

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DE TLEMCEEN
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



THÈSE

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR EN GENIE MECANIQUE

Spécialité : *Energétique*

Par

Mr BABA AHMED Nassim

Sur le Thème

**ETUDE SUR LE COMPORTEMENT ENERGETIQUE ET EN ENDOMMAGEMENT
D'UN FILM EN POLYMERE - APPLICATION : DISPOSITIFS A EFFET DE SERRE**

Soutenue publiquement le 14 – 12 – 2014, devant le jury composé de :

Président	Dr. SEBBANE Omar	Université de Tlemcen
Directeur de thèse	Pr. BENMOUSSAT Abderrahim	Université de Tlemcen
Co-directeur de thèse	Dr. AZZI Ahmed	Université de Tlemcen
Examineurs	Dr. SELADJI Chakib	Université de Tlemcen
	Pr. BOUDGHENE STAMBOULI Amine	USTMB Oran
	Pr. MEKKAKIA-MAAZA Nasreddine	USTMB Oran
Invité	Pr. BENCHRIFA Rachid	Université M ^{ed} V Rabat-Maroc

Résumé :

Une des applications du solaire thermique est la production de l'eau douce à partir d'eau saumâtre et/ou d'eau salée ce qui nous ramène à développer des dispositifs énergétiques à effet de serre. Pour cela, on a besoin de connaître et d'améliorer le comportement des matériaux utilisés pour la conception de ses dispositifs, notamment les matériaux fonctionnels, qu'on utilise pour leurs propriétés physiques, telles que conductivité, propriétés optiques ou propriétés radiatives...

On s'intéressera dans ce travail aux matériaux polymères utilisés comme film noir absorbeur de chaleur comme le polyéthylène (PE) où la question de la durabilité du PE est alors clairement posée. L'objectif de cette thèse étant, tout d'abord, l'étude du comportement énergétique du PE comme absorbeur de chaleur, et ensuite voir l'influence de son vieillissement sur la durabilité et l'efficacité des dispositifs solaires à effet de serre. Ainsi, notre travail sera divisé en quatre parties :

✚ La première sera consacré à l'étude bibliographique sur les dispositifs à effet de serre tel que les capteurs solaires afin d'établir les différents matériaux fonctionnels utilisés (absorbeurs, isolants, transparents) par leur nuances, leurs propriétés et leurs structures. Ceci nous mène à développer les matériaux polymères thermoplastiques avec plus de détail sur la microstructure et la morphologie des polymères semi-cristallins, dont le PE fait partie, et d'introduire les principales notions abordées dans l'étude pour faire apparaître le rôle et l'intérêt du choix du matériau étudié dans la réalisation et la conception des dispositifs à effet de serre. Nous abordons le comportement énergétique des polymères ainsi que le comportement en endommagement thermique (vieillessement) des polymères.

✚ La deuxième partie s'attache à décrire la caractérisation physico-chimique du PE, ainsi qu'à l'analyse de sa microstructure initiale. La part importante du polyéthylène comme matériau absorbeur de chaleur montre les forts enjeux associés à cette étude. De ce fait, nous effectuons des mesures de quelques propriétés telles que l'émissivité et la conductivité thermique ainsi que d'autres propriétés du matériau étudié pour valider notre choix. Comme application, nous étalons deux expériences réalisées au laboratoire sur le distillateur solaire et sur le capteur solaire afin d'étudier leurs comportement énergétique. Et enfin, présenter les méthodes de caractérisation des échantillons vieillis du PE pour cibler ses phénomènes de vieillissement.

✚ Ensuite, nous abordons la simulation numérique à partir de la modélisation du comportement énergétique des dispositifs à effet de serre. Dans ce cadre, nous proposons un modèle mathématique et son analyse numérique vis-à-vis du comportement énergétique des deux systèmes solaires décrits dans le chapitre précédent.

✚ La dernière partie sera consacré aux résultats et discussions par la confrontation des résultats numériques et de l'expérience pour pouvoir mieux interpréter l'effet énergétique et le choix des matériaux utilisés et d'interpréter le comportement en endommagement du PE. Ainsi, on va décrire le comportement dû au vieillissement thermique du PE et visualiser la dégradation du PE qui affecte ses propriétés en général.

Nous avons étudié le comportement énergétique du polyéthylène basse densité utilisé comme matériau absorbant par une simulation expérimentale dans un prototype de distillateur solaire et par une simulation numérique. L'étude a été complétée par une caractérisation en vieillissement du matériau où le problème majeur que l'on rencontre pour les polymères thermoplastiques tel que le PE concerne leur durée de vie où de nombreux travaux ont été menés. La compréhension et la prédiction de la durabilité de ces matériaux par rapport à leur dégradation sont, d'une façon générale, moins avancées et assez disparates selon le mode de vieillissement. Tous les matériaux utilisés dans les dispositifs à effet de serre se caractérisent surtout par leur instabilité plus au moins rapide dans le temps vis-à-vis du rayonnement solaire et surtout sa fraction ultraviolette (UV).

Mots clés : Polyéthylène – Capteurs solaires – Comportement énergétique – Vieillessement.

Abstract:

One of the applications of solar thermal energy is the production of fresh water from brackish water and / or salt water which brings us to develop energy devices greenhouse. For this, we need to know and improve the behavior of materials used in the design of its devices, including functional materials, used for their physical properties, such as conductivity, optical properties and radiative properties ...

We will focus in this work on polymers used as film noir heat absorber such as polyethylene (PE) where the issue of the sustainability of PE is then clearly stated materials.

The objective of this thesis is, first of all, the study of energy behavior of PE as heat absorber, and then see the influence of aging on the sustainability and efficiency of solar devices greenhouse. Thus, our work will be divided into four parts:

✚ The first will be devoted to literature study on greenhouse devices such as solar collectors to establish the various functional materials (absorbers, insulating, transparent) by their nuances, their properties and structures. This leads us to develop thermoplastic polymeric materials with more details on the microstructure and morphology of semi-crystalline polymers, the PE is a part, and to introduce the main concepts covered in the study to show the role and interest of the choice of material studied in the production and design of devices greenhouse. We discuss the energy behavior of polymers and behavior thermal damage (aging) polymers.

✚ The second part focuses on describing the physico-chemical characterization of the EP, and the analysis of the initial microstructure. The important part of polyethylene as heat absorber material shows the high stakes involved in this study. Therefore, we conduct measures some properties such as emissivity and thermal and other properties of the material studied to validate our choice conductivity. As an application, we display two experiments performed in the laboratory on the solar still and the solar energy to study their behavior. And finally present the characterization methods aged samples of PE to target its aging phenomena.

✚ Then, we discuss the numerical simulation from the modeling of the energy behavior of devices greenhouse. In this context, we propose a mathematical model and numerical analysis vis-à-vis the energy behavior of the two solar systems described in the previous chapter.

✚ The last part will be devoted to results and discussions by comparing numerical results and experience to better interpret the energy effect and the choice of materials and interpret the behavior of PE damage. Thus, we will describe the behavior due to thermal aging of PE and PE view degradation that affects its properties in general.

We studied the energy behavior of low density polyethylene used as an absorbent in an experimental simulation of a prototype solar still and a digital simulation material. The study was complemented by material aging characterization where the major problem encountered for thermoplastic polymers such as PE about their life where many studies have been conducted. Understanding and predicting the durability of these materials with respect to their degradation are, in general, less advanced and quite disparate depending on the mode of aging. All materials used in the devices greenhouse is characterized by their instability more slower over time vis-à-vis the solar radiation and especially its ultraviolet fraction (UV).

Keywords: Polyethylene - Solar distiller - Energy Behavior – Aging mode.

ملخص:

واحدة من تطبيقات الطاقة الحرارية الشمسية لإنتاج المياه العذبة من المياه المالحة و / أو الماء المالح الذي يقودنا إلى تطوير أجهزة الطاقة المسببة للاحتباس الحراري. لهذا، نحن بحاجة إلى معرفة وتحسين سلوك المواد المستخدمة في تصميم الأجهزة، بما في ذلك المواد الفنية، وتستخدم لخصائصها الفيزيائية، مثل الموصلية، الخصائص البصرية وخصائص الإشعاعي ... سنركز في هذا العمل على البوليمرات تستخدم الفيلم نوير الحرارة امتصاص مثل البولي إيثيلين (PE) حيث يتم بعد ذلك مواد ذكر مسألة استخدام PE بشكل واضح.

الهدف من هذه الرسالة هو، أولاً وقبل كل شيء، ودراسة السلوك الطاقة من PE كما امتصاص الحرارة، ومن ثم نرى تأثير الشبخوخة على استخدام وكفاءة أجهزة الطاقة الشمسية المسببة للاحتباس الحراري. وبالتالي، سيتم تقسيم عملنا إلى أربعة أجزاء :

➤ أول ستخصص لدراسة الأدب على الأجهزة المسببة للاحتباس الحراري مثل تجميع الطاقة الشمسية لإقامة مختلف المواد الفنية (امتصاص عازلة وشفافة) من خلال درجاتها المختلفة، والخصائص وميكانيكا. هذا يقودنا إلى تطوير المواد البوليمرية بالحرارة مع مزيد من التفاصيل حول المبصرية ومورفولوجية البوليمرات شبه البلورية، وPE هو جزء منه، وإدخال المفاهيم الرئيسية التي شملتها هذه الدراسة لإظهار دور و الفائدة من اختيار المواد درس في إنتاج وتصميم الأجهزة المسببة للاحتباس الحراري. نحن نناقش سلوك الطاقة من البوليمرات والضرر الحراري السلوك (الشبخوخة) البوليمرات.

➤ ويركز الجزء الثاني على وصف خصائص الفيزيائية والكيميائية للEP، وتحليل المبصرية الأولى. الجزء المهم من البولي إيثيلين كمادة امتصاص الحرارة يظهر حالة المخاطر التي تنطوي عليها هذه الدراسة. لذا، نقوم بإجراء بعض التدابير خصائص مثل الأبتعاثية والخواص الحرارية وغيرها من المواد درس للتحقق من صحة التوصيل لدينا خيار. كتحقيق، نعرض تجربتين أجريته في المختبر على الطاقة الشمسية لا تزال والطاقة الشمسية لدراسة سلوكهم. وأخيراً تقديم أساليب توصيف الذين تتراوح أعمارهم بين عيانات من PE لاستهداف ظواهر الشبخوخة لها.

➤ ثم، ونحن نناقش المحاكاة العددية من نمذجة سلوك الطاقة للأجهزة المسببة للاحتباس الحراري. في هذا السياق، فإننا نقترح نموذج رياضي والتحليل العددي وجها لوجه مع السلوك الطاقة من اثنين من أنظمة الطاقة الشمسية وصفها في الفصل السابق.

➤ وسيخصص الجزء الأخير إلى نتائج والمناقشات من خلال مقارنة النتائج العددية والخبرة لتفسير أفضل للتأثير الطاقة واختيار المواد وتفسير السلوك من الضرر PE. وبالتالي، فإننا سوف تصف السلوك بسبب الشبخوخة الحرارية من البولي إيثيلين والبولي إيثيلين تصور مفاده أن يؤثر في خصائصه العامة.

درسنا سلوك الطاقة من البولي إيثيلين منخفض الكثافة استخداما بوصفها ماصة في محاكاة تجريبية من النموذج الأولي لا يزال الشمسية والمواد المحاكاة الرقمية. وقد استعملت الدراسة التي توصيف المواد الشبخوخة أين تكمن المشكلة الرئيسية التي واجهتها للبوليمرات الحرارية مثل البولي إيثيلين عن حياتهم حيث تم إجراء العديد من الدراسات. فهم والتنبؤ متانة هذه المواد فيما يتعلق تصورها هي، بصفة عامة، أقل تقدما والمتباينة جدا تبعا لوضع الشبخوخة. وتتميز جميع المواد المستخدمة في الأجهزة المسببة للاحتباس الحراري بسبب عدم الاستقرار على نحو أكثر أبطأ مع مرور الوقت وجها لوجه مع الإشعاع الشمسي وخصوصا في جزء الأشعة فوق البنفسجية (UV).

الكلمات الرئيسية: بولي إيثيلين - مجمعات الطاقة الشمسية - سلوك الطاقة - الشبخوخة.

AVANT- PROPOS

On m'aurait dit au début de la rédaction que les remerciements seraient la partie la plus difficile à écrire, je n'y aurais pas cru. Et pourtant, je peux le confirmer maintenant. Ils représentent bien souvent la partie la plus lue d'un mémoire de thèse, ou du moins celle qu'un lecteur regardera naturellement en premier. Il s'agit donc de trouver les mots justes pour chacun, tout en n'oubliant personne. Je commencerai donc par remercier toute personne que j'aurais pu malencontreusement oublier par la suite. Contrairement aux idées reçues, une thèse n'est pas le résultat d'un travail purement personnel. Au-delà d'être une expérience scientifique incroyable, c'est également une aventure humaine inoubliable qui m'a permis de rencontrer et côtoyer des personnes extraordinaires, qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail. C'est donc naturellement et en toute sincérité que je vais maintenant remercier l'ensemble des personnes qui m'ont entourée pendant ces quelques années !

En avant-propos de ce manuscrit, j'aimerais remercier ceux qui me sont les plus chers : mes parents et mon épouse. Merci pour tout l'amour que vous m'avez donné depuis toujours. Je vous suis vraiment reconnaissant pour tout ce que vous m'avez apporté et tout ce que vous m'apportez encore chaque jour. Je n'en serais pas là sans l'environnement idéal que vous m'avez offert pendant toutes ces années. L'éducation exemplaire que vous m'avez donnée et les valeurs morales que vous m'avez inculquées sont pour beaucoup dans la personne que je suis devenue. Les mots me manquent pour exprimer tout ce que j'éprouve pour vous... Je tiens tout d'abord à remercier les personnes qui m'ont le plus soutenue pendant cette période de ma vie. Il s'agit de mes directeurs de thèse : Monsieur **Abderrahim BENMOUSSAT** Professeur à l'université de Tlemcen et Docteur **Ahmed AZZI** Maître de conférences « A » à l'université de Tlemcen. Je tiens à leur exprimer toute ma gratitude pour leur aide technique, scientifique et morale ; pour leur encouragement et surtout pour la patience et la disponibilité dont ils ont fait preuve à mon égard.

Je tiens ensuite à adresser mes remerciements à l'ensemble des membres du jury pour le temps qu'ils ont accordé à la relecture du manuscrit. Je remercie en particulier Monsieur **Omar SEBBANE** Maître de conférences « A » à l'université de Tlemcen, non seulement pour l'honneur qu'il me fait de présider ce jury ; mais aussi pour sa générosité et son encouragement.

Je suis très honorée par la présence de Monsieur **Amine BOUDGHENE STAMBOULI** professeur à l'USTMB d'Oran, de Monsieur **Nasreddine MEKKAKIA-MAAZA** professeur à l'USTMB d'Oran, de Monsieur **Rachid BENCHRIFA** professeur à l'université Mohamed V de Rabat au Maroc et de Monsieur **Chakib SELADJI** Maître de conférences « A » à l'université de Tlemcen ; et je les remercie pour avoir accepté de siéger dans ce jury en tant que examinateurs, pour leur expérience et le regard critique qu'ils ont porté sur mon travail.

TABLE DES MATIERES

Table des matières

Avant-propos	
Table des matières	
Introduction générale	01
Références bibliographiques	05
Chapitre 1 : Etude bibliographique sur les matériaux des dispositifs à effet de serre	06
Introduction	07
I. Caractéristiques physiques et géométriques Solaires	07
1.1 Géométrie et atmosphère	08
1.2 Constante solaire I_0	08
1.3 Rayonnement solaire dans le système Terre – Soleil	09
1.3.1 Déclinaison du soleil (δ)	09
1.3.2 Angle horaire (w)	09
1.3.3 Latitude du lieu (L)	09
1.3.4 hauteur (h)	10
1.3.5 Angle d'incidence θ	10
1.4 Composante du rayonnement solaire	10
1.5 Conversion par effet thermique	10
1.6 Lois de rayonnement thermique	12
II. Matériaux fonctionnels	14
2.1 Matériaux absorbeurs	14
2.2 Matériaux transparents	18
2.3 Matériaux isolants	19
2.3.1 Isolants fibreux	20
2.3.2 Isolants cellulaires	21
2.3.3 Isolants pulvérulents, nodulaires ou granulaires	22
2.3.4 Superisolants	22
III. Les matériaux polymères	23
3.1 Polymères thermoplastiques	23
3.1.1 Les amorphes	23
3.1.2 Les semi cristallins	23
3.2 Propriétés	24
3.2.1 Volume spécifique	24
3.2.2 Conductivité thermique	24
3.2.3 Module d'élasticité	24
3.2.4 Rhéologie	25

3.3 Le polyéthylène	25
3.3.1 Synthèse du polyéthylène	25
3.3.2 Structure et morphologie du polyéthylène	27
3.3.3 Propriétés physiques	31
3.3.4 Propriétés chimiques	33
IV. Vieillessement des polymères semi-cristallins	34
4.1 Vieillessement physique	34
4.2 Vieillessement chimique	34
4.3 Vieillessement du polyéthylène	36
4.3.1 Perte physique des antioxydants	37
4.3.2 Oxydation du polyéthylène	40
4.3.3 Vieillessement thermique	40
4.3.4 Vieillessement photochimique	45
4.3.5 Vieillessement naturel	53
4.4 Stabilisation	55
V. Synthèse bibliographique	59
VI. Conclusion	75
VII. Références bibliographique	76
Chapitre 2 : Matériel et méthodes	91
Introduction	92
I. Choix du matériau d'étude	92
1.1 Problématique sur la conception du dispositif à effet de serre	93
1.2 Choix du matériau fonctionnel	95
II. Caractérisation du matériau d'étude	96
2.1 Composition chimique	96
2.2 Emissivité	97
2.2.1 Structure et fonctionnement de l'émissomètre portable	98
2.2.2 Protocole de mesure	100
2.2.3 Détermination de l'émissivité	101
2.3 Masse volumique	103
2.4 Conductivité thermique et diffusivité thermique	104
2.4.1 Dispositif expérimental	104
2.4.2 Propriétés thermophysiques	107
III. Techniques expérimentales de caractérisation du vieillessement du PE	107
3.1 Diffraction des rayons X (DRX)	107
3.1.1 Principe	107
3.1.2 Conditions d'analyse	108

3.2	Microscopie électronique à balayage (MEB)	109
3.2.1	Principe	109
3.2.2	Conditions d'analyse	109
3.3	Analyse thermique	109
3.3.1	Principe	109
3.3.2	Conditions d'analyse	110
3.4	Calorimétrie différentielle à balayage (DSC)	110
3.4.1	Température de fusion et taux de cristallinité	111
3.4.2	Temps d'induction à l'oxydation (TIO)	112
3.5	Spectroscopie d'absorption UV- visible du solide	113
3.5.1	Principe	113
3.5.2	Transmission	113
3.5.3	Réflexion	113
3.5.4	Conditions d'analyse	114
3.5.5	Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)	115
IV.	Tests de la conversion thermosolaire	115
4.1	Conception du distillateur solaire	116
4.2	Tests d'exposition solaire	119
4.2.1	Tests d'exposition solaire avec film polymère noir	122
4.2.2	Tests d'exposition solaire avec film polymère sur support en acier	132
4.3	Conception du capteur solaire	141
4.3.1	Description du banc d'essai	141
4.3.2	Mesures de l'éclairement	143
V.	Conclusion	148
VI.	Références bibliographiques	148
	Chapitre 3 : Modélisation et simulation numérique	151
	Introduction	152
I.	Bilan énergétique	152
1.1	Distillateur solaire	152
1.1.1	Les paramètres et caractéristiques de fonctionnement	152
1.1.2	Modélisation mathématique	153
1.1.3	Simulation numérique	157
1.2	Capteur solaire	162
1.2.1	Les paramètres et caractéristiques de fonctionnement	162
1.2.2	Paramètres de performance des capteurs solaires	163
1.2.3	Transfert thermique dans les capteurs solaire	165
1.2.4	Modélisation mathématique	169

1.2.5 Simulation numérique	172
II. Conclusion	174
III. Références bibliographiques	174
Chapitre 4 : Résultats et discussions	177
Introduction	178
I. Propriétés du matériau d'étude	178
1.1 Emissivité	178
1.2 Masse volumique	178
1.3 Conductivité thermique, Diffusivité thermique, Capacité thermique massique	179
1.4 Autres propriétés	179
II. Comportement énergétique du polyéthylène sous exposition solaire	179
2.1 Distillateur solaire	179
2.1.1 Distillateur avec film PE seul	179
2.1.2 Distillateur solaire avec Bac + PE	191
2.2 Capteur solaire	207
2.2.1 Variation des pertes de chaleur	210
2.2.2 Variation du rendement thermique en fonction de l'écart de température	211
III. Comportement en vieillissement du polyéthylène sous exposition thermique	212
3.1 Échantillonnage	213
3.2 Conditions de vieillissement	213
3.3 Etude analytique du vieillissement	213
3.3.1 Caractérisation initiale	213
3.3.2 Prise d'eau	222
3.3.3 Caractérisation du vieillissement	223
3.3.4 Représentativité du PE	227
3.3.5 Représentativité du PE	228
3.4 Pertes des antioxydants au cours du vieillissement thermique	228
3.4.1 Cas du vieillissement dans l'air	229
3.4.2 Cas du vieillissement dans l'eau	233
IV. Conclusion	238
V. Références bibliographiques	239
Conclusion générale et perspectives	241

INTRODUCTION GENERALE

Un des défis majeurs auquel est confrontée notre société est la gestion de nos ressources naturelles sans provoquer leur épuisement et sans modifier l'environnement de la planète. En particulier, la production d'énergie s'effectue principalement par prélèvement de combustibles sur des gisements de taille limitée dont on peut craindre l'épuisement. Les énergies fossiles réunies représentent 81 % de consommation mondiale selon l'agence internationale de l'énergie [1]. La part du pétrole dans la consommation énergétique primaire mondiale est de 35 %. D'autre part, la production et la consommation d'énergie contribuent à la modification de l'équilibre thermique à la surface de la terre en produisant des gaz à effet de serre auxquels on attribue le réchauffement actuel de la planète. A cette pollution thermique vient également s'ajouter une pollution physique ou chimique par les déchets [2]. L'utilisation massive de combustibles fossiles cause de graves dommages à notre environnement et provoque des changements climatiques de grande envergure. Elle a introduit un excès de CO₂ qui n'a pas encore trouvé sa place dans le cycle de la matière organique et a contribué à l'augmentation de l'effet de serre. A cause de cela, l'état actuel de notre planète devient de plus en plus préoccupant [1]. La réduction de la consommation reste le moyen le plus efficace non seulement pour économiser l'énergie mais aussi pour réduire la pollution.

Une des voies explorée consiste à rechercher et à utiliser de nouvelles technologies sobres et propres, qui ne conduisent ni à l'épuisement des ressources ni à la modification de l'environnement et permettent un développement durable. Par conséquent, il convient de limiter et rendre plus efficace l'usage de l'énergie, et de se tourner vers des sources d'énergies renouvelables. Ces énergies sont inépuisables et limitent fortement la pollution en diminuant les émissions de CO₂. Le développement de nouveaux comportements et d'énergies de substitution est indispensable. Pour diversifier le bouquet énergétique, plusieurs types de ressources naturelles sont à notre disposition : la géothermie, l'éolien, la biomasse, l'eau et le soleil. L'énergie solaire, qui est à l'origine de la plupart des énergies sur Terre, est aussi une source inépuisable d'approvisionnement immédiat en énergie. Grâce à divers procédés, elle peut être transformée en une autre forme d'énergie utile pour l'activité humaine, notamment en biomasse (photosynthèse), en électricité (conversion photovoltaïque) ou en chaleur (conversion thermique).

D'un autre côté, la satisfaction des besoins en eau potable est en augmentation d'une manière continue alors que les réserves se trouvent constamment diminuées et mal réparties. Dans les régions où l'eau potable est rare comme les zones arides et semi arides, la production de l'eau

douce à partir d'une eau saumâtre ou d'une eau salée peut s'effectuer à partir de l'énergie solaire en utilisant les dispositifs énergétiques à effet de serre qui sont des capteurs solaires.

Une des problématiques dans la captation solaire dans ce procédé est le choix des matériaux et leurs sélectivité pour optimiser l'absorption et réduire les transferts thermiques à travers l'isolation ou encore les matériaux transparents pour diminuer les réflexions et obtenir le maximum de rayonnement convertis. On distinguera deux grandes catégories de matériaux :

- les matériaux de structure qu'on utilise essentiellement pour leurs capacités à soutenir des sollicitations mécaniques et thermiques.
- les matériaux fonctionnels qu'on utilise pour leurs propriétés physiques, telles que la conductivité thermique ou électrique, le magnétisme, les propriétés optiques et radiatives ... comme dans les dispositifs solaires à effet de serre.

Certains matériaux se trouvent à la frontière entre les applications mécaniques et physiques, comme par exemple les matériaux polymères qui ont vu leur utilisation croître dans divers domaines vu leur facilité de mise en œuvre, leur faible coût de production et leurs caractéristiques mécaniques.

Un problème majeur que l'on rencontre pour les polymères thermoplastiques concerne leur durée de vie. De nombreux travaux ont été menés pour prédire la durée de vie. La compréhension et la prédiction de la durabilité de ces matériaux par rapport à leur dégradation sont, d'une façon générale, moins avancées et assez disparates selon le mode de vieillissement [3, 4]. Tous les matériaux utilisés dans les dispositifs à effet de serre se caractérisent surtout par leur instabilité plus au moins rapide dans le temps vis-à-vis du rayonnement solaire et surtout sa fraction ultraviolette (UV). Le vieillissement climatique des polymères entraîne l'évolution des propriétés du matériau tant sur le plan mécanique que chimique ou morphologique. Il combine, pour l'essentiel, les effets de la lumière, de la température et de l'oxygène. L'humidité, la pluie, le vent (et le vent de sable), la poussière, l'ozone et la pollution chimique sont d'autres agents aussi importants.

Nous sommes intéressés dans cette étude au matériau polymère, le polyéthylène (PE) utilisé comme matériau absorbant dans le dispositif solaire qui constituera l'étude de son comportement énergétique durant l'exposition solaire. Dans un second temps, l'influence de son vieillissement sur la durabilité et l'efficacité des dispositifs solaires constituera son comportement en vieillissement. La question de la durabilité du PE est alors clairement posée. En effet, des ruptures prématurées ont été constatées depuis une dizaine d'années [4], et ceci est dû essentiellement aux canicules de chaleur qui amplifient le phénomène. Le polyéthylène industriel totalement transparent aux UV, contient des défauts de structures (double liaisons,

liaisons vinyliques), des impuretés métalliques restent du catalyseur et d'oxygène dont les proportions ont une grande influence sur la stabilité du matériau. Cette photodégradation est due essentiellement à la fraction ultraviolet contenue dans le spectre solaire et dans les longueurs d'onde sont comprises entre 280 et 400 nm [5, 6] et à la température. Le matériau est aussi transparent aux rayonnements infrarouges (IR) entre 800 et 1400 cm^{-1} (7,1 à 12,5 μm) au maximum d'émission du corps noir. Aussi différentes actions sont menées au niveau du polymère pour qu'il présente d'une part une bonne couverture thermique et d'autre part une bonne stabilisation aux UV.

La méthodologie d'étude consiste à mener l'étude dans un prototype solaire de laboratoire permettant de voir le comportement énergétique et le comportement en vieillissement. Le polyéthylène basse densité a été fourni par le commerce sous forme de film mince de quelques microns.

Notre travail sera divisé en quatre (04) chapitres. Ainsi, le **chapitre I** sera consacré à l'étude bibliographique sur les matériaux des dispositifs solaires à effet de serre afin d'établir les différents matériaux fonctionnels utilisés (absorbants, isolants, transparents), comme les matériaux polymères thermoplastiques du point de vue énergétique et du point de vue en endommagement thermique (vieillissement). Nous terminerons ce chapitre par la synthèse bibliographique.

Le **chapitre II** sera consacré aux matériels et méthodes dans la caractérisation physico-chimique du matériau d'étude. De ce fait, nous effectuons des mesures de quelques propriétés telles que l'émissivité et la conductivité thermique ainsi que d'autres propriétés du matériau étudié pour valider notre choix. Comme application, nous étalons deux expériences réalisées au laboratoire sur le prototype de distillateur solaire et sur le capteur solaire plan à air. Et nous terminerons ce chapitre par les essais de caractérisation des échantillons vieillis.

Ensuite, dans le **chapitre III**, nous abordons la simulation numérique à partir de la modélisation du comportement énergétique. Dans ce cadre, nous proposons un modèle mathématique et son analyse numérique vis-à-vis du comportement énergétique dans deux systèmes solaires : Capteur solaire plan à air et le prototype de distillateur solaire.

Le **chapitre IV** sera consacré aux résultats et discussions par la confrontation des résultats numériques et de l'expérience pour pouvoir mieux interpréter l'effet énergétique et le choix des matériaux utilisés et d'interpréter le comportement en endommagement du PE. Ainsi, on va décrire le comportement dû au vieillissement thermique du PE et visualiser la dégradation du PE qui affecte ses propriétés en général.

Enfin, une **conclusion générale**, incluant des perspectives, est finalement développée en fin de ce manuscrit afin de clarifier et récapituler l'ensemble des résultats obtenus dans cette thèse.

Références bibliographiques :

- [1] OCDE. Énergie : les cinquante prochaines années. OECD Publishing, 2009.
- [2] A. Bidart et L. Dubois, « Les énergies fossiles et renouvelables », Dossier Pédagogique de la Fondation Polaire Internationale, Mai 2003.
- [3] S. CASTAGNET, Y. DEBURCK, “Relative influence of microstructure and macroscopic triaxiality on cavitation damage in semi-cristalline polymer”, Mater. Sci. Eng., A448, 2007, 56-66.
- [4] I. MKACHER, « Vieillissement thermique des graines de PE et de PVC des câbles électriques », Thèse de Doctorat, PARISTECH et Ecole nationale supérieure des arts et métiers de PARIS, Décembre 2012.
- [5] W. WANG, B. QU, “Photo and thermo-oxidative degradation of photocrosslinked ethylene-propylene-diene terpolymer”, Polymer degradation and stability, 81, 2003, 531-537.
- [6] A. KUMAR, S. COMMERUC, V. VERNEY, “Ageing of elastomers: A molecular approach based on rheological characterization”, Polymer degradation and stability, 85, 2004, 751-757.

CHAPITRE 1 :

**Etude bibliographique sur les matériaux des
dispositifs à effet de serre**

Introduction :

L'utilisation des énergies renouvelables et en particulier l'énergie solaire, est parmi les solutions préconisées pour pallier au manque d'eau dans les endroits déshérités par l'utilisation des dispositifs solaires à effet de serre. Différents modèles ont été conçus en tenant compte des effets de différents paramètres (atmosphériques, de conception et techniques opérationnelles). Une description de ces dispositifs est nécessaire pour pouvoir optimiser les systèmes énergétiques solaires en utilisant les matériaux fonctionnels adéquats. Ensuite, dans un second temps une étude bibliographique sur le comportement en endommagement par vieillissement des polymères est indispensable. Nous commencerons par décrire les caractéristiques physiques et géométriques solaires puis les matériaux fonctionnels dans les dispositifs solaires à effet de serre comportant les matériaux absorbeurs, les matériaux transparents et les matériaux isolants. On s'intéressera particulièrement aux matériaux polymères thermoplastiques et leur vieillissement thermique et ainsi on terminera par une synthèse bibliographique.

I. Caractéristiques physiques et géométriques Solaires :

L'énergie solaire est disponible sur toute la surface de la terre. Notre planète reçoit 15000 fois l'énergie que l'humanité consomme. L'exploitation de cette énergie peut se faire soit thermiquement sous forme de chaleur par des capteurs solaires, soit par effet thermodynamique avec des capteurs utilisant des absorbeurs sélectifs, soit sous une forme photovoltaïque avec des modules constitués de cellules solaires. A titre d'exemple, les ressources annuelles d'énergie solaire en Algérie sont représentées dans la **Figure 1**.

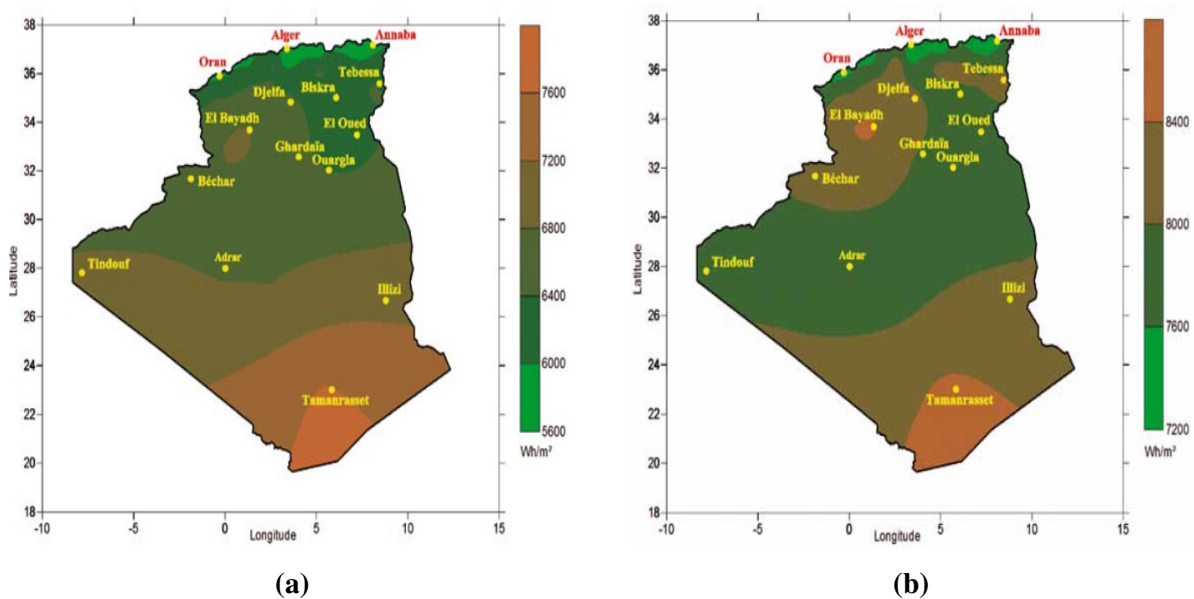


Figure 1 : Carte de la moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue en Algérie [1] :
(a) Surface horizontale, cas d'un ciel totalement clair
(b) Surface inclinée à la latitude du lieu, cas d'un ciel totalement clair

1.1 Géométrie et atmosphère :

La Terre est en mouvement de rotation autour du soleil en 365 jours 48 minutes 46 secondes (année tropique) et tourne autour d'elle même en 24 h. La distance moyenne Terre - Soleil est $d = 149$ millions de kilomètres. La trajectoire de la Terre autour du soleil est une ellipse faiblement excentrée. Les distances spécifiques sont :

- Au solstice d'été (21 juin), la Terre est éloigné au maximum : $d_{\max} = 1.017 \times d$
- Au solstice d'hiver (22 décembre), elle est à la distance minimale : $d_{\min} = 0.983 \times d$

L'observateur terrestre placé sur un cercle dont le soleil occuperait le centre verrait celui-ci sous un angle de $32'$ d'arc, soit environ $1/2$ degré. Voir **Figure 2** [2].

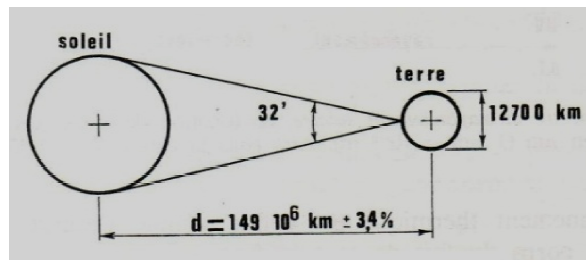


Figure 2 : La distance Terre - Soleil

1.2 Constante solaire I_0 :

La constante solaire, c'est-à-dire le rayonnement direct I_0 reçu par l'unité de surface placée perpendiculairement aux rayons du soleil à la limite extérieure de l'atmosphère terrestre, est de 1353 W/m^2 d'après des mesures effectuées par satellite. La constante solaire I_0 représente le rayonnement total du spectre solaire qui a la forme représenté en **figure 3** [3].

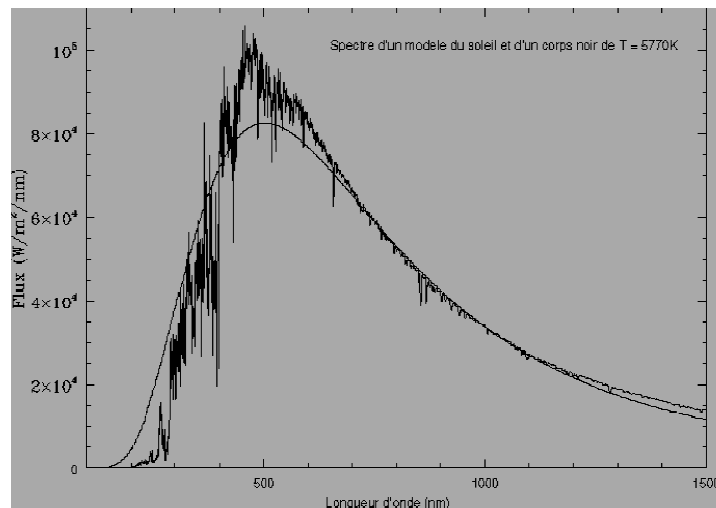


Figure 3 : Spectre du rayonnement solaire, en fonction de la longueur d'onde λ (μm).

Le rayonnement thermique est défini comme l'énergie rayonnante émise par un corps du fait de sa température. L'émission de rayonnement thermique est gouvernée par la température du corps émetteur (soleil 5469°C , corps terrestre 20°C ou plus). L'étendue spectrale est comprise entre $0,1$ et $100 \mu\text{m}$. Le rayonnement solaire émis à 5469°C est compris entre $0,2$ et $5 \mu\text{m}$.

1.3 Rayonnement solaire dans le système Terre - Soleil :

Dans le système Terre - Soleil, des paramètres essentiels sont utilisés pour le repérage de la position du soleil par rapport à la terre. C'est la déclinaison du soleil (δ), l'angle horaire (w) et latitude du lieu (L).

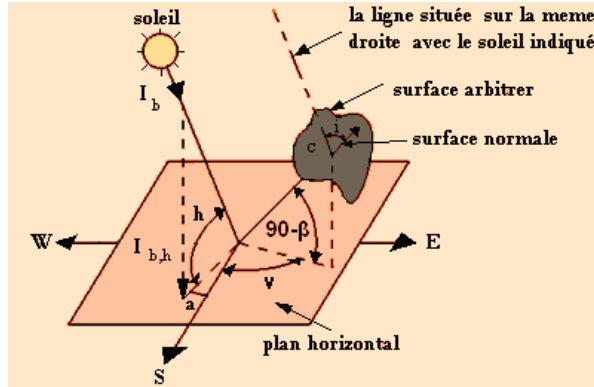


Figure 4 : La position du soleil avec terre par une surface normale [4].

1.3.1 Déclinaison du soleil (δ) :

δ est l'angle que fait la direction du soleil avec le plan équatorial ; il est donné par la relation :

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \quad (1)$$

Où n est le nombre de jour pendant l'année ($1 \leq n \leq 365$), $\delta = \pm 23^\circ 27'$ pour solstices (21 juin et 21 décembre) et $\delta = 0$ pour équinoxe (21 mars et 21 septembre).

1.3.2 Angle horaire (w) :

C'est le déplacement angulaire du soleil à l'Est ou à l'Ouest du méridien local par rapport à la rotation de la Terre sur elle-même. La relation entre les heures et les degrés est comme suit :

- 1 heure de temps = 15° en angle horaire,
- 1 minute de temps = $15'$ d'arc,
- 1 seconde de temps = $15''$ d'arc.

L'angle horaire est l'angle entre le plan méridien passant par le centre du soleil et le plan vertical du lieu et est défini par :

$$W = \frac{360}{24}(TSV - 12) \quad (2)$$

Où TSV : Temps solaire vrai donné en heure.

La variation de l'angle horaire w est donnée quand le soleil se trouve sur le plan méridien local (où se trouve l'observateur) donc $w = 0$.

1.3.3 Latitude du lieu (L) :

C'est la position verticale entre le lieu et le plan équatorial d'après les relations suivants :

$$\sinh = \sin l \sin \delta + \cos l \cos \delta \cos w \quad (3)$$

$$\sin a = \cos \delta \frac{\sin w}{\cosh} \quad (4)$$

Les angles h et α peuvent être calculés à partir de la latitude de lieu L , de la déclinaison δ et d'angle horaire w .

1.3.4 hauteur (h) :

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec le plan horizontal. En peut définir l'angle zénithal noté θ_z qui est l'angle que fait la direction du Soleil avec le vecteur du lieu :

$$\theta = 90^\circ - h \tag{5}$$

1.3.5 Angle d'incidence θ :

C'est l'angle entre le plan du capteur et la radiation solaire θ qui est exprimé par :

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \varphi \cos i + \cos \delta \cos i \cos w + \cos \delta \sin i \sin \alpha \sin w \\ & - \sin \delta \cos \varphi \sin i \cos \alpha + \cos \delta \sin \varphi \sin i \cos \alpha \cos w \end{aligned} \tag{6}$$

Où i est l'inclinaison du capteur et α est l'angle entre le méridien local et la projection de la normale au plan.

1.4 Composante du rayonnement solaire :

Le rayonnement qui nous parvient du soleil est émis par sa surface extérieure dont la température est d'environ 6000 °K. A une telle température, 40% de l'énergie est émise dans le domaine visible, c'est-à-dire dans une gamme de longueur d'onde allant de 0,3 μm (violet - bleu) à 0,7 μm (rouge). La décomposition du rayonnement solaire peut être réalisée en projetant un faisceau lumineux sur un prisme de verre ou sur un réseau de diffraction.

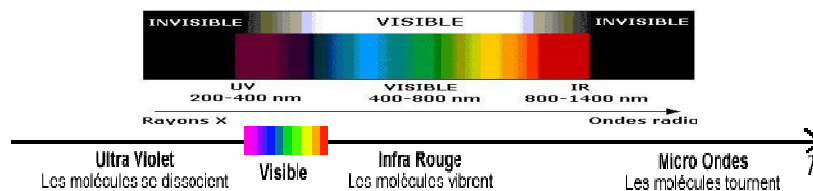


Figure 5 : Répartition du rayonnement solaire [5].

Le rayonnement solaire au sol se divise en plusieurs rayonnements : directs, diffus, réfléchis et globale à partir des conditions physiques à travers l'année.

- *Rayonnement direct* : C'est le rayonnement solaire qui se forme de rayons parallèles provenant du soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère.
- *Rayonnement diffus* : C'est une partie du rayonnement du soleil qui a subi de multiples réflexions (dispersion) par les molécules et les aérosols de l'atmosphère. Pour un observateur au sol, le rayonnement diffus est un ensemble des directions rayonnées.
- *Rayonnement réfléchi* : C'est le rayonnement qui provient du sol causé par la réflexion. Cette composante dépend de la nature du sol et de sa couleur.

1.5 Conversion par effet thermique :

La terre reçoit une chaleur par le rayonnement solaire à partir d'une distance à travers le vide spatial. Ce transfert intervient dans le mécanisme du rayonnement électromagnétique dans

l'échelle distance terrestre. La matière émet des ondes électromagnétiques sous différente excitation. A distance entre les corps, l'onde électromagnétique est caractérisée par sa fréquence ν ou sa longueur d'onde λ et liées par la relation $C = \lambda\nu$ dans laquelle $C = C_0/n$ avec C la vitesse de propagation, C_0 la vitesse de lumière ($2,99 \cdot 10^8$ m/s) et n le milieu traversé. Le rayonnement thermique est émis par la matière du fait de sa température et la variation de son énergie calorifique. Il occupe une très faible portion du spectre des ondes électromagnétiques. La densité du rayonnement est définie par les paramètres suivants :

- L'angle solide Ω est l'angle formé par le point M et la projection conique dans l'espace.

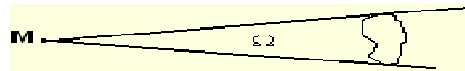


Figure 6 : Angles solides [6]

Cas d'une surface infinie : Soit angle solide $d\Omega$ aux points M assemble basse sur une surface élémentaire ds entourait par un point P, L la distance MP donc en évolue $d\Omega$ on sphère de centre M et de rayon L , et on a $d\sigma$ élément de surface sur sphère.

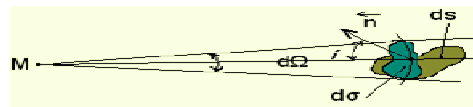


Figure 7 : Angles solides élémentaires [6]

Donc
$$d\Omega = \frac{d\sigma}{L^2} \quad (7)$$

Avec
$$d\sigma = ds \cdot \cos i$$

Cas d'une surface plane finie :
$$\Omega = \iint_s \frac{ds \cdot \cos i}{L^2} \quad (8)$$

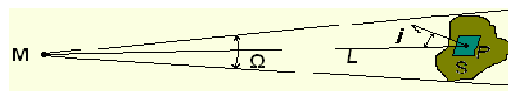


Figure 8 : Angles solides finis [6]

- Intensité énergétique : On considère une direction OX issue de la surface d'un corps radiant par angle θ avec la normale n et azimuth φ . Si $d\Phi_{0x}$ est la portion du flux rayonné dans un angle solide $d\Omega$ la direction du rayonnement d'intensité I_{0x} (le flux).

$$I_{0x} = \frac{d\phi_{0x}}{d\Omega} \quad (9)$$

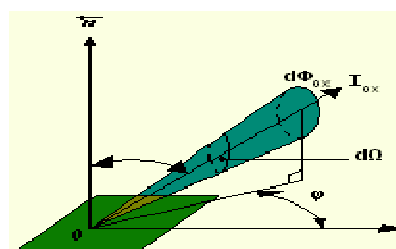


Figure 9 : Définition de l'intensité [6]

- Emission énergétique : C'est le flux total émis par unité de surface de la source, la puissance $d\Phi$ émis par un élément de surface ds dans l'ensemble de direction :

$$M = \frac{d\phi}{ds} \quad (10)$$

- Luminance :

$$L_{0X} = \frac{I_{0X}}{ds'} = \frac{d^2\phi_{0,x}}{dsd\Omega \cos\theta} \quad (11)$$

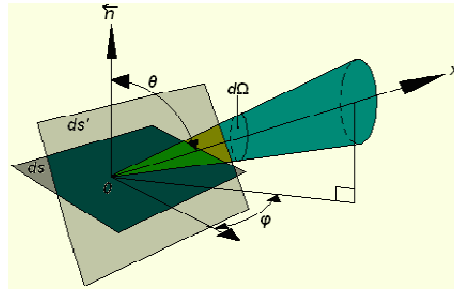


Figure 10 : Définition de la luminance [6]

- Eclairage : C'est l'énergie d'éclairage de surface ds :

$$E = E_0 \cos i \quad (12)$$

Avec $E_0 = \frac{I_{0X}}{r^2}$

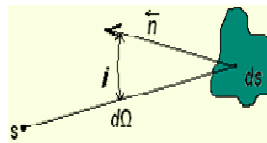


Figure 11 : Eclairage d'une surface [6]

- La transmission est la soustraction du flux incident et la somme des flux réfléchis et absorbés.

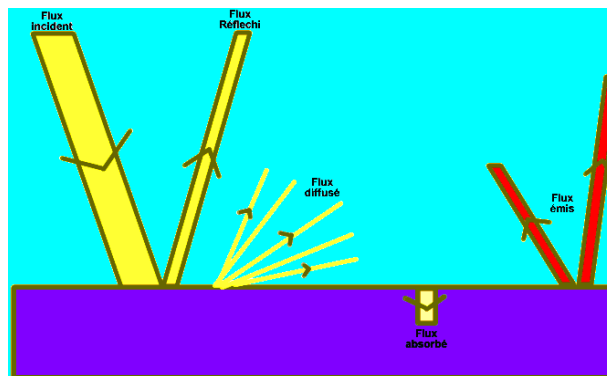


Figure 12 : Composition du flux rayonnant [6]

1.6 Lois de rayonnement thermique :

- Loi de Planck : C'est une expression mathématique théorique établie par Planck qui donne la

valeur de $L_{\lambda T}^0$ en fonction de λ et T [7] :

$$L_{\lambda T}^0 = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp(C_2/\lambda T) - 1} \quad (13)$$

Où $C_1 = 2\pi h C_0^2 = 3.741 \cdot 10^{-16} \text{ w.m}^2$, $C_2 = h C_0 / K = 0.013388 \text{ m.k}$, h : Constante de Planck égale à $h = 6.6245 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$, K : Constante de Boltzmann égale à $k = 1.38033 \cdot 10^{-23} \text{ J/kg}$ et C_0 : vitesse de lumière donnée par $C_0 = 2.997930 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

La loi de Planck simplifiée est donné par :
$$L_{\lambda T}^0 = C_1 \lambda^{-5} \exp\left(\frac{-C_2}{\lambda T}\right) \quad (14)$$

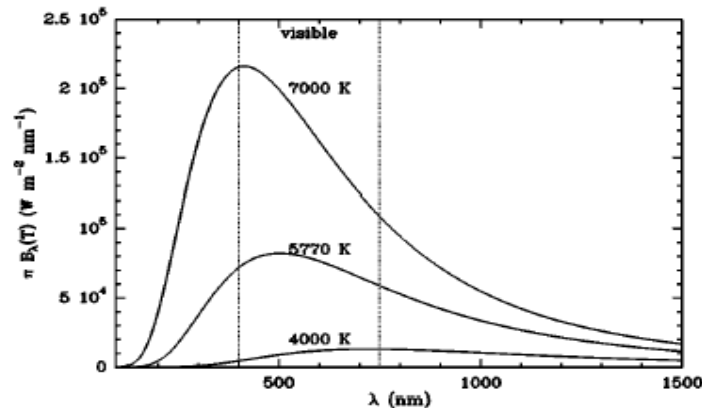


Figure 13 : Distribution spectrale du corps noir en fonction de la température absolue [7]

- Loi de Wien : La première loi de Wien est une loi du déplacement de λ_m en fonction de T et permet de calculer la luminance spectrale d'un corps noir de température T et de longueur d'onde λ_m . Elle est donnée par :

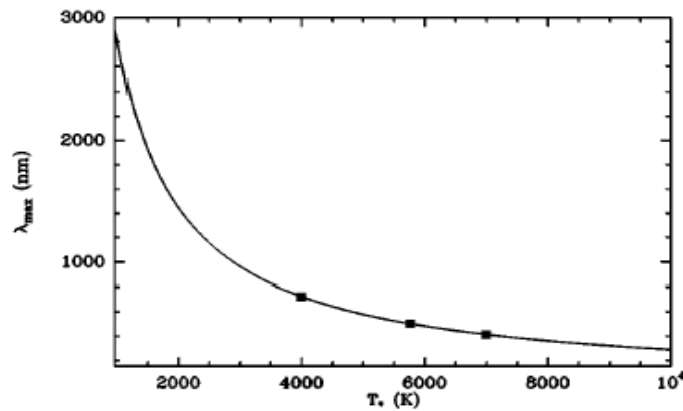
$$\lambda_m T = 2897.8 \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (15)$$


Figure 14 : Déplacement λ_m en fonction de la température [7]

La deuxième loi de $L_{\lambda_m}^0$ s'exprime sous la formule suivante :
$$L_{\lambda_m}^0 = B T^5 \quad (16)$$

Avec $B = 1.287 \cdot 10^{-5} \text{ w / m}^3 \cdot \text{k}^5$ est la constante de Wien.

