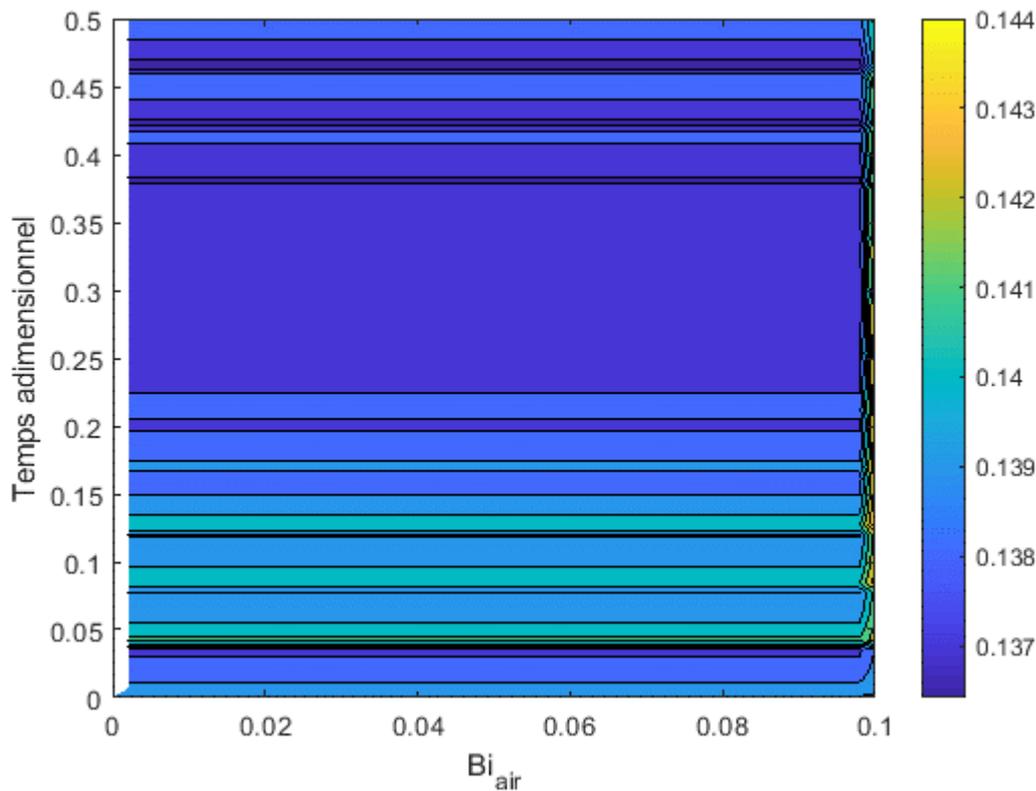


Figure 81: Influence du nombre de Biot air sur le rendement électrique

Afin de conclure un lien entre le paramètre de contrôle de la lame d'air Bi_{air} et le paramètre de contrôle de l'écoulement du fluide caloporteur Bi_{eau} , la Figure 82 représente le profil du rendement électrique en fonction de Bi_{air} et Bi_{eau} . On constate que le rendement électrique reste constant pour le domaine adimensionnel $Bi_{air} \times Bi_{eau} \in]0,0.1[\times]0,0.1[$ et augmente significativement pour les valeurs de Bi_{eau} proche de 0,1 $\forall Bi_{air} \in]0,0.1[$ et $\forall \tau \in]\tau_0, \tau_1[$.

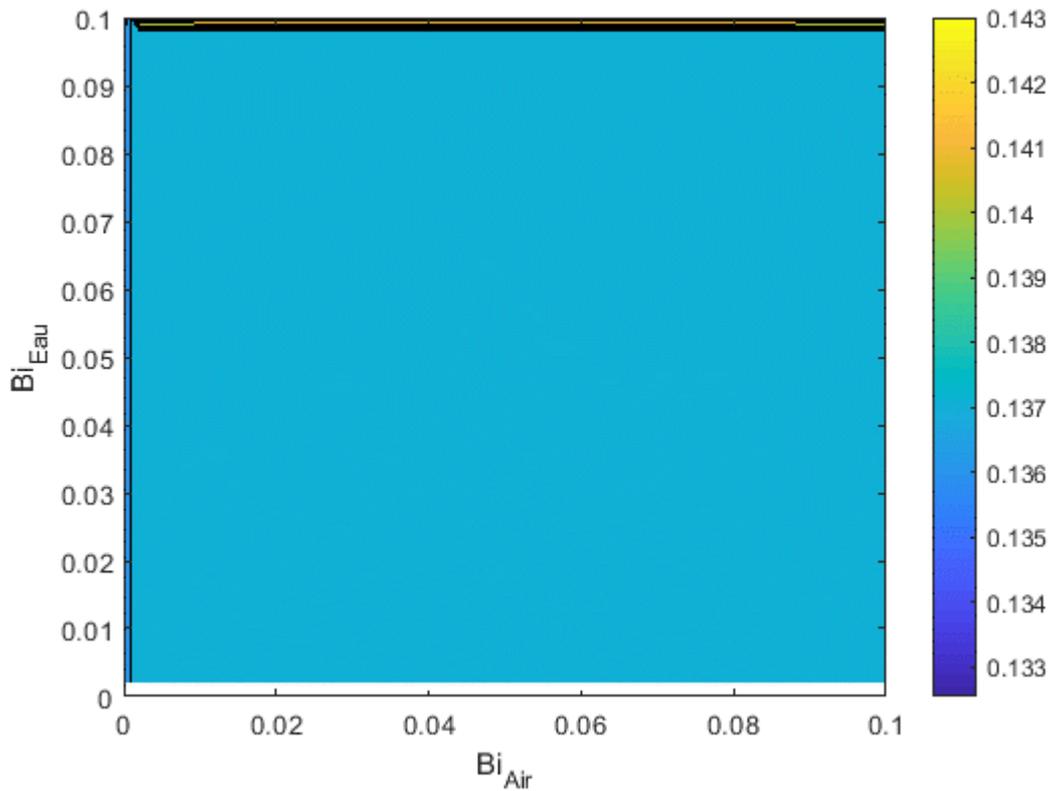


Figure 82: Profil du rendement électrique en fonction du Bi_{Air} et de Bi_{eau}

3.2. Le rendement thermique

Le productible thermique du système PV/T-Eau peut varier simultanément en fonction des paramètres de contrôle et de conception. Afin d'investiguer la sensibilité de ces paramètres, une étude sur l'influence de la lame d'air et de l'écoulement interne du fluide caloporteur est étudié, la Figure 83 représente la variation du rendement thermique en fonction de la variation simultanée de $FoBi_{air}$ et $FoBi_w$. Il est constaté que l'apport de convection peut améliorer significativement le rendement thermique du système.

