



HAL
open science

Les systèmes énergétiques durables : performances et vieillissement

Fabien Delaleux

► **To cite this version:**

Fabien Delaleux. Les systèmes énergétiques durables : performances et vieillissement. Sciences de l'ingénieur [physics]. UPEC, 2022. ⟨tel-04325834⟩

HAL Id: tel-04325834

<https://hal.science/tel-04325834v1>

Submitted on 6 Dec 2023

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

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



Copyright - All rights reserved

UNIVERSITE PARIS EST CRETEIL
Ecole doctorale 531 Sciences Ingénierie et Environnement
Laboratoire CERTES – EA 3481

HABILITATION A DIRIGER LES RECHERCHES

Spécialité : Energétique et génie des procédés

Présentée par

Fabien DELALEUX

**Les systèmes énergétiques durables : performances et
vieillessement**

Soutenue publiquement le 8 juin 2022 devant la commission d'examen,

M. Jean-Pierre BEDECARRATS, Professeur, LATEP, Université de Pau et des Pays de l'Addour, *Rapporteur*

M. Patrick GLOUANNEC, Professeur, IRDL, Université de Bretagne Sud, *Rapporteur*

Mme Anne MIGAN-DUBOIS, Professeur, GEEPS, Université Paris Saclay, *Rapporteur*

M. Régis OLIVES, Professeur, PROMES CNRS, Université de Perpignan Via Domitia, *Examineur*

M. Xavier PY, Professeur, LTeN, Nantes Université, *Examineur*

M. Jean-Félix DURASTANTI, CERTES, Université Paris Est Créteil, *Directeur*

Remerciements

Je tiens, tout d'abord, à remercier chaleureusement Anne Migan-Dubois, Patrick Glouannec et Jean-Pierre Bedecarrats d'avoir accepté d'être rapporteurs de mon manuscrit et d'évaluer ce travail, fruit de presque 15 ans de recherches.

Je souhaite ensuite remercier les autres membres du jury, Xavier Py, Régis Olivès et Jean-Félix Durastanti à double titre. Merci Xavier de m'avoir accordé ta confiance et fais prendre confiance en moi, en dirigeant ma thèse, de m'avoir guidé et laissé une liberté d'actions si formatrice. J'ai tant appris à tes côtés et tâche au quotidien de transmettre à mon tour ces connaissances aux jeunes chercheurs que j'encadre. Merci Régis pour ton soutien sans faille lors de ma thèse et ton amitié qui perdure à travers les années. Que de souvenirs d'heures de discussion dans ton bureau ! Il y a ensuite des mentors qui à un moment de votre carrière croient en vous et vous permettent de prendre votre envol. Jean-Félix tu es de ceux-là, tout d'abord en m'ayant recruté en 2013 et en me donnant les clés depuis toutes ces années des méandres du monde universitaire. J'apprends encore et toujours beaucoup en écoutant tes conseils avisés remplis de bienveillance.

Je profite de l'occasion qui m'est donnée pour remercier Evelyne Géhin, directrice du CERTES, et à travers elle l'ensemble des collègues du laboratoire. En effet, j'ai vu une évolution extrêmement positive de l'ambiance de travail générale au sein du laboratoire, et nous avons, désormais, tous plaisir à nous retrouver.

J'adresse des remerciements particuliers à deux collègues, Olivier et Pierre-Olivier, collègues de bureau depuis bientôt 10 ans (désolé je vais vous faire une infidélité quelques temps). Olivier, quel plaisir de discuter au quotidien avec toi ! J'apprends tous les jours à tes côtés sur des sujets scientifiques ou de toute autre nature. Je n'arrive qu'à la cheville du puits de culture que tu es. Mon travail ne pourrait pas être le même sans toi et nos centaines (milliers sans doute...) de cafés partagés. Merci également à Pierre-Olivier, bien que nous soyons très différents dans nos approches, j'ai toujours plaisir à échanger avec toi et j'espère que dans l'avenir nous pourrions construire de beaux projets ensemble. J'associe à ces remerciements tous les doctorants et stagiaires que j'ai encadré de près ou de loin : Vincent (on a beaucoup appris ensemble), Luca, Zakaria, Samy, Julia et tous les autres qui me pardonneront de ne pas les citer.

Je voudrais également remercier l'ensemble du département GIM, je ne vais pas tous les citer de peur d'en oublier, mais cette équipe soudée fait qu'il est toujours un plaisir de venir le matin. Cette équipe qui m'a tout de suite accueilli et fait une place à son sein lors de mon arrivée alors que je me retrouvais seul, à 800 kilomètres de chez moi. Merci à tous !

J'associe à ces remerciements l'ensemble de l'équipe MMRI, Thibault, Sylvain, Isabelle, Antoine et tous les autres. J'aurais un mot particulier pour Thibault Lemaire, un grand monsieur au cœur en or. Merci pour tout et bien plus encore. Ton soutien sans faille dans ce projet d'HDR, ta bienveillance et ton amitié au quotidien. Il y a des rencontres dans une vie professionnelle que l'on n'oublie pas. J'ai, au moment d'écrire ces remerciements, une pensée émue pour notre chère Cathy qui nous manque à tous. Tu as été une collaboratrice exemplaire mais surtout une amie, une confidente parfois, une grande sœur. Je n'oublierai jamais les mots que tu as eus lors du décès de ma maman. Avec Thibault, nous nous efforçons de tenir la promesse que nous t'avons faite.

Enfin, je souhaite clore ces remerciements par mes proches. Tout d'abord mes amis, du côté de Perpignan même si la distance tend à nous éloigner parfois, mais le plaisir est toujours le même lorsque nous nous retrouvons. Merci à Flo, Elo et Alex, mes amis « parisiens », pour tout ce que nous partageons (ce serait trop long à citer ici).

Mes derniers remerciements iront à ma famille que je vois trop peu souvent du fait de l'éloignement géographique. A mon père, qui je le sais est très fier de ses enfants et petits-enfants, même si nous ne le disons pas trop dans la famille. A ma mère, qui de là où elle est nous regarde et nous protège, j'en suis certain. J'aurais tant aimé que tu sois là avec tes petits enfants ! A Aimie ma sœur, Aaron et Maloé, mon neveu et ma nièce.

Et enfin, mes derniers mots seront adressés à ma petite famille à moi, Nathalie et notre petit Clément qui devient grand ; vous qui faites mon bonheur au quotidien.

Merci !!!

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE : CONTEXTE ET POSITIONNEMENT	9
I. PARCOURS ET TRAVAUX.....	13
I.1. ETAT CIVIL.....	13
I.2. PARCOURS PROFESSIONNEL	13
I.3. FORMATION	13
I.4. PRODUCTION.....	14
I.5. RESPONSABILITES SCIENTIFIQUES, PEDAGOGIQUES, ADMINISTRATIVES	20
I.6. ENCADREMENT SCIENTIFIQUE.....	23
I.7. ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT	25
II. PERFORMANCES DES SYSTEMES ENERGETIQUES DURABLES	29
II.1. INTRODUCTION	29
II.2. INTENSIFICATION DES TRANSFERTS THERMIQUES DES SONDES GEOTHERMIQUES	30
II.3. STOCKAGE D'ENERGIE PAR COUPLAGE SOLAIRE/GEOTHERMIE	39
II.4. REFROIDISSEMENT SEC DE CENTRALE SOLAIRE A CONCENTRATION.....	53
II.5. COGENERATION THERMOELECTRIQUE : APPLICATION AU PHOTOVOLTAÏQUE	62
II.6. VALORISATION ENERGETIQUE DES EFFLUENTS EN SORTIE DE STATION D'EPURATION.....	65
II.7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES DU CHAPITRE II.....	71
III. VIEILLISSEMENT DES SYSTEMES ENERGETIQUES DURABLES	75
III.1. INTRODUCTION	75
III.2. APPLICATION AU VIEILLISSEMENT DES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES.....	76
III.3. EQUIVALENCE VIEILLISSEMENT ACCELERE/ NATUREL : DEVELOPPEMENT DE PROTOCOLES.....	88
III.4. DEVELOPPEMENT D'UN INDICATEUR DE VIEILLISSEMENT : L'EMISSIVITE APPARENTE.....	93
III.5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES DU CHAPITRE III.....	107
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	109
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	111
LISTE DES FIGURES	116
LISTES DES TABLES	119

Introduction générale : contexte et positionnement

La rédaction d'un manuscrit d'habilitation à diriger les recherches est un exercice singulier qui permet, de réaliser un bilan des activités de recherche passées afin de mieux les ancrer dans le présent et d'ouvrir des perspectives d'évolutions futures. Ce regard dans le rétroviseur, tout en gardant les yeux grands ouverts vers l'avenir, permet à l'enseignant chercheur de réfléchir sur son positionnement, au milieu d'un quotidien, fait de multiples sollicitations de tous ordres.

Je vais tâcher tout au long de ce manuscrit de rendre compte de la progression du jeune chercheur que j'étais durant ma thèse, qui passait son temps à « faire tourner » des simulations numériques ou le nez sur la paillasse en salle de manip', vers celui que je suis devenu aujourd'hui, qui aime discuter de résultats et de perspectives de travail avec ses collègues ou les doctorants et autres stagiaires.

Ma première rencontre avec la recherche remonte à une quinzaine d'années, lorsque l'un de mes enseignants au sein du Master Energie Solaire (qui deviendra mon directeur de thèse par la suite) proposa un sujet de projet à traiter sur le couplage entre deux énergies renouvelables que sont le solaire et la géothermie. Projet qui se transforma ensuite en stage de fin d'études et qui commença par une timide entrée dans le bureau de mon « chef », un jour de février 2008. Je mesure en l'écrivant, le chemin parcouru depuis cher Xavier.

Ce stage en collaboration entre l'entreprise Dominguez Energie, spécialiste de géothermie, et le laboratoire PROMES CNRS à Perpignan me fit découvrir un monde que je ne connaissais pas et qui m'attira immédiatement. Nous parlions là, pêle-mêle, de collaboration industrielle, d'économie d'énergie, d'intégration de solutions de stockage thermique couplées aux énergies renouvelables, de calculs technico-économiques etc.... Cette première approche de la recherche, appliquée, pragmatique et raisonnable, ne m'a jamais quittée et est toujours au cœur de mes réflexions actuelles. Ce type de raisonnement, est une des réponses, à mon avis, à apporter à la problématique énergétique actuelle : des systèmes efficaces, fiables et économiquement compétitifs face aux énergies fossiles.

La suite de mon début de carrière au cours de ma thèse, du post-doctorat ainsi que de mon année d'ATER m'a conforté dans la direction que je souhaitais suivre.

J'y ai développé une approche mêlant à la fois modélisation numérique et expérimentations à l'échelle du matériau permettant ensuite une extrapolation au niveau du système. J'aurai l'occasion de revenir en détails sur l'approche qui me guide encore aujourd'hui au cours de la partie scientifique de ce manuscrit.

Est venu ensuite, mon recrutement en tant que maître de conférences au sein du laboratoire CERTES de l'Université Paris Est Créteil en septembre 2013. Nouvelle vie, nouvelle équipe, nouvel environnement mais des axes de recherche assez proches tournés vers les systèmes énergétiques durables et plus particulièrement la thématique de l'étude du vieillissement de ces derniers. Nous parlons à longueur de temps de performances initiales et nominales mais la pérennité de ces performances dans le temps est un enjeu crucial. Cet axe de recherche, alors très récent au sein de l'équipe, n'avait été jusqu'alors, abordé uniquement sous l'angle de la modélisation, l'activité expérimentale n'en était qu'à ses balbutiements. Depuis lors, cette activité a pris de l'ampleur, donnant lieu à de nombreux résultats, avec notamment la thèse de Vincent Guihéneuf que j'ai co-encadrée ou celle de Samy Brazane, démarrée il y a peu. Résultats qui seront présentés dans la suite de ce manuscrit.

Après une première phase d'intégration à l'équipe déjà en place, j'ai progressivement contribué au rayonnement et au développement de celle-ci en apportant mon expérience passée. L'équipe est très complémentaire puisque composée de numériciens capables de modéliser tout phénomène physique, et de métrologues, expérimentateurs permettant de développer des bancs de caractérisations thermo-physiques fines. Mon rôle au sein de cette équipe est d'apporter une vision appliquée de nos activités, en accord avec la philosophie développée plus tôt dans cette introduction, tant dans le choix et l'interprétation des indicateurs.

Depuis quelques temps j'ai également noué des collaborations avec des acteurs publics locaux permettant de développer un axe de recherche, qui me semble être au cœur des enjeux environnementaux et énergétiques actuels, celui de l'optimisation de l'utilisation de la ressource énergétique locale. La réponse à la problématique de la raréfaction des sources énergétiques passe, bien entendu, par une réduction de nos consommations, mais également par le mix énergétique et l'utilisation de systèmes énergétiques durables, fiables et rentables en limitant le plus possible les étapes de conversion et de transport.

La première partie de ce manuscrit reprendra de manière classique, les éléments du déroulé de ma carrière d'enseignant chercheur. Le système énergétique durable étant le fil rouge de mon activité de recherche, la partie scientifique sera composée de deux axes thématiques. Le premier traitera de la question des performances de ces systèmes, le second, quant à lui, traitera du vieillissement des systèmes et de la durabilité des performances dans le temps ainsi que des indicateurs associés.

Chapitre I : Parcours et travaux

I. Parcours et travaux

I.1. Etat civil

Fabien DELALEUX, 36 ans, pacsé, 1 enfant

Université Paris Est Créteil, IUT Sénart-Fontainebleau, département Génie Industriel et Maintenance GIM

Centre d'Etudes et de Recherche en Thermique Environnement et Systèmes
CERTES EA 3481,
Axe thématique Optimisation des Systèmes Energétiques Durables OSED
36 rue Georges Charpak 77567 Lieusaint

I.2. Parcours professionnel

Depuis sept.2013 **Maitre de conférences 62^{ème} section:** Université Paris Est Créteil, IUT de Sénart Fontainebleau, Laboratoire CERTES EA 3481

2012-2013 **Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche (ATER) :**
Université de Perpignan Via Domitia et Laboratoire PROMES CNRS

2011-2012 **Post-doctorant** au laboratoire PROMES CNRS

2009-2011 **Enseignant vacataire** à l'Université de Perpignan Via Domitia

2008-2011 **Ingénieur de recherche** Dominguez-Energie et laboratoire PROMES CNRS
bourse CIFRE

I.3. Formation

2008-2011 **Doctorat** en Sciences pour l'ingénieur, Université de Perpignan Via Domitia, Ecole Doctorale Energie Environnement, Laboratoire PROMES-CNRS,
Thèse : **Intensification des performances des procédés énergétiques par hybridation solaire/géothermie**, soutenue le 7 décembre 2011

2006-2008 **Master** Energie Solaire, Université de Perpignan Via Domitia

- 2005-2006** **Licence** Génie des Systèmes industriels, Université de Perpignan Via Domitia.
- 2003-2005** **DUT** Génie Industriel et Maintenance, IUT de Perpignan.
- 2003** **Baccalauréat** Scientifique option physique-chimie, Lycée Docteur Lacroix, Narbonne

I.4. Production

Le nom des doctorants encadrés est souligné dans la liste des auteurs

Publications dans des revues internationales à comité de lecture : 16

- [1] F.Delaleux, X.Py, R.Olivès, A.Dominguez;
Enhancement of geothermal borehole heat exchangers performances by improvement of bentonite grout conductivity
Applied Thermal Engineering, Volume 33-34, Février 2012, pp 92-99.
- [2] S.Lanini, F.Delaleux, X.Py, R.Olivès, D.Nguyen,
Improvement of Borehole Thermal Energy Storage Design Based on Experimental and Modelling Results"
Energy and Buildings, Volume 77, Juillet 2014, pp.393-400.
- [3] O.Riou, P-O.Logerais, F.Delaleux, J-F.Durastanti,
A self-method for resolving the problem of apparent LWIR emissivity for quantitative thermography up to 130°C
Infrared Physics & Technology, Volume 67, Novembre 2014, pp.504-513.
- [4] P-O.Logerais, O.Riou, F.Delaleux, J-F.Durastanti, A.Bouteville;
Improvement of the homogeneity of the temperature of a silicon wafer heated in a rapid thermal system (RTP: Rapid Thermal Process) by a filtering window
Applied Thermal Engineering, Volume 77, Février 2015, pp.76-89.
- [5] H.Mazouz, P-O.Logerais, A.Belgachi, O.Riou, F.Delaleux, J-F.Durastanti;
Effect of electron irradiation fluence on the output parameters of GaAs solar cell
International Journal of Hydrogen Energy, Volume 40, Juin 2015.

- [6] P-O.Logerais, M.A.Camara, O.Riou, A.Djellad, A.Omeiri, F.Delaleux, J-F.Durastanti;
Modeling of a supercapacitor with a multibranch circuit
International Journal of Hydrogen Energy, Volume 40, Issue 39, October 2015, pp.
13725-13736
- [7] O.Riou, V.Guiheneuf, F.Delaleux, P-O.Logerais, J-F.Durastanti;
Accurate methods for single-band apparent emissivity of opaque materials
Measurement, Volume 89, July 2016, pp.239-251
- [8] Logerais P.O., Diallo A., Guiheneuf V., Delaleux F., O. Riou, Durastanti J.F.
Evolution of the efficiency of a photovoltaic/ supercapacitor system with aging.
Advanced Engineering Forum (AEF) Volume 21, pp 520-528. 2017
- [9] V.Guiheneuf, F.Delaleux, O.Riou, P-O. Logerais, J-F.Durastanti
Investigation of damp heat effects on glass properties for photovoltaic applications
Corrosion Engineering, Science and Technology, Volume 52, Avril 2017, pp.170-177
- [10] O.Riou, F.Delaleux, V.Guihéneuf, H.Espargillière, P-O.Logerais, R.Olivès, X.Py, J-
F.Durastanti ;
*Non-destructive testing method to quantify ageing of materials by its apparent
emissivity : case of glass-based reflectors*
Applied Thermal Engineering, Volume 115, Mars 2017, pp.539-548
- [11] V.Guiheneuf, O.Riou, F.Delaleux, P-O. Logerais, J-F.Durastanti
*Correlation between transmittance and LWIR apparent emissivity of soda-lime glass
during accelerated aging tests for solar applications*
Journal of Solar Energy Engineering, Volume 139, Mai 2017
- [12] V.Guiheneuf, F.Delaleux, O.Riou, S. Pouliquen, P-O. Logerais, J-F.Durastanti
Effects of the irradiance intensity during UV accelerated aging test on
unencapsulated silicon solar cells
Solar Energy, Volume 157 pp. 477-485 Novembre 2017

- [13] A. Azizi, P-O. Logerais, A. Omeiri, A. Amiar, A. Charki, O. Riou, F.Delaleux, J-F. Durastanti ;
Impact of the aging of a photovoltaic module on the performance of a grid-connected system
Solar Energy, Volume 174, November 2018, pp. 445-454
- [14] Mazouz H., Belgachi A., Logerais P.O., Delaleux F., Riou O.
Numerical Simulation of GaAs Solar Cell Aging Under Electron and Proton Irradiation
IEEE Journal of Photovoltaics Volume : 9, N° 6 pp 1774-1782 2019
- [15] Z. Bekkar Djelloul Sayah, A. Mekki, F. Delaleux, O. Riou, J.F. Durastanti
Response surface methodology as powerful tool for the synthesis of polypyrrole doped organic sulfonic acid and the optimization of its thermoelectric properties
Journal of Electronic Materials (JEMS) Volume 48 N°6, 20 Mars 2019, pp 3662-3675
- [16] M.Jed, C.Mayle, O.Riou, F.Delaleux, P-O. Logerais, M.El Bah
Analysis of the performance of the photovoltaic power plant of Sourduin (France)
International Journal of Sustainable Energy (September 2021)

Publications dans des revues nationales à comité de lecture : 1

- [1] Delaleux F.,Guiheneuf V., Riou O., Logerais P.O., Durastanti J.F.
Etude du vieillissement accéléré sous UV du copolymère éthylène-acétate de vinyle pour des applications photovoltaïques
Revue des composites et des matériaux avancés, N° 27/1-2 pp 87-96. **2017**

Publications soumises : 2

- [1] V.Guiheneuf, F.Delaleux, O.Riou, P-O. Logerais, J-F.Durastanti
A comparative study of degradation mechanisms of encapsulated monocrystalline Si solar cells under damp heat and UV exposure tests
soumis à Journal EPJ Photovoltaïcs
- [2] V.R. Posa, M.Jed, F.Delaleux, O.Riou, P-O. Logerais, J-F.Durastanti
Accelerated UV test for silicon photovoltaic modules
soumis à Microelectronics Reliability

Conférences internationales: 14

- [1] F.Delaleux, X.Py, R.Olivès, A.Dominguez, S.Lanini, D.Nguyen
Supervised rock-mass storage of thermal energy produced by a solar thermal panel
SOLARPACES, September 21-24, 2010, Perpignan, France.
- [2] S.Lanini, D.Nguyen, F.Delaleux, X.Py
Experimental and modelling study of solar thermal energy storage in dry rocks
EUROTHERM, November 16-18, 2011, Bordeaux, France.
- [3] R.Olives, F.Delaleux, X.Py, A.Dominguez
Geothermal boreholes heat exchangers applied to the dry-cooling of CSP plants
SOLARPACES, September 11-14 2012, Marrakech, Maroc
- [4] O.Riou, P-O.Logerais, F.Delaleux, J-F.Durastanti
A self-method for solving the problem of LWIR spectral band of camera for quantitative thermography
QIRT 2014, July 7-11 2014, Bordeaux, France.
- [5] F. Delaleux, O. Riou, P.O. Logerais, J.F Durastanti
Caractérisation du vieillissement des systèmes solaires par émissivité apparente
2ème Conférence Internationale des Énergies Renouvelables (CIER'14), Monastir, 19-21 décembre 2014.
- [6] V.Guiheneuf, F.Delaleux, O.Riou, P-O.Logerais, J-F.Durastanti
Etude du vieillissement des verres : corrélation entre émissivité apparente (IR) et transmittance (visible)
Journées Internationales de Thermique JITH 2015, 28-30 Octobre 2015, Marseille, France.
- [7] D.De Sousa Meneses, P. Echegut, P-O. Logerais, O. Riou, F. Delaleux, D. Vacher, O.lurevych, S.Gubin, P. Guibert, M. Dudeck
Propriétés optique et thermique du polycarbonate pour son utilisation dans un panneau solaire hybride avec concentrateur
Journées Internationales de Thermique, JITH 2015, 28-30 Octobre 2015, Marseille, France.

- [8] V.Guihéneuf, F.Delaleux, O.Riou, P-O.Logerais, J-F.Durastanti,
Investigation of damp heat aging on soda-lime glass for photovoltaic application
EUPVSEC 2016, June 21-24 2016, Munich Germany.
- [9] V.Guihéneuf, F.Delaleux, O.Riou, P-O.Logerais, J-F.Durastanti
Accelerated ageing tests on un-packaged mono-crystalline silicon solar cells
Energy and Environment Knowledge Week E2KW 2016, October 28-29th 2016, Paris
- [10] V.Guihéneuf, F.Delaleux, O.Riou, P-O.Logerais, J-F.Durastanti
Etude du vieillissement accéléré sous UV du copolymère éthylène-acétate de vinyle pour des applications photovoltaïques
Journées Scientifiques Franco Maghrébines – Caractérisation de Matériaux Complexes JSFM-CMC 2016, November 2016 Paris
- [11] P.O Logerais, M.Y. Diallo, O. Lurevych, V. Guihéneuf, O. Riou, F. Delaleux, P. Guibert, J.F. Durastanti
Modélisation des transferts thermiques au sein d'un capteur solaire hybride à concentrateur holographique
4ème Journées scientifiques Franco-Maghrébines : Caractérisation des Matériaux Complexes –Rabat (Maroc), 27-29 novembre 2017
- [12] V. Guihéneuf, F. Delaleux, S. Pouliquen, O. Riou, P.-O. Logerais, J.-F. Durastanti .
Impact of UV exposure on the anti-reflection coating of an unencapsulated silicon solar cell
33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC 2017), Amsterdam (Pays-Bas), 25-29 septembre 2017
- [13] O. Riou, V. Guihéneuf, F. Delaleux, P.-O. Logerais, J.-F. Durastanti
Outil de quantification non intrusif du vieillissement naturel par émissivité apparente : essais en conditions extérieures.
5ème Journées scientifiques Franco-Maghrébines : Caractérisation des Matériaux Complexes (JSFM-CMC 2018), Tunis (Tunisie), 22-24 octobre 2018.
- [14] Ihaddadene N., Ihaddadene R., Betka A., Logerais P.O., Delaleux F., Riou O.
Study of the thermal conductivity of clay-based building materials IAPE '19, Oxford, United Kingdom (2019)

Conférences nationales : 10

- [1] F.Delaleux, X.Py, R.Olives, A.Dominguez
Dopage thermique de la bentonite pour l'intensification des transferts thermiques en géothermie basse température
SFT, Congrès de la Société Française de Thermique, 24-27 Mai 2011, Perpignan, France.
- [2] R.Olives, F.Delaleux, X.Py, A.Dominguez
Refroidissement sec des centrales solaires thermodynamiques par sondes géothermiques
SFT, Congrès de la Société Française de Thermique, 29 Mai-1^{er} Juin 2012, Bordeaux, France.
- [3] F.Delaleux, R.Olives, X.Py;
Refroidissement sec des centrales solaires thermodynamiques par sondes géothermiques : comportement thermique du sous-sol à long terme
SFT, Congrès de la Société Française de Thermique, 28-31 Mai 2013, Gerardmer, France.
- [4] F.Delaleux, O.Riou, H.Espargilliere, P-O.Logerais, R.Olives, X.Py, J-F.Durastanti
Caractérisation du vieillissement par émissivité apparente des miroirs verre des héliostats
SFT, Congrès de la Société Française de Thermique, 26-29 Mai 2015, La Rochelle, France.
- [5] V. Guiheneuf, F. Delaleux, S. Pouliquen, O. Riou, P.-O. Logerais, J.-F. Durastanti
Vieillissement accéléré sous UV de cellules solaires c-Si non-encapsulées : effet de l'intensité du rayonnement UV.
Journées Nationales sur l'Énergie Solaire (JNES 2017), Perpignan (France), 13-15 mai 2017.
- [6] F. Delaleux, O. Riou, V. Guiheneuf, P.-O. Logerais, J.-F. Durastanti
Outil de contrôle non destructif pour la quantification du vieillissement des concentrateurs solaires
Congrès Français de Thermique 2017, Marseille (France), 31 mai - 2 juin 2017.
- [7] F. Delaleux, V. Guiheneuf, O. Riou, P.-O. Logerais, J.-F. Durastanti
Protocole de vieillissement accéléré pour application solaire.
Congrès Français de Thermique 2018, Pau (France), 29 mai - 1 juin 2018.

- [8] Z. Bekkar Djelloul Sayah, F Delaleux, O Riou, J.F Durastanti, A. Mekki
Elaboration d'un dispositif expérimental pour la mesure du coefficient de Seebeck : Application
Pour un matériau thermoélectrique à base de polythiophène
 Congrès Français de thermique 2019, Nantes(France), 3-6 juin 2019
- [9] S.Brazane, O.Riou, F.Delaleux, L.Ibos, J-F.Durastanti
 Méthode de détection sans contact des effets de l'érosion éolienne sur un verre sodocalcique
 Congrès Français de thermique 2022, Valenciennes (France), à venir
- [10] L.Zanatta, F.Delaleux, J-F.Durastanti
 Production d'électricité par valorisation énergétique des effluents de station d'épuration
 Congrès Français de thermique 2022, Valenciennes (France), à venir

I.4.1. Autres productions

Thèse de doctorat

Intensification des performances des procédés énergétiques par hybridation solaire/géothermie

Université de Perpignan Via Domitia, Ecole Doctorale Energie Environnement, PROMES-CNRS

Financement : Bourse CIFRE DOMINGUEZ-ENERGIE & Programme ANR STOCK-E 2008 SOLARGEOTHERM

Directeur de thèse : Xavier Py

Période : Novembre 2008- Décembre 2011, soutenue le 7 Décembre 2011

Rapport d'activités de l'équipe SHPE du laboratoire PROMES, Projet Solargeotherm, programme STOCK-E de l'Agence Nationale de la Recherche, Décembre 2011

Auteurs : Fabien Delaleux, Xavier Py, Régis Olivès

I.5. Responsabilités scientifiques, pédagogiques, administratives

I.5.1. Responsabilités scientifiques locales :

- Co-responsable de la plateforme OSED AGEING (Optimisation des Systèmes Energétiques et Durabilité : moyens de vieillissements accélérés, de mesurage, de caractérisation) depuis 2014

- Membre du conseil de laboratoire du CERTES depuis 2013
- Membre élu au comité scientifique de l'IUT de Sénart-Fontainebleau, depuis 2018
- Membre du comité local d'organisation du congrès international QIRT 2022
- Président du comité de sélection MCF n°4845 section 60 en 2021 (55 dossiers)

I.5.2. Participation à des projets coopératifs :

Projet ANR SOLARGEOTHERM

Stockage d'énergie solaire thermique par géothermie

Durée : 3 ans (2008 - 2011)

Montant : 457 k€

Partenaires académiques : PROMES-CNRS (Perpignan), BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières – Montpellier),

Partenaire industriel : Dominguez-Energie (Argelès sur Mer, 66)

Contribution personnelle : dimensionnement de l'installation expérimentale, développement du modèle numérique thermique, analyse des résultats expérimentaux

Projet ANR Dry RSP

Dry cooling and water producing system for Rankine cycle concentrated solar power processes.

Montant : 800 k€

Durée : 4 ans (2013 - 2017).

Partenaires académiques : Laboratoire Energie Solaire & Economie d'Energie - LESEE (Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, Ouagadougou - BURKINA FASO), Laboratoire Procédés, Matériaux et Energie Solaire - PROMES (CNRS UPR 8521 Perpignan), Laboratoire Sciences Pour l'Environnement - SPE (Université de Corse - UMR6134).

Partenaires industriels : EXOSUN, EXOES.

Contribution personnelle : étude du potentiel de refroidissement radiatif, étude du vieillissement de surfaces des miroirs verre

Projet ANR MAPPYRO

Objectif : développement d'un guide méthodologique à destination des utilisateurs de pyrométrie optique et enrichissement d'une base de données des propriétés radiatives

Montant : 750 k€

Durée : 4 ans (démarrage prévu en 2022).

Etat : projet présélectionné en étape 1, en cours d'expertise étape 2

Partenaires académiques : CERTES (Université Paris Est Créteil), ITHEMM (Université Reims Champagne Ardennes), IUSTI (Aix Marseille Université), IRDL (Université Bretagne Sud).

Partenaire industriel : THEMACS Ingénierie

Contrat PHC Maghreb

Depuis 2016

Partenaires académiques : LTI (Laboratoire des Technologies Innovantes) ENSA Tanger (Maroc), FUNDAPL (Fundamental and Applied Physics Laboratory) Université de Blida (Algérie), Unité de Recherche Energétique et Environnement ENI Tunis (Tunisie)

Porté par le CERTES, ce contrat a pour but de mettre en commun le savoir-faire numérique et expérimental des différents partenaires sur la modélisation, l'optimisation et le contrôle des modules photovoltaïques et leurs applications dans le domaine du chauffage, de la climatisation et de la production du froid

Convention de collaboration de recherche avec le SIARCE – 2020-2024

Depuis 2020 je suis responsable d'une collaboration avec le Syndicat Intercommunal d'Aménagement de Réseaux et de Cycle de l'Eau de Corbeil-Essonnes (91), dans le cadre du schéma directeur syndical des énergies renouvelables et ressources réutilisables

Objectifs : optimisation énergétique des stations d'épuration et valorisation de chaleur fatale résiduelle

Ce partenariat s'est concrétisé par un stage de M2 débouchant sur le financement d'une thèse en contrat CIFRE.

Expertises scientifiques

- Revues : Geothermal Energy, Applied Clay Sciences (1 à 2 par an depuis 2017)
- Congrès Français de Thermique SFT : Membre du comité d'expertise depuis 2019 (2 à 3 par an)
-

Participations à des jurys de thèse (hors encadrement)

ESPARGILLIERE Harold, Doctorat de l'université de Perpignan Via Domitia le 8 mars 2017
Système de refroidissement sec et de production d'eau pour centrale électrosolaire thermodynamique à cycle de Rankine.

I.5.3. Responsabilités pédagogiques

Depuis 2017 : Directeur des Etudes du Master Maintenance et Maîtrise des Risques Industriels : 100 étudiants en formation initiale, continue et par alternance (recrutement, emploi du temps, organisations des soutenances, jurys, gestion des vacataires et des notes, relations avec le CFA, dossiers d'autoévaluation et d'accréditation de la formation etc...).

Depuis 2021 : Membre élu au conseil du département Génie Industriel et Maintenance (GIM) IUT de Sénart-Fontainebleau

I.6. Encadrement scientifique

I.6.1. Co-encadrement de thèses

[TH 1] Vincent Guiheneuf, Doctorat de l'Université Paris Est, bourse MESRI

Approche multiphysique du vieillissement des matériaux pour application photovoltaïque.

Soutenu le 26 octobre 2017.