- Loi de Stefan Boltzmann : Cette loi fournit l'émittance totale du rayonnement du corps noir dans le vide en fonction de sa température absolue [7] :

$$M^0 = \sigma T^4 \quad (17)$$

Avec $\sigma = \frac{2\pi^5}{15} \frac{K^4}{C_0^2 h^3} = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ w / m}^2 \cdot \text{k}^4$.

- Emissivité totale d'une surface : C'est le rapport entre luminance de cette surface et la luminance du corps noir à la même température :

$$\varepsilon_{iT} = \frac{L_{iT}}{L_T^0} \quad (18)$$

- Facteur d'émission spectral d'une surface : C'est un rapporte entre luminance spectrale de cette surface et luminance celle du corps noir à la même température et pour la même longueur d'onde :

$$\varepsilon_{i\lambda T} = \frac{L_{i\lambda T}}{L_{\lambda T}^0} \quad (19)$$

- Propriétés des corps noir : Soit une surface quelconque différente du corps noir (ne rayonne pas comme un corps noir) désigné par une surface s, le corps c reçoit une incidence i de flux $\Phi_{i\lambda}^i$ de longueur d'onde λ une partie de ce flux réfléchi $\Phi_{i\lambda}^r$ par s le reste pénètre à l'intérieure de c, une partie ressort (transmission) $\Phi_{i\lambda}^t$, le reste a été absorbé par le corps c $\Phi_{i\lambda}^a$.

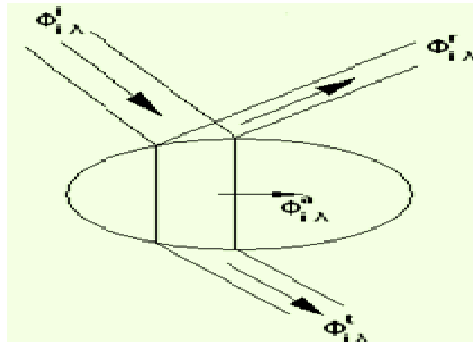


Figure 15 : Définition des propriétés radiatives [6]

Si $\Phi_{i\lambda}^i, \Phi_{i\lambda}^r, \Phi_{i\lambda}^t, \Phi_{i\lambda}^a$ sont les flux monochromatique de même longueur d'onde on a :

$$\alpha_{i\lambda} = \frac{\Phi_{i\lambda}^a}{\Phi_{i\lambda}^i} ; \quad \rho_{i\lambda} = \frac{\Phi_{i\lambda}^r}{\Phi_{i\lambda}^i} ; \quad \tau_{i\lambda} = \frac{\Phi_{i\lambda}^t}{\Phi_{i\lambda}^i} \quad (20)$$

Le rayonnement thermique qui est un rayonnement électromagnétique peut se présenter sous trois formes d'énergie : émission, absorption, réflexion et diffusion. L'émission par rayonnement est obtenue lorsqu'un corps porté à une certaine température convertit son énergie interne (énergie microscopique) en rayonnement thermique. Une unité de surface d'un corps émet durant une unité de temps une quantité d'énergie appelée flux d'émission. On le note Φ_i . L'absorption par rayonnement est l'opération inverse. Quand une surface reçoit un flux d'énergie, la fraction transformée en énergie interne est appelée flux absorbé (noté Φ_a). La réflexion ou la diffusion par rayonnement est le cas où au lieu d'être absorbé, le rayonnement incident sur une paroi peut être directement renvoyé par la paroi. Dans ces conditions, on distingue 2 cas : L'optique géométrique (il s'agit alors de réflexion) et la diffusion pour toutes les directions. On note que l'onde diffusée ou émise a la même fréquence que l'onde incidente. La somme de ces deux flux est notée Φ_r .

II. Matériaux fonctionnels :

Dans les dispositifs solaires à effet de serre, il y a plusieurs familles de matériaux fonctionnels qu'on peut utiliser pour leurs propriétés physiques, optiques ou radiatives : Les matériaux absorbeurs, les matériaux transparents et enfin les matériaux isolants.

2.1 Matériaux absorbeurs :

L'absorbeur joue un rôle principal dans le capteur solaire. C'est généralement un corps noir qui absorbe toutes les rayonnements dans le spectre du visible, de l'ultraviolet et une petite quantité dans l'infrarouge. Il converti le rayonnement solaire capté en énergie calorifique. Un absorbeur doit avoir les caractéristiques suivantes : Un bon coefficient d'absorption, une bonne conductivité thermique et une bonne résistance à la corrosion.

Donc, deux fonctions incombent à l'absorbeur :

- absorber la plus grande partie du rayonnement solaire possible,
- transmettre la chaleur produite vers le fluide caloporteur avec un minimum de perte.

Le choix du matériau absorbeur et le mode de construction a une grande influence sur la qualité du capteur solaire. Du fait de leur conductivité élevée, les absorbeurs sont généralement métalliques comme le cuivre, l'acier ou l'aluminium. Ils peuvent être des polymères dans le cas où un milieu agressif circule directement dans l'absorbeur tel est le cas de l'eau saumâtre. L'emploi des polymères entraine des différences notables comparées aux métaux : Ils ont l'avantage d'être légers, d'avoir la possibilité de teinter le produit dans la masse et d'avoir une faible sensibilité à la corrosion. Toutefois, ils ont une mauvaise conductibilité thermique, et sont susceptibles à un vieillissement dû au rayonnement U.V et d'avoir une tenue médiocre aux températures élevées. Quelques caractéristiques de ces matériaux sont données dans le **Tableau 1.1**.

Tableau 1.1 : Caractéristiques physiques de divers matériaux absorbeurs

Matériaux	Conductivité thermique (W/m.°C)	Coefficient de dilatation
Aluminium	230	2,38
Cuivre	380	1,65
Zinc	112	2,90
Acier	52	1,15
Inox	52	1,15
Plastique	0,2 – 0,4	7 - 20
Polyéthylène	0,48	$2 \cdot 10^{-4}$

En général, un absorbeur efficace a une bonne absorptivité et une faible émissivité. Cependant, les surfaces métalliques tendent à réfléchir la lumière d'où une perte d'énergie. Pour résoudre ce problème, les surfaces métalliques doivent être enduites d'une surface sélective [8] qui d'une part absorbe le rayonnement solaire de courtes longueurs d'onde avec un rendement élevé et le transforme en I.R par l'effet de décalage de Wien et qui ne perd que très peu d'énergie grâce à son état de surface qui agit comme un piège vis-à-vis du rayonnement I.R. Cette surface n'est considérée comme surface noire que pour la lumière solaire, pour les I.R elle agit comme un miroir. De plus, il devra être la plus léger possible afin de limiter l'inertie de mise en régime. Des considérations simples sur les échanges radiatifs au niveau du

revêtement de l'absorbeur montrent que, suivant la température à laquelle est portée la surface d'absorption, l'établissement des bilans thermiques peut se faire suivant deux schémas distincts, simples dans le cas des basses et moyennes températures et plus complexe dans le cas des hautes températures. En effet, le revêtement permet au flux solaire d'être absorbé par la surface revêtue, elle doit être réalisée avec un matériau transparent pour le domaine spectral correspondant ($0,25 < \lambda < 2,5 \mu\text{m}$). Si ce revêtement est une surface sélective, elle doit être absorbante pour ce même domaine de longueur d'onde. Par contre, il faut qu'elle s'oppose aux échanges radiatifs avec le milieu environnant. Tant que la température de la surface d'absorption est relativement peu élevée ($T < 200 \text{ }^\circ\text{C}$), les domaines spectraux d'émission ne se recouvrent pas. On peut donc imaginer l'existence de matériaux transparents ou surfaces sélectives absorbantes pour le domaine spectral allant de $0,25 < \lambda < 2,5 \mu\text{m}$ et de matériaux opaques ou surfaces sélectives peu émissives dans le reste du domaine spectral. Ainsi, on voit apparaître une longueur d'onde de coupure (ou frontière) qui sépare les deux domaines spectraux à comportement optique différencié. Il n'en va pas de même à haute température ($T > 200 \text{ }^\circ\text{C}$) car il y a alors recouvrement partiel entre les deux spectres considérés. La longueur d'onde de coupure ne peut donc plus se trouver entre les deux domaines spectraux considérés et, suivant sa position, il y a amputation d'une partie du rayonnement soit par le :

- Spectre solaire incident et donc diminution du flux solaire pouvant être absorbé par la surface d'absorption,
- Spectre d'émission de la surface d'absorption d'où augmentation des pertes radiatives,
- De chacun de ces deux spectres en même temps et donc, de manière concomitante, diminution du flux solaire absorbé et augmentation des pertes radiatives.

Le matériau sélectif recherché devra répondre à cette contrainte de l'effet de température sur la longueur d'onde de coupure où cette dernière doit être la plus élevée possible de l'infrarouge. Son rendement de conversion sera alors sensiblement augmenté du fait de la réduction des pertes radiatives. Le plus souvent, une surface sélective résulte de l'association d'un film et d'un support métallique poli. Le film doit absorber l'énergie solaire et être transparent à l'infrarouge, donc présenter une émissivité thermique faible. L'épaisseur du film absorbant doit rester faible, en générale de quelques dixièmes de microns car dans ce cas la réflectance du métal de base dans l'infrarouge thermique n'est que très légèrement modifiée et l'émissivité de la surface est proche de celle du métal de base. Il existe différentes manières de réaliser de tels films qui sont :

- L'absorption par film semi-conducteur,

- L'absorption par film multicouches,
- L'absorption par l'empilement Absorbant + Réflecteur infrarouges,
- Sélectivité par utilisation de surfaces texturées,
- Matériaux intrinsèques,
- Filtres interférentiels par empilement de plusieurs couches alternées de deux matériaux ayant des indices optiques différents.

Selon les caractéristiques escomptées, il est plus judicieux de considérer les facteurs d'absorption α et d'émission ε que le rapport $\frac{\alpha}{\varepsilon}$, parfois utilisé, et qui ne permet de déterminer que la température de stagnation des dispositifs à effet de serre, température atteinte lorsqu'une Calorie n'en est extraite. Ainsi, on peut évaluer l'intérêt de différents absorbeurs sélectifs en tenant compte à la fois des propriétés optiques de l'absorbant et des conditions de fonctionnement des dispositifs à effet de serre. Dans ce sens, la surface sélective devra supporter la température de fonctionnement, des cycles thermiques d'amplitude et de durée très variables, quelques excursions à sa température de stagnation en cas d'arrêt de la circulation du fluide de transfert. Ces contraintes externes peuvent entraîner un certain nombre de détériorations de la surface sélective. Comme détériorations, on peut avoir soit un trop grand écart entre les coefficients de dilatation du substrat et des matériaux composant la surface sélective ou encore la diffusion d'une couche dans l'autre surtout dans le cas où la sélectivité est obtenue par effet d'interférences. On peut réduire le risque de diffusion en interposant des barrières de diffusion entre les couches optiquement actives, mais plus l'empilement est complexe, plus grand est le risque de détérioration par inter-diffusion. En plus de leur stabilité thermique, les surfaces sélectives doivent être chimiquement inertes et présenter une cinétique de réaction extrêmement lente afin de résister aux divers types de corrosion auxquels elles peuvent être soumises. Pour cela, la sélectivité de l'absorbant peut être améliorée au moyen de traitement de surface peut être obtenu par des procédés électrochimiques ou électro-physiques. Trois facteurs devront être pris en considération avant de choisir un absorbant sélectif comme solution à la conception des dispositifs à effet de serre qui sont :

- La stabilité des propriétés optiques,
- la stabilité physico-chimique
- et le coût de la réalisation des surfaces sélectives.

Avec l'utilisation des absorbeurs sélectifs, on obtient un gain appréciable à toutes températures et particulièrement au-delà de 60 °C. Il est remarqué aussi que le rendement d'un absorbant sélectif recouvert d'un simple vitrage est supérieur à celui d'un absorbant non

sélectif équipé d'un double vitrage. En fait, l'utilisation simultanée d'un vitrage sélectif et d'un absorbeur sélectif ou d'un double vitrage non sélectif et d'un absorbeur sélectif ne conduit pas à amélioration sensible des performances tout en entraînant un surcoût important. Il convient de noter que des températures supérieures à 100 °C peuvent être obtenues avec des capteurs plans sélectifs avec un rendement de conversion acceptable. Ce type de capteur peut donc être utilisé avec efficacité pour toutes les applications aux moyennes températures : réfrigération, conditionnement d'air, dessalement d'eau. Pour les hautes températures, il est nécessaire d'utiliser des systèmes concentrateurs du flux solaire et dans ces conditions on a vu que les pertes par conversion et conduction pouvaient être négligées en première approximation par rapport aux pertes radiatives. Les plus importantes surfaces sélectives sont données dans le **tableau 1.2 [8]**:

Tableau 1.2 : Caractéristiques physico-chimiques de diverses surfaces sélectives.

Surface et traitement	Absorptivité	Emissivité	Effet de l'humidité
Acier et Nickel noir sur Nickel	0,95	0,07	Variable
Acier et Chrome noir sur Nickel	0,95	0,09	Sans effet
Acier et Chrome noir	0,91	0,07	Oxydation rapide
Cuivre et Chrome noir	0,95	0,14	Peu d'effets
Acier galvanisé et Chrome noir	0,95	0,16	Pèle rapidement
Cuivre et Cuivre noir	0,88	0,15	
Acier et Oxyde de Fer	0,85	0,08	Peu d'effets
Aluminium et oxyde de manganèse	0,70	0,08	
Acier et couche organique sur oxyde de fer	0,90	0,16	Peu d'effets
Acier et couche organique sur chrome noir	0,94	0,20	Peu d'effets
Peinture noire	0,92 – 0,97	0,85	
Tinox	0,95	0,05	
Traitement sous vide	> 0,95	< 0,05	

2.2 Matériaux transparents :

Du fait de sa résistance aux chocs, aux contraintes mécaniques (grêle, neige) et aux chocs thermiques, le verre sécurisé est principalement utilisé comme couverture transparente. Il est de préférence pauvre en oxyde de fer afin d'être le plus transparent possible à la transmission du rayonnement solaire. Dans le cas de capteurs intégrés en toiture, des matières synthétiques sont parfois utilisées. Leur durée de vie est plus faible que celle du verre ordinaire, mais elles sont plus légères, moins chères et plus facile à mettre en œuvre. Le vitrage est légèrement structuré et disperse, afin de diminuer un éventuel éblouissement. Les caractéristiques essentielles d'un vitrage sont le coefficient de transmission (τ) et l'émissivité (ε). Le coefficient de transmission (τ) est déterminé par la structure du vitrage (simple, double ou triple, l'épaisseur des vitres, des espaces et la nature du gaz de remplissage). Les propriétés physiques du verre sont données au **tableau 1.3** :

Tableau 1.3 : Caractéristiques physiques du verre

Verre	Réflexion	Absorption	Transmission
Verre clair	8 %	9 %	83 %
Verre basse teneur en Fe ₂ O ₃	8 %	2 %	90 %

Le vitrage n'absorbe que faiblement le rayonnement solaire d'où il transmet donc un maximum d'énergie vers l'absorbeur. Au **tableau 1.4** sont données les caractéristiques optiques des matériaux, utilisés comme couverture transparente :

Tableau 1.4 : Caractéristiques des couvertures transparentes

Matériaux	Indice de réfraction	Epaisseur (mm)	Transmittivité
Verre	1,518	3 - 4	0,840
Lexan	1,586	3 - 4	0,840
Teflan	1,343	0,05	0,960
Tedlar	1,460	0,10	0,920
Mylar	1,640	0,10	0,870
Kynar	1,410	0,10	0,930
Marlex	1,50	0,10	0,920

Actuellement le verre le plus utilisé dans les capteurs solaires plan est le verre prismé. Sa particularité est de diminuer la partie réfléchi du rayonnement contrairement au verre trempé. Lorsque l'angle d'incidence est faible, le verre prismé peut atteindre 96% de transmission.

2.3 Matériaux isolants :

La production et les performances des isolants thermiques ont marqué d'importants progrès ces dernières décennies et en particulier à partir des années 1970. Le nombre d'isolants disponibles sur le marché a augmenté et leurs propriétés thermiques et d'aptitude à l'emploi ont été sensiblement améliorées. Trois facteurs qui ont joué un rôle important dans la réalisation de ces progrès peuvent être mentionnés :

- l'évolution rapide et l'amélioration des technologies de fabrication des isolants avec une augmentation des productivités et une réduction des coûts,
- l'approfondissement des connaissances physiques du fonctionnement des isolants,
- la mise en place d'un système de contrôle de qualité pour garantir les propriétés des produits manufacturés, d'une part, par l'élaboration de normes pour définir et quantifier les propriétés des isolants et fixer les méthodes de mesure avec la mise au point d'appareils et matériaux de référence, en l'organisation d'un ensemble de procédures de contrôle de fabrication et de certification des produits.

Malgré les progrès déjà entamés, on ne peut pas dire que l'effort de recherche et de développement dans le domaine des isolants thermiques a été affaibli. En effet, les différentes tendances relevées à l'heure actuelle qui ouvrent de nouvelles perspectives sont notamment :

- l'étude de nouveaux gaz interstitiels de basses conductivités thermiques, non nuisibles à la couche d'ozone atmosphérique,

- l'extension du domaine d'utilisation des super isolants, en particulier les nanomatériaux et les isolants sous vide dans le domaine de la température ambiante et du bâtiment (double vitrage de haut pouvoir isolant, paroi transparente, etc.),
 - le développement d'applications spécifiques des isolants, par exemple l'isolation dynamique réunissant à la fois l'utilisation des isolants à hautes performances, l'inertie thermique des bâtiments et les apports solaires,
 - une meilleure maîtrise de la structure morphologique de la matrice solide des isolants (contrôle de l'anisotropie et répartition de masse volumique) pour améliorer le pouvoir isolant.
- Cela pour ne citer que quelques-unes des orientations actuelles des recherches et développement dans un domaine d'activité en pleine évolution.

Le capteur doit être isolé thermiquement avec des matériaux appropriés. Ces matériaux doivent avoir un faible coefficient de conductivité thermique, afin de limiter les pertes thermiques par conduction à travers les faces postérieures et latérales du capteur plan. L'isolant doit résister aux hautes températures atteintes à l'intérieur du capteur. Pour choisir un matériau isolant, on doit considérer les paramètres suivants : La masse volumique, la température maximale en régime permanent, la résistance au feu, aux rongeurs et à la putréfaction et la sensibilité à l'humidité et son coût. Le critère de classification des isolants thermiques généralement retenu [9] repose sur la structure de leur matrice solide et sur la nature chimique de la substance qui la constitue : isolants fibreux, cellulaires, granulaires de nature minérale et organique.

2.3.1 Isolants fibreux :

Les isolants fibreux minéraux sont manufacturés à partir de matières amorphes fondues : roche (basalte en particulier), verre, silice vitreuse et oxydes métalliques. Les principaux représentants sont les laines minérales et les isolants en fibres céramiques (silice-alumine). Les isolants fibreux organiques peuvent être d'origine naturelle, comme les fibres ou laine de bois, la laine animale (mouton) ou manufacturés à partir de matières plastiques comme les fibres de polyester (**tableau 1.5**).

Tableau 1.5 : Matériaux isolants fibreux

Isolant	Masse volumique (Kg/m ³)	Température limite (°C)	Conductivité thermique (W/m.K)
Laine de roche	18 à 180	≤ 600	0,047
Laine de verre	7 à 130	≤ 400	0,049
Laine de silice	8 à 100	≤ 1100	0,04
Fibres de silice-alumine	40 à 200	≤ 1260	0,06
Fibre de bois	200 à 250	≤ 100	0,06
Fibre de polyester	10 à 35	≤ 95	0,05
Laine de mouton	10 à 35	≤ 100	0,041

Pour renforcer la résistance mécanique et la tenue de ces isolants à matrice solide non consolidée, les fibres sont généralement agglomérées avec des faibles quantités de résines synthétiques ou autres types de liants (ciment, etc.). Ils sont commercialisés sous forme de feutres flexibles se présentant en rouleaux ou panneaux semi-rigides et de panneaux rigides.

Lorsque le produit est livré comprimé, il doit reprendre son épaisseur nominale après décompression et pose, pour laquelle la résistance thermique est annoncée. Pour l'isolation des tuyauteries, le matériau est préformé sous forme de cylindre annulaire en un ou deux éléments (coquilles). Les feutres et les panneaux peuvent être recouverts avec des revêtements de surface ayant un rôle fonctionnel (papier kraft-bitume ou kraft-aluminium formant pare-vapeur, voile de verre renforcé améliorant la tenue mécanique, feuille d'aluminium pour les applications haute température en particulier pour les coquilles) ou esthétique (kraft-aluminium laqué de différentes couleurs pour les plafonds, etc.).

2.3.2 Isolants cellulaires :

Ce sont les matériaux poreux à matrice solide consolidée contenant des cellules fermées ou ouvertes ou partiellement ouvertes, contenant de l'air ou un autre gaz ayant servi à l'expansion du matériau initial (**tableau 1.6**).

Tableau 1.6 : Matériaux isolants cellulaires

Isolant	Masse volumique (Kg/m ³)	Température limite (°C)
Béton cellulaire	375 à 825	< 400
Verre cellulaire	110 à 140	- 260 à 430
Polystyrène expansé	7 à 35	< 95
Polystyrène extrudé	25 à 40	< 95
Polyuréthane et polyisocyanurate	27 à 60	- 200 à 100
Polychlorure de vinyle	25 à 48	< 95
Mousse phénolique	30 à 100	- 200 à 120
Mousse souple élastomère	40 à 100	- 180 à 105

Parmi les isolants cellulaires d'origine minérale, les plus répandus sont le béton cellulaire léger et le verre cellulaire. Les isolants cellulaires organiques manufacturés sont représentés par une grande diversité de matériaux plastiques alvéolaires et de mousses à base de produits carbonés : le polystyrène expansé et extrudé, le polyuréthane, le polychlorure de vinyle, la mousse phénolique et les mousses souples d'élastomère.

Ces matériaux se présentent sous forme de panneaux semi-rigides ou rigides (les polystyrènes, par exemple) de plaques, de blocs et de coquilles et plus rarement sous forme de rouleaux. Très souvent, les panneaux sont recouverts par des revêtements de protection, éventuellement étanches pour préserver le gaz en fermé dans les cellules (le cas des polyuréthanes, par exemple). Il faut citer également l'application des mousses (polyuréthane en particulier), par injection *in situ*, dans des espaces confinés à isoler.

2.3.3 Isolants pulvérulents, nodulaires ou granulaires :

Ils se présentent en général en vrac, emballés dans des sacs. Leur mise en œuvre *in situ* se fait soit manuellement, soit à l'aide d'équipements pneumatiques, dans des espaces confinés (cavité des murs) ou ouverts (combles) qui doivent être isolés (**tableau 1.7**).

Tableau 1.7 : Matériaux isolants pulvérulents, nodulaires ou granulaires

Isolant	Masse volumique (Kg/m³)	Température limite (°C)
Silicate de calcium (compacté en plaques ou coquilles)	200 à 350	<870
Perlite expansé : en vrac agglomérée en plaques	32 à 176 140 à 200	272 à 760
Vermiculite (en vrac)	90 à 130	- 272 à 760
Granulats de verre cellulaire (vrac)	115 à 175	- 260 à 430
Laines minérales (vrac) : fibres de roche nodulées en flocons fibres de verre nodulées en flocons	30 à 50 ≈ 10	<600 <400
Liège (aggloméré en panneaux)	100 à 250	- 165 à 100
Fibres de cellulose (vrac)	30 à 50	< 100
Copeaux de mousse rigide de polychlorure de vinyle	30 à 50	< 95

Les matériaux d'origine minérale de ce type sont la perlite et la vermiculite qui se présentent respectivement sous forme de grains et de paillettes obtenus à partir de l'expansion à chaud de roches volcaniques et de mica, le granulats de verre cellulaire, les flocons de laine de roche ou de verre. Le silicate de calcium est une poudre compactée sous forme de plaques renforcées par incorporation de fibres minérales. La perlite et la vermiculite peuvent également être agglomérés et livrés sous forme de plaques. Les isolants d'origine organique de ce type sont les granulats de liège, les copeaux de mousse rigide de polychlorure de vinyle, les fibres de cellulose (obtenues à partir de papiers, de cartons, de pâte à bois avec ou sans liant et d'autres adjuvants), des perles expansées à partir de granules de polystyrène. Les granulats de liège agglomérés à l'aide de liants bitumineux ou de résines synthétiques peuvent être livrés aussi sous forme de plaques. L'utilisation des isolants appliqués *en vrac* fait intervenir la notion de surface recouverte par unité d'emballage d'isolant en vrac, posé selon les instructions du fabricant pour obtenir une performance annoncée.

2.3.4 Superisolants :

Ce sont des matériaux manufacturés, c'est-à-dire des matériaux microporeux de type cellulaire, comme des plaques aérogel de silice monolithique, ou pulvérulents, comme les poudres aérogel ou les poudres ultrafines (nanomatériaux) de silice (**tableau 1.8**). On peut les obtenir à partir d'isolants en poudre ou en fibre, sous vide, confinés dans un espace étanche. L'utilisation de ces matériaux isolants initialement prévue pour des applications spéciales commence à gagner le domaine du bâtiment.

Tableau 1.8 : Superisolants (isolants microporeux et sous vide)

Isolant	Masse volumique (Kg/m ³)	Température limite (°C)
Aérogel de silice (plaques)	70 à 230	< 600
Aérogel de silice (poudres)	200	< 800
Poudres de silice ultrafine	200 à 300	< 1000
Poudres et laines minérales sous vide	10 à 150	- 272 à 760

III. Les matériaux polymères :

Les matériaux polymères ont vu leur utilisation croître dans divers domaines vu leur facilité de mise en œuvre, leur faible coût de production et leurs caractéristiques énergétiques. Un problème majeur que l'on rencontre dans ces matériaux concerne leur durée de vie. De nombreux travaux [10-20] ont été menés pour prédire la durée de vie. La compréhension et la prédiction de la durabilité de ces matériaux par rapport à leur dégradation sont, d'une façon générale, moins avancées et assez disparates selon le mode de vieillissement [21, 22].

3.1 Polymères thermoplastiques :

Un polymère est un enchaînement de groupes organiques identiques appelés monomères. Un monomère est une suite d'atomes de carbone liés entre eux et avec d'autres éléments (H, N, Si, Cl...). On distingue les homopolymères, répétition d'une unique structure moléculaire et les copolymères, répétition de plusieurs structures différentes. Ils sont classés en deux catégories : les thermoplastiques et les thermodurcissables. Les propriétés thermodynamiques, thermomécaniques et rhéologiques des thermoplastiques varient fortement avec la température. On en distingue deux grandes familles : les amorphes et les semi cristallins. La différence entre ces deux types de matériaux est que le premier possède une transition du second ordre appelée transition vitreuse, à la température T_g , et que le second a une température de transition visqueuse plus une température de fusion T_f .

3.1.1 Les amorphes :

Comme dans un liquide, la configuration des chaînes de macromolécule dans un solide amorphe est compacte et désordonnée. Un solide amorphe s'apparente à un liquide à très faible mobilité moléculaire. Il n'existe pas pour un amorphe de transition du premier ordre entre l'état solide et l'état liquide. On observe une variation importante de certaines propriétés à la solidification. La transition du second ordre alors observée se produit à une température de transition vitreuse. Elle correspond à une brusque variation de la mobilité moléculaire. Au-dessous de la température T_g , un matériau amorphe se comporte comme un solide.

3.1.2 Les semi cristallins :

Dans un cristal, on observe un ordre à grande distance. Les chaînes s'arrangent de façon ordonnée et compacte : la maille cristalline est le motif élémentaire qui se répète dans les trois directions de l'espace. Les polymères ne cristallisent jamais totalement. En effet, les deux

extrémités de chaînes, les défauts, les boucles, la participation d'une macromolécule à deux lamelles sont autant de cause de cristallinité imparfaite. On parle alors de semi cristallins. On utilise la notion de taux de cristallinité χ_c , fraction massique ou molaire d'unités structurales cristallisées par rapport à la totalité des unités présentes qui peut se calculer par méthode volumétrique ou par méthode calorimétrique. L'autre phase présente est une phase amorphe. Les thermoplastiques semi cristallins sont utilisés à une température située entre la température de transition vitreuse de la phase amorphe et la température de fusion de la phase cristalline.

3.2 Propriétés :

3.2.1 *Volume spécifique :*

Le volume spécifique des polymères est plus élevé que celui des métaux parce qu'ils sont constitués d'atomes légers et adoptent des structures d'empilement non compactes. Les polymères amorphes ont un coefficient de dilatation thermique qui augmente lors de la transition vitreuse. Pour les semi cristallins, elle dépend de la transition vitreuse mais aussi de la cristallinité. La fusion de la phase cristalline provoque une dilatation isotherme qui vient s'ajouter à celle de la phase amorphe. Leur compressibilité est de l'ordre de 10^{-1} bar^{-1} . La chaleur spécifique des amorphes augmente lors de la transition vitreuse. Pour un semi cristallin, la calorimétrie montre une enthalpie de fusion.

3.2.2 *Conductivité thermique :*

La conductivité thermique des polymères est faible, de l'ordre de $0,1 \text{ W/m.K}$. Le transport de la chaleur est assuré uniquement par les phonons dans une structure relativement désorganisée, l'énergie de cohésion n'étant pas suffisamment forte. Pour un amorphe, le maximum de conductivité se situe à la température de transition vitreuse. Pour un semi cristallin, on observe une conductivité plus forte de la phase cristalline.

3.2.3 *Module d'élasticité :*

La rigidité d'un polymère a été définie d'après les observations de Thomas Young. Celui-ci avait remarqué que, pour une petite déformation, le rapport entre la contrainte de traction appliquée à un matériau et la déformation qui en résulte est constant, tant que la limite d'élasticité du matériau n'est pas atteinte. Cette constante, nommée module d'Young ou module d'élasticité longitudinal, se calcule via la loi de Hooke :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (21)$$

Où σ est la contrainte, E le module d'Young et ε la déformation. Le module d'Young est la valeur théorique de la contrainte mécanique (Pa) qui entrainerait un allongement de 100% de la longueur initiale d'un matériau.

On dit d'un matériau dont le module d'Young est très élevé (>105 Pa) qu'il est rigide. Le module d'Young des polymères est faible : environ un centième de celui du métal. Il est de plus sensible à la température.

3.2.4 Rhéologie :

La viscosité d'un fluide traduit l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement, ce qui se résume comme suit :

$$\mu(\dot{\gamma}) = \frac{\tau(\dot{\gamma})}{\dot{\gamma}} \quad (22)$$

Où μ est la viscosité dynamique en Pa.s, τ est la contrainte de cisaillement en Pa et $\dot{\gamma}$ le taux de cisaillement en s^{-1} .

La viscosité est habituellement notée η par les rhéologues alors que la notation usuelle des mécaniciens des fluides est μ . Nous utiliserons par la suite la notation des rhéologues pour définir la viscosité. Pour un fluide newtonien, la viscosité est une fonction constante, indépendante du taux de cisaillement. Mais la viscosité des polymères fondus est généralement non newtonienne. La **figure 16** montre l'évolution de la viscosité en fonction du taux de cisaillement. On y observe un plateau newtonien pour les faibles vitesses de cisaillement et un comportement pseudoplastique assimilable à une loi puissance pour les taux de cisaillement élevés. La viscosité est aussi thermo et piezodépendante (non montrée sur la **figure 16**). Néanmoins, ce modèle ne permet pas d'expliquer tous les phénomènes observés comme le gonflement en sortie de filière. On parle alors de comportement viscoélastique. Ce comportement est usuellement formalisé selon l'analogie entre le comportement des milieux viscoélastiques et celui de systèmes composés de ressorts et d'amortisseurs [23-25]. D'autres formalismes sont également disponibles [26-28].

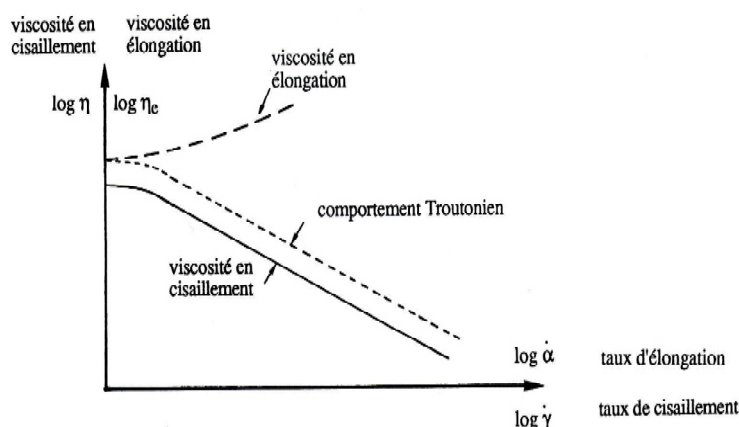
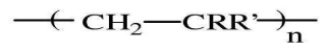


Figure 16 : Viscosité en fonction du taux de cisaillement pour un thermoplastique

3.3 Le polyéthylène :

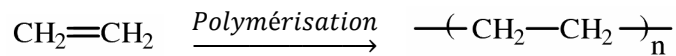
3.3.1 Synthèse du PE :

Le polyéthylène (PE) est un polymère appartenant à la famille des polyoléfines dont la formule générique est donnée ci-dessous :



Où R et R' sont soit des atomes d'hydrogène (cas du PE), soit des groupements alkyles.

Le polyéthylène est obtenu par polymérisation des monomères d'éthylène :



Il existe différents modes de polymérisation : le procédé "haute pression" et les procédés "basses pressions".

Les conditions de synthèse du polyéthylène influent énormément sur la structure du produit final. Le procédé dit "haute pression" est historiquement le plus ancien. Il a été découvert accidentellement par Eric Fawett et Reginald Gibson en 1933, en appliquant une pression très élevée (plusieurs centaines de bars) sur un mélange d'éthylène et de benzaldéhyde à haute température. La réaction s'était alors amorcée grâce à des traces d'oxygène présent dans le réacteur. Difficile à reproduire, ce n'est pas avant 1935 que Michel Perrin transforma cet accident en un procédé reproductible et industrialisable. La première production industrielle a lieu en 1939. En raison des nombreuses réactions de transfert, les chaînes de polymère présentent beaucoup de ramifications (**Figure 17**).



Figure 17 : Schéma d'une chaîne ramifiée de PEBD

Ces ramifications gênent l'arrangement macromoléculaire, ce qui empêche le polyéthylène de cristalliser facilement. On le nomme Polyéthylène Basse Densité (PEBD) ou Low Density Polyethylene (LDPE). Il est défini par une densité comprise entre 0,91 et 0,94 g/cm³.

Les procédés dits "basses pressions" sont apparus dans les années 50, peu de temps après des avancées majeures dans le domaine des catalyseurs. Ils permettent la polymérisation du polyéthylène à des faibles pressions (< 50 bars). On distingue en particulier :

- la catalyse Phillips : découverte en 1951 par J. Paul Hogan et Robert L. Banks de la société Phillips, elle utilise des oxydes de chrome et d'aluminium en tant que catalyseurs. Le principal inconvénient de ce procédé est de ne pas pouvoir polymériser d'autres monomères que l'éthylène,
- la catalyse Ziegler : développée en 1953 par le chimiste allemand Karl Ziegler, elle repose sur l'utilisation d'un système catalytique composé d'halogénures de titane, appartenant à la famille des catalyseurs dits Ziegler-Natta. Ce procédé permet de travailler à des pressions encore plus faibles que pour le procédé Phillips.

Ces procédés permettent d'obtenir des chaînes macromoléculaires linéaires qui peuvent cristalliser facilement (**figure 18**). Ce type de polyéthylène est appelé Polyéthylène Haute

Densité (PEHD) ou High Density Polyethylene (HDPE). Il est défini par une densité supérieure à $0,941 \text{ g/cm}^3$.

Figure 18 : Schéma d'une chaîne linéaire de PEHD

Par ailleurs, le taux de cristallinité du polyéthylène est intimement lié à sa densité : un PE sera d'autant plus dense qu'il est cristallin. Le taux cristallinité est de l'ordre de 60 % pour un PEHD, alors qu'il n'est que de 40 % pour un PEBD. Cette structure confère au PEHD de bonnes propriétés mécaniques élastiques dues à des modules très élevés (module d'Young E ou de cisaillement G par exemple), c'est pourquoi il est principalement utilisé pour la fabrication de produits rigides (tubes, flacons par exemple). Le PEBD quant à lui, a des applications plus restreintes, comme des produits souples (films, sachets...).

3.3.2 Structure et morphologie du polyéthylène :

La structure du polyéthylène peut être décrite à différentes échelles, partant de la macromolécule pour arriver à l'échantillon macroscopique. Cinq échelles se distinguent, la structure moléculaire, directement issue des réactions de synthèse du polymère, la structure conformationnelle ou l'arrangement spatial de la chaîne macromoléculaire, l'échelle des phases amorphe et cristalline, l'organisation entre elles sous forme de sphérolite constitue l'échelle microscopique, et enfin la dernière échelle représente l'échantillon macroscopique.

i. Structure moléculaire (échelle I) : Une macromolécule est constituée d'une chaîne principale appelée squelette sur laquelle des atomes de nature chimique différente ou des molécules peuvent se substituer de façon plus ou moins régulière, à certains atomes appartenant au monomère constitutif d'origine. Dans le cas où les groupes d'atomes disposés latéralement sur le squelette ont une structure chimique identique à celle de la chaîne principale, on parle de ramifications ou de branches. La présence de ces substituants peut avoir deux effets, soit ils rendent la chaîne principale et l'ensemble des macromolécules plus mobiles et flexibles, soit au contraire ils tendent à rigidifier l'édifice macromoléculaire. La macromolécule du polyéthylène est obtenue par la répétition de l'unité constitutive de masse molaire M_0 . Le nombre de répétition n de cette unité est appelé degré de polymérisation (DP). Il est donc possible de calculer la masse molaire de la macromolécule selon l'expression $M = n \cdot M_0$. Au sein de cette macromolécule, l'association des atomes entre eux est réalisée par les forces chimiques de cohésion que sont les liaisons covalentes. Dans le cas où le degré de polymérisation DP est très faible, il est facile d'obtenir un matériau où toutes les macromolécules ont la même masse. Ceci n'est plus vrai dans le cas d'un polymère réel, où la masse des chaînes est distribuée. Les polymères réels sont plus ou moins polydispersés, ce qui

conduit à l'utilisation de la masse molaire moyenne en nombre \overline{M}_n et la masse molaire moyenne en poids \overline{M}_w [29]. Soit N_i le nombre de molécules de masse individuelle M_i , on définit alors n_i et w_i comme des fonctions de distribution normalisées telles que :

$$n_i = \frac{N_i}{\sum_i N_i} \text{ et } w_i = \frac{N_i \cdot M_i}{\sum_i N_i \cdot M_i} \quad (23)$$

A partir de ces fonctions de distribution, on peut calculer la masse molaire moyenne en nombre et la masse moyenne en poids qui sont respectivement :

$$\overline{M}_n = \sum_i n_i \cdot M_i = \frac{\sum_i N_i \cdot M_i}{\sum_i N_i} \quad (24)$$

$$\overline{M}_w = \sum_i w_i \cdot M_i = \frac{\sum_i N_i \cdot M_i^2}{\sum_i N_i \cdot M_i} \quad (25)$$

A partir de ces valeurs moyennes, on peut déterminer le coefficient de distribution des masses molaires, ou indice de polymolécularité correspondant au rapport $\frac{\overline{M}_w}{\overline{M}_n}$ caractéristique de l'homogénéité des masses molaires. La masse molaire des chaînes macromoléculaires constitue un paramètre très important conditionnant les propriétés d'un matériau polymère.

ii. Structure conformationnelle (échelle II) : La chaîne macromoléculaire est caractérisée par une conformation locale qui correspond à l'orientation relative des segments et des groupes latéraux des chaînes. La conformation locale dépend de la structure covalente locale et des interactions entre atomes et groupements d'atomes. Elle résulte des possibilités de rotation autour des liaisons covalentes en fonction de l'encombrement stérique des différents groupements fixés sur la chaîne. L'autre caractéristique des chaînes macromoléculaires est la conformation globale à l'échelle de la chaîne (**Figure 19**).

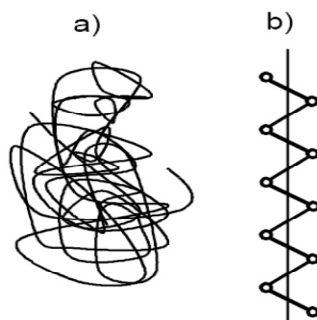


Figure 19 : Conformations globales de la chaîne macromoléculaire du polyéthylène
a) Pelote statistique; b) Zigzag plan.

Elle définit la position relative des atomes de carbone constituant l'ossature de la chaîne. Dans le cas du PE, la chaîne macromoléculaire peut adopter deux conformations globales : en pelote statistique ou en zigzag plan (**Figure 20**). L'arrangement de la chaîne macromoléculaire sous forme de pelote statistique concerne la phase amorphe du polymère, lui prodiguant la même conformation à l'état solide et à l'état fondu.

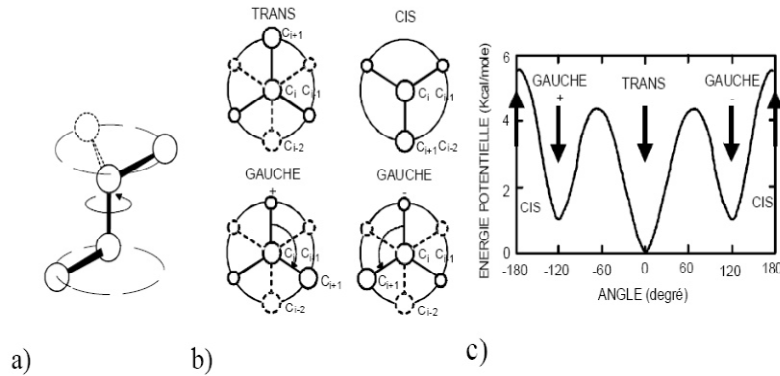


Figure 20 : Conformations locales du polyéthylène : a) Rotation d'une liaison covalente ; b) Convention d'angle de Newmann ; c) Potentiel d'interaction [30].

Les enchevêtrements joueront un rôle important dans le comportement mécanique du polymère en lui donnant des propriétés viscoélastiques [30, 31]. La structure conformationnelle de type zigzag plan implique la phase cristalline du polyéthylène.

iii. Structure des états amorphe et cristallin (échelle III) : La structure cristalline du polyéthylène est constituée par l'assemblage périodique de chaînes ayant une conformation régulière, liées entre elles par des liaisons faibles de Van Der Waals. La configuration la plus stable et la plus couramment rencontrée est la maille orthorhombique (**Figure 21**), dont les paramètres déterminés par Bunn en 1939 [32] sont : $a = 0,740$ nm, $b = 0,493$ nm, $c = 0,253$ nm, l'axe c correspondant à l'orientation des chaînes macromoléculaires. La phase amorphe, quant à elle est caractérisée par l'absence d'ordre à grande distance, c'est-à-dire, l'ordre des macromolécules par rapport à leurs proches voisins, à la différence d'un ordre à courte distance, qui décrit les états d'ordre qui ne se rapportent qu'aux premiers voisins. L'agitation thermique entraîne l'apparition et la disparition continue de ces ordres.

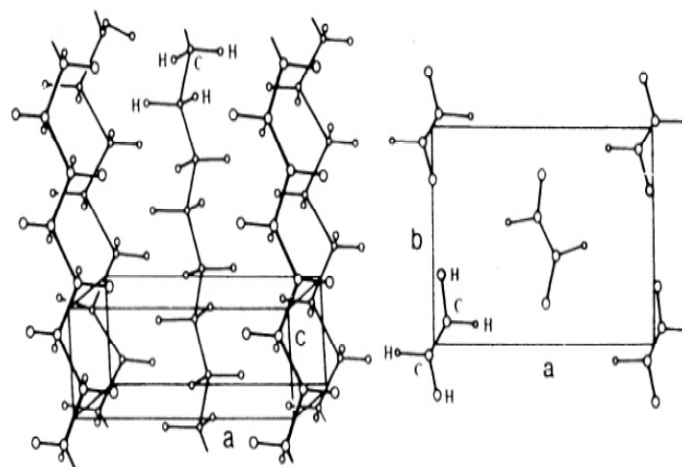


Figure 21 : Maille cristalline du polyéthylène.

A l'état amorphe, les macromolécules linéaires sont imbriquées de façon complexe et leur comportement dépend largement de la température. A haute température, elles adoptent une conformation en pelote statistique. Si l'on refroidit le polymère, l'état structural va se figer,

c'est la transition vitreuse (T_g). Structuellement, cette zone amorphe est constituée de différents types d'organisation au niveau de ses chaînes : elle contient des boucles de chaînes repliées repénétrant dans les cristallites, des chaînes traversant plusieurs cristallites, des extrémités de chaînes et même des chaînes indépendantes [32]. De plus la phase amorphe est caractérisée par une entropie et une enthalpie plus élevées que la phase cristalline. Une troisième phase, appelée interphase faisant l'intermédiaire entre la phase cristalline et la phase amorphe a pu être mise en évidence par spectroscopie Raman [33, 34]. Celle-ci est partiellement ordonnée et constituée de segments de chaîne en conformation trans. La stabilité du polymère est assurée par les liaisons inter macromoléculaires de type Van der Waals entre les différents segments de chaîne. Celles-ci sont d'énergie beaucoup plus faible que les liaisons intra moléculaires de type covalente que l'on trouve entre les atomes constituant la chaîne. Elles sont résumées dans le **tableau 1.9** :

Tableau 1.9 : Caractéristiques des différents segments de chaîne polymères

Type de liaison	Covalente		Van Der Walls		
	C – C	C – H	C...C	C...H	H...H
Energie (KJ/Mol)	19,8	23,7	0,1 – 0,5	0,7 – 1,2	0,1 – 0,5
Distance (nm)	0,154	0,109	0,34 – 0,85	0,29 – 0,7	0,23 – 0,6

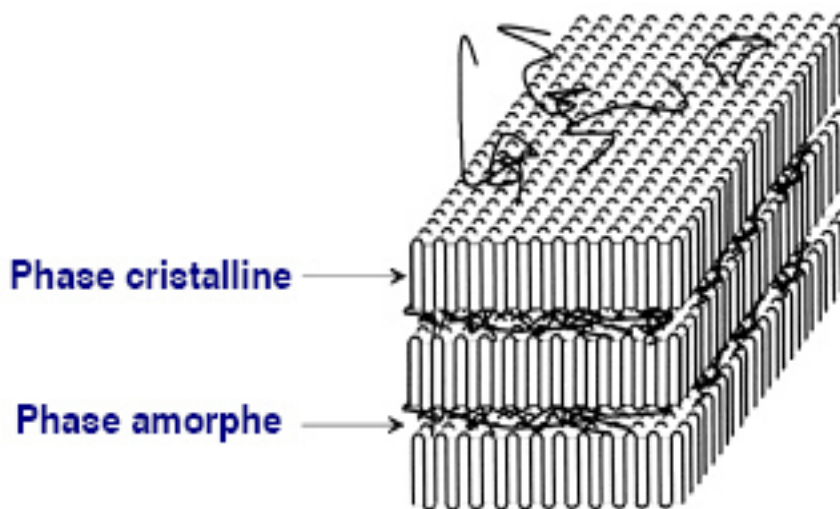


Figure 22 : Morphologie semi cristalline du polyéthylène.