3.2.1. Influence des paramètres $FoBi_w$

Le rendement thermique journalier augmente en fonction du nombre $FoBi_w$ significativement jusqu'à une valeur de maximale 60% par rapport à d'autres paramètres constants.

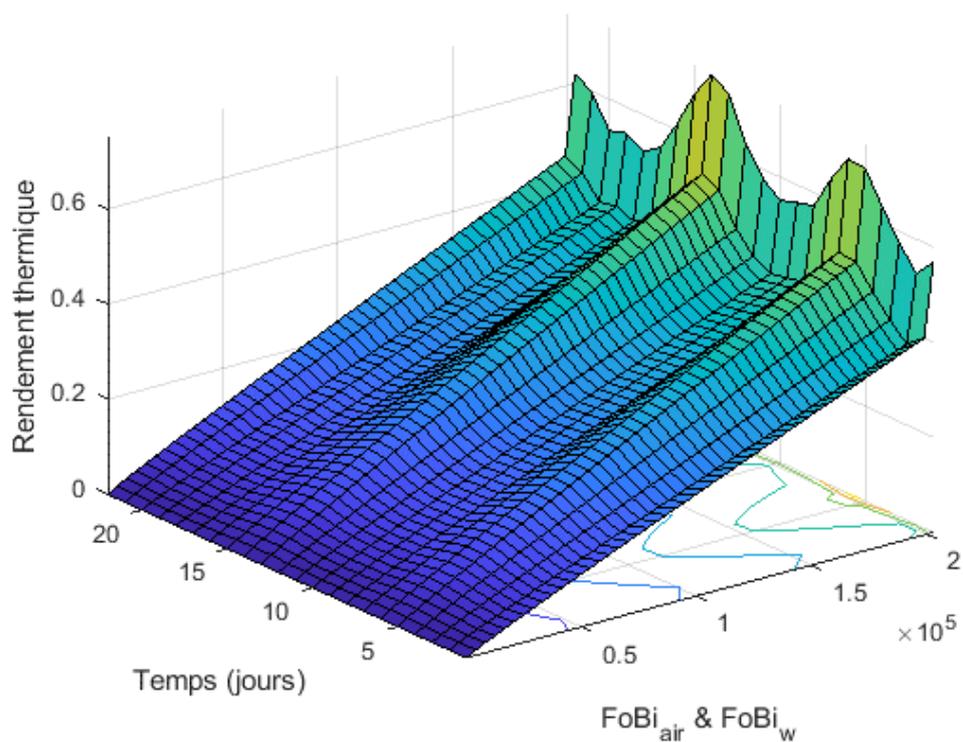


Figure 83: variation du rendement thermique journalier en fonction des paramètres de contrôle de l'écoulement interne du système

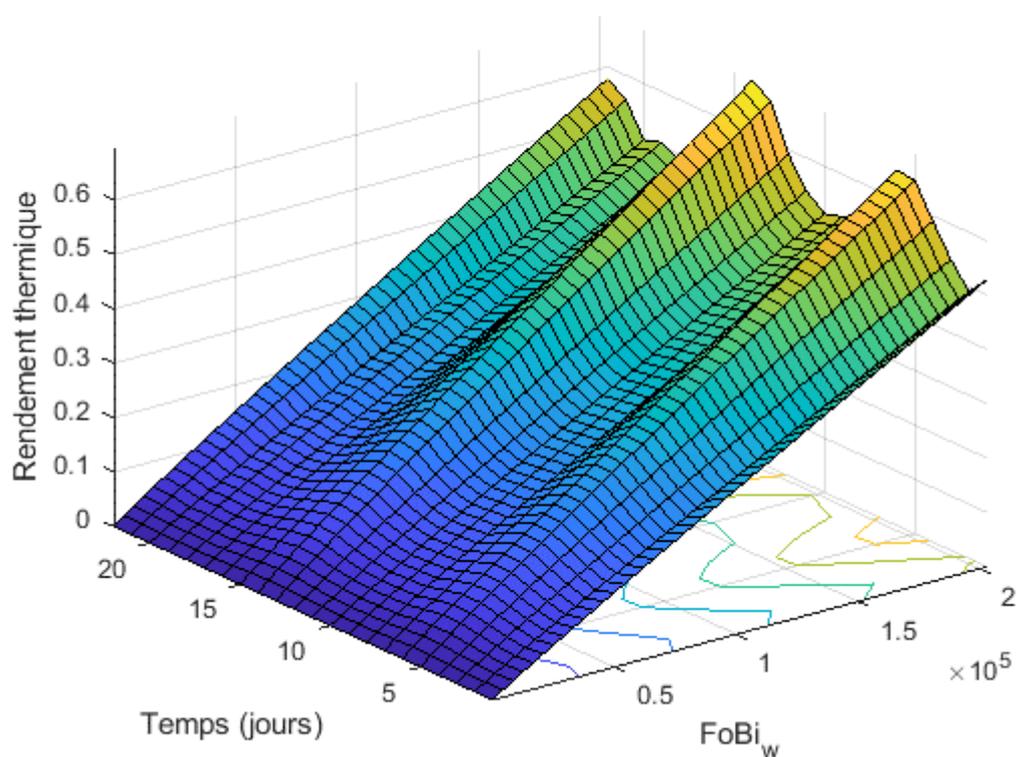


Figure 84: variation du rendement thermique journalier en fonction des paramètres de contrôle de la lame d'air et de l'écoulement interne du système