Direction : JF Durastanti

Encadrement : JF Durastanti (50%) F. Delaleux (50%)

[TH 2] Zakaria BEKKAR, Doctorat de l'Université Paris Est Créteil en co-tutelle avec l'Ecole Militaire Polytechnique Alger

Préparation en couches minces de polymères conducteurs et leurs composites : application à la conversion d'énergie

Soutenu le 8 juillet 2021

Direction : JF Durastanti

Encadrement : JF Durastanti (50%), O.Riou (40%) F. Delaleux (10%)

[TH 3] Luca Zanatta, Doctorat de l'Université Paris Est Créteil, contrat CIFRE SIARCE

Valorisation énergétique des effluents en sortie de STEP

Début : Mars 2021, en cours

Direction : JF Durastanti

Encadrement : JF Durastanti (50%) F. Delaleux (50%)

[TH 4] Samy Brazane, Doctorat de l'Université Paris Est Créteil

Développement d'un outil sans contact de caractérisation in-situ du vieillissement de surface par émissivité apparente

Début : Octobre 2021, en cours

Direction : L.Ibos

Encadrement : L.Ibos (50%), O.Riou (30%) F. Delaleux (20%)

I.6.2. Stages de Master :

[STA 1] Eddy Trouillas, Stage de Master Recherche Energie Solaire (Université de Perpignan Via Domitia)

Dimensionnement et mise en place d'un banc de travaux pratiques de géothermie

Février – Juillet 2009

[STA 2] Luca Zanatta, Stage de Master Recherche Physique et Ingénierie Energétique (Université Paris-Saclay)

Optimisation énergétique de STEP et valorisation de la chaleur fatale

Mars-Septembre 2020

I.6.3. Stages de Licence :

[STA 3] Mahdi Bellocine, Stage de Licence Chimie (Université Paris Est Créteil)

Caractérisation de matériaux polymères utilisés dans les modules photovoltaïques

Avril – Juin 2015

[STA 4] Renaud Delage, Stage de Licence Sciences pour l'Ingénieur (Université Paris Ouest Nanterre La Défense)

Mise au point de tests de vieillissement accéléré sur modules photovoltaïque

Avril – Juin 2015

I.6.4. Stages de DUT :

[STA 5] Asmaa Bouriach, Stage de DUT Mesures Physiques (Université Montpellier II)

Dopage thermique de la bentonite pour l'intensification des transferts thermiques en géothermie basse température

Avril – Juin 2010

[STA 6] Qousey Goulahmoussen, Stage de DUT Génie Industriel et Maintenance (IUT Sénart-Fontainebleau)

Etude de vieillissement accéléré de modules photovoltaïques

Mai – Juillet 2015

I.7. Activités d'enseignement

De 2009 à 2013, la création de nouvelles formations dans le département SPI (Science pour l'ingénieur) m'a permis d'obtenir un poste de vacataire à l'Université de Perpignan, pendant les deux dernières années de ma thèse (2009/2011) puis un poste d'ATER au cours de l'année universitaire 2012/2013.

Principaux domaines d'enseignement : Thermique, Transfert de chaleur et de masse, Thermodynamique appliquée, Stockage d'énergie.

Formations : Licence SPI ENERMAT (Energie, Matériaux),

Licence professionnelle TeFER (Technologies du Froid et Energies Renouvelables),

Master Energie Solaire

Depuis septembre 2013 et mon recrutement à l'IUT de Sénart-Fontainebleau, je suis responsable des enseignements et des travaux pratiques de thermodynamique et thermique du département Génie Industriel et Maintenance.

Principaux domaines d'enseignement : Transfert de chaleur, Thermodynamique, Machines thermiques, Développement durable

Depuis 2016, j'assure également les enseignements de développement durable au sein du Master Génie Industriel parcours Maintenance et Maîtrise des Risques Industriels (MMRI), Faculté des Sciences, Université Paris Est Créteil.

Depuis 2020, j'assure un module d'Energie Solaire Thermique au sein du Master International Energies Renouvelables et Efficacité Energétique, Faculté des Sciences UPEC ainsi qu'un module d'Introduction à l'énergie au département Systèmes d'Informations de l'Ecole Publique d'Ingénieurs en Santé et Numérique (EPISEN, UPEC).

En parallèle de mon service principal, j'ai effectué des interventions en vacances au sein des Ecoles d'ingénieur suivantes :

- ESTP Paris (Ecole Spéciale des Travaux Publics ; Cachan 94) : Application de physique, 2014-2015
- ICAM Paris-Sénart (Institut Catholique des Arts et Métiers ; Lieusaint 77) : Transfert de chaleur, 2014 à 2017

Chapitre II : Performances des systèmes énergétiques durables

II. Performances des systèmes énergétiques durables

II.1. Introduction

Depuis le milieu du vingtième siècle, l'utilisation massive d'énergie provoque à la fois la raréfaction des énergies fossiles et l'accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. On estime que l'humanité consomme l'énergie disponible des millions de fois plus vite qu'elle n'avait été stockée ou produite par divers processus naturels (plantes, roches, océan). De plus, le coût de l'énergie s'est fortement accru ces dernières années faisant du développement durable un enjeu majeur du XXI^e siècle.

Les objectifs fixés en 2008 à horizon 2020 par le programme 20/20/20 (diminution de 20% des émissions de gaz à effet de serre, de 20% la consommation d'énergie, 20% d'énergies renouvelables) ont guidé le début de ma carrière. Ils ont été, depuis, remplacé par de nouveaux objectifs à horizon 2050. En effet, la France a adopté en 2019 le projet de loi « Energie-Climat » avec pour objectif la neutralité carbone en 2050. Pour cela, deux axes ont été choisis : premièrement le maintien de l'activité nucléaire qui permet une indépendance énergétique sans émissions de gaz à effet de serre mais dont nous connaissons tous les problèmes (déchets, risques d'accident etc...) et le développement des énergies renouvelables.

Afin que ceci ne reste pas un vœu pieux, nous devons, nous, énergéticiens, proposer des systèmes énergétiques durables permettant de répondre à la demande croissante, tout en diminuant drastiquement les impacts sur l'environnement (émissions, déchets, utilisation des ressources) et en prenant en compte le critère économique. En effet, si nous voulons atteindre les objectifs à horizon 2050, il est impératif que les systèmes à énergies renouvelables soient attractifs et économiquement concurrentiels des systèmes traditionnels.

C'est ainsi que ce chapitre s'attache à décrire une partie de mes activités de recherche sur l'amélioration des performances des systèmes énergétiques durables. J'ai choisi de l'illustrer à travers quelques exemples en commençant par la géothermie. Cette dernière est une énergie parfois marginalisée mais qui a sa place dans le mix énergétique de demain puisque largement disponible et offrant une source thermique stable, contrairement à d'autres énergies intermittentes (solaire ou éolien). Son utilisation est variée et ne se limite pas à son exploitation classique permettant d'extraire la chaleur du sous-sol, mais peut également être couplée à l'énergie solaire thermique pour des applications de stockage ou être utilisée comme source de refroidissement d'un procédé grâce à ses propriétés de dissipation thermique.

Enfin, je présenterai les travaux en cours ouvrant la voie à de nombreuses perspectives dans ce domaine à travers deux collaborations nouvelles : l'utilisation d'un matériau thermoélectrique pour application photovoltaïque dans la continuité des travaux de Zakaria Bekkar et la valorisation énergétique des effluents de station d'épuration, dans le cadre de la thèse de Luca Zanatta.

II.2. Intensification des transferts thermiques des sondes géothermiques

Cette partie résume les activités de recherche menées entre 2008 et 2011 dans le cadre du contrat CIFRE avec l'entreprise spécialisée dans le domaine de la géothermie Dominguez Energie basée à Argelès-sur-Mer (66). Une partie des résultats est issue du stage d'Asmaa Bourriach [STA 5]. Ce paragraphe a donné lieu à la publication [1].

II.2.1. Identification du facteur limitant au transfert thermique

Cette partie est dédiée à l'étude préliminaire du système géothermique classique afin de déterminer les possibilités d'évolution pour améliorer l'interface et les transferts thermiques entre la sonde géothermique et le sous-sol environnant. Le système géothermique est de conception simple : le transfert de chaleur qui s'établit entre le fluide caloporteur (eau ou eau additionnée d'antigel) et le sous-sol, dépend de la résistance thermique globale radiale [Trillat-Berdal 2006]. Cette résistance thermique est composée de plusieurs résistances en série : la résistance interne par convection entre le fluide caloporteur et la paroi interne du tube, la résistance par conduction dans la paroi du tube en polyéthylène haute densité (PEHD), la résistance par conduction dans le matériau de remplissage du forage, la bentonite, ainsi que la résistance par conduction induite par le sol lui-même (Figure II-1). La configuration d'une sonde géothermique en double U étant la plus couramment utilisée nous nous concentrerons sur cette configuration particulière.

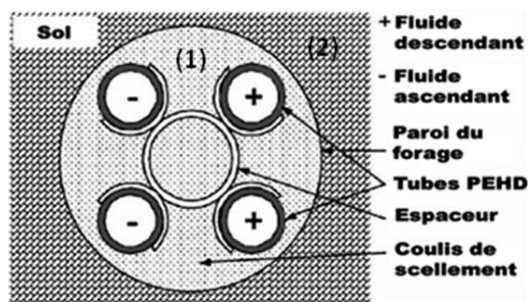


Figure II-1 : Vue en coupe d'un forage géothermique et d'une sonde en double U incluant un espaceur. (+) fluide descendant, (-) fluide ascendant, (1) bentonite, (2) sous-sol

L'analyse de ces résistances thermiques et des gradients thermiques correspondants permet de déterminer le facteur principal limitant le transfert thermique. Par conséquent, l'intensification de la conductivité de ce facteur déterminé comme étant limitant, et donc la diminution de la résistance thermique globale à l'interface sonde géothermique/sol, doit entraîner une amélioration significative des performances du système.

Cette analyse a tout d'abord été réalisée numériquement sur la géométrie représentée Figure II-1, grâce au logiciel COMSOL®, en utilisant les paramètres de simulation répertoriés dans le Tableau II-1. Le diamètre de forage de 0,16 m est une valeur classique utilisée en France pour les applications dédiées à l'habitat.

Fluide (eau)	Conductivité thermique	$0,6 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
	Température	275 K
	Coefficient de convection	$2500 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$
Tube en PEHD	Conductivité thermique	$0,6 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
	Diamètre intérieur	$2,6 \cdot 10^{-2} \text{ m}$
	Diamètre extérieur	$3,2 \cdot 10^{-2} \text{ m}$
Forage (bentonite)	Conductivité thermique initiale	$1,5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
	Diamètre	0,16 m
Sol	Conductivité thermique	$3 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
	Température	288K

Tableau II-1 : Valeurs des paramètres utilisés pour la simulation numérique

La Figure II-2 représente l'évolution de la température dans les différents éléments composant un forage géothermique ainsi que le sous-sol environnant, simulée par modélisation numérique sous COMSOL®. Les hypothèses de température du fluide caloporteur (2°C) et de température initiale du sous-sol (15°C) ont été prises arbitrairement, l'objectif ici étant simplement de déterminer les résistances thermiques principales d'un tel procédé.

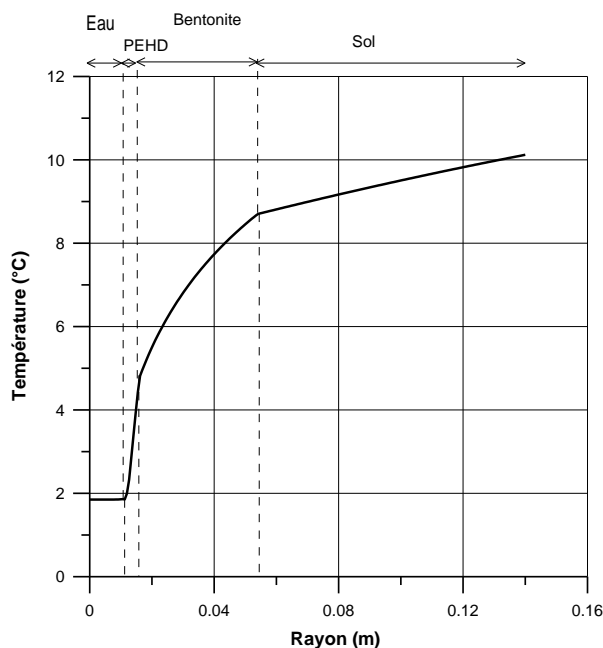


Figure II-2 : Evolution radiale de la température dans un forage géothermique

On peut voir clairement que deux éléments entraînent un fort gradient thermique radial, il s'agit du tube en polyéthylène haute densité (PEHD) et de la bentonite avec des gradients respectifs de 3°C (sur 3 mm d'épaisseur) et 4°C (sur quelques centimètres d'épaisseur). Le transfert de chaleur global entre le fluide et le sol peut donc être largement intensifié en améliorant, dans un premier temps les propriétés thermiques du coulis de scellement et, dans un deuxième temps, celles du tube en PEHD. Il paraît délicat de travailler sur les propriétés du tube, c'est pour cela que cette étude a uniquement porté sur l'intensification de la conductivité thermique de la bentonite.

Les résultats obtenus par analyse numérique, pour une large gamme de conductivité thermique de la bentonite, sont représentés sur la Figure II-3. Pour des valeurs de conductivité correspondant à la bentonite classique (1,5 à 2 $W m^{-1} K^{-1}$), la principale résistance thermique est due à la bentonite (de 65 à 45%), suivie par la paroi des tubes en PEHD de la sonde (de 35 à 52%). La part correspondant au transfert convectif entre le fluide caloporteur et la paroi interne du tube reste dans tous les cas très faible (moins de 5%).

Comme nous pouvons le voir sur la Figure II-3, une augmentation de la valeur de la conductivité thermique de la bentonite jusqu'à 7 $W m^{-1} K^{-1}$ entraîne une chute de la part de sa résistance dans la résistance globale, à environ 20%. La résistance totale du forage diminuant de 0,1 $K W^{-1}$ (pour une bentonite classique) à 0,07 $K.W^{-1}$, soit une diminution de 30%.

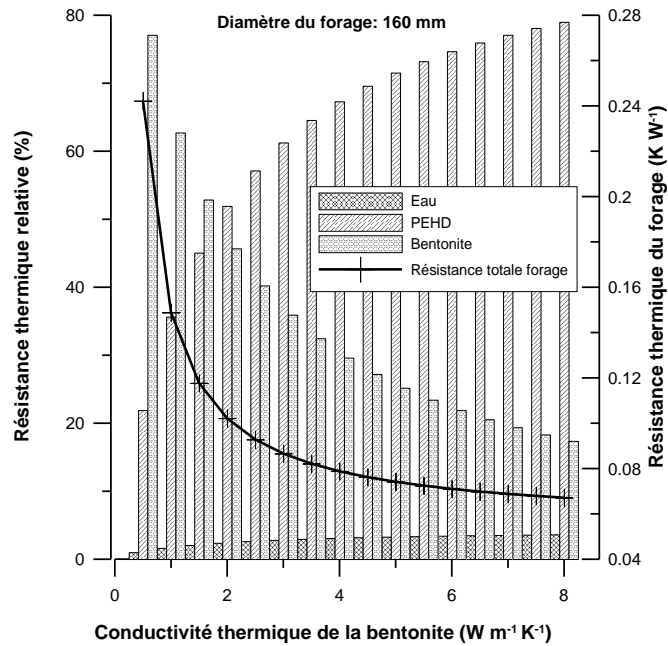


Figure II-3 : Résistance thermique du forage en fonction de la conductivité thermique de la bentonite

Ainsi, une conductivité thermique de $5 W m^{-1} K^{-1}$, a été utilisée comme valeur cible à atteindre pour l'élaboration des composites à base de bentonite.

En s'appuyant sur ces résultats numériques, il y a donc un réel intérêt à intensifier la conductivité thermique de la bentonite pour améliorer les performances d'un forage. A besoin égal en puissance, si la performance du forage est améliorée, sa profondeur nécessaire au bon fonctionnement de la pompe à chaleur, sera donc diminuée entraînant une baisse des coûts de l'installation.

On retrouve également cet effet sur la Figure II-4, qui illustre l'évolution de la puissance extraite par une sonde géothermique par mètre de forage en fonction de la conductivité thermique de la bentonite. Nous retrouvons la valeur cible comprise en 5 et $7 W m^{-1} K^{-1}$ définie précédemment, la puissance linéaire extraite se trouvant pour cette valeur autour de $80 W m^{-1}$.

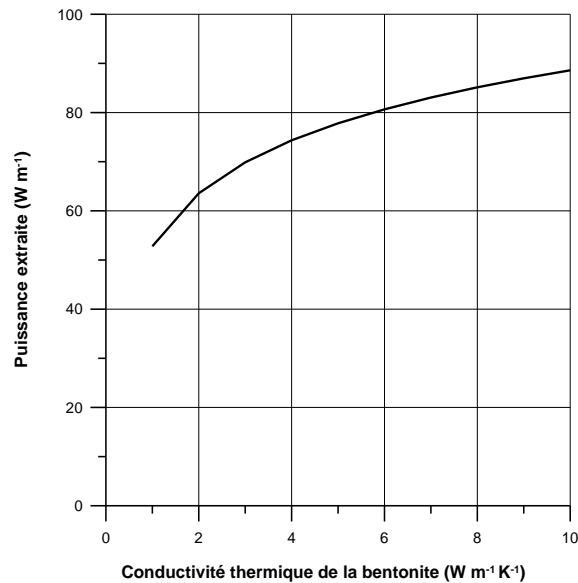


Figure II-4 : Puissance linéaire extraite par un forage géothermique dans sa configuration double U en fonction de la conductivité thermique de la bentonite

Les résultats de ces analyses doivent être considérés comme des ordres de grandeurs et non comme des valeurs absolues. Cependant, pour différentes valeurs de température de sol et de température initiale les tendances dégagées de cette étude préliminaire sont confirmées.

II.2.2. Dopage thermique au graphite

L'intensification de la conductivité thermique d'un matériau solide peut être réalisée en élaborant un matériau composite par intégration d'un solide dispersé conducteur. Concernant l'application géothermique, peu de travaux ont été réalisés dans ce sens, citons [Jobmann 2009] et [Lee 2010]. Cette approche utilisant le graphite comme matériau conducteur a déjà été largement appliquée à différents matériaux comme les sels réactifs [Olivès 2001], adsorbants [Py 2002], les matériaux organiques à changement de phase [Py 2001] ou les PCM inorganiques. Le matériau dispersé conducteur sélectionné est le graphite. Ce dernier est inerte, respectueux de l'environnement, très stable, disponible à échelle industrielle et présente une conductivité thermique intrinsèque très élevée.

Les conductivités thermiques effectives des composites élaborés avec ces deux types de graphite ont été comparées à la valeur cible définie au paragraphe précédent.

Après plusieurs essais, l'utilisation du graphite naturel expansé (GNE) a été choisie.

Ce dernier est obtenu par exfoliation thermique d'intercalats de paillettes de graphite. Le résultat de l'exfoliation est composé de vermicules (Figure II-5). La densité apparente d'un lit de vermicules de GNE est très faible, environ 3 kg m^{-3} en général.

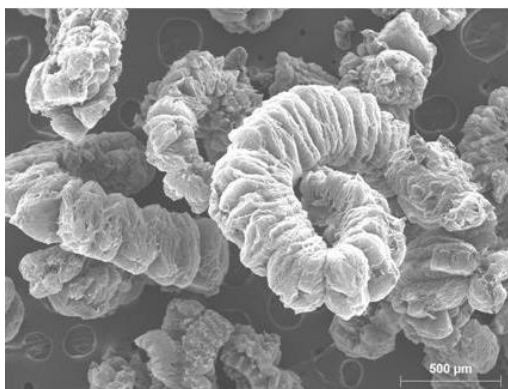


Figure II-5 : Vue au microscope électronique à balayage de vermicules de graphite naturel expansé (GNE)

L'approche choisie est de créer des matrices de GNEC (GNE compressé) qui seront par la suite broyées pour former des particules poreuses et conductrices de graphite notées GNEg. Les particules de GNEg pourront être ensuite dispersées dans le mélange bentonite/eau afin d'en augmenter leur conductivité thermique effective.

II.2.2.1. Dopage de la bentonite par dispersion de GNEg

Ces essais ont été réalisés à différentes masses volumiques intrinsèques des particules de GNEg, et pour des taux de dopages différents (jusqu'à 25% massique). La plage de masse volumique testée se trouve entre 20 et 150 kg m⁻³, qui correspond à des taux de compression facilement réalisables. Les conductivités thermiques des composites réalisées ont été caractérisées par la méthode de la barre divisée et du fil chaud [Jannot 2011].

La masse volumique de GNEg qui semble être optimale pour intensifier la conductivité thermique effective de la bentonite, est de l'ordre de 100 kg m⁻³.

Ce comportement s'explique par l'influence, de deux effets antagonistes, sur la conductivité thermique du composite. Pour une quantité de graphite égale, l'augmentation de la masse volumique des particules de GNEg diminue le nombre de particules conductrices dispersées dans le composite, mais entraîne également une augmentation de la conductivité thermique interne de la particule elle-même. Pour une masse volumique inférieure à 100 kg m⁻³, le nombre de particules conductrices dispersées dans le composite est assez important pour créer un réseau de particules interconnectées entre elles et l'effet de l'augmentation de conductivité thermique interne du GNEg est sensible. Ensuite, à partir de 120 kg m⁻³, le nombre de particules conductrices est plus faible et tend à déconnecter le réseau conducteur créé. On observe alors une diminution de la conductivité thermique effective.

La Figure II-6 représente les résultats obtenus pour des essais de dopage au GNEg de masse volumique 100 kg m⁻³ (noté GNEg₁₀₀), pour des teneurs en graphite allant jusqu'à 25%.

Les points correspondent aux valeurs moyennes obtenues au cours des essais ainsi que les valeurs minimales et maximales représentées par les barres verticales. Ces résultats ont pu être corrélés avec les expressions suivantes :

Pour $q \leq 15\%$

$$\lambda = 2,3 + 1,3.q^{0,51}$$

Pour $q \geq 15\%$

$$\lambda = -0,106.q + 8,96$$

Équation II-1

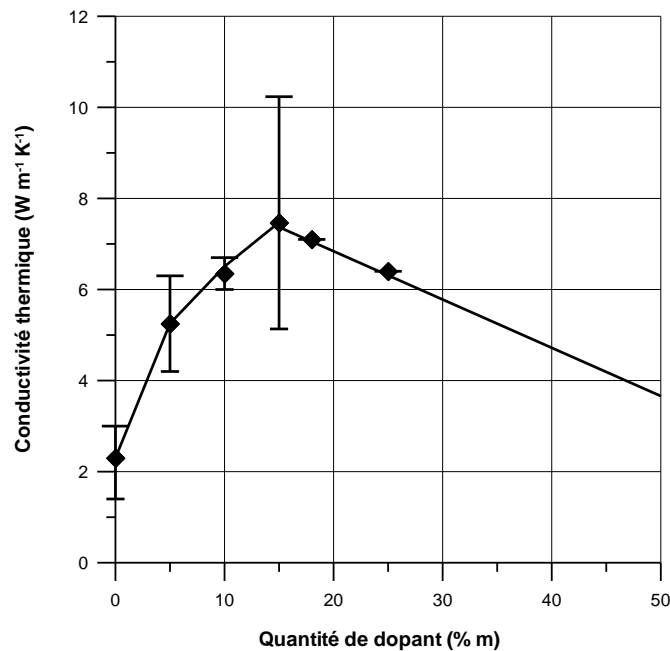


Figure II-6 : Conductivité thermique des composites bentonite/GNEg100

Cette expression, avec rupture de pente, rend bien compte de l'effet de l'ajout de GNEg₁₀₀ sur la conductivité thermique effective du composite. Cette tendance particulière s'explique également par l'action de deux effets antagonistes, la création d'un réseau conducteur de particules de GNEg₁₀₀ interconnectées et la porosité intrinsèque de chaque particule. L'ajout de particules de GNEg₁₀₀ jusqu'à 15% m intensifie la conductivité thermique effective du composite. Ensuite, l'effet inhibiteur de la porosité de ces particules devient prépondérant devant l'intensification en conductivité thermique, et entraîne donc une chute, de λ_b . Ce phénomène est d'autant plus visible pour des taux d'ajout de GNEg₁₀₀ plus importants (supérieurs à 25% m), puisque le composite obtenu devient fortement poreux et diminue fortement sa tenue mécanique en plus de diminuer significativement sa conductivité thermique effective.

Mais en reprenant la valeur cible établie dans l'analyse préliminaire de $5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, les composites formés de bentonite et de GNEg₁₀₀ atteignent cette valeur pour un taux de dopage thermique de l'ordre de 5% m.

II.2.3. Etude technico-économique

La valeur cible définie à $5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ est obtenue pour un taux de dopage au GNEg_{100} compris entre 5 et 10 %m. L'objectif conservé tout au long de ce travail, était de préserver le caractère rustique du système géothermique, avec des matériaux disponibles à coûts raisonnables. Il est donc indispensable de réaliser une étude technico-économique du système intensifié thermiquement, afin de savoir si les améliorations apportées ne sont pas aberrantes au niveau économique.

Le graphite ayant un coût propre (environ 35 € kg^{-1} pour le GNE), son ajout dans le coulis de bentonite va entraîner un surcoût du prix du mètre linéaire de forage, qui est initialement estimé à 50 € par mètre en général. Ce coût linéaire comprend le forage, la sonde géothermique et le coulis de bentonite pure. Mais l'ajout de graphite va également améliorer la conductivité thermique effective de la bentonite et donc la puissance linéaire qu'il est possible d'extraire d'un forage (voir Figure II-4). Ceci permet donc, à puissance demandée égale, de mettre en œuvre un forage plus court que dans le cas de la bentonite non dopée. Le prix du mètre linéaire de forage est certes plus élevé mais la profondeur de forage nécessaire devient moins importante. Il faut trouver un optimum entre ces deux effets antagonistes grâce à l'étude technico-économique.

Les paramètres utilisés lors de cette étude technico-économique sont représentés dans le Tableau II-2.

Paramètres	Nom	Valeur et unité
L_0	Longueur de forage non dopé	1 m
D_f	Diamètre du forage	0,16 m
D_s	Diamètre d'une sonde	0,032 m
ρ_{GNEg}	Masse volumique GNEg	100 kg m^{-3}
C_{GNE}	Prix du GNE	€ kg^{-1} (selon choix)
P_0	Puissance linéaire extraite forage non dopé	60 W m^{-1}
$P_{\text{dopé}}$	Puissance linéaire extraite forage dopé	Voir Figure II-4
λ_b	Conductivité thermique bentonite dopée	Voir Figure II-6
q	Quantité de dopant	%m (selon choix)
C_{1W}	Coût du watt extrait	€ W^{-1}

Tableau II-2 : Paramètres utilisés lors de l'étude technico-économique

Les valeurs de diamètres et de prix du forage sont les valeurs classiques utilisées dans les installations géothermiques. Les résultats, représentés sous forme de prix du forage par unité de puissance extraite, sont calculés à partir de l'équation ci-dessous :

$$C_{1W} = C_{\text{forage+sonde}} + C_{GNEg} \quad \text{Équation II-2}$$

$$C_{1W} = \frac{L_{\text{dopé}} \cdot C_0}{P_{\text{dopé}} \cdot L_{\text{dopé}}} + \frac{V_{\text{bentonite}} \cdot q \cdot \rho_{GNEg} \cdot C_{GNEg}}{P_{\text{dopé}} \cdot L_{\text{dopé}}} \quad \text{Équation II-3}$$

$$\text{Avec } V_{\text{bentonite}} = \pi \left(\frac{D_f^2}{4} - \frac{D_s^2}{4} \cdot 4 \right) \cdot L_{\text{dopé}} \quad \text{Équation II-4}$$

$$\text{D'où : } \boxed{C_{1W} = \frac{1}{P_{\text{dopé}}} \left[C_0 + \left(\frac{D_f^2}{4} - D_s^2 \right) \cdot \pi \cdot q \cdot \rho_{GNEg} \cdot C_{GNEg} \right]} \quad \text{Équation II-5}$$

Les résultats principaux de l'analyse technico-économique sont résumés dans le Tableau II-3 ci-dessous :

	Puissance linéaire extraite (W m ⁻¹)	Profondeur totale nécessaire (m)	Prix unitaire (€ W ⁻¹)	Prix total du forage (€)
Forage non dopé	60	200	0,83	9960
Forage dopé (5% m GNEg ₁₀₀)	80	150	0,72	8640
Différence	+33%	-25%	-13%	-13%

Tableau II-3 : Récapitulatif des résultats de l'étude technico-économique appliquée à une PAC de 15kW avec un COP de 4

Ainsi, les optimums thermique et économique ont été obtenus pour un taux de dopage de 5% massique de graphite, entraînant une augmentation de 33% de la puissance thermique extraite du sous-sol et une diminution de 13% du coût total du forage.

II.3. Stockage d'énergie par couplage solaire/géothermie

Cette partie résume les travaux menés dans le cadre du projet ANR Stock-E SOLARGEOTHERM entre 2008 et 2012. Ce paragraphe a donné lieu à la publication [2]

II.3.1. Présentation et objectifs du projet

Ce projet, financé par l'appel à projets 2008 du programme STOCK-E de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), regroupe quatre partenaires complémentaires : le BRGM de Montpellier (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) coordinateur du projet, les laboratoires PROMES (PROcédés Matériaux Energie Solaire, UPR CNRS) et ELIAUS (Electronique Informatique Automatique et Systèmes, initialement EA Université de Perpignan Via Domitia, rattaché depuis au laboratoire PROMES) et la société Dominguez-Energie basée à Argeles sur Mer, spécialiste de la géothermie basse température.

En partant du constat que l'utilisation de capteurs solaires thermiques conduit à une production de chaleur intermittente et décalée dans le temps par rapport aux besoins, la nécessité de stocker cette énergie abondante semble inéluctable. Le but principal du projet est donc d'étudier et de modéliser la possibilité de stocker et déstocker de façon optimale cette énergie dans un massif rocheux, le sous-sol constituant un réservoir de stockage potentiellement important. Le projet s'attache, dans un premier temps, à évaluer les capacités du massif rocheux à stocker et déstocker l'énergie thermique produite par une installation solaire grâce à un transfert de chaleur obtenu au moyen de sondes géothermiques. Le nombre de projets de recherche sur le sujet est relativement peu important. Mais depuis le début des années 2000 on constate intérêt nouveau pour le couplage d'énergies renouvelables au sein de l'habitat, dans différents pays comme l'Allemagne [Schmidt 2004], la Suède [Lundh 2008], la Suisse [Pahud 2004], la France [Trillat-Berdal 2006] [Nou 2011], les Etats-Unis [Chiasson 2003], la Chine [Wang 2008] [Bi 2004] ou encore la Turquie [Ozneger 2005] et [Hepbasli 2007].

II.3.2. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental a été réalisé sur la carrière de schiste de la commune de Montauriol (66). Le dispositif était composé de 42m² de capteurs solaires thermiques orientés plein Sud et inclinés d'un angle de 45°, de trois forages profonds de 165 à 185 mètres (nommés A, B et C), de trois forages courts de mesures de 20 mètres (D, E et F) et d'un aérotherme de 3 kW de puissance, servant à simuler la charge thermique et les besoins en chauffage d'une maison individuelle classique (120m², 4 personnes etc....).

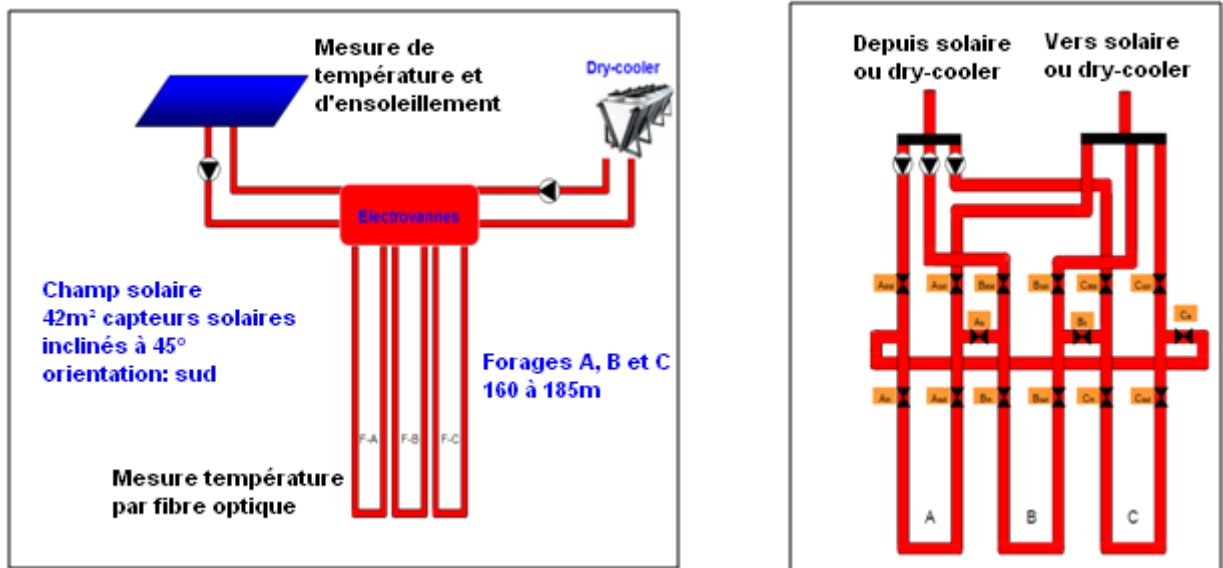


Figure II-7 : Synoptique du dispositif expérimental

Les forages profonds ont été isolés thermiquement sur leurs 5 premiers mètres afin de limiter l'influence de la température extérieure. Les 6 forages étaient équipés de fibres optiques permettant ainsi de mesurer la température dans la bentonite à proximité de la sonde géothermique en PEHD. Des mesures de températures sont également effectuées au niveau du champ solaire, en entrée et sortie de chaque rangée de capteurs solaires. Une mesure d'ensoleillement est également disponible et une mesure de débit global et par rangée de capteurs a été réalisée de manière ponctuelle. Les trois forages profonds d'injection de chaleur (A, B et C) sont distants en surface les uns des autres de 5 mètres pour former un triangle équilatéral (Figure II-8).