L'arrangement de ces phases constituant l'échelle IV se fait par une alternance de lamelles cristallines et de zones amorphes (**Figure 22**), les lamelles cristallines étant connectées à la phase amorphe par des fragments de molécules appelées molécules de liaisons [29].

iv. Arrangement des cristaux et de la phase amorphe (échelle IV) : Dans les polymères cristallisés à partir de l'état fondu comme le polyéthylène, les lamelles cristallines ainsi que la phase amorphe s'organisent en arrangements semi-cristallins dont la taille peut varier d'un micromètre à plusieurs millimètres. Les plus communément rencontrés sont les sphérolites (**Figure 23**).

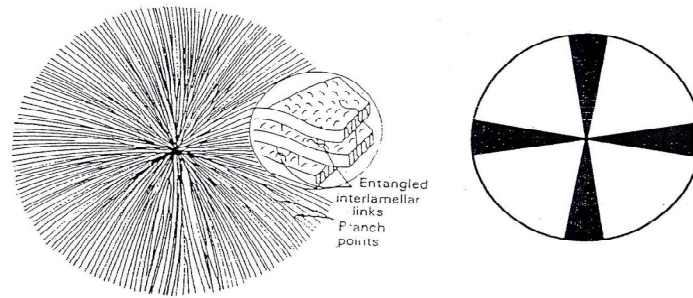


Figure 23 : Représentation schématique des sphérolites et des lamelles le constituant.

Un sphérolite est un arrangement polycristallin, constitué de lamelles cristallines radiales séparées par la phase amorphe. Ils croissent à partir de leur centre avec une symétrie sphérique jusqu'à entrer en contact entre eux de façon à occuper tout l'espace disponible. La direction radiale correspondant à la direction de croissance représente une direction cristallographique. Pour le polyéthylène, cette direction correspond à l'axe b de la maille orthorhombique. Les propriétés optiques des sphérolites permettent d'en faire une observation optique entre polariseurs croisés présentant une extinction en croix de Malte (**Figure 24**).



Figure 24 : Sphérolites du PE observés en microscopie optique en lumière polarisée.

Une autre méthode d'observation consiste à réaliser une attaque acide visant à dissoudre la phase amorphe, la visualisation est faite à l'aide d'un microscope à force atomique [35].

3.3.3 Propriétés physiques :

De nombreuses propriétés physiques des polymères ont été étudiées durant les dernières décennies, telles que la fusion, la cristallinité, les propriétés diélectriques etc.... Dans le cadre de cette étude, nous allons uniquement nous focaliser sur les propriétés de cristallinité et des processus de relaxation, qui nous serviront dans la suite de l'étude pour suivre les différents phénomènes intervenant au cours des vieillissements photochimique.

i. Cristallinité et fusion : La densitométrie permet d'obtenir le taux de cristallinité à partir de la détermination expérimentale de la masse volumique ρ du matériau et en considérant les masses volumiques de la phase amorphe (ρ_a) et cristalline (ρ_c). Les taux de cristallinité en masse χ_{cm} et en volume χ_{cv} sont donnés par les relations :

$$\chi_{cm} = \chi_{cv} \cdot \frac{\rho_c}{\rho} \quad (26)$$

$$\chi_{cv} = \frac{\rho - \rho_a}{\rho_c - \rho_a} \quad (27)$$

Une deuxième méthode de mesure de la cristallinité utilise la diffraction des rayons X aux faibles angles. En effet à partir d'un diffractogramme, il est possible de déconvoluer un halo amorphe et les pics cristallins. Le taux de cristallinité en masse est alors déterminé à partir de l'aire totale des pics cristallins C divisée par l'aire totale de tous les éléments diffractant cristallins et amorphes C + A [36] :

$$\chi_{cm} = \frac{C}{C + A} \quad (28)$$

Nous pouvons également avoir accès au taux de cristallinité par Analyse Enthalpique Différentielle (AED). En effet la mesure de l'enthalpie de fusion ΔH_f du matériau permet de déterminer χ_{cm} à partir de l'expression [37, 38] :

$$\chi_{cm} = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^\circ} \quad (29)$$

Où ΔH_f° : l'enthalpie de fusion du polyéthylène totalement cristallin qui vaut 285 J/g [39].

Différentes valeurs de ΔH_f° sont proposées dans la littérature allant de 285 à 293 J/g [29, 38, 40, 41]. De plus, La température de fusion dépend directement de la taille des lamelles cristallines, ainsi du fait que le matériau possède une distribution de taille de lamelles, le processus de fusion se produit dans une plage de température dépendant de cette distribution. Il est alors possible de définir une température moyenne de fusion T_f qui est la température où le maximum d'énergie est absorbé par cette étape.

ii. Processus de relaxation : Dans le PE, il est généralement observé trois processus de relaxation : γ , β et α par ordre de température croissante. Ils sont observables par spectroscopie mécanique ou diélectrique. La relaxation γ qui a lieu vers $T_\gamma = -120^\circ\text{C}$ caractérise des mouvements moléculaires dans la phase amorphe. C'est la relaxation principale associée à la transition vitreuse. Plus le taux de cristallinité est élevé, moins le pic est intense et plus T_γ est importante. Cette température de transition vitreuse varie inversement avec la masse moléculaire en nombre. En outre, le nombre et la disposition des ramifications dans une macromolécule influent sur la transition vitreuse. En général, plus les films polymères sont petits et symétriques, plus la température de transition vitreuse est faible. L'énergie d'activation de cette transition est comprise entre 50 et 100 kJ/mol.

La deuxième relaxation a lieu aux alentours de $T_\beta = -20^\circ\text{C}$. L'origine de cette transition est plus complexe, trois processus semblent y participer [42] :

- Mouvements de segments de chaînes de la phase amorphe,
- Mouvements de molécules en région interfaciale phase amorphe/phase cristalline,
- Des mouvements de boucles de repliement « libres » dans les lamelles cristallines.

L'énergie d'activation de cette transition est comprise entre 120 et 400 kJ/mol.

La relaxation α se produit entre $T_{\alpha}=50^{\circ}\text{C}$ et 100°C et s'explique par des mécanismes intralamellaires. Ils se caractérisent par des mouvements coopératifs impliquant toute la longueur des chaînes cristallines se traduisant par un glissement des chaînes par cisaillement. Plus le taux de cristallinité et l'épaisseur des lamelles augmentent, plus la transition α est marquée et plus T_{α} est élevée. L'énergie d'activation de ce processus est comprise entre 100 et 400 kJ/mol. Cette relaxation α se caractérise dans certains cas par l'apparition d'un second pic noté α' . Plusieurs hypothèses sont émises pour expliquer ce phénomène. Ce second pic pourrait provenir d'une cristallinité hétérogène au sein du matériau, une hypothèse consiste à dire que le pic α' provient de phénomènes de glissement à la surface des lamelles conduisant à une flexion de celles-ci. Une dernière approche suppose que α provient d'un glissement inhomogène des lamelles et que α' résulte d'un glissement homogène des lamelles [30].

iii. Dilatation : Sous l'effet d'une variation de température, le PE aura tendance à se dilater ou se rétracter. La variation de température entraînera une variation de longueur ΔL de l'échantillon calculée par la formule suivante :

$$\Delta L = L \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (30)$$

L : Longueur considérée, ΔL : Variation de longueur, ΔT : Variation de température, et α : Coefficient de dilatation.

En fonction de la température, le coefficient de dilatation évolue. En règle générale, pour un calcul approché, une valeur de $2 \cdot 10^{-4}$ convient.

iv. Tenue à l'UV : Une exposition aux UV trop longue peut entraîner une décoloration et une diminution sensibles des qualités intrinsèques du matériau. Le PE noir comporte du noir de carbone qui lui permet d'augmenter de manière considérable cette tenue aux UV. Ainsi, le PE noir a une remarquable stabilité au vieillissement.

v. Tenue au gel : Le PE apporte une sécurité sans égal, vis à vis des risques de gel. Il a :

- La grande souplesse du film en PE lui permet de bien résister au gel,
- Le PE se prête à la déformation due au gel puis reprend sa forme initiale au dégel,
- Le PE peut supporter des températures pouvant aller jusqu'à -40°C ,
- Le PE apporte une résistance thermique très importante,
- Le gel n'alterne pas la tenue de l'échantillon et sa souplesse lui permet de se prêter aux déformations dues à l'augmentation du volume lorsque le fluide gèle.

3.3.4 Propriétés chimiques :

i. Résistance chimique : Le PE a une bonne tenue chimique pour les cas les plus courants. Il résiste aux sels, aux acides et aux alcalis en solution aqueuse diluée. De nombreux solvants peuvent être acceptés jusqu'à 50°C . La résistance chimique des films en PE dépend de plusieurs paramètres comme le milieu, la concentration, la température, la charge. Le PE

possède l'une des meilleures tenues chimiques de l'ensemble des matières synthétiques. Il présente l'avantage d'avoir une bonne tenue au H₂S et résiste généralement très bien, dans des gammes importantes de concentration et de température, aux acides et aux eaux usées. Il résiste à des fluides ayant des valeurs de PH pouvant aller de 1,15 à 14.

- ii. Perméation : La Perméation aux produits pétroliers est pour le PE très faible. La Perméation est un phénomène qui est fonction, entre autre des matériaux, de l'épaisseur, de la température. Le PE de dernière génération présente de très bonnes résistances à la Perméation.
- iii. Corrosion : Le PE présente l'avantage d'être totalement inerte chimiquement pour les plages de températures conventionnelles. Ainsi, son utilisation garantit une pérennité maximale à la conduite et à son dimensionnement. En effet, il ne se concorde pas, ne se pique pas et ne rouille pas. Son épaisseur ne peut être modifiée ni par une corrosion électrique, ni par une corrosion chimique (insensibilité totale). Cette insensibilité à l'environnement évite d'onéreuses études de sol, tout en garantissant que les changements de propriétés environnementaux n'auront aucune incidence sur la tenue de la conduite.

IV. Vieillessement des polymères semi-cristallins :

Le vieillissement des thermoplastiques se manifeste par une dégradation souvent irréversible de leurs propriétés physiques, chimiques ou mécaniques. Ce phénomène de dégradation entraîne la notion de « durée de vie » du matériau, où le temps nécessaire pour qu'une propriété atteigne un seuil critique en dessous duquel le matériau n'a plus les propriétés attendues. Les différents mécanismes responsables de la dégradation des polymères peuvent être classés dans deux grandes catégories : les vieillissements physiques et chimiques.

4.1 Vieillessement physique :

On appelle vieillissement physique tout phénomène de vieillissement n'impliquant pas une altération chimique des macromolécules ou des additifs. On distingue :

- Les vieillissements physiques avec transfert de masse dans lesquels de la matière est adsorbée ou désorbée par le matériau (pénétration de solvants, migration d'adjuvant,...).
- Les vieillissements physiques sans transfert de masse, où il n'y a pas d'échange de ce type, concerne les vieillissements sous contrainte mécanique et les phénomènes de relaxation.

4.2 Vieillessement chimique :

Le vieillissement chimique concerne quant à lui tous les phénomènes conduisant à une modification chimique du matériau. Dans la pratique, il s'agit le plus souvent d'un vieillissement entraîné par l'attaque d'un réactif chimique. On rencontre donc différents modes de dégradation, tels que thermochimique, radiochimique, hydrolytique ou

photochimique. Dans le cadre de cette étude, c'est le vieillissement photochimique qui nous intéresse. Donc, on va s'intéresser au processus de la photo-oxydation.

i. Principe fondamental : L'acte primaire de tout processus de photodégradation est l'absorption d'une énergie lumineuse dans l'UV ou dans le visible. Cette absorption est due à la présence de chromophores dans le matériau (impuretés, défauts, produits d'oxydation etc.) [43]. La molécule est portée en un temps très court dans un état excité, l'énergie potentielle de cet état excité peut atteindre une valeur très élevée de l'ordre de 400 kJ/mol (une élévation de température permet seulement d'atteindre une énergie potentielle inférieure à 100 kJ/mol). Ainsi la photo-oxydation autorise certains processus inexistant en thermo-oxydation [44]. La seule condition pour l'initiation du processus de photo-oxydation est que la radiation puisse promouvoir la molécule à l'état excité suivant la loi de Planck :

$$\Delta E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (31)$$

Avec E l'énergie, h la constante de Planck, ν la fréquence, c la vitesse de la lumière et λ la longueur d'onde.

Il faut donc que la longueur d'onde du photon incident soit telle que :

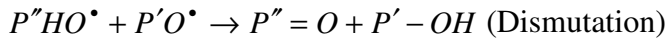
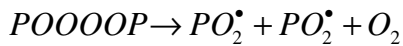
$$\lambda < \frac{h \cdot c}{\Delta E} \quad (32)$$

Dans certain cas, l'énergie de l'état excité peut être transférée de l'espèce absorbante à une autre espèce non absorbante. Si D est la molécule donneuse et A la molécule accepteuse, la réaction peut être écrite comme ceci : $D_0 + h \cdot \nu \rightarrow D^*$ et $D^* + A_0 \rightarrow D_0 + A^*$. Une molécule absorbante peut transférer l'énergie à une molécule non absorbante et lui donner la possibilité de réagir à partir de son état excité, ce qui lui aurait été impossible si elle était isolée.

Par définition, le vieillissement par photo-oxydation se développe sous l'action conjointe des ultraviolets et de l'oxygène, ce qui en fait une des principales causes du vieillissement des polymères. Il appartient à la classe des vieillissements chimiques associés aux phénomènes d'oxydation. Contrairement au vieillissement physique, il entraîne des modifications chimiques des chaînes macromoléculaires, de façon préférentielle en surface des échantillons. L'épaisseur dégradée étant fonction décroissante de la capacité d'absorption du matériau, le facteur limitant de ce processus est donc la capacité de l'oxygène à diffuser dans le matériau [45, 46]. Pour décrire les réactions mises en jeu lors de la photo-oxydation, il est possible de se baser sur un schéma composé essentiellement de trois étapes :

- Amorçage : polymère ou impureté $\rightarrow P^*$
- Propagation : $P^* + O_2 \rightarrow PO_2^*$
 $PO_2^* + PH \rightarrow PO_2H + P^*$
- Terminaison : $PO_2^* + PO_2^* \rightarrow$ Produits inactifs

Divers mécanismes de terminaison peuvent être envisagés :



La formation des hydroperoxydes (PO_2H), les peroxydes (PO_2P), les cétones, les aldéhydes ($P' = O$) ou les alcools (POH) est envisageable avec ce processus standard.

Les phénomènes de dégradation mis en jeu lors de la photodégradation sont communs à tous les autres vieillissements chimiques et regroupent principalement les mécanismes de rupture de chaîne et de réticulation [47].

ii. Mécanisme de coupures de chaîne : Il se traduit par une diminution de la masse moléculaire moyenne du polymère et peut être schématisé par la **Figure 25** :

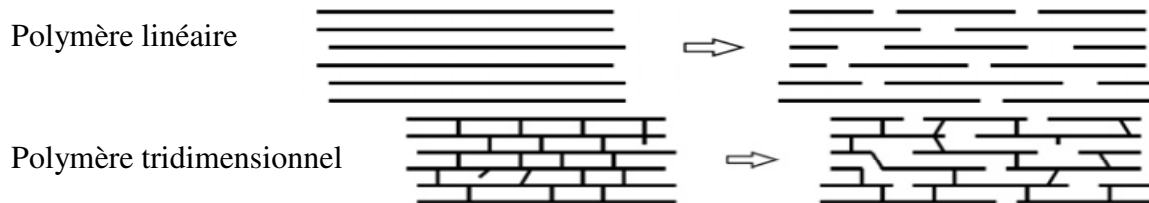


Figure 25 : Processus de coupures de chaînes macromoléculaires.

Différentes techniques d'analyses permettent de caractériser le processus de rupture de chaîne suivant le type de polymère. Dans le cas d'un linéaire tel que le polyéthylène, les méthodes classiques de GPC et de viscosimétrie donnent accès à la mesure de la masse moléculaire. Dans les polymères tridimensionnels, les mesures de la température de transition vitreuse T_g (qui diminue avec le temps), et du gonflement (qui augmente) sont utilisables.

iii. Réticulation : C'est le processus inverse de la coupure de chaîne, il se traduit par la formation de ponts entre les segments voisins de macromolécules (**Figure 26**).



Figure 26 : Représentation schématique des processus de réticulation dans un polymère.

Ce mécanisme de dégradation se traduit par une augmentation de la masse moléculaire moyenne à cause de l'association des différentes chaînes. Cependant ces deux mécanismes interviennent dans la plupart des cas simultanément, rendant ainsi l'étude de la photodégradation des polymères complexes [48-49].

4.3 Vieillissement du polyéthylène :

C'est un polymère très répandu dans les applications énergétiques en raison de son faible coût, de sa facilité de mise en œuvre, de ses propriétés barrières à l'eau, ou encore de sa

résistance à l'humidité et aux principaux agents chimiques. Cependant, en environnement extérieur, plusieurs facteurs tels que le lessivage par l'eau de pluie, les rayonnements ultraviolets (UV) et les variations saisonnières de température peuvent entraîner une dégradation chimique du polymère et, à terme, sa fragilisation [50]. La durabilité des polyéthylènes a retenu l'attention de nombreuses équipes de recherche et elle a donné lieu à la publication des dizaines d'ouvrages et des milliers d'articles. Malgré l'abondance de travaux relatifs à ce sujet, des zones d'ombre persistent sur les différents mécanismes de vieillissement et il n'existe pas encore de méthodologie générale de prédiction de la durée de vie dans ce domaine. Cette étude bibliographique vise à définir l'état de l'art relatif au comportement à long terme des films en polyéthylène utilisés sur les dispositifs à effet de serre. Nous aborderons les problèmes liés au vieillissement du polyéthylène tel qu'il est décrit dans la littérature. Après un bref rappel des différents agresseurs environnementaux pouvant induire des dégradations sur ce type de polymère, une description approfondie des mécanismes physiques et chimiques de perte des antioxydants, de thermo-oxydation et photo-oxydation du polymère PE, sera réalisée à l'échelle moléculaire. Nous poursuivrons cette partie en décrivant les conséquences de l'oxydation aux échelles macromoléculaire et morphologique.

4.3.1 Perte physique des antioxydants :

➤ Perte physique par extraction : Les principales études menées sur l'extraction des antioxydants visent à prédire la durabilité des conduites d'eau, des géomembranes ou des films minces d'emballage alimentaire en PE [51-56]. Mueller et Jakob [57] ont étudié la durabilité de géomembranes en PEhd immergées dans l'eau à 80°C pendant 6 ans en se basant sur des mesures du temps d'induction à l'oxydation (TIO). Leurs observations les ont amenés à définir deux régimes cinétiques distincts de perte des antioxydants (**Figure 27**) :

- Une diminution rapide du TIO, au cours des 200 premiers jours d'exposition, jusqu'à ce que le TIO atteigne 20% de sa valeur initiale,
- Puis une diminution plus faible pour des expositions prolongées ($t > 200$ jours).

Smith et al. [58], ont également décrit, à l'aide de la même méthode, l'évolution en deux étapes dans le cas de tuyaux en PEmd immergés dans l'eau entre 80°C et 105°C. Néanmoins, selon ces auteurs, la deuxième étape d'extraction débiterait plus tôt dès que le TIO atteint 30 à 50% de la valeur initiale. Des tendances similaires ont été décrites dans le cas de films et de plaques en polypropylène (PP), PE réticulé (PEX) ou PEmd, stabilisés à l'aide de différents antioxydants de type phénolique, immergés dans l'eau à différentes températures [59-61].

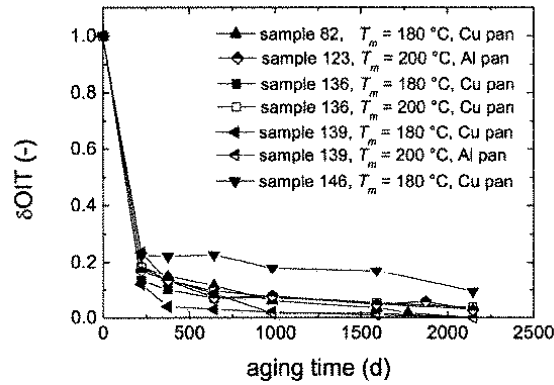


Figure 27 : Stabilité résiduelle d'une géomembrane en PEhd en fonction de son temps d'immersion dans l'eau à 80°C. [57]

D'autres auteurs se sont intéressés à l'influence de la température sur la vitesse d'extraction des antioxydants. Hsuan et Koerner [57] ont étudié la stabilité de géomembranes en PEhd immergées dans de l'eau entre 55°C et 85°C. Leurs observations révèlent une diminution du TIO au cours du temps (de 25% à 55°C et de 75% à 85°C au bout de 25 mois d'exposition) et une dépendance de la vitesse d'extraction avec la température. A partir des courbes cinétiques de TIO, ces auteurs ont déterminé les lois de variations de TIO et de la vitesse maximale d'extraction des antioxydants (S) avec le temps et la température d'exposition :

$$TIO = TIO_0 \cdot \exp(-S \cdot t) \quad (33)$$

$$S = S_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T}\right) \quad (34)$$

TIO_0 est le temps d'induction à l'oxydation initial (en min), S_0 un facteur pré-exponentiel (en min^{-1}) et E_a une énergie d'activation (en kJ/mol).

➤ Comparaison des phénomènes d'extraction et d'évaporation : Cette comparaison a donné lieu à de nombreuses publications. Lundbäck et al. [52] se sont intéressés à des plaques en PE réticulé stabilisées par un antioxydant phénolique de type Santonox R. Les résultats obtenus par suivi du TIO au cours du vieillissement dans l'air et dans l'eau entre 75°C et 95°C sont résumés sur la **figure 28**. Ces auteurs observent des diminutions importantes de TIO dans le cas des films immergés (de 46% à 92% après 1600h d'exposition) alors que les diminutions sont jugées négligeables dans l'air ou l'azote. Ainsi, selon Lundbäck et al. [52], les phénomènes d'évaporation seraient négligeables devant l'extraction. Par ailleurs, Smith et al. [58], ont étudié les pertes en antioxydants de tuyaux en polyéthylène de moyenne densité (PEmd), stabilisés à partir d'un mélange synergique conventionnel d'antioxydants (phénol et phosphite), dans l'air et l'eau entre 80°C et 105°C. En se basant sur les profils de TIO, ils ont observé, dans les deux cas, une diminution du TIO attribuée à une perte des antioxydants respectivement par évaporation et par extraction. Pour chaque température, ces auteurs ont déterminé des coefficients de diffusion, d'évaporation et d'extraction. La détermination de ces

paramètres a permis à Smith et al. [58] de pouvoir simuler numériquement les pertes par extraction et par évaporation et d'estimer qu'en cas d'une double exposition air/eau, à chaque température, l'extraction représenterait environ 75% des pertes totales en antioxydants alors que l'évaporation n'en représenterait seulement que 25%. Sangam et Rowe [62] ont observé, dans le cas de géomembranes en PEhd exposées dans l'air et l'eau entre 22°C et 85°C, une diminution du TIO avec le temps d'exposition. En se basant sur ces résultats, ces auteurs ont exprimé les vitesses (s) d'évaporation et d'extraction à l'aide d'une loi d'Arrhénius :

- Cas de l'évaporation : $\ln(s) = 15,901 - 6480/T$ (35)

- Cas de l'extraction : $\ln(s) = 16,054 - 6305/T$ (36)

En faisant le rapport des vitesses de ces deux processus, Sangam et Rowe [63] ont estimé que la perte physique des antioxydants serait 1,6 à 2,4 fois plus rapide dans l'eau que dans l'air.

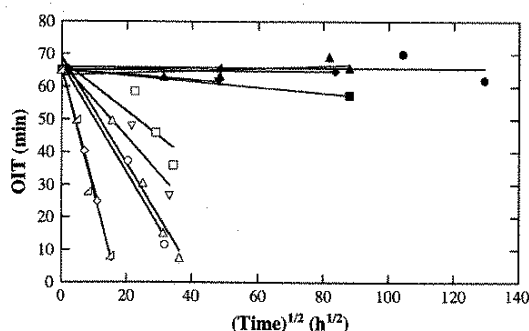


Figure 28 : Stabilité résiduelle de plaques PEX stabilisées par le Santonox R en fonction du temps d'exposition dans différents environnements [52].

Cette partie a mis en évidence deux processus de perte physique des antioxydants : l'évaporation et l'extraction. Les pertes engendrées par ces deux processus obéiraient, d'après l'ensemble des auteurs cités, à une loi d'Arrhénius. De plus, il semblerait que les pertes par extraction soient environ deux fois plus rapides que celles par évaporation à une même température. Selon une hypothèse avancée par Calvert et Billingham [64], la protection contre l'oxydation resterait active tant que les pertes ne dépassent pas 90% de la concentration initiale en antioxydants. Au-dessus de cette valeur critique, le polymère ne serait plus protégé contre les agressions chimiques de l'environnement extérieur. Comme décrit précédemment par Sangam et Rowe [62], la perte de la stabilisation peut s'expliquer par des phénomènes physiques (évaporation et extraction) mais aussi par des phénomènes chimiques. Afin de pouvoir décrire les principales réactions chimiques de stabilisation du polymère, il paraît indispensable de décrire au préalable les produits de dégradation apparaissant au cours de l'oxydation du PE. Dans la partie suivante, nous commencerons par donner une description des mécanismes de thermo- et photo-oxydation du PE pur avant de montrer comment les principaux stabilisants industriels essaient de retarder l'apparition de ces mécanismes.

4.3.2 Oxydation du polyéthylène :

En l'absence de système de stabilisation et sous l'action conjuguée des différentes contraintes environnementales, Mendès et al. [65] rapportent, dans le cas d'un vieillissement naturel d'un PEhd à Rio de Janeiro, plusieurs variations significatives de propriétés du PE à différentes échelles. A titre d'exemple, après 74 jours d'exposition, ils observent :

- Par spectroscopie IR, l'apparition d'un massif entre 1715 et 1740 cm^{-1} qu'ils attribuent aux carbonyles,
- Par GPC, une diminution de 50% de la masse molaire moyenne en poids,
- Par DSC, une augmentation de 6% du taux de cristallinité,
- Par tests de Charpy, une diminution de 50% de la résistance à l'impact,
- Par des essais de traction uniaxiale, une diminution de 90% de l'allongement à la rupture.

Mendès et al. [65] concluent qu'un PE non stabilisé est mécaniquement hors service après 03 mois d'exposition et que la fragilisation serait principalement le résultat de coupures de chaînes générées par les phénomènes de thermo- et photo-oxydation.

Ainsi, nous nous intéresserons aux variations de composition chimique du PE au cours de vieillissements accélérés thermique et photochimique, et du vieillissement naturel. Le premier schéma mécanistique développé pour expliquer la dégradation oxydative a été proposé en 1946 par Bolland and Gee [66-67]. D'après ces auteurs, le mécanisme de vieillissement thermique de l'éthyl linoléate à 25°C [68] se composerait des trois étapes suivantes :

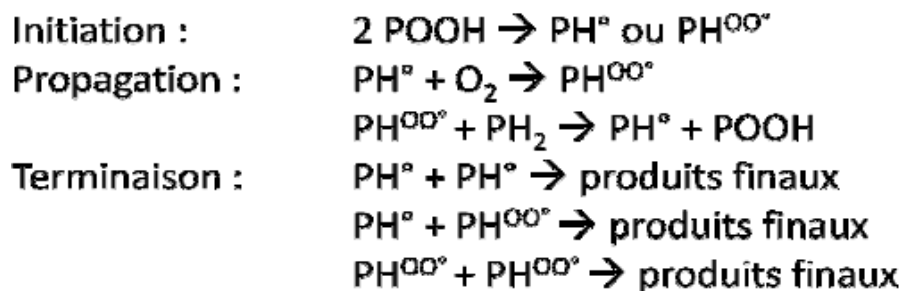


Figure 29 : Schéma de thermo-oxydation de l'éthyl linoléate d'après Bolland et Gee[68]

Où POOH = hydroperoxyde, PH^\bullet = radical alkyl, $\text{PH}^{\bullet\bullet}$ = radical peroxy, PH_2 = Site oxydable.

Bien que destiné à décrire, au départ, la dégradation oxydante du caoutchouc naturel, le mécanisme proposé par Bolland fut hydrocarburé saturé [69]. Faisant l'objet d'un large consensus schéma « standard » d'oxydation [70].

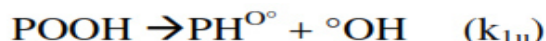
4.3.3 Vieillissement thermique :

i. Mécanisme de thermo-oxydation :

➤ Amorçage par thermolyse des hydroperoxydes : Dans le cas de la thermolyse, les hydroperoxydes sont les principaux amorceurs de l'oxydation [71-74] d'après Achimsky [70],

cet amorçage par thermolyse des hydroperoxydes s'expliquerait par la faible énergie de la liaison O-O ($E_d = 176 \text{ kJ.mol}^{-1}$, [75]) en comparaisant de celle de la liaison C-C (valeur moyenne $E_d = 340 \text{ kJ.mol}^{-1}$, [76]).

Dans l'optique d'identifier le mécanisme de thermo-oxydation, d'après différents auteurs [73][77-78] la connaissance du mode de décomposition de ces amorceurs apparaît primordiale. Deux modes de décomposition des hydroperoxydes sont possible [74] [77-78] : la décomposition unimoléculaire (k_{1u}) et bimoléculaire (k_{1b}).



Tüdös et al.[79] ont étudié la dégradation thermique de films minces de $30\mu\text{m}$ d'épaisseur à 160°C dans l'air. Par spectroscopie IR et chromatographie en phase gaz, ces auteurs ont pu suivre l'évolution de la composition chimique du PE et identifier les principaux produits volatils formés : éthylène, acétaldéhyde, acétone, butyraldéhyde et 2-butone. A partir de ces observations, Tüdös et al.[80] ont suggéré un mécanisme de thermo-oxydation du PE basé sur la décomposition des hydroperoxydes selon un mode unimoléculaire (**Figure 30**). D'autres auteurs suggèrent aussi une décomposition unimoléculaire des hydroperoxydes en phase liquide [80-82].

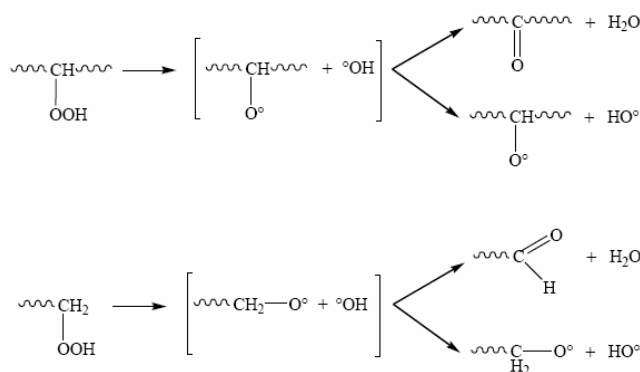


Figure 30 : Décomposition unimoléculaire des hydroperoxydes dans le PE. [79].

De leur côté, Iring et al.[74] ont étudié la stabilité d'hydroperoxydes modèles dans l'argon entre 100°C et 130°C . Par dosage iodométrique, ils ont pu mettre en évidence que la vitesse de décomposition diminue avec le temps d'exposition et que le logarithme des variations de la concentration en hydroperoxydes n'est pas linéaire avec le temps. De ces observations, ces auteurs concluent que la décomposition des hydroperoxydes dans le PE ne pourrait pas être décrite par un simple processus de décomposition unimoléculaire, comme indiqué par Tüdös et al. [79]. Il faudrait aussi prendre en compte la décomposition bimoléculaire. De plus, Achimsky rapporte que l'énergie d'activation et le facteur pré-exponentiel de la décomposition bimoléculaire des hydroperoxydes seraient plus faibles que ceux de la

décomposition unimoléculaire ($E_u - E_b \approx 60$ kJ/mol [83]). Ainsi, cet auteur prétend que la décomposition unimoléculaire prédominerait à haute température et, qu'en dessous d'une valeur critique T_c (qui resterait à déterminer), la décomposition bimoléculaire deviendrait à son tour prépondérante [70]. Colin et al. [83] ont tenté de déterminer la polymolécularité de

l'amorçage par analyse cinétique: $\delta\text{POOH} \rightarrow \alpha\text{PH}^\circ + \beta\text{PH}^{\text{OO}\cdot}$ (k_1)

Avec pour une décomposition unimoléculaire : $d = 1$, $\alpha = 2$, $\beta = 0$ et $k_1 = k_{1u}$ et pour une décomposition bimoléculaire : $d = 2$, $\alpha = 1$, $\beta = 1$, et $k_1 = k_{1b}$. Les vitesses des deux modes de décomposition des hydroperoxydes s'écrivent :

$$v_{1u} = k_{1u} [\text{POOH}] \rightarrow \text{cas unimoléculaire}$$

$$v_{1b} = k_{1b} [\text{POOH}]^2 \rightarrow \text{cas bimoléculaire}$$

En établissant une égalité entre ces deux expressions, ils ont défini une concentration critique en hydroperoxydes $[\text{POOH}]_c = k_{1u} / k_{1b}$ telle que :

- Si la concentration initiale en hydroperoxydes $[\text{POOH}]_0$ est inférieure à la valeur critique $[\text{POOH}]_c$, le mode unimoléculaire prédomine au début de l'exposition. Dès que leur concentration devient supérieure à cette valeur critique, la décomposition devient bimoléculaire,
- Si $[\text{POOH}]_0$ est supérieure à $[\text{POOH}]_c$, alors l'initiation est bimoléculaire pendant toute la durée de l'exposition.

Comme les constantes de vitesse obéissent à la loi d'Arrhenius, ils ont exprimé la concentration critique de la manière suivante : $[\text{POOH}]_c = A \cdot \exp\left(-\frac{E_u - E_b}{R \cdot T}\right)$ (37)

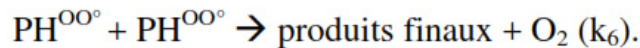
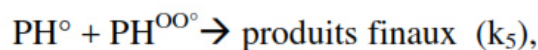
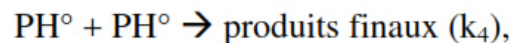
Où A est un facteur pré-exponentiel, et E_u et E_b sont les énergies d'activation respectives des constantes de vitesse k_{1u} et k_{1b} .

Connaissant la différence des énergies d'activation ($E_u - E_b = 60$ kJ/mol), d'après ces mêmes auteurs, la concentration critique en hydroperoxydes serait une fonction croissante de la température et la décomposition des hydroperoxydes à température ambiante se déroulerait donc préférentiellement selon le mécanisme bimoléculaire.

➤ L'étape de propagation : Selon de nombreux auteurs [73][68][84], l'étape de propagation se déroulerait en deux étapes ; d'une part la réaction d'addition de l'oxygène sur un radical alkyl, et d'autre part, l'arrachement d'un hydrogène labile par un radical peroxy entraînant la formation d'un nouveau radical alkyl et d'un hydroperoxyde. Kamiya et Niki [73] affirment que la constante de vitesse de la réaction entre l'oxygène et la plupart des radicaux alkyl (k_2) serait de l'ordre de 10^9 mol.l⁻¹.s⁻¹, soit approximativement du même ordre de grandeur que la constante de vitesse de réaction entre deux radicaux alkyl. La réaction

d'arrachement d'un hydrogène par un radical peroxy est considérée, par ces auteurs, comme étant la réaction limitante de l'auto-oxydation [73]. En comparant la vitesse de réaction k_3 , rapportée dans la littérature pour différents polymères, Kamiya et Niki [73] suggèrent que cette vitesse dépendrait principalement de la stabilité de l'hydrogène labile (k_3 hydrogène primaire < k_3 hydrogène secondaire < k_3 hydrogène tertiaire), de l'encombrement stérique, des effets de polarité et enfin du solvant (dans le cas d'une réaction d'oxydation en solution).

➤ L'étape de terminaison : Selon l'étude menée par Bolland sur la dégradation thermique des éthyl linoléates à 25°C [68], les réactions de terminaison seraient de trois types :



En excès d'oxygène, cas généralement suggéré par Gijsman et Sampers pour les polyéthylènes [85], les radicaux alkyls réagiraient de manière très rapide avec l'oxygène [73]. De ce fait, selon Achimsky, l'acte de terminaison entre deux radicaux peroxydes ne se composerait pas d'un seul acte élémentaire. L'ensemble des réactions de combinaisons possibles sont présentées sur la **figure 31**.

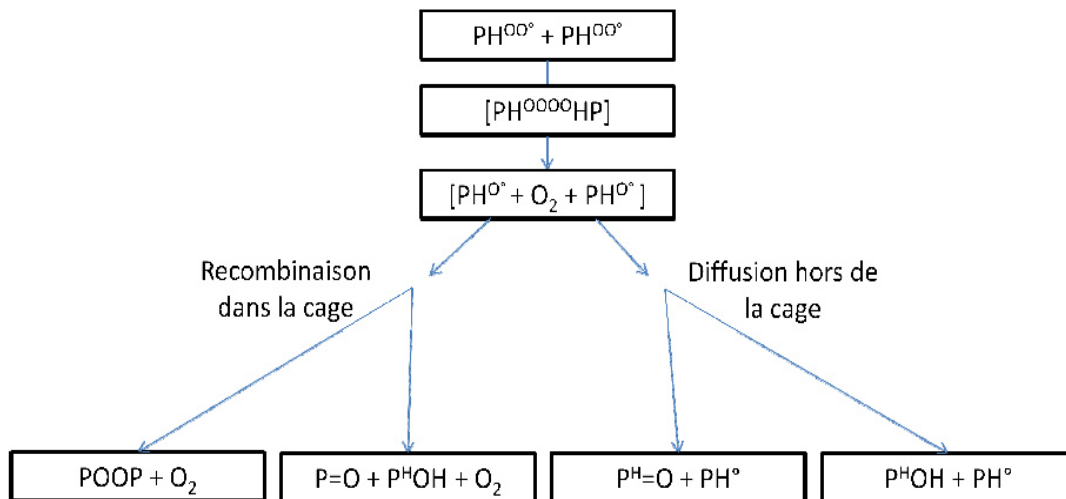


Figure 31 : Réactions possibles entre deux radicaux peroxydes [70].

Selon Benson [75], les peroxydes (POOP), formés par recombinaison dans la cage, ont une liaison de dissociation de faible énergie (de l'ordre de 156 kJ.mol⁻¹). De ce fait, ils seraient considérés comme moins stables que les hydroperoxydes dont l'énergie de liaison avoisine les 176 kJ.mol⁻¹ [75]. Achimsky [70] en déduit que les POOP pourraient ainsi être décomposé tout comme les hydroperoxydes et, de ce fait la création de nouveaux radicaux.

Dans sa forme la plus simple, en excès d'oxygène, le schéma standard se résume à 4 actes élémentaires [83] :

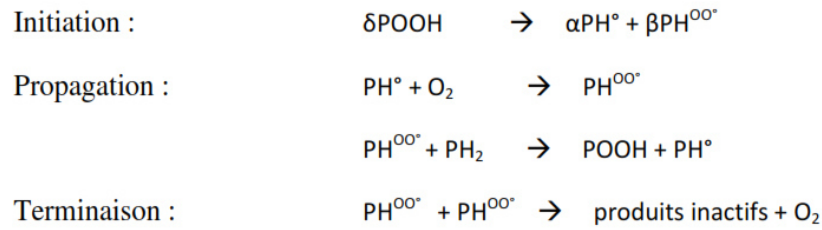


Figure 32 : Schéma mécanistique en boucle fermée de thermo-oxydation d'un polymère hydrocarboné saturé en excès d'oxygène [86].

D'après Colin et al.[83], entre 90°C et 200°C, la résolution du système d'équation suivant permettrait de simuler correctement les courbes cinétiques d'absorption d'oxygène.

$$\frac{d[PH^\circ]}{dt} = 2k_{1a}[POOH] + k_{1b}[POOH]^2 - k_2[O_2][PH^\circ] + k_3[PH][PH^{OO^\circ}]$$

$$\frac{d[PH^{OO^\circ}]}{dt} = k_{1b}[POOH]^2 + k_2[O_2][PH^\circ] - k_3[PH_2][PH^{OO^\circ}] - 2k_6[PH^{OO^\circ}]^2$$

$$\frac{d[POOH]}{dt} = -k_{1a}[POOH] - 2k_{1b}[POOH]^2 + k_3[PH_2][PH^{OO^\circ}]$$

$$\frac{d[O_2]}{dt} = k_2[O_2][PH^\circ] - k_6[PH^{OO^\circ}]^2$$

D'autre part, Hawkins [83] s'est intéressé à l'oxydation du polyéthylène à 140°C. Il a ainsi analysé par des mesures manométriques (mesures de pression), l'évolution de la quantité d'oxygène absorbée, et par spectroscopie infrarouge, la quantité de groupements peroxyde formés sans toutefois préciser la bande d'absorption suivie. Les résultats obtenus semblent indiquer que la quantité en POOP ou POOH augmente pour atteindre un maximum au bout des 4 à 5 premières heures avant de diminuer. De son côté, l'évolution de la quantité d'oxygène absorbée présente un temps d'induction avant l'apparition d'une auto-accélération. Hawkins [87] conclut que, dans la période d'induction, la vitesse d'oxydation r_s reste très faible, et lorsque la concentration en hydroperoxydes atteint une valeur maximale, l'oxydation s'auto-accélère pour atteindre un état d'équilibre défini par une vitesse maximale r_s . D'après Colin et al. [83], dans le cas d'une exposition à haute température ($T > 150^\circ C$), les hydroperoxydes se décomposeraient rapidement selon un mode unimoléculaire et le temps d'induction (t_i) avant que l'oxydation s'auto-accélère serait significativement réduit en comparaison du cas bimoléculaire. Ces auteurs ajoutent, cependant, que même si le mode de décomposition initial des hydroperoxydes apparaîtrait majoritairement unimoléculaire à haute température ($T > 150^\circ C$), au bout d'un certain temps d'exposition, les hydroperoxydes s'accumuleraient et finiraient par se décomposer majoritairement selon un mode bimoléculaire à plus long terme.

ii. Influence de la température sur le temps d'induction et la vitesse maximale d'oxydation : Colin et al.[83] se sont intéressés à l'influence de la température sur le temps d'induction et la vitesse d'oxydation. Ainsi, en s'appuyant sur des données de la littérature concernant le

vieillessement thermique entre 90°C et 200°C du polyéthylène non stabilisé, ils ont observé un comportement quasi-universel de la thermo-oxydation du PE dans cette gamme de température (**Figure 33**). Ainsi, ils ont montré qu'indépendamment du taux de branchement, du taux cristallinité ou d'autres irrégularités structurales, le temps d'induction d'oxydation et la vitesse maximale d'oxydation, à l'état stationnaire, sembleraient obéir à la loi d'Arrhénius. Khelidj et al.[88] ont étendu cette même étude sur une gamme de température comprise entre 40°C et 220°C. Ces auteurs mettent en évidence une discontinuité du graphe d'Arrhénius vers 80°C (**Figures 33 et 34**) qu'ils ont attribué à la compétition entre les réactions bimoléculaires de recombinaison dans la cage et de diffusion hors de la cage des PH^{O} .

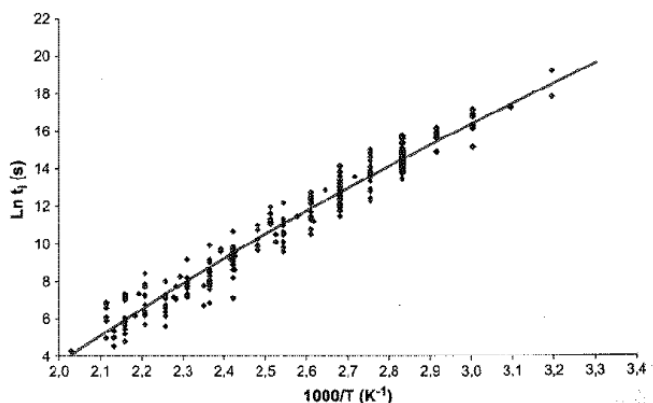


Figure 33 : Graphe d'Arrhénius du temps d'induction t_i en excès d'oxygène [88].

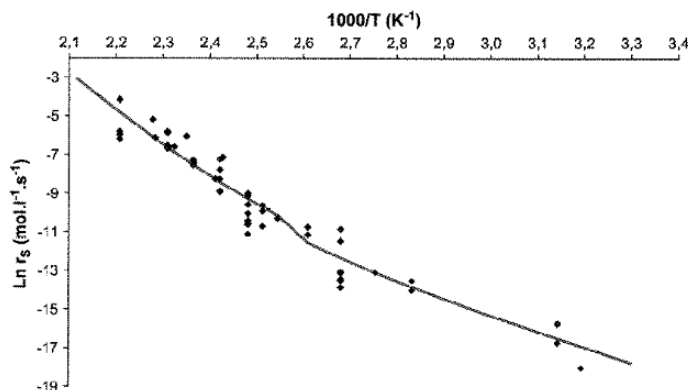


Figure 34 : Graphe d'Arrhénius de la vitesse maximale d'oxydation stationnaire r_s en excès d'oxygène [88].

4.3.4 Vieillessement photochimique :

i. Schéma d'oxydation et amorçage par photolyse : Selon Allen et McKellar [89-91], en raison d'un effet écran de l'atmosphère supérieur, aucun rayonnement de longueur d'onde inférieur à 280-290 nm ne pourrait atteindre la surface terrestre. De ce fait, ils suggèrent que les polyoléfines ne devraient pas être affectées par les radiations solaires. Néanmoins de nombreux auteurs ont rapporté des dégradations après exposition des polyoléfines sous rayonnements UV ($\lambda > 300$ nm) [92-94]. Des études menées sur les polyoléfines par luminescence ont permis d'élargir le champ de connaissances sur l'absorption des molécules,

et de ce fait, sur les mécanismes de photo-oxydation. Charlesby et Partridge [95] ont été les premiers à rapporter l'émission phosphorescente de polyoléfines contenant des impuretés carbonyles. Par la suite, Charlesby et Boustead [96] ont identifié d'autres phosphorescences liées, cette fois, à la présence d'acide benzoïque au sein de la phase cristalline et d'hydrocarbure aromatique dans la phase amorphe du polyéthylène. Allen et al. [97] se sont intéressés à la phosphorescence des espèces formées pendant les processus de thermo et photo oxydation des polyoléfines commerciales. Ils ont observé la présence d'espèces possédant une longueur d'onde d'excitation supérieure à 290 nm. Ces auteurs attribuent cette phosphorescence aux cétones et aldéhydes qui, selon eux, seraient les principaux amorceurs de la photo-oxydation [97]. De plus, comme le rapportent de nombreux auteurs [98][93][99-100], les hydroperoxydes sont extrêmement photolabiles. Ils peuvent donc absorber les rayonnements UV et ainsi amorcer la photo-oxydation. Enfin, Carlsson et Wiles [101] listent d'autres amorçages possibles de la photo-oxydation résultant d'un transfert de charge complexe et dues à la présence de résidus catalytiques ou encore d'ozone. Dans la suite de ce paragraphe dédié à la description des mécanismes de photo-oxydation, nous nous focaliserons sur les réactions d'amorçage par photolyse des cétones et des hydroperoxydes avant d'aborder l'influence de différents paramètres pouvant gouverner la vitesse de photo-oxydation.

➤ Amorçage par photolyse des groupes carbonyles : D'après de nombreux auteurs [98][99][101-102] l'amorçage de la photo-oxydation résulterait de la photolyse des cétones selon deux réactions : Norrish I et II.

- Norrish I : Cette réaction, serait due au fait que les cétones accèderaient à un état excité sous l'effet de l'absorption d'un photon, ce qui entraînerait la formation de deux radicaux alkyls selon le mécanisme suivant :

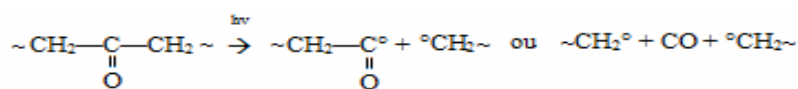


Figure 35 : Photolyse des cétones selon Norrish I [98].

- Norrish II : Cette réaction apparaîtrait seulement dans le cas où les cétones possèderaient un atome d'hydrogène sur le carbone situé en γ . Elle s'effectuerait par l'intermédiaire d'un cycle à six atomes et entraînerait la formation d'un groupement insaturé et d'un groupe énolique. L'énol se recombinerait ensuite rapidement en cétone.

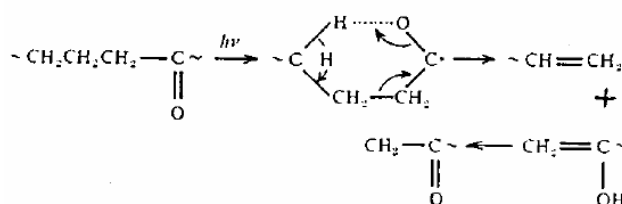


Figure 36 : Photolyse des cétones selon Norrish II [105].

D'autres auteurs [103-105] proposent l'existence d'une troisième réaction proche de la réaction de Norrish I :

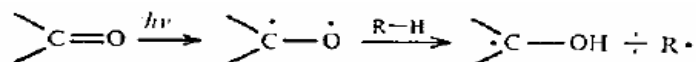


Figure 37 : Photolyse des cétones suivant une réaction proche de Norrish I [98].

Enfin, Trozzolo et Winslow [106] suggèrent que la photo-oxydation des polyoléfines résulterait d'une réaction selon Norrish II indirecte. Selon eux, la décomposition des cétones selon Norrish II serait suivie par la réaction du groupe insaturé avec un singulet d'oxygène excité (Figure 38). Néanmoins, les travaux de Mill et al.[107], ainsi que de Breck et al.[108],mettant en présence des polyoléfines insaturées et des singulets d'oxygène excités n'ont pas révélé de formation d'hydroperoxydes.