3.2.2. Influences des nombres Fourier

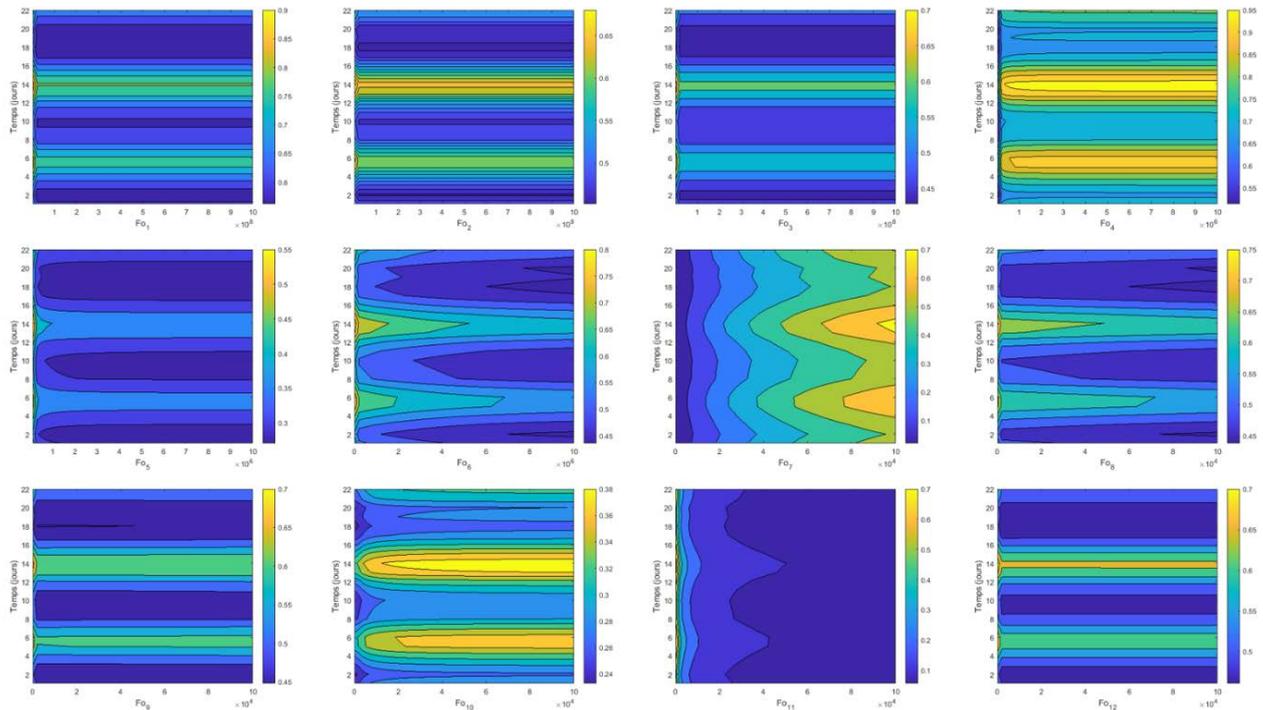


Figure 85: Influence des nombres Fo à Bi constant en temps réel sur le rendement thermique journalier dans des périodes journalières typiques

L'influence des nombres de Fourier sur le rendement thermique journalier est répartie selon chaque composante. Comme est observé en général le rendement augment en fonction du nombre de Fourier, ceci est expliqué par le transfert thermique important lors de l'augmentation du nombre de Fourier.

4. Bilan du chapitre

Dans ce chapitre une analyse de sensibilité des paramètres de conception et de contrôle est étudiée, basée sur une approche de réduction dimensionnelle. Il est conclu que le rendement électrique est plus sensible à l'augmentation des paramètres de contrôle qu'aux paramètres de conception. De même, le rendement thermique journalier est amélioré linéairement en fonction des paramètres de contrôle et de conception. En revanche, l'étude de sensibilité reste insuffisante par rapport aux nombre des fonctions objectifs du système, d'où la nécessité d'élargir l'étude paramétrique à une étude d'optimisation multicritère.

Chapitre VI : Optimisation multi-objectif des PV/T-Bât.

1. Introduction

Les études d'optimisation paramétrique restent limitées à cause de la résolution mono-objectif du problème d'optimisation, alors qu'en générale les capteurs PV/T manifestent un comportement hybride de nature contradictoire. Comme le représente ce travail, trois fonctions objectifs sont présentées afin d'optimiser la production électrique et thermique du système selon une variété des paramètres clés. Les trois dites fonctions objectifs sont le rendement électrique, le rendement thermique et les pertes de charge du fluide caloporteur qui est l'air. Ce chapitre est organisé comme suit ; dans un premier temps, on représente l'ensemble des équations différentielles qui traduisent le comportement thermique d'un capteur PV/T à air, ensuite une résolution numérique est proposée de l'ensemble du modèle mathématique, enfin l'ensemble des solutions représente le nombre de population d'entrée du modèle d'optimisation proposé par l'algorithme NSGA-II [99].

2. Optimisation multicritères des systèmes PVT-air

Les simulations numériques basées sur l'analyse thermique du système PV/T et l'évaluation des performances électriques ne suffisent pas pour la détermination des paramètres optimaux du système. L'optimisation multi-objectifs nécessite la satisfaction de plusieurs objectifs contradictoires en même temps, l'ensemble des solutions est nommé par l'ensemble optimale Pareto, Les algorithmes évolutionnaires sont employés pour la résolution de plusieurs problèmes d'optimisation de nos jours grâce à leurs efficacités à la résolution des problèmes d'optimisation par rapport à des techniques classiques à savoir « *weighted sum method* », « *goal programming* », « *min-max method* »...etc.

Cette partie décrit la démarche suivie pour résoudre le problème en se basant sur un algorithme évolutionnaire.

- *L'algorithme NSGA-II*

L'optimisation multi-objectif est utilisée pour minimiser ou maximiser deux ou plus de fonctions objectifs contradictoires. On exprime mathématiquement le problème d'optimisation par :

Minimiser/Maximiser $f_m(x)$, $m = 1, 2, \dots, M$;

Sujet à $g_j(x) \geq 0$, $j = 1, 2, \dots, J$;

$h_k(x) = 0$, $k = 1, 2, \dots, K$;

$x_i^{(L)} \leq x \leq x_i^{(U)}$, $i = 1, 2, \dots, n$;

La solution optimale est un vecteur $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$

- **Application pour un capteur hybride à air PV/T**

Le défi d'optimisation de la production de chaleur et d'électricité constitue un dilemme de plusieurs paramètres. On propose une optimisation multicritère de trois fonctions majeures qui contient des paramètres physiques du système. Cependant, les performances du système PV/T sont étudiées en utilisant l'algorithme évolutionnaire méta-heuristique élitiste dite NSGA-II développé par [99].

$$f_1(\bar{x}) = -\eta_r[1 - \beta(T_c - T_r)] + \gamma \log G = -\eta_e \quad (95)$$

$$f_2(\bar{x}) = -\frac{\dot{m}_f C_f (T_{fo} - T_{fi})}{G} = -\eta_t \quad (96)$$

$$f_3(\bar{x}) = -\frac{\dot{m}_f \Delta P}{\rho \eta_{pu}} \quad (97)$$

Les pertes de charges peuvent être modélisées selon la nature de l'écoulement à prévoir à l'intérieur de l'échangeur. η_{pu} est le rendement de la pompe de circulation qui est supposé de 75%, \dot{m}_f est le débit massique du fluide de récupération de la chaleur.