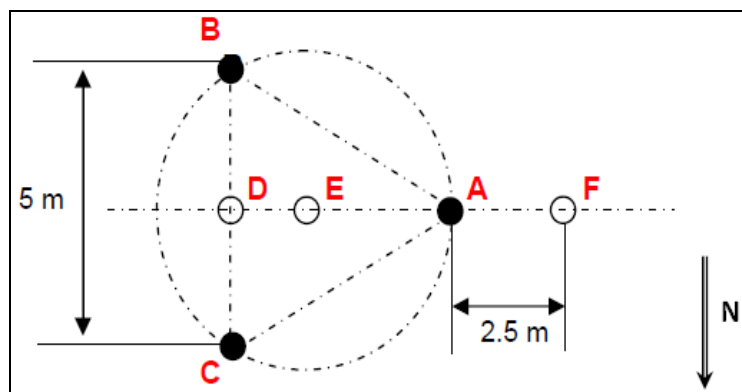


Figure II-8 : Position des 3 forages profonds ainsi que des 3 forages courts de mesure

Le principe était l'injection de la chaleur fournie par le champ solaire dans le sous-sol pendant plusieurs mois de printemps et d'été puis de venir l'extraire durant les mois d'hiver par l'intermédiaire des sondes géothermiques.

II.3.3. Principaux résultats expérimentaux

Une campagne expérimentale consistant à injecter l'intégralité de la chaleur produite par le champ solaire sur un seul forage (forage B en l'occurrence) a été menée. L'observation des différents résultats expérimentaux a permis de répondre à plusieurs interrogations :

- quelle est la distance d'influence d'un forage et donc du gradient thermique radial obtenu, qui assure les transferts de chaleur de la sonde géothermique vers le massif rocheux ?
- quelle est la profondeur optimale des forages pour obtenir une meilleure efficacité de stockage ?
- quelle est la durée de stockage obtenue ?

II.3.3.1. Gradient thermique radial obtenu

Afin de déterminer s'il est possible de stocker de l'énergie thermique dans le massif rocheux, la connaissance du gradient thermique radial obtenu est primordiale, celui-ci étant la force motrice du transfert de chaleur dans le sous-sol.

L'injection de chaleur se faisant sur le forage B, la présence de deux autres forages (A et C) équipés de fibre optique sur toute leur profondeur a servi de valeur référence de la température du sous-sol permettant ainsi de déterminer la zone d'influence thermique de l'injection de chaleur.

La Figure II-9 (a) rappelle la température des forages B et C en fonction de la longueur de la sonde le 5 août à midi (période d'injection) et du forage C dans son état initial (1^{er} janvier). Nous constatons que la température du forage passif C n'évolue pas au cours du temps (mise à part une légère diminution de l'ordre de 0,3°C en fond de forage), malgré l'injection de chaleur depuis plusieurs mois dans le forage B. Ceci prouve que la température du forage C n'est pas influencée par celle du forage B et qu'il est donc possible d'utiliser les forages passifs (A et C) comme référence.

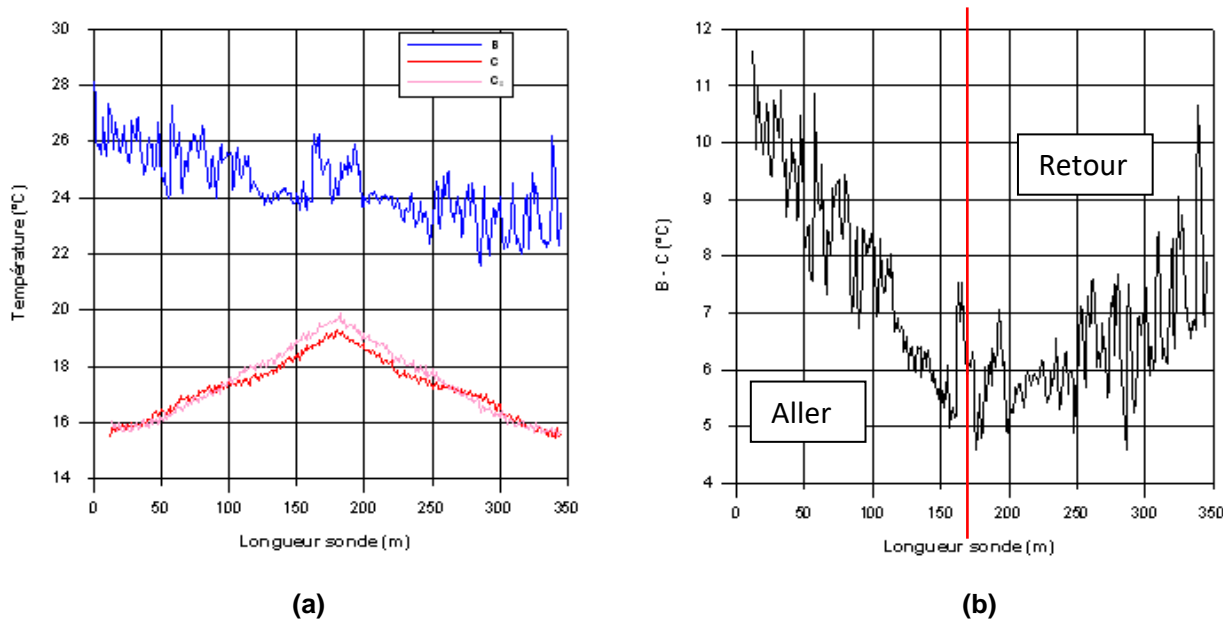


Figure II-9 : (a) Température des forages B et C en période d'injection et de C à l'état initial ; (b) Différence de température entre le forage B et le forage passif C en période d'injection, en fonction de la longueur de la sonde

La Figure II-9 (b) est l'exemple de l'utilisation d'un forage passif, ici le C, comme mesure de référence. En effet, ce graphe représente la différence de température entre les deux forages (actif et passif) en fonction de la longueur de la sonde géothermique (aller puis retour), en pleine période d'injection, le 5 août à midi. Cette différence de température, représente le gradient thermique radial disponible pour le transfert de chaleur. Il est d'environ 11°C au sommet du forage sur la branche aller, puis décroît avec la profondeur jusqu'à atteindre 5°C en fond de forage avant de remonter progressivement autour de 7 à 8°C en haut de la branche retour. La décroissance observée en profondeur a deux explications : la première est qu'avec le gradient géothermique naturel, la température du forage C est plus élevée en profondeur (de l'ordre de 2 à 3°C tous les 100 m). La deuxième explication est que le fluide caloporteur cède peu à peu son énergie à son environnement et voit sa température décroître ; d'où un transfert de chaleur limité. La valeur minimale se trouve au fond du forage, profondeur à laquelle la température du forage C est la plus élevée. Ensuite, sur la branche remontante (correspondant à une longueur de sonde supérieure à 185m sur le graphe), la valeur de la différence de température augmente peu à peu pour atteindre environ 8°C en haut du forage. Ceci s'explique toujours par le gradient géothermique naturel qui agit sur le forage C. La valeur reste néanmoins plus faible que pour la branche descendante puisque le fluide caloporteur a perdu une grande partie de son énergie initialement disponible.

II.3.3.2. Profondeur optimale des forages

Une autre interrogation concerne la profondeur de forage optimale pour réaliser un stockage d'énergie efficace. La Figure II-10 représente l'évolution de la température sur une journée du mois d'août (du matin 8h au lendemain 8h) à différents niveaux de profondeur.

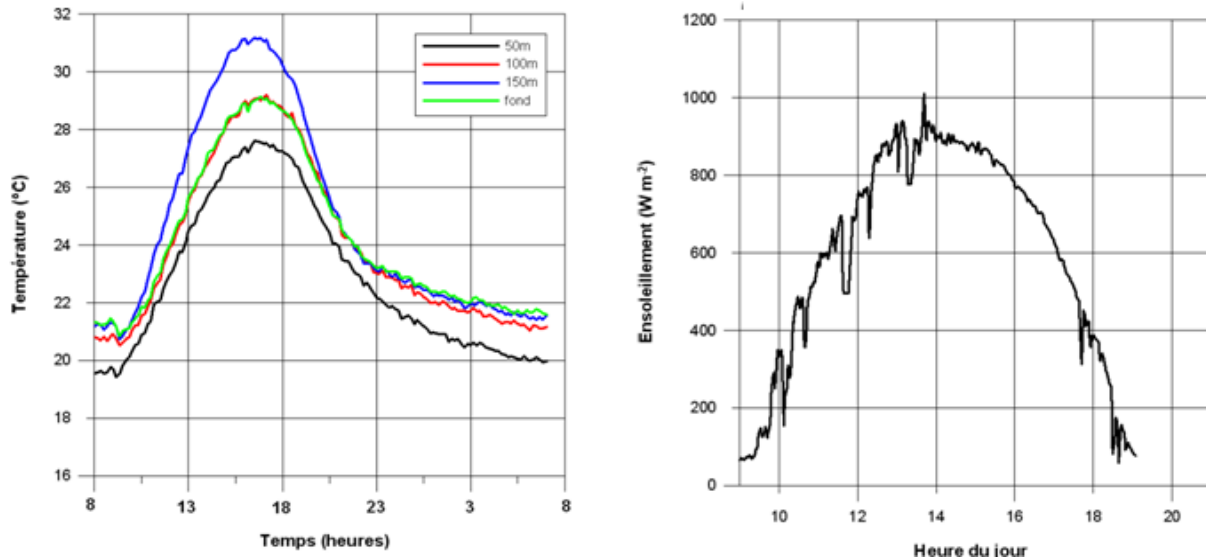


Figure II-10 : Evolution de la température du forage B sur une journée en pleine injection de chaleur à plusieurs niveaux de profondeur et ensoleillement

La journée choisie ici est une journée bien ensoleillée afin de mettre en avant les différents phénomènes entrant en jeu et de s'affranchir d'un ensoleillement trop variable. En début de journée, on retrouve l'effet du gradient géothermique classique, la température du forage étant de 19,5°C à 50 mètres de profondeur et d'environ 21,5°C en fond de forage. Le maximum de température est atteint vers 17 heures pour décroître progressivement au cours de la soirée et de la nuit. La courbe qui donne les températures les plus basses est celle mesurée à 50 mètres de profondeur. Ceci est dû à la température initiale du massif rocheux à 50 mètres inférieure aux autres profondeurs. Les températures les plus élevées sont observées pour une profondeur de 150 mètres. La température au fond du forage est au même niveau que celle détectée à 100 mètres de profondeur. Bien que la température initiale soit plus élevée en fond de forage, le fluide caloporteur y dispose d'un gradient thermique radial moindre. Ceci explique donc un niveau de température plus bas en fond de forage. Cette observation justifie la question de la profondeur optimale d'un forage pour des applications de stockage d'énergie. Il est clair dans notre exemple que les derniers mètres de forage ne sont que peu utiles, la température maximale étant atteinte autour de 150m de profondeur. Il est donc plus judicieux de réaliser des forages plus courts, dans ce type

d'applications, pour diminuer les pertes en température et donc en performance ainsi que les coûts d'investissement.

II.3.3.3. Durée caractéristique de stockage

La question principale étudiée dans cette partie concerne la durée du stockage qu'il est possible d'obtenir en analysant le comportement du massif rocheux pendant une période d'injection de chaleur puis pendant une phase de relaxation naturelle.

Est-ce qu'un stockage intersaisonnier est envisageable ou doit-on s'orienter vers un stockage de courte durée type jour/nuit ?

La Figure II-11 représente le rapport entre la chute de température pendant une nuit et l'augmentation de température pendant la journée précédente. La journée choisie ici est une journée représentative de ce qu'il se passe pendant une période d'injection.

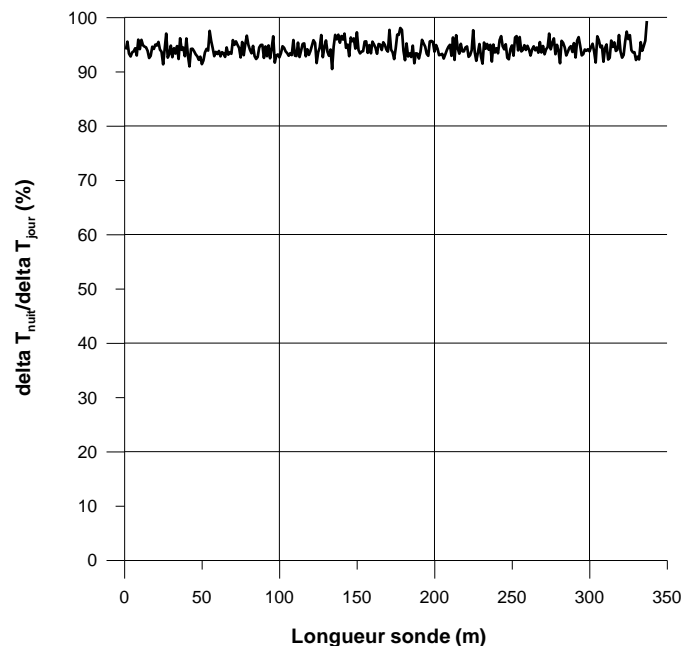


Figure II-11 : Rapport entre la chute de température le long du forage B pendant la nuit et l'augmentation de température pendant la journée

Ce rapport nous montre donc que sur toute la longueur de la sonde géothermique (aller et retour) environ 95% de l'énergie injectée pendant la journée est diffusée pendant la nuit dans le massif rocheux. Ce phénomène, couplé au fait que la température du forage revienne à un niveau proche de son état initial, en fin de nuit, prouve que l'énergie injectée dans le sous-sol est en grande partie perdue par notre dispositif.

Un autre exemple de la diffusion importante de l'énergie injectée dans le massif rocheux est représenté sur la Figure II-12. Celle-ci illustre l'évolution de la température au fond du forage B du 1^{er} au 31 août 2010.

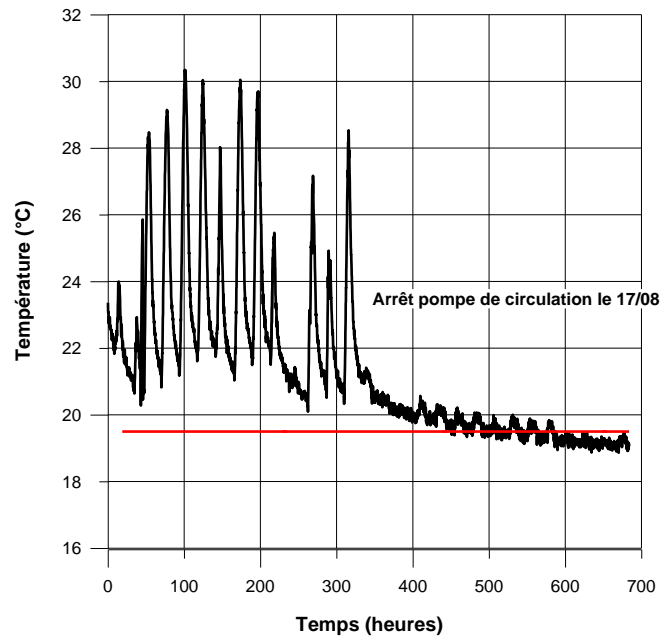


Figure II-12 : Température au fond du forage B (180m) au cours du mois d'août 2010

Un incident sur le site expérimental s'est avéré être très instructif pour notre étude. En effet, le 17 août, la pompe de circulation a été arrêtée suite à un incident technique et n'a redémarré que courant septembre. Jusqu'à cet événement, nous retrouvons le comportement classique observé, caractérisé par des oscillations jour/nuit. A partir de l'arrêt de la pompe de circulation, plus aucune énergie n'est injectée dans le forage et sa température va diminuer progressivement jusqu'à atteindre la valeur de sa température initiale en quelques jours seulement. A titre d'exemple, au fond du forage, la température va retrouver sa valeur initiale de 19,5°C seulement 4 jours après l'arrêt de l'injection d'énergie. On peut donc conclure aisément que réaliser un stockage intersaisonnier en injectant de l'énergie solaire dans un massif rocheux en mettant en œuvre des sondes géothermiques n'est pas envisageable dans les conditions testées sur le site de Montauriol. Un stockage de protection (du type jour/nuit ou pour compenser un passage nuageux par exemple) sur quelques heures peut néanmoins être envisagé. Il semblerait que la présence importante d'eau dans le sous-sol défavorise grandement le stockage de chaleur et est responsable du lessivage thermique de la roche.

Cependant, l'installation peut être détournée de son utilisation initiale de réservoir de stockage. Les résultats montrent que le sous-sol peut être vu comme une source potentiellement de refroidissement puisque permettant une dissipation thermique importante.

II.3.4. Développement d'un modèle numérique du comportement thermique

La modélisation du comportement thermique du sous-sol pendant l'injection de chaleur a été réalisée sous le logiciel Comsol®. Cette étude a été menée en deux temps : tout d'abord nous avons représenté un seul forage, le B, sur une période d'injection afin de valider le modèle avec les résultats expérimentaux obtenus par fibre optique. Par la suite, une fois le modèle comparé aux résultats expérimentaux, différentes configurations (injection sur plusieurs forages simultanément par exemple) ou comportement à long terme ont été extrapolées. Le modèle a été construit en pseudo 3D. Tout d'abord un modèle à une dimension a été établi afin de déterminer le profil de température axial du fluide caloporteur à l'intérieur de la sonde géothermique en fonction de la profondeur. Une fois ces résultats connus, ils pourront être facilement importés comme une condition aux limites d'un modèle 2D représentant une vue en coupe d'un forage complet.

Ce modèle à une dimension résulte d'un bilan thermique sur le fluide connaissant son débit, l'évolution de sa température en entrée (qui correspond à la sortie du champ solaire) ainsi que tous les paramètres détaillés dans le Tableau II-4.

Paramètres	Valeur	Unité
Profondeur	Selon choix	m
Débit massique	0,53	kg s ⁻¹
Rayon équivalent du forage	5,7.10 ⁻²	m
Rayon tube en PEHD	16,3/20.10 ⁻³	m
Conductivité thermique du PEHD	0,5	W m ⁻¹ K ⁻¹
Conductivité thermique bentonite	2	W m ⁻¹ K ⁻¹
Distance à laquelle le sol est « non perturbé »	5	m
Conductivité thermique moyenne du sol	3,2	W m ⁻¹ K ⁻¹
Coefficient convectif côté fluide	2500	W m ⁻² K ⁻¹
Température initiale du sol	Selon profondeur	°C

Tableau II-4 : Paramètres utilisés lors de la modélisation 1D

La variable d'entrée du modèle à une dimension est la température de sortie du champ solaire en fonction du temps au long du mois de juillet 2010. La Figure II-13 représente les valeurs en entrée du modèle ainsi que les résultats obtenus à 180 mètres de profondeur.

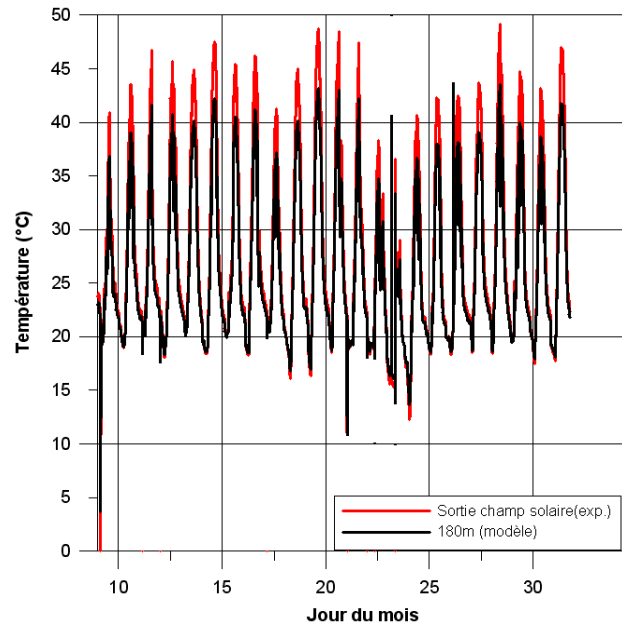


Figure II-13 : Température du fluide caloporteur dans la sonde géothermique sur tout le mois de juillet 2010 à 180 m de profondeur dans le puits B et en sortie du champ solaire

On observe, bien évidemment, que les pics de températures aux heures les plus chaudes de la journée se réduisent avec la profondeur, le fluide caloporteur cédant son énergie peu à peu. Le modèle réalisé nous permet de connaître cette évolution de température au cours du temps pour chaque profondeur mais pour des raisons de clarté, seule celle au fond du forage a été représentée sur le graphe. Les résultats sont ensuite extraits pour être exploités comme conditions d'entrée du modèle à deux dimensions dont la géométrie est représentée sur la Figure II-14.

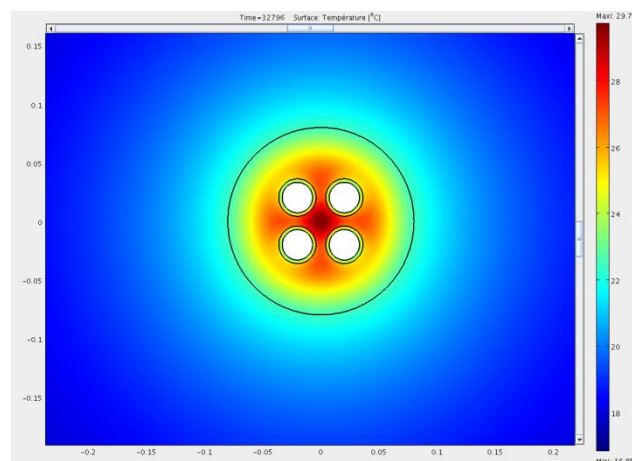


Figure II-14 : Géométrie du modèle à deux dimensions en coupe

Le modèle à deux dimensions réalisé représente un forage en coupe. On peut distinguer les quatre tubes formant le double-U de la sonde géothermique ainsi que la couche de bentonite colmatant le forage. La température de l'eau dans les tubes n'est pas calculée mais provient du modèle 1D. Chaque profondeur est simulée par pas de 10 mètres (une coupe à chaque fois) avec sa propre température de fluide évoluant au cours du temps. La totalité des paramètres utilisés pour ce modèle se trouvent dans le Tableau II-5. Les résultats de la modélisation du forage à 180 mètres de profondeur sont représentés sur la Figure II-15 ci-dessous.

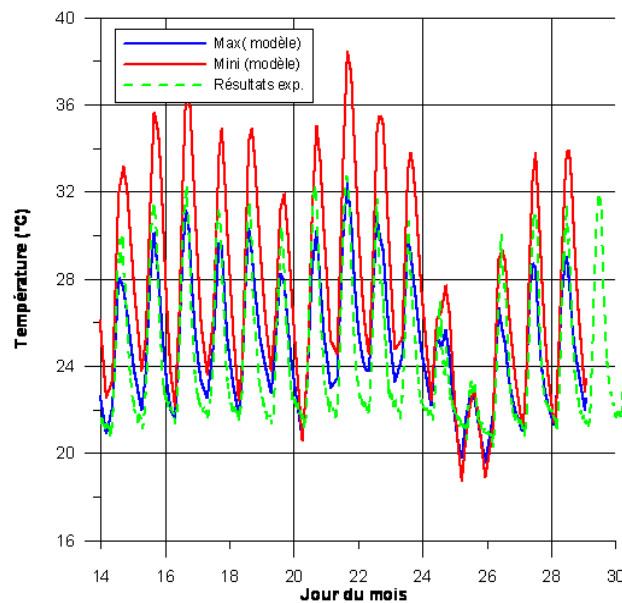


Figure II-15 : Température modélisée du forage B à 180 m de profondeur sur la deuxième quinzaine du mois de juillet 2010 : (---) température maximale possible, (---) température minimale possible ; (---) résultats expérimentaux

La Figure II-15 représente deux courbes correspondant à la position de la mesure de température qui donne la valeur la plus élevée, et celle qui donne la valeur la plus faible. En effet, la position de la fibre optique sur la périphérie du tube influe sur la mesure effective de la température du forage. Par conséquent, ne connaissant pas la position exacte de la mesure de température autour du tube d'injection de chaleur, le modèle ne pourra pas donner les valeurs exactes mesurées. Par contre, il peut nous donner des bornes minimales et maximales à l'intérieur desquelles la courbe de relevé de températures devrait se trouver. Si l'on compare les résultats obtenus par modélisation numérique aux résultats expérimentaux, l'allure générale étant respectée, ceci a permis de valider le modèle numérique développé. L'intérêt de cette deuxième étape de modélisation est de connaître l'évolution de la température en différents points du massif rocheux et de savoir si un stockage d'énergie est possible et sur quelle échelle de temps.

II.3.5. Modélisation de l'interaction entre trois forages actifs

Une fois le modèle validé, il a été possible de simuler l'injection sur les trois forages actifs. Le principe consiste à représenter les trois forages en « 3D approchée », c'est-à-dire en coupes successives réalisées tous les 10 mètres. La trajectométrie des forages ayant été réalisée, leurs positions sont connues, nous pouvons donc en déduire les écartements relatifs des uns par rapport aux autres. Comme précédemment, les valeurs de conductivité thermique et de température initiale du sol en fonction de la profondeur sont connues grâce aux mesures effectuées en amont. Les paramètres utilisés pour la modélisation de l'interaction des trois forages sont précisés dans le Tableau II-5.

Paramètres	Valeur	Unité
Diamètre forage	160	mm
Diamètre sonde géothermique	26/32	mm
Capacité calorifique PEHD	$1,85 \cdot 10^6$	$J m^{-3} K^{-1}$
Conductivité thermique PEHD	0,5	$W m^{-1} K^{-1}$
Capacité calorifique sol	$2,5 \cdot 10^6$	$J m^{-3} K^{-1}$
Conductivité thermique sol	Selon profondeur	$W m^{-1} K^{-1}$
Conductivité thermique bentonite	2	$W m^{-1} K^{-1}$
Capacité calorifique bentonite	$3,9 \cdot 10^6$	$J m^{-3} K^{-1}$
Coefficient de convection interne fluide et PEHD	2500 (corrélation)	$W m^{-2} K^{-1}$
Température initiale du sol	Selon profondeur	°C
Pas de temps de simulation	1	heure

Tableau II-5 : Paramètres de simulation pour l'interaction entre les trois forages

Les valeurs de température en entrée du forage sont issues de mesures réelles et l'évolution en fonction de la profondeur est issue du modèle à un seul forage (couplage modèle 1D et 2 D).

Avant d'exploiter les résultats du modèle, une donnée importante est la distance entre les forages en fonction de la profondeur, représentée sur la Figure II-16.

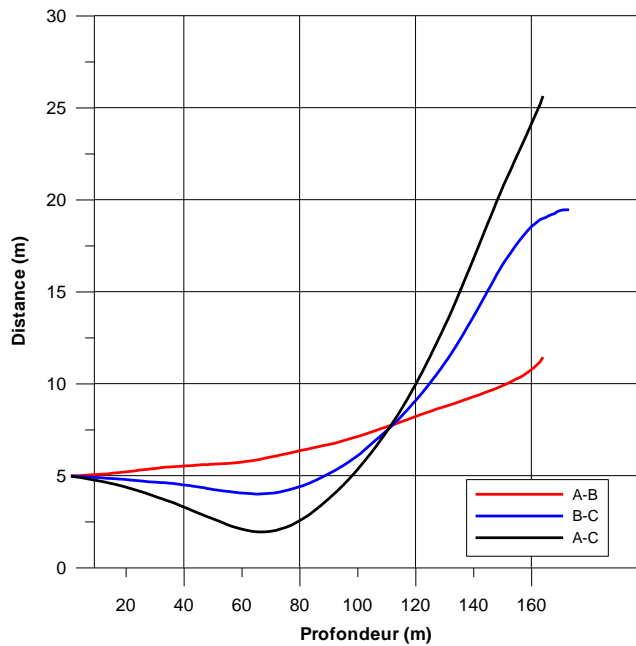


Figure II-16 : Distance entre les forages en fonction de la profondeur

On constate que sur les 20 premiers mètres, les forages sont distants les uns des autres d'environ 5 mètres comme en surface. Les forages A et B tendent à s'éloigner peu à peu l'un de l'autre progressivement jusqu'à un peu plus de 10 mètres à 160 mètres de profondeur. Concernant les écarts entre B et C ainsi que A et C, on remarque qu'ils se rapprochent entre 20 et 100 mètres de profondeur pour n'être distants par endroit que de seulement 2 mètres. Par contre, à partir de 120 mètres de profondeur, les forages sont distants les uns des autres d'au moins 10 mètres, cette valeur dépasse même les 25 mètres en fond de forage. Ces données seront très utiles pour l'interprétation des résultats du modèle.

Le choix est fait de ne représenter que les résultats obtenus en E, c'est à dire au centre du triangle formé par les trois forages d'injection (Figure II-17).

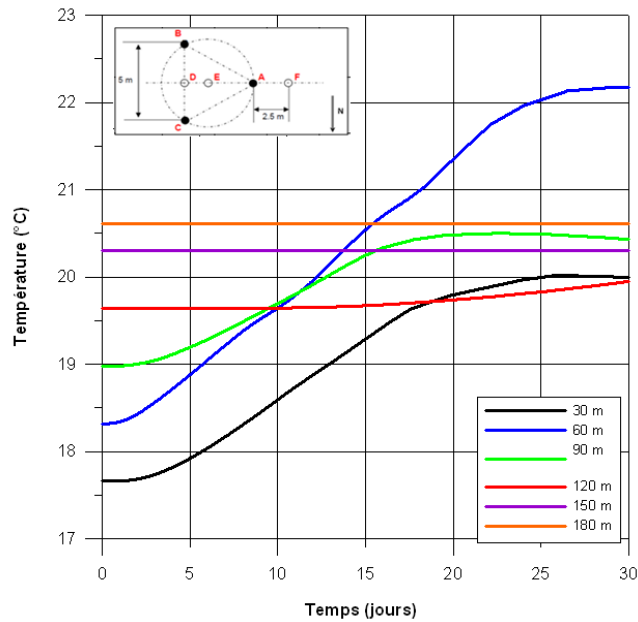


Figure II-17 : Résultats du modèle numérique en température en fonction du temps à différentes profondeurs en E

Tout d’abord, nous observons qu’à partir de 120 mètres de profondeur la température au centre du triangle ne varie pas ou peu (0,2°C au maximum) au cours du mois. A ces profondeurs, les forages sont très éloignés les uns des autres (Figure II-16) et ne forment donc pas un réel volume de stockage. L’énergie injectée est diluée dans la masse qui, de plus, arrive au fond des forages à une température plus basses qu’aux profondeurs les moins importantes.

Les évolutions de la température à 30 et 90 mètres de profondeur ont des profils similaires avec une première augmentation (respectivement de 17,5 à 20°C et de 19 à 20,5°C) avant de se stabiliser sur les dernières journées du mois. Il en est de même pour les résultats du modèle à 60 mètres de profondeur où l’augmentation de la température est également plus importante que pour les autres profondeurs, en passant de 18,5 à 22 °C en moins d’un mois. Cette différence s’explique par le fait que les forages sont plus proches les uns des autres à cette profondeur créant un volume plus petit entre les trois forages et donc une température plus importante.

II.3.6. Modélisation de la relaxation naturelle du sous-sol

Après avoir modélisé le comportement de trois forages en période d’injection de chaleur, la représentation de la relaxation naturelle du sous-sol par diffusion thermique a été réalisée. Ceci a pour but de déterminer s’il est possible de réaliser un stockage sur une durée de plusieurs mois. La modélisation représente un mois d’injection d’énergie dans le sous-sol en

utilisant les mêmes paramètres que dans le paragraphe précédent, puis un deuxième mois sans aucune injection de chaleur mais en laissant le sol se relaxer naturellement.