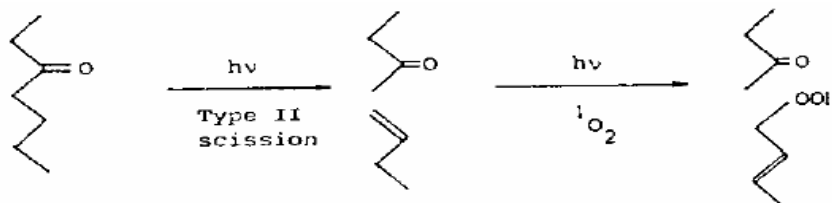


Figure 38 : Décomposition des cétones selon Norrish II et formation des hydroperoxydes par un singulet d'oxygène. [109]

Dans le but de statuer sur la prédominance entre Norrish I et II, Carlsson et Wiles [99] ont étudié la photolyse de cétones modèles (cétones A et B de la Figure 39). A partir du pourcentage des produits volatils produits, déterminé par chromatographie en phase gazeuse, ils ont pu déduire les réactions prédominantes et déterminer leurs rendements.

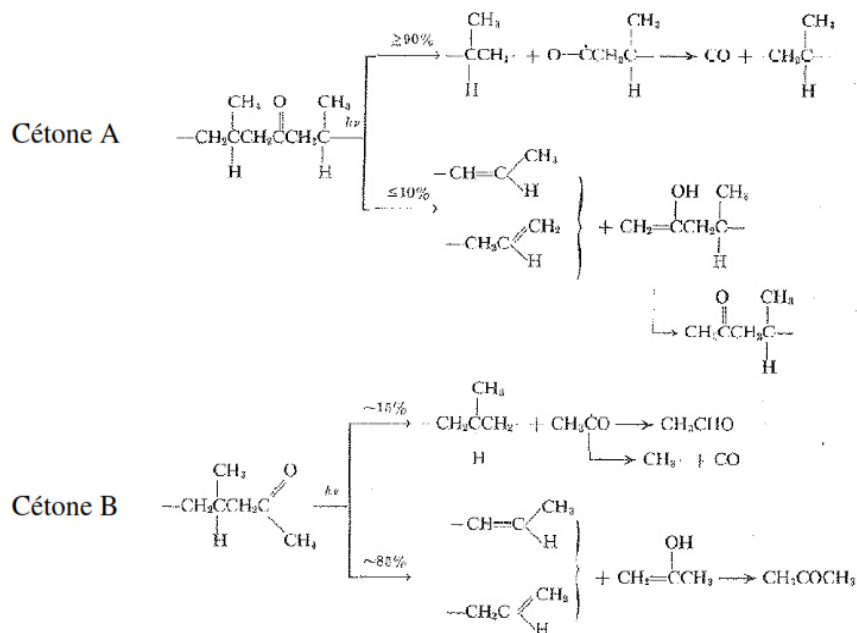


Figure 39 : Photolyse et rendement des réactions de Norrish I et II pour deux types de cétones modèles [99].

Au cours de la photolyse sous vide entre 220 et 380 nm, ces auteurs ont déduit que quand les cétones sont situées en milieu de chaînes (cas A **Figure 39**), elles se photolysent préférentiellement selon Norrish I et que quand les cétones sont situées en bout de chaînes (cas B **Figure 39**), elles se photolysent préférentiellement selon Norrish II. Geuskens et Kabamba [110] se sont intéressés à l'influence de la longueur d'onde sur la photolyse des cétones. Pour cela, ils ont étudié la photo-oxydation de films minces d'EPR (copolymère éthylène-propylène) au cours d'une exposition monochromatique à 310 et 365nm. Dans le cas de l'exposition à 310 nm, ils ont observé, par spectroscopie IR, l'apparition d'une bande à 1640 cm^{-1} attribuée aux insaturations de type vinyl. Ces auteurs en déduisent que les réactions de Norrish II se produiraient seulement pour des expositions de longueurs d'ondes inférieures à 365 nm. D'après Rabek [111], les polymères peuvent absorber dans le domaine UV et subir des coupures de chaînes résultant de réactions photochimiques. En photochimie, le rendement quantique Φ correspond à la fraction de molécules excitées par un photon UV et donnant lieu à une réaction photochimique :

Soit : $A + h\nu \rightarrow \text{Produits}$ alors $\Phi = -\frac{d[A]}{I_{abs} \cdot dt}$ avec A une espèce absorbant dans le domaine des

UV et I_{abs} l'intensité lumineuse absorbée.

Carlsson et Wiles [112] ont déterminé, par spectroscopie IR, le rendement quantique de

cétones modèles:

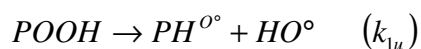
$$\ln \left(\frac{(OD)_t^{1718}}{(OD)_0^{1718}} \right) = -2,303 \cdot \Phi \cdot \frac{L \cdot t}{V} \cdot \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{\lambda} \cdot \epsilon_{\lambda} \quad (38)$$

Où OD est la densité optique des cétones (à 1718 cm^{-1}), λ_1 et λ_2 sont des longueurs d'onde délimitant le domaine spectral étudié, l et V sont respectivement l'épaisseur et le volume de l'échantillon, I_{λ} est l'intensité incidente et ϵ_{λ} l'absorptivité molaire des cétones.

Selon ces auteurs, quand les cétones sont situées en milieu de chaînes (cas A de la **Figure 39**), les rendements quantiques selon Norrish I et Norrish II seraient de 0,07 et 0,01 respectivement. Quand les cétones sont situées en bout de chaînes, ces rendements sont évalués respectivement à 0,013 et 0,08. Hartley et Guillet [113] prédisent, pour la photolyse de copolymère éthylène-monoxyde de carbone à 25°C , des rendements quantiques de 0,003 et 0,025 pour les réactions Norrish I et II respectivement. Enfin, Geuskens et David [114] affirment que le rendement quantique de la réaction Norrish I ne serait que de 0,002 en solution à température ambiante dans le cas d'un copolymère éthylène-monoxyde de carbone. Ils ajoutent que ce rendement devrait être encore plus faible à l'état solide puisqu'il faudrait tenir compte de la possible recombinaison des radicaux alkyles dans la cage. Ainsi, la photolyse des cétones semble s'expliquer préférentiellement par des réactions de Norrish I et

II. Toutefois, il y a prédominance de ces réactions l'une sur l'autre où leur rendement quantique respectif reste mal défini.

➤ Amorçage par photolyse des hydroperoxydes : Selon de nombreux auteurs [112][115][116], les cétones ne seraient pas les seules espèces à pouvoir amorcer la photo-oxydation. Les hydroperoxydes, possédant une liaison O-O de seulement 176 kJ mol⁻¹[75], seraient plus ou moins photosensibles selon leur structure et, pourraient ainsi donner lieu à des réactions de photolyse :



Mellor et al. [117] ont observé, par analyse infrarouge, que les photo-dégradations les plus rapides se passaient sans modification significative de la concentration en carbonyles. Cependant, en se basant sur ces observations, ils en ont conclu que les hydroperoxydes formés pendant la mise en forme des polyoléfinés seraient les principaux précurseurs des espèces carbonyle. Geuskens et David [114] ajoutent que la production en hydroperoxydes serait 10 fois plus importante que celle des carbonyles pendant la mise en forme du PE à 165°C. Ces hydroperoxydes, seraient extrêmement photosensibles et auraient la capacité de se décomposer avec un rendement quantique proche de l'unité. De plus, ces mêmes auteurs affirment que le coefficient d'absorptivité molaire des POOH serait de 0,31 L.mol⁻¹.cm⁻¹ dans le domaine UV. En comparaison, les groupes carbonyles possèderaient un coefficient d'absorptivité molaire de 30 L.mol⁻¹.cm⁻¹ vers 300nm. Ainsi, même avec une concentration 10fois inférieure, les carbonyles seraient les espèces les plus absorbantes. Néanmoins, selon Trozzolo et Winslow [106], de possibles transferts d'énergie des carbonyles vers les hydroperoxydes favoriseraient la décomposition des hydroperoxydes voisins des carbonyles par rapport à celle des hydroperoxydes isolés [106].

ii. Les différents produits de photo-oxydation : Les produits formés pendant la photo-oxydation du PE semblent peu différer de ceux observés en thermo-oxydation. Gulmine et al. [118] ont observé, par analyse IR de PE photooxydés en enceinte de type Weather-Ometer (WOM) et QUV, l'apparition de pics à 1780 cm⁻¹, 1733 cm⁻¹, 1714 cm⁻¹ et 1700 cm⁻¹. Ils attribuent ces pics à la présence de γ -lactones, d'esters, de cétones et d'acides carboxyliques respectivement. De plus, outre les carbonyles, de nombreux auteurs mettent en évidence, par analyse IR de PE photo-oxydés, la présence de groupements insaturés [119-120][121]. A titre d'exemple, Lacoste et Carlsson [119] précisent, dans le cas de films de PEbd linéaire, que les insaturations seraient constituées principalement de vinyles (995 et 909 cm⁻¹), vinylènes (965cm⁻¹) et vinylidènes (888 cm⁻¹) (**Figure 40**).

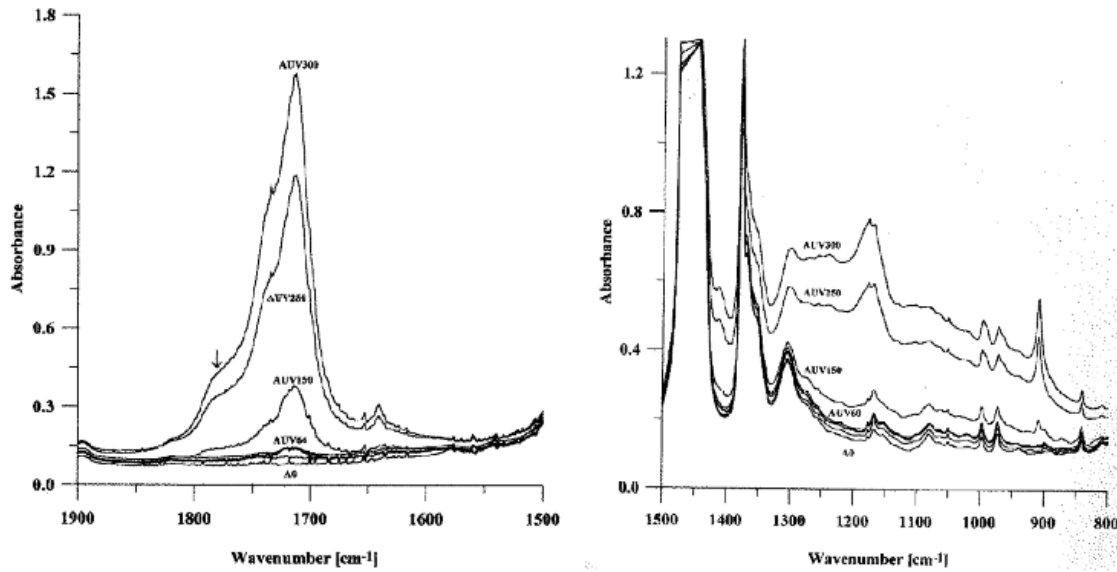


Figure 40 : Principales modifications des spectres IR dans le cas de films de PEbd (de $130\mu\text{m}$ d'épaisseur) exposés en enceinte de type SEPAP (I non mentionnée et $T=60^\circ\text{C}$) : temps d'exposition : 0, 64, 150, 250, 300 heures. [119]

Après avoir vu les principaux produits de dégradation formés sous rayonnement UV, nous poursuivrons par les principaux facteurs influençant la cinétique de photo-oxydation : la température, la longueur d'onde et l'intensité du rayonnement UV.

iii. Influence de la température sur la cinétique de photo-oxydation : Comme dans le cas de la thermo-oxydation, Audouin et al. [86] ont suggéré, pour des films minces de PP photo-oxydés, que la température aurait une influence sur le temps d'induction à l'oxydation et sur la vitesse de formation des carbonyles. Suivant la **Figure 41(b)**, le temps d'induction à l'oxydation diminuerait et la vitesse maximale d'oxydation augmenterait avec la température. Ces mêmes auteurs affirment que, contrairement à ce que l'on peut observer en thermo-oxydation, la vitesse maximale de photo-oxydation et le temps d'induction à l'oxydation ne suivraient pas une loi d'Arrhenius. Cela pourrait provenir du fait qu'en photo-oxydation, l'amorçage ne résulterait pas de la photolyse des hydroperoxydes mais de leur thermolyse.

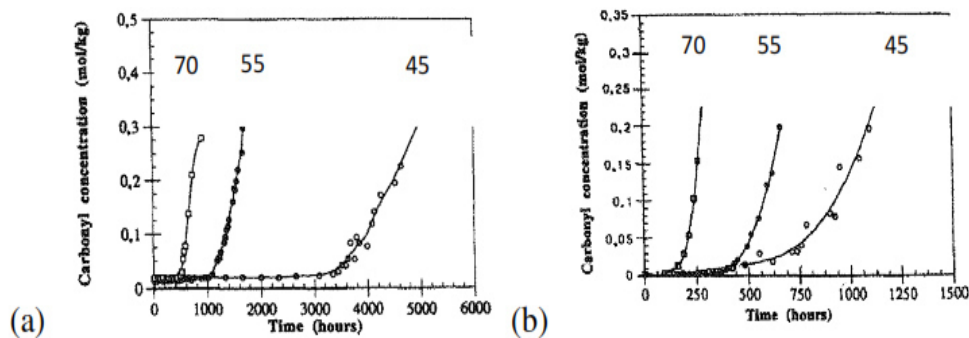


Figure 41 : Variation de la concentration en carbonyles en fonction du temps dans le cas de films en PP (a) thermo-oxydés à 40, 55 et 70°C et (b) photo-oxydés sous lampe fluorescente de 40W à 40, 55 et 70°C dans l'air [86]

iv. Influence de l'intensité lumineuse sur la cinétique de photo-oxydation : Afin d'étudier l'influence de l'intensité du rayonnement UV sur la vitesse d'oxydation, Gulmine et al. [118] se sont intéressés à la dégradation photochimique de trois types de PE (PEbd linéaire, PEbd et PEhd) à différentes intensités. Par analyse IR, ils ont mis en évidence que l'intensité avait un effet sur le temps d'induction à l'oxydation et sur la vitesse de formation des carbonyles. Ainsi, ils ont observé qu'une augmentation de l'intensité de $0,35\text{W/m}^2$ à $0,60\text{W/m}^2$ réduisait le temps d'induction à l'oxydation (t_i) d'un facteur 4 et multipliait la vitesse de formation des carbonyles d'un facteur 2 après 800h de vieillissement. Tavarez et al. [122] ont réalisé le même type d'étude sur des films de PEbd (**Figure 42**). Ils confirment cette tendance sur les carbonyles mais n'observent pas de variation de t_i avec l'intensité. Phillipart et al. [123] ont analysé des films de PP photooxydés à différentes intensités sous enceinte UV de type SEPAP 12-24. L'analyse IR leur a permis de confirmer l'influence de l'intensité sur la vitesse de formation des carbonyles et d'estimer qu'elle serait proportionnelle à \sqrt{I} à l'état stationnaire.

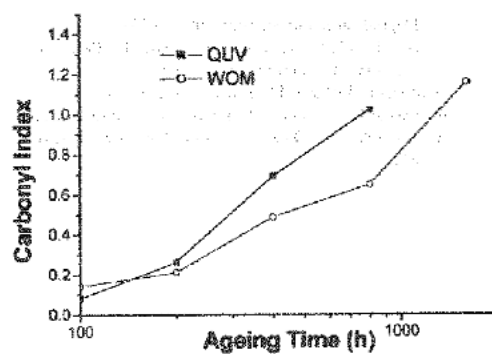


Figure 42 : Variation de l'indice des carbonyles après vieillissement de films de PEbd en enceinte UV de type WOM ($0,35\text{W/m}^2$) et QUV ($0,60\text{W/m}^2$) dans l'air. [122]

v. Influence de la longueur d'onde sur la cinétique de photo-oxydation : Liu et al. [124] se sont intéressés à l'influence des longueurs d'onde du rayonnement UV sur la cinétique de photo-oxydation. Dans cette optique, ils ont suivi, par analyse IR et traction uniaxiale, les variations de composition chimique et des caractéristiques mécaniques après exposition aux UVA (400-315 nm) et UVB (315-280 nm). Ces auteurs observent une diminution de 50% de l'allongement à la rupture après 50h sous UVB et 240h sous UVA. Ils précisent, sans donner de valeurs, que la formation en carbonyles est plus rapide sous UVB que sous UVA. A partir de ces observations, Liu et al. [124] concluent, à durée d'exposition égale, que l'exposition aux UVB conduit à une dégradation plus importante que l'exposition aux UVA.

D'autre part, en s'appuyant sur l'absorption de films minces (de 0,05 mm d'épaisseur) dans le domaine des UV, Searle [125] précise que les polymères aliphatiques tels que le polyéthylène, le polypropylène ou le polychlorure de vinyle ne sont pas capables d'absorber les radiations solaires UV arrivant sur terre : c'est-à-dire saturés dans le domaine 400–300nm (**Figure 43**).

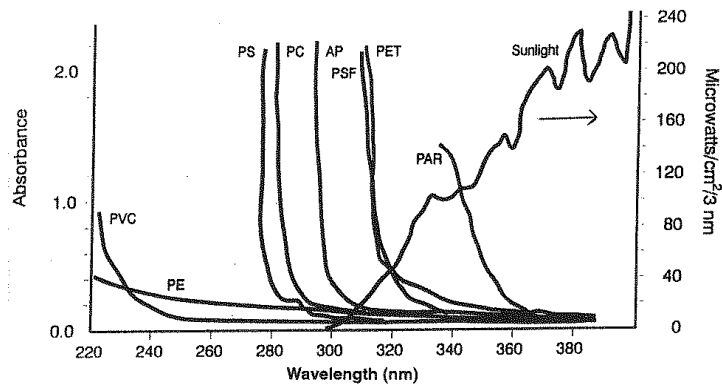


Figure 43 : Spectre d'absorption UV de films minces de polymère (de 0,05 mm d'épaisseur) dans le cas d'une exposition au spectre solaire (Juillet – 41° latitude) [125] : AP : polyester aromatique ; PAR : polyacrylate ; PC : polycarbonate ; PE : polyéthylène ; PET : polyéthylène téréphtalate ; PS : polystyrène ; PSF : polysulfone ; PVC : polychlorure de vinyle.

La principale bande d'absorption de ces polymères se situerait, d'après cet auteur, en dessous de 220 nm. Le vieillissement photochimique de ces polymères résulterait de l'absorption des UV par des impuretés ou des produits de thermo-oxydation formés lors de la phase de polymérisation ou de mise en forme.

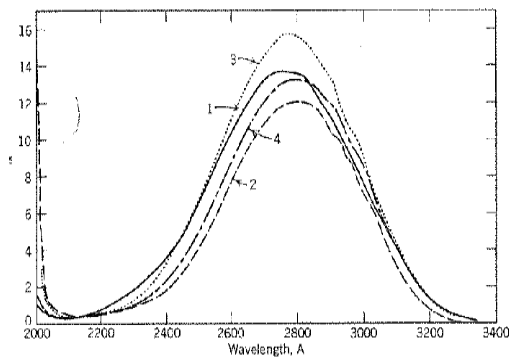


Figure 44 : Spectre d'absorption de (1) l'acétone, (2) diéthyl cétone, (3) méthyl éthyl cétone, et du (4) méthyl n-butyl cétone à 25°C.

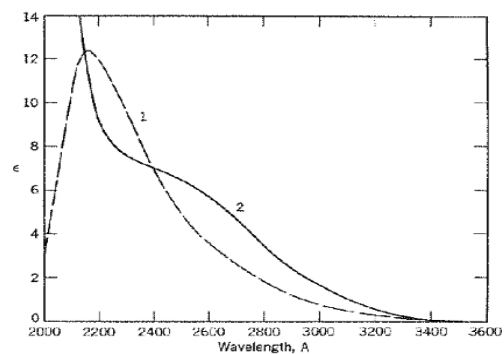


Figure 45 : Spectre d'absorption du (1) diméthyl peroxyde et du (2) di-ter-butyl peroxyde à 25°C.

Les **Figures 44 et 45** illustrent les spectres d'absorption de produits d'oxydation tels que les cétones et les peroxydes. Les bandes d'absorption des cétones et des peroxydes seraient respectivement comprises entre 330 et 220 nm et en dessous de 340 nm. Elles seraient donc en partie situées dans le domaine des UV. Enfin, afin de simuler et d'accélérer le vieillissement naturel, de nombreux auteurs ont eu recours à des enceintes ou chambres UV, constituées de lampes à arc xénon, carbone, mercure ou à fluorescence UVA et UVB [85][121][124][126-127]. Selon Searle [56], chaque type de lampe à une distribution spectrale unique associant une intensité à chaque longueur d'onde. Les **Figures 46 à 48** présentent les propriétés d'émission des différentes sources lumineuses utilisées pour des essais de vieillissement accéléré en laboratoire, en comparaison avec les rayonnements solaires réagissant avec la surface de la terre. D'après cet auteur, seule la lampe à arc xénon reproduit

convenablement les rayonnements solaires dans le domaine UV et visible. De plus, il ajoute que les mécanismes de dégradation seraient fortement dépendants de la longueur d'onde et de l'intensité des rayonnements incidents.

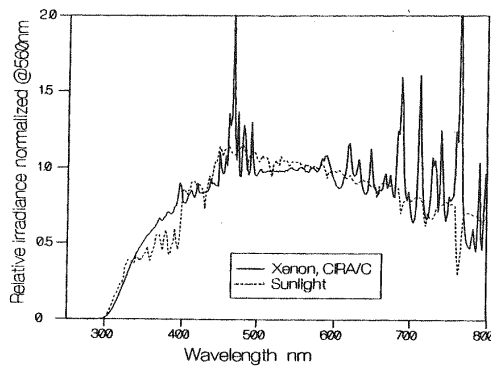


Figure 46 : Distribution de l'énergie spectrale mesurée auprès d'un arc xénon filtré CRA/soda et à midi à Miami [125].

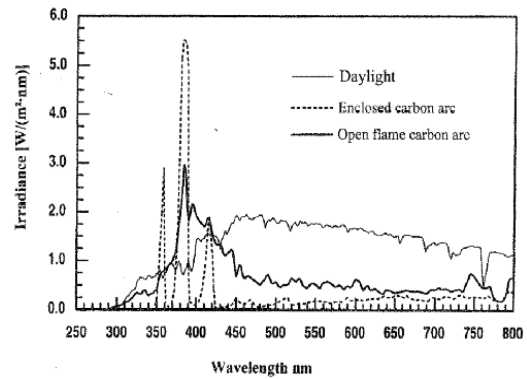


Figure 47 : Distribution de l'énergie spectrale mesurée auprès d'un arc carbone filtré Corex D et à midi à Miami [125].

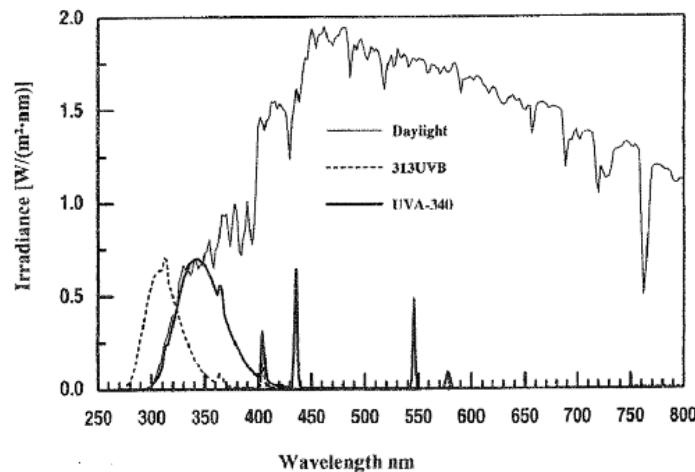


Figure 48 : Distribution de l'énergie spectrale mesurée auprès de lampe fluorescente UVB-313 et UVA-340 et à midi à Miami [72].

De ce fait, il en conclut qu'une bonne reproduction du spectre solaire par la lampe UV serait indispensable à la reproduction du vieillissement naturel en laboratoire. Après s'être intéressé aux mécanismes de thermo et photo-oxydation et aux paramètres influençant la cinétique de ces deux phénomènes, nous poursuivrons avec le vieillissement naturel.

4.3.5 Vieillessement naturel :

Satoto et al. [109] se sont intéressés aux paramètres influençant la cinétique du vieillissement naturel du polyéthylène. L'analyse IR de films de PEhd exposés, pour une part à Tsukuba (Japon) où la température oscille entre 3°C et 25°C au cours de l'année et, pour l'autre part, à Bandung (Indonésie) où la température reste constante à 23°C +/- 2°C, met en évidence une différence en terme de vitesse de formation des carbonyles (Figure 49). Comme l'illustrent les Figures 49 et 51, la vitesse de formation des carbonyles dépendrait de la température. Par

contre, selon ces mêmes auteurs, il n'existerait pas de relation simple entre l'intensité du rayonnement solaire et la vitesse de formation des carbonyles (**Figure 51**).

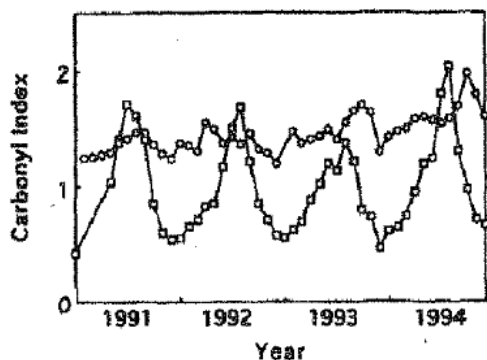


Figure 49 : Variations de l'indice des carbonyles dans des films de PEhd (de 0,20 mm d'épaisseur) exposés pendant 4 ans à (○) Bandung (Indonésie) et (□) Tsukuba (Japon). [109]

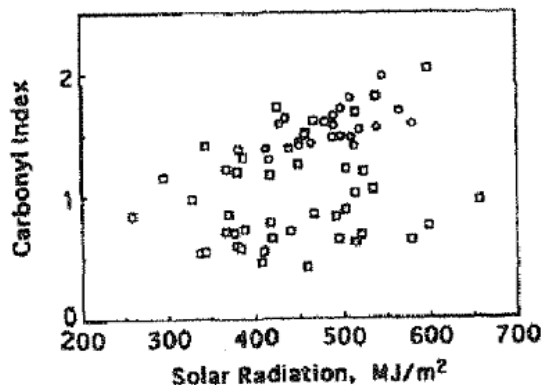


Figure 50 : Corrélation entre l'indice des carbonyles et l'intensité d'irradiation solaire dans le cas de films de PEhd (de 0.20 mm d'épaisseur) exposés pendant 4 ans à (○) Bandung (Indonésie) et (□) Tsukuba (Japon). [109]

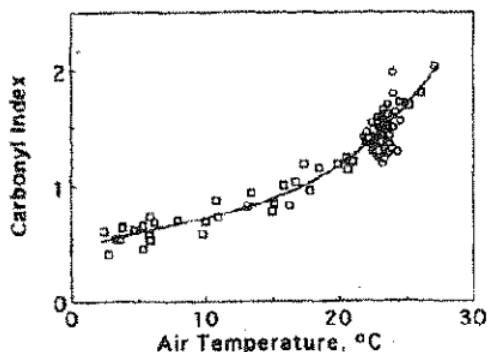


Figure 51 : Corrélation entre l'indice des carbonyles et la température moyenne mensuelle dans le cas de films de PEhd (de 0.20 mm d'épaisseur) exposés pendant 4 ans à (○) Bandung (Indonésie) et (□) Tsukuba (Japon). [109]

D'autres auteurs se sont intéressés à la validité du vieillissement accéléré en enceinte UV. Tidjani et Arnaud [128] ont, par exemple, étudié par analyse IR, la dégradation de films de PEbd exposés à un vieillissement naturel (Dakar) d'une part, et à un vieillissement accéléré en enceinte UV (SEPAP 12-24), d'autre part. Ils ont observé l'apparition des mêmes bandes d'absorption dans les deux cas. Néanmoins, quantitativement, des différences apparaissent. En effet, ces auteurs mesurent la même vitesse de formation des acides carboxyliques, des alcools et des esters dans les deux cas mais une vitesse de formation des vinyloxydes, des hydroperoxydes et des cétones est plus rapide dans le cas du vieillissement accéléré. Ainsi, Tidjani et Arnaud concluent que la vitesse de formation des acides, des esters et des alcools serait indépendante des conditions d'exposition, alors que la vitesse de formation des vinyloxydes, des cétones et des hydroperoxydes en serait dépendante.

Dans cette partie, nous avons rapporté les différents mécanismes de thermo- et photo-oxydation présentés dans la littérature. Il en ressort que, contrairement à la thermo-oxydation, les mécanismes d'amorçage de la photo-oxydation ne sont pas encore clairement établis. De plus, la vitesse de photo-oxydation dépendrait de plusieurs facteurs : la température, l'intensité et de la longueur d'onde du rayonnement UV. Malgré la diversité de ces paramètres, il semblerait ainsi que certaines enceintes UV soient capables de reproduire convenablement le vieillissement naturel. Dans la partie suivante, nous présenterons les principaux stabilisants utilisés pour protéger le PE contre la thermo- et la photo-oxydation.

4.4 Stabilisation :

La plupart des polymères nécessite l'utilisation de stabilisants et/ou antioxydants afin d'inhiber les réactions d'oxydation pouvant se produire tout au long de leur cycle de vie [129]. Selon de nombreux auteurs, les deux principales voies de stabilisation seraient de capter les radicaux libres afin d'entraver la propagation de l'oxydation et ainsi de décomposer les hydroperoxydes afin de retarder l'amorçage de l'oxydation [130-132][133].

➤ Décomposeurs d'hydroperoxydes : Concernant les décomposeurs d'hydroperoxydes, il semblerait d'après Zweifel [129], qu'ils soient efficaces et adaptés s'ils ont la capacité de transformer les POOH en espèces non radicalaires et thermiquement stables. Dans le cas particulier des polymères mis en forme à l'état fondu, cet auteur précise que les composés les plus couramment utilisés pour décomposer les hydroperoxydes sont les phosphites trivalents associés à des antioxydants phénoliques. La **Figure 52** illustre la réaction de réduction d'un hydroperoxyde par un phosphite. De nombreux auteurs précisent que les phosphites peuvent participer à d'autres réactions [46][129][132]. Ils pourraient apparaître comme des réducteurs de peroxydes (**Figure 53**) et de radicaux alkoxydes (**Figure 54**).

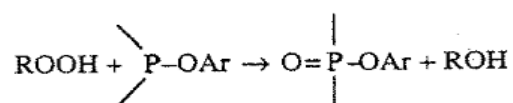


Figure 52 : Réduction d'un hydroperoxyde par un phosphite. [133]

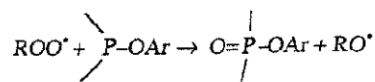


Figure 53 : Réduction d'un radical peroxy par un phosphite. [133]

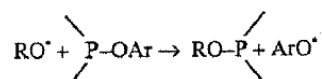


Figure 54 : Substitution d'un radical alkoxy par un phosphite. [133]

De plus, selon différents auteurs [61] [133], les phosphites pourraient s'hydrolyser (**Figure 55**). A titre d'exemple, d'après Zweifel [129], les espèces acides formées par hydrolyse des phosphites pourraient entraîner la corrosion des métaux en contact direct avec le polymère.

Cependant, selon Schwetlich et Habicher [133], l'oxydation des phosphites interviendrait, dans la plupart des cas, plus rapidement que l'hydrolyse.

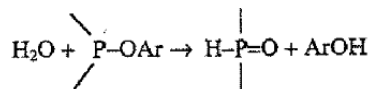


Figure 55 : Hydrolyse d'un phosphite. [133]

➤ Capteurs de radicaux : Outre les décomposeurs d'hydroperoxydes, une autre voie permettant d'inhiber l'oxydation consisterait, selon Zweifel [129], à capturer des radicaux alkyl. Ce même auteur rapporte que la réaction quasi instantanée de ces radicaux avec l'oxygène rendrait difficile leur capture par un antioxydant. Il fait toutefois remarquer que les radicaux peroxydes, formés par réaction des radicaux alkyl avec le dioxygène, seraient moins réactifs que les radicaux alkyl. Ainsi, l'effet donneur d'hydrogène de certains antioxydants serait en mesure de limiter la propagation de l'oxydation. Les antioxydants phénoliques seraient, selon Zweifel [129], les plus largement utilisés pour capter les radicaux. Leur réaction avec un radical peroxy s'écrit, d'après Pospisil et Nespurek [134], de la manière suivante: $\text{AH} + \text{PO}_2^\circ \rightarrow [\text{A}^+\text{PO}_2^-] \rightarrow \text{A}^\circ + \text{POOH} \quad (k_{s1})$. Selon ce même auteur, les radicaux phénoxy formés seraient stabilisés par isomérisation. Les réactions secondaires entre leurs isomères et les radicaux peroxydes sont résumées sur la Figure 56.

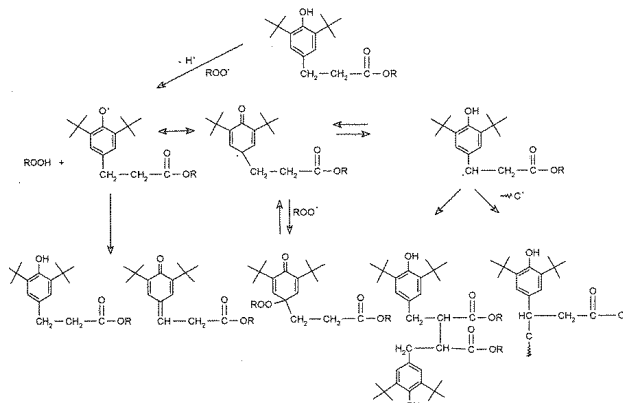


Figure 56 : Réactions possibles des phénols et leurs sous-produits avec les radicaux Peroxydes [129].

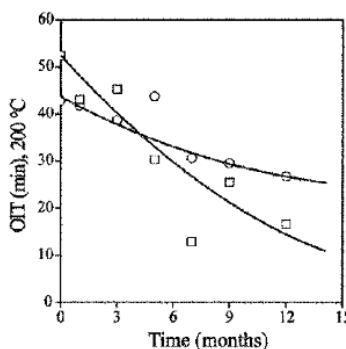


Figure 57 : Variation de la stabilité résiduelle d'un PEhd stabilisé par l'Irganox 1010 (□) et l'Hostanox O3 (○) au cours du vieillissement dans l'eau à 80°C [135]

Nagy et al. [135], quant à eux, ont étudié les pertes en antioxydants de films de PEhd stabilisés par deux types d'antioxydants phénoliques : l'Irganox 1010 et l'Hostanox O3 au cours de leur immersion dans l'eau à 80°C. Le suivi du TIO (**Figure 57**), ont permis à ces auteurs de montrer que la perte en antioxydants était plus importante dans le cas de l'Irganox1010. Pour expliquer cette différence, des tests complémentaires ayant pour objectif de vérifier la stabilité des antioxydants directement placés dans l'eau ont été effectués. Ainsi, par analyse UV ils ont observé une diminution de 80% en 10 jours de l'absorbance des phénols dans le cas de l'Irganox 1010, mais aucune évolution significative dans le cas de l'HostanoxO3. De ces observations Nagy et al. [135] suggèrent une hydrolyse de l'Irganox 1010 alors que l'Hostanox O3 resterait stable en milieu aqueux à 80°C. Nagy et al. [135] ainsi que Bertholdo et Ciardelli [61] ont proposé des mécanismes d'hydrolyse de l'antioxydant phénolique (Irganox 1010). Dans les deux cas, l'hydrolyse de l'ester serait la réaction la plus probable (**Figure 58**).

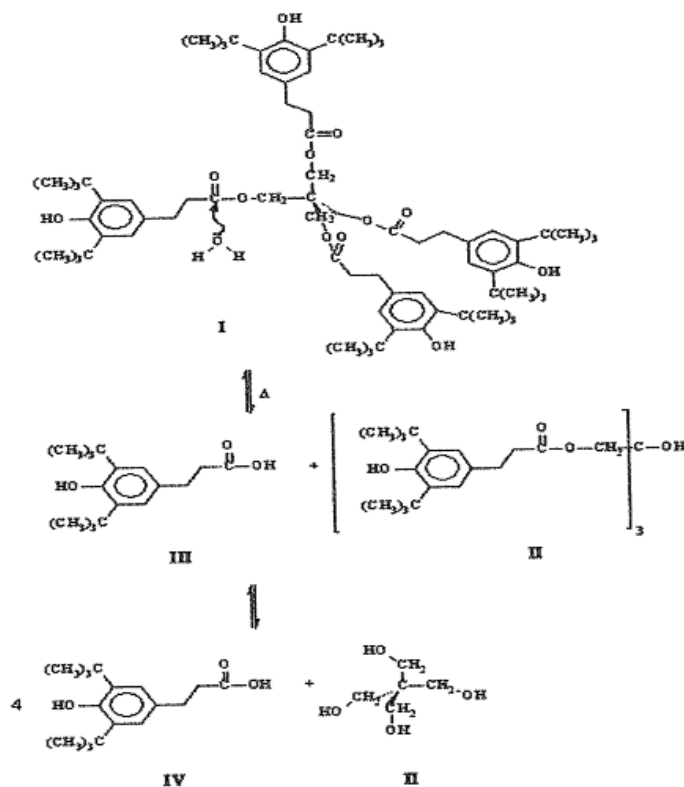


Figure 58 : Hydrolyse des fonctions ester de l'Irganox 1010 [61].

Ainsi, comme nous venons de le voir, la stabilisation des polyoléfines passe principalement par deux voies : la décomposition des hydroperoxydes par voie non radicalaire et la capture des radicaux. Cependant, il est à noter que les antioxydants ne réagissent pas seulement avec les produits de dégradation. En effet, certains peuvent être sensibles à l'environnement et plus particulièrement à l'eau. Dans le paragraphe suivant, nous nous intéresserons à l'effet du noir de carbone.

➤ Noir de carbone : Selon Allen et al. [135], le noir de carbone serait multifonctionnel et pourrait, par exemple, agir comme un puissant absorbeur UV (facteur de stabilité aux UV proche de 12) et visible, opérer comme un désactivateur d'espèces excitées et participer à la décomposition des hydroperoxydes. Jackab et Omastova [130] ont étudié la stabilité thermique, à 400°C, d'un PEbd chargé par 30% en masse de noir de carbone par analyse thermogravimétrique et par chromatographie en phase gaz couplée à la spectrométrie de masse. Ils ont observé une augmentation de 36°C de la température de dégradation thermique du polymère après incorporation de noir. Ces auteurs ont interprété cette augmentation de température par une meilleure stabilité associée au fait que les particules de noir participeraient à l'hydrogénation des premiers macroradicaux et retarderaient la réaction radicalaire de dégradation thermique. Des résultats similaires ont été rapportés par Jackab et Blazco [131] dans le cas d'un PEhd chargé par 50% en masse de noir de carbone.

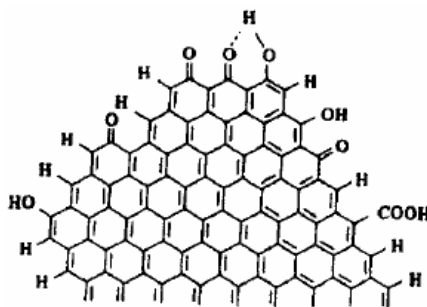


Figure 59 : Structure du noir de carbone d'après Allen [136]

Phease et al. [136] ont, quant à eux, étudié l'influence du noir de carbone sur un PEmd stabilisé par un mélange synergique de phénol (Irganox 1010) et de phosphite (Irgafos 168). Ils ont mesuré le temps d'induction à l'oxydation (TIO) par DSC et ont observé une augmentation linéaire du TIO avec la quantité de noir de carbone pour des fractions massiques comprises entre 2 et 5,6% :

$$TIO = k \cdot [CB] + \tau_0 \quad (39)$$

Où k est une constante, $[CB]$ la fraction massique de noir de carbone et τ_0 le TIO en l'absence de noir.

Ces mêmes auteurs se sont intéressés à l'interaction des antioxydants avec les particules de noir de carbone. Ils ont observé, dans le cas de films de PEmd de 0,5 mm d'épaisseur chargés de noir de carbone, un rendement d'extraction de l'Irganox 1010 et de l'Irgafos 168 de 80% et 100% respectivement dans du chloroforme à 60°C. A partir de ces observations, ils suggèrent que l'adsorption des antioxydants à la surface du noir ne se produit pas ou peu. Ces conclusions vont à l'encontre de celles faites par Hawkins et al. [82]. Viebke et Gedde [60], quant à eux, se sont intéressés à l'influence du noir de carbone sur la diffusion des antioxydants à travers la paroi de tuyaux en PEmd. Ces auteurs observent des profils de TIO

plus plats en l'absence de noir de carbone après exposition à 95°C. Ils suggèrent ainsi que la présence de noir de carbone diminuerait le coefficient de diffusivité des antioxydants. En revanche, en présence d'eau, ces auteurs observent des profils de TIO proches de ceux obtenus en l'absence de noir de carbone. Ils en concluent que la présence d'eau favoriserait la migration de ces antioxydants car l'eau pourrait s'adsorber à la place des antioxydants sur la surface des particules de noir de carbone. Cette partie a mis en évidence le rôle des phosphites et des phénols dans la stabilisation des polyéthylènes. Il apparaît, qu'en plus des réactions avec les produits de dégradation du PE, les phosphites et l'Irganox 1010 seraient sensibles à l'hydrolyse. Outre, les antioxydants, le noir de carbone est aussi utilisé pour protéger les polyéthylènes. Il serait particulièrement efficace contre les UV. Néanmoins, de possibles phénomènes d'adsorption à la surface des particules de noir de carbone pourraient réduire l'efficacité des antioxydants.

V. Synthèse bibliographique :

L'étude des dispositifs solaires à effet de serre est rendue délicate par la complexité des échanges thermiques et massiques se manifestant à l'intérieur et à l'extérieur de ses dispositifs et d'autre part par leurs géométries. Ainsi l'influence du choix des matériaux fonctionnels constituant les capteurs solaires jouent énormément sur leur rendement, et en général ils sont reliés à de nombreux autres problèmes comme l'isolation thermique, le rayonnement solaire incident et le coût du dispositif solaire. Pour ces raisons, la majorité des études sur les capteurs solaires donnent toujours le coût de la réalisation et la production journalière soit en eau distillée soit en énergie stockée. Cette complexité a conduit à un grand nombre de travaux scientifiques ayant trait soit à l'étude du capteur solaire à eau, appelé aussi distillateur solaire, avec plusieurs améliorations dans sa géométrie soit actif pour les capteurs solaires à air avec une alimentation d'énergie. La présentation de ces travaux est l'objet de l'étude qui va suivre. L'amélioration des performances des capteurs solaires consiste à limiter les déperditions thermiques entre l'absorbeur et l'environnement et à augmenter la quantité d'énergie absorbée avec un choix judicieux des composants des capteurs. Ainsi, un certain nombre de travaux ont été faits sur les capteurs solaires dont le but est d'améliorer leur efficacité.