Ψ est une fonction calculée à partir de nombre de Reynolds, pour les écoulements laminaires, transitoire et turbulents, ξ est la somme des résistances hydrauliques locales.

$$\Delta P = \left[\frac{\Psi(\text{Re})L_t}{D_h} + \xi \right] \rho_f V_f^2 / 2 \quad (98)$$

Les variables de décision sont représentés par le Tableau 6: Les paramètres de conception du système utilisés pour l'optimisation qui sont les paramètres les plus influençant le fonctionnement du système PV/T, qui sont le coefficient géométrique α qui représente le rapport entre la profondeur du canal et sa largeur, la longueur du capteur, le débit massique ainsi que le coefficient de transfert de chaleur par convection moyen, et le coefficient de dilatation thermique β qui dépend de la nature des cellules PV.

Tableau 6: Les paramètres de conception du système utilisés pour l'optimisation

Figure 86: Paramètre	Sous-paramètre	Valeur
α	W (mm)	3 à 10
	H (mm)	10 à 700
L	L (m)	0.5 à 3.5
\dot{m}	D_h (m)	0.5 à 10
	v (m/s)	1 à 14
h_{cv}	h_{cv} (W/m ² .K)	6.1 à 24
Technologie (β)		0.04 0.0048

3. Résultats et discussions

Après les résultats obtenus par le modèle mathématique, une deuxième simulation est effectuée sur les paramètres cités au Tableau 4, une matrice de 8 dimensions est générée afin d'optimiser les trois fonctions objectifs imposées.

Dans un premier temps, on a obtenu les résultats de modélisation du système, la Figure 87 illustre un exemple de résultat de simulation et montre la variation des températures de chaque couche du capteur en fonction du temps pendant les deux premières jours de Janvier avec un faible rayonnement représenté pour les deux journées sur la même courbe, la température de l'entrée d'air qui est supposée égale à la température ambiante, la température de la sortie d'air pour une Longueur L=0.5m, ainsi que le rayonnement solaire globale G.

La Figure 88 montre l'évolution de la température d'air en fonction de la longueur et du temps pour une longueur du capteur PV/T L=1 m, cette variation représente une légère augmentation en fonction de la longueur, c'est pour cette raison, notre étude d'optimisation s'étaler sur des longueurs plus importantes.

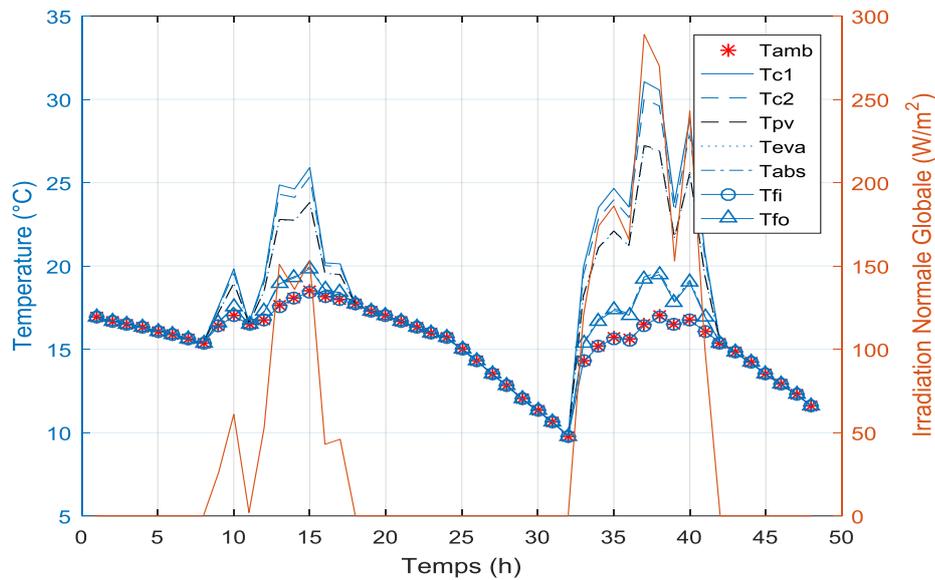


Figure 87: Variation de la température du système en fonction du temps, et la variation de flux solaire globale G

Dans un deuxième temps, après l'étude d'optimisation, le tableau 3 montre les résultats obtenus par l'algorithme NSGA-II, le nombre de population choisi est de 50, et le nombre de génération est de 40. Le résultat du modèle d'optimisation révèle que la température de la cellule reste maintenue à 25°C pour les jours chauds. On a conclu dans cette étude que 6 solutions candidats d'optimisation selon les variables choisis, comme on a constaté que pour une longueur de 2.65 m et une technologie d'un panneau PV monocristallin représente le meilleur rendement avec une puissance optimale. En revanche, la présente étude n'inclue pas la simulation de tous les jours du mois et ne représente pas une validation avec un état réel qui fera l'objet de prochains travaux.

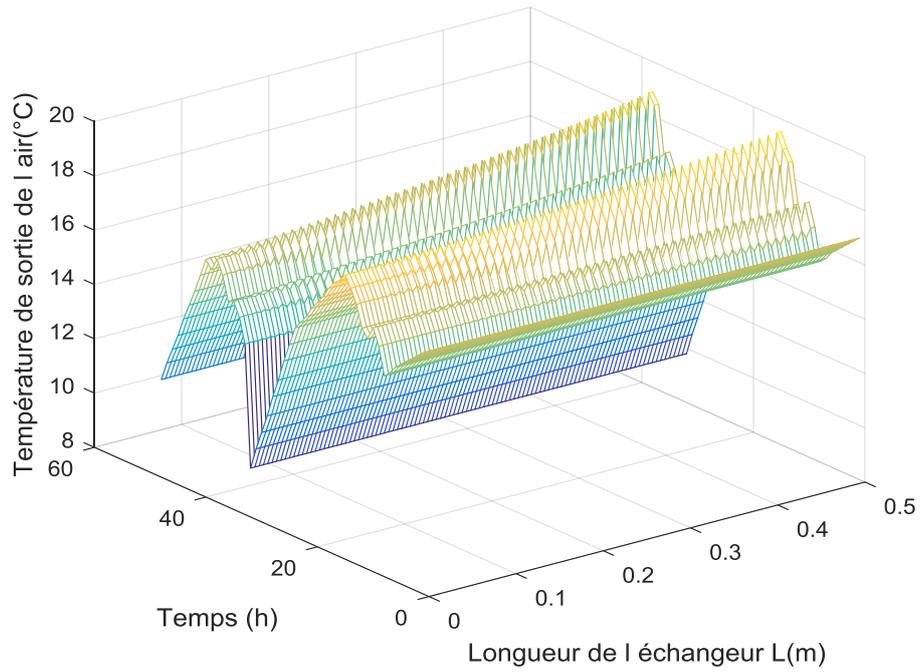


Figure 88: Variation de la température de l'air chauffé en fonction du temps et de la longueur de la conduite