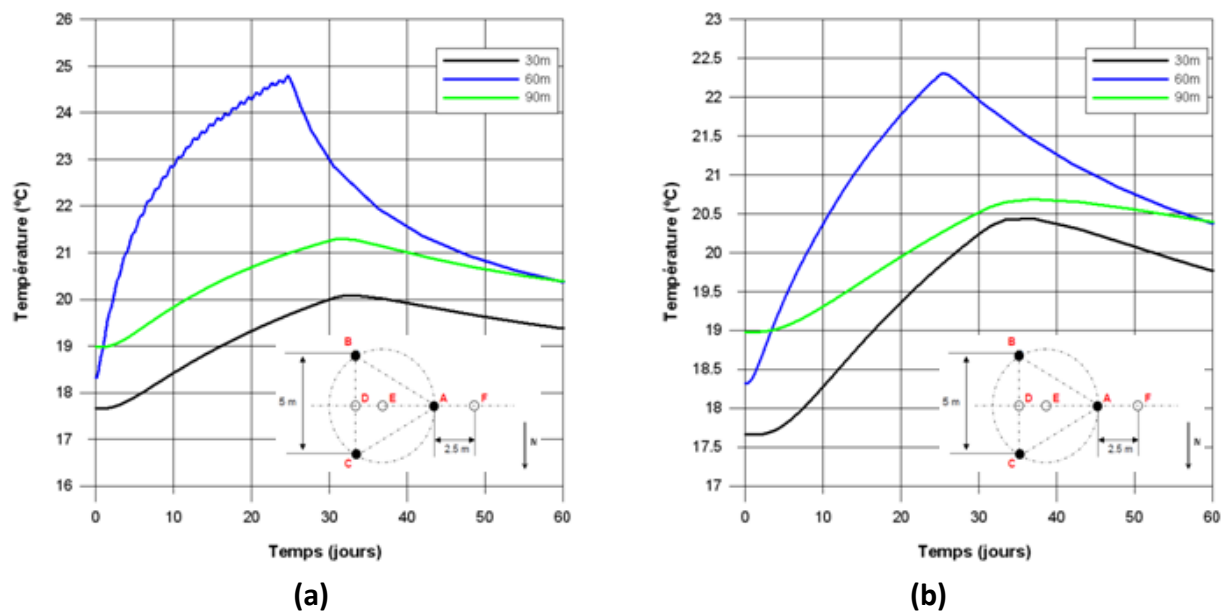


Figure II-18 : Résultats du modèle numérique en température après 30 jours d'injection puis 30 jours de relaxation : (a) en D, (b) en E

La Figure II-18(a) représente la température simulée en D pour différentes profondeurs (30, 60 et 90 m) après l'injection d'énergie sur les 3 forages (A, B et C) pendant 30 jours puis la relaxation thermique naturelle du sous-sol pendant 30 jours. La Figure II-18(b) représente la même température au cours du temps en E. L'analyse de la relaxation thermique du sous-sol montre que la température à 60 et 90 mètres de profondeur atteint la même température après 30 jours de relaxation que ce soit en D ou en E (20,5°C dans les deux cas). Une forte chute de température est observée en D à 60 mètres de profondeur (de 25 à 20,5°C en un mois).

Après un mois d'injection d'énergie puis un mois de relaxation, l'évolution des températures entre deux forages, en D, n'est que de 1 ou 2°C (de 17,8 à 19,3°C pour 30 m, de 18,5 à 20,5°C pour 60m et de 19 à 20,5°C pour 90m). Le même constat s'impose pour les températures en E (de 17,8 à 19,7°C pour 30m, de 18,5 à 20,5°C pour 60m et de 19 à 20,5°C pour 90m).

Ainsi, la réalisation d'un stockage d'énergie intersaisonnier dans la configuration du site de Montauriol n'était pas envisageable. En effet, l'énergie injectée pendant une période de stockage est en grande partie diffusée par le sous-sol pendant une période équivalente. De plus, la maîtrise de la distance entre forages est primordiale. En effet, les résultats montrent

que l'obtention d'un stockage thermique utilisable n'est possible qu'avec des forages proches les uns des autres.

Le modèle développé a pu être validé expérimentalement et utilisé pour d'autres applications, comme dans le cadre du refroidissement du condenseur des centrales solaires à concentration.

II.4. Refroidissement sec de centrale solaire à concentration

Cette partie résume les travaux sur le sujet, menés au cours de mon année de post-doctorat (2011-2012), puis au cours de mon année d'ATER (2012-2013) au sein du laboratoire PROMES CNRS et de l'Université de Perpignan Via Domitia. Ceux-ci ont permis de donner naissance au projet ANR Dry RSP (2013 –2017) et à la thèse d'Harold Espargillière soutenue en 2017 (examinateur).

Actuellement, les centrales électro-solaires doivent résoudre la problématique du refroidissement de leur condenseur par des moyens propres, économiques et renouvelables pour remplacer les procédés existants qui sont coûteux et peu performants pour certains. En effet, le bloc électrique doit évacuer deux fois plus de puissance thermique au condenseur que la puissance électrique qu'il produit. Les techniques utilisées sont différentes mais ont l'inconvénient de nécessiter la consommation d'une quantité d'eau importante ([**Cohen 1999**], [**Gary 2010**], [**Balogh 2008**]). D'autres solutions existent, utilisant un refroidissement à air ou hybride mais les performances sont naturellement limitées par la température de l'air ambiant ([**Kelly 2006**], [**WorleyParsons 2008**])

Nous avons vu par ailleurs que la dissipation de l'énergie thermique provenant d'un champ de capteurs solaires plans peut être réalisée au moyen de forages géothermiques classiques. Cette dissipation peut être avantageusement intensifiée de manière significative (jusqu'à 50%) par dopage du liant mis en œuvre.

Ainsi, dans le cas des centrales électro-solaires, la faisabilité de réaliser cet échange de chaleur à l'aide d'un champ de sondes géothermiques classiques ou utilisant la bentonite dopée thermiquement a été étudiée et comparée aux techniques classiques. La possibilité de coupler l'effet de la géothermie à d'autres principes de refroidissement (convection, rayonnement) a également été envisagée.

II.4.1. Refroidissement par géothermie

La stabilité thermique du sous-sol (entre 10 et 20°C) permet d'envisager l'utilisation de la géothermie comme dissipateur thermique. Il serait ainsi possible d'utiliser le sous-sol comme un échangeur de chaleur infini pour évacuer l'énergie nécessaire à la condensation de la vapeur du cycle thermodynamique d'une centrale électro-solaire. En prenant l'exemple

de la centrale PE1 de Séville, d'une puissance d'environ 1,5 MW électrique, la puissance thermique à dissiper au condenseur est de l'ordre de 3 MW, pour une surface de réflecteurs solaires d'environ 18 000 m².

II.4.1.1. Analyse préliminaire

Dans un premier temps, afin de dimensionner l'installation géothermique qui conviendrait aux besoins d'une telle centrale, une simulation d'un forage géothermique en dissipation d'énergie a été réalisée. Cette simulation a pour but de déterminer la puissance qu'il est possible de dissiper par mètre de forage géothermique, l'objectif étant ici de raisonner avec des ordres de grandeur et non pas de réaliser un dimensionnement précis, cette simulation a été faite avec des valeurs moyennes de propriétés thermiques du sol (voir Tableau II-6).

Fluide (eau)	Conductivité thermique	0,6 W m ⁻¹ K ⁻¹
	Température en entrée	333 K
	Coefficient de convection	2500 W m ⁻² K ⁻¹
Tube en PEHD	Conductivité thermique	0,6 W m ⁻¹ K ⁻¹
	Diamètre intérieur	2,6.10 ⁻² m
	Diamètre extérieur	3,2.10 ⁻² m
Forage (bentonite)	Conductivité thermique brute	De 1,5 à 10 W m ⁻¹ K ⁻¹
	Diamètre	0,16 m
Sol	Conductivité thermique	3 W m ⁻¹ K ⁻¹
	Température	288K

Tableau II-6 : Paramètres utilisés lors de la simulation numérique

Nous avons vu précédemment qu'il était possible d'augmenter la conductivité thermique de la bentonite par ajout de proportions raisonnables de dopant (graphite) jusqu'à 5 W m⁻¹ K⁻¹ (Figure II-6), et ainsi considérablement augmenter les échanges thermiques. La simulation a donc été réalisée ici pour une gamme de conductivité thermique de la bentonite du liant brut (1,5 W m⁻¹ K⁻¹) à une valeur maximale arbitraire de 10 W m⁻¹ K⁻¹.

Le modèle utilisé est celui développé au paragraphe II.3. La Figure II-19 représente la puissance linéaire que l'on peut dissiper par géothermie en fonction de la conductivité thermique de la bentonite, avec des propriétés thermiques moyennes du sous-sol répertoriées dans le Tableau II-6.

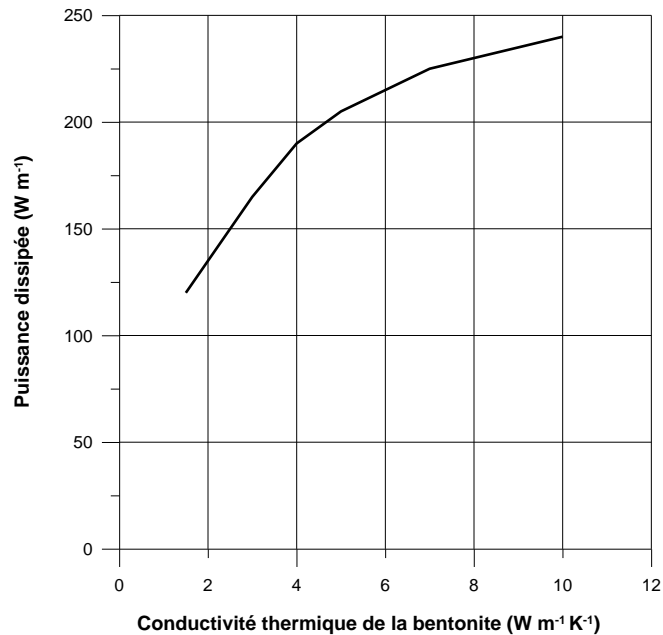


Figure II-19 : Puissance linéaire dissipée par géothermie en fonction de la conductivité thermique de la bentonite

Pour une conductivité thermique classique comprise entre $1,5$ et $2 W m^{-1} K^{-1}$, on peut dissiper dans le sous-sol entre 120 et $130 W m^{-1}$. En prenant la valeur de $5 W m^{-1} K^{-1}$ nous trouvons une valeur de $200 W m^{-1}$.

Par conséquent, pour évacuer les $3 MW$ thermique du condenseur de la centrale PE1 il faudrait mettre en œuvre entre $23\ 000$ et $25\ 000$ mètres linéaires de forage à bentonite classique (soit de 230 à 250 forages de $100m$ de profondeur). En comparaison, avec de la bentonite dopée à $5 W m^{-1} K^{-1}$, la réalisation de $15\ 000$ mètres linéaires de forage serait nécessaire, soit 150 forages de $100 m$ de profondeur. Compte tenu de l'objectif visant à dissiper cette énergie dans le sol, l'espacement entre les forages devra être suffisamment important pour assurer une bonne relaxation thermique naturelle du terrain. La surface au sol qu'occupe le champ de miroirs plans est importante ($18\ 000 m^2$) et nécessite un ancrage au sol, permettant d'envisager l'implantation de forages sous les miroirs en profitant des ancrages existants.

II.4.1.2. Etude technico-économique

Une étude technico économique de cette approche a été réalisée, afin de voir s'il est raisonnable d'envisager l'utilisation d'un champ de sondes géothermiques. En effet, la réalisation de centaines de forages géothermiques a un coût qu'il faut quantifier en gardant à l'esprit que ceux-ci remplaceront les systèmes actuellement utilisés, et notamment les tours de refroidissement qui génèrent un surcoût de consommation en eau de l'ordre de 1 million de dollars par an pour les centrale SEGS par exemple [Cohen 1999]. De plus, pour

améliorer les performances thermiques des échangeurs de chaleur enterrés que sont les puits géothermiques, la possibilité de doper thermiquement ces échanges en intensifiant la conductivité thermique du coulis de scellement des forages a été étudiée au niveau technico-économique. Le dopage thermique va avoir deux effets antagonistes qui vont être répercutés sur le coût de l'installation ; l'ajout de graphite va entraîner un surcoût dû au prix du graphite lui-même mais va permettre, en même temps, de réduire la profondeur de forage nécessaire et donc le coût total. C'est cette balance qui a été étudiée grâce aux différents paramètres listés dans le Tableau II-7.

Paramètres	Nom	Valeur et unité
D_f	Diamètre du forage	0,16 m
D_s	Diamètre d'une sonde	0,032 m
C_0	Coût du mètre linéaire de forage non dopé	50 € m ⁻¹
ρ_{GNEg}	Masse volumique GNEg	100 kg m ⁻³
C_{GNE}	Prix du GNE	€ kg ⁻¹ (selon choix)
$P_{dopé}$	Puissance linéaire dissipée forage dopé	Voir Figure II-19
λ_b	Conductivité thermique bentonite dopée	Voir Figure II-6
q	Quantité de dopant	%m (selon choix)
C_{1W}	Coût du watt dissipé	€ W ⁻¹

Tableau II-7 : Paramètres utilisés lors de l'étude technico-économique

Les paramètres utilisés concernent notamment la géométrie du forage (diamètre du forage et des sondes géothermiques), son coût par mètre linéaire ainsi que les propriétés physiques et économiques de la bentonite et du graphite (prix, masse volumique, quantité etc...).

Les calculs ont été faits de manière à connaître le coût d'un watt dissipé dans le sous-sol en fonction de la quantité de GNEg ajouté pour différents prix du GNE. Bien entendu plusieurs choix ont été fixés, comme le coût du forage non dopé (50 € m⁻¹). L'équation utilisée est la suivante :

$$C_{1W} = C_{forage+sonde} + C_{GNEg} \quad \text{Équation II-6}$$

$$C_{1W} = \frac{L_{dopé} \cdot C_0}{P_{dopé} \cdot L_{dopé}} + \frac{V_{bentonite} \cdot q \cdot \rho_{GNEg} \cdot C_{GNEg}}{P_{dopé} \cdot L_{dopé}} \quad \text{Équation II-7}$$

$$\text{Avec } V_{\text{bentonite}} = \pi \left(\frac{D_f^2}{4} - \frac{D_s^2}{4} \cdot 4 \right) \cdot L_{\text{dopé}}$$

Équation II-8

$$\text{D'où : } C_{1W} = \frac{1}{P_{\text{dopé}}} \left[C_0 + \left(\frac{D_f^2}{4} - D_s^2 \right) \cdot \pi \cdot q \cdot \rho_{\text{GNEg}} \cdot C_{\text{GNEg}} \right]$$

Équation II-9

Les résultats de l'analyse technico-économique sont résumés dans le Tableau II-8 ci-dessous.

	Puissance linéaire dissipée (W m ⁻¹)	Longueur de forage totale nécessaire (m)	Prix unitaire (€ W ⁻¹)	Prix total des forages complets (€)
Forage non dopé	120	250 000	0,35	1 050 000
Forage dopé (5% _m GNEg ₁₀₀)	200	150 000	0,10	300 000
Différence	+66%	-40%	-71%	-71%

Tableau II-8 : Récapitulatif des résultats de l'étude technico économique appliquée au refroidissement sec du condenseur des CES de type linéaire Fresnel par géothermie

Ces résultats peuvent être comparés au coût de revient d'un refroidissement sec en utilisant des aérothermes. Une étude menée par ailleurs [Carrier 2011] a montré que le coût d'achat des dry cooler revient à 200 000€ auxquels il faut ajouter les 100 000€ estimés de consommation électrique sur les 30 ans de durée de vie de l'installation soit un total de 300 000€.

Il faut comparer ce résultat, au coût d'investissement d'un champ de sondes géothermiques utilisant de la bentonite dopée dimensionné pour dissiper la même puissance, qui est également de 300 000 € (Tableau II-8). La différence entre ces deux types de refroidissement sec (aérotherme et géothermie) se situe au niveau des performances du système, le premier étant limité par la température de l'air ambiant, alors que la géothermie bénéficie d'une température d'échange stable et plus basse entraînant ainsi des meilleures performances.

Il est également intéressant de réaliser une comparaison avec un refroidissement par tour humide. En effet, une tour humide consomme 3 m³ d'eau par MWh électrique produit. Dans le cas de PE1 et en considérant un fonctionnement de la centrale 12 heures par jour, la consommation annuelle d'eau est de l'ordre de 20 000 m³. L'utilisation d'un système de refroidissement sec évite ainsi sur toute la durée de vie d'une centrale de type PE1, estimée à 30 ans, une consommation en eau d'environ 600 000 m³.

II.4.2. Dissipation par échanges radiatifs

Le refroidissement radiatif résulte d'un bilan net entre l'énergie reçue par la surface considérée (dont une partie est absorbée et l'autre réfléchi), et l'énergie émise par cette même surface [Muselli 2010]. Si l'énergie émise par la surface est supérieure à l'énergie qu'elle reçoit, elle va se refroidir : c'est le phénomène de refroidissement radiatif. Pour des corps terrestres à températures modérées, le maximum d'énergie émise par la surface se trouve dans l'infrarouge autour d'une longueur d'onde de $10\mu\text{m}$. Par ailleurs l'atmosphère terrestre est en partie transparente au rayonnement infrarouge dans la fenêtre comprise entre 8 et $15\mu\text{m}$, l'échange d'énergie se fait donc entre la surface émettrice et l'espace à la température de 3K (Figure II-20). Cependant, l'échange radiatif est le plus souvent exprimé à l'aide d'une température équivalente de ciel, qui tient compte de l'ensemble du rayonnement infrarouge et non pas de la seule fenêtre « 8-15 ».

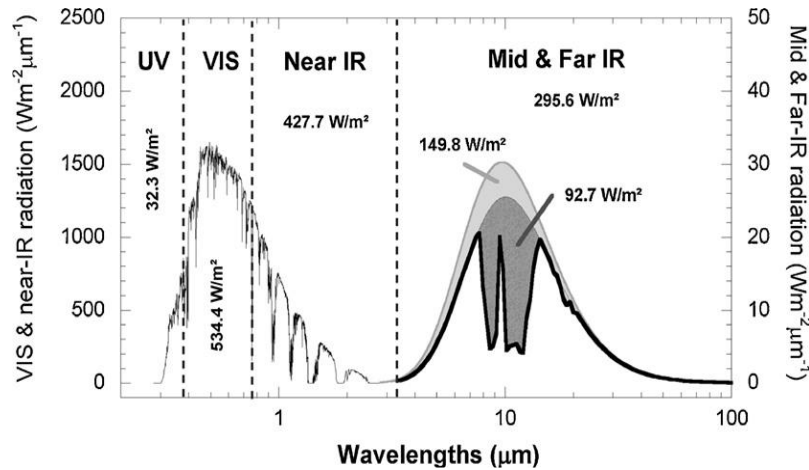


Figure II-20 : Spectre solaire reçu à la surface de la Terre (trait épais), émission d'un corps noir à 288K (surface gris foncé) et à 303K (surface gris clair)

La Figure II-20, indique la puissance émise par un corps noir à température ambiante. Pour cette étude, l'idée originale était d'utiliser les miroirs plans comme échangeurs de chaleur. Ceux-ci sont articulés sur un axe creux rendant possible la circulation d'un fluide (Figure II-21). Le calcul de la puissance globale dissipée résulte des effets couplés de convection naturelle et de rayonnement. Le schéma du système étudié ainsi que les notations utilisées pour le calcul de la puissance dissipée par effet cumulé de la convection naturelle et du refroidissement radiatif sont représentés sur la figure suivante. L'exemple étudié ici est la centrale PE1.

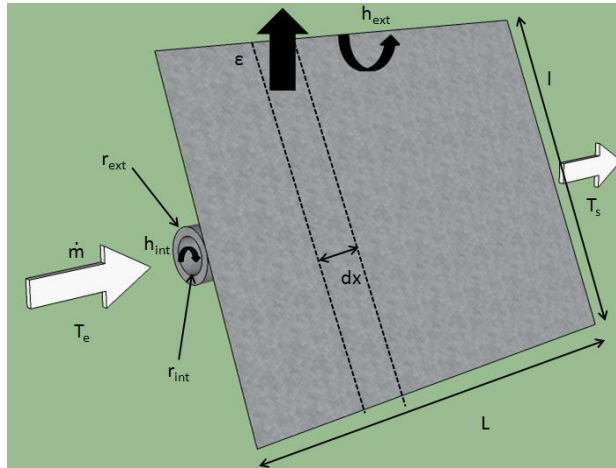


Figure II-21 : Schéma d'un miroir sur son axe creux et notations utilisées pour le calcul de la puissance dissipée par convection naturelle et par effet radiatif

Le bilan correspondant sur le fluide caloporteur est décrit par l'équation suivante :

$$- \dot{m} Cp dT = \left(\frac{T - T_{air}}{R} + 4\sigma\epsilon T_m^3 (T - T_{ciel}) \cos \vartheta \right) dx \quad \text{Équation II-10}$$

En utilisant l'hypothèse simplificatrice suivante :

$$\sigma\epsilon(T^4 - T_{ciel}^4) \approx 4\sigma\epsilon T_m^3 (T - T_{ciel}) \quad \text{Équation II-11}$$

Ceci devient :

$$\int_{T_e}^{T_s} \frac{dT}{\frac{T - T_{air}}{R} + 4\sigma\epsilon T_m^3 (T - T_{ciel}) \cos \vartheta} = \frac{-1}{mCp} \int_0^L dx \quad \text{Équation II-12}$$

La résolution de l'intégration nous donne l'expression de la température de sortie du fluide T_s :

$$T_s = \frac{1}{\frac{1}{R} + 4\sigma\epsilon T_m^3 \cos \vartheta} \cdot \left[\left(\frac{1}{R} + 4\sigma\epsilon T_m^3 \cos \vartheta \right) T_e - \frac{T_{air}}{R} - 4\sigma\epsilon T_m^3 T_{ciel} \cos \vartheta \right] \cdot \exp\left[\frac{-L}{mCp} \left(\frac{1}{R} + 4\sigma\epsilon T_m^3 \cos \vartheta \right) \right] + \frac{T_{air}}{R} + 4\sigma\epsilon T_m^3 T_{ciel} \cos \vartheta \quad \text{Équation II-13}$$

$$\text{Avec } R = \frac{1}{2 \cdot h_{int} \cdot r_{int} \cdot \pi} + \frac{1}{2 \cdot l \cdot h_{ext}} \quad \text{Équation II-14}$$

Le coefficient de convection interne a été calculé par la corrélation de Collburn, couramment utilisée dans des configurations similaires.

L'ensemble des paramètres utilisés pour le calcul de la puissance dissipée par refroidissement radiatif est répertorié dans le Tableau II-9 :

Paramètre	Nom	Valeur
T_s	Température de sortie du fluide	
T_{air}	Température de l'air ambiant	Données météo
T_e	Température d'entrée du fluide	60°C
L	Longueur d'un miroir	806,4 m
\dot{m}	Débit massique du fluide	2 kg s ⁻¹
C_p	Capacité calorifique du fluide	4180 J kg ⁻¹ K ⁻¹
l	Largeur d'un miroir	1,43 m
θ	Angle d'inclinaison d'un miroir	Modèle analytique
h_{ext}	Coefficient de convection externe	corrélation
r_{int}	Rayon intérieur du tube	0,05 m
h_{int}	Coefficient de convection interne	880 W m ⁻² K ⁻¹
ϵ	Emissivité du miroir	0,9
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	5,67.10 ⁻⁸ W m ⁻² K ⁻⁴
T_m	Température moyenne entre le fluide et le ciel	303 K

Tableau II-9 : Paramètres utilisés pour les différents calculs de puissance dissipée

Les résultats obtenus sont représentés sur la Figure II-22 illustrant la puissance dissipée par l'effet cumulé de la convection naturelle et du refroidissement radiatif au cours du temps pour cinq journées différentes de l'année. La configuration nocturne choisie correspond à des miroirs positionnés horizontalement afin de favoriser le refroidissement radiatif qui est plus important la nuit que le jour.

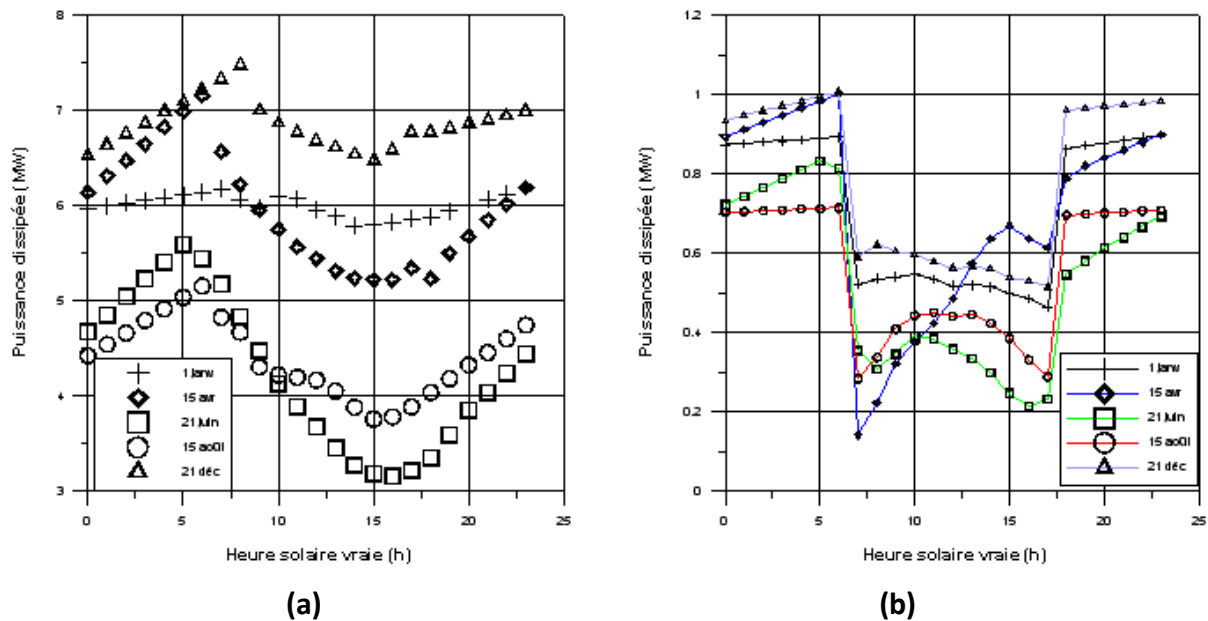


Figure II-22 : Puissance dissipée pour différentes journées pour une inclinaison nocturne des miroirs à 0° : (a) par convection naturelle et effet radiatif, (b) part due à l'effet radiatif

Les résultats de la Figure II-22 montrent, qu'en tenant compte du phénomène de rayonnement de la surface du miroir en plus de la convection naturelle, la puissance dissipée est largement suffisante pour évacuer la puissance thermique de 3 MW nécessaire au cycle thermodynamique du bloc électrique. Le transfert radiatif permet au fluide caloporteur d'atteindre une température plus basse que l'air extérieur. On peut voir que l'influence du refroidissement radiatif est plus importante la nuit (de 0,6 à 1 MW) que la journée (0,2 à 0,6 MW). En effet, la journée, les miroirs sont inclinés d'un angle plus ou moins important, ce qui limite les échanges par rayonnement de la surface des miroirs vers le ciel. La position nocturne des miroirs a une influence importante. Placés horizontalement, ils vont permettre de favoriser le phénomène de refroidissement radiatif, alors que verticalement, les échanges par convection naturelle seront amplifiés. La comparaison entre ces deux configurations est effectuée dans le Tableau II-10.

	0° (radiative cooling)	90° (convection)	Différence (%)
1^{er} janvier	6 à 6,1 MW	5,8 à 6 MW	+ 2 à 3%
15 avril	6,2 à 7,2 MW	5,9 à 7 MW	+ 3 à 5%
21 juin	4,7 à 5,5 MW	4,5 à 5,5 MW	+ 4 %
15 août	4,5 à 5,3 MW	4,2 à 5 MW	+ 6 à 7%
21 décembre	6,5 à 7,2 MW	6,3 à 7 MW	+ 3 %

Tableau II-10 : Comparaison de la puissance dissipée la nuit pour plusieurs journées de l'année avec une inclinaison nocturne des miroirs favorisant le radiative cooling (0°) ou la convection naturelle (90°)

Quel que soit le jour de l'année, la puissance dissipée la nuit est plus importante avec des miroirs positionnés à 0° qu'à 90° (de 3 à 7%).

La conclusion de cette comparaison est qu'il est plus intéressant, quel que soit le jour de l'année, de favoriser le refroidissement radiatif nocturne en positionnant les miroirs de manière horizontale. Ce constat est d'autant plus vrai les nuits chaudes d'été quand la température importante de l'air extérieur limite les échanges par convection mais pour lesquelles un ciel dégagé permet de dissiper une puissance importante par effet radiatif.

Un travail important d'optimisation doit donc être effectué en fonction des conditions climatiques nocturnes réelles (température, couverture nuageuse, humidité etc...) afin de favoriser l'un ou l'autre des phénomènes.

II.5. Cogénération thermoélectrique : application au photovoltaïque

Cette partie s'inscrit dans le cadre d'une collaboration avec l'Ecole Militaire Polytechnique d'Alger. La première partie de ce travail consistant à développer et caractériser un nouveau matériau thermoélectrique, a été réalisé au cours de la thèse de Zakaria Bekkar soutenue en juillet 2021. Mon intervention principale sur le sujet se trouve dans les perspectives de ce travail concernant l'intégration du matériau au sein d'un système photovoltaïque.

La publication [15] est issue de ce projet.

II.5.1. Contexte et résultats préliminaires

Les matériaux thermoélectriques ont la capacité de transformer la chaleur en électricité grâce à l'effet Seebeck. Ce dernier exploite la différence de température entre deux matériaux de conductivité différente, ce qui génère un écart de potentiel et donc un courant électrique.

La première phase de ce travail consistant à synthétiser un matériau thermoélectrique sous forme de couches minces a été réalisée au cours de la thèse de Zakaria Bekkar. Le matériau obtenu est du polythiophène dopé au perchlorate de lithium.

La deuxième étape de ce travail est la caractérisation des performances du matériau thermoélectrique synthétisé. La performance des matériaux thermoélectriques est quantifiée par le facteur de mérite adimensionnel lié à la température T.

$$ZT = (S^2 \sigma / \kappa)$$

Équation II-15

Un matériau efficace doit donc posséder à la fois une conductivité électrique (σ) élevée, un coefficient de Seebeck (S) important et une faible conductivité thermique (κ). Le coefficient de Seebeck, relatif à l'apparition d'un courant et à la variation de température entre deux matériaux, est lié au transport d'énergie par les porteurs de charge au sein du matériau

(électrons ou trous). Ces propriétés sont antinomiques étant donné que, lorsque la concentration en porteurs de charge dans un matériau augmente, σ et κ augmentent mais S diminue. L'amélioration du coefficient de mérite passe par l'optimisation de la concentration des porteurs de charges via le dopage avec des atomes donneurs ou accepteurs [Culebras 2014].

La conductivité électrique a été mesurée en utilisant la technique conventionnelle de quatre pointes de type Jandel RM 3000. La conductivité thermique a été déterminée en utilisant un appareil de type Hot-Disk 2500S. Cette technique est adaptée pour la mesure des conductivités thermiques des matériaux polymériques, généralement comprises entre 0.1 et 2 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Le coefficient de Seebeck a été caractérisé à l'aide d'un dispositif expérimental élaboré au laboratoire CERTES (Figure II-23). Le principe étant d'imposer un gradient thermique maîtrisé et de mesurer la différence de potentiel induite. Le coefficient de Seebeck S est obtenu par le rapport entre la différence du potentiel ΔV , et la différence de température mesurée dans une gamme de $\Delta T \sim 10 \text{ K}$, donnée par l'équation suivante :

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta T}$$

Équation II-16

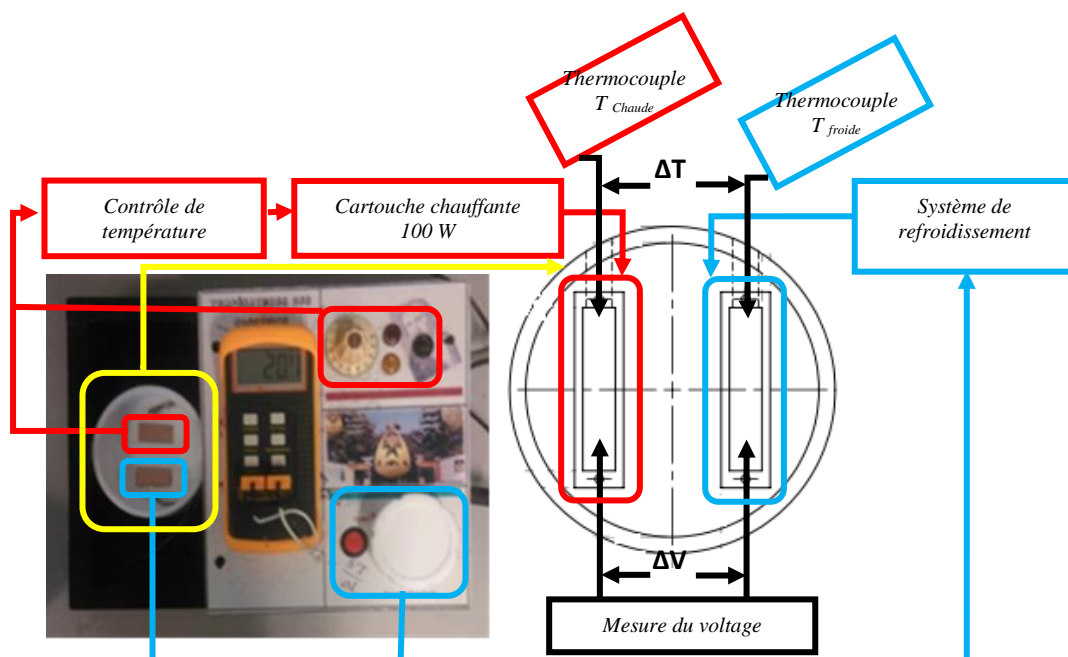


Figure II-23: Schéma du dispositif de mesure du coefficient de Seebeck.