Ainsi, **Duffie et al. [137]** ont élaboré un modèle pour les capteurs solaires plans. Dans ce modèle, les températures de l'absorbeur, de la plaque arrière et du vitrage sont calculées en considérant le régime stationnaire monodimensionnel. La résolution est basée sur l'analogie électrique. Malgré les hypothèses simplificatrices, ce modèle reste largement utilisé pour la conception et la prédiction. L'influence des conditions internes et externes d'un capteur solaire comme la vitesse du vent et sa direction, le vieillissement de la surface d'absorption,

les pertes thermiques par convection, l'inertie thermique et l'angle d'incidence, sur le rendement ont été explorés numériquement par **Rodriguez et al. [138]** et validé expérimentalement par les mêmes auteurs **[139]** sur un champ de capteurs solaires plans de 50 m² de surface totale. L'ensemble des capteurs est incliné de 40° (correspondant à la latitude locale Madrid) et le débit du fluide caloporteur est de 0,6 10⁻³ m³/s ce qui correspond à 0,3 10⁻⁴ m³/s par capteur. L'influence de ces conditions sur le rendement du capteur a été effectuée en comparant avec les performances d'un capteur industriel de type EN-12975. Il ressort de cette étude que l'accroissement du débit augmente la température et l'efficacité. Par ailleurs, comme les expérimentations ont été menées sur une durée de 9 ans afin d'investiguer l'effet du vieillissement, il a été montré que l'efficacité optique est diminuée de 9% passant de 0.85 à 0.76 après 9 ans de fonctionnement. Pour étudier le comportement thermique des capteurs solaires, **Molero et al. [140]** ont mis au point un modèle mathématique tridimensionnel en régime instationnaire. Le modèle permet d'étudier plusieurs configurations : capteur à tubes parallèles, capteur à tube serpentin, capteur à deux plaques parallèles, utilisation d'un fluide absorbant avec plaque semi-transparente ou transparente et utilisation d'un isolant transparent en nid d'abeilles entre la plaque et la couverture. L'effet de la température sur les propriétés thermiques des matériaux a également été examiné. Le modèle permet également d'analyser des températures de l'absorbeur avec un écoulement uniforme et non uniforme. Les résultats ont été validés avec un code de calcul commercial. **Minn et al. [141]** ont étudié comment la température de l'absorbeur interagit avec le fluide caloporteur, les effets de bord, les pertes globales et le coefficient du transfert thermique du fluide pour un capteur conçu avec une couverture en Tedlar. Ils ont trouvé que la température du fluide à la sortie varie et que le coefficient de perte global augmente avec la température de l'absorbeur. Une analyse sur le comportement d'un capteur à air sous ensoleillement naturel et artificiel a été faite par **Letz et al. [142]** et ceci en utilisant un modèle basé sur une résolution des équations de bilan thermique par la méthode nodale. Cette étude théorique était validée à partir des essais expérimentaux. L'écart entre le rendement théorique et expérimental était de 3%. Il a été déduit que le débit d'air dans le capteur et la température d'entrée ont une grande influence sur le rendement par contre l'inclinaison et l'éclairement influent très peu. La sélectivité de l'absorbeur est aussi importante pour une amélioration du rendement lorsque la température d'entrée de l'air est élevée. Les pertes diminuent la température de sortie mais améliorent dans certains cas le rendement. Le modèle a permis aussi de corriger les mesures faites sous simulateur solaire. L'influence de l'orientation d'un capteur solaire joue un rôle important sur le rendement des capteurs plans puisqu'elle peut changer le rayonnement solaire atteignant le

capteur solaire, **Dang et al. [143]** ont présenté une étude expérimentale sur l'effet de l'orientation-sud sur le rendement des capteurs solaires plans. L'étude a été faite pour trois latitudes $L = 28.38^\circ\text{N}$ (New Delhi), $L = 12.97^\circ\text{N}$ (Bangalore) et $L = 13.0^\circ\text{N}$ (Madras). Il a été constaté que la meilleure performance est obtenue pour une inclinaison d'angle de la latitude de $+15^\circ$ l'hiver et -15° l'été. Par contre pour toute l'année, l'énergie solaire maximale est recueillie lorsque l'inclinaison est de 0.9 fois l'angle de la latitude. Ils n'ont conclu que l'augmentation de l'angle au sud diminue l'efficacité durant l'année. Afin de trouver un absorbeur à revêtement de faible coût, optiquement efficace et de longue durabilité, **Henry et al. [144]** ont travaillé sur le Nickel noir (NiS), le Chrome noir (Cr₂O₃) et le fer noir (FeO) comme revêtement plaqué sur l'absorbeur ; ils ont trouvé que le noir du nickel (avec une absorptivité $\alpha = 0.95$ et une émissivité $\varepsilon = 0.07$) a les meilleures propriétés optiques. Le Chrome noir, qui a montré une mineure dégradation après un test de 192 heures d'exposition à l'humidité, avait la meilleure durabilité alors que le Noir de fer présente le coût le plus bas. L'effet du nombre et des propriétés du vitrage sur les performances thermiques d'un capteur solaire a aussi été considéré. Nous citons le travail expérimental de **Yousef-Ali [145]** sur des capteurs solaires à double et à triple vitrages auquel il leur a ajouté des plaques rectangulaires (ailettes) minces, de différentes longueurs, orientées parallèlement à l'écoulement, pour augmenter ainsi le transfert thermique et donc les performances du capteur solaire. Pour un débit de 50kg/hm^2 et un vitrage en polycarbonate, il a trouvé que le capteur à triple vitrage atteint un rendement de 39%, 67%, 68% et 59% avec des longueurs d'ailettes respectives de 2.5, 5.0, 10.0 et 20.0 cm alors que le capteur à double vitrage atteint les valeurs de 38%, 59%, 64% et 56%. Le capteur à double vitrage offre une performance thermique inférieure à celle du triple vitrage. Avec le capteur à triple vitrage, la quantité de rayonnement interceptée et transmise à l'absorbeur est diminuée, mais les pertes globales sont réduites. Pour trouver l'effet de l'espace entre deux vitres sur le rendement thermique d'un capteur solaire plan **BenGuehza et al. [146]** ont fait une étude théorique sur un capteur à double vitrage, ceci afin de minimiser les pertes thermiques par convection. Le système d'équations est résolu en utilisant la méthode des différences finies avec un schéma explicite. Le système algébrique obtenu est résolu par la méthode itérative de Gauss Seidel. Le capteur est de 1m de longueur et 1,1m de largeur, l'espace entre l'absorbeur et la première vitre est de 1,5cm et l'espace entre la première vitre et la deuxième varie entre 0,1cm et 3cm. Ils ont distingué trois zones, entre 0,1cm et 1,5cm, il y a augmentation de la puissance utile P_u , entre 1,5cm et 2 cm la puissance diminue légèrement et entre 2cm et 3cm la puissance tend vers une valeur constante. La même tendance est observée concernant la température du fluide caloporteur et

le rendement. Comme le plastique est une matière de protection contre les casses **D. Njomo [147]** a procédé à une étude numérique du comportement thermique d'un capteur solaire à air avec couverture combinée plastique-vitre, le plastique utilisé ici est le plexiglas et l'absorbeur est du type corps gris ($\alpha = 0,83$). La simulation est faite en régime quasi-stationnaire. Il découle de l'analyse numérique que les performances thermiques de ce capteur sont sensiblement meilleures que celles obtenues dans le cas d'un capteur à double vitrage de même matériau. Les matériaux copolymères ont commencé à s'introduire dans la conception des capteurs solaires. Ainsi, **C. Cristofari et al. [148]** cherchent les performances d'une installation solaire thermique dont le collecteur est entièrement fabriqué en copolymère. Ils ont fait une analyse sur l'épaisseur de l'isolation, le débit et l'épaisseur de la couche du fluide caloporteur. La simulation a été effectuée sur une année de fonctionnement avec des données météorologiques réelles. Les auteurs ont trouvé que l'utilisation des matériaux copolymères réduit le poids du collecteur de 50% par rapport à un collecteur traditionnel. Après cette description générale sur les travaux relatifs aux capteurs solaires plans, nous allons plus particulièrement nous intéresser aux travaux orientés sur la réduction des pertes thermiques avant. Ainsi, **F. Benyelles et al. [149]** ont proposé de placer un isolant « aérogel de silice » au-dessus de l'absorbeur. C'est un matériau de faible conductivité thermique et de forte porosité. Les auteurs ont montré que la température du vitrage ne dépasse pas 20°C pour le capteur avec l'aérogel alors que dans les mêmes conditions elle atteint 50°C pour un capteur classique. Quant à **Vestlund et al. [150]**, ils ont remplacé l'air qui se trouve entre l'absorbeur et la couverture en verre par un gaz inerte. Les résultats ont montré que la perte de chaleur globale peut être réduite jusqu'à 20% lors de la modification de l'air par un gaz inerte (Argon, krypton, Xenon). Cependant un travail est nécessaire pour connaître l'influence de l'épaisseur entre l'absorbeur et la vitre et lorsque le gaz change de température. Une autre façon d'améliorer le rendement et de réduire les pertes avant d'un capteur solaire consiste à insérer entre l'absorbeur et la couverture transparente des partitions. Ces partitions ont l'avantage de bloquer le rayonnement émis par la surface réceptrice et réduire les pertes par convection. Ce procédé a été proposé **Francia [151]** en 1961. Un travail expérimental a été fait par **Metwally et al. [152]** pour déterminer le rendement d'un capteur solaire menu de lamelles rectangulaires transparentes placées dans la lame d'air, les auteurs montrent que l'utilisation de lamelles transparentes améliore considérablement les performances du capteur solaire. Dans un travail de simulation **Hollands et al. [153]** ont placé des partitions en forme de nid d'abeilles dans la lame d'air. Ils ont déduit que, laisser un vide entre le nid d'abeilles et le revêtement sélectif de l'absorbeur peut minimiser le couplage entre la conduction et le

rayonnement. Leurs résultats montrent également que cette technique pourrait diminuer considérablement le transfert de chaleur. **Jami et al [154]** ont étudié numériquement le transfert de chaleur par convection naturelle dans une enceinte inclinée contenant des partitions d'épaisseur très fine et faisant un angle avec la paroi chaude. Dans leur analyse numérique les auteurs ont fait varier la longueur de la partition, le rapport de forme, le nombre de partitions, l'inclinaison des partitions et l'inclinaison de l'enceinte, et ils ont trouvé que la réduction du transfert thermique augmente avec la longueur de la partition quand cette dernière est inclinée et ceci quelle que soit l'orientation de l'enceinte. Ainsi, ils ont conclu que pour $Ra = 5 \cdot 10^5$ et pour toute valeur de l'inclinaison des partitions, le transfert thermique dans le cas de l'enceinte verticale est élevé par rapport à celui du cas de l'enceinte inclinée de 45° . La forme de l'absorbeur a également été explorée pour voir son effet sur les pertes avant du capteur. Ainsi, **H.Abdi et al. [155]** ont étudié expérimentalement et théoriquement deux formes de la plaque absorbante, l'une concave et l'autre convexe. Les résultats montrent que la forme convexe donne un meilleur rendement. Il ressort de cette description, que les pertes thermiques avant restent une préoccupation permanente. Dans les dernières décennies, l'étude de la convection naturelle dans ce type de problème a suscité un très grand nombre de travaux, notamment sous l'aspect numérique, grâce au développement des moyens informatiques. Ainsi, dans ce qui suit, nous allons décrire les différents travaux relatifs aux écoulements et transferts dans les cavités fermées. Parmi les paramètres susceptibles de modifier l'écoulement de convection naturelle en cavité : le nombre de Rayleigh, l'inclinaison de la cavité par rapport à l'horizontale, le rapport d'aspect, le nombre de Prandtl, la présence de partitions, ... Beaucoup de travaux se sont intéressés à l'effet de l'inclinaison et du nombre de Rayleigh sur le développement de l'écoulement. Ainsi, pour une cavité de rapport d'aspect égal à 44, **Hollands et al. [156]** ont cherché à déterminer le nombre de Rayleigh critique pour les couches fluides horizontales, verticales et inclinées. Ils ont trouvé que le nombre de Rayleigh critique dans le cas horizontal est (à 1% près) égal à la valeur critique de Rayleigh-Bénard (1708) dans une cavité à extension infinie. Dans le cas de la cavité inclinée et pour des angles d'inclinaison avec l'horizontale variant de 15° à 85° , ils ont trouvé que le transfert de chaleur décroît de façon monotone avec l'accroissement de l'angle d'inclinaison. **El Sherbiny [63]** s'est intéressé au transfert de chaleur et a établi des corrélations du nombre de Nusselt ; celles-ci dépendent de l'angle d'inclinaison et sont valides pour une certaine gamme du nombre de Rayleigh ($10^2 < Ra < 2 \cdot 10^6$). Elles sont valables pour un allongement de la lame égale à 20 et pour un angle d'inclinaison variant de 120° à 180° .

Pour $\alpha = 180^\circ$, on a :

$$Nu = \left[1 + (0,212 \cdot x \cdot Ra^{0,136})^{11} \right]^{1/11}$$

Pour $\alpha = 120^\circ$, on a :
$$Nu = \left[1 + (0,0566 \cdot x \cdot Ra^{0,332})^{4,76} \right]^{1/4,761}$$

Pour $120^\circ < \alpha < 180^\circ$, on a :
$$Nu = Nu(180^\circ) + \frac{180 - \alpha}{60} \cdot [Nu(120^\circ) - Nu(180^\circ)]$$

En utilisant l'eau comme fluide caloporteur **Azevedo et al. [157]** ont effectué une étude sur des canaux inclinés. Ils ont trouvé que le transfert était contrôlé par une fonction de puissance du produit du nombre de Rayleigh, du facteur de forme et du cosinus de l'angle d'inclinaison, le transfert de chaleur par rayonnement a été négligé dans ce travail. **Inaba [158]** a pu visualiser l'écoulement dans des plans longitudinaux et transversaux en faisant une étude sur la convection naturelle dans une cavité, rectangulaire, inclinée pour différents angles d'inclinaison allant de 0° à 180° par rapport à la verticale et ceci pour des rapports d'aspect de 5 à 81 et des nombres de Rayleigh de $1,2 \cdot 10^3$ et $2 \cdot 10^6$. Il a également établi des corrélations pour le transfert de chaleur. Une étude expérimentale et numérique a été faite par **Hamady et al. [159]** pour étudier l'effet de l'inclinaison sur les caractéristiques locales du transfert thermique en convection naturelle stationnaire dans une enceinte remplie d'air, différentiellement chauffée, avec un rapport de forme de section droite. Des mesures des nombres de Nusselt locaux et globaux sont réalisées pour différents angles d'inclinaison. Les configurations d'écoulement, les fonctions de courant et les isothermes pour différents angles d'inclinaison sont fournies. **Grondin et al. [160]** ont cherché à corréler les résultats numériques du flux de chaleur obtenu, en résolvant par méthode aux différences finies les équations qui décrivent la convection naturelle dans une couche de fluide inclinée, différentiellement chauffée. Ils ont trouvé que la corrélation la plus réaliste est celle proposée par **[161-162]** de la forme $\overline{Nu} = A \cdot Ra^a \cdot l^{-b}$ et elle n'existe qu'en dehors du régime conductif. Pour un allongement l tel que $4 \leq l \leq 32$, un nombre de Rayleigh variant entre 2500 et $2 \cdot 10^5$ et une inclinaison α entre 30° et 120° , ils ont trouvé que b est pratiquement indépendant de ϕ , par contre a diminué et A augmente notablement lorsque α varie de 30° à 120° . L'influence du milieu participatif sur l'écoulement dans une cavité différentiellement chauffée a été examinée expérimentalement et numériquement par **Ozoe et al. [163]**. Les auteurs ont réalisé une étude numérique et expérimentale de la convection laminaire à l'intérieur d'un long canal rectangulaire en utilisant comme fluide caloporteur l'huile de silicone et l'air pour différents rapports d'aspect et pour des valeurs du nombre de Rayleigh de 310^3 et 10^5 . L'effet de l'inclinaison et le rapport d'aspect sur le taux de transfert thermique ont été mesurés expérimentalement. **Crunkleton et al. [164]** ont utilisé l'Étain ($Pr = 0,008$) pour étudier numériquement la convection naturelle dans une cavité cubique inclinée de 0° , 5° , 10° et 30° , chauffée par le bas. Ils ont trouvé que la vitesse augmente significativement avec l'augmentation de l'angle d'inclinaison et avec l'augmentation de Ra . **Tari et al. [165]** ont

utilisé la méthode basée sur l'approche spectrale pour analyser l'écoulement tridimensionnel de la convection naturelle de l'air se trouvant entre deux plaques parallèles inclinées. En observant le changement des structures de l'écoulement, les flux thermiques maximal et minimal ont été déterminés en fonction de l'angle critique d'inclinaison. Lorsque l'angle d'inclinaison augmente, les rouleaux convectifs suivant la direction transversale deviennent dominants et les rouleaux longitudinaux commencent à se briser. **Soong et al. [166]** ont également présenté une étude numérique de la convection naturelle dans une enceinte inclinée à deux dimensions, différentiellement chauffée, à l'état instationnaire pour des nombres de Rayleigh compris entre $10^3 < Ra < 2.10^4$ et d'angles d'inclinaison entre $0 < \alpha < 90^\circ$. Pour un rapport de 4, ils ont trouvé que la structure multicellulaire domine pour les faibles inclinaisons alors que pour les fortes inclinaisons le modèle unicellulaire est en vigueur. Pour suivre l'évolution de l'écoulement à fort nombre de Rayleigh en fonction des valeurs du rapport d'aspect, **Hernandez et al. [167]** ont fait une étude numérique tridimensionnelle sur la convection naturelle de l'air se trouvant dans une cavité parallélépipédique chauffée par le bas. Pour un nombre de Rayleigh égal à 810^3 , ils ont remarqué que la structure de l'écoulement est toroïdale et qu'elle évolue d'un écoulement unicellulaire pour les faibles rapports d'aspect (1-2) à des écoulements multicellulaires pour les plus forts rapports d'aspect (3-5). Le nombre de Nusselt croît de manière significative avec le rapport d'aspect. **Dulieu et al. [168]** ont mis en lumière le caractère de la convection laminaire dans le cas des faibles angles et lorsque la paroi supérieure est la plus chaude. La circulation est caractérisée, pour les nombres de Rayleigh assez grands, par l'existence de deux nappes le long des parois supérieure et inférieure et d'une région de circulation stratifiée où se développe une circulation faible de sens contraire. Certains ont étudié expérimentalement les bifurcations dans de telles cavités ainsi que l'influence de l'inclinaison et l'effet tridimensionnel, on peut citer le travail de **Benkhelifa et al. [169]** où ils ont pu visualiser la convection naturelle turbulente de Rayleigh Bénard pour des nombres de Rayleigh de l'ordre de 10^8 grâce à une étude expérimentale dynamique par PIV-2D. Ils ont également examiné l'effet tridimensionnel de l'écoulement. La cellule parallélépipédique étudiée a deux parois horizontales isothermes de surface $48 \text{ cm} * 12 \text{ cm}$ et d'épaisseur 12 cm , donc de rapport de forme vertical égale à 4. Les résultats montrent la formation de trois rouleaux contrarotatifs. Ces derniers persistent pour des grands écarts de températures. Deux petits tourbillons secondaires se forment aux extrémités. Ceci est dû à la non adiabaticité des extrémités verticales du dispositif expérimental. D'autre part, les résultats des champs de vitesses dans deux plans orthogonaux ont permis une première estimation de l'énergie cinétique turbulente. Le transfert de chaleur

par convection naturelle combiné au rayonnement dans une enceinte rectangulaire a été traité la première fois par **Larson et al. [170]**. Ils ont examiné les effets du transfert par rayonnement et par conduction sur les parois de l'enceinte. Il découle de ce travail que le rayonnement domine le transfert de chaleur dans l'enceinte et change significativement la structure de l'écoulement du fluide dans cette dernière. D'autres études ont tenu compte du rayonnement dans les cavités, nous citons le travail de **Lan et al. [171]** où ils ont étudié l'influence du rayonnement des parois, du nombre de Rayleigh et de l'épaisseur optique pour un écoulement tridimensionnel dans une cavité rectangulaire chauffée par le bas. Les parois sont supposées noires et le fluide un gaz gris. Les instabilités de l'écoulement et les bifurcations ont été discutées. Ils ont trouvé qu'en tenant compte du transfert de chaleur radiatif, le Rayleigh critique est augmenté, l'écoulement devient plus stable et les calculs suggèrent que le nombre de Rayleigh modifié peut être défini en utilisant la somme de la diffusivité moléculaire ainsi que la diffusivité radiative dans le dénominateur. Leurs résultats ont été comparés avec des résultats expérimentaux existants. **Alvadro et al. [172]** ont fait une étude stationnaire à deux dimensions d'une cavité remplie d'air, les équations de mouvement et d'énergie étaient résolues par la méthode des volumes finis. Les lignes de courant, les isothermes et le nombre de Nusselt sont déterminés pour un nombre de Rayleigh allant de 10^4 à 10^6 et une inclinaison α entre 15° et 35° . Les résultats ont indiqué que le rayonnement couplé à la convection naturelle a un grand effet sur la structure de l'écoulement et sur le transfert thermique moyen. En effet pour le cas découplé l'augmentation du rapport d'aspect et ou le nombre de Rayleigh peut réduire les forces de flottabilité de sorte que le modèle multicellulaire disparaît, mais pour le cas couplé le modèle multicellulaire est observé dans la plus part des cas. Le transfert thermique augmente quand l'inclinaison augmente excepté quand l'écoulement change d'une structure multicellulaire à une structure unicellulaire. De même le transfert thermique diminue quand le rapport d'aspect augmente. Une corrélation globale pour le nombre de Nusselt a été proposée. **M. A. Hassab et al. [173]** ont étudié la stabilité neutre d'un fluide visqueux absorbant émissif, diffusant et non gris contenu dans une cavité allongée avec une inclinaison variant entre 0° et 180° et soumise à des conditions aux limites de convection. Ils ont déterminé à la fois pour les rouleaux tourbillonnaires longitudinaux et transverses les effets du nombre de Biot, de l'épaisseur optique, de l'albédo de diffusion, de l'émissivité et de l'angle d'inclinaison ϕ sur les conditions de stabilité dans le gaz. Les résultats ont montré que le rayonnement outre son effet stabilisant, déplace de manière significative l'angle de transition. **Balaji et al. [174]** ont étudié numériquement l'interaction du rayonnement des surfaces sur la convection. Ils ont conclu que le

rayonnement était non négligeable même aux faibles émissivités et que cela pourrait expliquer les différences souvent notées entre les résultats expérimentaux et les corrélations théoriques. Un autre moyen pour réduire la convection naturelle dans les cavités consiste à introduire des partitions à l'intérieur de la cavité. Ainsi, **Anderson et Bejan [175]** ont étudié théoriquement et expérimentalement la réduction du transfert thermique à travers une enceinte avec une ou deux cloisons placées au milieu de celle-ci. Ils ont conclu que le nombre de Nusselt moyen est proportionnel à $(1 + N_p)^{-0.61}$, N_p étant le nombre de cloisons. Egalement d'autres chercheurs se sont intéressés à l'effet des cloisons, ainsi **Tong et al. [176]** ont étudié l'effet d'une cloison verticale fine sur la convection naturelle dans une enceinte remplie d'air. Ils ont étudié l'influence de la position de la cloison sur le nombre de Nusselt et ont montré que la position au milieu de l'enceinte produisait la plus grande réduction sur le transfert thermique. Ils ont également montré que le partitionnement pouvait produire une réduction sur le transfert thermique comparable à celle d'un isolant poreux comme la fibre de verre remplissant la cavité. **Ho et al. [89]** ont étudié la convection naturelle à travers une enceinte rectangulaire avec une cloison épaisse. Leurs résultats montrent que le transfert thermique est considérablement atténué par la présence de la cloison. Ils ont aussi mis en évidence l'influence de la conductivité thermique de la cloison sur le nombre de Nusselt. Plus récemment, **Amraoui et al. [90]** ont présenté un travail numérique traitant de la convection naturelle couplée au rayonnement dans une cavité d'air. Cette dernière est équipée de partitions. Les auteurs sont arrivés aux conclusions suivantes : Le rayonnement thermique affecte la structure des isothermes et des lignes de courant et augmente considérablement le nombre de Nusselt moyen global (convectif et radiatif). Ces effets sont d'autant plus importants que le nombre de Rayleigh Ra est grand. Les longueurs de la partition L produisent un changement remarquable dans le transfert thermique. Indépendamment de la valeur du nombre de Rayleigh, le nombre de Nusselt moyen augmente avec l'augmentation de L_p .

En 2011, **Amar et al. [91]** ont fait une étude qui porte sur un essai expérimental de réalisation d'un concentrateur solaire miniature à base de fibre optique à plat de lumière et relié à un accumulateur d'eau chaude. Le plat du prototype est de 150cm de diamètre. Dans l'essai, la lumière du soleil concentrée a été collectée et transportée dans une fibre optique à une surface sélective dans le réservoir de stockage. Cette surface absorbe le rayonnement qui reste emprisonné à l'intérieur et échange de la chaleur avec le fluide caloporteur du réservoir dont la température peut atteindre 70° C. **N. Bellel [177]** propose l'étude de boîte cylindrique avec un noyau sphérique en utilisant deux types de récepteurs, la première cylindrique fermée et la deuxième formé d'une bobine cylindrique à l'intérieur d'un récepteur. Les auteurs ont

déterminé quelques caractéristiques de fonctionnement tel que la température de l'absorbeur, la puissance et l'efficacité du dispositif étudié. Le bilan énergétique est utilisé pour déterminer les caractéristiques thermiques de l'absorbeur afin de calculer la température concentré au capteur de surface. Dans le premier absorbeur, l'équation de la chaleur est résolue par la méthode des différences finies implicite pour déterminer la différence de température entre les bords de la bobine. La comparaison des résultats numériques avec ceux obtenus par une étude expérimentale menée en parallèle montre une bonne fiabilité du code informatique développé. **F. Z. Ferahta et al. [178]** ont étudié numériquement l'influence de l'épaisseur de la lame d'air entre l'absorbeur et le verre sur les pertes par convection dans le verre.

En 2012, **S. Saulich et al. [179]** ont présenté des travaux sur une approche holistique pour améliorer la conception globale des systèmes de climatisation solaire ; méthodes de contrôle nouvellement développées pour l'hydraulique ont été utilisés pour redessiner une usine pilote existante. Les mesures prises à partir de l'émission de tout nouveau système qui ciblent le fils de commande de température à une augmentation de l'efficacité du refroidissement solaire(SCE) de facteur de 81% par rapport au système de pilote original. En plus des améliorations dans la conception du système, de nouveaux facteurs d'efficacité pour l'étalonnage des systèmes de refroidissement solaires sont présentés. L'efficacité de l'approvisionnement solaire(SSE) de facteur fournit un moyen de quantifier la qualité des systèmes de recharge solaires thermiques par rapport à la chaleur utilisable pour conduire le processus de sorption. Le produit de l'ESS à la CdP déjà établi du refroidisseur, conduit au facteur de SCE qui, pour la première fois, propose une méthode d'analyse comparative claire et concise de la conception globale des systèmes de climatisation solaire. Alors, **M. D'Antoni et al. [180]** ont étudié la littérature produite à ce jour sur la haute capacité des capteurs solaires thermiques, dans le but de mettre en évidence le large éventail de variantes et applications possibles et de partager les informations recueillies ici pour les développements futurs. Ils ont vu surtout les capteurs solaires thermique-Massive. L'examen est axé sur les technologies liquide plutôt de l'air, en raison de leur applicabilité directe aux systèmes qui fournissent uniquement de l'eau chaude sanitaire ainsi que combinée d'eau chaude sanitaire et le chauffage des locaux. L'attention sur ce sujet se justifie par l'augmentation du nombre de publications et de concepts énergétiques qui traitent de l'utilisation des structures opaques que des absorbeurs solaires à faible coût et de l'efficacité des capteurs similaires à basse température pour les systèmes solaires conventionnels.

En 2013, **A. C. Mintsa Do Ango et al. [181]** présentent des simulations numériques visant à optimiser la conception de capteurs solaires en utilisant les polymères comme matériaux

absorbeurs. Les absorbeurs de capteurs solaires sont généralement faits de cuivre ou d'aluminium et, même si elles offrent de bonnes performances, ils sont par conséquent coûteux. En comparaison, en utilisant un polymère peut améliorer les capteurs solaires par compétitivité économique. Ces auteurs proposent une étude numérique d'un nouveau design pour un capteur solaire pour évaluer l'influence des paramètres de conception (épaisseur de la lame d'air, la longueur du collecteur) et des conditions de fonctionnement (débit massique, le rayonnement solaire incident, la température d'entrée) sur l'efficacité. Ce travail à présenter les principales tendances concernant les principaux paramètres qui influent l'efficacité du polymère sur capteur solaire.

En 2014, **J. L. Rodríguez-Muñoz et al. [182]** ont utilisé les polymères pour examiner les technologies de réfrigération diffusion d'absorption afin de promouvoir leurs principales caractéristiques en termes de processus de réfrigération, de leurs applications, leurs tendances actuelles et leurs limites, entre autres. Plus de 70 publications dans ce domaine ont été analysés pour conclure que cette étude représente une alternative complémentaire et viable dans le domaine des technologies de réfrigération pour faible capacité de refroidissement, en raison d'une augmentation de la demande actuelle d'appareils de réfrigération et de climatisation. **C I. Ferreira et al. [183]** ont examiné de leurs coté les systèmes de refroidissement pour les bâtiments résidentiels et publics à la fois du Sud et du nord de l'Europe et étudie les solutions les plus prometteuses lorsque l'énergie solaire est utilisée pour répondre à la demande de refroidissement de ces bâtiments alors que les températures de rejet de chaleur sont élevées. Les deux voies électriques et thermiques solaires sont considérées. Ils ont conclu que les cycles de compression de vapeur actuellement en combinaison avec des capteurs solaires conduisent à des solutions économiquement plus attrayantes surtout avec l'utilisation des polymères comme matériaux fonctionnels par les quelles les cycles de compression de vapeur entraînés par l'électricité fournie par les collectionneurs paraboliques et les moteurs Stirling donnent de meilleure solution à sorption que les cycles d'absorption à double effet équipé de collecteurs creux et capteurs solaires . De même, **M. Hamed et al. [184]** ont fait une étude numérique sur les capteurs solaires plans pour déterminer la performance optimale et les paramètres de conception de ces systèmes à l'énergie solaire de conversion de l'énergie thermique. Le collecteur est utilisé pour fournir de l'eau chaude. Il se compose de trois éléments principaux, à savoir un couvercle transparent, un absorbeur en polymère et un fluide de transfert. Une simulation en régime transitoire a été développée pour caractériser le comportement dynamique. Le modèle établi concerne l'analyse de l'équilibre énergétique. Un ensemble d'équations représentant ce modèle a été résolu simultanément et

les résultats sont utilisés pour étudier l'effet de différents paramètres sur les performances du capteur telles que la température de sortie d'eau et le coefficient global de perte de chaleur. La méthode globale a été développée sur des données environnementales qui sont caractéristiques de la ville de Gabès en Tunisie. En Algérie, **R. Ihaddadene et al. [185]** ont présenté une étude expérimentale sur les influences de débit volumétrique et l'angle d'inclinaison sur les performances d'un collecteur solaire pilote (ET200) et qui se compose d'un capteur solaire plan, un réservoir de stockage, une armoire de contrôle et de commande et d'une lampe de forte puissance simulant l'énergie solaire. Pour une intensité de rayonnement de 1,033 kW/m² et l'angle d'inclinaison de 0°, les résultats ont montré que l'efficacité du collecteur suivi d'une relation linéaire par rapport à la vitesse d'écoulement ; $\eta = 0,68 \times Q_v + 49,79$ et a présenté un coefficient de corrélation (R²) de 0,9898. De même, l'augmentation de l'angle d'inclinaison de 0° à 60° augmente l'efficacité du collecteur. Une relation linéaire $\eta = 0,43 \times \alpha + 53,07$ avec un coefficient de détermination (R² = 0,967) concerne l'efficacité du collecteur à l'angle d'inclinaison. Il est important de conserver des débits massiques élevés et de prendre l'angle de collecteur à 0° afin d'atteindre sa pleine signification efficacité (eau de chauffage).

Cette étude est très intéressante car elle nous a permis de nous orienter vers l'utilisation des polymères comme matériaux fonctionnels dans les dispositifs solaires à effet de serre.

Concernant les problèmes relatifs à leurs caractéristiques de vieillissement, plusieurs auteurs se sont intéressés et ont montrés que les polymères sont susceptibles particulièrement au vieillissement thermique comme le cas de l'exposition solaire. D'après Hamid et Hussain [50], la détérioration d'un matériau polymère dépendrait de son environnement et de son comportement face à ce dernier. Parmi les polymères produits annuellement, plus de la moitié seraient utilisés en environnement extérieur. Pour de telles utilisations, les principaux facteurs de dégradation recensés, par ces auteurs [186] sont : les radiations UV, la pluie, l'humidité, les contaminants atmosphériques, les variations saisonnières de température et le taux d'oxygène dans l'air. De plus, ils précisent que tous ces facteurs contribueraient à limiter la performance des polymères. Concernant les PE, d'après Hsuan et Koerner [186], la dégradation se résumerait en trois étapes successives :

- une période d'incubation, pendant laquelle les antioxydants disparaîtraient par perte physique ou consommation chimique : étape A,
- la dégradation chimique du PE par oxydation : étape B,
- une brutale auto-accélération de la dégradation menant à la fragilisation du PE : étape C.

La perte des antioxydants protégeant le polyéthylène a intéressé de nombreux auteurs [187-58]. Selon Han et al. [187] et Möller et Gevert [188], la migration des antioxydants du PE vers l'environnement extérieur (perte physique) et la consommation par réaction avec les produits issus de l'oxydation du PE (perte chimique) seraient les deux phénomènes prépondérants régissant la stabilité des polyéthylènes. Smith et al. [58] ont étudié, par des mesures de temps d'induction à l'oxydation (TIO), les pertes en antioxydant de tuyaux en PE_{md} (polyéthylène moyenne densité) exposés sous air et immergés dans l'eau. Afin de modéliser ces pertes, ces auteurs ont développé un modèle tenant compte des pertes par diffusion, évaporation, extraction et consommation chimique. Concernant cette dernière, Smith et al. prédisent une perte n'excédant pas 0,005 mol/l à 95°C après 3660h d'exposition sous air et dans l'eau. En précisant que cette valeur est du même ordre de grandeur que la dispersion des résultats expérimentaux, ces auteurs suggèrent que la consommation par la réaction chimique reste négligeable face aux pertes physiques par extraction ou évaporation. Ainsi dans les paragraphes suivants, nous nous intéresserons préférentiellement aux pertes physiques par extraction et évaporation. Nous aborderons une partie théorique avant de présenter les paramètres régissant les vitesses de perte physique dans le cas des films minces. Un court paragraphe sera toutefois consacré à la description des mécanismes de consommation chimique. Cependant, cette description sera faite après celle des mécanismes de thermo et photooxydation car la consommation chimique des antioxydants interviendrait, en partie, par réaction avec les produits issus de l'oxydation du polymère. Calvert et Billingham [64] attestent que la perte physique des antioxydants dépend essentiellement de trois facteurs : la solubilité de l'antioxydant, la vitesse à laquelle il s'évapore ou s'extrait de la surface du polymère et enfin, de son coefficient de diffusion au sein du polymère. Dans le cas de l'évaporation, par exemple, en faisant l'hypothèse que la volatilité d'un adjuvant est proportionnelle à la pression de vapeur saturante et que la loi de Raoult est valable à toutes les concentrations d'antioxydants, Billingham [189] suggère d'écrire la vitesse de perte de masse

par unité de surface de la façon suivante :

$$\frac{dm}{dt} = \frac{V \cdot C}{C_s} = H \cdot C \quad (40)$$

Avec V ($\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$) le coefficient de volatilité, C la concentration d'antioxydants dans la couche superficielle, C_s la concentration d'antioxydants à saturation et $H = \frac{V}{C_s}$ paramètre de transport de masse caractéristique du couple polymère antioxydant.

Fayolle et Verdu [190] affirment que la précédente loi ne peut s'appliquer que dans le cas d'une diffusion suffisamment rapide afin d'assurer une répartition homogène de l'antioxydant dans toute l'épaisseur du polymère, ce qui ne serait possible que dans le cas d'échantillon de faibles épaisseurs tels que les fils ou les films. Selon ces mêmes auteurs, il existerait une

épaisseur critique ($2l$) en deçà de laquelle la perte physique en antioxydants serait limitée par l'évaporation et au-delà de laquelle elle serait gouvernée par la diffusion. Calvert et Billingham [189] se sont intéressés à la détermination de cette épaisseur critique. Partant de l'équation de Crank [191], ils ont développé un modèle qui suggère l'existence de trois régimes de perte en antioxydants pour un échantillon d'épaisseur $2l$ caractérisé par un paramètre L :

- Dominé par la diffusion dans le cas où $L > 10$,
- Contrôlé par la vitesse de diffusion et de désorption pour $0,6 < L < 10$,
- Exclusivement limité par la vitesse de désorption pour $L < 0,6$.

L'équation générale de perte physique s'écrit :
$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot L^2 \cdot \exp(-\beta_n^2 \cdot T)}{\beta_n^2 \cdot (\beta_n^2 + L^2 + L)} \quad (41)$$

Où M_t est la quantité d'antioxydants à l'instant t , M_∞ est la quantité d'antioxydant après un temps infini, $L = l \cdot H/D$, $T = D \cdot t/l^2$, Et β un paramètre positif défini tel que $\beta \tan \beta = L$, l est la demi-épaisseur du film polymère, H est la constante de transfert de masse, D est le coefficient de diffusion.

En se basant sur des valeurs de solubilité, coefficient de diffusion et volatilité de l'antioxydant de la littérature, Calvert et Billingham [64] précisent, à l'aide de leur modèle, que dans le cas du polyéthylène basse densité (PEbd) stabilisé à partir de 2,6-di-tert-butyl-4-méthylphénol (BHT) :

- La vitesse de perte physique serait principalement limitée par la désorption dans le cas de fibres et films minces (typiquement $2l < 10 \mu\text{m}$),
- La diffusion contrôlerait la vitesse de perte physique dans le cas de films épais (typiquement $2l > 1 \text{mm}$).

Après cette partie théorique sur les pertes physiques, nous poursuivons avec la description de l'influence de divers facteurs, tels que la température et la masse molaire des adjuvants, sur la vitesse de perte physique en antioxydants.

➤ Perte physique par évaporation : Möller et Gevert [192] ont étudié, dans le cas de films de PEbd, la perte en antioxydant phénolique au cours d'un vieillissement thermique à 100°C . En se basant sur des analyses par spectroscopies UV et IR, ils ont observé une diminution des absorbances UV à 282 nm et IR à 1740 cm^{-1} qu'ils ont attribué respectivement aux groupements phénolique et ester. A l'aide d'une droite de calibration obtenue avec des films de PEbd stabilisés entre 0 et $0,12\% \text{ g/g}$, ces auteurs corrèlent les diminutions des absorbances aux pertes de masse liées au départ des antioxydants. Ils ont ainsi montré qu'à 100°C , les pertes observées en IR et UV sont comparables et représenteraient 90% de la quantité initiale d'antioxydants après 2500 heures d'exposition. De plus, ces mêmes auteurs se sont intéressés

à l'influence de la température sur la vitesse de perte physique des antioxydants phénolique. En utilisant la même méthode que celle décrite précédemment, ils ont mis en évidence que la vitesse d'évaporation des antioxydants était une fonction croissante de la température. Ces auteurs concluent que les vitesses de perte par désorption obéiraient à la loi d'Arrhénius :

$$\alpha = \alpha_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T}\right) \quad (42)$$

Où α_0 est le facteur pré-exponentiel, E_a l'énergie d'activation, R la constante universelle des gaz parfaits et T la température absolue.

Des conclusions similaires ont été faites par Han et al [186], dans le cas de films minces de PE stabilisés par des antioxydants de type phénolique.

Möller et Gevert [192] se sont également intéressés à l'influence de la masse molaire des antioxydants sur leur vitesse d'évaporation du PEbd. En analysant par spectroscopies IR et UV, la perte d'antioxydants phénolique de masse molaire comprise entre 292 g/mol et 530g/mol, ces auteurs montrent que la vitesse d'évaporation est une fonction décroissante de la masse molaire. Les auteurs en tirent les conclusions suivantes :

- L'énergie d'activation de l'évaporation augmenterait avec la masse molaire des antioxydants, passant de 70,9 kJ/mol à 103 kJ/mol respectivement pour le phénol de plus faible masse molaire et celui de masse molaire la plus élevée,
- Le facteur pré-exponentiel α_0 serait, de son côté, indépendant de la masse molaire.

Au cours d'une étude précédente sur les mêmes systèmes PEbd-antioxydants phénolique, Möller et Gevert [192] ont décrit l'influence de la température et de la masse molaire des antioxydants sur leur coefficient de diffusion (D). Pour cela, ces auteurs ont réalisé un empilement de films de PEbd contenant un excès en antioxydants et l'ont mis en sandwich entre deux empilements de films de PEbd pur, puis exposé cet ensemble à des températures comprises entre 30°C et 60°C. Ils ont ensuite déterminé la diffusion des antioxydants phénolique en suivant par spectroscopie IR l'absorbance à 1740cm^{-1} (attribuée aux fonctions ester) sur chaque film. Ils ont trouvé que :

- La diffusion des phénols est une fonction croissante de la température,
- Le coefficient de diffusion obéirait à la loi de type Arrhénius,
- Le facteur pré-exponentiel α_0 augmenterait aussi avec la masse molaire des antioxydants, passant de 63,6 à 14800 m^2/s respectivement pour des phénols de 292 g/mol et 530 g/mol,
- L'énergie d'activation de la diffusion augmenterait avec la masse molaire des antioxydants, passant de 87 kJ/mol à 104 kJ/mol respectivement pour des phénols de 292 g/mol et 530 g/mol,

Möller et Gevert [192] précisent, enfin, que le rapport des vitesses d'évaporation entre un phénol de faible masse molaire ($M_w = 292 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$) et de masse molaire élevée ($M_w = 530 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$) serait de 3000 à 80°C et de l'ordre de 10^5 à 40°C. En revanche, le rapport des coefficients de diffusion, de ces mêmes antioxydants passerait de 2 à 80°C à 4 à 40°C. Ils concluent que, contrairement à la vitesse d'évaporation, le coefficient de diffusion dépendrait peu de la masse molaire des antioxydants. Moisan [193] a étudié, à l'aide d'un montage similaire, le coefficient de diffusion à 50°C, d'adjuvants de masse molaire M comprise entre 220 g/mol et 1177 g/mol dans le PE. Il a mis en évidence une dépendance de ce coefficient avec M . L'auteur observe que le coefficient de diffusion est globalement une fonction décroissante de la masse molaire. Procédant à des expériences similaires entre 23°C et 90°C, Moisan [193] déduit que le coefficient de diffusion D obéit à la loi d'Arrhénius :

$$D = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_d}{R \cdot T}\right) \quad (43)$$

Avec D_0 le facteur pré-exponentiel, E l'énergie d'activation de la diffusion, R la constante des gaz parfaits et T la température absolue.

L'influence de divers facteurs sur la vitesse d'évaporation nous a permis de mettre en évidence que la diffusion et l'évaporation sont des fonctions croissantes de la température. De plus, l'évaporation serait une fonction décroissante de la masse molaire. Cette dépendance apparaît cependant plus controversée pour la diffusion. Nous allons maintenant nous intéresser aux pertes physiques par extraction.

Les différents produits de dégradation : D'autres auteurs se sont intéressés à la nature des différents produits formés lors de l'oxydation. Gugumus [194] a étudié, par spectroscopie IR, l'oxydation de films de PE de 500 μm d'épaisseur exposés dans l'air à 80°C. Il a observé deux modifications du spectre infrarouge : L'apparition d'un massif vers 1715 cm^{-1} attribué aux carbonyles et l'apparition de deux pics situés à 3550 cm^{-1} et 3410 cm^{-1} attribués respectivement aux hydroperoxydes libres et liés. D'autre part, Zanetti et al. [195] révèlent, par analyse IR des plaques de PE dégradées dans l'air entre 200°C et 500°C, que le massif des carbonyles serait constitué de la superposition de plusieurs pics liés aux lactones (1778 cm^{-1}), esters (1770-1740 cm^{-1}), cétones saturées et insaturées (1718 cm^{-1} et 1698 cm^{-1}) ainsi qu'aux acides carboxyliques (1710 cm^{-1}). D'autres auteurs ont montré, par analyse IR et chimiluminescence, la présence d'aldéhydes [196][71]. Néanmoins, selon les résultats d'Iring et al. [84] sur un PE exposé entre 130°C et 170°C dans l'air, les aldéhydes réagiraient très vite en présence d'oxygène et leur concentration resterait trop faible pour être détectée. De plus, selon Adams [197], l'oxydation des aldéhydes mènerait majoritairement à la formation d'acides carboxyliques. En plus de l'oxydation des aldéhydes, Lacoste et al. [119] attribuent

la formation des acides à l'attaque d'un hydroperoxyde par un radical alkyl ou peroxy. Un autre mécanisme a été mis en avant par Iring et al. [84] qui est basé sur l'isomérisation des radicaux peroxy, néanmoins le manque d'étapes intermédiaires dans le schéma mécanistique proposé ne nous permet pas de juger de la pertinence de ce dernier. Costa et al. [120] imaginent d'autres voies réactionnelles des aldéhydes. D'après ces auteurs, un aldéhyde réagirait préférentiellement avec un radical alkyl et une molécule de dioxygène pour former un peracide. Concernant les γ -lactones, Iring et al. [84] ont proposé un mécanisme de formation dérivant du schéma proposé par Adams [197]. Par la suite, d'autres mécanismes de formation des lactones ont été proposés. A titre d'exemple, Gugumus [107], a corrélé la présence de lactones à des réactions inter et intramoléculaires des 1,4 dihydroperoxydes et des 1,4 hydroxy-hydroperoxydes. Cependant, à notre connaissance, ce dernier mécanisme n'a pas été repris par d'autres auteurs. Après s'être intéressé aux mécanismes de thermo-oxydation, nous poursuivrons l'étude par une description des mécanismes de photo-oxydation et des principaux facteurs influençant la cinétique de ce phénomène.

VI. Conclusion :

Différents types de matériaux sont utilisés dans les capteurs solaires comme : Absorbants de chaleur, isolants thermiques et transparents à l'infrarouge. Ils dépendent de leurs caractéristiques physico-chimiques comme : L'absorbance, la transmittivité, l'émissivité, etc. Ils peuvent être de nature métallique ou polymères. Les matériaux métalliques présentent l'avantage de conductivité thermique élevée mais sont susceptibles à la dégradation par corrosion. Les matériaux polymères présentent l'avantage d'être légers, d'avoir la possibilité de teinter le produit dans la masse. Toutefois, ils ont une mauvaise conductibilité thermique, et sont susceptibles à un vieillissement dû au rayonnement U.V et d'avoir une tenue médiocre aux températures élevées. Le polyéthylène présente deux états amorphes et semi-cristallins. La configuration la plus stable est la maille orthorhombique. A l'état amorphe, les macromolécules linéaires sont imbriquées de façon complexe et leur comportement dépend de la température. Le matériau lors d'une exposition aux UV peut entraîner une décoloration et une diminution sensible des qualités intrinsèques du matériau. L'addition du noir de carbone permet d'augmenter de manière considérable de cette tenue aux UV. Il présente l'avantage d'être totalement inerte chimiquement aux températures conventionnelles. Son comportement en vieillissement est caractérisé par une dégradation souvent irréversible de leur propriété physique, chimique ou mécanique. Le vieillissement thermique est prononcé à des températures prolongées ou dépassant le seuil de résistance. Plusieurs auteurs se sont intéressés à ce type de vieillissement qui diffère de la thermo-oxydation. Nous présenterons

dans le chapitre suivant les matériels et les méthodes utilisées pour la caractérisation du matériau d'étude du point de vue physico-chimique et du point de vue vieillissement. Comme application de l'exposition solaire, nous avons utilisé trois types de capteurs solaires dont un prototype de distillation solaire.

VII. Références bibliographiques :

- [1] M. R. Yaiche, A. Bouhanik, « Atlas solaire Algérien », CDER Alger, 2013.
- [2] C. Chauviagnet, « Energie solaire Dans le bâtiment », EYROLLES, 1881.
- [3] J. A. Duffie, W. A. Beckman, « Solar Energy Thermal Processes », Wiley - Interscience publication, 1974.
- [4] J. F. Kreider, B. Colorado, « Medium and High Temperature Solar Processes », ACADEMIC PRESS, New York San Francisco London, 1979.
- [5] M. A. Azzi, « Cours de TEC324 : Energie Solaire », Université de Tlemcen, 2005.
- [6] J. Crabol, « transfert de chaleur », Edition Masson, paris, 1989.
- [7] J. F. Sacadura, « Initiation aux transferts thermique », Edition TEC & DOC, 2000.
- [8] S. H. Hamid, Handbook of polymer degradation, CRC, 2000.
- [9] M. Le Huy, G. Evrard, “Methodologies lifetime predictions of rubber using arrhenius and wlf models”, Die Angewand Makromolekulare Chemie, 261, 135–142, 1999.
- [10] R. M. Koerner, A. E. Lord Jr, Y. H. Hsuan, “Arrhenius modeling to predict geosynthetic degradation”, Geotextiles and Geomembranes, 11, 151–183, 1992.
- [11] Y. Hsuan, M. Li, “Temperature and pressure effects on the oxidation of high-density polyethylene geogrids”, Geotextiles and Geomembranes, 23:55–75, 2005.
- [12] H. Y. Jeon, H. K. Kim, G. R. Koerner, “Prediction of long-term behavior of Korean HDPE géomembranes”, Proceedings Geo-Frontiers, 2005.
- [13] E. M. Hoang, N. S. Allen, C. M. Liauw, E. Fontan, P. Lafuente, “The thermo-oxidative degradation of metallocene polyethylenes. Long-term thermal oxidation in the solid state”, Polymer Degradation and Stability, 91(6), 1356–1362, 2006.
- [14] E. Kramer, J. Koppelman, “Measurement of oxidation stability of polyolefins by thermal analysis”, Polymer Degradation and Stability, 16, 261–275, 1986.
- [15] V. Langlois, L. Audouin, J. Verdu, P. Courtois, “Thermooxidative aging of crosslinked linear polyethylene: stabilizer consumption and lifetime prediction, Polymer degradation and stability, 40(3), 399–409, 1993.
- [16] E. Richaud, « Durabilité des géotextiles en polypropylène », PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2006.

- [17] N. Barrois-Oudin, C. Cardinet, F. Delor-Justin, « Vieillissement photochimique des caoutchoucs epdm », 12èmes journées d'études sur le vieillissement des polymères – station d'essais de vieillissement naturel de Bandol, 25 - 26 septembre 1997.
- [18] L. Audouin, S. Girois, L. Achimsky, J. Verdu, “Effect of temperature on the photooxidation of polypropylene films”, *Polym. Degradation Stab.*, 60, 137–143, 1998.
- [19] X. Colin, L. Audouin, J. Verdu, “Determination of thermal oxidation rate constants by an inverse method. application to polyethylene”, *Polym. Degradation Stab.*, 86, 309–321, 2004.
- [20] B. Fayolle, X. Colin, L. Audouin, J. Verdu, “Mechanism of degradation induced embrittlement in PE”, *Polymer Degradation and Stability*, 92, 231–238, 2007.
- [21] J. V. Gulmine et al., “Degradation profile of polyethylene after artificial accelerated weathering”, *Polymer degradation and stability*, **79**(3), 385-397, 2003.
- [22] M. Carrega, « Matériaux polymères », édition nouvelle. 2007, Paris, DUNOD.
- [23] J. Mandel, « Cours de Mécanique des Milieux Continus », Annexe XXI, Gauthiers-Villars, Paris, 1966.
- [24] J. D. Ferry, « Viscoplastic Properties of Polymers », 2nd edition, New York, 1970.
- [25] R. B. Bird et al., « Dynamics of Polymeric Liquides: Fluid Mechanics and Kinetic Theory », John Wiley and Sons, New York, 1987.
- [26] C. D. Han, « Rheology in Polymer Processing, Academic Press », New York, 1976.
- [27] R. B. Bird, R.C. Armstrong et O. Hassager, « Dynamics of Polymeric Liquids, Fluid Mechanics », Wiley, New York, vol. 1, 1977.
- [28] K. Walters, « Developments in Non-Newtonian Fluid Mechanics », a Personal View, Communication à l'IUTAM Symposium on Non-Newtonian Fluid Mechanics, Louvain La Neuve, Belgique , 1978.
- [29] S. Etienne, L. David, « Introduction à la physique des polymères », 2002, DUNOD
- [30] F. Addiego, « Caractérisation de la variation volumique du polyéthylène au cours de la déformation plastique en traction et en fluage », 2006
- [31] J. Rault, « Les polymères solides », 2002.
- [32] C.W. Bunn, « The crystal structure of long-chain normal paraffin hydrocarbons. The shape of the CH₂ group », *Transactions of the Faraday Society*, 35, 482-491, 1939.
- [33] G. W. Ehrenstein, F. Montagne, « Matériaux polymères », 2000, Paris, Hermes science
- [34] D. Barron, C. Birkinshaw, « Ultra-high molecular weight polyethylene. Evidence for a three phase morphology », *Polymer*, 2008, Vol. 49 (13-14), p. 3111-3115

- [35] W. Lin, "The application of Raman spectroscopy to three-phase characterization of polyethylene crystallinity", *Polymer Testing*, 26 (6), 814-821, 2007.
- [36] J. J. Janimak and al., « Spherulitic banding in metallocene catalysed polyethylene spherulites », *Polymer*, 42 (10), 4675-4685, 2001.
- [37] A. Lahrouni, J. Arman, « Etude de mélanges de polyéthylène et de polystyrène par diffraction de rayons X et par densimétrie », *European Polymer Journal*, 31 (4), 347-352, 1995
- [38] S. Wu and al., « A study on ultraviolet irradiation modification of high-density polyethylene and its effect in the compatibility of HDPE/PVA fiber composites », *Materials Letters*, 57 (18), 2647-2650, 2003
- [39] A. Valadez-Gonzalez and al., « Mineral filler influence on the photo-oxidation of high density polyethylene: I. Accelerated UV chamber exposure test », *Polymer Degradation and Stability*, 1999, Vol. 63 (2), p. 253-260
- [40] L. C. Mendes and al., Mechanical, « thermal and microstructure evaluation of HDPE after weathering in Rio de Janeiro City », *Polymer Degradation and Stability*, 79 (3), 371-383, 2003
- [41] T. Corrales and al., «Photooxidative and thermal degradation of polyethylenes: Interrelationship by chemiluminescence, thermal gravimetric analysis and FTIR data», *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 147 (3), 213-224, 2002
- [42] A. Pegoretti, « Relaxation processes in polyethylene fibre-reinforced polyethylene composites », *Composites Science and Technology*, 60 (8), 1181-1189, 2000.
- [43] A. Tidjani, R. Aranud, « Formation of treeing figures during the photooxidation of polyolefins », *Polymer*, 36 (14), 2841-2844, 1995
- [44] I. Yakimets-Pilot, « Elaboration d'un modèle viscoélastique et son application au comportement d'un polypropylène sous sollicitations mécaniques complexes et physico-chimiques », 2004.
- [45] A. V. Shyichuk and al., « Comparison of UV-degradation depth-profiles in polyethylene, polypropylene and an ethylene-propylene copolymer », *Polymer Degradation and Stability*, 88 (3), 415-419, 2005.
- [46] J. R. White, A. V. Shyichuk, « Effect of stabilizer on scission and crosslinking rate changes during photo-oxidation of polypropylene », *Polymer Degradation and Stability*, 92 (11), 2095-2101, 2007.