Tableau 7: Les différentes valeurs sélectionnées à partir du modèle d'optimisation NSGA-II

\dot{m}_{air}	L	H/W	β	η_e	η_t	$f_3(\bar{x})$
(kg/s)	(m)					(W)
0.08	0.5	0.02	0.0045	0.14	0.32	0.18
0.12	0.7	0.06	0.0048	0.18	0.35	2.14
0.17	1	1.97	0.0045	0.16	0.38	3.12
2.1	1.2	0.8	0.0043	0.19	0.30	8.2
2.9	0.8	1.9	0.0045	0.22	0.34	8.4
5.2	2.65	0.8	0.0048	0.15	0.42	12.1

4. Bilan du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons présenté une optimisation multi-objectifs d'un capteur hybride PV/T à l'aide d'un algorithme génétique NSGA-II. Les paramètres de conception du capteur PV/T sont choisis, le débit massique, la géométrie de la conduite, la technologie du module PV. Les fonctions objectifs représentent le rendement électrique, le rendement thermique ainsi que la puissance de circulation de l'air. Les résultats présentés montrent la faisabilité de la méthode pour optimiser la production énergétique des panneaux PV/T hybrides. En revanche, il est envisageable d'élargir notre étude en prenant en compte les différentes *scénarios* possibles de conditions climatiques et en fonction de la fluctuation des besoins en énergie aux bâtiments.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, une stratégie de modélisation, de simulation dynamique et d'optimisation des systèmes PV/T intégrés aux bâtiments a été développée. La méthode de modélisation d'ORRE permet de prédire les performances énergétiques globales en temps réel. La stratégie d'optimisation permet de déterminer les valeurs optimales des paramètres adimensionnels, mis en jeu, à savoir les paramètres de contrôle et de conception. Comme le comportement physique des systèmes étudiés manifeste un comportement contradictoire, la stratégie d'optimisation multicritères, utilisant l'algorithme NSGA-II, a été adoptée pour résoudre le conflit d'intérêt des flux énergétiques. En outre, le travail effectué ouvre des nouvelles perspectives afin d'élargir l'utilisation du modèle d'ORRE à d'autres systèmes énergétiques intégrés aux bâtiments, en introduisant des phénomènes mécaniques afin d'améliorer la précision du modèle de simulation. Le modèle développé permet également de concevoir des algorithmes de contrôle et de gestion en temps réel des différents flux intervenant dans le système ainsi que l'introduction de nouvelles conceptions.

Les principaux résultats obtenus dans le présent travail peuvent être récapitulés comme suit :

- Le modèle d'ordre réduit en représentation d'état constitue une approche simple et simplifiée de modélisation. Il a été prouvé que le modèle est applicable et généralisable à plusieurs configurations géométriques des systèmes PV/T. Il permet de simuler le comportement (thermique et électrique) en temps réel ;
- L'adimensionnalisation a permis d'identifier les paramètres adimensionnels mise-en jeu. Une telle démarche permet la définition d'une stratégie de contrôle, ainsi qu'une meilleure optimisation de la conception et du fonctionnement des installations ;

- Le modèle bilinéaire développé adapté au comportement non-linéaire du système PV/T à concentration a été mis en valeur afin de quantifier la non-linéarité du système et simuler au mieux son comportement global ;
- Le rendement électrique est plus sensible à l'augmentation des paramètres de contrôle qu'aux paramètres de conception ;
- le rendement thermique journalier est amélioré linéairement en fonction des paramètres de contrôle et de conception ;
- Il est difficile de conclure des corrélations empiriques sans faire appel à une méthode d'identification bien définie.

D'après les conclusions tirées de ce mémoire, il a été envisagé d'affiner le modèle d'OREE proposé en intégrant le comportement mécanique du fluide caloporteur dans le système, et d'établir des corrélations de fonctions objectifs, telles que les rendements thermique et électrique pour faciliter l'optimisation des systèmes PV/T et leurs intégrations aux bâtiments. De plus, le modèle d'ORRE est adapté pour le contrôle des systèmes PV/T-Bât en fonction des paramètres externes et de l'état du système lui-même. Ainsi, des algorithmes de contrôle robustes sont envisageables pour ce type d'application. Enfin, malgré les qualités de simplification et de flexibilité du modèle de simulation et d'optimisation développé, il est toujours nécessaire d'accompagner cette étude par une comparaison avec les résultats expérimentaux sur des prototypes réels afin de mieux affiner ce modèle et réduire les erreurs dues aux différents paramètres intervenants.

Références bibliographiques

- [1] International Energy Agency, Éd., *Transition to sustainable buildings: strategies and opportunities to 2050*. Paris: IEA Publ, 2013.
- [2] J. Newman, « Energy labels and standards », 2000.
- [3] A. Stefanović, M. Bojić, et D. Gordić, « Achieving net zero energy cost house from old thermally non-insulated house using photovoltaic panels », *Energy Build.*, vol. 76, p. 57-63, juin 2014.
- [4] H. Janssen, B. Blocken, et J. Carmeliet, « Conservative modelling of the moisture and heat transfer in building components under atmospheric excitation », *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 50, n° 5-6, p. 1128-1140, mars 2007.
- [5] C.-E. Hagentoft *et al.*, « Assessment Method of Numerical Prediction Models for Combined Heat, Air and Moisture Transfer in Building Components: Benchmarks for One-dimensional Cases », *J. Therm. Envel. Build. Sci.*, vol. 27, n° 4, p. 327-352, avr. 2004.
- [6] P. I. Ravikovitch, A. Vishnyakov, R. Russo, et A. V. Neimark, « Unified Approach to Pore Size Characterization of Microporous Carbonaceous Materials from N₂, Ar, and CO₂ Adsorption Isotherms[†] », *Langmuir*, vol. 16, n° 5, p. 2311-2320, mars 2000.
- [7] S. Charisi, T. K. Thiis, P. Stefansson, et I. Burud, « Prediction model of microclimatic surface conditions on building façades », *Build. Environ.*, vol. 128, p. 46-54, janv. 2018.
- [8] J. Brouns, A. Nassiopoulos, K. Limam, et F. Bourquin, « Heat source discrimination in buildings to reconstruct internal gains from temperature measurements », *Energy Build.*, vol. 135, p. 253-262, janv. 2017.
- [9] K. Ahmed, A. Akhondzada, J. Kurnitski, et B. Olesen, « Occupancy schedules for energy simulation in new prEN16798-1 and ISO/FDIS 17772-1 standards », *Sustain. Cities Soc.*, vol. 35, p. 134-144, nov. 2017.
- [10] Q. Zhang, D. Yan, J. An, T. Hong, W. Tian, et K. Sun, « Spatial distribution of internal heat gains: A probabilistic representation and evaluation of its influence on cooling equipment sizing in large office buildings », *Energy Build.*, vol. 139, p. 407-416, mars 2017.
- [11] A. Bennouna et C. El Hebil, « Energy needs for Morocco 2030, as obtained from GDP-energy and GDP-energy intensity correlations », *Energy Policy*, vol. 88, p. 45-55, janv. 2016.
- [12] A. Allouhi, Y. El Fouih, T. Kousksou, A. Jamil, Y. Zeraouli, et Y. Mourad, « Energy consumption and efficiency in buildings: current status and future trends », *J. Clean. Prod.*, vol. 109, p. 118-130, déc. 2015.
- [13] N. Lee et C. Barrows, « Transmission Planning Studies for the Renewable Energy Zone (REZ) Process », p. 4.
- [14] V. V. Tyagi, N. A. A. Rahim, N. A. Rahim, et J. A. /L. Selvaraj, « Progress in solar PV technology: Research and achievement », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 20, p. 443-461, avr. 2013.
- [15] A. S. Jordan, A. R. von Neida, et R. Caruso, « The theory and practice of dislocation reduction in GaAs and InP », *J. Cryst. Growth*, vol. 70, n° 1-2, p. 555-573, déc. 1984.
- [16] A. S. Jordan, A. R. Von Neida, et R. Caruso, « The theoretical and experimental fundamentals of decreasing dislocations in melt grown GaAs and InP », *J. Cryst. Growth*, vol. 79, n° 1-3, p. 243-262, déc. 1986.