Les paramètres thermoélectriques des matériaux préparés à base de polythiophène dopé au perchlorate de lithium, et déposés en couches minces sont recensés dans le Tableau II-11.

Concentration du dopant (M)	Conductivité électrique (S/m)	Coefficient de Seebeck (mV/K)	Conductivité thermique (W/m.K)	FP (W/m.K ²)	Coefficient de mérite (ZT)
0.05	8,4	0.00141	0,09637	1,6686.10 ⁻¹¹	5,16.10 ⁻⁸
0.1	17,95	0.00191	1,341	6,5141.10 ⁻¹¹	1,45.10 ⁻⁸
0.2	83,33	0.01289	1,739	1,3856.10 ⁻⁰⁸	2,37.10 ⁻⁶
0.3	6,49	0.00169	1,507	1,8499.10 ⁻¹¹	3,66.10 ⁻⁹

Tableau II-11: Propriétés thermoélectriques du matériau étudié, à température ambiante

D'après les résultats obtenus, nous avons constaté que le matériau préparé, à base de polythiophène dopé avec 0,2 M de perchlorate de lithium, présente des performances thermoélectriques élevées, à température ambiante, traduites par un coefficient de mérite égal à $2,37.10^{-6}$.

II.5.2. Perspectives : intégration au système photovoltaïque

Ces résultats préliminaires encourageants permettent d'envisager des perspectives. En effet, la suite de ce travail, outre l'optimisation des performances du matériau thermoélectrique, concerne l'intégration au système photovoltaïque. En fonctionnement, un gradient thermique important est créé entre la face arrière d'une cellule ou d'un panneau photovoltaïque et l'air ambiant. Celui-ci peut atteindre jusqu'à 30 ou 40 °C. Cette source de chaleur représente donc un potentiel utilisable par le matériau thermoélectrique développé à base de polythiophène dopé.

Ceci aura deux effets positifs sur les performances du système : la limitation de l'échauffement du matériau photovoltaïque (la production électrique PV diminuant avec la température) et la cogénération thermoélectrique.

Les verrous scientifiques majeurs sont la gestion de la thermique et le design de l'installation afin d'en maximiser les performances de production thermoélectrique sans nuire à la production photovoltaïque. Ceci passera par le développement d'études expérimentales à l'échelle du laboratoire avant d'établir un prototype prouvant la faisabilité du concept. Enfin, une phase d'optimisation de ce prototype suivra à plus long terme.

II.6. Valorisation énergétique des effluents en sortie de station d'épuration

Ce travail est le fruit d'une collaboration initiée en 2020 avec le SIARCE (Syndicat Intercommunal d'Aménagement, de Rivières et du Cycle de l'Eau) formalisée par une convention de partenariat. Celle-ci se matérialise par un stage de Master puis par la thèse de Luca Zanatta, démarrée en mars 2021, que je co-encadre avec Jean-Félix Durastanti.

II.6.1. Contexte et objectifs

Depuis 2019, le SIARCE a mis en place un schéma directeur syndical des énergies renouvelables et des ressources réutilisables qui vise à fixer les objectifs et les perspectives de réalisation de projets autour de leurs compétences. C'est donc dans ce cadre que j'ai été sollicité afin de répondre au mieux à cette problématique.

Bien que les services publics d'eau et d'assainissement ne représentent pas plus de 1% des émissions de gaz à effet de serre à l'échelle nationale, il est nécessaire pour les collectivités territoriales de mettre en place des solutions afin de réduire leur impact environnemental dans le respect de la loi transition énergétique. Les stations d'épuration (STEP) ont été visées comme les principales sources de consommation énergétique et donc comme les meilleures candidates pour l'optimisation énergétique de ce secteur. Plusieurs solutions existent déjà aussi bien d'un point de vue technologique, avec, par exemple, l'émergence de nouveaux types de surpresseurs à air moins consommateurs d'énergie, que d'un point de vue technique, avec notamment les unités de méthanisation qui permettent de produire des gaz de synthèse à partir des boues produites. Actuellement, ces solutions sont adaptées à des sites de grande, voire très grande, capacité afin que les économies soient réellement rentables.

L'originalité de ce travail est qu'il s'attache à des stations d'épuration de petites et moyennes capacités en étudiant les possibilités d'optimisation énergétique et de production d'énergie verte pour une utilisation locale. Du fait de leur taille, les solutions conventionnelles ne sont pas adaptées et donc des technologies et des techniques innovantes doivent être trouvées. L'exploitation de l'énergie thermique présente dans les effluents est au centre des recherches car elle présente le plus grand nombre d'avantages par rapport aux objectifs de la thèse de Luca Zanatta : la ressource est abondante, les données relatives aux effluents tels que le débit ou la température sont connues et les méthodes de récupération de l'énergie, grâce aux pompes à chaleur notamment, sont facilement réalisables à bas coûts.

Deux voies de valorisation énergétique des effluents s'offrent à nous : sous forme de chaleur ou d'électricité. La solution consistant à produire de l'énergie par méthanisation des boues n'est pas applicable à notre étude puisque la taille des STEP ne permet pas d'avoir une matière première suffisante pour obtenir un procédé rentable.

La voie de valorisation sous forme de chaleur paraît, au premier abord, intéressante et plutôt simple à mettre en œuvre puisque les effluents représentent une ressource stable en terme de température et de débit. Son exploitation par pompe à chaleur est bien connue. Cependant, cette solution nécessite une utilisation locale ou à proximité de la source de production, le transport de chaleur sur de longues distance entraînant des pertes conséquentes. Les STEP étudiées se situent en milieu rural, éloignées de tout candidat potentiel à l'utilisation de la chaleur ainsi produite.

La deuxième voie de valorisation est la production d'électricité puisqu'elle peut être utilisée localement et les surplus éventuels peuvent être réinjectés sur le réseau. L'idée est de mettre en œuvre un cycle thermodynamique basse température de type ORC (Organic Rankine Cycle) pour produire de l'électricité en utilisant les effluents, qui sont thermiquement stable au cours de l'année (entre 10 et 20°C), comme source froide, et un système à concentration solaire comme source chaude.

L'avantage de cette solution est qu'elle utilise deux ressources abondantes et gratuites, ce qui permet de faire baisser le coût global de l'installation.

II.6.2. Résultats préliminaires : analyse de la ressource disponible

La problématique de l'ensoleillement disponible en région parisienne est posée : est-il suffisant pour permettre la rentabilité d'une telle installation ? Une première étude a été menée dans le cadre de la thèse de Luca Zanatta, démarrée en mars 2021 sur deux stations de petite et moyenne capacités, Vert-le-Grand et Lardy-Jainville, respectivement 3970 et 12 680 équivalent habitants. De plus, une grande surface de foncier disponible dans l'enceinte de chaque station d'épuration étudiée, respectivement 1 000 m² et 4 000 m², permet d'envisager l'installation de concentrateurs solaires.

Les données d'ensoleillement des sites ont été étudiées grâce au logiciel PVGIS et rapportées sur la Figure II-24. L'Ile de France étant soumis à un climat continental, l'ensoleillement qui en résulte est globalement faible avec une moyenne annuelle de l'ordre de 130 W/m² et surtout une période hivernale où il ne dépasse pas 70 W/m² en moyenne sur la journée.

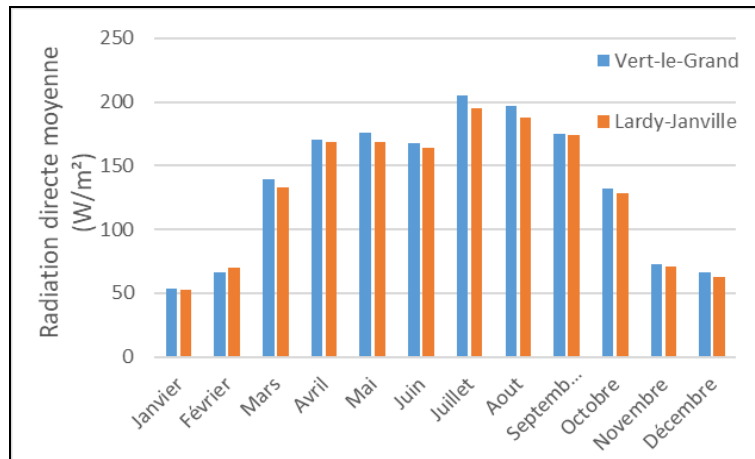


Figure II-24: Ensoleillement mensuel moyen pour les STEP de Vert-le-Grand et de Lardy-Janville

Toute installation solaire est régie par un paramètre appelé rayonnement de seuil, qui permet de marquer la transition entre différents régimes de fonctionnement. Une méthode pour mettre en valeur ce phénomène est la réalisation de courbes de fréquences cumulées comme présenté sur la Figure II-25. Ces courbes donnent le nombre d’heures pour lesquelles une puissance donnée est atteinte. Dans notre étude, nous avons choisi de fixer une valeur de rayonnement de seuil pour un fonctionnement nominal à 200 W/m² atteint au moins 4h par jour, ainsi les conditions d’ensoleillement sont satisfaites de mars à septembre.

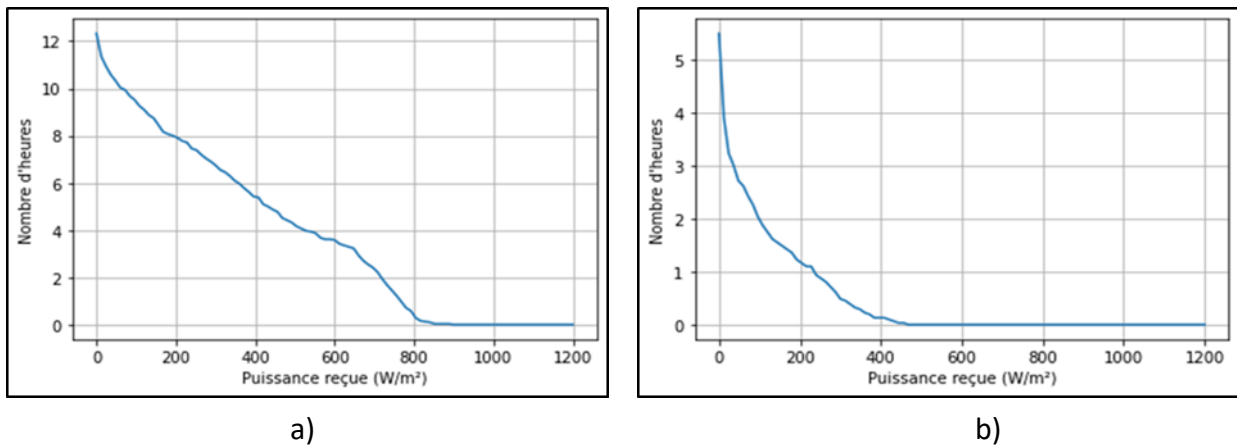


Figure II-25 : Courbes de fréquences cumulées de l’ensoleillement de la STEP de Lardy-Janville en a) juillet et en b) décembre

Afin de montrer la viabilité d’une solution utilisant un cycle ORC, une étude de cas a été réalisée pour la STEP de Lardy-Janville afin de déterminer la production électrique du système de mars à septembre. Le système d’équation est le suivant : à partir de la puissance solaire moyenne mensuelle Q_s , la puissance thermique Q_{in} absorbée par les collecteurs, la

puissance disponible à la turbine et la production d'électricité sont calculées à partir des équations ci-dessous.

$$Q_{in} = \eta_{opt} \times A \times Q_s \quad \text{Équation II-17}$$

$$Q_{tur} = \eta_{ORC} \times Q_{in} \quad \text{Équation II-18}$$

$$W_{tur} = H \times Q_{tur} \quad \text{Équation II-19}$$

La surface utile prise ici est de 3 500 m². Le rendement optique et le rendement global du cycle ORC ont été fixés à des valeurs de 0,66 et 0,2 respectivement ([Desai 2016] et [Sun 2021]). Les résultats de l'étude sont consignés dans le Tableau II-12. Sur les 7 mois de fonctionnement, l'installation pourrait produire donc 387 133 kWh. Sur la même durée, la station d'épuration consomme environ 290 000 kWh d'électricité.

		<i>mars</i>	<i>avril</i>	<i>mai</i>	<i>juin</i>	<i>juillet</i>	<i>août</i>	<i>septembre</i>
Q_s	W/m ²	449.6	562.1	504.2	571.7	533.1	526.4	484.2
Q_{in}	kW	1038.6	1298.5	1164.7	1320.6	1231.5	1216.0	1118.5
Q_{tur}	kW	207.7	259.7	232.9	264.1	246.3	243.2	223.7
H	heures	147	227	231	319	247	222	200
W_{tur}	kWh	30534	58950	53809	84256	60834	53990	44740

Tableau II-12 : Résultats de l'étude de cas de la production d'électricité pour la STEP de Lardy-Janville

Précisons qu'il s'agit là de résultats préliminaires. Ceux-ci montrent toutefois que la solution semble viable d'un point de vue énergétique en première approximation.

II.6.3. Perspectives

La suite du travail va consister à approfondir cette étude en développant notamment un modèle numérique prenant en compte progressivement les contraintes de terrain. Grâce à cela, une optimisation poussée du cycle pourra être effectuée afin d'étudier des solutions pour maximiser la production d'électricité comme notamment l'ajout d'un stockage thermique performant pour pallier les problèmes d'intermittence. Une analyse exergetique viendra compléter l'analyse énergétique.

A moyen terme, l'objectif est de réaliser l'installation sur un des sites étudiés afin d'obtenir un démonstrateur faisant office de preuve de concept et pouvant être dupliqué et adapté à d'autres sites.

Un des principaux verrous scientifiques est l'obtention d'une source chaude suffisante pour faire fonctionner le cycle ORC. Nous avons vu précédemment que l'ensoleillement disponible serait suffisant 6 à 7 mois par an, afin de produire la quantité d'électricité nécessaire au fonctionnement de la STEP sur la même période. La notion de rentabilité économique sera primordiale. Ainsi, nous envisageons l'utilisation de miroirs linéaires de Fresnel de par la simplicité de leur mise en œuvre et leur faible coût, tout en assumant un rendement légèrement dégradé par rapport à d'autres types de concentrateur comme les cylindro-paraboliques, technologie la plus mature aujourd'hui.

L'autre verrou scientifique majeur concerne la problématique la température de rejet de l'eau épurée dans l'environnement en sortie de STEP. En effet, les normes environnementales limitent la température de rejet des effluents à 25°C. En période estivale, la température de l'eau est naturellement plus élevée et proche de la limite haute autorisée. Ainsi, l'utilisation de stockage thermique est là aussi à étudier ou des solutions hybrides sont envisagées (échangeur à air, géothermie, refroidissement radiatif notamment).

II.7. Conclusions et perspectives du chapitre II

Ce chapitre a permis de montrer plusieurs pistes d'amélioration des performances des systèmes énergétiques durables.

La première partie concerne la géothermie. Cette technologie étant de conception simple, la première partie du travail a montré la nécessité d'en intensifier les transferts thermiques entre le fluide de travail et le sous-sol. Le facteur limitant au transfert a été identifié : il s'agit de la bentonite. L'étude de l'impact de l'augmentation de sa conductivité thermique a permis de définir une valeur cible à obtenir de $5 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ qui entraîne un gain de 50% de puissance extraite du sous-sol.

La solution retenue est le dopage de la bentonite au graphite en utilisant une matrice de graphite naturel expansé, compressée puis broyée. Un taux de dopage de 5% massique permet d'obtenir la valeur cible précédemment définie. D'un point de vue économique, l'ajout de graphite va entraîner deux effets antagonistes : l'augmentation du coût global de matières premières, et la diminution de la profondeur totale de forage nécessaire à puissance extraite constante. Ainsi, la réalisation d'une étude technico-économique sur un cas d'étude classique (chauffage par pompe à chaleur géothermique d'une habitation de 120m^2) a montré que cette solution diminuait le coût de l'installation de 15 à 20%.

L'optimisation des transferts thermiques permet d'envisager d'utiliser la géothermie pour d'autres applications. La première étant le stockage de chaleur par couplage solaire/géothermie, ces deux sources d'énergie renouvelable étant complémentaire. Ceci a fait l'objet du projet ANR SOLARGEOTHERM dont l'objectif principal était la réalisation d'une solution de stockage intersaisonnier. Le dispositif expérimental a démontré que la profondeur optimale des forages était plus faible (100 à 150m) qu'envisagé au départ (180 à 200m). Il a également été montré que l'utilisation de cette configuration pour un stockage de type intersaisonnier était irréalisable au profit d'un stockage de type jour/nuit. Le développement d'un modèle numérique du comportement thermique du sous-sol a été validé grâce aux résultats expérimentaux. Ce modèle a ensuite été utilisé pour simuler différentes configurations (nombre de forages, disposition, stratégie de stockage/déstockage...).

La deuxième application originale est l'utilisation de la géothermie comme système de refroidissement du condenseur des centrales solaires à concentration. Le modèle numérique développé a été utilisé afin de simuler la dissipation dans le sous-sol de la puissance thermique de refroidissement. Les performances obtenues grâce notamment au dopage de la bentonite au graphite permettent de dissiper jusqu'à 200 W par mètre linéaire de forage, ce qui rend possible cette solution dans le cas de la centrale PE 1 de Séville. Une

optimisation du procédé, couplant la dissipation par géothermie à un refroidissement radiatif nocturne à l'aide des miroirs, non utilisés la nuit, a démontré tout son potentiel.

Deux autres projets sont en cours et ouvrent la voie à des perspectives à moyen et long termes. Le premier concerne l'intégration d'un matériau thermoélectrique en face arrière de panneaux photovoltaïques afin d'utiliser le gradient thermique généré en exploitation. Grâce à une collaboration avec une équipe de chimistes de l'Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, un matériau prometteur à base de polythiophène dopé a été élaboré. Le principal verrou scientifique de la suite de ce travail est le design de l'installation afin d'en maximiser les performances de production thermoélectrique sans nuire à la production photovoltaïque.

Le second projet est un axe majeur de développement de mon activité de recherche future concernant la valorisation énergétique de la ressource disponible à échelle locale. Ceci se matérialise par la thèse en cours de Luca Zanatta dans le cadre d'une collaboration avec le SIARCE et plus généralement par la collaboration avec des acteurs publics locaux. L'approche originale consiste en l'utilisation des effluents en sortie de station d'épuration comme source froide d'un cycle ORC, la source chaude étant assurée par un système à concentration solaire. Les premiers résultats ont montré que l'ensoleillement disponible est suffisant 6 à 7 mois par an. Les perspectives de ce travail à court terme sont la réalisation d'un modèle numérique de l'installation afin d'en quantifier les performances attendues. Les perspectives à plus long terme concernent le développement d'un prototype, son optimisation et le déploiement de cette solution sur d'autres sites.

***Chapitre III : Vieillessement des systèmes énergétiques
durables***

III. Vieillessement des systèmes énergétiques durables

III.1. Introduction

Dans le contexte énergétique actuel de raréfaction des ressources fossiles, la question de l'efficacité et de la tenue dans le temps des systèmes à énergies renouvelables (notamment solaire) est un enjeu majeur. L'ensemble des recherches menées sur le sujet s'est essentiellement attaché à montrer l'efficacité de tels systèmes alternatifs dans le but d'intéresser des investisseurs potentiels.

La course au rendement nominal s'avère être de plus en plus coûteuse et la notion de vieillissement est souvent oubliée. En effet que deviennent les rendements annoncés au bout de la durée de vie prévue qui est généralement de 20, 25 ou 30 ans ? La réponse à cette problématique détermine in fine la rentabilité des investissements.

Je travaille principalement sur la thématique du vieillissement des systèmes solaires, et l'intérêt de la prise en compte de ce phénomène a déjà été démontré puisque, par exemple, un capteur photovoltaïque, soumis à diverses agressions environnementales (soleil, UV, chaleur, humidité, pollution etc...) perd entre 10 et 15% de son rendement après 20 ans d'exploitation [Berman 1997, Vazquez 2008]. L'objectif de ce travail est de comprendre et de quantifier les phénomènes et les cinétiques de dégradation des systèmes afin d'en anticiper les conséquences pour une meilleure prise en compte dès la phase de mise en œuvre.

La thématique du vieillissement était nouvelle lors de mon arrivée au CERTES en 2013. J'ai ainsi contribué au développement de la plateforme expérimentale OSED AGEING, finalisée en 2014, dotée de moyens de vieillissements accélérés (plaque thermo-régulée, enceinte climatique, simulateur solaire, insolateur UV), de caractérisations thermo-physiques et optiques (dispositif de mesure d'émissivité apparente, banc de spectroscopie d'impédance, spectromètre UV /visible/Infrarouge Perkin Elmer, transmittivité, émissivité, réflectivité). La création de la plateforme expérimentale a permis le développement des activités de recherche expérimentale dans le domaine du vieillissement, complétée par les activités de modélisation alors déjà engagées.

III.2. Application au vieillissement des systèmes photovoltaïques

Cette partie résume les travaux menés dans le cadre de la thèse de Vincent Guihéneuf (UPEC, CERTES) de 2014 à 2017, co-encadrée avec Jean-Félix Durastanti. Ce paragraphe fait référence aux publications [9] et [12].

Ce travail s'intéresse à la détermination des différents mécanismes multi-physiques de dégradation mis en jeu durant l'exploitation et le vieillissement d'un module photovoltaïque (PV). Celui-ci est un empilement multi-matériaux composé de verre, de polymère, de matériaux semi-conducteurs et de métaux. Cette hétérogénéité complexifie la compréhension du processus de dégradation et rend indispensable la connaissance des dégradations individuelles de chacun des matériaux constitutifs du module avant d'aborder les interactions entre matériaux.

La démarche a été d'étudier l'évolution des propriétés optiques et physico-chimiques des matériaux en question au cours de leur vieillissement. Des essais de vieillissements accélérés ont été conduits en laboratoire à l'aide de la plateforme OSED AGEING, en s'appuyant sur des protocoles normalisés et couramment employés dans le domaine.

III.2.1. Protocoles de vieillissement accéléré

III.2.1.1. Chaleur humide 85/85

Le test de chaleur humide à 85°C et 85 % d'humidité relative est le test le plus courant et le plus critique pour la qualification des modules PV. C'est un test de vieillissement couramment employé pour les systèmes électroniques. Il a été utilisé depuis les années 1970 sur les modules photovoltaïques à l'initiative du Jet Propulsion Laboratory (JPL). Il a été établi une équivalence entre une variation de 1 % d'humidité et un changement en température de 1°C. Il a été démontré à partir de ces résultats que 1000 heures de chaleur humide à 85°C/85 % h.r. correspondait à 20 ans d'exposition naturelle à Miami [Otth1983]. La norme IEC 61215 a imposé, depuis, la réalisation de ce test de CH à 85°C/85 % h.r. durant 1000 heures dans sa séquence de tests de qualification [IEC61215].

Le test de vieillissement accéléré sous CH est réalisé dans une enceinte climatique (MKF 240, Binder) permettant un contrôle précis des conditions climatiques (température et humidité). Des tests de chaleur humide et de cyclage thermique peuvent être réalisés grâce à des plages étendues en température (-40°C à 180°C) et en humidité (10 % h.r. à 98 % h.r.).

III.2.1.2. Exposition aux rayons UV

Le test de vieillissement accéléré sous UV se fait dans une enceinte spécifique (INVE 2000, Helios Quartz) équipée d'une lampe UV au mercure de 500 W et d'un porte-échantillon composé d'un plateau tournant en aluminium (diamètre de 30 cm) permettant d'homogénéiser le flux incident sur toute la surface. L'irradiation incidente est comprise entre 600 et 2000 W/m² selon la hauteur du plateau tournant et sur une plage de longueur d'onde comprise entre 250 nm et 400 nm. La température de l'enceinte est régulée à l'aide d'une lampe infrarouge sur la plage [35 – 70] °C mais elle sera maintenue à 50°C durant les essais. La température standard de corps noir varie entre 65°C et 90°C selon la puissance de l'irradiation incidente. Cette température standard de corps noir constitue une limite maximale pour la température de surface de l'échantillon.

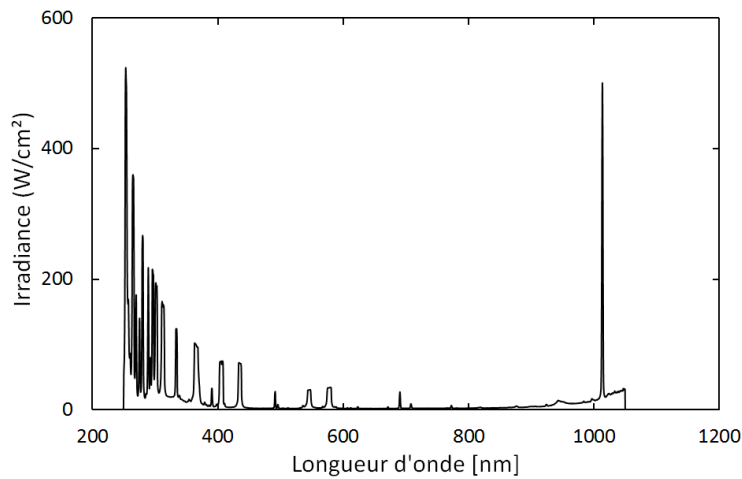


Figure III-1 Spectres d'émission mesurés de la lampe UV à moyenne pression de mercure utilisé dans l'enceinte UV.

La Figure III-1 présente le spectre d'émission de la lampe UV employée pour les tests de vieillissement sous UV. La présence du pic à 1000 nm est due à l'action de la lampe IR lors de la régulation de la température ambiante. Concernant la plage UV, l'émission des UV se fait principalement dans les UV-C, avec un pic principal à 250 nm et des pics secondaires à 265 et 279 nm, ainsi que dans les UV-B.

III.2.2. Vieillissement du verre

Le verre est un matériau inorganique qui joue un rôle majeur dans la conception des modules photovoltaïques au silicium cristallin en tant que protection supérieure ou parfois comme support (cas des modules bi-verre). Le verre est une protection de choix pour l'industrie photovoltaïque grâce à sa capacité à transmettre une large part du spectre

solaire, sa bonne tenue mécanique et sa résistance aux agressions environnementales. Il offre aussi des propriétés intéressantes comme le piégeage de la lumière par une texturation de surface ou la possibilité d'appliquer un revêtement de couche mince, comme par exemple une couche anti-reflet (CAR), un film conducteur transparent (TCO) ou des couches réfléchissantes en face arrière [Deubener 2009]. Dans ce paragraphe, nous avons évalué la durabilité d'un verre sodocalcique couramment employé comme protection supérieure dans les modules PV à base de silicium cristallin en caractérisant l'évolution de ses propriétés optiques et physico-chimiques au cours de son vieillissement. Un focus a été fait sur l'évolution des propriétés optiques fonctionnelles (transmittance en particulier) pour des applications solaires.

III.2.2.1. Étude du vieillissement accéléré sous Chaleur Humide (CH)

La Figure III.2 présente les spectres de transmittance du verre avant et après 1000 heures sous chaleur humide (CH). Deux échantillons identiques (ou échantillon double) ont été utilisés pour chaque durée d'exposition sous CH. Les courbes de transmittance comme de réflectance sont obtenues en moyennant quatre mesures pour chacun des échantillons.

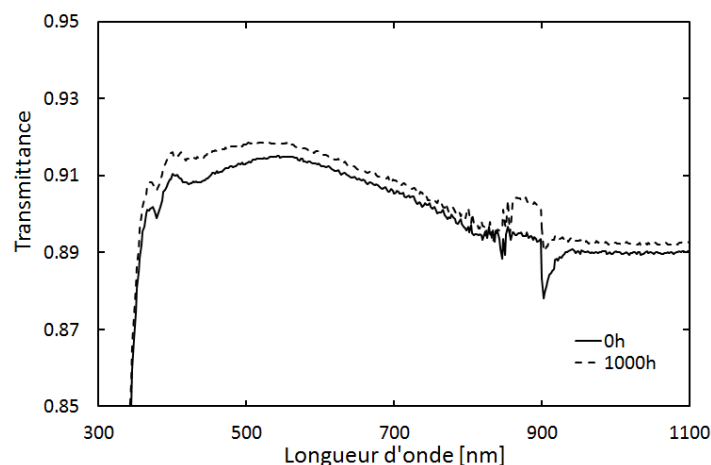


Figure III-2 Transmittance du verre sodocalcique avant et après 1000 heures sous chaleur humide (CH).

Les changements soudains à 860 nm sont des artefacts dus à l'équipement de mesure et ils ne doivent donc pas être considérés comme des changements optiques réels. Le verre à l'état initial se caractérise par une transmittance nulle pour des longueurs d'onde inférieures à 300 nm et de l'ordre de 90 % sur la plage visible et proche infrarouge. Après 1000 heures sous CH, on observe une augmentation significative de la transmittance sur l'ensemble de la plage de longueur d'onde [300 – 1100] nm. Ce résultat est intéressant pour la conversion photovoltaïque des cellules au silicium cristallin dont la plage de photo-conversion est

typiquement de [400 – 1100] nm. Cependant, un tel résultat peut engendrer des problèmes de détérioration dans la plage UV : l'augmentation de transmittance sur cette plage de longueur d'onde peut accélérer la dégradation du polymère sous-jacent (encapsulant) et de la cellule PV réduisant à long terme le rendement et la durabilité du module.

La Figure III-3 représente l'évolution de la transmittance intégrée en fonction du temps d'exposition sous CH.

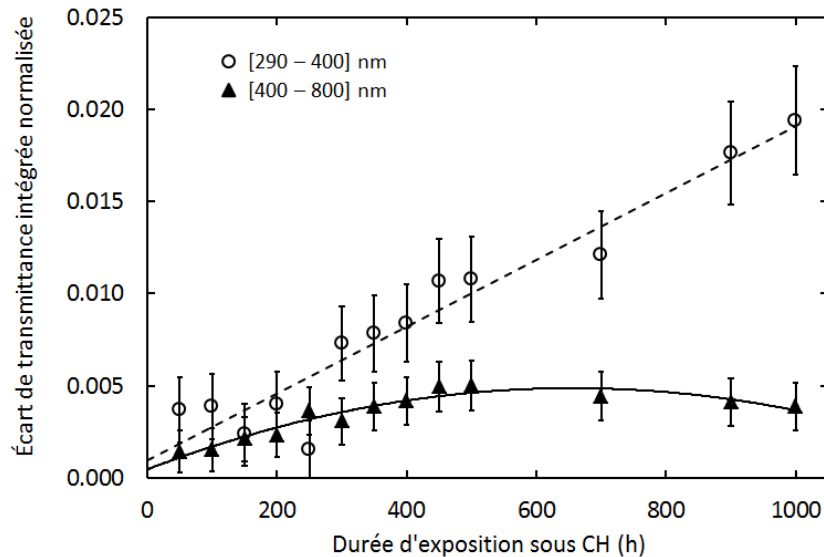


Figure III-3 Écart normalisé de transmittance intégrée sur [290 – 400] nm (●) et [400 – 800] nm (▲) en fonction du temps d'exposition sous CH.

Il en ressort que le gain en transmittance est plus important dans la plage UV [290 – 400] nm que dans la plage visible [400 – 800] nm. L'écart de transmittance intégrée calculé sur la plage UV augmente linéairement avec la durée d'exposition pour atteindre 0,019 après 1000 heures.

Nous pouvons en conclure que l'encapsulant polymère situé sous le verre en face avant va être soumis à une quantité plus importante de radiations UV au fil des années accélérant ainsi sa dégradation. L'évolution de l'écart de transmittance intégrée semble être plus complexe dans la plage visible [400 – 800] nm. L'écart augmente de seulement 0,005 après 500 heures de CH puis il y a une stabilisation voir une légère baisse jusqu'à 1000 heures. Ceci démontre la bonne résistance du verre aux dégradations thermiques et chimiques induites par le vieillissement sous CH.

Dans le but de relier les modifications optiques précédemment constatées avec des modifications physico-chimiques de surface et en volume du verre certaines caractérisations ont été réalisées. Il s'agit de spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) permettant d'identifier la concentration et les liaisons des espèces présentes dans le verre,

la microscopie électronique à balayage (MEB) couplée à un détecteur à rayons X (EDX) qui fournit une analyse de la composition chimique sur un volume de l'ordre du μm^3 alors que la spectrométrie photoélectronique par rayon X (XPS) analyse le verre à l'extrême surface (profondeur d'analyse inférieure à 10 nm).

L'ensemble des caractérisations effectuées a permis de conclure que le vieillissement sous CH induit une dégradation en surface du verre. Les résultats ont également permis de suggérer que le vieillissement du verre est surtout défini par un processus d'hydratation du réseau vitreux durant l'exposition sous CH.

Les modificateurs de réseau (Na_2O , CaO , K_2O) sont plus ou moins lixiviés à la surface du verre et il se produit une corrosion en surface du verre induite par l'hydrolyse du réseau Si–O–Si.

III.2.2.2. Etude du vieillissement accéléré sous UV

La Figure III-4 présente l'évolution de la transmittance sur la plage de longueur d'onde [300 – 1100] nm en fonction de la dose UV incidente.