- [47] A. Rivaton and al., "Investigation of the photophysical processes and photochemical reactions involved in PVK films irradiated at $\lambda > 300$ nm", *Macromolecules*, 36 (15), 5815-5824, 2003.
- [48] J. V. Gulmine, L. Akcelrud, "Correlations between structure and accelerated artificial ageing of XLPE", *European Polymer Journal*, 2006, Vol. 42 (3), p. 553-562
- [49] P. Gijssman, A. Dozeman, "Comparison of the UV-degradation chemistry of unstabilized and HALS-stabilized polyethylene and polypropylene", *Polymer Degradation and Stability*, 1996, Vol. 53 (1), p. 45-50
- [50] S. H. Hamid, "Handbook of polymer degradation", CRC, 2000.
- [51] J. Hassinen, M. Lundback, M. Ifwarson, U. W. Gedde, "Deterioration of PE pipes exposed to chlorinated water", *Polymer Degradation and Stability*, 84, 261–267, 2004.
- [52] M. Lundback, C. Strandberg, A. C. Albertsson, M. S. Hedenqvist, U. W. Gedde, "Loss of stability by migration and chemical reaction of santonox r in branched polyethylene under anaerobic and aerobic conditions", *Polymer Degradation and Stability*, 91, 1071–1078, 2006.
- [53] M. Lundback, J. Hassinen, U. Andersson, T. Fujiwara, U. W. Gedde, "Polybutene 1 pipes exposed to pressurized chlorinated water: Lifetime and antioxidant consumption", *Polymer Degradation and Stability*, 91, 842–847, 2006.
- [54] M. Lundback, M. S. Hedenqvist, A. Mattozzi, U. W. Gedde, "Migration of phenolic antioxidants from linear and branched polyethylene", *Polymer Degradation and Stability*, 91, 1571–1580, 2006.
- [55] G. Mittelman, J. H. Davidson, S. C. Mantell, Y. Su, "Prediction of polymer tube life for solar hot water systems : A model of antioxidant loss", *Solar Energy*, 82, 452–461, 2008.
- [56] G. D. Smith, K. Karlsson, U. W. Gedde, "Modeling of antioxidant loss from polyolefins in hot-water applications. i: Model and application to medium density polyethylene pipes", *Polymer Engineering and Science*, 32, 658–667, 2004.
- [57] W. Mueller, I. Jakob, "Oxidative resistance of high-density polyethylene geomembranes", *Polymer Degradation and Stability*, 79, 161–172, 2003.
- [58] G. D. Smith, K. Karlsson, U. W. Gedde, "Modeling of antioxidant loss from polyolefins in hot-water applications. I: Model and application to medium density polyethylene pipes", *Polymer Engineering and Science*, 32(10), 658–667, 1992.
- [59] G. Geertz, R. Brull, J. Wieser, R. Maria, M. Wenzel, K. Engelsing, J. Wüst, M. Bastian, M. Rudschuck, "Stabiliser diffusion in long-term pressure tested

- polypropylene pipes analysed by ir microscopy”, *Polymer Degradation and Stability*, 94, 1092–1102, 2009.
- [60] J. Viebke, U. W. Gedde, “Antioxidant diffusion in polyethylene hot-water pipes”, *Polymer Engineering and Science*, 37, 896–911, 2004.
- [61] M. Bertoldo, F. Ciardelli, “Water extraction and degradation of a sterically hindered phenolic antioxidant in polypropylene films”, *Polymer*, 45(26), 8751–8759, 2004.
- [62] H. P. Sangam, R. K. Rowe, “Effects of exposure conditions on the depletion of antioxidants from high-density polyethylene (hdpe) géomembranes”, *Canadian Geotechnical Journal*, 39, 1221–1230, 2002.
- [63] S. M. El Sherbiny, “Free convection in inclined air layers heated from above”, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 39, 3925–3930, 1996.
- [64] P. D. Calvert, N. C. Billingham, “Loss of additives from polymers: a theoretical model”, *Journal of Applied Polymer Science*, 24, 357–370, 1979.
- [65] L. C. Mendes, E. S. Rufino, F. O. C. De Paula, A. C. Torres Jr, “Mechanical, thermal and microstructure evaluation of hdpe after weathering in rio de janeiro city”, *Polymer Degradation and Stability*, 79, 371–383, 2003.
- [66] J. L. Bolland, G. Gee, “Kinetic studies in the chemistry of rubber and related materials III: Thermochemistry and mechanisms of olefin oxidation”, *Transactions of the Faraday Society*, 42, 244–252, 1946.
- [67] J. L. Bolland, G. Gee, “Kinetic studies in the chemistry of rubber and related materials II: The kinetics of oxidation of unconjugated olefins”, *Transactions of the Faraday Society*, 42, 236–243, 1946.
- [68] J. L. Bolland, “Kinetic studies in the chemistry of rubber and related materials. The thermal oxidation of ethyl linoleate”, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 186, 218–236, 1946.
- [69] M. T. Gillen, R. L. Clough, “Occurrence and implications of radiation dose-rate effects for materials aging studies”, *Radiation Physics and Chemistry*, 18, 679–687, 1981.
- [70] L. Achimsky, « Etude cinétique de la thermo-oxydation du polypropylène », PhD thesis, Pierre et Marie Curie (Paris VI), 1996.
- [71] R. Setnescu, S. Jipa, Z. Osawa, “Chemiluminescence study on the oxidation of several polyolefins –i. thermal-induced degradation of additive-free polyolefins.”, *Polymer Degradation and Stability*, 60, 377–383, 1998.
- [72] L. Audouin, A. Achimsky, J. Verdu, “Kinetic Modeling of Low-Temperature”, *Oxidation of Hydrocarbon Polymers*, 727–763. Marcel Dekker, 2000.

- [73] Y. Kamiya, E. Niki, "Oxidative degradation in Aspects of Degradation and stabilization of polymers", edited by HHG Jellinek, 79–147, 1978.
- [74] M. Iring, S. Laszlo-Hedvig, K. Barabas, T. Kelen, F. Tudos, "Study of the thermaloxidation of polyolefines–ix: Some differences in the oxidation of polyethylene and polypropylene", *European Polymer Journal*, 14, 439–442, 1978.
- [75] S. W. Benson, "Kinetics of Pyrolysis of Alkyl Hydroperoxides and Their O [SingleBond] O Bond Dissociation Energies", *The Journal of Chemical Physics*, 40, 1007, 1964.
- [76] H. P. Frank, "Some oxidation characteristics of polypropylene", In *Journal of Polymer Science: Polymer Symposia*, 57, Wiley Subscription Services Inc., A Wiley Company New York, 1976.
- [77] L. Reich, S. S. Stivala, "Autoxidation of hydrocarbons and polyolefins: kinetics and mechanisms", M. Dekker New York, 1969.
- [78] D. M. Brown, A. Fish, "The Extension to Long-Chain Alkanes and to High Temperatures of the Hydroperoxide Chain Mechanism of Autoxidation", *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 308(1495), 547–568, 1969.
- [79] F. Tudos, M. Iring, T. Kelen, "Oxidation of polyolefins", In *Proceeding of the International Conference on Advances in the Stabilization and Controlled Degradation of Polymers*, ED. A.V. Patsis, Vol.1, 1985.
- [80] V. V. Ivanchenko, P. A. Kharitonov, Y.T.Denisov, "Kinetics and mechanism of initiated degradation of polyethylene in solution", *Vysokomolekularnye soedinenia. seria A*, 11, 1870–1852, 1969.
- [81] J. C. W. Chien, "Hydroperoxides in degradation and stabilisation of polymers", chapter 5, 95–112, Halsted, New York, 1975.
- [82] F. Gugumus, "Thermolysis of polyethylene hydroperoxides in the melt 3.Experimental kinetics of product formation", *Polym. Degradation Stab.*, 76, 95–110, 2002.
- [83] X. Colin, B. Fayolle, L. Audouin, J. Verdu, "About a quasi-universal character of unstabilised polyethylene thermal oxidation kinetics", *Polymer Degradation and Stability*, 80(1), 67–74, 2003.
- [84] M. Iring, F. Tudos, Z. Fodor, T. Kelen, "The thermo-oxidative degradation of polyolefines–Part 10. Correlation between the formation of carboxyl groups and scission in the oxidation of polyethylene in the melt phase", *Polymer Degradation and Stability*, 2(2), 143–153, 1980.

- [85] P. Gijsman, J. Sampers, “The influence of oxygen pressure and temperature on the UV-degradation chemistry of polyethylene”, *Polymer degradation and stability*, 58 (1-2), 55–59, 1997.
- [86] L. Audouin, S. Girois, L. Achimsky, J. Verdu, “Effect of temperature on the photooxidation of polypropylene films”, *Polym. Degradation Stab.*, 60, 137–143, 1998.
- [87] W.L. Hawkins, “Polymer stabilization”, Wiley-Interscience New York, 1972.
- [88] N. Khelidj, « Vieillissement d’isolants de câbles en polyéthylène en ambiance nucléaire », PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure d’Arts et Métiers, 2006.
- [89] C. J. Ho, Y. L. Yih, “Conjugate natural convection heat transfer in an air-filled rectangular cavity”, *Int. C. Heat Mass Transfer*, 14, 91-100, 1987.
- [90] S. Amraoui, A. Mezrhab, C. Abid, « Simulation numérique des transferts de chaleur par convection naturelle dans une configuration de type capteur solaire contenant des partitions », Journée d’études : convection dans les capteurs solaires, Groupe « modes de transfert convection » SFT, Paris, France, 2009.
- [91] S. Amara, B. Nordell, B. Benyoucef, A. Benmoussat, “Concentration Heating System with Optical Fiber Supply”, *Energy Procedia*, 6, 805-814, 2011.
- [92] A. A. Basfar, K. M. Idriss Ali, “Natural weathering test for films of various formulations of low density polyethylene (LDPE) and linear low density polyethylene (LLDPE)”, *Polymer Degradation and Stability*, 91(3), 437–443, 2006.
- [93] J. R. MacCallum, “Kinetics and Mechanisms of Photo-Oxidation Processes”, *Developments in Polymer Degradation*, 6, 191–205, 1985.
- [94] V. L. Vakula, E. B. Orlov, N. A. Konstantinova, N. V. Kanatchikova, V. V. Lavrentev, “The effect of the actual contact surface on the auto-and adhesion bond formation during the welding of photo-aged polyethylene films”, *Polymer Science USSR*, 13(8), 1986–1991, 1971.
- [95] A. Charlesby, R. H. Partridge, “The identification of luminescence centres in polyethylene and other polymers”, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 283 (1394), 312–328, 1965.
- [96] I. Boustead, A. Charlesby, “Thermoluminescence in polyethylene. I. Electron traps”, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 316(1525), 291–302, 1970.
- [97] N. S. Allen, J. F. McKellar, G. O. Phillips, “Effects of thermal oxidation on polypropylene phosphorescence”, *Journal of Polymer Science Polymer Letters Edition*, 12(5), 253–255, 1974.

- [98] N. S. Allen, J. F. McKellar, "Photodegradation and stabilization of commercial polyolefins", *Chemical Society Reviews*, 4(4), 533–547, 1975.
- [99] D. J. Carlsson, D. M. Wiles, "The photodegradation of polypropylene films. II: Photolysis of ketonic oxidation products", *Macromolecules*, 2(6), 587–597, 1969.
- [100] G. Scott, "Developments in the photo-oxidation and photo-stabilisation of polymers", *Polym. Degradation Stab.*, 10, 97–125, 1985.
- [101] D. J. Carlsson, D. M. Wiles, "The photo-oxidative degradation of PE. Photooxidation and photoinitiation processes", *Macromolecules*, C14 (1), 65–106, 1976.
- [102] F. Gugumus, "Mechanisms of photooxidation of polyolefins", *Die Angewandte Chemie*, John Wiley & Sons, 176, 27–42, 1990.
- [103] Y. A. Ershov, S. I. Kuzina, M. B. Neiman, "The mechanism of light induced ageing and light stabilisation of polymers", *Russian Chemical Reviews*, 38, 147, 1969.
- [104] A. King, "Ultra-violet light : its effects on plastics", *Plastics and Polymers*, 36, 195–203, 1968.
- [105] J. G. Calvert, J. N. Pitts, Jr., *Photochemistry*. Wiley, New York, 1966.
- [106] A. M. Trozzolo, F. H. Winslow, "A mechanism for the oxidative photodegradation of polyethylene", *Macromolecules*, 1(1), 98–100, 1968.
- [107] T. Mill, H. Richardson, F.R. Mayo, "Aging and degradation of polyolefins. IV. Thermal and photodecompositions of model peroxides", *Journal of Polymer Science Polymer, Chemistry Edition*, 11(11), 2899–2907, 1973.
- [108] A.K. Breck, C.L. Taylor, K.E. Russell, J.K.S. Wan, "Heterogeneous reactions of singlet molecular oxygen with solid polymers", *Journal of Polymer Science Polymer, Chemistry Edition*, 12(7), 1505–1513, 1974.
- [109] R. Satoto, W.S. Subowo, R. Yusiasih, Y. Takane, Y. Watanabe, T. Hatakeyama, "Weathering of high-density polyethylene in different latitudes", *Polym. Degradation Stab.*, 56, 275–279, 1997.
- [110] G. Geuskens, M. S. Kabamba, "Photo-oxidation of polymers—Part V: A new chain-scission mechanism in polyolefins", *Polymer Degradation and Stability*, 4(1), 69–76, 1982.
- [111] J. F. Rabek, "Polymer photodegradation: mechanisms and experimental methods", Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [112] F. Delor, G. Teissedre, M. Baba, J. Lacoste, "Ageing of epdm - 2. role of hydroperoxides in photo- and thermo-oxidation", *Polym. Degradation Stab.*, 60, 321–331, 1998.

- [113] G. H. Hartley, J. E. Guillet, "Photochemistry of ketone polymers.i. studies of ethylene carbon monoxide copolymers", *Macromolecules*,1, 165–170,1968.
- [114] G. Geuskens, C. David, "The photo-oxidation of polymers. A comparison with low molecular weight compounds", *Pure Appl Chem*, 51, 233–240, 1979.
- [115] J. Lemaire, R. Arnaud, "Primary hydroperoxidation in photooxidation of polyolefins and polyamides", *Polymer Photochemistry*, 5, 243–265, 1984.
- [116] G. Teissedre, J. F. Pilichowski, S. Chmela, J. Lacoste, "Ageing of epdm - i: Photo-and thermal stability of PE hydroperoxydes", *Polym. Degr. Stab.*, 53, 207–215, 1996.
- [117] D.C. Mellor, A. B. Moir, G. Scott, "The effect of processing conditions on the uv stability of polyolefins", *European Polymer Journal*, 9(3), 219–225, 1973.
- [118] J. V. Gulmine, P. R. Janissek, H. M. Heise, L. Akcelrud, "Degradation profile of polyethylene after artificial accelerated weathering", *Polymer degradation and stability*,79(3), 385–397, 2003.
- [119] J. Lacoste, D. J. Carlsson, S. Falicki, D. M. Wiles, "Polyethylene hydroperoxide decomposition products", *Polymer degradation and stability*, 34 (1-3), 309–323, 1991.
- [120] L. Costa, M. P. Luda, L. Trossarelli, "Ultra high molecular weight PE-II. Thermal- and photo-oxidation", *Polymer degradation and stability*, 58(1-2), 41–54, 1997.
- [121] H. D. Hoekstra, J. L. Spoormaker, J. Breen, L. Audouin, J. Verdu, "UV-exposure of stabilized and non-stabilized HDPE films: physico-chemical characterization", *Polymer degradation and stability*, 49(2), 251–262, 1995.
- [122] A. C. Tavares, J. V. Gulmine, C. M. Lepienski, L. Akcelrud, "The effect of accelerated aging on the surface mechanical properties of polyethylene", *Polymer degradation and stability*, 81 (2), 367–373, 2003.
- [123] J. L. Philippart, C. Sinturel, R. Arnaud, J. L. Gardette, "Influence of the exposure parameters on the mechanism of photo oxidation of polypropylene", *Polymer degradation and stability*, 64(2), 213–225, 1999.
- [124] M. Liu, A.R. Horrocks, E. M. Hall, "Correlation of physicochemical changes in uv exposed ldpe films containing various uv stabilizers", *Polymer Degradation and Stability*, 49, 151–161, 1995.
- [125] N.D. Searle, "Handbook of Polymer Degradation - Activation Spectra of Polymers and Their Application to Stabilization and Stability Testing", 16, 605–643, Dekker, 2000.
- [126] L. Guadagno, C. Naddeo, V. Vittoria, G. Camino, C. Cagnani, "Chemical andmorphological modifications of irradiated linear low density polyethylene (lldpe)", *Polym. Degradation Stab.*, 72, 175–186, 2001.

- [127] N. S. Allen, M. Edge, D. Holdsworth, A. Rahman, F. Catalina, E. Fontan, A. M. Escolona, F. F. Sibon, “Ageing and spectroscopic properties of polyethylenes: comparison with metallocene polymer”, *Polym. Degradation Stab.*, 67, 57–67, 2000.
- [128] A. Tidjani, R. Arnaud, “Photo-oxidation of linear low density polyethylene: a comparison of photoproducts formation under natural and accelerated exposure”, *Polymer degradation and stability*, 39(3), 285–292, 1993.
- [129] S. Al-Malaika, “Antioxidants: an overview”, Springer, 1998.
- [130] H. Zweifel, R.D. Maier, M. Schiller, “Plastics additives handbook”, Hanser Verlag, 2001.
- [131] N. C. Billingham, P. Garcia-Trabajo, “The possibilities of microencapsulated antioxidants for polymers. i: A theoretical analysis”, *Polymer Degradation and Stability*, 48, 419–426, 1995.
- [132] K. Schwetlick, W. D. Habicher, “Polymer Durability”, American Chemical Society, 1996.
- [133] S. Pospisil, J. Nespurek, “Chain-breaking stabilizer in polymers: the current status”, *Polym. Degradation Stab.*, 49, 99–110, 1995.
- [134] K. Nagy, E. Epacher, P. Staniek, B. Pukanszky, “Hydrolytic stability of phenolic antioxidants and its effect on their performance in high-density polyethylene”, *Polymer Degradation and Stability*, 82, 211–219, 2003.
- [135] N.S. Allen, M. Edge, T. Corrales, A. Childs, C.M. Liauw, F. Catalina, C. Peinado, A. Minihan, D. Aldcroft, “Ageing and stabilisation of filled polymers: an overview”, *Polymer degradation and stability*, 61(2), 183–200, 1998.
- [136] T.L. Phease, S.W. Billingham, N. C. Bigger, “The effect of carbon black on the oxidative induction time of medium-density polyethylene”, *Polymer*, 41, 9123–9130, 2000.
- [137] J. A. Duffie, W. A. Beckman, “Solar Engineering of Thermal Processes”, 3rd edition, Wiley et Sons Inc., 2006.
- [138] M. C. Rodriguez, “Flat plate thermal solar collector efficiency: transient behavior under working conditions part II : model application and design contributions”, *Applied Thermal Engineering*, 31, 2385-2393, 2011.
- [139] M. C. Rodríguez- Hidalgo, P. A. Rodríguez-Aumente, A. Lecuona, G. L. Gutiérrez-Urueta, R. Ventas, “Flat plate thermal solar collector efficiency: Transient behavior under working conditions. Part I: Model description and experimental validation”, *Applied Thermal Engineering*, 31, 2394-2404, 2011.

- [140] N. Molero Villar, J. M. Cejudo Lopez, F. D. Dominguez Munoz, A. Rodriguez Garcia, A. Carrillo Andres, “Numerical 3-D heat flux simulations on flat plate solar collectors”, *Solar Energy*, 83, 1086–1092, 2009.
- [141] M. A. Minn, K. C. Ng, W. H. Khong, T. Melvin, “A distributed model for a tedlar-foil flat plate solar collector”, *Renewable Energy*, 27, 507–523, 2002.
- [142] T. Letz, M. Lallemand, « Etude théorique et expérimentale d’un capteur solaire plan à air en régime dynamique », *Revue de Physique Appliquée*, 21, 727-734, 1986.
- [143] A. Dang, K. J. Shama, “Performance of flat plate collectors in off-south orientation in India”, *Energy Conversion and Management*, 23, 1983.
- [144] Y. B. M. Henry, R. E. Peterson, B. Zimmer, “Low cost coating for flat plate solar collector”, *Journal thin solid film*, 39, 95-103, 1976.
- [145] S. Youcef-Ali, “Study and optimization of the thermal performances of the offset rectangular plate fin absorber plates, with various glazing”, *Renewable Energy*, 30, 271–280, 2005.
- [146] M. L. Ben Guehza, A. Kaabi, « Effet de l’espace entre deux vitres sur le rendement du capteur solaire plan à double vitrage », *Revue Des Sciences Fondamentales et Appliquées*, 2(1), 121-136, 2010.
- [147] D. Njomo, « Etude théorique du comportement thermique d’un capteur solaire plan d’air à couverture combinée plastique-vitre », *Revue Générale de Thermique*, 37, 973-980, 1998.
- [148] C. Cristofari, G. Notton, P. Poggi, A. Louche, “Modelling and performance of a copolymer solar water heating collector”, *Solar Energy*, 72, 99–112, 2002.
- [149] F. Benyelles, B. Benbadjia, B. Benyoucef, Z. Ziani, « Comparaison entre un capteur à aérogel de silice et d’autres capteurs plans », 13^{èmes} Journées Internationales de Thermique, 2007.
- [150] J. Vestlund, M. Ronnelid, J. O. Dalenback, “Thermal performance of gas-filled flat plate solar collectors », *Solar Energy*, 83, 896–904, 2009.
- [151] G. Francia, « Un nouveau collecteur de l’énergie rayonnant solaire-théorie et vérification expérimentales », *Proc. United Nations Conf. New Sources of Energy*, Rome, 21-23 August 1961, 35/S/71, United Nations, New York, 1964.
- [152] M. N. Metwally, H. Z. Abou-Ziyan, A. M. El-Leathy, “Performance of advanced corrugated-duct solar air collector compared with five conventional designs”, *Renewable Energy*, 10 (4), 519–537, 1997.

- [153] K. G. T. Hollands, K. Iynkaran, “Proposal for a compound honeycomb collector”, *Solar Energy*, 34, 309–316, 1985.
- [154] M. Jami, A. Mesrhab, M. Bouzidi, P. Lallemend, “Lattice-Boltzmann computation of natural convection in a portioned enclosure with inclined partitions attached to its hot wall”, *Physical A: Statistical mechanics and its applications*, 368, 481-494, 2006.
- [155] H. Abdi, N. Ait Messaoudene, « Etude expérimentale et théorique des performances de deux capteurs plans à contact direct eau-plaque d’absorption », *Revue des EnergiesRenouvelables*, 53-60, 2000.
- [156] K. G. T. Hollands, L. Konicek, “Experimental study of the stability of differentially heated inclined air layers”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 16, 1467-1476, 1973.
- [157] L. F. A. Azevedo, E. M. Sparrow, “Natural convection in open-ended inclined channels”, *Journal of heat transfer, Transactions ASME*, 107 (4), 893-901, 1985.
- [158] H. Inaba, “Experimental study of natural convection in an inclined air layer”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 27, 1127-1139, 1984.
- [159] F. J. Hamady, R. J. Lloyd, “Study of local natural convection heat transfer in an inclined enclosure”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 32, 1697-1708, 1986.
- [160] C. G. Grondin, B. Roux, « Recherche de corrélations simples exprimant les pertes convectives dans une cavité bidimensionnelle, inclinée, chauffée différemment », *Revue de physique appliquée*, 49, 1979.
- [161] R. W. Thomas, G. De Vahl Davis, “Natural convection in an air layer enclosed between two vertical plates with different temperatures”, *Int. Heat Mass Transfer* 2, 106-120, 1961.
- [162] N. Seki, S. Fukusak, H. Inaba, “Visual observation of natural convective flow in a narrow vertical cavity”, *J. Fluid Mech*, 84, 695-704, 1978.
- [163] H. Ozoe, H. Sayama, W. S. Churchill, “Natural convection in an inclined rectangular channel at various aspect ratios and angles-experimental measurements”, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 18, 1425-1431, 1975.
- [164] D. W. Crunkleton, T. J. Anderson, “A numerical study of flow and thermal fields in tilted Rayleigh–Bénard convection”, *Int. C. Heat and Mass Transfer*, 33, 24–29, 2006.
- [165] I. Tari, “Natural convection simulations and numerical determination of critical tilt angles for a parallel plate channel”, *Energy conversion and management*, 51, 685-695, 2010.

- [166] C. Y. Soong, P. Y. Tzeng, “Numerical study on mode–transition of natural convection indifferentially heated inclined enclosures”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 39, 2869-2882, 1996.
- [167] R. Hernandez, R. L. Frederick, “Spatial and thermal features of three dimensional Rayleigh–Bénard convection”, 37, 411-424, 1994.
- [168] B. Dulieu, M. L. Bonniaud, J. P. Walch, « Convection naturelle dans une enceinte rectangulaire presque horizontale chauffée par le haut », *Int. J. Heat Mass Transfer*, 22, 739-747, 1979.
- [169] A. Benkhelifa, C. Fuentes, J. L. Tuhaut, F. Penot, « Convection naturelle à grand nombre de Rayleigh dans une couche horizontal de fluide, approche expérimentale », *Journées Internationales de Thermique*, 2007.
- [170] D. W. Larson, R. Viskanta, “Transient combined laminar free convection and radiation in a rectangular enclosure”, *J. Fluid Mech*, 78 (1), 65-85, 1976.
- [171] C. H. Lan, O. A. Ezekoye, J. R. Howell, K. S. Ball, “Stability analysis for three dimensional Rayleigh–Bénard convection with radiatively participating medium using spectral methods”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 46, 1371-1383, 2003.
- [172] R. Alvarado, J. Xamán, J. Hinojosa, G. Álvarez, “Interaction between natural convection and surface thermal radiation in tilted slender cavities”, *Int. J. of thermal sciences*, 47, 355–368, 2008.
- [173] M. A. Hassab, M. N. Ozisik, “Effects of radiation and convective boundary conditions on the stability of fluid in an inclined slender slot”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 22, 1095–1105, 1979.
- [174] C. Balaji, S. P. Venkateshan, “Interaction of surface radiation with free convection”, *Int. J. Heat Fluid Flow*, 14, 260-267, 1993.
- [175] R. Anderson, A. Bejan, “Heat transfer through single and double vertical walls in natural convection: theory and experiment”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 24, 1611-1620, 1981.
- [176] T. W. Tong, F. M. Gerner, “Natural convection in partitioned air-filled rectangular enclosures”, *Int. C. Heat Mass Transfer*, 13, 99-108, 1986.
- [177] N. Bellel, “Study of two types of cylindrical absorber of a spherical concentrator”, *Energy Procedia*, 6, 217-227, 2011.
- [178] F.Z. Ferahta, S. Bougoul, D. Ababsa, C. Abid, “Numerical Study of the Convection in the Air Gap of a Solar Collector Original”, *Energy Procedia*, 6, 176-184, 2011.

- [179] S. Saulich, U. Jakob, M.J. Cook, “Performance analysis of a novel control system for solar collectors coupled with sorption chillers”, *International Journal of Refrigeration*, 35 (3),719-728, 2012.
- [180] M. D’Antoni, O. Saro, “Massive Solar-Thermal Collectors: A critical literature review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3666-3679, 2012.
- [181] A.C. Mintsá Do Anjo, M. Medale, C. Abid, “Optimization of the design of a polymer flat plate solar collector”,*Solar Energy*, 87, 64-75, 2013.
- [182] J.L. Rodríguez-Muñoz, J.M. Belman-Flores, “Review of diffusion–absorption refrigeration technologies”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 145-153, 2014.
- [183] C I. Ferreira, D. S. Kim, “Techno-economic review of solar cooling technologies based on location-specific”, *International Journal of Refrigeration*, 39, 23-37, 2014.
- [184] M. Hamed, A. Fellah, A. Ben Brahim, “Parametric sensitivity studies on the performance of a flat plate solar collector in transient behavior », *Energy Conversion and Management*, 78, 938-947, 2014.
- [185] R. Ihaddadene, N. Ihaddadene, B. Madani, F. Z. Hamdibacha, “The effects of volumetric flow rate and inclination angle on the performance of a solar thermalcollector”, *Energy Conversion and Management*, 78, 931-937, 2014.
- [186] Y.G. Hsuan, R.M. Koerner, “Antioxidant depletion lifetime in high density polyethylene géomembranes”, *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (USA)*, 124, 532, 1998.
- [187] J. K. Han, J. Miltz, B. R. Harte, J. R. Giacín, J. I. Gray, “Loss of 2-tertiary-butyl-4methoxyphenol (bha) from high-density polyethylene film”, *Polymer Engineering and Science*, 27, 934–938, 2004.
- [188] K. Möller, T. Gevert, “A solid-state investigation of the desorption/evaporation of hindered phenols from low density polyethylene using ftir and uv spectroscopy with integrating sphere: The effect of molecular size on the desorption”, *Journal of Applied Polymer Science*, 61, 1149–1162, 1998.
- [189] N. C. Billingham, “Physical Chemistry of Polymer Oxidation and Stabilisation”, *Atmospheric Oxidation and Antioxidants*, 2,G. Scott, Amsterdam 1993.
- [190] B. Fayolle, J. Verdu, « Vieillissement physique des matériaux polymères », Technical report, *Techniques de l’Ingénieur*.
- [191] J. Crank, “The mathematics of diffusion”, 2nd.Ed., Clarendon Press, Oxford, 1975.

- [192] K. Möller, T. Gevert, “An ftir solid-state analysis of the diffusion of hindered phenols in low-density polyethylene (ldpe): The effect of molecular size on the diffusion coefficient”, *Journal of Applied Polymer Science*, 51, 895–903, 2003.
- [193] J. Y. Moisan, « Diffusion des additifs du polyéthylène - I: Influence de la nature du Diffusant », *European Polymer Journal*, 16, 979–987, 1980.
- [194] F. Gugumus, “Re-examination of the role of hydroperoxides in polyethylene and polypropylene: chemical and physical aspects of hydroperoxides in polyethylene”, *Polymer Degradation and Stability*, 49(1), 29–50, 1995.
- [195] M. Zanetti, P. Bracco, L. Costa, “Thermal degradation behaviour of pe/claynano composites”, *Polymer Degradation and Stability*, 85, 657–665, 2004.
- [196] J. P. Luongo, “Infrared study of oxygenated groups formed in polyethylene during oxidation”, *Journal of Polymer Science*, 42, 139–150, 2003.
- [197] J.H. Adams, “Analysis of the nonvolatile oxidation products of polypropylene I. Thermal oxidation”, *Journal of Polymer Science Part A-1 Polymer Chemistry*, 8(5), 1077–1090, 1970.

CHAPITRE 2 :

Matériels et méthodes

Introduction :

Après avoir vu dans le premier chapitre, les différents types de matériaux utilisés dans les dispositifs solaire à effet de serre au regard de leur nuances, structures et propriétés, nous développerons maintenant les différentes méthodes de caractérisation du matériau d'étude : composition chimique, émissivité, conductivité thermique, diffusivité thermique, masse volumique et nous présenterons les résultats des tests d'exposition solaire : les différentes températures et l'éclairement solaire. Nous finirons par relater les différentes techniques expérimentales utilisées pour la caractérisation physico-chimique du vieillissement des échantillons du matériau d'étude, en l'occurrence, la diffraction des rayons X (DRX), la microscopie électronique à balayage (MEB), la spectrométrie à dispersion d'énergie (EDX) couplée au MEB, l'analyse thermique, l'UV-visible du solide et l'infra-rouge à transformée de Fourier (FTIR). Ces techniques d'analyse vont nous permettre d'évaluer les propriétés structurales et texturales de notre matériau d'étude.

I. Choix du matériau d'étude

Il est toujours nécessaire, dans toute conception de produit industriel, de choisir le matériau dans lequel l'objet sera réalisé et le procédé utilisé pour sa réalisation. Ce choix est à la fois crucial et difficile. Crucial car de lui dépend la performance de la conception et sa viabilité économique, difficile en raison à la fois de la diversité des matériaux et des procédés possibles, et de la variété des requêtes exigées par la conception. On estime à 60 000 le nombre de matériaux disponibles et à environ 6 000 le nombre de procédés possibles. Il est impensable que le concepteur soit familier avec plus qu'une petite fraction de cette immense diversité, et la difficulté du choix des matériaux tient en partie à cet hyper choix des matériaux. Mais, par ailleurs, la variété des requêtes et leurs caractères souvent contradictoires viennent ajouter, à la complexité liée à la multitude des possibilités, celle liée à la difficulté d'énoncer de façon objective les performances recherchées et, plus encore peut-être, celle liée à la difficulté de gérer un choix multicritère. Il est donc clairement utile, pour pouvoir se guider efficacement dans la variété des choix possibles, de disposer d'une procédure systématique pour sélectionner le procédé et le matériau le mieux adapté pour réaliser un dispositif énergétique à effet de serre. Cette procédure systématique doit être suffisamment générale pour pouvoir être appliquée à des conceptions très variées en prenant comme exemple les dispositifs du solaire thermique allant du capteur solaire, du distillateur solaire et pourquoi pas aux pompes à chaleur ou aux systèmes de stockage de la chaleur, et suffisamment transparente pour que l'utilisateur en garde la maîtrise, puisse intervenir au cours de la procédure de sélection et laisser agir sa créativité, son imagination et sa propre expérience. La

question paradigmatique de la sélection des matériaux consiste à définir un indice de performance qui permette de comparer objectivement deux matériaux aussi différents, et de choisir entre eux en fonction des autres requêtes de la conception. La méthode de sélection en elle-même doit être suffisamment simple et flexible pour que le concepteur puisse la mettre en œuvre par quelques rapides calculs mais, pour pouvoir choisir efficacement parmi un grand nombre de matériaux et de procédés, il est naturel d'avoir recours à des banques de données et à des logiciels d'aide à la sélection. Il existe de nombreux ouvrages traitant de la conception des produits industriels et de la sélection des matériaux [1-6]. Cette sélection-là, qui s'appuie sur l'évaluation précise des coûts, des délais de fabrication, de la dépendance vis-à-vis d'un seul fournisseur qu'il est bon d'éviter, est une question souvent autant économique que technique.

1.1 Problématique sur la conception du dispositif à effet de serre :

Le point de départ de la conception d'un produit industriel est une idée innovante ou un besoin du marché. L'étape ultime correspond à toutes les spécifications qui rendent la réalisation du produit possible (colonne centrale de la **figure 1**). Il est impératif de définir précisément dès le départ le besoin à satisfaire (sous la forme d'un énoncé du type il nous faut réaliser une pièce qui remplit telle fonction). Les traités classiques de conception [2] insistent sur la nécessité d'une spécification de la fonction indépendamment de toute solution remplissant cette fonction, cette précaution ayant pour but d'éviter les limitations qui pourraient résulter d'idées préconçues. Dans notre étude, nous allons faire le choix de matériaux absorbants de chaleur afin de les tester dans des dispositifs à effet de serre.

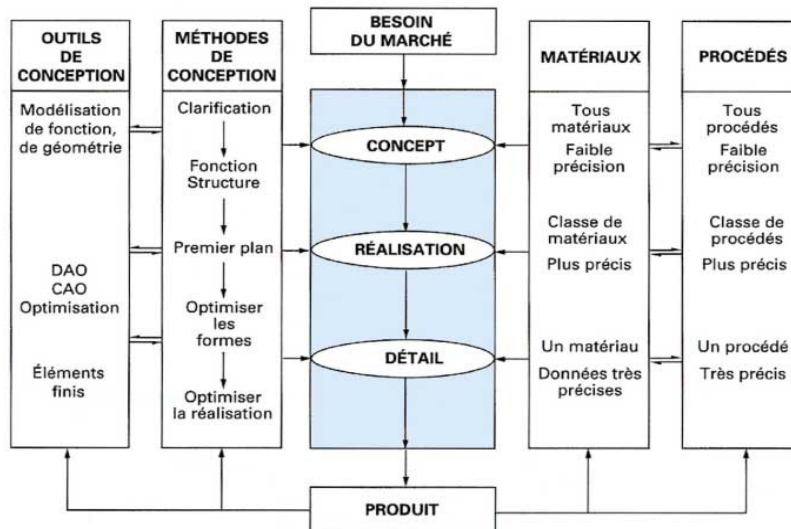


Figure 1 : Les différentes étapes de la conception.

La démarche de conception consiste ensuite à développer des concepts qui peuvent potentiellement remplir la fonction demandée. À cette étape de la conception, toutes les

options demeurent ouvertes, et le concepteur se doit d'envisager tous les concepts possibles et toutes leurs combinaisons. À l'étape suivante, chaque concept est analysé à un niveau d'approximation qui permet de déterminer grossièrement la taille des dispositifs à effet de serre au niveau de notre laboratoire, les contraintes mécaniques auxquelles elles sont soumises, les températures et environnements dans lesquels elles doivent fonctionner ses dispositifs. À cette étape, le concepteur doit sélectionner les classes de matériaux qui peuvent éventuellement être utilisés dans ces conditions : Dans notre cas, nous avons les métaux, les polymères, le verre et le bois. Le concepteur passe ensuite de ce schéma de faisabilité à une étape de conception détaillée dans laquelle les spécifications de chaque élément sont précisées. Les composants critiques sont alors analysés en détail (du point de vue mécanique et thermique), et enfin un choix définitif de la forme et des matériaux adaptés est arrêté. L'aspect production et coût est alors analysé et cela conduit à clore la démarche de conception par des spécifications de production. Cette démarche de conception se décline quelque peu différemment si l'on a affaire non pas à une conception originale qui démarre pour ainsi dire de rien, mais à une conception adaptative, ou à une conception de variation qui, toutes deux, partent d'un produit déjà existant.

➤ La conception originale implique une idée nouvelle ou un nouveau principe de fonctionnement. Dans cette démarche de conception, il est impératif de réfléchir avec le maximum de latitude, d'envisager toutes les solutions possibles et de choisir, par une démarche rationnelle, la meilleure d'entre elles. Cette largeur de vue doit aussi s'appliquer au choix des matériaux. De nouveaux matériaux peuvent rendre possibles des conceptions originales, par exemple le silicium de haute pureté a rendu possible le transistor, le verre de haute pureté la fibre optique. Quelquefois, le nouveau matériau suggère le nouveau produit, d'autres fois le nouveau produit exige le développement de nouveaux matériaux. Par exemple, la technologie des turbines de réacteurs est aujourd'hui motrice dans le développement des céramiques ou des composites à matrice métallique.

➤ La conception de variation concerne un changement de taille ou une amélioration de détail sans que la fonction ou son principe de réalisation soit modifié. Par exemple, la conception de réservoirs de plus grande taille impose le choix de nouveaux matériaux : Les bateaux de petite taille sont réalisés en fibre de verre, alors que les bateaux de taille importante sont en acier.

➤ Dans notre cas, la conception adaptative part d'un concept déjà existant et recherche une amélioration incrémentale en raffinant le principe de fonctionnement. Ce type de conception est rendu possible par le développement des matériaux : les polymères ont remplacé les

métaux dans les objets électroménagers, la fibre de carbone le bois dans les objets pour le sport. Des marchés entiers peuvent être gagnés (ou perdus) selon l'usage que le manufacturier fait des matériaux classiques et des nouveaux matériaux.

Aux différentes étapes de la conception, la sélection des matériaux et des procédés se pose en des termes différents (**figure 1**) ; il est donc impératif de se poser cette question tout au long de la procédure de conception, faute de quoi l'on risque de se voir imposer une solution à moindre performance parce que l'on n'a pas envisagé les différentes conceptions qu'un autre choix de matériau eût rendu possible. Le choix des matériaux et des procédés pour la conception du dispositif à effet de serre se doivent idéalement d'être interactifs, ce qui suggère l'utilisation de données sur le matériau choisi qui seront caractérisées.

1.2 Choix du matériau fonctionnel :

Le choix des matériaux repose essentiellement sur l'application à laquelle ils sont destinés et le procédé grâce auquel ils seront mis en œuvre, il importe avant tout de brosser deux rapides panoramas [3] : l'un, des grandes classes de matériaux et des propriétés génériques qui les caractérisent, l'autre, des principales filières de procédés permettant, à partir de ces matériaux, l'obtention des produits finis.

Ces deux revues débouchent naturellement sur des inventaires plus détaillés des propriétés d'usage des matériaux, des caractéristiques des procédés ainsi que des interactions obligées entre un matériau, le produit auquel il est destiné et le procédé de mise en œuvre utilisé. Les propriétés physiques des matériaux à l'état solide, qu'elles soient mécaniques, électriques, optiques ou thermique peuvent s'étendre sur plusieurs décades. La plupart de ces propriétés dépendent très fortement du type d'interaction entre atomes ou molécules qui assurent leur cohésion. Ces liaisons interatomiques conditionnent en effet, dans une large mesure, la structure de la matière à l'échelle atomique ou moléculaire, structure dont la cristallographie et les défauts ont des conséquences capitales sur les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques du matériau. Il est donc raisonnable, dans l'optique d'une sélection de ces matériaux, de les classer en fonction de ces différents types de liaisons chimiques. Rappelons que, en fonction de leur position dans la classification périodique de Mendeleïev, les espèces chimiques constitutives d'un matériau peuvent établir entre elles :

- des liaisons fortes, à caractère métallique, ionique ou covalent ; elles sont présentes à l'intérieur des édifices moléculaires, dans les édifices cristallins et les solides amorphes ;
- des liaisons faibles, à caractère électrostatique hétéropolaire intrinsèque ou induit ; ce sont elles qui assurent la cohésion intermoléculaire des solides constitués de la juxtaposition de plusieurs molécules.

Notre choix a porté sur le matériau polymère semi-cristallin **polyéthylène (PE)** sous forme d'un film noir pour les causes suivantes :

- Technique : Le matériau PE noir comporte du noir de carbone qui lui permet d'augmenter de manière considérable cette tenue aux UV. Ainsi, le PE noir a une remarquable stabilité au vieillissement. Sa grande souplesse lui permet de bien résister au gel. Le matériau PE :
 - ✓ se prête à la déformation due au gel puis reprend sa forme initiale au dégel,
 - ✓ peut supporter des températures allant de -40°C à 110 °C,
 - ✓ apporte une résistance thermique très importante
 - ✓ sous l'effet d'une variation de température, le PE aura tendance à se dilater ou se rétracter.
- Commerciale : Le polyéthylène basse densité, utilisée dans cette étude, est fabriqué au complexe pétrochimique de Skikda en Algérie. Le film commercial de polyéthylène basse densité (PEBD) 117 µm environ.
- Chimique : Le PE a une bonne tenue chimique et il résiste aux sels, aux acides et aux alcalis en solutions aqueuses diluées. De nombreux solvants peuvent être acceptés jusqu'à 50°C. Il résiste à des fluides ayant des valeurs de PH pouvant aller de 1,15 à 14. Le PE présente l'avantage d'être totalement inerte chimiquement pour les plages de températures conventionnelles. Ainsi, son utilisation garantit une pérennité maximale à son utilisation et à son dimensionnement.

II. Caractérisation du matériau d'étude :

Dans ce paragraphe, nous nous intéresseront aux différentes méthodes de caractérisation du matériau d'étude : composition chimique, émissivité, conductivité thermique, diffusivité thermique, masse volumique.

2.1 Composition chimique :

Nous récapitulons quelques propriétés intrinsèques au film noir en PE dans le **tableau 2.1**.

Tableau 2.1 : Propriétés intrinsèques au film noir en PE

Propriétés	Unité	Valeur
Densité [*]		0,943 ± 0,001
Température de fusion ^{**}	°C	127,6 ± 0,1
Taux de cristallinité ^{**}	%	40 ± 2
Masse molaire moyenne en poids ^{***}	Kg / mol	220
Module d'élasticité ^{****}	Mpa	345 ± 50
Température de transition vitreuse	°C	- 110
Coefficient de dilatation	K ⁻¹	2 · 10 ⁻⁴

* données issues de Richaud et al. [7].

** Mesuré par calorimétrie différentielle à balayage avec une vitesse de montée en température de 10°C/min sous atmosphère inerte.

*** Mesuré par chromatographie d'exclusion sphérique à 135°C dans le 1, 2, 4 trichlobenzène.

2.2 Emissivité :

L'émissivité dépend d'un grand nombre de facteurs, tels que la composition chimique du matériau, de l'état de surface et de la température, or il n'existe pas de loi générale prédictive permettant d'obtenir l'émissivité d'un matériau donné en fonction de ces facteurs. Généralement, pour le même matériau et aux mêmes conditions de mesure, on trouve dans la littérature, des recueils de valeurs d'émissivité qui sont le plus souvent dispersées. Il existe deux types de méthodes de mesure de l'émissivité : les méthodes radiométriques et les méthodes calorimétriques. Les méthodes calorimétriques sont très précises mais difficilement applicables à des mesures de terrain. Parmi les nombreuses méthodes radiométriques, on distingue les méthodes directes et indirectes. La méthode directe consiste à mesurer le flux émis par une surface (**figure 2-a**). La méthode indirecte consiste à éclairer la surface à caractériser et à mesurer le flux réfléchi par celle-ci (**figure 2-b**). L'émissivité s'obtient en utilisant les lois de Kirchhoff. Lorsque l'on effectue des mesures directes à température ambiante, le rayonnement réfléchi peut masquer le rayonnement émis par la surface du matériau. En fait, ces deux flux sont du même ordre de grandeur. Si la réflectivité de la surface est élevée, le flux réfléchi peut même devenir supérieur au flux émis. Ainsi, la méthode directe nécessite de chauffer le matériau à caractériser de manière à augmenter la part de flux émis. Ceci rend la méthode inutilisable sur le terrain pour la caractérisation de surfaces des dispositifs solaires par exemple, car elle nécessite de posséder un échantillon dont on peut contrôler et connaître la température de surface. Une méthode indirecte est utilisable sur le terrain, mais la problématique liée à la difficulté de différenciation d'un flux émis et d'un flux réfléchi demeure. L'utilisation de méthodes basées sur une modulation en température [8, 9] permet de différencier ces deux flux. La méthode indirecte modulée est donc la seule méthode permettant des mesures in-situ sur des matériaux des dispositifs à effet de serre à température ambiante. La surface à étudier est éclairée de manière isotrope à l'aide d'une source dont la température est modulée autour de la température ambiante (**figure 2-c**). Dans le cas où le matériau à caractériser est opaque, où la température moyenne de la source est proche de la température de la surface de l'échantillon et où la surface de la source peut être considérée comme grise dans la bande de longueur d'onde de mesure, les lois de Kirchhoff permettent d'établir une relation entre l'émissivité directionnelle ε' et la réflectivité hémisphérique directionnelle ρ' du matériau :

$$\varepsilon' + \rho' = 1 \quad (1)$$

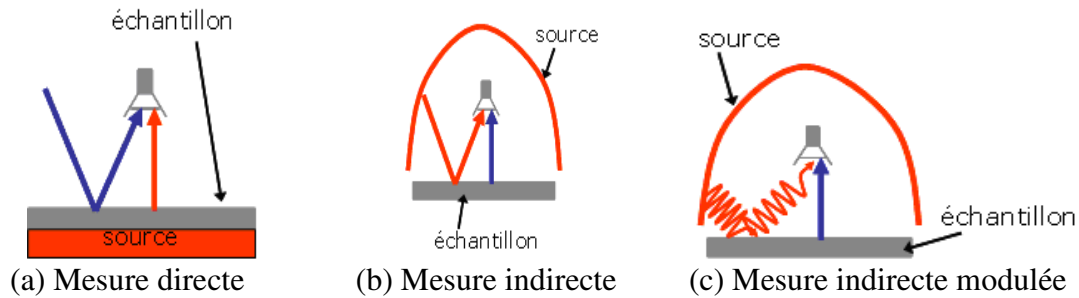


Figure 2 : Principes de mesure de l'émissivité par méthodes radiométriques

Nous proposons une méthode directe de mesure de l'émissivité totale de matériaux sur une gamme de température autour de l'ambiante. La méthode repose sur la modélisation de température de l'échantillon étudié et le traitement du signal infrarouge issu de la surface de l'échantillon. La précision absolue atteinte sur l'émissivité est de l'ordre du pour-cent. La méthode utilisée dans cette étude permet une mesure de la réflectivité hémisphérique-directionnelle et le calcul de l'émissivité de la surface en utilisant un émissomètre portable.

2.2.1 Structure et fonctionnement de l'émissomètre portable :

Le premier appareillage transportable de mesure d'émissivité développé au Centre d'Etude et de Recherche en Thermique, Environnement et Systèmes **CERTES**, de l'Université Paris-Est Créteil - Val de Marne, a été initialement conçu pour la caractérisation de l'émissivité de revêtements de chaussée [10, 11]. Ces revêtements possèdent en général une émissivité élevée comme la plupart des matériaux rencontrés dans le bâtiment [12].

L'appareillage actuel (**figure 3**) a été conçu pour une utilisation plus aisée sur le terrain et pour permettre un meilleur contrôle du fonctionnement de la source infrarouge ; il permet par ailleurs de réaliser des mesures d'émissivité dans différentes bandes de longueur d'onde du fait que le détecteur optique peut être remplacé très aisément. A ce jour, deux bandes de longueur d'onde sont accessibles : 1 - 20 μm d'une part et 8 - 14 μm d'autre part (**figure 4**). La bande 1-20 μm permet d'obtenir une valeur d'émissivité que l'on peut considérer comme totale puisqu'une surface à température proche de l'ambiante émet 74 % de son rayonnement dans cette bande. La bande 8 - 14 μm permet de disposer de valeurs d'émissivité dans la bande de longueur d'onde correspondant au domaine de sensibilité des caméras thermiques dites ondes longues. Toutes les caméras portables du commerce à vocation maintenance fonctionnent dans cette bande de longueur d'onde. Si la surface étudiée a un comportement très éloigné de celui d'un corps gris, il est possible que les valeurs d'émissivité dans ces deux bandes soient très différentes.