- [17] B. Lloyd et A. S. Forest, « The transition to renewables: Can PV provide an answer to the peak oil and climate change challenges? », *Energy Policy*, vol. 38, n° 11, p. 7378-7394, nov. 2010.
- [18] I. L. Repins *et al.*, « Kesterite Successes, Ongoing Work, and Challenges: A Perspective From Vacuum Deposition », *IEEE J. Photovolt.*, vol. 3, n° 1, p. 439-445, janv. 2013.
- [19] C. Radue, E. E. van Dyk, et E. Q. Macabebe, « Analysis of performance and device parameters of CIGS PV modules deployed outdoors », *Thin Solid Films*, vol. 517, n° 7, p. 2383-2385, févr. 2009.
- [20] E. . Meyer et E. . van Dyk, « Characterization of degradation in thin-film photovoltaic module performance parameters », *Renew. Energy*, vol. 28, n° 9, p. 1455-1469, juill. 2003.
- [21] A. Goetzberger, C. Hebling, et H.-W. Schock, « Photovoltaic materials, history, status and outlook », *Mater. Sci. Eng. R Rep.*, vol. 40, n° 1, p. 1-46, janv. 2003.
- [22] T. Gorter et A. H. M. E. Reinders, « A comparison of 15 polymers for application in photovoltaic modules in PV-powered boats », *Appl. Energy*, vol. 92, p. 286-297, avr. 2012.
- [23] P. Peumans, A. Yakimov, et S. R. Forrest, « Small molecular weight organic thin-film photodetectors and solar cells », *J. Appl. Phys.*, vol. 93, n° 7, p. 3693-3723, avr. 2003.
- [24] M. Itoh, H. Takahashi, T. Fujii, Y. Hamakawa, et Y. Matsumoto, « Evaluation of electric energy performance by democratic module PV system "eld test" », *Sol. Energy Mater.*, p. 6, 2001.
- [25] L. Wu, W. Tian, et X. Jiang, « Silicon-based solar cell system with a hybrid PV module », *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 87, n° 1-4, p. 637-645, mai 2005.
- [26] M. K. Nazeeruddin, E. Baranoff, et M. Grätzel, « Dye-sensitized solar cells: A brief overview », *Sol. Energy*, vol. 85, n° 6, p. 1172-1178, juin 2011.
- [27] T. K. Manna et S. M. Mahajan, « Nanotechnology in the Development of Photovoltaic Cells », in *2007 International Conference on Clean Electrical Power*, Capri, Italy, 2007, p. 379-386.
- [28] P. Kumar, A. Deep, S. C. Sharma, et L. M. Bharadwaj, « Bioconjugation of InGaP quantum dots for molecular sensing », *Anal. Biochem.*, vol. 421, n° 1, p. 285-290, févr. 2012.
- [29] V. Aroutiounian, S. Petrosyan, et A. Khachatryan, « Studies of the photocurrent in quantum dot solar cells by the application of a new theoretical model », *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 89, n° 2-3, p. 165-173, nov. 2005.
- [30] N. E. Gorji, « A theoretical approach on the strain-induced dislocation effects in the quantum dot solar cells », *Sol. Energy*, vol. 86, n° 3, p. 935-940, mars 2012.
- [31] J. Chen *et al.*, « Directly assembled CdSe quantum dots on TiO₂ in aqueous solution by adjusting pH value for quantum dot sensitized solar cells », *Electrochem. Commun.*, vol. 11, n° 12, p. 2265-2267, déc. 2009.
- [32] R. T. Ross et A. J. Nozik, « Efficiency of hot-carrier solar energy converters », *J. Appl. Phys.*, vol. 53, n° 5, p. 3813-3818, mai 1982.
- [33] C. Honsberg, A. Barnett, et D. Kirkpatrick, « Nanostructured Solar Cells for High Efficiency Photovoltaics », in *2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference*, Waikoloa, HI, 2006, p. 2565-2568.
- [34] D. König *et al.*, « Hot carrier solar cells: Principles, materials and design », *Phys. E Low-Dimens. Syst. Nanostructures*, vol. 42, n° 10, p. 2862-2866, sept. 2010.
- [35] R. E. Halsted, « Temperature Consideration in Solar Battery Development », p. 2, 2014.
- [36] J. J. Wysocki et P. Rappaport, « Effect of Temperature on Photovoltaic Solar Energy Conversion », *J. Appl. Phys.*, vol. 31, n° 3, p. 571-578, mars 1960.