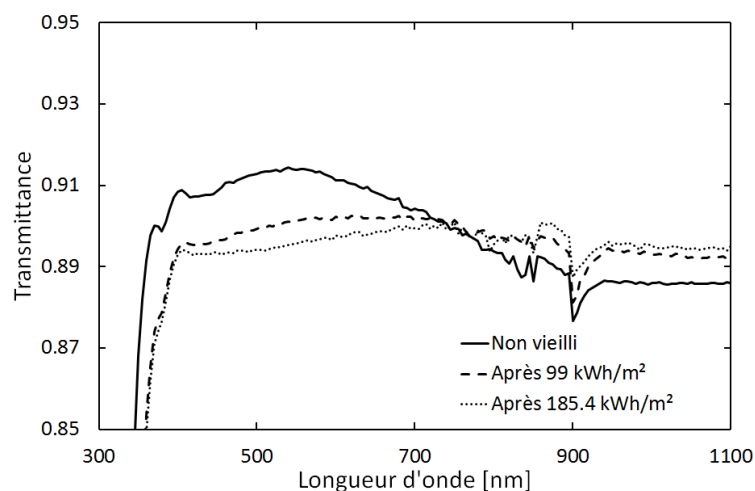


Figure III-4 Transmittance du verre sodocalcique en fonction de la dose UV incidente.

La courbe initiale (verre non vieilli) se caractérise par une transmittance de 0,911 pour une longueur d'onde de 600 nm contre 0,877 à 900 nm. Ce verre a une transmittance aux UV quasiment nulle avec une valeur de seulement 0,058 à 300 nm. Au fur et à mesure de l'exposition aux UV, on constate un phénomène « d'aplanissement » de la transmittance sur l'ensemble du spectre. Sur la plage de longueur d'onde [400 – 1100] nm, la transmittance diminue de 2,1 % avec l'exposition aux UV. En effet, à 600 nm, elle n'est que de 0,902 et 0,897 pour des doses UV respectives de 99 kWh/m² et 185,4 kWh/m². À l'inverse, à partir de 800 nm, il y a un accroissement de la transmittance avec l'exposition aux UV par rapport à

l'échantillon non vieilli. La transmittance à 900 nm atteint 0,881 et 0,887 pour respectivement 99 kWh/m² et 185,4 kWh/m².

Afin de mieux analyser ces résultats, la Figure III-5 expose les écarts normalisés de transmittance intégrée par rapport à l'échantillon non vieilli en fonction de deux plages de longueur d'onde : [290 – 400] nm et [400 – 800] nm.

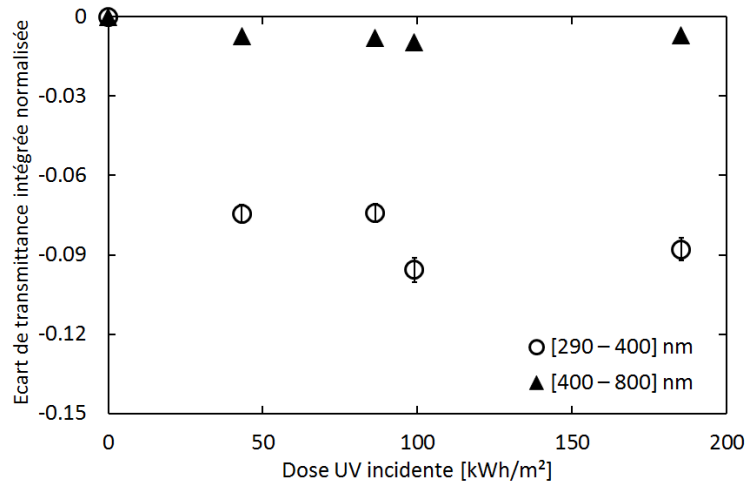


Figure III-5 Écart normalisé de transmittance intégrée sur [290 – 400] nm (●) et [400 – 800] nm (▲) en fonction de la dose UV

La plage [290 – 400] nm subit une forte diminution de la transmittance fournissant ainsi la preuve que le vieillissement sous UV du verre sodocalcique diminue l'exposition aux UV du polymère encapsulant situé juste après le verre. Concernant la plage [400 – 800] nm, l'écart par rapport à la transmittance avant vieillissement est plus faible, de l'ordre de 0,8 %, et la stabilisation est atteinte dès la première exposition (43,2 kWh/m²). Il apparaît donc que le vieillissement sous UV ne provoque pas directement de dégradation significative pour la conversion PV. De plus, l'impact des UV sur le verre semble préserver le polymère encapsulant d'une forte photodégradation n'impactant pas sa durabilité dans le module.

L'absence de modification dans la composition chimique du verre ne permet pas de mettre en évidence des phénomènes de migrations ioniques dans le réseau vitreux durant le vieillissement sous UV. Des changements structuraux comme des réarrangements de liaisons chimiques semblent plus probables. En effet, les analyses FTIR suggèrent des modifications en volume de la structure du réseau vitreux avec migration de l'eau moléculaire vers la surface.

III.2.3. Vieillissement accéléré d'une cellule solaire au silicium cristallin

Les mêmes protocoles de vieillissement accéléré ont été appliqués à une cellule solaire silicium cristallin. Il est apparu que la chaleur humide à 85°C et 85 % h.r. n'a aucun impact significatif sur les performances électriques de la cellule solaire non encapsulée, et ce, même après 2000 heures d'exposition. Des taux de dégradation du rendement de seulement 0,5 % ont été mesurés après 2000 heures. Les résultats issus du vieillissement accéléré sous UV sont donc détaillés avec plus de précisions.

III.2.3.1. Étude du vieillissement accéléré sous UV

Des cellules solaires commerciales avec de bonnes performances électriques et une faible dispersion des caractéristiques ont été sélectionnées pour assurer la fiabilité de l'étude. Afin d'obtenir des valeurs de référence, une caractérisation électrique initiale a été réalisée : tension de circuit ouvert V_{CO} , courant de court-circuit J_{CC} , facteur de forme FF, puissance maximale délivrée P_{max} et rendement. La moyenne des caractéristiques électriques initiales des 61 cellules étudiées dans ce chapitre est présentée dans le Tableau III-1. Les mesures sont effectuées dans les conditions standard de mesure I-V.

V_{CO} [V]	J_{CC} [mA/cm ²]	FF [%]	P_{max} [W]	Rendement [%]
$0,6538 \pm 0,0005$	$38,55 \pm 0,11$	$77,2 \pm 0,2$	$4,66 \pm 0,02$	$19,45 \pm 0,07$

Tableau III-1 : Moyennes des caractéristiques électriques initiales de l'ensemble des cellules étudiées.

L'intervalle de confiance associé à chaque caractéristique est quantifié par l'écart type issu des 183 caractérisations (3 mesures sur chacune des 61 cellules).

La Figure III-6 présente les caractéristiques électriques de plusieurs cellules PV en fonction de la dose UV reçue. À partir des mesures initiales sur chaque cellule, un taux de dégradation est calculé pour chaque paramètre électrique. Le taux de dégradation croît logiquement au fur et à mesure de l'exposition aux UV. Après une exposition aux UV de 199,8 kWh/m² (soit 333 heures sous 600 W/m²), le taux de dégradation du rendement η de la cellule atteint 11,23 %. Ce taux de dégradation est principalement dû à une dégradation de V_{CO} (6,24 %) et du J_{CC} (3,16 %). Le facteur de forme, FF, semble être moins affecté par le vieillissement UV et montre un taux de dégradation moyen de 1 % quelle que soit la dose UV.

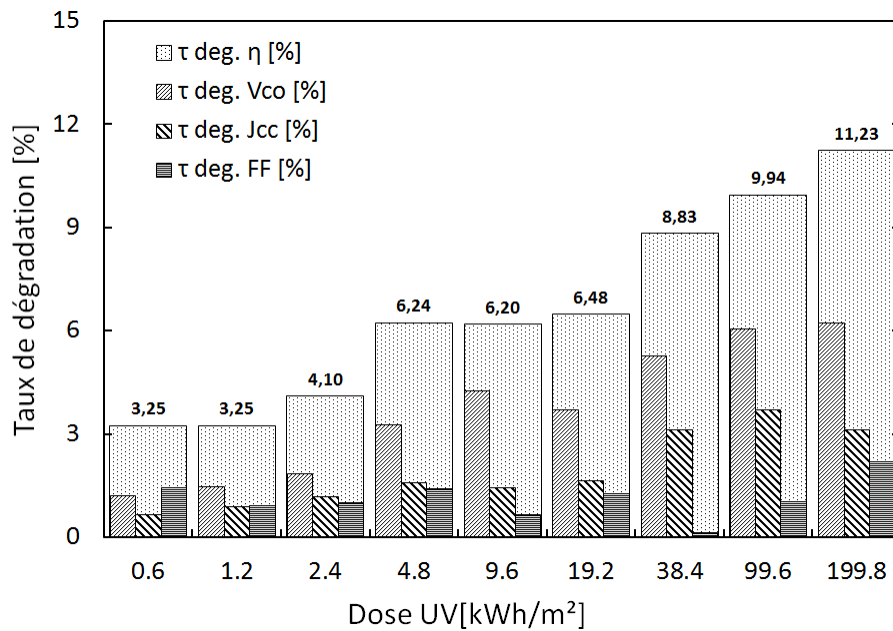


Figure III-6 : Taux de dégradation des paramètres électriques à partir des mesures I-V et en fonction de la dose UV incidente sous une intensité de 600 W/m².

L'évolution de chaque taux de dégradation est présentée en Figure III-7 en fonction de la dose UV incidente.

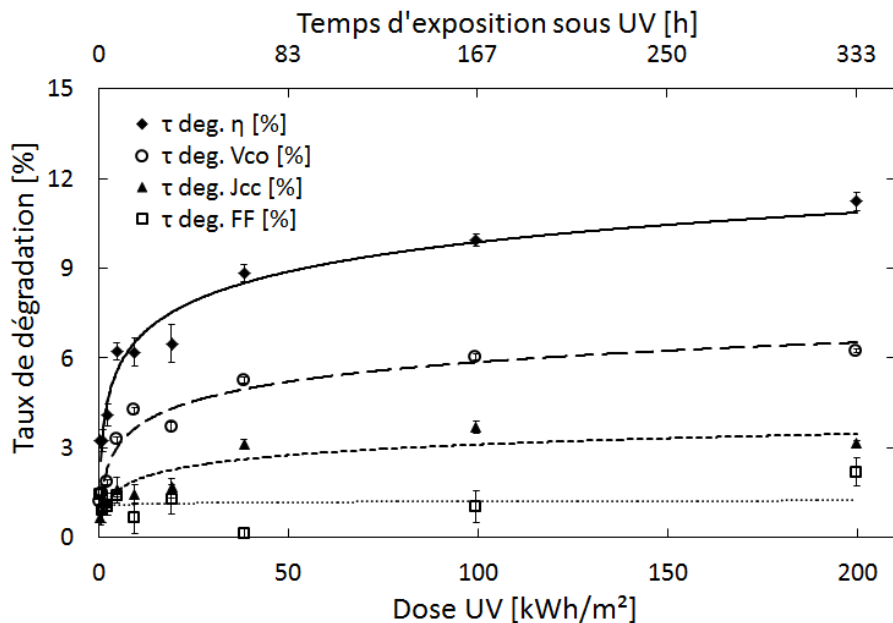


Figure III-7 : Cinétiques du taux de dégradation de chaque paramètre électrique en fonction de la dose UV sous une intensité de 600 W/m².

La tension de circuit ouvert, V_{CO} , et la densité de courant de court-circuit, J_{CC} , ont des comportements similaires : une forte dégradation pour de faibles doses UV suivie par une stabilisation du taux de dégradation pour des doses UV plus importantes. En effet, une exposition UV additionnelle après approximativement 50 kWh/m² ne va pas engendrer

d'augmentation significative des taux de dégradation. Le V_{CO} est le paramètre le plus affecté et compte pour la moitié du taux de dégradation du rendement. Cette perte en V_{CO} pourrait être partiellement liée à une dégradation de la couche antireflet. La réduction du J_{CC} est quant à elle due à une dégradation inhérente à la jonction p-n. Il apparaît que le taux de dégradation du FF n'est pas corrélé avec le temps d'exposition aux UV. Le FF est une mesure de la qualité de la cellule solaire et il est calculé en comparant la puissance maximale avec la puissance théorique. Ainsi, ce ratio reste approximativement constant durant le vieillissement sous UV.

III.2.4. Vieillissement accéléré d'un mini-module au silicium cristallin

III.2.4.1. Structure et performances initiales du mini-module

Les mini-modules utilisés dans cette étude ont été réalisés à partir des cellules solaires monocristallines fournis par Evergreen Solar et analysées au paragraphe précédent. Pour rappel, il s'agit d'une cellule solaire au silicium de type p avec une architecture PERC avec la particularité de présenter une fenêtre de contact en face arrière avec une passivation par effet de champs (Al-BSF). Les cellules solaires ont une aire active de $239,5 \text{ cm}^2$ et trois busbars pour le contact en face avant. Des rubans d'interconnexion avec une composition SnPb de 60/40 ont été soudés à une température d'environ 400°C après avoir appliqué une résine comme flux à souder sur chaque busbar. Cette cellule est ensuite encapsulée entre deux feuilles de copolymère d'éthylène-acétate de vinyle (EVA), composé de 30 % molaire d'acétate de vinyle, et de deux plaques de verre sodocalcique de dimensions $17 \times 17 \text{ cm}^2$ et d'une épaisseur de 2 mm. L'encapsulation a été réalisée par l'entreprise Solems (Palaiseau, France) à une température de 150°C durant 15 minutes. Le verre est identique à celui étudié précédemment. Pour cette première étude, le choix a été fait de ne pas utiliser de cadre métallique afin de permettre un vieillissement homogène du module (impossibilité de mettre un cadre métallique au niveau des rubans). Une image ainsi qu'une représentation schématique du mini-module sont présentés dans la Figure III-8.

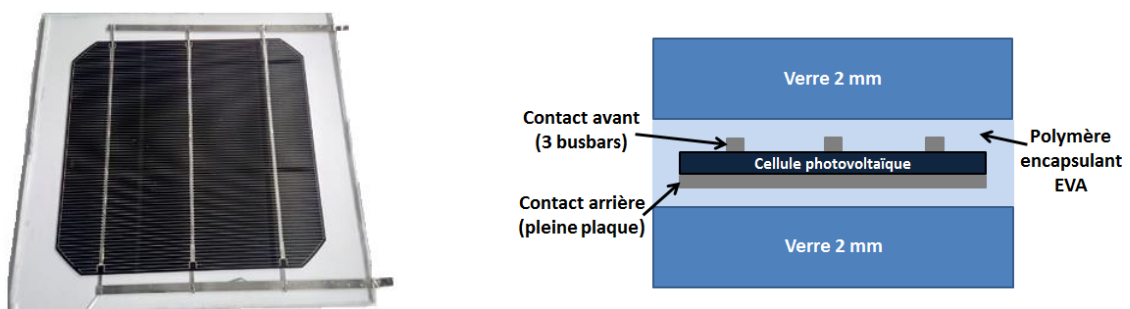


Figure III-8 : Image et représentation schématique du mini-module bi-verre au silicium cristallin

Les six mini-modules réalisés ont tout d’abord été divisés en trois lots : le premier constituant le lot de référence, le second est consacré au vieillissement sous CH et le dernier dédié à l’impact de l’exposition aux UV. La moyenne des caractéristiques électriques initiales des six mini-modules étudiés dans ce chapitre est présentée dans le Tableau III-2

V_{CO} [V]	J_{CC} [mA/cm ²]	FF [%]	P_{max} [W]	Rendement [%]
$0,6481 \pm 0,0006$	$30,37 \pm 0,05$	$69,6 \pm 0,2$	$3,28 \pm 0,01$	$13,69 \pm 0,03$

Tableau III-2 Moyennes des caractéristiques électriques initiales des six mini-modules étudiés.

III.2.4.2. Vieillissement accéléré sous chaleur humide

La chaleur humide (CH) à 85°C/85 % h.r. n’affecte pas les performances électriques des mini-modules après plus de 2000 heures d’exposition. Le rendement qui était initialement de 13,67 %, reste constant à 13,74 % avec un I_{CC} à 7,33 A, un V_{CO} à 0,6415 V et un FF à 69,93 comme le montre le Tableau III-3.

Durée sous CH [h]	Paramètres STC									
	V_{CO} [V]		J_{CC} [mA/cm ²]		FF [%]		P_{max} [W]		Rendement [%]	
	Moy.	ΔX	Moy.	ΔX	Moy.	ΔX	Moy.	ΔX	Moy.	ΔX
0	0,6476		30,45		69,30		3,27		13,67	
479	0,6435	-0,63	30,70	0,82	70,11	1,16	3,32	1,53	13,85	1,32
970	0,6432	-0,68	30,65	0,66	70,22	1,33	3,31	1,21	13,84	1,24
1278	0,6435	-0,63	30,62	0,56	70,57	1,83	3,33	1,83	13,90	1,68
1612	0,6421	-0,85	30,17	-0,92	70,43	1,63	3,27	0	13,64	-0,22
2010	0,6415	-0,94	30,62	0,56	69,94	0,92	3,29	0,61	13,74	0,51

Tableau III-3 Caractéristiques électriques et écarts relatifs ΔX (%) après différentes durées d’exposition à la CH.

III.2.4.3. Vieillissement accéléré sous UV

L’exposition aux UV induit une légère diminution des performances électriques. Le rendement passe de 13,68 % à 13,21 % après une exposition à une dose UV de 597,6 kWh/m², soit 13 années de vieillissement en conditions naturelles.

Le V_{CO} décroît rapidement dès la première exposition aux UV et passe de 0,6459V à 0,6285 V après 19,2 kWh/m², soit une baisse relative de 2,69 %. Les écarts relatifs en J_{CC} sont légèrement plus faibles que pour le V_{CO} et varient entre -1,55 % et -2,14 %.

En revanche, il a été constaté une légère amélioration du FF et donc du rapport entre la structure PV réelle et idéale. Cette dégradation est caractéristique du phénomène de LID qui implique l'apparition de complexes B-O recombinants pour les porteurs de charge.

Dose UV [kWh/m ²]	Paramètres STC									
	V _{co} [V]		J _{cc} [mA/cm ²]		FF [%]		P _{max} [W]		Rendement [%]	
	Moy.	ΔX	Moy.	ΔX	Moy.	ΔX	Moy.	ΔX	Moy.	ΔX
0	0,6459		30,35		69,76		3,28		13,68	
19,2	0,6285	-2,69	29,87	-1,58	70,53	1,10	3,17	-3,35	13,24	-3,22
99,6	0,6283	-2,72	29,85	-1,65	70,62	1,23	3,17	-3,35	13,24	-3,22
199,2	0,6272	-2,90	29,70	-2,14	70,81	1,51	3,16	-3,66	13,19	-3,58
398,4	0,6272	-2,90	29,81	-1,78	70,65	1,28	3,16	-3,66	13,21	-3,44
597,6	0,6285	-2,69	29,88	-1,55	70,36	0,86	3,16	-3,66	13,21	-3,44

Tableau III-4 Caractéristiques électriques et écart relatif ΔX (%) après différentes doses UV.

La Figure III-9 présente l'évolution de la transmittance et de l'écart de transmittance absolu ΔT en fonction de la dose UV incidente: non vieilli, 19,2 kWh/m², 199,2 kWh/m² et 597,6 kWh/m². Deux mesures par mini-module (empilement verre/double couche d'encapsulant / verre) ont été faites au fur et à mesure de l'exposition aux UV.

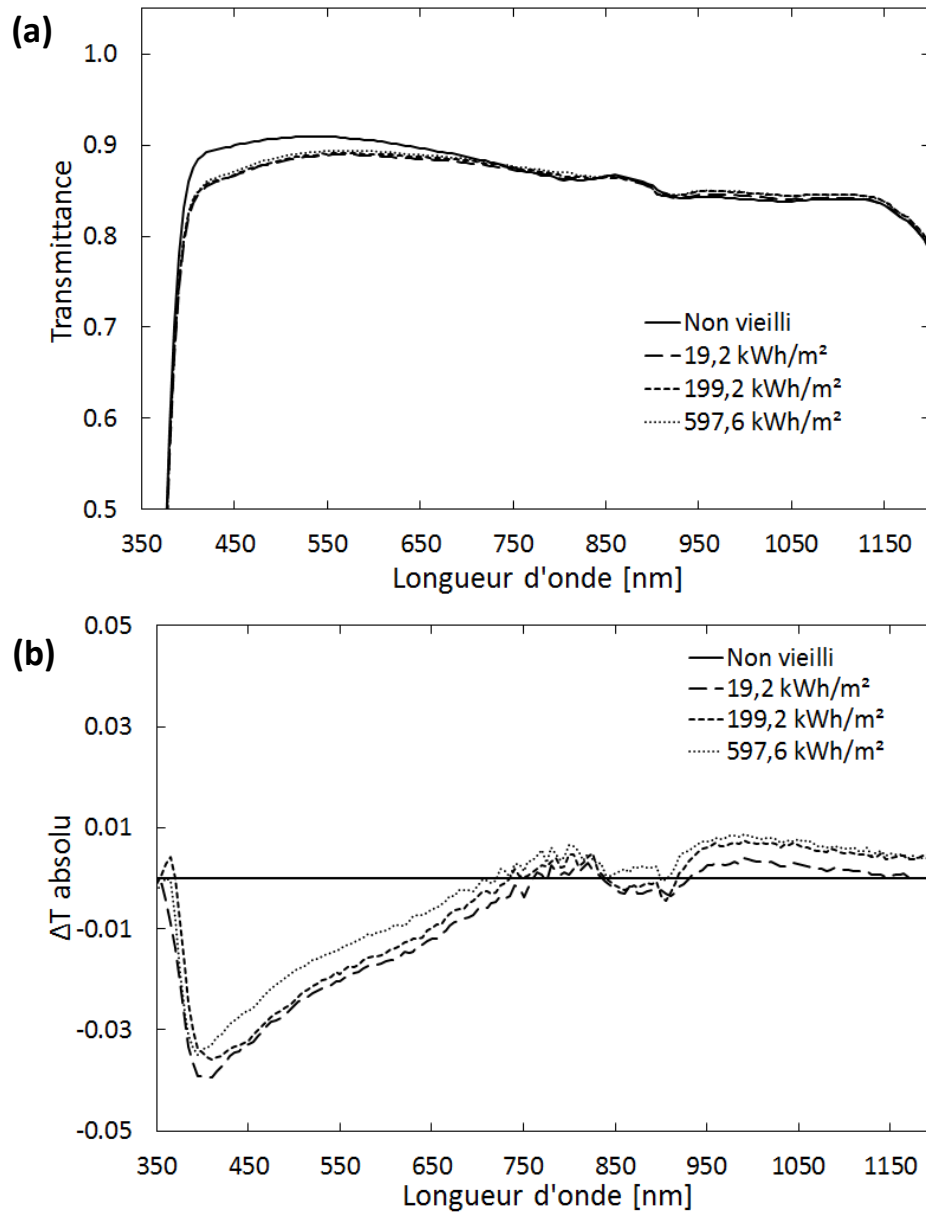


Figure III-9 Transmittance (a) et écart de transmittance absolu ΔT (b) en fonction de la dose UV reçue.

L'exposition aux UV induit un phénomène d'aplanissement de la transmittance. Ainsi, il y a une légère diminution de la transmittance sur la plage de longueur d'onde [400 – 700] nm et une légère augmentation pour des longueurs d'onde supérieures à 900 nm. Selon l'inspection visuelle, les UV ne provoquent pas de changement macroscopique tel que l'apparition de tâche ou la formation de dépôt, une délamination précoce ou un début de corrosion de la grille de collecte.

III.3. Equivalence vieillissement accéléré/ naturel : développement de protocoles

Cette partie traite d'une interrogation constante au fil des travaux sur la thématique du vieillissement : peut-on parler « d'équivalence » entre vieillissement accéléré et vieillissement naturel ? Les résultats présentés ici sont préliminaires et discutent de la pertinence des protocoles couramment utilisés et normalisés.

III.3.1. Introduction

La connaissance de l'évolution des performances d'un système solaire thermique ou photovoltaïque est primordiale. Les protocoles de vieillissement accéléré actuellement utilisés sont très souvent remis en cause par la communauté. Aujourd'hui, la certification des performances des modules photovoltaïques est réalisée à l'aide d'un test dit de « Chaleur Humide » (Damp Heat) qui consiste à soumettre le module à une température de 85°C et un taux d'humidité de 85% pendant 1000 heures. Pour rappel, ce test a été développé par le NREL et est censé représenter un vieillissement naturel équivalent à 20 ans sous le climat de Miami. Mais ce test est remis en cause par plusieurs études (notamment par **[Wolgemuth 2011]**) et par les travaux menés au cours de la thèse de Vincent Guihéneuf. Certes, ce protocole est agressif pour les installations, mais l'équivalence vieillissement accéléré/ vieillissement naturel n'est pas démontrée expérimentalement.

D'autres protocoles de vieillissement accéléré comme l'irradiation aux rayons UV ou la combinaison de ces deux tests ont été réalisés, et ces derniers donnent des premiers résultats prometteurs. Il semble donc bien nécessaire de développer des protocoles de vieillissement accéléré fiables comme outil scientifique d'appui à la durabilité technico-économique des installations solaires à petite ou grande échelle.

Cette étude a porté sur l'évolution des propriétés optiques en transmission et réflexion du verre sodocalcique couramment utilisé pour les héliostats des centrales solaires à concentration mais également pour le photovoltaïque. En effet, ce dernier représente la première couche du système, soumis aux agressions environnementales. Le comportement de ses propriétés optiques au cours du temps est donc primordial pour comprendre le phénomène de vieillissement du système global et l'évolution des performances associées (rendement de conversion thermique ou électrique).

III.3.2. Comparaison du vieillissement naturel et du vieillissement accéléré du verre

La Figure III-10 présente la transmittance et la réflectance sur la plage [300 – 1100] nm de deux échantillons de verre sodocalcique de 2 mm d'épaisseur utilisés sur des héliostats de centrale solaire à concentration durant plus de 30 ans en environnement semi-aride [Lind 1980]. L'un des échantillons a été exposé aux agressions extérieures durant 30 ans et le second (considéré non vieilli) a été protégé d'un ensoleillement direct.

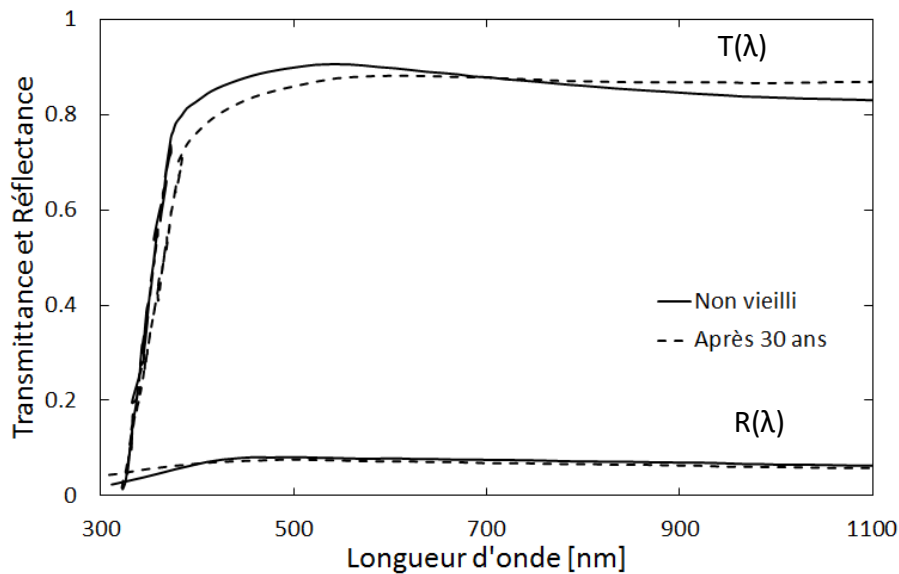


Figure III-10 : Transmittance et réflectance de verres non vieilli et exposé durant 30 ans à un vieillissement naturel

La transmittance évolue significativement sur deux bandes spectrales : une diminution de la transmittance sur la plage [350 – 700] nm et une augmentation sur la plage [700 – 1100] nm. Ceci conduit à un « aplatissement » de la transmittance sur la plage [350 – 1100] nm. Le verre se comporte quasiment comme un corps gris après vieillissement naturel avec une valeur de transmittance de 0,88 sur la plage [500 – 1100] nm.

Comparons ces résultats issus de la littérature à l'impact du test vieillissement accéléré sous chaleur humide (CH) sur les propriétés optiques du verre sodocalcique. Cette étude a permis de déterminer le mécanisme de vieillissement correspondant et de caractériser l'évolution de la transmittance qui est la propriété optique fonctionnelle du verre pour des applications solaires.

La Figure III-11 présente les spectres de transmittance du verre avant et après 1000 heures sous chaleur humide (CH). Les changements soudains à 860 nm sont des artefacts dus à

l'équipement de mesure et ils ne doivent donc pas être considérés comme des changements optiques réels.

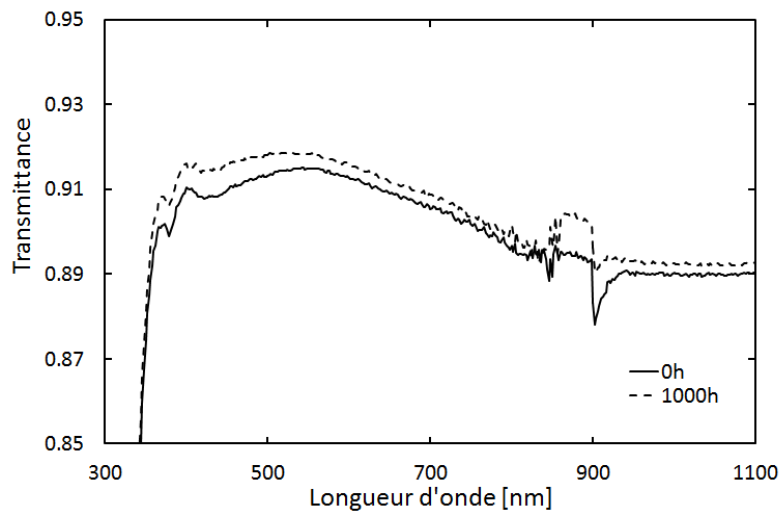


Figure III-11 : Transmittance du verre sodocalcique avant et après 1000 heures sous chaleur humide (CH).

Le verre à l'état initial se caractérise par une transmittance nulle pour des longueurs d'onde inférieures à 300 nm et de l'ordre de 90 % sur la plage visible et proche infrarouge. Après 1000 heures sous CH, on observe une augmentation significative de la transmittance sur l'ensemble de la plage de longueur d'onde [300 – 1100] nm. Le vieillissement accéléré sous chaleur humide reproduit l'augmentation de transmittance du vieillissement naturel sur le proche infrarouge [900 – 1100] nm mais a un effet antagoniste dans le visible [400 – 800] nm.

Ce protocole ne reproduit donc que partiellement les effets du vieillissement naturel sur les propriétés optiques fonctionnelles du verre.

La même comparaison a été opérée après application du protocole d'irradiation UV. Ainsi la Figure III-12 présente l'évolution de la transmittance sur la plage de longueur d'onde [300 – 1100] nm en fonction de la dose UV incidente.

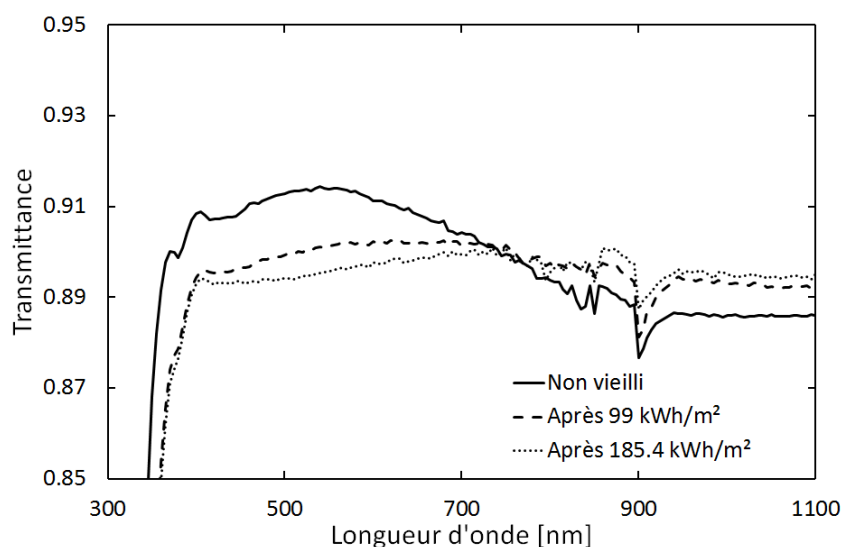


Figure III-12: Transmittance du verre sodocalcique en fonction de la dose UV incidente.