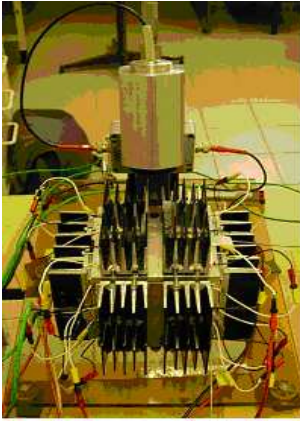


Figure 3 : Photographie de l'émissomètre Portable

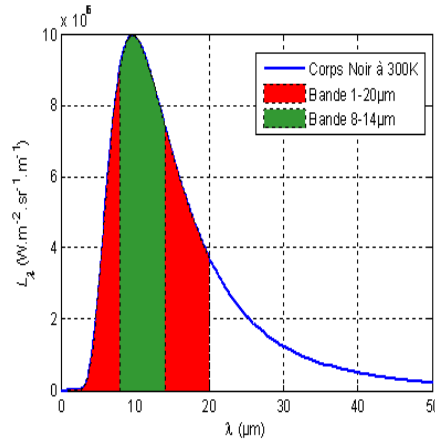


Figure 4 : Rayonnement d'un corps noir à 300 K et bandes de longueur d'onde utilisées

Description de l'appareillage : L'émissomètre conçu et réalisé est composé de trois blocs principaux (**figures 3 et 5**) : une source infrarouge, un dispositif optique de mesure du flux réfléchi, une chaîne de contrôle et d'acquisition pilotée par ordinateur.

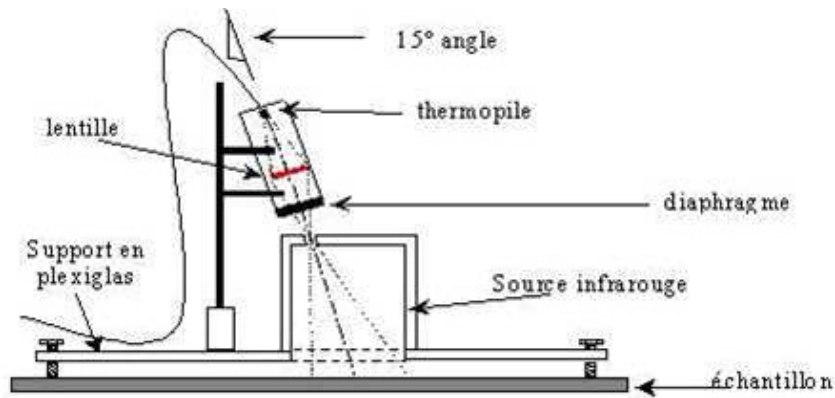


Figure 5 : Représentation schématique simplifiée de l'émissomètre portable

La source infrarouge est constituée d'un cube de dix centimètres de côté intérieur, en Duralumin, ouvert sur la face inférieure (**figure 6-a**). Les parois intérieures sont recouvertes d'une peinture très émissive ($\epsilon = 0,97$). Quatre éléments à effet Peltier sont fixés sur chacune des faces extérieures du cube. Chaque Peltier est équipé d'un dissipateur thermique pour évacuer la chaleur générée par effet Joule. Les 20 éléments Peltier sont branchés en série et alimentés par un amplificateur de puissance Basse Fréquence. Cet amplificateur est commandé analogiquement par un ordinateur afin d'obtenir une température de source modulée. La portion de flux réfléchi par l'échantillon est proportionnelle à la réflectivité ρ de celui-ci. Le système optique, constitué d'une lentille en ZnSe et d'une thermopile, permet de mesurer le flux réfléchi dans une direction précise. Le montage optique utilisé est du type 2f-2f (**figure 5**). La thermopile utilisée est une thermopile DEXTER modèle 1M. Ce composant mesure le flux absolu avec une grande détectivité et un encombrement réduit. Suivant le

domaine de longueur d'onde choisi, on utilise une thermopile large bande ou bien une thermopile fenêtrée (8-14 μm). Ces capteurs sont amovibles et permettent donc de réaliser des mesures dans deux bandes de longueur d'onde (**figures 6-b et 6-c**).

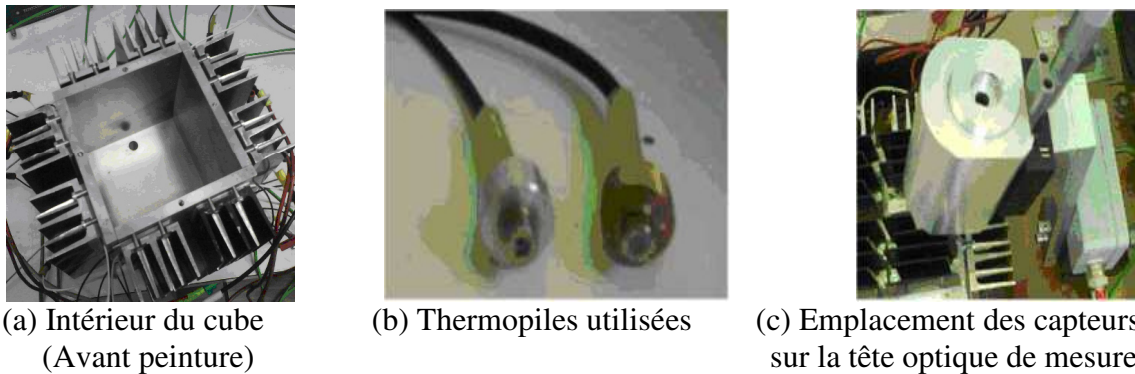


Figure 6 : Différentes vues de l'émissomètre

Le signal généré par la thermopile est amplifié à l'aide d'un amplificateur faible bruit de gain 1000, puis conditionné grâce à un module de conditionnement Analog Device 5B30. Un filtre passe-bas de fréquence de coupure égale à 4Hz élimine le bruit en haute fréquence. La température instantanée de la source est mesurée à l'aide de cinq thermocouples de type K (un par face du cube). Ces thermocouples sont reliés à des modules de conditionnement Analog Device 5B37, qui amplifient et linéarisent le signal électrique issu des thermocouples en un signal analogique compris entre 0 et 5 Volts. Les signaux provenant de la thermopile et du thermocouple sont ensuite enregistrés à l'aide d'une carte d'acquisition. L'ensemble du dispositif est piloté par une application LabView TM. La géométrie de la source infrarouge permet d'assurer un éclairage s'approchant du cas d'une source hémisphérique. Les dimensions choisies permettent d'éclairer une surface étendue de 100 cm. Par ailleurs, le montage optique choisi permet également de récupérer le flux réfléchi sur une surface de quelques dizaines de cm^2 . Ceci permet de s'affranchir de variations locales d'émissivité et donc d'obtenir une valeur moyenne sur une zone de surface très supérieure à la taille des inhomogénéités du matériau étudié. En effet, la plupart des matériaux des dispositifs à effet de serre sont par essence très hétérogènes ou poreux et présentent souvent par ailleurs une surface de rugosité élevée avec des cavités de taille millimétrique ou centimétrique. Il est donc important de s'assurer que l'appareillage possède une surface d'analyse supérieure à celle de ces hétérogénéités.

2.2.2 Protocole de mesure :

L'amplitude de la modulation de température et la fréquence de modulation sont modifiables. Des études précédentes ont permis de déterminer que l'utilisation d'une fréquence de modulation égale à 12,5 mhz constituait un bon compromis assurant un rapport signal sur

bruit satisfaisant et une durée de mesure de l'ordre de 15 minutes [11, 12]. Donc, les mesures qui seront présentées par la suite ont été effectuées en utilisant une fréquence de modulation de 12,5 mhz, soit une période de 80 s. L'amplitude crête-à-crête de la modulation de température de la source infrarouge est de l'ordre de 4 °C. Chaque mesure d'émissivité est déterminée à partir d'enregistrements effectués sur 12 périodes du signal modulé. La fréquence d'échantillonnage utilisée est égale à 1 Hz.

2.2.3 Détermination de l'émissivité :

✓ *Traitement des données* : Après acquisition des données, on dispose de deux signaux temporels $T(t)$ et $U(t)$ enregistrés sur un nombre entier de périodes. Une correction de la dérive par interpolation polynômiale permet d'obtenir des signaux à valeur moyenne nulle. Un calcul de la transformée de Fourier complexe permet ensuite d'obtenir les amplitudes de température de la source ΔT et de tension mesurée par la thermopile ΔU à la fréquence de modulation fixée par l'utilisateur. Cette procédure est illustrée sur la **figure 7** pour la température de la source et sur la **figure 8** pour la tension de la thermopile. Le cas présenté ici est celui de la caractérisation d'une surface en bois contre-plaqué recouverte du film polymère en PE étudié. On peut remarquer sur la **figure 8 (d)** que la modulation du signal réfléchi mesuré par la thermopile est nettement visible et ce malgré le fait que seulement 7 % du taux émis par la source est réfléchi dans ce cas présent. La **figure 8 (c)** montre que le pic centré autour de 12,5 mhz correspondant au signal délivré par la thermopile à la fréquence de modulation de la source se distingue très nettement du bruit de mesure. Ceci permet à l'appareil de distinguer des surfaces d'émissivité proches même lorsque celles-ci ont un comportement très émissif.

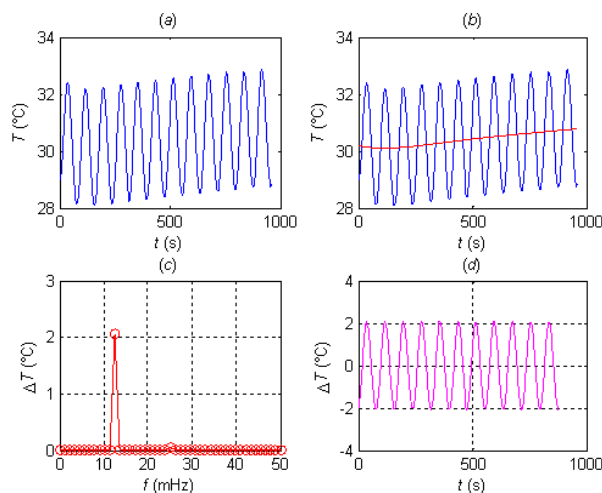


Figure 7 : Mesure et traitement de la température de la source :

- (a) Mesure brute, (b) mesure brute et polynôme d'interpolation permettant la correction de la dérive, (c) FFT du signal de température corrigé, (d) signal de température corrigé (sans dérive)

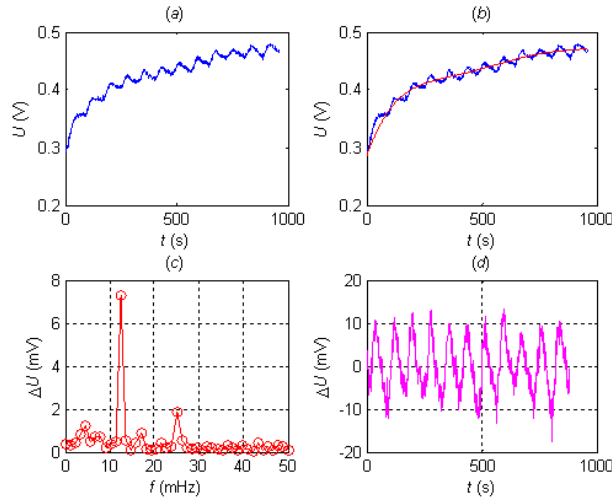


Figure 8 : Traitement de la tension mesurée par la thermopile :

(a) Mesure brute, (b) mesure brute & polynôme d'interpolation permettant la correction de la dérive, (c) FFT du signal corrigé, (d) tension corrigée (sans dérive)

✓ *Calcul de l'émissivité* : L'émissivité ε est obtenue grâce à la relation [10, 11] :

$$\varepsilon = 1 - K \cdot \frac{|\tilde{U}|}{|\tilde{T}_s^4|} \quad (2)$$

Où $|\tilde{U}|$ est l'amplitude de tension délivrée par la thermopile à la fréquence de modulation

$|\tilde{U}| = \Delta U$, $|\tilde{T}_s^4|$ est l'amplitude de la température absolue de la source élevée à la puissance 4 à la fréquence de modulation et K est une constante d'étalonnage déterminée à l'aide d'une mesure préalable sur un échantillon d'émissivité connue. La valeur de $|\tilde{T}_s^4|$ est déterminée à

partir de la relation suivante [11] :

$$|\tilde{T}_s^4| = 8 \cdot T_{moy} \cdot \Delta T \cdot (T_{moy}^2 + \Delta T^2) \quad (3)$$

Où T_{moy} est la température moyenne absolue de la source pendant la mesure.

La constante d'étalonnage K est calculée à partir de [10, 11] :

$$K = (1 - \varepsilon_{réf}) \cdot \frac{|\tilde{T}_s^4|}{|\tilde{U}_{réf}|} \quad (4)$$

Où $\varepsilon_{réf}$ est l'émissivité de l'échantillon de référence et $|\tilde{T}_s^4|$ et $|\tilde{U}_{réf}|$ sont calculées à partir de mesures d'amplitude de température de la source et de tension de la thermopile lors de la mesure sur la surface de référence.

L'échantillon de référence utilisé est une feuille d'Aluminium rugueux d'émissivité égale à 0,063 [13]. Des tests préliminaires ont permis de montrer qu'il est préférable d'étalonner l'appareil à l'aide d'une surface très réfléchissante afin d'augmenter le rapport signal sur bruit, même si les émissivités à mesurer sont le plus souvent proches de l'unité dans le cas de la plupart des matériaux des dispositifs à effet de serre [10]. En outre, certaines surfaces sont utilisées comme surfaces de contrôle permettant de vérifier le bon fonctionnement de

l'appareil. Deux surfaces sont utilisées en routine : Une surface en alumine de pureté égale à 99,7 % d'émissivité égale à 0,76 [11] et une surface en PVC lisse recouverte d'une peinture noire Nextel Velvet 811-21 d'émissivité égale à 0,97 [14, 10, 11].

✓ *Résultats des mesures de l'émissivité* : On présente les résultats obtenus pour le matériau étudié, le film polymère en PE, dans les deux bandes de longueur d'onde disponibles à ce jour. Les résultats sont présentés dans le **tableau 2.2**. Les valeurs ont été obtenues après étalonnage sur une feuille d'aluminium rugueux comme présenté précédemment, en considérant la même valeur d'émissivité dans les deux bandes de mesure. Les mesures ont été réalisées à température ambiante ($21^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$) au sein du CERTES. La température moyenne de la source infrarouge pendant les mesures varie entre 25°C et 30°C . Ce point est important puisqu'il faut s'assurer, pour que la relation 2 soit toujours valide pour des grandeurs totales, que la température de l'échantillon et de la source soient proches l'une de l'autre [10, 11]. Les résultats obtenus sont réunis dans le **tableau 2.2**.

Tableau 2.2 : Résultats de mesure de l'émissivité

Valeur de l'émissivité		Incertitude type composée	Incertitude élargie
8 - 14 μm	1-20 μm		
0,98	0,97	0,004	0,007

On note systématiquement une valeur d'émissivité légèrement plus élevée dans la bande 8-14 μm que dans la bande 1-20 μm . Néanmoins, ces résultats ont permis de montrer la faisabilité des mesures dans une bande de longueur d'onde plus réduite, tout en conservant un rapport signal sur bruit satisfaisant pour la caractérisation de surfaces à forte émissivité. Il est toutefois nécessaire de rappeler que certains des matériaux utilisés dans les dispositifs à effet de serre possèdent des émissivités faibles, cas des aciers par exemple. L'appareil a donc été conçu pour pouvoir mesurer des émissivités quelconques.

2.3 Masse volumique :

La méthode choisie pour la caractérisation de la masse volumique est celle du pycnomètre. Les mesures sont réalisées avec une balance et un pycnomètre pour des petites quantités (de 1 à 4 g) pour le film polymère en PE. Le pycnomètre utilisé est muni d'un capillaire marqué qui permet de mesurer un volume très précis. On pèse le pycnomètre vide (m_0) à l'aide d'une balance de précision, ensuite, On pèse le pycnomètre + l'échantillon (m_0+m). Après, on immerge l'échantillon jusqu'aux limites du pycnomètre placé dans un bain thermostaté, on pèse alors l'ensemble (m_0+m+m_2). Ensuite, le pycnomètre rempli du liquide d'immersion après dégazage (eau distillée) est pesé (m_0+m_1). Après avoir déterminé chaque masse, on obtient la

masse volumique de l'échantillon grâce à :

$$\rho = \frac{m \times \rho_{eau}}{m_1 - m_2} \quad (5)$$

Où ρ_{eau} est la masse volumique de l'eau. L'incertitude sur de la masse volumique de l'échantillon ρ est aussi calculée.

La masse volumique du film polymère en PE a été caractérisée en utilisant un pycnomètre et, après mesure, on trouve $\rho_{PE} = (0,929 \pm 0,01) \text{ g.cm}^{-3}$.

2.4 Conductivité thermique et diffusivité thermique :

Nous proposons une méthode de mesure permettant la caractérisation simultanée de la conductivité thermique (**k**) et de la diffusivité thermique (**a**) d'un échantillon du film polymère en PE à température ambiante. Nous présentons le dispositif de mesure ainsi que le traitement du signal mesuré et le principe de la méthode d'identification mise en œuvre pour la détermination de **k** et **a** et enfin les résultats obtenus expérimentalement.

2.4.1 Dispositif expérimental :

Le montage réalisé est un dispositif conçu au centre de recherche en thermique énergétique et systèmes (*CERTES*) [14]. La méthode adoptée consiste à moduler la température de l'échantillon et à mesurer les variations de température sur chacune de ses faces. Les mesures sont effectuées sous vide (pression $< 10^{-4}$ mbar) pour réduire les pertes par convection sur les faces latérales. Le dispositif comporte :

- un porte échantillon, • une enceinte à vide reliée à un groupe de pompage,
- une source d'excitation, • un système de contrôle et d'acquisition.

✓ *Porte Échantillon* : Un échantillon parallélépipédique est inséré entre deux plaques métalliques (**figure 9**).

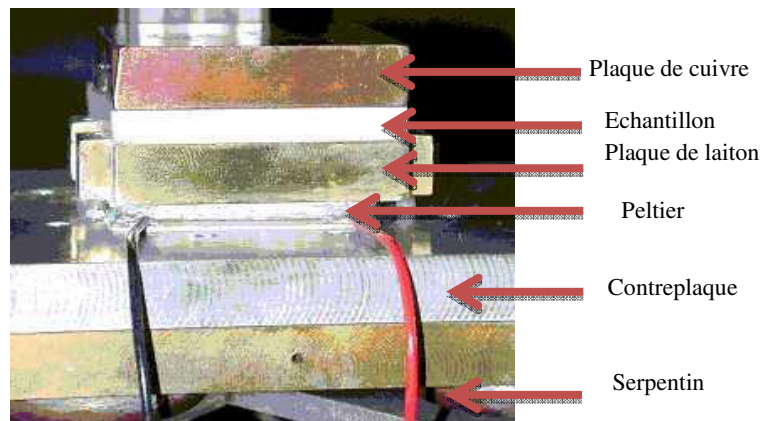


Figure 9 : Dispositif expérimental de mesure des paramètres thermophysiques

Une graisse thermo-conductrice est appliquée sur les surfaces de contact afin de réduire au maximum les résistances de contact. Une graisse silicone chargée avec un oxyde métallique, de conductivité thermique proche de $1 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ a été choisie. La plaque d'entrée est soumise à une excitation thermique périodique. La température est mesurée à l'aide de thermocouples

de type K (Chromel-Alumel) insérés dans les deux plaques métalliques à une profondeur de 2 cm. Une contreplaque en duralumin supporte le bloc de mesure qui comporte la plaque métallique d'entrée, l'échantillon, la plaque métallique de sortie et le Peltier. De la graisse thermique est disposée entre la contreplaque et le bloc de mesure. La dissipation du flux de chaleur est assurée via un serpentin rempli par un fluide caloporteur se trouvant sur la face arrière de la platine en laiton.

✓ *Source d'excitation* : La source d'excitation est un bloc Peltier (*Marlow Industries, modèle DT12-6*). Il assure la modulation en température de l'échantillon qui est pris en sandwich entre les deux plaques métalliques d'entrée et de sortie. Le bloc Peltier est composé de plusieurs éléments qui se comportent comme plusieurs résistances électroniquement en série et thermiquement en parallèle. L'ensemble se trouve à l'intérieur de deux plaques de céramique. Lorsque le Peltier est alimenté par un courant électrique, il produit un écart de température entre les deux faces des plaques de céramique qui est lié au flux thermique transversal. La direction du flux est donnée par le sens de déplacement des porteurs majoritaires. L'effet Peltier engendre un dégagement de chaleur proportionnel à la puissance électrique injectée. La tension d'alimentation imposée pour le Peltier est une somme de 5 sinusoïdes de fréquences multiples de la fréquence fondamentale f . La tension appliquée peut alors être écrite sous la forme :

$$U(t) = U_{moy} + \sum_{n=1}^5 U_n \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 2^{n-1} \cdot f_0 \cdot t) \quad (6)$$

Où U_{moy} représente la tension d'excitation moyenne, U_n les amplitudes des différentes composantes fréquentielles et t le temps. Dans la plupart des cas $U_{moy} = 0$. La limitation donnée par le constructeur est : $U_{max} = 14,5$ volts et $I_{max} = 5,6$ A.

✓ *Chaîne de mesure* : Le Peltier est alimenté en tension par un amplificateur de puissance de gain 2 commandé par une tension analogique fournie par une carte d'E/S analogiques via un module de commande (*Analog Devices, 5B49*). L'amplificateur est alimenté par une alimentation stabilisée (*AX 322 Metrix de ITT Instruments*) qui permet de fournir un courant maximal de 2,5A. Ce dispositif permet d'imposer les modulations en température du Peltier. Les signaux fournis par les thermocouples au sein des deux plaques (entrée, sortie) sont amplifiés, filtrés (filtre passe-bas à 4 Hz) et linéarisés à l'aide de modules de conditionnement (*Analog Devices, 5B37-K-02*). Le signal en sortie du conditionneur est donné à partir de

l'équation suivante :

$$U_{sortie} = (U_{T_sortie} - U_0) \cdot G_a \quad (7)$$

Avec U_{sortie} : Tension de sortie (V) du module, G_a : Gain de sortie (V/mV) du module 5B37,

U_{T_sortie} : Tension de sortie (mV) du thermocouple à la température mesurée par le module,

U_0 : Tension de sortie (mV) du thermocouple à la température de soudure froide.

Le jeu d'amplitudes appliqué aux cinq fréquences est choisi de manière à ce qu'il n'engendre pas de variations de températures trop importantes au sein de l'échantillon. Cette procédure permet de considérer que les propriétés thermiques sont constantes pendant toute la durée de l'expérience. Les différents modules de conditionnement sont placés sur un rack (*National Instrument, 5B01*) lui-même relié à une carte d'acquisition (*National Instrument, NI6035E*), possédant 16 entrées analogiques et 2 sorties analogiques. Cette carte est pilotée par l'intermédiaire d'une application Labview TM qui permet de :

- Fixer les différents paramètres du signal de commande (fréquences et amplitude des sinusoïdes),
- Réaliser des acquisitions des températures sur les faces avant et arrière de l'échantillon, ainsi que de la pression dans l'enceinte,
- Sauvegarder les données acquises dans les fichiers textes au format ASCII.

Les thermocouples ont été étalonnés à l'aide d'un bain thermostaté. La tension délivrée par les thermocouples a été mesurée ainsi que celle du bain à l'aide d'un thermomètre. La courbe d'étalonnage est par la suite obtenue par un ajustement polynomial des tensions en fonction des températures. Les paramètres d'ajustement sont introduits dans l'application Labview afin de convertir les tensions délivrées par les thermocouples en températures.

✓ *Enceinte et dispositif à vide* : Les échantillons étudiés, ainsi que le porte échantillon sont contenus dans une enceinte de forme cylindrique en verre de 6 mm d'épaisseur. Le cylindre est posé sur une plaque en acier inoxydable qui est munie de deux ouvertures de 20 mm de diamètre chacune. La première est reliée aux groupes de pompage et la seconde permet de remettre l'enceinte à la pression atmosphérique. Une plaque en acier inoxydable est disposée sur la partie supérieure de l'enceinte et joue le rôle de couvercle. L'étanchéité du dispositif est assurée par deux joints en caoutchouc qui garantissent un bon contact entre les deux plaques et l'enceinte en verre. Des passages électriques étanches au vide, permettant la mesure des tensions fournies par les thermocouples et l'alimentation du Peltier qui sont disposés sur les deux plaques. Afin d'assurer la sécurité de l'enceinte, nous disposons d'un cylindre en plastique transparent qui entoure celui en verre. Le dispositif de pompage est constitué de deux pompes montées en série. La première est une pompe à palettes rotatives (*Trivac B D8B* de *Leybold*) avec un débit nominal d'environ 9,7 m³/h. Elle peut évacuer l'air dans l'enceinte jusqu'à un domaine de vide moyen. La deuxième est une pompe turbo moléculaire aux dimensions compactes (*Turbovac 50* de *Leybold*) avec un débit nominal de 118 m³/h. La pression limite donnée par le constructeur est de 8.10⁻⁹ mbar. Elle est destinée au pompage de récipients à vide de dimensions réduites dans le domaine du vide poussé. La pression dans le

dispositif de pompage est mesurée à l'aide de deux jauges. Une jauge primaire à thermocouple (*Thermo VAC TM20* de *Leybold*) assure une mesure de pression entre 100 et 10^{-3} mbar et une jauge secondaire à ionisation à cathode froide (*Penning VAC PM31*) permet d'indiquer la pression à l'entrée de la pompe turbo entre 10^{-2} et 10^{-9} mbar.

2.4.2 Propriétés thermophysiques :

Dans cette partie nous présentons les résultats obtenues des propriétés thermophysiques du film polymère en PE utilisé comme absorbeur de chaleur dans les dispositifs à effet de serre.

- *Conductivité et diffusivité thermique* : Les valeurs de la conductivité et la diffusivité thermique du film en PE sont caractérisées par la méthode périodique présentée auparavant. La conductivité thermique obtenue est $k_{PE} = (0,48 \pm 0,01)$ et la diffusivité thermique est : $a_{PE} = (0,314 \pm 0,02)$.

- *Capacité thermique massique* : La capacité thermique massique du PE est donnée en calculant la valeur de C_{pPE} à partir des valeurs de la masse volumique mesurée, de la conductivité et de la diffusivité thermique en utilisant la relation :
$$C_p = \frac{k}{a \cdot \rho} \quad (8)$$

On obtient la valeur de la capacité thermique massique suivante : $C_{pPE} = (1,645 \pm 0,012)$.

III. Techniques expérimentales de caractérisation du vieillissement du PE :

Nous exposons, maintenant, les différentes techniques expérimentales utilisées pour la caractérisation physico-chimique du vieillissement des échantillons de PE, en l'occurrence, la diffraction des rayons X (DRX), la microscopie électronique à balayage (MEB), la spectrométrie à dispersion d'énergie (EDX) couplée au MEB, l'analyse thermique, l'UV-visible du solide et l'infra-rouge à transformée de Fourier (FTIR). Ces techniques d'analyse vont nous permettre d'évaluer les propriétés structurales et texturales de nos matériaux.

3.1 Diffraction des rayons X (DRX) :

3.1.1 Principe :

Cette technique analytique permet de mettre en évidence les différentes phases cristallines présentes dans un échantillon par comparaison aux fiches internationales de diffraction JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standard). Un rayonnement X est produit par un bombardement électronique sur une cible au cuivre appelée anticathode. Le faisceau de rayons X, après avoir subi divers traitements, converge vers l'échantillon plat où il est diffracté par les plans cristallographiques formant un angle 2θ avec le faisceau incident. Un compteur enregistre un signal proportionnel à l'intensité du rayon diffracté. Le traitement du signal permet de connaître les paramètres de la maille cristalline et de caractériser les phases

cristallines de l'échantillon. La DRX est basée sur la mesure des angles de diffraction des rayons X par les plans cristallins de l'échantillon à analyser. Les angles de diffraction sont reliés aux caractéristiques du réseau cristallin (d_{hkl} = distance interréticulaire de la famille de plan hkl) et du rayonnement incident (longueur d'onde λ) par la loi de Bragg [15] :

$$2 \cdot d_{hkl} \cdot \sin \theta = n \cdot \lambda \quad (9)$$

d_{hkl} (Å) : la distance interréticulaire d'un faisceau,

θ (°) : l'angle formé par les faisceaux incidents et diffractés (angle de Bragg),

λ (Å) : la longueur d'onde du faisceau incident, n : ordre de diffraction de Bragg.

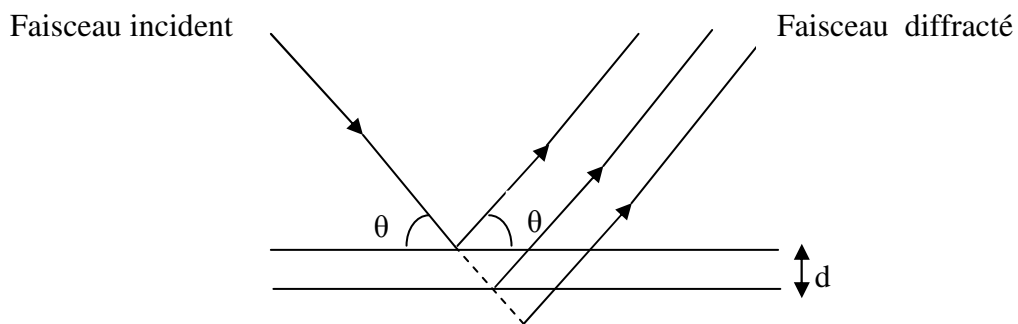


Figure 10 : Principe de la diffraction des rayons X

3.1.2 Conditions d'analyse :

Les analyses DRX ont été réalisées au laboratoire de recherche en chimie LCSCO de l'université de Tlemcen. L'appareil utilisé est un diffractomètre Philips PW 3710, équipé d'une anode en cuivre Cu ($\lambda_{K\alpha 1} = 1,54060 \text{ \AA}$) et d'un monochromateur arrière en graphite et piloté par un micro-ordinateur. Les conditions générales d'acquisition correspondent à un intervalle angulaire 2θ allant de 10 à 80° avec un pas d'analyse de $0,3^\circ$ pour une durée d'acquisition de 1s par pas.



Figure 11 : Le diffractomètre Philips PW 3710

3.2 Microscopie électronique à balayage (MEB) et spectrométrie à dispersion d'énergie (EDX) couplée au MEB :

3.2.1 Principe :

La microscopie électronique à balayage (MEB) ou, en anglais, « Scanning Electron Microscopy » (SEM) est utilisée pour obtenir des images de la surface de l'échantillon. Le fonctionnement du microscope est basé sur l'émission des électrons produits par la cathode et la détection des électrons secondaires émergents de la surface sous l'impact d'un très fin pinceau d'électrons primaires qui balaye la surface observée et permet d'obtenir des images avec une résolution pouvant atteindre quelques nanomètres et une très grande profondeur de champ. La spectrométrie à dispersion d'énergie (EDX) couplée au MEB permet l'analyse qualitative et quantitative de la composition chimique de la surface examinée (éléments minéraux/métalliques présents dans l'échantillon). Elle consiste à analyser les rayons X générés par l'échantillon placé sous le faisceau d'électrons du microscope électronique à balayage. Le rayonnement émis lors de l'interaction entre les rayons X et la matière de l'échantillon est retranscrit sous forme de spectre, où apparaissent les pics d'intensité variable, caractéristiques des éléments métalliques ou minéraux en présence.

3.2.2 Conditions d'analyse :

La microscopie électronique à balayage (MEB) a été réalisée au laboratoire de microscopie à l'université de Tlemcen sur un appareil HITACHI TM1000-Swift-ED couplé à un spectromètre à dispersion d'énergie EDX et piloté par un micro-ordinateur (**figure 12**).



Figure 12 : Appareil MEB HITACHI TM1000-Swift-ED.

3.3 Analyse thermique :

3.3.1 Principe :

Cette analyse permet de déterminer l'évolution thermique d'un matériau ; on peut suivre les transformations qui ont lieu aux différentes températures et essayer de déterminer les phénomènes chimiques qui sont responsables des effets observés. Cette méthode permet aussi de donner une idée sur la stabilité thermique des échantillons par la détermination des

quantités de masses perdues en fonction de la température et par la détermination de la température maximale de chauffage.

Les différentes techniques d'analyse thermique sont la thermogravimétrie, l'analyse thermique différentielle et la calorimétrie :

- L'analyse thermogravimétrique (ATG) permet de déterminer les variations de masse d'un échantillon en fonction du temps pour une vitesse constante d'augmentation de la température. On sait ainsi que, à chaque perte de masse il y a eu une réaction au sein de l'échantillon. On a donc un suivi précis de la masse de l'échantillon en fonction de la température,
- L'analyse thermique différentielle (ATD), apparue en 1887 à la suite des travaux de H. Le Chatelier, consiste à mesurer l'écart de température entre l'échantillon et la substance de référence, soumise à la même loi d'échauffement. Cette technique d'analyse permet de suivre les phénomènes exo et endothermiques qui ont lieu lorsque les échantillons sont traités thermiquement,
- La calorimétrie différentielle programmée ; appelée aussi calorimétrie différentielle à balayage ou, en anglais, « Differential Scanning Calorimetry » (DSC) mesure l'écart de flux de chaleur entre l'échantillon et un matériau de référence soumis aux mêmes variations de température dans une atmosphère contrôlée. Cette technique d'analyse permet donc de déterminer la température et la chaleur dégagée ou consommée lors d'une transformation.

3.3.2 Conditions d'analyse :

L'analyse thermique ATG-ATD des échantillons a été réalisée au laboratoire de catalyse en chimie organique (LACCO) de l'université de Poitiers. L'appareil utilisé est de type SDT Q600 (**figure 13**). L'analyse a été faite sous air avec une rampe de température de 5°C /min dans l'intervalle de 25 à 1200 °C pour quelques échantillons et à 1000 °C pour d'autres.



Figure 13 : Appareil d'analyse thermique « SDT Q600 instrument »

3.4 Calorimétrie différentielle à balayage (DSC) : La température de fusion (T_f), le taux de cristallinité (χ_c) et le temps d'induction à l'oxydation (TIO) des échantillons ont été mesurés

par analyse calorimétrique différentielle (DSC, differential scanning calorimetry) à l'aide de calorimètres de type Q10, Q20 (**figure 14**) ainsi que Q1000 de la société TA Instruments. Ces calorimètres ont été calibrés avec de l'indium au laboratoire LCSCO à l'université de Tlemcen. La masse des échantillons a varié entre 4 et 8 mg.



Figure 14 : Appareil de mesure par analyse calorimétrique différentielle

3.4.1 Température de fusion et taux de cristallinité :

Le principe de fonctionnement du calorimètre consiste à mesurer le flux de chaleur nécessaire au maintien du matériau à la même température que celle de l'échantillon de référence. L'enregistrement d'un signal proportionnel à la différence de flux de chaleur entre ces deux éléments permet de déterminer l'enthalpie de fusion. Lors d'un essai, un échantillon polymère de 4 à 8 mg est placé dans des capsules hermétiques en aluminium. Il est chauffé sous azote (débit de $50 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$) avec une vitesse de chauffe de $10 \text{ }^\circ\text{C}$ par minute de 25 à $200 \text{ }^\circ\text{C}$. Les essais sont réalisés sous azote afin d'éviter toute oxydation thermique du matériau. Cette technique permet de déterminer la chaleur de fusion ΔH_f (aire sous le pic endothermique-**Figure 15**) et la température de fusion T_f (position du sommet du pic endothermique).

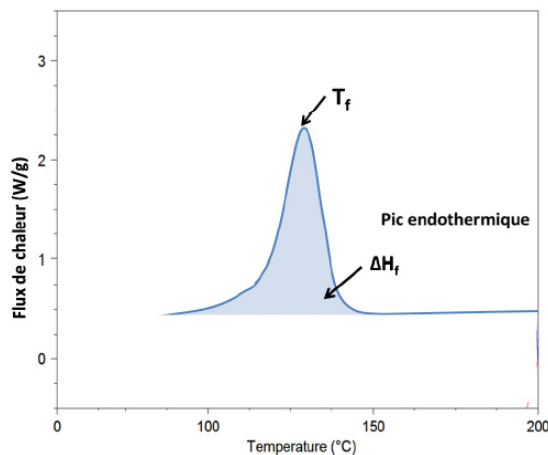


Figure 15 : Détermination de T_f et ΔH_f par DSC pour le PE.

Cette technique a donc permis de caractériser la morphologie du matériau étudié :

- La température de fusion permet d'estimer la taille des cristaux et la masse molaire du matériau. Ainsi, une température de fusion élevée implique généralement de gros cristaux issus d'une masse molaire élevée et d'un degré d'enchevêtrement faible.
- Le taux de cristallinité (χ_c) correspond au rapport entre l'enthalpie de fusion du polymère (ΔH_f) et celle de ce même polymère considéré comme 100 % cristallin (ΔH_f^0) :

$$\chi_c = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^0} \quad (10)$$

Dans notre étude, nous avons choisi $\Delta H_f^0 = 290 \text{ (J.g}^{-1}\text{)}$ [16, 17] pour le PE.

3.4.2 Temps d'induction à l'oxydation (TIO) :

Le temps d'induction à l'oxydation (TIO) correspond au temps nécessaire pour amorcer l'oxydation du polymère sous oxygène pur dans des conditions isothermes sévères. Lors d'un essai de TIO, un échantillon polymère de 4 à 8 mg est placé dans des capsules ouvertes en aluminium, il est chauffé sous azote (débit de 50 mL.min^{-1}) de 50 à 200 °C puis il est maintenu pendant environ 5 minutes à 200 °C. Ensuite, une fois la température équilibrée, l'azote est remplacé par l'oxygène pur (même débit) et la variation du flux de chaleur au cours du temps est enregistrée par un ordinateur. Le TIO correspond à l'onset (temps nécessaire à l'apparition) du pic d'oxydation du polymère (**Figure 16**). Les mesures ont été répétées deux à trois fois pour estimer la dispersion des résultats sur les échantillons.

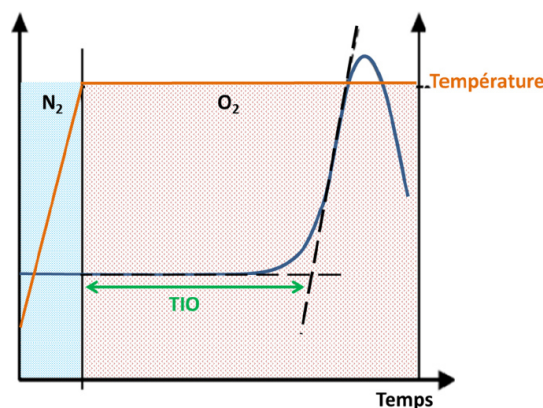


Figure 16 : Détermination du TIO par DSC pour le PE stabilisé.

Le TIO est une mesure de la quantité d'antioxydants présents dans le polymère. En effet, l'oxydation rapide a lieu après que la quantité d'antioxydants de l'échantillon est totalement épuisée. Pour le PE pur, le TIO est très faible (autour de 2 minutes) alors que pour un PE stabilisé, il est autour de quelques centaines de minutes. Par conséquent, cette technique peut être utilisée pour doser les antioxydants dans un polymère, mais aussi pour suivre leur disparition au cours du vieillissement thermique.

3.5 Spectroscopie d'absorption UV- visible du solide :

3.5.1 Principe :

L'absorption d'un rayonnement électromagnétique par des molécules dans le domaine énergétique de l'ultraviolet (λ : 200 - 400 nm) et le visible (λ : 400 - 800 nm) donne lieu à des transitions entre différents niveaux électroniques. L'envoi d'un photon de fréquence ν provoque une variation de l'état d'énergie de l'espèce chimique. L'énergie nécessaire pour passer de l'état E_n à l'état E_{n+1} ou l'inverse est : $\Delta E = E_{n+1} - E_n = h \nu$ (h : constante de Plank).

La spectroscopie UV - Visible concerne les transitions des électrons de valence des ions entre les orbitales atomiques ou moléculaires. Les transitions électroniques peuvent être classées en plusieurs groupes selon la nature des sauts électroniques :

- Les transitions d-d rencontrées dans le cas des ions des métaux de transition,
- Les transferts de charge qui impliquent un transfert d'électrons d'une orbitale occupée localisée sur un donneur à une autre non occupée localisée sur un accepteur,
- Les transitions $n-\pi^*$ et $\pi-\pi^*$ qui concernent les sauts d'électrons π ou d'électrons n de doublets libres dans les orbitales moléculaires des molécules organiques.

Le spectre d'absorption est obtenu après analyse de la lumière transmise ou réfléchiée par le milieu absorbant placé entre la source de la lumière et le détecteur. Les spectrophotomètres comprennent une ou deux sources polychromatiques, un milieu dispersif qui sépare les différentes fréquences (monochromateur à prisme, ou à réseau ou les deux à la fois), une cellule contenant l'échantillon, un système de détection (photomètre). Ce dernier compare l'intensité lumineuse avant et après interaction avec la substance. La technique de transmission est utilisée pour les solutions homogènes. Dans le cas de catalyseurs solides ou de suspensions troubles, cette technique est remplacée par la réflexion diffuse ou réflectance.

3.5.2 Transmission :

Dans le cas des liquides, des gaz ou des solides transparents, on analyse la lumière transmise

par l'échantillon et on définit la transmittance $T = \frac{I}{I_0}$ ou absorbance $A = \log_{10} \left(\frac{I_0}{I} \right)$.

I_0 est l'intensité incidente et I l'intensité transmise ou réfléchiée.

La concentration de l'absorbant [Abs] est reliée à A par la relation : $A = \epsilon$ [Abs] ; où ϵ est le coefficient d'extinction molaire.

3.5.3 Réflexion :

Lorsqu'un faisceau de lumière d'intensité I_0 arrive sur une poudre en lit plan, deux phénomènes de réflexion se produisent : la réflexion spéculaire pour laquelle les

microcristaux constituant le lit agissent comme un miroir et la réflexion diffuse pour laquelle les grains diffusent le rayonnement dans tout l'espace (**figure 17**).

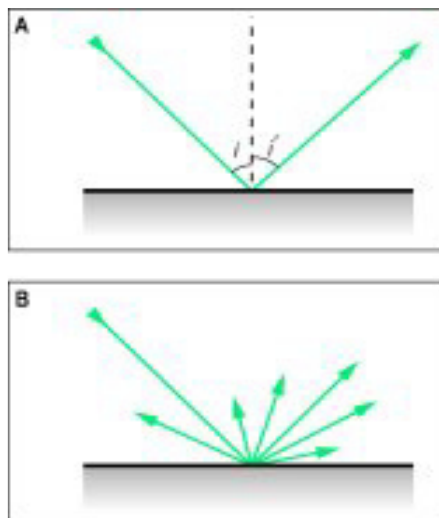


Figure 17: Phénomène de réflexion : spéculaire (A) et diffuse (B).

L'échantillon absorbant une partie du rayonnement, l'intensité diffusée I sera plus faible que l'intensité incidente I_0 . De plus le détecteur ne reçoit qu'une faible partie du rayonnement diffusé I . La mesure devient alors délicate et une sphère d'intégration doit être employée. Cette sphère recouverte intérieurement d'un matériau hautement diffusant et peu absorbant (MgO ou $BaSO_4$ par exemple) réfléchit la lumière diffusée et permet d'augmenter la fraction de I arrivant au détecteur (30 à 50 %). Le pourcentage de réflexion de l'échantillon est comparé à celui d'un composé standard (blanc dans un grand domaine de longueur), l'intensité I_0 étant envoyée alternativement sur l'échantillon et sur la référence.

3.5.4 Conditions d'analyse :

L'analyse UV-visible en réflexion diffuse a été effectuée dans notre laboratoire (LCSCO) sur un appareil Perkin Elmer, Lambda 800 piloté d'un micro-ordinateur (**figure 18**).



Figure 18 : Spectromètre UV-Visible

3.5.5 Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) :

a. Principe : La spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (ou FTIR : Fourier Transformed Infra-Red spectroscopy) s'appuie sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par le composé analysé. Elle permet, via la détection des vibrations caractéristiques des liaisons chimiques, l'identification des fonctions chimiques présentes dans l'échantillon. Le domaine infrarouge entre 4000 cm^{-1} et 400 cm^{-1} correspond au domaine de vibration des molécules. Pour qu'une molécule soit active de manière significative en infrarouge, elle doit présenter un moment dipolaire permanent non nul. L'absorption d'un photon IR est associée à la vibration du moment dipolaire de la molécule qui peut être interprétée en termes de changement d'énergie vibrationnelle sur un mode donné. Il en résulte que seuls les modes de vibration impliquant une vibration du moment dipolaire de la molécule sont observés en infrarouge. Comme dans tout phénomène d'absorption, les longueurs d'onde IR pouvant être absorbées correspondent aux énergies de vibration du mode de la molécule absorbante.

b- conditions d'analyse : L'analyse infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) a été réalisée au laboratoire de spectroscopie et pharmacologie structurale de l'université de Tlemcen. Les spectres ont été enregistrés soit en transmittance (T) soit en absorbance (A) entre 4000 cm^{-1} et 400 cm^{-1} à l'aide d'un spectromètre AVATAR 320 FT-IR THERMO-NICOLET (**figure 19**).



Figure 19 : Spectromètre AVATAR 320 FT-IR

IV. Tests de la conversion thermosolaire :

Nous avons pour objectif, dans la première partie, le dimensionnement d'un prototype de laboratoire d'un distillateur à simple effet de serre et ensuite apprécier l'influence de certains paramètres sur les performances du distillateur. En second, on va étudier l'influence de quelques caractéristiques thermophysiques sur un capteur solaire. Pour ces différents paramètres, nous ferons des relevés sur l'évolution de la température de la zone tampon, la température de la face externe du vitrage et la température de la face externe de l'isolant, il est aussi fait des relevés sur la température ambiante.

L'utilisation de l'eau distillée est très vaste dans les industries pharmaceutiques et chimiques pour la production et la dilution d'émulsions. Pour l'usage domestique, l'eau distillée est utilisée dans les fers à repasser et lors du lavage des vêtements. L'eau distillée ne convient pas à la consommation car elle peut déstabiliser l'équilibre de minéraux dans le corps humain par la déminéralisation. Si on admet que la production journalière est de 1,30 l/jour pendant toute l'année, on trouve que la production annuelle est de 475 l.

4.1 Conception du distillateur solaire :

Notre étude a pour but de réaliser un distillateur solaire simple. L'acquisition des différents éléments de l'appareil a été obtenue dans la plupart du commerce. Le distillateur solaire utilisé dans notre expérience est d'une conception très simple facile à construire et surtout à maintenir. Comme la montre les figure 15 et figure 16, il est constitué de :

- Un bac absorbant, - Une couverture verrière, - Une isolation thermique,
- Une couverture extérieure, - Une tuyauterie.

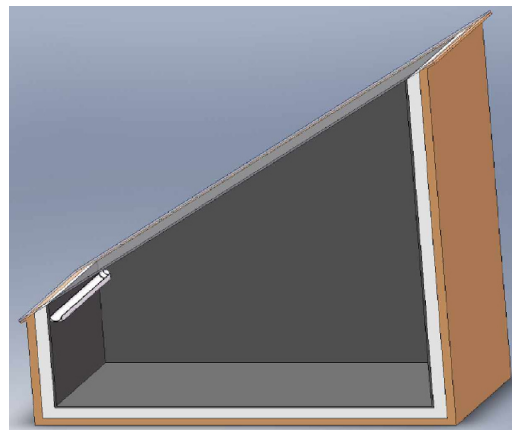
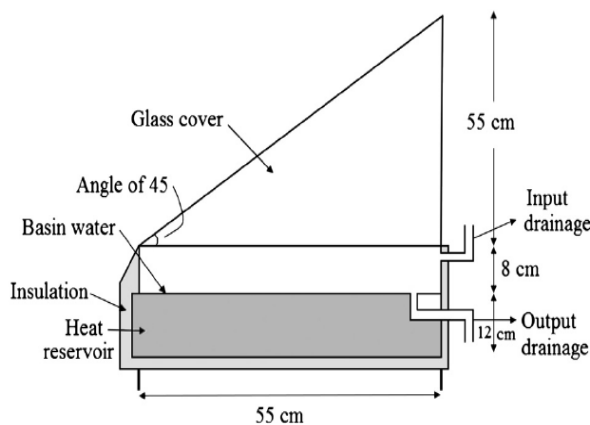


Figure 20 : Prototype du distillateur solaire réalisé.



Figure 21 : distillateur solaire avec une isolation en bois bien sec peint en blanc avec et sans le film d'aluminium.

- *Bac absorbant* : Le rôle du bac absorbant est d'absorber le maximum de rayonnement solaire global et de transmettre la chaleur produite par cette absorption vers la saumure, c'est pour cette raison qu'il est préférable qu'il soit en noir. Ce bac est obtenu par soudage d'une

tôle en fer galvanisé et couverte par un film noir en Polyéthylène. Les dimensions de la surface de l'absorbeur sont :

Longueur : 0,55 m Largeur : 0,55 m Hauteurs : 0,75 m et 0,20 m

Epaisseur : 1,5 mm Superficie de la base : 0,3025 m²

Pour la réalisation du bac absorbant, il a suffi d'une tôle en fer galvanisée de 1m × 2 m × 15mm, à cet effet cette dernière est découpée en cinq parties et soudée en un seul bac absorbant dont les dimensions sont indiquées dans le paragraphe 4.1.1. Enfin, on obtient la structure qui est présentée dans la figure 17.