- [37] O. Dupré, R. Vaillon, et M. A. Green, *Thermal Behavior of Photovoltaic Devices*. Cham: Springer International Publishing, 2017.
- [38] D. C. Jordan et S. R. Kurtz, « Photovoltaic Degradation Rates-an Analytical Review: Photovoltaic degradation rates », *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, vol. 21, n° 1, p. 12-29, janv. 2013.
- [39] D. Moser, M. Pichler, et M. Nikolaeva-Dimitrova, « Filtering Procedures for Reliable Outdoor Temperature Coefficients in Different Photovoltaic Technologies », *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 136, n° 2, p. 021006, août 2013.
- [40] S. Hoffmann et M. Koehl, « Effect of humidity and temperature on the potential-induced degradation: Effect of humidity and temperature on the PID », *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, vol. 22, n° 2, p. 173-179, févr. 2014.
- [41] V. Naumann *et al.*, « Explanation of potential-induced degradation of the shunting type by Na decoration of stacking faults in Si solar cells », *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 120, p. 383-389, janv. 2014.
- [42] C. Peike *et al.*, « Origin of damp-heat induced cell degradation », *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 116, p. 49-54, sept. 2013.
- [43] T. H. Kim, N. C. Park, et D. H. Kim, « The effect of moisture on the degradation mechanism of multi-crystalline silicon photovoltaic module », *Microelectron. Reliab.*, vol. 53, n° 9-11, p. 1823-1827, sept. 2013.
- [44] K. Moradi, M. Ali Ebadian, et C.-X. Lin, « A review of PV/T technologies: Effects of control parameters », *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 64, p. 483-500, sept. 2013.
- [45] D. N. Nkwetta, M. Smyth, F. Haghghat, A. Zacharopoulos, et T. Hyde, « Experimental performance evaluation and comparative analyses of heat pipe and direct flow augmented solar collectors », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 60, n° 1-2, p. 225-233, oct. 2013.
- [46] F. Cruz-Peragon, J. M. Palomar, P. J. Casanova, M. P. Dorado, et F. Manzano-Agugliaro, « Characterization of solar flat plate collectors », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, n° 3, p. 1709-1720, avr. 2012.
- [47] T. T. Chow, W. He, et J. Ji, « Hybrid photovoltaic-thermosyphon water heating system for residential application », *Sol. Energy*, vol. 80, n° 3, p. 298-306, mars 2006.
- [48] H. Zondag, « Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 12, n° 4, p. 891-959, mai 2008.
- [49] P. G. Charalambous, G. G. Maidment, S. A. Kalogirou, et K. Yiakoumetti, « Photovoltaic thermal (PV/T) collectors: A review », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 27, n° 2-3, p. 275-286, févr. 2007.
- [50] F. Lasnier et T. Ang, *Photovoltaic Engineering Handbook*. CRC Press (1 janvier 1990), 1990.
- [51] S. Dubey, G. S. Sandhu, et G. N. Tiwari, « Analytical expression for electrical efficiency of PV/T hybrid air collector », *Appl. Energy*, vol. 86, n° 5, p. 697-705, mai 2009.
- [52] Shyam, G. N. Tiwari, et I. M. Al-Helal, « Analytical expression of temperature dependent electrical efficiency of N-PVT water collectors connected in series », *Sol. Energy*, vol. 114, p. 61-76, avr. 2015.
- [53] J. A. Duffie et W. A. Beckman, « Solar Engineering of Thermal Processes », p. 928.
- [54] L. Ouhsaine, A. Scipioni, M. El Ganaoui, et A. Mimet, « MODELISATION D'ECHANGEUR FRACTAL POUR UN SYSTEME HYBRIDE PHOTOVOLTAÏQUE/THERMIQUE », présenté à Le congrès International sur les Matériaux et l'Énergie. CIMATEN, Sousse, Tunisie, 2016.
- [55] H. Pierrick, M. Christophe, G. Leon, et D. Patrick, « Dynamic numerical model of a high efficiency PV-T collector integrated into a domestic hot water system », *Sol. Energy*, vol. 111, p. 68-81, janv. 2015.

- [56] K. Vats, V. Tomar, et G. N. Tiwari, « Effect of packing factor on the performance of a building integrated semitransparent photovoltaic thermal (BISPVT) system with air duct », *Energy Build.*, vol. 53, p. 159-165, oct. 2012.
- [57] M. Abdelhamid *et al.*, « Novel double-stage high-concentrated solar hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) collector with nonimaging optics and GaAs solar cells reflector », *Appl. Energy*, vol. 182, p. 68-79, nov. 2016.
- [58] H. Bahaidarah, A. Subhan, P. Gandhidasan, et S. Rehman, « Performance evaluation of a PV (photovoltaic) module by back surface water cooling for hot climatic conditions », *Energy*, vol. 59, p. 445-453, sept. 2013.
- [59] M. Beccali, P. Finocchiaro, et B. Nocke, « Energy and economic assessment of desiccant cooling systems coupled with single glazed air and hybrid PV/thermal solar collectors for applications in hot and humid climate », *Sol. Energy*, vol. 83, n° 10, p. 1828-1846, oct. 2009.
- [60] S. A. Brideau et M. R. Collins, « Experimental Model Validation of a Hybrid PV/thermal Air based Collector with Impinging Jets », *Energy Procedia*, vol. 30, p. 44-54, 2012.
- [61] C. Cristofari, G. Notton, et J. L. Canaletti, « Thermal behavior of a copolymer PV/Th solar system in low flow rate conditions », *Sol. Energy*, vol. 83, n° 8, p. 1123-1138, août 2009.
- [62] H. G. Teo, P. S. Lee, et M. N. A. Hawlader, « An active cooling system for photovoltaic modules », *Appl. Energy*, vol. 90, n° 1, p. 309-315, févr. 2012.
- [63] J. K. Tonui et Y. Tripanagnostopoulos, « Improved PV/T solar collectors with heat extraction by forced or natural air circulation », *Renew. Energy*, vol. 32, n° 4, p. 623-637, avr. 2007.
- [64] O. Zogou et H. Stapountzis, « Flow and heat transfer inside a PV/T collector for building application », *Appl. Energy*, vol. 91, n° 1, p. 103-115, mars 2012.
- [65] R. Daghigh, M. H. Ruslan, et K. Sopian, « Advances in liquid based photovoltaic/thermal (PV/T) collectors », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, n° 8, p. 4156-4170, oct. 2011.
- [66] A. H. A. Alwaeli, K. Sopian, A. Ibrahim, S. Mat, et M. H. Ruslan, « Nanofluid based photovoltaic thermal (PVT) incorporation in palm oil production process », vol. 3, n° 3, p. 3, 2017.
- [67] Ö. Kayhan, « A thermal model to investigate the power output of solar array for stratospheric balloons in real environment », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 139, p. 113-120, juill. 2018.
- [68] H. Jouhara *et al.*, « The performance of a novel flat heat pipe based thermal and PV/T (photovoltaic and thermal systems) solar collector that can be used as an energy-active building envelope material », *Energy*, vol. 108, p. 148-154, août 2016.
- [69] H. Kavooosi Balotaki et M. H. Saidi, « Design and Performance of a Novel Hybrid Photovoltaic-Thermal Collector with Pulsating Heat Pipe (PVTPHP) », *Iran. J. Sci. Technol. Trans. Mech. Eng.*, mai 2018.
- [70] B. M. Ziapour et V. Palideh, « (54) FINNED PASSIVE PVT SYSTEM WITH ADJUSTABLE ANGLE INSULATING REFLECTORS », p. 8, 2017.
- [71] K. Szymocha, « (54) HYBRID SOLAR ENERGY COLLECTOR », p. 8.
- [72] A. Elazari, « (54) COMBINED SOLAR THERMAL POWER EN AND A POWER STATION », p. 14.
- [73] T. A. Davis et M. A. Cappelle, « (54) PHOTOVOLTAIC-THERMAL (PV-T) SYSTEM », p. 10.
- [74] H. I. Dag, « (54) METHOD FOR PRODUCING A SOLAR ENERGY CONVERSION MODULE AND A MODULE PRODUCED BY SAME », p. 5, 2013.