La courbe initiale (verre non vieilli) se caractérise par une transmittance de 0,911 pour une longueur d'onde de 600 nm contre 0,877 à 900 nm. Ce verre a une transmittance aux UV quasiment nulle avec une valeur de seulement 0,058 à 300 nm. Au fur et à mesure de l'exposition aux UV, on constate un phénomène « d'aplanissement » de la transmittance sur l'ensemble de la plage de longueur d'onde. Sur la plage de longueur d'onde [400 – 1100] nm, la transmittance diminue de 2,1 % avec l'exposition aux UV. En effet, à 600 nm, elle n'est que de 0,902 et 0,897 pour des doses UV respectives de 99 kWh/m² et 185,4 kWh/m². À l'inverse, à partir de 800 nm, il y a un accroissement de la transmittance avec l'exposition aux UV par rapport à l'échantillon non vieilli. La transmittance à 900 nm atteint 0,881 et 0,887 pour respectivement 99 kWh/m² et 185,4 kWh/m².

Le vieillissement accéléré sous UV reproduit principalement l'effet du vieillissement naturel dans le visible avec une diminution significative de la transmittance sur la plage [400 – 800] nm. Il semble que ce dernier reproduise également les effets du vieillissement naturel sur le proche infrarouge avec une augmentation de la transmittance.

III.3.3. Perspectives : combinaison des deux tests de vieillissement accéléré

Une étude portant sur la combinaison des deux tests de vieillissement accéléré (CH et UV) a été réalisée pour déterminer l'effet successif du couple température/humidité et des radiations UV. Nous avons vu précédemment que le vieillissement sous chaleur humide reproduit les effets du vieillissement naturel dans le proche infrarouge avec une augmentation de la transmittance sur cette plage (Figure III-10 et Figure III-11). Nous avons

vu également, que le vieillissement accéléré sous UV reproduit les effets du vieillissement naturel dans le visible avec une diminution de la transmittance sur cette plage (Figure III-10 et Figure III-12). L'hypothèse ici avancée est que le vieillissement accéléré le plus représentatif d'un vieillissement naturel serait la combinaison de ces deux tests (chaleur humide et UV).

Ainsi, la Figure III-13 présente l'évolution de la transmittance du verre non vieilli et exposé à trois conditions de vieillissement accéléré : 900h sous CH, 99 kWh/m² sous UV et une combinaison de 900h sous CH suivi de 57,6 kWh/m² sous UV.

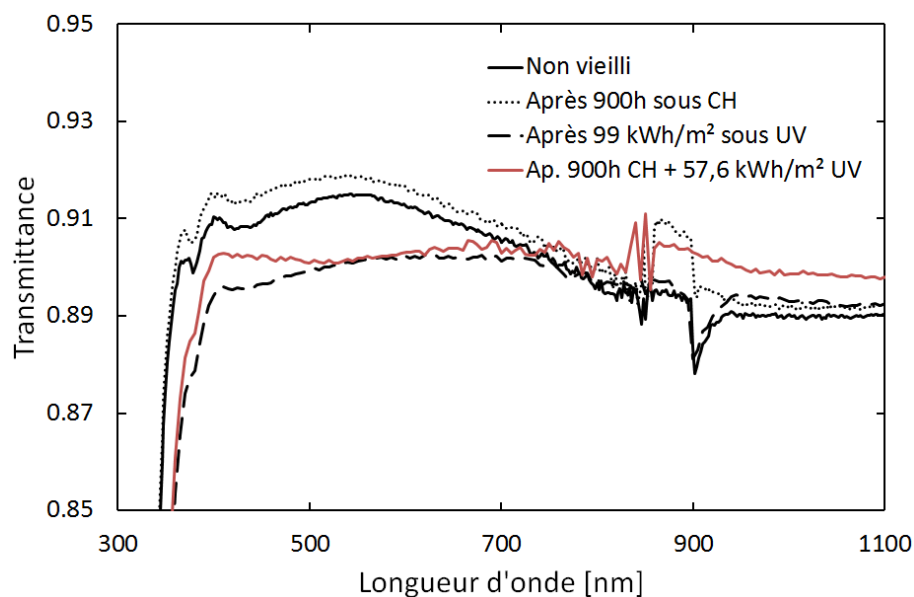


Figure III-13: Transmittance du verre non vieilli et exposé à trois conditions de vieillissement accéléré : 900h sous CH, 99 kWh/m² sous UV et une combinaison de 900h sous CH suivi de 57,6 kWh/m² sous UV.

Comme vu précédemment, l'exposition à la CH provoque une augmentation de la transmittance sur la plage de longueur d'onde [400 – 800] nm. À l'inverse, l'exposition aux UV conduit à une diminution de la transmittance sur la plage [400 – 700] nm et à une augmentation de celle-ci sur la plage [900 – 1100] nm ; ce qui conduit en somme à un aplatissement de la courbe de transmittance sur la plage [400 – 1100] nm. La combinaison de ces deux types de vieillissement accéléré (en rouge sur la Figure III-13) conduit globalement à des résultats proches de ceux constatés pour l'exposition aux UV : diminution sur [400 – 700] nm et augmentation sur [900 – 1100] nm. On notera que les durées d'exposition sous CH et les doses UV sont différentes pour les vieillissements seuls et combinés, mais il semble que le prétraitement sous chaleur humide constitue un facteur accélérateur dans la dégradation de la transmittance.

Le vieillissement sous chaleur humide reproduit les effets du vieillissement naturel sur la plage correspondant au proche infrarouge mais conduit à un effet contraire dans la plage visible. Ce test accéléré seul ne semble pas convenir puisque la transmittance dans la plage visible est la propriété fonctionnelle recherchée pour des applications solaires. Ce dernier est pourtant le seul utilisé dans la norme pour la certification des modules solaires photovoltaïques. Il semble évident qu'un seul test ne puisse correspondre à toutes les configurations rencontrées ainsi qu'à tous types de climats. Ainsi, il faut définir un type de vieillissement accéléré adapté à chaque grand type de climat rencontré (aride, humide, continental etc...)

La combinaison d'une exposition sous CH suivie d'une exposition aux UV conduit à des résultats proches de ceux constatés pour un vieillissement naturel.

La réalisation de ces tests séquentiels, semble être une voie intéressante pour reproduire le plus fidèlement possible les effets du vieillissement naturel.

III.4. Développement d'un indicateur de vieillissement : l'émissivité apparente

Ce travail est réalisé en étroite collaboration avec Olivier Riou depuis mon arrivée au CERTES en 2013. Les publications [7], [10] et [11] en sont issues.

Les compétences historiques de l'équipe OSED du CERTES en thermographie infrarouge et métrologie thermique ont été mise à profit afin de développer un outil de quantification du vieillissement des surfaces des matériaux utilisés par les systèmes énergétiques.

III.4.1. Principe de l'émissivité apparente

L'émissivité apparente est une propriété de surface et reflète donc l'état de surface de l'échantillon. Sa mesure utilise la thermographie infra-rouge, une technique indirecte mesurant la température d'un corps à partir des radiations émises par ce dernier. La notion d'émissivité apparente apparait dans l'équation radiométrique qu'utilisent implicitement tous les imageurs thermiques : ce paramètre $\varepsilon_{\Delta\lambda}(T)$ mesure le thermosignal d'émission de la cible rapporté à un corps noir à la même température. L'expression de l'équation radiométrique, mise en œuvre dans les caméras thermiques est rappelée ci-dessous:

$$L_{\Delta\lambda}(T_{app.}) = \varepsilon_{\Delta\lambda}(T) \times L_{\Delta\lambda}^0(T) + (1 - \varepsilon_{\Delta\lambda}(T)) \times L_{\Delta\lambda}^0(T_{env.}) \quad \text{Équation III-1}$$

où $L_{\Delta\lambda}^0(T)$ et $L_{\Delta\lambda}^0(T_{env.})$ sont les thermosignaux de corps noirs associés respectivement aux températures d'émission T et d'environnement $T_{env.}$. Le thermosignal fourni par la caméra $L_{\Delta\lambda}(T_{app.})$ est associé à la température apparente $T_{app.}$. Ces thermosignaux sont rapportés à la bande spectrale de détection $\Delta\lambda$ de la caméra. Une fois la validité du modèle de l'émetteur admise, l'expression de l'émissivité apparente devient :

$$\varepsilon_{\Delta\lambda}(T) = \frac{L_{\Delta\lambda}(T_{app.}) - L_{\Delta\lambda}^0(T_{env.})}{L_{\Delta\lambda}^0(T) - L_{\Delta\lambda}^0(T_{env.})} \quad \text{Équation III-2}$$

Sa caractérisation est alors possible à partir des trois températures (apparente, d'environnement et d'émission) et de la courbe d'étalonnage du système. Cet indicateur est spécifique à la technique de détection mise en œuvre dans la caméra, de la bande spectrale de détection $\Delta\lambda$ et de l'émissivité spectrale de la cible.

Un banc de caractérisation de l'émissivité apparente a été développé en interne (Figure III-14). La quantification de l'émissivité apparente suppose donc la connaissance de la température de l'émetteur. Celle-ci est contrôlée à trois niveaux :

- une référence isotherme est fournie par un bloc en acier de 150 x 150 x 50 mm³ scellé dans un ciment réfractaire de 150 mm d'épaisseur. Un régulateur PID nous permet de fixer la température du bloc dans la gamme [20 – 120] °C avec une non-uniformité de 0,5 % de la consigne.
- une pastille de graphite naturel expansé ou est placée en face arrière de Le montage comprime le GNE en améliorant ainsi le contact thermique de l'échantillon sur le bloc isotherme.
- Le troisième niveau de contrôle est fourni par une entretoise en papier de 2 mm d'épaisseur. L'entretoise comporte une ouverture circulaire de 8 mm de diamètre en son centre. Elle couvre la face avant de l'échantillon et isole thermiquement l'échantillon de la plaque de montage. Deux thermocouples sont collés sur l'entretoise et placés en contact direct avec la face avant de l'échantillon : ils permettent de mesurer la température de lèvre qui nous permettra ensuite de quantifier la température d'émission au centre de l'ouverture. L'empilement est finalement serré à l'aide d'une plaque ajourée en acier de 1,5 mm d'épaisseur.

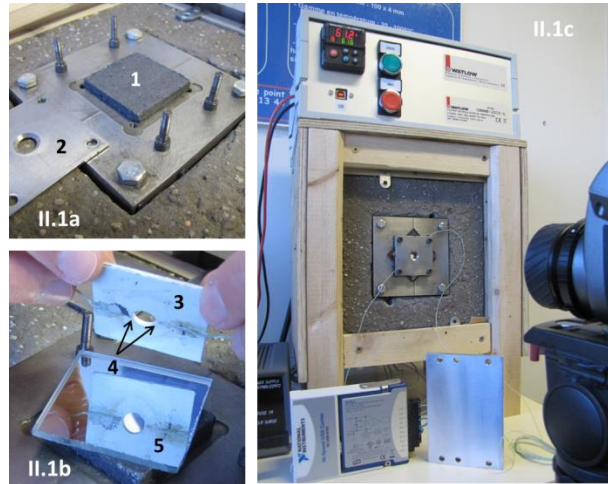


Figure III-14 : Appareil de mesure de l'émissivité apparente. 1: pastille de graphite naturel expansé (GNE), 2 : plaque de montage, 3 : cale, 4 : thermocouples, 5 : échantillon de verre

Pour finir, une plaque de montage est finalement vissée. Le détail du montage de l'échantillon est présenté en Figure III-15

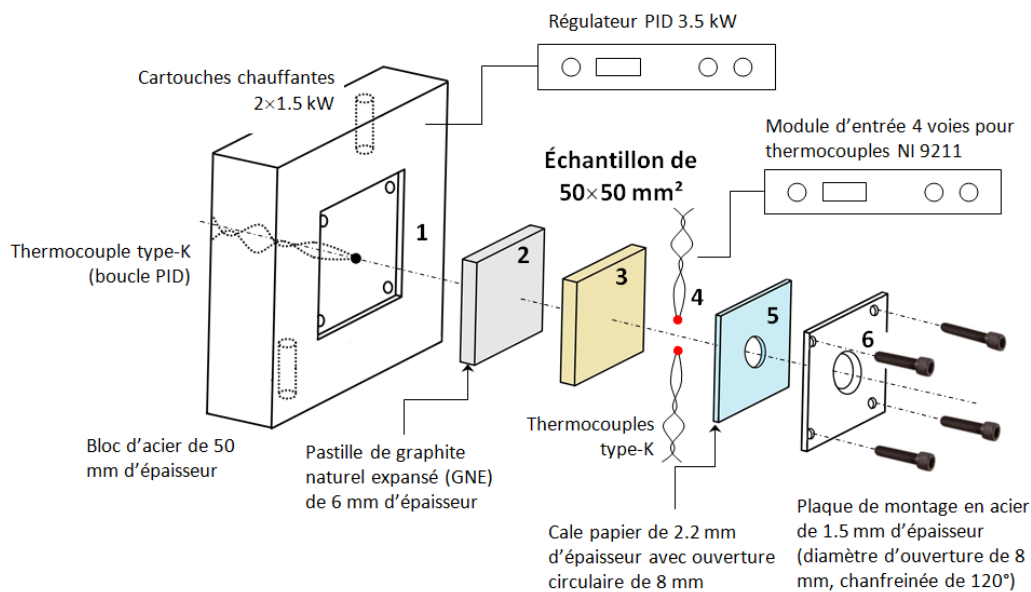


Figure III-15 : Détail du montage de l'échantillon sur le banc expérimental

Les températures radiométriques sont mesurées au moyen d'une caméra infrarouge Thermacam E300. La caractérisation de l'émissivité apparente est faite sur une plage de température de [20 – 120] °C. La distance caméra-échantillon est fixée à la distance focale minimale de la caméra, soit 30 cm. La température de réflexion est mesurée selon les méthodes de test standard [ASTM2002] avec une plaque d'aluminium ayant été optiquement polie. Pour prévenir toute non-uniformité d'irradiation due à la caméra, cette dernière est inclinée de 15° par rapport à la normale de l'ouverture.

À partir de ces valeurs de température, nous pouvons calculer la luminance apparente de l'échantillon, la luminance provenant de l'environnement, et enfin celle du corps noir à la température de l'échantillon. L'émissivité apparente est alors calculée par l'Équation III-2. L'exactitude de mesure de l'émissivité apparente est affectée par différentes sources d'erreurs énumérées ci-dessous :

- Mesurage des températures de contact,
- Evaluation de la température de l'émetteur à partir de la température de lèvre,
- Mesurage des températures radiométriques,
- Evaluation de la température réfléchie au point de visée à partir de celle mesurée à l'entrée de la cavité.

Une étude complète de toutes ces sources d'erreurs a été réalisée. Le dispositif permet le mesurage de l'émissivité avec une exactitude variant dans l'intervalle [0,5 % – 4,2 %] pour des matériaux d'émissivité variant entre 0,94 (polycarbonate) et 0,18 (acier inoxydable). La reproductibilité des mesures varie dans l'intervalle [0,5 % – 16 %], tandis que la répétabilité est comprise entre 0,2 % et 10 %.

III.4.2. Connexion entre émissivité spectrale et émissivité apparente

La connexion de l'émissivité apparente et de l'émissivité spectrale obtenue par réflectométrie IR a été vérifiée expérimentalement pour différents matériaux (acier, verre, polycarbonates). De nombreux mécanismes de vieillissement naturel induisent une modification de l'émissivité spectrale suite à des mécanismes de corrosion, de recristallisation ou d'altération chimique. Les effets du vieillissement naturel peuvent être quantifiés par émissivité apparente si les dégradations produisent des variations d'émissivité spectrale dans la bande spectrale du système infrarouge utilisé.

Pour illustrer les capacités de détection de telles variations, nous traitons un corps gris (émissivité spectrale de 0,5) présentant des variations d'émissivité spectrale supposées résulter de modifications structurelles de la surface produites pendant la durée de vie du système. Une forme gaussienne est utilisée pour reproduire de telles variations. L'émissivité apparente est calculée en utilisant l'Équation III-2, dans laquelle la réponse spectrale $R(\lambda)$ est connue sur la bande normalisée LWIR [8 μm – 13 μm]. Le résultat est montré sur la Figure III-16 pour des températures d'émetteur comprises entre -20°C et 180°C. Les effets sont significatifs si les performances du banc de caractérisation permettent de quantifier des variations d'émissivité apparente de l'ordre du pourcent.

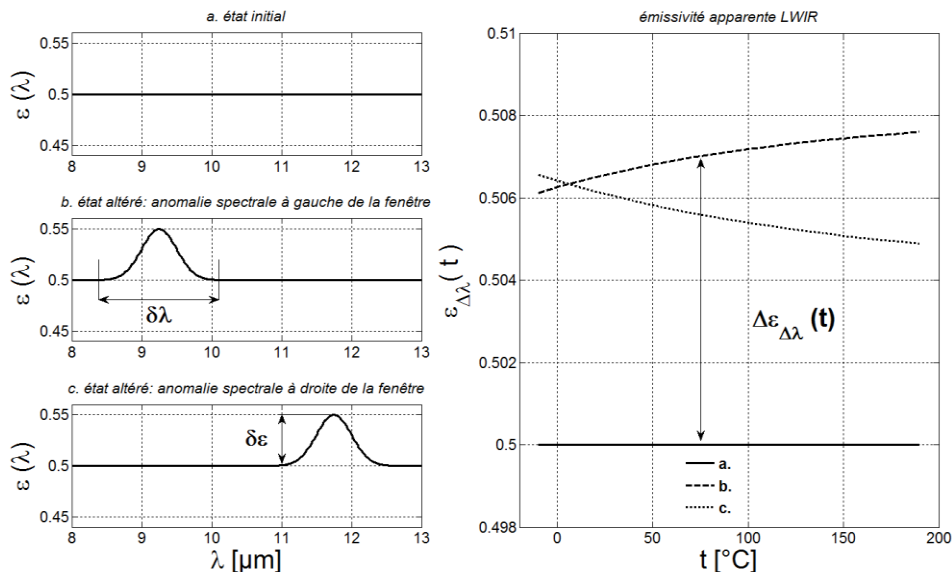


Figure III-16: Connexion de l'émissivité apparente avec l'émissivité spectrale des surfaces

III.4.3. Caractérisation du vieillissement de miroirs verre par émissivité apparente

Afin d'illustrer la méthode, la caractérisation du vieillissement de 3 miroirs verre des héliostats du grand four solaire d'Odeillo (66) par émissivité apparente est présentée dans ce paragraphe (notés Odeillo 1, Odeillo 2 et Odeillo 3). Ces miroirs sont respectivement âgés de 5, 10 et 20 ans mais leurs durées réelles d'exploitation en fonctionnement sur les héliostats sont inconnues. Le plan d'expérience est le suivant :

- Caractérisation des émissivités spectrales et apparentes des 3 verres à l'état initial
- Caractérisation des 3 verres après application du test de vieillissement accéléré suivant le protocole de la chaleur humide (85°C/85% d'humidité pendant 1000h ; équivalent à 20 ans)

L'émissivité spectrale hémisphérique des échantillons initiaux est présentée sur la Figure III-17. La méthode utilisée pour la mesure de l'émissivité spectrale est une méthode indirecte de type réflectométrique [Ibos 2006].

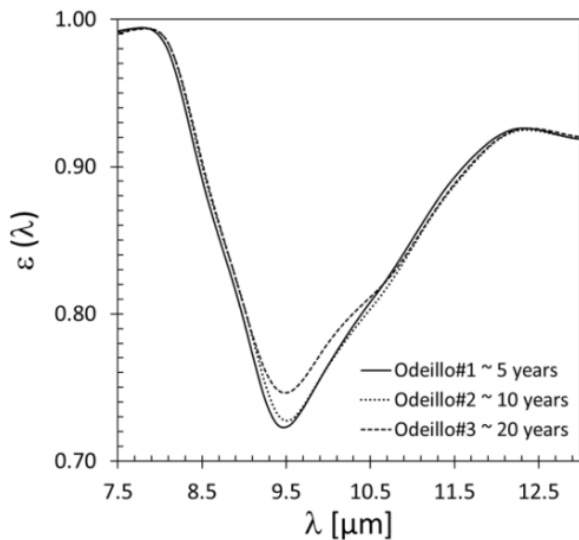


Figure III-17: Emissivité spectrale hémisphérique initiale des miroirs verre Odeillo

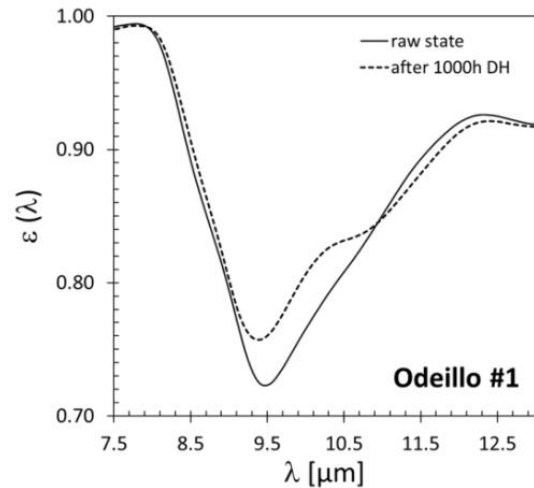


Figure III-18: Emissivité spectrale hémisphérique d'Odeillo #1 à l'état initial et après 1000h de vieillissement en chaleur humide

La différence d'émissivité spectrale entre les trois échantillons caractérisés se situe dans la fenêtre [9.2μm - 11μm]. Ceci reproduit un vieillissement naturel caractéristique des miroirs, confirmant au passage les âges croissants. Rapporté à Odeillo #1, l'écart d'émissivité spectrale d'Odeillo #3 est d'environ 3% dans la gamme spectrale mentionnée.

Ensuite, les trois échantillons ont été placés en enceinte climatique et exposés au test de chaleur humide décrit précédemment. La Figure III-18 présente l'émissivité spectrale de Odeillo #1 à l'état brut et après 1000 heures en chambre climatique. Les effets du vieillissement accéléré sont similaires à ceux du vieillissement naturel observés chez Odeillo #3 à l'état initial. La Figure III-19 détaille les écarts en émissivité spectrale des trois verres Odeillo avant et après vieillissement accéléré dans la fenêtre [3μm – 20μm].

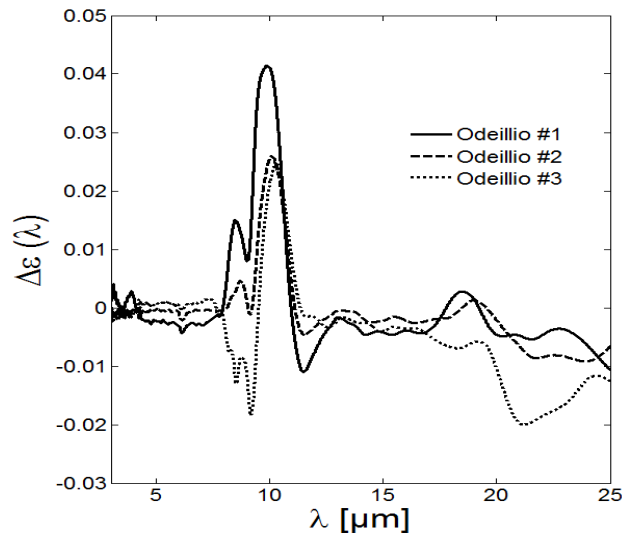


Figure III-19 : Ecart d'émissivité spectrale hémisphérique des miroirs verre Odeillo

Les effets du vieillissement accéléré sont exclusivement observés dans la bande LWIR. Cela confère à ces systèmes IR la capacité de les quantifier. Le vieillissement accéléré suit globalement le processus suivant :

- une augmentation de l'absorption dans la bande $[9.5\mu\text{m} - 10.5\mu\text{m}]$: prononcée chez Odeillo #1, elle est du même ordre chez Odeillo #2 et #3 ;
- une diminution de l'absorption dans la bande $[8 \mu\text{m} - 9 \mu\text{m}]$;
- une augmentation de l'absorption dans la bande $[11\mu\text{m} - 13\mu\text{m}]$.

La caractérisation de l'émissivité apparente des miroirs verre est présentée ci-dessous. La bande spectrale de la caméra ThermaCAM E300 utilisée est $[7,9 - 12,7\mu\text{m}]$. L'incertitude de mesure de température apparente, quantifiée au préalable, est de $0,1^\circ\text{C}$.

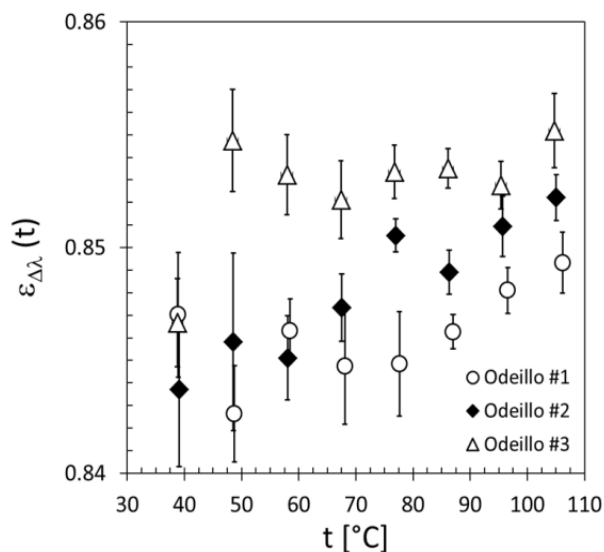


Figure III-20: Emissivité apparente LWIR des miroirs Odeillo dans leur état initial.

La caractérisation de l'émissivité apparente est effectuée dans la plage [20°C – 120°C] au moyen d'un banc de caractérisation détaillé au paragraphe III.4.1. La Figure III-20 représente l'émissivité apparente des trois échantillons de verre dans leur état initial. A partir d'une température d'émetteur supérieure à 70°C, la discrimination fondée sur l'âge des échantillons est envisageable. Les valeurs d'émissivité apparentes augmentent de façon monotone avec l'état de vieillissement initial des miroirs. La Figure III-21 présente l'écart relatif % pour chaque échantillon de verre. Les barres d'erreur indiquent la répétabilité de mesure ($\pm 0,002$).

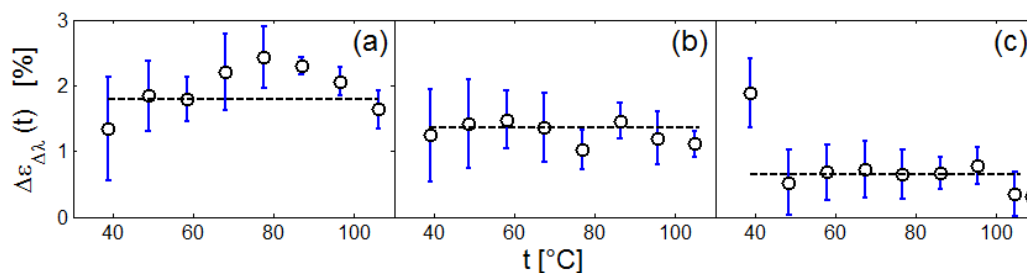


Figure III-21: Ecart relatif % en émissivité apparente LWIR des miroirs verre Odeillo: a. Odeillo #1; b. Odeillo #2 et c. Odeillo #3

L'écart d'émissivité apparente rend compte du vieillissement accéléré. Les trois miroirs présentent des valeurs quasi-constantes pour des températures d'émission comprise entre 40°C et 110°C, ce qui signifie que la dépendance en température de l'émissivité apparente est conservée pendant le processus de vieillissement accéléré. D'autre part, le processus de vieillissement accéléré est de nature différente selon l'âge initial des miroirs. Il est d'autant plus prononcé que le miroir est initialement jeune (2% en moyenne pour Odeillo #1 contre 0,8% pour Odeillo #3).

L'émissivité apparente LWIR est donc un indicateur pertinent pour quantifier le vieillissement des miroirs verre des héliostats. Les limitations de l'approche résident dans ses capacités de mesurage ainsi que la connaissance des températures d'émission et d'environnement. Les performances typiques de mesures obtenues en situation intérieure sont détaillées dans Tableau III-5.

Température	répétabilité	incertitude combinée
ambiante	0.2°C	0.2°C
environnement	0.2°C	0.2°C
émission	0.1°C	0.3°C
$\delta\varepsilon_{\Delta\lambda}(\delta t)$	0.2%	0.5%
apparente	0.1°C	0.3°C
$\delta\varepsilon_{\Delta\lambda}(\delta t)$	0.2%	0.5%
$\delta\varepsilon_{\Delta\lambda}$	0.3 %	0,7%

Tableau III-5: Incertitude de type A et B des mesures de températures pour la quantification de l'émissivité apparente LWIR en situation intérieure.

La résolution globale de mesure de l'émissivité apparente est la somme quadratique des résolutions associées à chaque incertitude de température. La répétabilité dépend à la fois de la qualité de la correction de non uniformité (typiquement 0,1°C à 35°C) et de la répétabilité de la température d'émission. L'incertitude combinée dépend de la qualité de la compensation de la dérive thermique. Sans précaution particulière, l'incertitude de la compensation chez la caméra ThermaCAM E300 est typiquement de 0,3°C.

III.4.4. Corrélation entre l'émissivité apparente IR et la transmittance visible

Après avoir démontré la pertinence de l'utilisation de l'émissivité apparente comme indicateur précoce de vieillissement de surface, la question de la corrélation entre celui-ci et la transmittance s'est posée. En effet, la propriété optique fonctionnelle du verre est sa transmittance dans la plage visible, pour une multitudes d'applications soumises aux conditions climatiques extérieures agressives. Citons par exemple les applications solaires qu'elles soient thermique ou photovoltaïque, ou plus largement dans le domaine du bâtiment.

Les comportements de la transmittance intégrée dans le visible et de l'émissivité apparente présentent des tendances similaires au cours des essais de vieillissement accéléré. La question de la corrélation entre ces deux indicateurs, permettant la détection par émissivité apparente IR des variations de transmittance visible a ainsi été posée.

Une corrélation a été établie entre la transmittance intégrée dans la plage [400 – 800] nm et l'émissivité apparente dans la plage [8 – 12] μm pour quatre températures d'émission (Figure III-22).

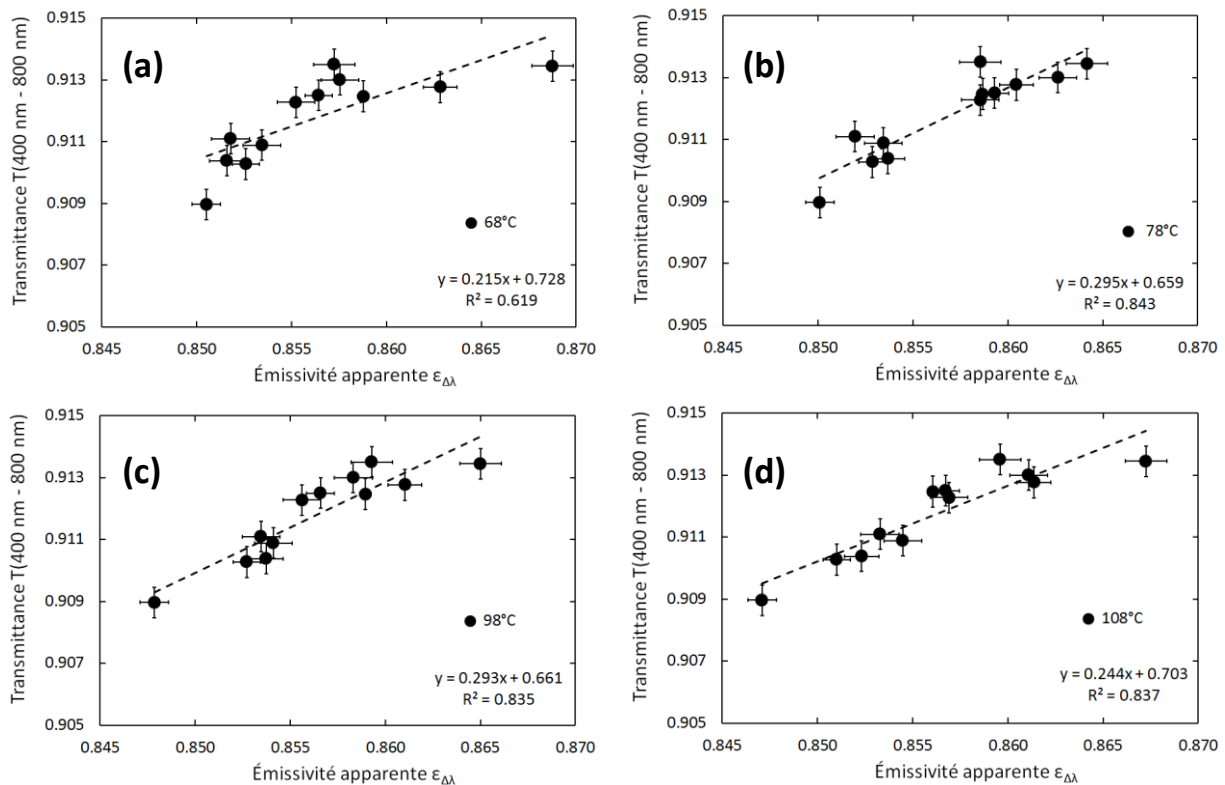


Figure III-22 : Transmittance intégrée sur [400 – 800] nm en fonction de l'émissivité apparente pour différentes températures d'émission. Les barres d'erreur représentent l'écart type (SD).

L'ensemble des mesures d'émissivité apparente pour chaque température d'émission permet de vérifier la tendance générale en fonction de la transmittance intégrée correspondante dans la plage visible. Toutes les mesures sont dans une précision acceptable par rapport aux tendances générales avec une amélioration notable pour les hautes températures d'émission.