- [75] K. W. Roth, D. Westphalen, M. Y. Feng, P. Llana, et L. Quartararo, « Energy Impact of Commercial Building Controls and Performance Diagnostics: Market Characterization, Energy Impact of Building Faults and Energy Savings Potential », p. 413.
- [76] J. H. Lienhard et J. H. Lienhard, *A heat transfer textbook*, 3rd ed. Cambridge, Mass: Phlogiston Press, 2001.
- [77] F. Alhama et A. Campo, « THE CONNECTION BETWEEN THE DISTBIBUTED AND LUMPED MODELS FOR ASYMMETBIC COOLING OF LONG SLAB!3 BY HEAT CONVECTION », *Int. Comm. Heat Transfer*, vol. 28, n° 1, p. 127-137, janv. 2001.
- [78] K. J. Kircher et K. Max Zhang, « On the lumped capacitance approximation accuracy in RC network building models », *Energy Build.*, vol. 108, p. 454-462, déc. 2015.
- [79] M. Usama Siddiqui, A. F. M. Arif, L. Kelley, et S. Dubowsky, « Three-dimensional thermal modeling of a photovoltaic module under varying conditions », *Sol. Energy*, vol. 86, n° 9, p. 2620-2631, sept. 2012.
- [80] Y. Tripanagnostopoulos, « Photovoltaic/Thermal Solar Collectors », in *Comprehensive Renewable Energy*, Elsevier, 2012, p. 255-300.
- [81] G. Gan, « A parametric study of Trombe walls for passive cooling of buildings », p. 7.
- [82] L. Zalewski, S. Lassue, B. Duthoit, et M. Butez, « Study of solar walls — validating a simulation model », *Build. Environ.*, vol. 37, n° 1, p. 109-121, janv. 2002.
- [83] J. Jie, Y. Hua, H. Wei, P. Gang, L. Jianping, et J. Bin, « Modeling of a novel Trombe wall with PV cells », *Build. Environ.*, vol. 42, n° 3, p. 1544-1552, mars 2007.
- [84] K. Irshad, K. Habib, et N. Thirumalaiswamy, « Performance Evaluation of PV-trombe Wall for Sustainable Building Development », *Procedia CIRP*, vol. 26, p. 624-629, 2015.
- [85] Y. Kharbouch, A. Mimet, M. El Ganaoui, et L. Ouhsaine, « Thermal energy and economic analysis of a PCM-enhanced household envelope considering different climate zones in Morocco », *Int. J. Sustain. Energy*, vol. 37, n° 6, p. 515-532, juill. 2018.
- [86] D. Chemisana, « Building Integrated Concentrating Photovoltaics: A review », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, n° 1, p. 603-611, janv. 2011.
- [87] H. Baig, N. Sarmah, K. C. Heasman, et T. K. Mallick, « Numerical modelling and experimental validation of a low concentrating photovoltaic system », *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 113, p. 201-219, juin 2013.
- [88] N. Sellami et T. K. Mallick, « Optical characterisation and optimisation of a static Window Integrated Concentrating Photovoltaic system », *Sol. Energy*, vol. 91, p. 273-282, mai 2013.
- [89] K C Heasman *et al.*, « Device Design and Process Optimisation for LGBC Solar Cells for Use Between 50X and 100X Concentration », 2006.
- [90] B. J. Brinkworth, « Optimum depth for PV cooling ducts », *Sol. Energy*, vol. 80, n° 9, p. 1131-1134, sept. 2006.
- [91] B. J. Brinkworth, R. H. Marshall, et Z. Ibarahim, « A validated model of naturally ventilated PV cladding », *Sol. Energy*, vol. 69, n° 1, p. 67-81, 2000.
- [92] A. S. Kaiser, B. Zamora, R. Mazón, J. R. García, et F. Vera, « Experimental study of cooling BIPV modules by forced convection in the air channel », *Appl. Energy*, vol. 135, p. 88-97, déc. 2014.
- [93] L. Mei, D. Infield, U. Eicker, et V. Fux, « Thermal modelling of a building with an integrated ventilated PV facade », *Energy Build.*, p. 13, 2003.
- [94] D. Infield, U. Eicker, V. Fux, L. Mei, et J. Schumacher, « A simplified approach to thermal performance calculation for building integrated mechanically ventilated PV facades », *Build. Environ.*, vol. 41, n° 7, p. 893-901, juill. 2006.

- [95] H. Manz, « Numerical simulation of heat transfer by natural convection in cavities of facade elements », *Energy Build.*, vol. 35, n° 3, p. 305-311, mars 2003.
- [96] J. Xamán, G. Álvarez, L. Lira, et C. Estrada, « Numerical study of heat transfer by laminar and turbulent natural convection in tall cavities of façade elements », *Energy Build.*, vol. 37, n° 7, p. 787-794, juill. 2005.
- [97] R. A. Agathokleous et S. A. Kalogirou, « Double skin facades (DSF) and building integrated photovoltaics (BIPV): A review of configurations and heat transfer characteristics », *Renew. Energy*, vol. 89, p. 743-756, avr. 2016.
- [98] C. Hachem et M. Elsayed, « Patterns of façade system design for enhanced energy performance of multistory buildings », *Energy Build.*, vol. 130, p. 366-377, oct. 2016.
- [99] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, et T. Meyarivan, « A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II », *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 6, n° 2, p. 182-197, avr. 2002.