L'émissivité apparente a une meilleure sensibilité que la transmittance intégrée dans la plage [400 – 800] nm pour ce qui est du vieillissement du verre. Le coefficient de sensibilité de l'émissivité apparente, $K(\epsilon)$, est défini comme la dérivée partielle de la transmittance intégrée, δT , sur la dérivée partielle de l'émissivité apparente, $\delta \epsilon$, tel que :

$$K(\epsilon) = \frac{\delta T}{\delta \epsilon} \quad \text{Équation III-3}$$

Le coefficient de sensibilité de l'émissivité apparente, $K(\epsilon)$, a été calculé pour chaque température d'émission et est compris dans la plage [3,39 – 4,65] avec une valeur moyenne de 3,83. Ainsi, dans ce cas d'étude, l'émissivité apparente augmente plus rapidement, d'un facteur 3, que la transmittance intégrée $T_{\Delta\lambda}$. Ce résultat confirme l'intérêt de développer une approche originale sur le terrain pour l'évaluation du vieillissement des systèmes avec un

verre en face avant (panneau solaire thermique ou PV) pour quantifier son émissivité apparente.

III.4.5. Perspectives : développement d'un outil de caractérisation du vieillissement de surface en conditions extérieures

Ce projet s'inscrit dans le cadre de la thèse de Samy Brazane, démarrée en octobre 2021, co-encadrée avec Laurent Ibos et Olivier Riou.

La pertinence de l'utilisation de l'émissivité apparente a précédemment été démontrée (paragraphe III.4) en conditions maîtrisées de laboratoire. L'étape suivante, objet de cette partie, est le développement de cet outil en conditions extérieures, par définition, non maîtrisables.

Le verrou scientifique majeur réside dans l'évaluation de la température d'émission sans contact de la cible. En effet, la mesure de la température de la cible par contact n'est plus envisageable en condition de fonctionnement d'une installation. La première solution testée est l'utilisation de mires thermique. Les tests ont été réalisés sur des échantillons de verre sodocalcique recouverts d'une fine couche de peinture noire mate servant de mires thermiques (Figure III-23).

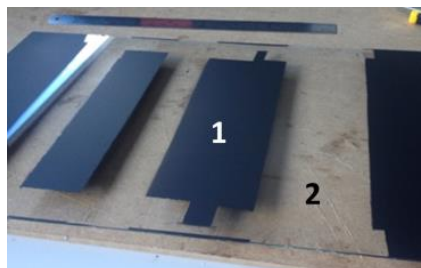


Figure III-23 : Différentes mires thermiques (1) déposées sur un échantillon de verre sodocalcique (2)

L'émissivité apparente de la mire et du verre a préalablement été quantifiée en condition de laboratoire sur la bande spectrale LWIR [7,9 μ m – 12,7m] (Figure III-24 et Figure III-25). Les barres d'erreur sont associées à la répétabilité sur 10 essais successifs.

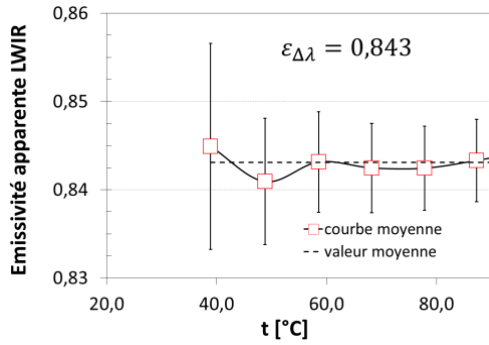


Figure III-24: Emissivité apparente du verre sodo-calcique

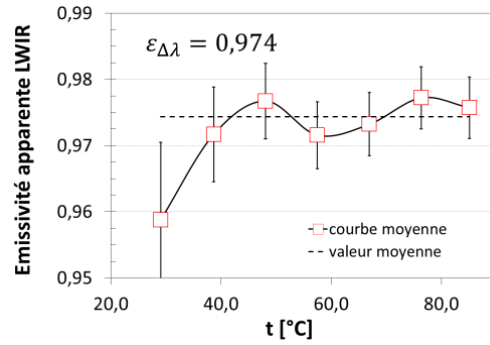


Figure III-25: Emissivité apparente de la mire (peinture noire mate)

L'évaluation de l'émissivité apparente est inexacte lorsque les températures d'émission, d'environnement et apparente sont proches (par exemple une émission à 30°C dans un environnement à 20°C).

Afin de tester la méthode en conditions extérieures, une mire thermique de 1 cm² a été déposée, accolée à une surface nue de verre de même dimension. L'ensemble est entouré d'un film d'aluminium collé à l'aide d'un adhésif double face plaquant quatre thermocouples respectivement sur la mire et le verre. Le schéma du dispositif est montré sur la Figure III-26.

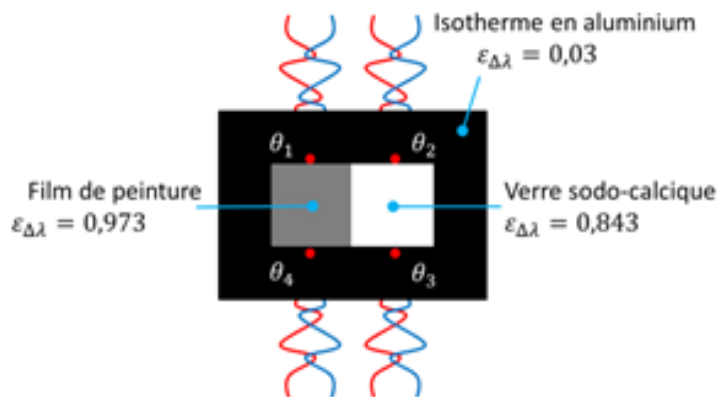


Figure III-26: Mire thermique déposée sur un verre sodo-calcique

Lors des tests, la température ambiante était voisine de 26°C. La température a été supposée uniforme sur l'ensemble du dispositif. Un exemple d'émissogramme du dispositif est montré sur la Figure III-27. Le profil en émissivité apparente au centre du dispositif est montré sur la Figure III-28.

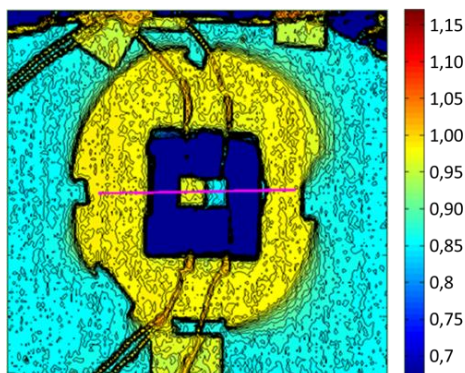


Figure III-27: Emissogramme du dispositif mire-verre obtenu à la température moyenne d'environnement de -18°C.

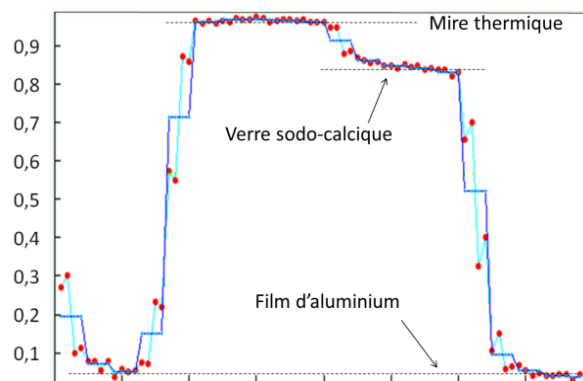


Figure III-28: Profil en émissivité apparente

Les valeurs obtenues sont en accord avec la caractérisation en laboratoire :

	Essai en conditions de laboratoire	Essai en conditions extérieures
Mire thermique	0,974±0,003	0,97±0,01
Verre sodo-calcique	0,843±0,005	0,85±0,01
Aluminium	0,03±0,01	0,05±0,01

L'uniformité de la température d'environnement est satisfaisante sur la zone analysée malgré des effets de bords en particulier à l'interface mire-verre. Le comportement est également observé aux interfaces aluminium-mire et verre-aluminium.

L'utilisation de mires thermiques dans le but de mesurer l'émissivité apparente dans des conditions extérieures a permis de valider l'approche expérimentale consistant à améliorer l'exactitude et la résolution de mesure en optimisant le contraste thermique entre la température d'émission et la température d'environnement. Les performances obtenues en conditions extérieures sont comparables à celles en condition de laboratoire (contrôle strict des températures). Cependant, elle présente un certain nombre d'inconvénients :

- Elle est fondamentalement invasive,
- Elle perturbe le champ de températures d'émission quelle que soit la configuration expérimentale (mesurage à l'ombre ou en isolation directe) du fait d'un couplage thermique inhérent au dépôt de la mire thermique
- Elle ne permet pas de gérer les gradients thermiques éventuellement présents dans un système de grande dimension.

L'utilisation de mire thermique comme solution de quantification de la température d'émission n'est donc pas envisageable en conditions extérieures.

Ainsi, la solution envisagée, qui est innovante, est la suivante : au moyen d'un dispositif générant un environnement thermique oscillant (Figure III-29), une détection synchrone du rayonnement réfléchi permettrait de cartographier la cible en réflectivité apparente et par conséquent d'en déduire l'émissivité apparente d'une cible opaque via la relation de Kirchoff.

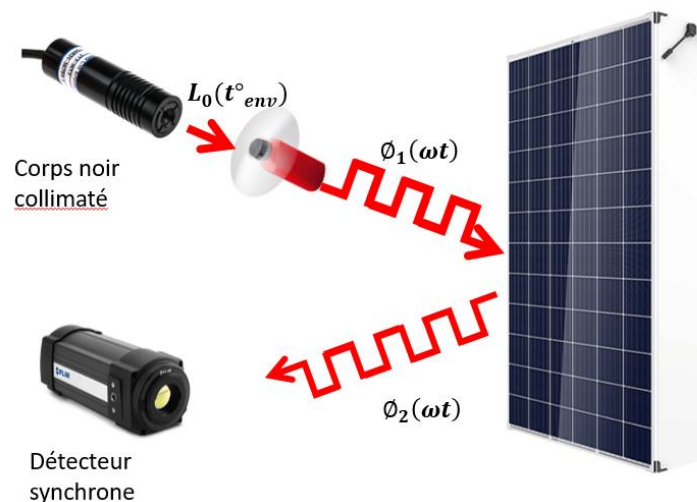


Figure III-29 : Dispositif expérimental de réflectométrie apparente en régime radiatif oscillant

Cette solution a l'avantage de permettre de cartographier des surfaces étendues en quelques instants en s'affranchissant de la connaissance de la température d'émission. Une image infrarouge de la cible sera réalisée in-situ suivi d'un post-traitement permettant de produire un émissogramme. La première phase du travail est en cours, il s'agit de la caractérisation fine de la caméra afin d'en déterminer les conditions opératoires permettant une précision optimale. L'accent est mis notamment sur la dérive thermique de la caméra et ses conséquences sur la précision des valeurs d'émissivité obtenues. Ainsi, ces valeurs pourront être par la suite corrigées en post-traitement et proposer une solution fiable en conditions extérieures aléatoires.

III.5. Conclusions et perspectives du chapitre III

Au cours de ce chapitre l'impact du vieillissement sur les performances des systèmes énergétiques a été étudié. L'accent a été mis sur la compréhension des phénomènes physiques des dégradations obtenues et sur le développement d'un nouvel indicateur de vieillissement.

Tout d'abord, au cours de sa thèse, Vincent Guihéneuf a considéré un module photovoltaïque comme un empilement multi-matériaux et a étudié les dégradations des propriétés optiques et physico-chimiques de chaque couche puis du système complet. Pour cela, il a appliqué deux protocoles de vieillissement accéléré, la chaleur humide et l'expositions aux rayons UV.

Le vieillissement du verre sous chaleur humide a montré une augmentation de la transmittance du verre, plus marquée dans la plage UV que dans la plage visible, s'expliquant par une hydratation de surface du verre. L'impact de l'exposition aux UV aboutit à une diminution de la transmittance sur les deux plages (UV et visible) sans modification significative des propriétés physico-chimiques de surface. Cependant, de légères modifications en volume ont été observées, laissant penser à un phénomène de migration de l'eau moléculaire du réseau vitreux vers la surface.

Le vieillissement de la cellule silicium sous chaleur humide n'a aucun impact sur ses performances. En revanche, l'exposition aux UV entraîne une diminution du rendement de l'ordre de 10% après 50 kWh.m⁻² d'exposition et stagne ensuite. Ceci s'explique par un processus de photo-oxydation de la couche antireflet.

Enfin, concernant le mini-module, le vieillissement sous chaleur humide n'impacte pas les performances de production électrique. L'exposition aux UV entraîne une diminution d'environ 3% du rendement, principalement expliqué par la diminution de la transmittance de la couche supérieure de verre.

Les protocoles de vieillissement accéléré normalisés (chaleur humide et insolation UV) sont actuellement remis en cause. Plus particulièrement la notion d'équivalence entre vieillissement naturel et vieillissement accéléré pose question. La piste des tests combinés ou séquentiels semble prometteuse. Un axe majeur de perspectives dans ce domaine est ainsi naissant. Le travail expérimental à mener est conséquent et l'apport des compétences en modélisation au sein de l'équipe sera une opportunité majeure.

La deuxième partie de ce chapitre traite du développement d'un nouvel indicateur de vieillissement de surfaces, l'émissivité apparente. La méthode sans contact est parfaitement

adaptée au vieillissement du verre notamment, puisque ses dégradations entraînent une signature optique centrée sur la gamme spectrale de la caméra infrarouge LWIR (8-13 μ m).

L'application de la méthode sur les miroirs verres du grand four solaire d'Odeillo a permis de montrer la pertinence d'un tel indicateur, capable de discriminer « l'âge » des miroirs. Enfin, la corrélation entre l'émissivité apparente (8-13 μ m) et la transmittance visible (0,4-0,8 μ m) a été montrée, rendant ainsi possible la caractérisation de la dégradation de la propriété optique fonctionnelle (transmittance) par notre approche sans contact avec un rapport de sensibilité émissivité apparente / transmittance visible de l'ordre de 4.

L'outil a été développé et validé en conditions maîtrisées de laboratoire mais une étape supplémentaire est à franchir : celle de son utilisation in situ en conditions non maîtrisées. Le verrou scientifique majeur est la quantification de la température d'émission de la cible sans contact dans un environnement thermique instable. La solution consiste à s'affranchir de la connaissance de la température de la cible grâce à la détection synchrone du rayonnement réfléchi permettrait de cartographier la cible en réflectivité apparente. Ceci représente une perspective de travail conséquente pour le futur, développée dans le cadre de la thèse de Samy Brazane.

Conclusion générale et perspectives

A présent est venu le moment de conclure ce manuscrit. Celui-ci est un point d'étape important permettant de faire le bilan de bientôt quinze années dans le domaine de la recherche et d'ouvrir sur des perspectives passionnantes pour l'avenir.

Le système énergétique durable est au cœur de mes activités de recherche et a donc servi de fil rouge à ce manuscrit à travers deux problématiques principales :

- Comment faire en sorte que ces systèmes soient les plus performants possibles au point de « concurrencer » les systèmes matures nécessitant des sources énergétiques non renouvelables ?
- Comment anticiper le vieillissement des systèmes et son impact sur la durabilité des performances ?

L'approche générale utilisée au quotidien balaye un spectre large, allant du matériau au système complet en s'appuyant à la fois sur l'expérimentation et la modélisation. Le volet expérimental permettant de connaître et quantifier le comportement des matériaux composant le système étudié ; la modélisation quant à elle va permettre l'extrapolation à l'échelle système.

Les perspectives de travail sont nombreuses. En premier lieu, je crois au déploiement de solutions de mix énergétique utilisant de manière optimale les ressources disponibles à échelle locale. L'emploi de matériaux à bas coûts, à faible énergie grise ainsi que des systèmes aux performances durables dans le temps devra être privilégié afin que le choix des énergies renouvelables devienne naturel. Pour cela, je compte poursuivre les collaborations déjà initiées, les développer et en construire de nouvelles avec les acteurs publics et privés locaux. La valorisation énergétique de la chaleur fatale des procédés industriels est une mine d'or encore peu exploitée.

Je n'oublie pas également la collaboration à l'international avec l'Ecole militaire Polytechnique d'Alger pour le développement de matériaux thermoélectriques dans le but de son intégration au systèmes photovoltaïques, permettant de mobiliser des compétences de chimistes de nos partenaires.

Quant à l'axe de travail concernant le vieillissement des systèmes, les compétences internes au laboratoire dans le domaine de la thermographie infrarouge notamment permettent d'envisager le déploiement de l'outil de caractérisation in-situ du vieillissement de surfaces par émissivité apparente. Celui-ci pourra être utilisé comme un

outil d'aide à la décision quant au maintien en condition ou au remplacement de tout ou partie d'un système.

Enfin, le développement de protocoles de vieillissement accéléré adaptés et fiables est nécessaire, tant ceux normalisés aujourd'hui sont remis en cause. C'est un travail de longue haleine à mener. Une de mes principales ambitions pour le futur est de réussir à établir des collaborations sur le sujet.

J'avais ouvert mon manuscrit de thèse avec la citation suivante : « l'énergie la moins chère et la moins polluante est celle que nous ne consommons pas ». J'ai également envie de conclure mon manuscrit d'habilitation à diriger les recherches avec la même citation (l'auteur me pardonnera d'avoir oublié son nom), tant elle est encore d'actualité plus de dix ans plus tard...

Références bibliographiques

- [ASTM2002] ASTM E1862-97e1, Standard Test Methods for measuring and Compensating for Reflected Temperature Using Infrared Imaging Radiometers, 2002
- [Balogh 2008] Balogh A, Szabo Z, *HELLER system: The economical substitute for wet cooling to avoid casting a shadow upon the sky*, EPRI Workshop on Advanced Thermal Electrical Power Cooling Technologies, Charlotte, July 8-9, 2008.
- [Berman 1997] Berman D, Faiman D, *EVA browning and the time-dependence of I-V curve parameters on PV modules with and without mirror-enhancement in a desert environment*, Solar Energy Materials and Solar Cells 45 pp. 401-412, 1997
- [Bi 2004] Bi Y, Guo T, Zhang L, Chen L, *Solar and ground source heat pump system*, Applied Energy 78, 2004
- [Chiasson 2003] Chiasson A.D, Yavuzturk C, *Assessment of the viability of hybrid geothermal heat pump systems with solar collectors*, ASHRAE Transactions 19, 2003
- [Cohen 1999] Cohen G, Kearney D, Kolb G, *Final report on the operation and maintenance improvement program for concentrating solar power plants*, Centrale SEGS, 1999.
- [Culebras 2014] Culebras M, Gómez C, Cantarero A, *Review on Polymers for Thermoelectric Applications*; Materials (Basel) 7 pp 6701–6732, 2014
- [Desai 2016] Desai N.B, Bandyopadhyay S, *Thermo-economic analysis and selection of working fluid for solar organic Rankine cycle*, Applied Thermal Engineering, pp. 471-481, 2016

- [Deubener2009] Deubener J, Hensch G, Moiseev A *et al.*, *Glasses for solar energy conversion systems*, Journal of the European Ceramic Society 29, pp.1203–1210, 2009
- [Gary 2010] Gary J, Development of a power tower technology roadmap for DOE; *SOLARPACES conference Perpignan*, 2010.
- [Hepbasli 2007] Hepbasli A, *Exergetic modeling and assessment of solar assisted domestic hot water tank integrated ground-source heat pump systems for residences*, Energy and Buildings 39, 2007
- [Ibos 2006] Ibos L, Marchetti M, Boudenne A, Datcu S, Livet J, Candau Y; *Infrared emissivity measurement device: Principle and applications*, Measurement Science and Technology 17, pp. 2950-2956, 2006
- [IEC61215] International Electrotechnical Commission, *Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) module – Design qualification and type approval*, IEC 61215. 2nd ed., 2005
- [Jannot 2004] Jannot Y, Meukam P, *Simplified estimation method for the determination of the thermal effusivity and the thermal conductivity using a low cost hot stripe*; Measurement Science and Technology 15 p.1932-1938, 2004
- [Jobmann 2009] Jobmann M, Buntebarth G, *Influence of graphite and quartz addition on the thermal-physical properties of bentonite for sealing heat-generation radioactive waste*; Applied Clay Science 44 p.206-210, 2009
- [Kelly 2006] Kelly B, *Nexant parabolic through solar power plant systems analysis; Task 2 comparison of wet and dry Rankine cycle heat rejection*, Subcontrat report NREL/SR-550-40163, 2006.

- [Lee 2010] Lee C, Lee K, Choi H, Choi H.P, *Characteristics of thermally-enhanced bentonite grouts for geothermal heat exchanger in South Korea*; Sci. China Tech. Sci. 53 p.123-128, 2010
- [Lind 1980] Lind A, Hartman J.S, *Natural aging of soda-lime-silicate glass in a semi-arid environment*, Solar Energy Materials 3 pp.81–95, 1980
- [Lundh 2008] Lundh M, Dalenbäck J.O, *Swedish solar heated residential area with seasonal storage in rock: Initial evaluation*, Renewable Energy 33, 2008
- [Muselli 2010] Muselli M, *Passive cooling for air-conditioning energy savings with new radiative low-cost coatings*, Energy and Buildings 42, p.945-954, 2010.
- [Nicolas 2006] Nicolas M, Guittard F, G ribaldi S; *Synthesis of Stable Super Water- and Oil-Repellent Polythiophene Films*, Angewandte Chemie 118 pp.2309–2312, 2006
- [Nou 2011] Nou J, Traor  A, Talbert T, *Solar Thermal and Geothermal Hybrid Process*, IEEE Green Technologies, Baton Rouge, Louisiana, April 14-15, 2011.
- [Olivès 2001] Olivès R, Mauran S, *A highly conductive porous medium for solid-gas reactions: effect of the dispersed phase on the thermal tortuosity*; Transport in Porous Media 43 p.377, 2001
- [Otth1984] Otth D.H, Ross R.G, *Assessing photovoltaic module degradation and lifetime from long-term environmental tests*, Proceedings of the 30th Institute of Environmental Sciences Technical Meeting, Los Angeles, CA, USA, pp.121–126, 1984
- [Ozneger 2005] Ozneger O, Hepbasli A, *Experimental performance analysis of a solar assisted ground-source heat pump greenhouse heating system*, Energy and Buildings 37, 2005

- [Pahud 2004] Pahud D, Lachal B, *Mesure des performances thermiques d'une pompe à chaleur couplée sur des sondes géothermiques à Lugano, rapport final*, Programme de recherche énergétique sur mandat de l'Office Fédéral de l'Energie (Suisse), 2004
- [Py 2001] Py X, Olivès R, Mauran S, *Paraffin-porous graphite matrix as a high and constant power thermal storage material*; International Journal of Heat and Mass Transfer 44 p.2727, 2001
- [Py 2002] Py X, Daguerre E, Menard D, *Composites of expanded natural graphite and in situ prepared activated carbon*; Carbon 40 p.1255, 2002
- [Schmidt 2004] Schmidt T, Mangold D, Müller-Steinhagen H, *Central solar heating plants with seasonal storage in Germany*, Solar Energy 76, 2004
- [Sun 2021] Sun K et al., *Comprehensive evaluation of concentrated solar collector and Organic Rankine cycle hybrid energy process with considering the effects of different heat transfer fluids*, Energy Reports, pp. 362-384, 2021
- [Trillat-Berdal 2006] Trillat-Berdal V, *Intégration énergétique dans les bâtiments par l'utilisation combinée de l'énergie solaire et de la géothermie basse température*, Thèse de Doctorat de l'université de Savoie-Chambéry, 2006
- [Vazquez 2008] Vazquez M, Rey-Stolle I, *Photovoltaic Module Reliability Model Based on Field Degradation Studies*, Progress in Photovoltaics: Research and Applications 16 pp.419–433, 2008
- [Wang 2008] Wang H, Qi C, *Performance study of underground thermal storage in a solar-ground coupled heat pump system for residential buildings*, Energy and Buildings 40, 2008
- [Wolghemuth 2011] Wohlgemuth J.H, Kurtz S, *Using accelerated testing to predict module reliability*, Proceedings of the 37th IEEE PVSEC, Seattle, WA, USA, 2011

[WorleyParsons 2008]

WorleyParsons, *Wet and dry cooling options for a 250MW thermal plant*, Report to congress, 2008

[Zotti 1987]

Zotti G, Cattarin S, Comisso N, *Electrodeposition of Polythiophene, Polypyrrole and Polyaniline by the Cyclic Potential Sweep Method*; *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry* 235 pp.259–273, 1987

Liste des figures

Figure II-1 : Vue en coupe d'un forage géothermique et d'une sonde en double U incluant un espaceur. (+) fluide descendant, (-) fluide ascendant, (1) bentonite, (2) sous-sol.....	31
Figure II-2 : Evolution radiale de la température dans un forage géothermique.....	32
Figure II-3 : Résistance thermique du forage en fonction de la conductivité thermique de la bentonite.....	33
Figure II-4 : Puissance linéaire extraite par un forage géothermique dans sa configuration double U en fonction de la conductivité thermique de la bentonite	34
Figure II-5 : Vue au microscope électronique à balayage de vermicules de graphite naturel expansé (GNE).....	35
Figure II-6 : Conductivité thermique des composites bentonite/GNEg100.....	36
Figure II-7 : Synoptique du dispositif expérimental	40
Figure II-8 : Position des 3 forages profonds ainsi que des 3 forages courts de mesure	40
Figure II-9 : (a) Température des forages B et C en période d'injection et de C à l'état initial ; (b) Différence de température entre le forage B et le forage passif C en période d'injection, en fonction de la longueur de la sonde.....	42
Figure II-10 : Evolution de la température du forage B sur une journée en pleine injection de chaleur à plusieurs niveaux de profondeur et ensoleillement	43
Figure II-11 : Rapport entre la chute de température le long du forage B pendant la nuit et l'augmentation de température pendant la journée.....	44
Figure II-12 : Température au fond du forage B (180m) au cours du mois d'août 2010.....	45
Figure II-13 : Température du fluide caloporteur dans la sonde géothermique sur tout le mois de juillet 2010 à 180 m de profondeur dans le puits B et en sortie du champ solaire.....	47
Figure II-14 : Géométrie du modèle à deux dimensions en coupe	47
Figure II-15 : Température modélisée du forage B à 180 m de profondeur sur la deuxième quinzaine du mois de juillet 2010 : (---) température maximale possible, (---) température minimale possible ; (---) résultats expérimentaux	48
Figure II-16 : Distance entre les forages en fonction de la profondeur	50
Figure II-17 : Résultats du modèle numérique en température en fonction du temps à différentes profondeurs en E	51
Figure II-18 : Résultats du modèle numérique en température après 30 jours d'injection puis 30 jours de relaxation : (a) en D, (b) en E.....	52
Figure II-19 : Puissance linéaire dissipée par géothermie en fonction de la conductivité thermique de la bentonite	55

Figure II-20 : Spectre solaire reçu à la surface de la Terre (trait épais), émission d'un corps noir à 288K (surface gris foncé) et à 303K (surface gris clair)	58
Figure II-21 : Schéma d'un miroir sur son axe creux et notations utilisées pour le calcul de la puissance dissipée par convection naturelle et par effet radiatif	59
Figure II-22 : Puissance dissipée pour différentes journées pour une inclinaison nocturne des miroirs à 0° : (a) par convection naturelle et effet radiatif, (b) part due à l'effet radiatif.....	61
Figure II-23: Schéma du dispositif de mesure du coefficient de Seebeck.	63
Figure II-24: Ensoleillement mensuel moyen pour les STEP de Vert-le-Grand et de Lardy-Janville	67
Figure II-25 : Courbes de fréquences cumulées de l'ensoleillement de la STEP de Lardy-Janville en a) juillet et en b) décembre	67
Figure III-1 Spectres d'émission mesurés de la lampe UV à moyenne pression de mercure utilisé dans l'enceinte UV.	77
Figure III-2 Transmittance du verre sodocalcique avant et après 1000 heures sous chaleur humide (CH).....	78
Figure III-3 Écart normalisé de transmittance intégrée sur [290 – 400] nm (●) et [400 – 800] nm (▲) en fonction du temps d'exposition sous CH.	79
Figure III-4 Transmittance du verre sodocalcique en fonction de la dose UV incidente.....	80
Figure III-5 Écart normalisé de transmittance intégrée sur [290 – 400] nm (●) et [400 – 800] nm (▲) en fonction de la dose UV.....	81
Figure III-6 : Taux de dégradation des paramètres électriques à partir des mesures I-V et en fonction de la dose UV incidente sous une intensité de 600 W/m ²	83
Figure III-7 : Cinétiques du taux de dégradation de chaque paramètre électrique en fonction de la dose UV sous une intensité de 600 W/m ²	83
Figure III-8 : Image et représentation schématique du mini-module bi-verre au silicium cristallin	84
Figure III-9 Transmittance (a) et écart de transmittance absolu ΔT (b) en fonction de la dose UV reçue.	87
Figure III-10 : Transmittance et réflectance de verres non vieilli et exposé durant 30 ans à un vieillissement naturel	89
Figure III-11 : Transmittance du verre sodocalcique avant et après 1000 heures sous chaleur humide (CH).....	90
Figure III-12: Transmittance du verre sodocalcique en fonction de la dose UV incidente.....	91
Figure III-13: Transmittance du verre non vieilli et exposé à trois conditions de vieillissement accéléré : 900h sous CH, 99 kWh/m ² sous UV et une combinaison de 900h sous CH suivi de 57,6 kWh/m ² sous UV.	92

Figure III-14 : Appareil de mesure de l'émissivité apparente. 1: pastille de graphite naturel expansé (GNE), 2 : plaque de montage, 3 : cale, 4 : thermocouples, 5 : échantillon de verre 95	
Figure III-15 : Détail du montage de l'échantillon sur le banc expérimental.....	95
Figure III-16: Connexion de l'émissivité apparente avec l'émissivité spectrale des surfaces .	97
Figure III-17: Emissivité spectrale hémisphérique initiale des miroirs verre Odeillo	98
Figure III-18: Emissivité spectrale hémisphérique d'Odeillo #1 à l'état initial et après 1000h de vieillissement en chaleur humide	98
Figure III-19 : Ecart d'émissivité spectrale hémisphérique des miroirs verre Odeillo	99
Figure III-20: Emissivité apparente LWIR des miroirs Odeillo dans leur état initial.....	99
Figure III-21: Ecart relatif % en émissivité apparente LWIR des miroirs verre Odeillo: a. Odeillo #1; b. Odeillo #2 et c. Odeillo #3.....	100
Figure III-22 : Transmittance intégrée sur [400 – 800] nm en fonction de l'émissivité apparente pour différentes températures d'émission. Les barres d'erreur représentent l'écart type (SD).....	102
Figure III-23 : Différentes mires thermiques (1) déposées sur un échantillon de verre sodocalcique (2)	103
Figure III-24: Emissivité apparente du verre sodocalcique.....	104
Figure III-25: Emissivité apparente de la mire (peinture noire mate).....	104
Figure III-26: Mire thermique déposée sur un verre sodocalcique	104
Figure III-27: Emissogramme du dispositif mire-verre obtenu à la température moyenne d'environnement de -18°C.....	105
Figure III-28: Profil en émissivité apparente	105
Figure III-29 : Dispositif expérimental de réflectométrie apparente en régime radiatif oscillant	106

Listes des tables

Tableau II-1 : Valeurs des paramètres utilisés pour la simulation numérique	31
Tableau II-2 : Paramètres utilisés lors de l'étude technico-économique	37
Tableau II-3 : Récapitulatif des résultats de l'étude technico-économique appliquée à une PAC de 15kW avec un COP de 4	38
Tableau II-4 : Paramètres utilisés lors de la modélisation 1D	46
Tableau II-5 : Paramètres de simulation pour l'interaction entre les trois forages.....	49
Tableau II-6 : Paramètres utilisés lors de la simulation numérique.....	54
Tableau II-7 : Paramètres utilisés lors de l'étude technico-économique	56
Tableau II-8 : Récapitulatif des résultats de l'étude technico économique appliquée au refroidissement sec du condenseur des CES de type linéaire Fresnel par géothermie	57
Tableau II-9 : Paramètres utilisés pour les différents calculs de puissance dissipée.....	60
Tableau II-10 : Comparaison de la puissance dissipée la nuit pour plusieurs journées de l'année avec une inclinaison nocturne des miroirs favorisant le radiative cooling (0°) ou la convection naturelle (90°).....	61
Tableau II-11: Propriétés thermoélectriques du matériau étudié, à température ambiante .	64
Tableau II-12 : Résultats de l'étude de cas de la production d'électricité pour la STEP de Lardy-Janville	68
Tableau III-1 : Moyennes des caractéristiques électriques initiales de l'ensemble des cellules étudiées.....	82
Tableau III-2 Moyennes des caractéristiques électriques initiales des six mini-modules étudiées.....	85
Tableau III-3 Caractéristiques électriques et écarts relatifs ΔX (%) après différentes durées d'exposition à la CH.....	85
Tableau III-4 Caractéristiques électriques et écart relatif ΔX (%) après différentes doses UV.....	86
Tableau III-5: Incertitude de type A et B des mesures de températures pour la quantification de l'émissivité apparente LWIR en situation intérieure.	101