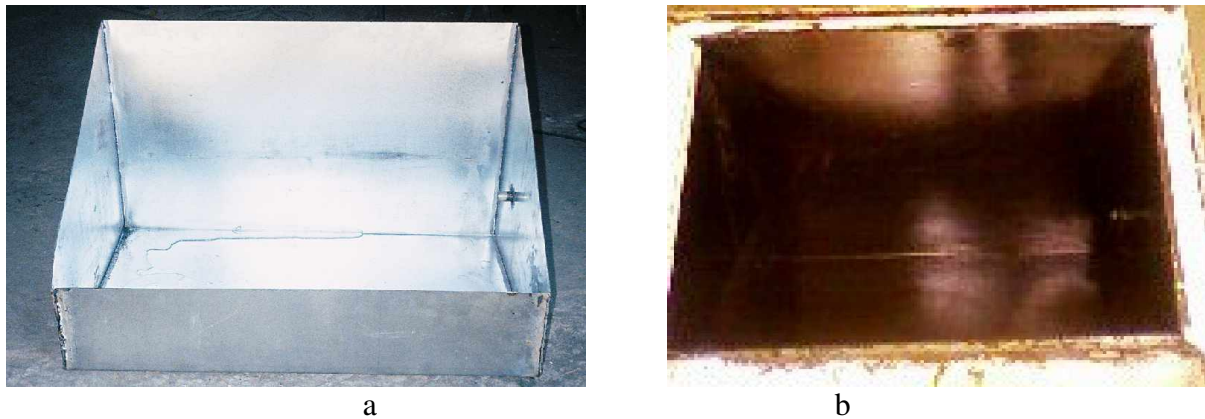


Figure 22 : Le bac absorbant : a – sans film en PE, b – avec film en PE.

- *Couverture verrière (verre)* : Pour sa simplicité et son bas coût, on a utilisé du verre ordinaire dont les dimensions de la vitre sont :

Longueur : 0,75 m Largeur : 0,55 m Epaisseur : 0,5 mm

Superficie de la base : 0,4125 m²

On a choisi du verre ordinaire pour sa bonne conductivité thermique, sa bonne transmission du rayonnement visible et sa mouillabilité. Pour assurer une bonne étanchéité entre la vitre et les autres constituants du distillateur on a utilisé de la silicone.

- *L'isolation thermique et couverture extérieure* : L'isolation thermique du distillateur est en laine de verre et du bois. L'épaisseur de la laine de verre est de 5 cm et celle du bois est de 2 cm. Il faut que les produits utilisés résistent aux températures de fonctionnement. Les dimensions de l'isolant thermique sont :

Longueur de base : 0,89 m Largeur de base : 0,69 m Epaisseur : 0,05 m et 0,02 m

Superficie de la base : 0,6141 m²

Donc, on fabrique un coffre d'isolation thermique (figure 18) dont on immerge à l'intérieur une couche en laine de verre qui est recouverte d'un coffre en bois confectionné de 4 madriers de 4m×15cm×2cm, découpés en morceaux assemblés à l'aide d'une colle spéciale bois et fixés avec des vis.



Figure 23 : Le coffre d'isolation thermique

- *Cuve de récupération du distillat* : On a utilisé une cuve graduée.
- *Tuyauterie* : La tuyauterie utilisée entre le bac absorbant et la cuve de récupération est en matière plastique de nom commercial « Tigre ».
- *Composants standards* : Ces composants ont été choisis de façon constructive et selon la disponibilité sur le marché, et sont résumés dans le **tableau 2.3**.

Tableau 2.3 : Désignation des composants du prototype de distillateur

Désignation	Unité	Nature et dimensions	
Le bac :		tôle galvanisée	Film noir en PE
Matériau		1,5	0.5
Epaisseur	mm	0,55*0,55*0,75	0,6*0,6*0,8
Dimensions	m		
La couverture transparente :		Verre ordinaire	
Nature		01	
Nombre		5	
Epaisseur	mm	0,55*0,75	
Dimensions	m	0.898	
Emissivité			
L'isolation thermique :		Laine de verre	Bois ordinaire
Nature		50	20
Epaisseur arrière	mm	50	20
Epaisseur latérale	mm	0.04	0.04
Conductivité			
Résine	M	3 × 1,50	
Manchon tigre 15/21		1	
Silicone mécanique	Tube	1	
Silicone	Tube	6	
Peinture blanche	Kg	1	
Papier aluminium	m ²	5	
Colle bois	Tube	1	
Colle patex	Tube	1	
Boulonnerie		50	
Revêts 4mm×20mm		20	
Vis 4mm×25mm			
Coudes 15/21		4	
Vannes 15/21		3	
Manchons en fer galvanisé 15/21		1	
Téflon		12mm×0,075mm×12m	
Entonnoir + conduite flexible	15/21	1	

- *Montage* : Le bac absorbant est équipé d'un système de remplissage et de vidange. Les soudures du bac sont isolées par une couche épaisse de silicone mécanique et le tout est

badigeonné par un film polymère en PE. Le distillateur est recouvert d'une couche de résille épaisse de 4 mm. Le remplissage se fait du côté droit du bac à l'aide d'une tuyauterie composée d'un raccord en cuivre 15/21, d'un tube tigre 15/21, d'un robinet en bronze du même diamètre, d'un coude en tigre 15/21 et d'un tuyau en polyvinyle avec son entonnoir. La vidange est réalisée en bas du bac à l'aide d'un manchon 15/21 soudé, raccordé à un bout de tube tigre 15/21 et un robinet en bronze 15/21. La récupération du distillat est exécutée par une saignée en tôle galvanisée et soudée à l'intérieur du bac. L'évacuation de celui-ci vers l'extérieur est réalisée par une tuyauterie constituée par un manchon soudé 15/21, un morceau de tube tigre, une vanne en bronze 15/21, un coude en tigre 15/21 et un tube en tigre. Des glissières en aluminium de 20cm fixées sur le bord du bac à l'aide des revêts permettent l'introduction d'une plaque en verre de 4 mm d'épaisseur pour la fermeture de ce dernier. Une couche de silicone est placée sur tout le pourtour du verre. Tous les côtés extérieurs du bac sont protégés par des cornières longues en aluminium boulonnés aux extrémités et on a placé 6 thermocouples sur toutes les parties de celui-ci. On a effectué deux types de distillateurs : Le premier est réalisé comme indiqué ci-dessus, et le deuxième est réalisé en collant des feuilles d'aluminium à la face extérieure du coffre d'isolation thermique.

4.2 Tests d'exposition solaire :

Nous présenterons deux tests d'exposition solaire sur le même distillateur. Dans le premier, nous utiliserons un film polymère noir en PE comme absorbeur de chaleur et, dans le deuxième, nous mettons un bac en fer galvanisé peint en noir et recouvert d'un film polymère noir en PE comme absorbeur de chaleur.

On a utilisé des instruments pour mesurer certains nombres de paramètres très importants pour l'expérience dont les indicateurs sont illustrés dans la **figure 24**.

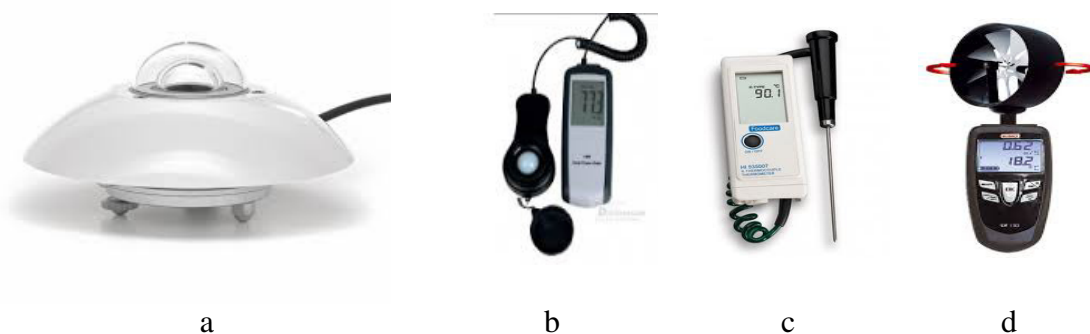


figure 24 : Instruments de mesure utilisés.

- a) Pyranomètre analogique pour mesurer le rayonnement solaire global,
- b) Pyranomètre électronique (Kipp & Zonen type CM11) pour mesurer le rayonnement solaire sur un plan incliné,

c) Thermomètre digital type K pour mesurer la température de l'air à l'entrée et à la sortie du conduit de l'absorbeur (0 à 400 °C),

d) Anémomètre à hélice (Kimo LV110) pour mesurer la vitesse et le débit d'air soufflé par un ventilateur muni d'un multi variateur de vitesse (0 à 40 m/s).

La campagne de tests a été axée sur les mesures de la température ambiante du milieu environnant, de la température de la surface extérieure de la vitre, de la température de l'eau salée, de la température de la surface extérieure de l'isolant et du débit de l'eau distillée en fonction du temps. Nous avons procédé à la variation de certains paramètres pour constater leurs effets sur l'évolution de ceux mesurés. Les paramètres variés sont les suivants :

- *La concentration en sel de l'eau saumâtre* : L'eau saumâtre utilisée est synthétique. Elle est préparée en dissolvant une quantité connue de sel de cuisine ordinaire dans une quantité connue d'eau distillée. Elle est préparée en utilisant la relation simple : $m = C.V$ (11)

m : la quantité de sel en grammes (g), V : le volume d'eau distillée nécessaire en litres (l)

C : la concentration de sel désirée en grammes par litres (g/l).

Les concentrations utilisées sont les suivantes : 1^{ère} partie : 5 g/l ; 2^{ème} partie : 2, 4 et 8 g/l.

- *la hauteur en eau saumâtre* dans le bac est donnée par : $V = S.h \Rightarrow h = \frac{V}{S}$ (12)

h : hauteur désirée en centimètre (cm), S : surface d'évaporation du bassin (cm²), V : volume nécessaire (ml).

- *l'isolation* : Deux types d'isolations ont été testés à savoir premièrement l'application d'une couche de peinture blanche sur la surface extérieure toute entière y compris la base du boîtier et deuxièmement l'intégration d'un système en feuilles d'aluminium.

- *mesure des températures* : Lors des essais expérimentaux, on utilise des thermocouples pour la mesure des différentes températures. Les thermocouples sont adaptés pour ce genre d'utilisation. Un thermocouple est formé par la soudure au chalumeau de deux différents fils métalliques. Suivant l'effet Seebeck, une tension thermoélectrique apparaît au niveau de la jonction en fonction de sa température. Lorsque ces deux fils sont connectés aux bornes de l'acquisition de données (Fluke Hydra data Logger 2625A) on forme un thermocouple à deux jonctions (T₁ : jonction chaude et T₂ : jonction froide) comme montré en **figure 25**.

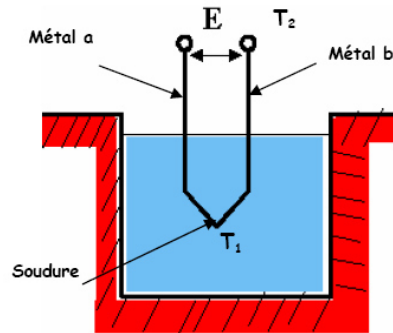


Figure 25 : Schéma représentatif d'un thermocouple relié aux bornes d'une acquisition de données.

Par effet Seebeck, ce thermocouple génère une tension qui est proportionnelle à la différence de température des deux jonctions. Si on veut mesurer la température T_1 , alors on doit compenser l'effet de la jonction froide T_2 ce qui est fait automatiquement par notre système d'acquisition de données grâce à un circuit électronique interne. Notre acquisition de données se charge également de la conversion électronique de la tension thermoélectrique délivrée par la jonction chaude à une température directement lue en degrés Celsius ($^{\circ}\text{C}$). L'étalonnage d'un thermocouple consiste à relever sa réponse à l'aide de notre acquisition de données quand sa soudure est placée dans un milieu dont la température est connue. Cette opération est effectuée au minimum en deux points fixes correspondants aux températures de changement d'état de l'eau. C'est-à-dire le point 0°C et le point 100°C . Pour les besoins de notre étude expérimentale, il nous faut trois (03) thermocouples dont les résultats des mesures d'étalonnage sont donnés dans le **tableau 2.4**.

Tableau 2.4 : Etalonnage des thermocouples

N° du thermocouple	Température mesurée au point 100°C	Température mesurée au point 0°C
1	99.5	0.0
2	99.5	0.1
3	99.7	0.0

On remarque que les écarts enregistrés (maximum 0.5°C) sont inférieurs aux valeurs limites tolérées pour le cas des thermocouples de type K, à savoir $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$. Nous concluons alors que nos thermocouples sont bons pour l'utilisation dans notre banc d'essai expérimental.

le thermocouple de type K a été utilisé pour les mesures de températures de l'eau saumâtre et du milieu environnant, et le thermomètre digital pour mesurer la température de la vitre et de l'isolant. Le thermocouple est une association de deux fils métalliques de natures différentes, soudés à l'une de leurs extrémités appelée « soudure de mesure » et comportant à l'autre extrémité deux « bornes » de raccordement qui sont à la température θ_a de l'appareil de mesure ou de l'ambiance. Lorsque la soudure de mesure se trouve à une température θ différente de

θ_a , il apparaît entre les bornes de raccordement une f.é.m. qui dépend du couple métallique et des températures θ et θ_a . Le thermocouple de type K est une jonction de Chromel et d'Alumel et possède une plage de mesure allant de -100 à + 1370°C. L'Alumel est un alliage composé de 95% de nickel, 2% d'aluminium 2% de manganèse et 1% de silicium alors que le Chromel est un alliage composé de 80% de nickel et 20% de chrome.

- *Etalonnage des thermomètres* : Tout appareil sensible de mesure doit subir d'abord un étalonnage avant utilisation. L'opération d'étalonnage des thermomètres se fait par la vérification de la mesure du zéro (0°C) en plongeant le point de soudure dans un récipient qui contient de la glace fondante et par la vérification de la mesure du 100 °C en plongeant le point de soudure dans un récipient qui contient de l'eau bouillante. Ensuite, les mesures sont effectuées après cinq (05) minutes pour chaque thermomètre. Les résultats obtenus sont résumés dans le **tableau 2.5**.

Tableau 2.5 : Indicateurs de températures des thermocouples

Type de thermomètre	Thermocouple type K	Thermomètre digital
Indication De Température à 0°C	- 0.13	0.00
Indication de Température à 100°C	94.45	98.70

L'emplacement des thermocouples au sein du prototype de distillateur solaire est représenté dans la **figure 26**.

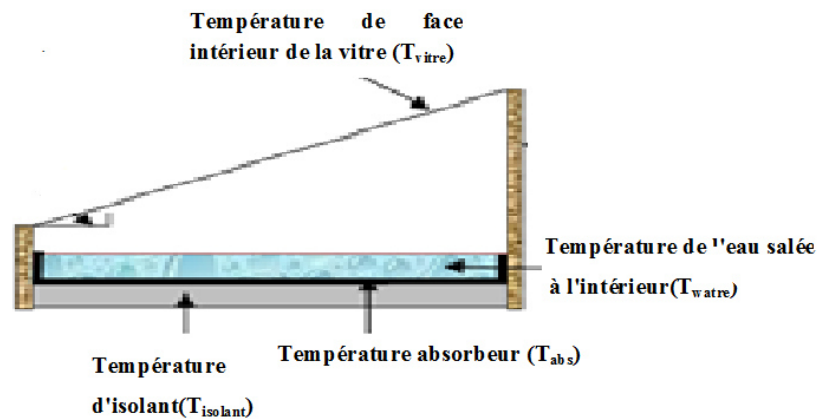


Figure 26 : Emplacement de thermocouples

4.2.1 Tests d'exposition solaire avec film polymère noir :

Les résultats sont présentés sous forme de tableaux pour chaque journée avec l'explication des paramètres prise en compte. Les symboles utilisés sont :

- T1 : température de la face externe de la vitre, T2 : température de la nappe d'eau (°C),
- T3 : température du bac absorbant (°C) T4 : température de la zone tampon (°C),
- T5 : température de l'atmosphère (°C) C : concentration de l'eau saumâtre (g/l),
- h : la hauteur de l'eau saumâtre dans le bassin (mm) Q : le volume d'eau distillée (ml),
- V : volume de l'eau utilisé (l) h : la hauteur de l'eau saumâtre dans le bassin (cm).

Journée du 15 Mai 2011 jusqu'à 09h30 du 16 Mai 2011
 $h = 6,75 \text{ mm}$; $C = 5 \text{ g/l}$; $V = 1 \text{ l}$; $Q_{\text{total}} = 619 \text{ ml}$; PH eau distillée = 6,87

heure	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	Q	Q _{cumulé}	état ciel	vent
10h00	33,9	47,2	44,3	49,2	29,2	/	/	nuages intermittents	calme
11h00	42,8	63	61,6	63,9	29,2	10	10	clair	//
12h00	46,1	68,4	67,6	69,3	30,4	60	70	//	//
13h00	47,7	69,1	70	69,8	31,7	92	162	//	//
14h00	45,2	67,4	70	69,1	31,9	93	255	//	//
15h00	44,2	66,8	67,1	69,2	30,8	100	355	//	Moyen
16h00	44,4	65	64,8	68,7	31,4	83	438	//	//
17h00	41,2	61	60,5	65,5	30,8	62	500	//	//
18h00	37,1	54,3	53,3	58,3	29,9	45	545	//	//
19h00	31,3	43	42,5	46,4	26,5	20	565	//	//
20h00	24,2	30,5	31,1	30,6	24,9	10	575	//	//
23h30	19,2	21,5	21,9	21,2	23,4	7	582	//	//
04h30	18,1	19,8	19,9	19,5	20,5	7	589	nuages	Calme
09h30	35,2	52,5	50,2	54,3	25	30	619	//	//

Calcul des moyennes :

Heure	T _{1mov}	T _{2mov}	T _{3mov}	T _{4mov}	T _{5mov}	Q _{mov}
à 20h	39,82	57,79	57,56	60	29,7	51,81
à 09h30	36,47	52,1	51,8	53,92	28,25	43,85

Journée du 16 Mai 2011 jusqu'à 09h30 du 17 Mai 2011
 $h = 6,75 \text{ mm}$; $C = 5 \text{ g/l}$; $V = 1 \text{ l}$; $Q_{\text{total}} = 601 \text{ ml}$, PH eau distillée = 7,5

heure	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	Q	Q _{cumulé}	état ciel	Vent
10h00	29,9	35,4	36	39,9	27,3	/	/	nuages intermittents	Moyen
11h00	41,3	58,5	56	51	28,9	30	30	clair	//
12h00	46,3	66,5	65,2	67,6	29,5	78	108	//	//
13h00	45,2	66,1	67,1	67,5	31,1	85	193	nuages intermittents	//
14h00	46,5	67,5	69,1	69,3	32,7	89	282	clair	//
15h00	45,8	66,3	65,3	68,9	33,1	91	373	//	//
16h00	44	64,2	63,5	68,1	32	74	447	//	//
17h00	41,6	60,5	59,9	65,6	31,2	63	510	//	//
18h00	38	53,9	52,7	58,2	30	40	550	//	//
19h00	30,2	40,2	40,5	41,1	26,8	20	570	nuages intermittents	//
20h00	24,8	30,1	30,5	29,9	25,8	10	580	clair	//
23 h30	21,3	23,2	23,4	22,9	24,2	3	583	//	//
04 h30	17,2	19,8	20,5	19,5	19,8	10	593	nuages	//
9 h30	24,8	33,1	31,7	33,5	22,2	8	601	nuages	//

Tableau des moyennes :

Heure	T _{1mov}	T _{2mov}	T _{3mov}	T _{4mov}	T _{5mov}	Q _{mov}
à 20h	39,41	55,38	55,07	57	29,85	52,72
à 09h30	35,49	48,95	48,67	50,21	28,18	42,92

Journée du 17 Mai 2011 jusqu'à 09h30 du 18 Mai 2011
 h = 6,75 mm ; C = 5 g/l ; V = 1 l ; Q_{total} = 519 ml ; PH eau distillée = 7,55

heure	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	Q	Q _{cumulé}	état ciel	Vent
10h00	26,3	30,9	31,3	33,9	23,4	/	/	nuages	Moyen
11h00	38,8	53,3	52,8	57,3	26,9	13	13	nuages intermittents	//
12h00	41,3	62	62,1	64,1	27,8	69	82	clair	//
13h00	44,5	66,9	67,2	67,8	28,4	83	165	//	//
14h00	40,8	64,7	66,3	66,3	27,2	80	245	nuages	peu fort
15h00	35,3	50,1	51,6	51,9	26,3	40	285	nuages intermittents	Moyen
16h00	38,2	52,4	53,5	55,1	27,2	43	328	//	//
17h00	42,1	60,3	59,5	56	30,6	52	380	clair	//
18h00	35,4	53,1	52,3	56,5	27,5	42	422	//	//
19h00	30,3	41,8	41,4	43,5	25,3	23	445	//	//
20h00	23,9	30,5	31,2	30,5	23,5	10	455	//	//
23 h30	18,2	20,9	21	20,5	21,6	11	466	//	//
04 h30	18,9	20,5	20,6	20,3	19,5	13	479	couvert	//
9 h30	36,3	54,1	51,3	56,2	24	40	519	clair	//

Tableau des moyennes :

Heure	T _{1mov}	T _{2mov}	T _{3mov}	T _{4mov}	T _{5mov}	Q _{mov}
à 20h	36,08	51,29	51,74	53,86	26,73	41,36
à 09h30	33,59	47,12	47,67	49,25	25,65	37,07

Journée du 18 Mai 2011 jusqu'à 09h30 du 19 Mai 2011
 h = 17,75 mm ; C = 5 g/l ; V = 3 l ; Q_{total} = 751 ml ; PH eau distillée = 7,8

heure	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	Q	Q _{cumulé}	état ciel	Vent
10h00	30,4	32,5	34	39,3	25,8	/	/	clair	Moyen
11h00	37	52	54	55,4	26,3	/	/	//	//
12h00	42,6	62,9	62,8	63,1	27,2	53	53	//	Calme
13h00	44	67,2	67,8	66,6	30,1	95	148	//	//
14h00	44,9	68,3	70,6	68,2	29,8	105	253	//	un peu fort
15h00	46,3	67,9	69,5	67,8	31,4	95	348	//	//
16h00	43,3	66,1	66,9	69,5	30,3	94	442	//	Moyen
17h00	41,3	63	63,3	67,2	30,5	88	530	//	//
18h00	40,2	57,1	57,2	61,1	30,5	60	590	//	//
19h00	33,5	48,2	47,2	50,8	27,9	39	629	//	//
20h00	26,4	37,6	35,6	35	24,4	24	653	//	//
23 h30	18,1	22,5	21,3	21,1	21,7	27	680	//	//
04 h30	14,4	17,8	17	16,7	18,5	30	710	//	Calme
9 h30	35,8	45	47,1	50,4	23,7	41	751	//	//

Tableau des moyennes :

heure	T _{1mov}	T _{2mov}	T _{3mov}	T _{4mov}	T _{5mov}	Q _{mov}
à 20h	39,08	56,61	57,17	58,54	28,56	59,36
à 09h30	35,58	50,57	51,02	52,3	27	53,64

Journée du 19 Mai 2011 jusqu'à 09h30 du 20 Mai 2011
 $h = 17,75 \text{ mm}$; $C = 5 \text{ g/l}$; $V = 3 \text{ l}$; $Q_{\text{total}} = 674 \text{ ml}$; PH eau distillée = 7,65

heure	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	Q	Q _{cumulé}	état ciel	Vent
10h00	30,9	31,3	33	40,3	25,3	/	/	clair	Calme
11h00	39,2	53	52,9	56,6	28,1	/	/	//	Moyen
12h00	44,1	64,6	62,8	64,9	29,4	55	55	//	//
13h00	46,5	68,3	68,5	67,8	31,7	80	135	//	un peu fort
14h00	47,1	69,3	71,7	69,7	32,4	106	241	//	Moyen
15h00	46,1	68,9	68,7	70,7	33,7	99	340	//	//
16h00	45,8	66,6	66,9	70,2	33,9	90	430	//	un peu fort
17h00	43,3	62,9	63,3	67,3	33,1	72	502	//	//
18h00	40	57	57,5	61,1	31,1	65	567	//	//
19h00	36,5	49,2	48,4	52,4	29,5	38	605	//	Moyen
20h00	28,5	39,8	38	37,2	26,3	22	627	//	Calme
23 h30	24,1	25,9	25,3	24,9	26,8	20	647	//	Moyen
04 h30	16,5	20,8	19,9	19,5	20,9	7	654	//	Calme
9 h30	31,8	43,2	45,1	48,2	24,5	20	674	//	//

Tableau des moyennes :

heure	T _{1mov}	T _{2mov}	T _{3mov}	T _{4mov}	T _{5mov}	Q _{mov}
à 20h	40,72	57,35	57,42	59,83	49,90	57
à 09h30	37,17	51,48	51,57	53,62	44,37	48,14

Journée du 23 Mai 2011 jusqu'à 09h30 du 24 Mai 2011
 $h = 17,75 \text{ mm}$; $C = 5 \text{ g/l}$; $V = 3 \text{ l}$; $Q_{\text{total}} = 656 \text{ ml}$; PH eau distillée = 7,33

heure	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	Q	Q _{cumulé}	état ciel	Vent
10h00	27,8	31,7	32,7	36,8	24,5	/	/	nuages intermittents	Calme
11h00	37	50,5	50,7	54,4	27,2	/	/	clair	Moyen
12h00	41,3	61,1	61,3	62,3	28,8	48	48	//	//
13h00	44,2	65,5	66,3	56,4	30,5	82	130	//	//
14h00	46,3	67	69,1	67,3	31,8	108	238	//	//
15h00	45,9	67,9	68,9	70	31,3	85	323	//	//
16h00	47,8	67,1	67,9	70,9	31,9	81	404	//	//
17h00	42,3	63,1	63,3	67,1	29,5	77	481	//	//
18h00	38	55,8	55,5	58,7	28,8	57	538	//	//
19h00	31,9	46,2	44,8	46,3	23,9	47	585	//	//
20h00	25,3	36,9	35,2	34,1	21,8	26	611	nuages intermittents	//
23 h30	21,5	24,8	24,8	23,7	21	25	636	couvert	Calme
04 h30	20,6	22,5	22,7	21,9	20,8	10	646	//	Moyen
9 h30	25,9	30,7	31,5	31,8	23,6	10	656	//	//

Tableau des moyennes :

heure	T _{1mov}	T _{2mov}	T _{3mov}	T _{4mov}	T _{5mov}	Q _{mov}
à 20h	38,89	55,70	55,97	56,75	28,18	55,54
à 09h30	35,41	49,34	49,62	50,12	26,81	46,85

Journée du 24 Mai 2011 jusqu'à 09h30 du 25 Mai 2011
 h =19,5 mm ; C =5 g/l ; V=5 l. Q_{total} = 640 ml ; PH eau distillée =7,69

heure	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	Q	Q _{cumulé}	état ciel	Vent
10h00	27,9	26,8	30,8	36,4	26,1	/	/	clair	Moyen
11h00	35,4	42,6	44,9	49,5	27,8	/	/	//	//
12h00	40,8	54,1	54,3	58,2	30,5	/	/	//	//
13h00	43,5	62,1	62,8	63	31,3	65	65	//	//
14h00	44,8	65,5	66,9	64,1	30,1	79	144	//	//
15h00	45,8	66,8	68,8	68,8	32,1	91	235	//	//
16h00	44,6	65,5	66,9	69,2	32,4	84	319	//	//
17h00	44,6	63,2	62,9	66,7	30,5	78	397	//	un peu fort
18h00	40,8	58,6	57,9	61,5	29,8	66	463	//	Moyen
19h00	35,5	51,5	50,1	52,4	27,4	55	518	//	//
20h00	29,2	42,7	40,7	38,9	24,8	34	552	//	//
23 h30	22,2	27,7	27,1	25,8	23	50	602	//	Calme
04 h30	18,1	21,6	21,6	20,3	21,1	28	630	//	//
9 h30	27,9	31,5	31,8	38,1	25,9	10	640	nuages intermittents	Moyen

Tableau des moyennes :

heure	T _{1mov}	T _{2mov}	T _{3mov}	T _{4mov}	T _{5mov}	Q _{mov}
à 20h	39,35	54,49	55,18	57,15	29,34	50,18
à 09h30	35,79	48,58	49,10	50,92	28,05	45,71

Journée du 25 Mai 2011 jusqu'à 09h30 du 26 Mai 2011
 h =19,5 mm ; C =5 g/l ; V=5 l ; Q_{total} = 540 ml ; PH eau distillée =7,82

heure	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	Q	Q _{cumulé}	état ciel	Vent
10h00	28,3	32	33,7	38,6	25,7	/	/	nuages intermittents	Moyen
11h00	32,2	37,5	39,4	43,9	26,5	/	/	//	//
12h00	34,9	46,8	46,9	47,2	27,2	/	/	nuages	//
13h00	39	53,3	54,4	55,5	30,2	43	43	nuages intermittents	//
14h00	37,1	56,1	57,9	54	26,8	65	108	nuages	//
15h00	44,5	60,6	62,8	63,5	31,3	45	153	clair	//
16h00	43,5	64	63,6	67,3	31,8	73	226	//	//
17h00	43,5	62,2	61,5	65,6	31,1	75	301	//	un peu fort
18h00	39,7	57,8	57,2	60,5	30,4	61	362	//	Moyen
19h00	35,4	50,7	49,4	50,9	27,9	54	416	//	//
20h00	28,8	42,6	40	38,4	24,8	32	448	//	//
23 h30	24,1	28,5	27,9	26,9	23,8	47	495	nuages intermittents	un peu fort
04 h30	19,2	23,6	23,1	22	22,1	25	520	clair	Calme
9 h30	34,2	39,6	42,5	48,2	27,9	20	540	clair	//

Tableau des moyennes :

heure	T _{1mov}	T _{2mov}	T _{3mov}	T _{4mov}	T _{5mov}	Q _{mov}
à 20h	37	51,23	49,07	53,21	28,51	40,72
à 09h30	34,60	46,80	45,23	48,75	27,67	38,57

Journée du 26 Mai 2011 jusqu'à 09h30 du 27 Mai 2011
 h =19,5 mm ; C =5 g/l ; V=5 l ; Q_{total} = 643 ml ; PH eau distillée =7,57

heure	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	Q	Q _{cumulé}	état ciel	Vent
10h00	30,9	32,1	33,5	38,3	28,9	/	/	clair	Moyen
11h00	38,6	46,3	47,6	54	30,1	/	/	//	//
12h00	43	58,2	58,1	61,1	31,7	/	/	//	//
13h00	37,5	65,9	56,9	66,6	33,8	26	26	//	//
14h00	48,1	69	70,1	70,1	33,3	90	116	//	//
15h00	49,2	69,1	70,5	71,5	33,8	98	214	//	//
16h00	49,9	68,3	68,1	72,2	34,8	90	304	//	//
17h00	46,7	65,2	65,1	68,9	33,7	87	391	//	//
18h00	41,9	60	59,8	62,8	32,2	70	461	//	//
19h00	39,2	53,2	52	53,7	31,2	52	513	//	//
20h00	31,6	44,9	42,7	40,8	27,4	35	548	//	Calme
23 h30	25,1	30,2	29,5	28,2	26,8	50	598	//	//
04 h30	22	25,9	25,4	24,6	24,8	25	623	//	//
9 h30	37,3	43,1	46,5	51,4	30,8	20	643	//	Moyen

Tableau des moyennes :

heure	T _{1mov}	T _{2mov}	T _{3mov}	T _{4mov}	T _{5mov}	Q _{mov}
à 20h	41,50	57,47	56,76	60	31,90	49,81
à 09h30	38,64	52,24	51,84	54,58	30,95	45,92

Journée du 29 Mai 2011 jusqu'à 09h30 du 30 Mai 2011
 h =39,75 mm ; C =5 g/l ; V=7 l ; Q_{total} = 632 ml ; PH eau distillée =7,8

heure	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	Q	Q _{cumulé}	état ciel	Vent
10h00	33,9	31,4	33,2	43,1	32,2	/	/	clair	Moyen
11h00	38,4	42,8	44,9	51,8	32,5	/	/	//	//
12h00	44,2	54,8	55,5	58,6	35,1	/	/	//	//
13h00	47,3	63	63,9	64,2	36,1	45	45	//	//
14h00	48,9	67,9	69,1	69,2	35,9	69	114	//	//
15h00	50,3	69,1	70,5	71,2	34,8	86	200	//	//
16h00	48,8	68,9	68,2	71,8	35,2	90	290	//	//
17h00	48,3	66,5	65,9	69,9	35,3	84	374	//	//
18h00	45,2	62,8	61,8	64,3	32,8	71	445	nuages intermittents	//
19h00	42,3	57,2	56	55,9	32,2	63	508	//	//
20h00	33	48,6	46,3	44,1	26,9	44	552	//	//
23 h30	23,1	31,1	29,5	27,8	27,2	30	582	Nuages + pluie	Très fort
04 h30	23,4	27,3	26,9	25,9	24,9	25	607	nuages intermittents	Calme
9 h30	32,7	36,2	37	44,6	29,5	25	632	clair	Moyen

Tableau des moyennes :

heure	T _{1mov}	T _{2mov}	T _{3mov}	T _{4mov}	T _{5mov}	Q _{mov}
à 20h	43,69	57,54	57,75	60,37	33,54	50,18
à 09h30	39,98	51,97	52,05	54,45	32,18	45,14

Journée du 30 Mai 2011 jusqu'à 09h30 du 31 Mai 2011
 $h=39,75$ mm ; $C=5$ g/l ; $V=7$ l ; $Q_{\text{total}}=645$ ml ; PH eau distillée =7,63

heure	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	Q	Q _{cumulé}	état ciel	Vent
10h00	31,8	30,6	32,3	38,9	35	/	/	clair	Moyen
11h00	37,8	41,5	43,1	50,4	32,1	/	/	//	Moyen
12h00	41,2	52,6	53,2	57,2	33,3	/	/	//	//
13h00	45,6	60,3	61,1	62,8	35,5	49	49	//	//
14h00	50	67,1	68,3	69,1	36,2	76	125	//	//
15h00	47,1	68,1	69,5	70,4	33,7	72	197	nuages intermittents	//
16h00	48,2	67,7	68,2	71,3	34,8	78	275	clair	//
17h00	45,2	64,3	63,4	66,5	32,8	87	362	nuages intermittents	//
18h00	41,1	59,1	58,1	60,5	31,2	68	430	//	//
19h00	36,3	53	51,3	51,5	28,3	58	488	//	//
20h00	30,3	45,5	43,2	40,9	25,5	44	532	//	Calme
23 h30	27,3	31	30,2	29,2	28,9	60	592	//	un peu fort
04 h30	19,8	24,1	23,6	22,2	21,8	30	622	//	Calme
9 h30	31,5	35,1	38,8	44,9	26,2	23	645	//	//

Tableau des moyennes :

heure	T _{1mov}	T _{2mov}	T _{3mov}	T _{4mov}	T _{5mov}	Q _{mov}
à 20h	41,32	55,43	55,60	58,13	32,58	48,36
à 09h30	38,08	49,17	50,30	52,55	31,09	46,07

2^{ème} partie

Journée du 02 aout 2011 jusqu'à 09h30 du 03 aout 2011
 $h=17,75$ mm ; $C=2$ g/l ; $V=3$ l ; $Q_{\text{total}}=631$ ml ; PH eau distillée =7,55

heure	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	Q	Q _{cumulé}	état ciel	Vent
10h00	30,9	31,9	32,9	35,5	32,2	/	/	nuages intermittents	Calme
11h00	46,3	54,2	55,1	62,7	37,1	/	/	//	//
12h00	48,5	60,6	60,6	64,8	38,1	45	45	clair	//
13h00	52,2	70,3	70,8	72,8	38,3	65	110	//	//
14h00	54,8	74,4	76,9	77,4	39,3	100	210	//	//
15h00	52,1	70,5	72	72,7	39	83	293	nuages intermittents	//
16h00	54	70,2	73,9	75,8	42,9	72	365	//	Moyen
17h00	50,8	64	66	69,2	41,9	65	430	//	//
18h00	47,2	59,2	59,2	63,5	39,2	51	481	//	//
19h00	42,1	53,5	52,6	54,9	35,8	39	520	//	Calme
20h00	34,7	43,5	41,8	41,1	33,3	25	545	//	//
23 h30	25,5	30,2	29,8	28,5	25,5	35	580	//	//
04 h30	19,8	23,3	23,1	22,1	23,8	36	616	clair	//
9 h30	38,4	48,3	50,9	55	30,5	15	631	//	//

Tableau des moyennes :

heure	T _{1mov}	T _{2mov}	T _{3mov}	T _{4mov}	T _{5mov}	Q _{mov}
à 20h	46,69	59,3	57,17	62,76	37,91	49,54
à 09h30	42,66	53,86	52,33	56,85	35,49	45,07

Journée du 03 aout 2011 jusqu'à 09h30 du 04 aout 2011

h =17,75 mm ; C =2 g/l ; V=3 l ; Q_{total}= 643 ml ; PH eau distillée =7,74

heure	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	Q	Q _{cumulé}	état ciel	Vent
10h00	32,7	33,3	34,5	41	30,9	/	/	clair	Calme
11h00	41,3	53,6	53,7	59,1	31,6	/	/	//	Moyen
12h00	48,6	65,3	64,5	68,2	33,5	40	40	//	//
13h00	51,5	70,7	71,1	72,7	34,8	60	100	//	//
14h00	53,5	72,9	75,1	75,2	35,9	95	195	//	//
15h00	53,5	73,2	75,1	76,8	35,9	102	297	//	//
16h00	51,8	70,4	71,9	75,2	37,3	88	385	//	//
17h00	48,6	66,2	66,8	70,8	35,7	75	460	//	//
18h00	44,6	60,2	59,1	64,2	34,1	60	520	//	//
19h00	36,4	49,9	48,7	49,5	29,4	47	567	//	//
20h00	28,9	38,9	37,2	36,3	27,1	23	590	//	//
23 h30	22,3	26,1	25,7	24,7	26,2	28	618	//	Calme
04 h30	20,1	22,9	22,6	22	24,1	20	638	//	//
9 h30	38,1	22,7	35,4	40,9	31,5	5	643	//	Moyen

Tableau des moyennes :

heure	T _{1mov}	T _{2mov}	T _{3mov}	T _{4mov}	T _{5mov}	Q _{mov}
à 20h	44,67	59,50	59,79	62,63	33,29	53,63
à 09h30	40,85	51,87	52,95	55,47	32	45,92

Journée du 04 aout 2011 jusqu'à 09h30 du 05 aout 2011

h =17,75 mm ; C =2 g/l ; V=3 l ; Q_{total}= 627 ml ; PH eau distillée =7,66

heure	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	Q	Q _{cumulé}	état ciel	Vent
10h00	33,1	32,7	35,4	40,9	31,5	/	/	clair	Moyen
11h00	42,3	53,8	54,3	59,2	33,1	/	/	//	//
12h00	49,1	65,9	68,4	68,6	34,5	38	38	//	//
13h00	51,3	72,8	71,3	71,3	35,6	57	95	//	//
14h00	51,7	72,7	74,7	74,4	35,5	103	198	//	//
15h00	51,3	71,1	73,2	74,4	35,3	100	298	//	un peu fort
16h00	50,1	68,2	69,5	72,9	37,4	90	388	//	//
17h00	47,5	64,3	64,2	69,2	36,4	75	463	//	//
18h00	44,1	58,8	57,9	63	34,7	55	518	//	Moyen
19h00	36,5	45,4	47,3	48,9	31,2	35	553	//	//
20h00	30,9	39,7	37,6	37,3	29,9	20	573	//	//
23 h30	23,9	27,6	26,8	26,3	27,3	25	598	//	Calme
04 h30	23,5	24	23,9	23,7	26,8	17	615	nuages	Calme
9 h30	40,8	48,7	51,9	56	34,2	12	627	clair	un peu fort

Tableau des moyennes :

heure	T _{1mov}	T _{2mov}	T _{3mov}	T _{4mov}	T _{5mov}	Q _{mov}
à 20h	44,35	58,67	59,43	61,82	34,1	52,09
à 09h30	41,15	53,26	54,02	56,15	33,1	44,78

Journée du 05 aout 2011 jusqu'à 09h30 du 06 aout 2011
 h =17,75 mm ; C =4 g/l ; V=3 l ; **Q**_{total}= 615 ml ; **PH** eau distillée =7,72

heure	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	Q	Q _{cumulé}	état ciel	Vent
10h00	35,8	34,5	36,5	43,8	34,2	/	/	clair	un peu fort
11h00	44	56,3	55,8	61,3	33,8	/	/	//	//
12h00	49,8	65,9	65,6	68,8	36,3	42	42	//	//
13h00	50,4	69,1	69,8	71	35,1	68	110	//	Moyen
14h00	50	69,9	71,5	72,2	34,6	93	203	//	//
15h00	51,9	69,8	74,5	73,5	34,2	90	293	//	//
16h00	51,9	69,1	70,2	74,1	35,9	84	377	//	//
17h00	48,9	65	68,9	69,9	35,5	38	415	//	un peu fort
18h00	44,5	60,3	66,3	65	34,8	95	510	nuages intermittents	Moyen
19h00	37,3	49,7	48,8	49,2	31,9	38	548	//	//
20h00	32,1	40,6	39,3	38,4	30,2	22	570	//	//
23 h30	26,9	29	29,2	28,1	30,3	27	597	clair	Calme
04 h30	22,4	25,1	25,2	24,1	25,6	10	607	//	//
9 h30	41,3	50,5	52,1	56,2	34,9	8	615	//	Moyen

Tableau des moyennes :

heure	T _{1mov}	T _{2mov}	T _{3mov}	T _{4mov}	T _{5mov}	Q _{mov}
à 20h	45,47	59,10	60,65	62,47	34,22	51,81
à 09h30	42,20	53,91	55,26	56,82	33,37	43,92

Journée du 06 aout 2011 jusqu'à 09h30 du 07 aout 2011
 h =17,75 mm ; C =4 g/l ; V=3 l ; **Q**_{total}= 605 ml ; **PH** eau distillée =7,85

heure	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	Q	Q _{cumulé}	état ciel	vent
10h00	35,5	35,3	37,1	42,2	34,9	/	/	clair	moyen
11h00	47	57,3	57,7	62,8	38	/	/	//	//
12h00	52,4	68,1	69	71,6	39,1	35	35	//	calme
13h00	55,5	73,2	75,1	75,9	39,7	80	115	//	moyen
14h00	53,6	72,5	76,3	75,1	39,2	95	210	//	un peu fort
15h00	54,9	72,7	74,6	77	37,4	95	305	//	//
16h00	54,1	70,2	71,2	75,5	39,7	90	395	//	moyen
17h00	50,5	67,2	68,1	72,4	38,2	77	472	//	//
18h00	40,5	53,3	52,5	52,9	33,5	58	530	nuages	//
19h00	35,8	44,5	43,9	43,7	32,1	33	563	//	//
20h00	30,7	37,9	37	36,1	30,1	17	580	nuages intermittents	calme
23 h30	29,6	30,2	30,5	29,8	32,2	10	590	clair	fort
04 h30	26,5	26,5	26,3	26,2	30,3	5	595	//	//
9 h30	39	49,4	55,1	55,1	31,2	10	605	//	moyen

Tableau des moyennes :

heure	T _{1mov}	T _{2mov}	T _{3mov}	T _{4mov}	T _{5mov}	Q _{mov}
à 20h	46,40	59,29	60,22	62,29	36,53	52,72
à 09h30	42,67	54,16	55,31	56,87	35,4	43,21

Journée du 07 aout 2011 jusqu'à 09h30 du 08 aout 2011
 $h = 17,75 \text{ mm}$; $C = 4 \text{ g/l}$; $V = 3 \text{ l}$; $Q_{\text{total}} = 632 \text{ ml}$; PH eau distillée = 7,85

heure	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	Q	Q _{cumulé}	état ciel	vent
10h00	33,4	34,2	38,1	40,5	32,5	/	/	clair	moyen
11h00	44,4	55,1	58	60,9	34,1	/	/	//	//
12h00	49,2	66,3	41,1	69,3	35,1	40	40	//	un peu fort
13h00	52,3	70,2	70,2	72,5	36,2	84	124	//	//
14h00	51,8	70,9	72,2	73,1	35,3	93	217	//	//
15h00	50,7	69,1	79,5	73	35,4	93	310	//	//
16h00	49,4	68,1	75,8	72,9	35,3	86	396	//	//
17h00	47,4	63,9	69,7	68,9	35,3	73	469	nuages intermittents	//
18h00	42,2	57,8	62,3	61,7	33,2	60	529	clair	//
19h00	33,1	46,2	46,3	44,5	29	33	562	//	moyen
20h00	27,8	35,9	34,5	33,8	27,5	23	585	//	//
23 h30	22,7	25,8	25,6	24,8	26,3	20	605	//	calme
04 h30	19,9	22,5	22,1	21,9	23,8	15	620	//	//
9 h30	34,7	44,5	44,2	50,7	26,1	12	632	//	//

Tableau des moyennes :

heure	T _{1mov}	T _{2mov}	T _{3mov}	T _{4mov}	T _{5mov}	Q _{mov}
à 20h	43,79	57,97	58,88	61	33,53	53,18
à 09h30	39,92	52,17	52,82	54,89	31,79	45,14

Journée du 10 aout 2011 jusqu'à 09h30 du 11 aout 2011
 $h = 17,75 \text{ mm}$; $C = 8 \text{ g/l}$; $V = 3 \text{ l}$; $Q_{\text{total}} = 693 \text{ ml}$; PH eau distillée = 7,82

heure	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	Q	Q _{cumulé}	état ciel	vent
10h00	29,6	33,1	33,2	38,8	26,2	/	/	très clair	moyen
11h00	40,9	53,3	54,1	58,9	28,5	/	/	//	//
12h00	47,1	64,8	64,1	67,3	30,2	52	52	//	//
13h00	50	70,8	71,3	72,4	32	96	148	//	//
14h00	51,2	71,8	74,2	74,1	33,5	87	235	//	un peu fort
15h00	50,2	70,8	74,4	74,4	31,5	100	335	//	//
16h00	48,3	68,3	70,5	72,9	33,1	95	430	//	//
17h00	44,9	63,3	64,2	67,9	33,1	88	518	//	//
18h00	42,4	57,6	45,8	62,5	31,2	54	572	//	//
19h00	32,1	45,8	27,9	43,2	27,2	45	617	//	calme
20h00	26,1	35,1	33,4	32,5	25,3	19	636	//	//
23 h30	19,5	23,8	23,8	22,1	23,5	27	663	//	//
04 h30	18,1	20,5	20,2	19,5	22,2	15	678	//	//
9 h30	34,6	44,4	43,3	51,2	25,9	15	693	//	//

Tableau des moyennes :

heure	T _{1mov}	T _{2mov}	T _{3mov}	T _{4mov}	T _{5mov}	Q _{mov}
à 20h	42,07	57,70	55,73	60,35	30,16	57,81
à 09h30	38,21	51,67	50,02	54,05	28,81	49,5

Journée du 11 aout 2011 jusqu'à 09h30 du 12 aout 2011
 $h = 17,75 \text{ mm}$; $C = 8 \text{ g/l}$; $V = 3 \text{ l}$; $Q_{\text{total}} = 662 \text{ ml}$; PH eau distillée = 7,84

heure	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	Q	Q _{cumulé}	état ciel	vent
10h00	30,6	32	32,3	38,7	28,2	/	/	très clair	moyen
11h00	40	51,8	51,3	57,2	29,2	/	/	//	//
12h00	48	63,8	63,4	66,8	31,5	35	35	//	//
13h00	50,8	70,1	71	72,1	33,8	88	123	//	//
14h00	51,1	71,9	73,4	74,1	34,5	99	222	//	un peu fort
15h00	49,2	69	70,7	72,4	33	103	325	//	//
16h00	49,8	67,5	68,2	72	35,8	90	415	//	//
17h00	46,3	63,1	63,3	68,3	34,3	77	492	//	//
18h00	43,5	57,2	56,3	62	32,8	68	560	nuages intermittents	moyen
19h00	34,2	46,3	44,5	44,3	29	33	593	//	//
20h00	29,5	37,2	35,8	34,9	28,7	20	613	//	//
23 h30	22,3	26,3	26,1	24,8	26,3	22	635	clair	calme
04 h30	18,1	21,3	20,8	20,3	21,8	17	652	//	//
9 h30	30,8	35,2	37	38,5	26,7	10	662	nuages	moyen

Tableau des moyennes :

heure	T _{1mov}	T _{2mov}	T _{3mov}	T _{4mov}	T _{5mov}	Q _{mov}
à 20h	43,90	57,26	57,29	60,25	31,89	55,72
à 09h30	39,58	50,90	51	53,31	30,4	47,28

Journée du 13 aout 2011 jusqu'à 09h30 du 14 aout 2011
 $h = 17,75 \text{ mm}$; $C = 8 \text{ g/l}$; $V = 3 \text{ l}$; $Q_{\text{total}} = 635 \text{ ml}$; PH eau distillée = 7,79

heure	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	Q	Q _{cumulé}	état ciel	vent
10h00	32	31,5	34,5	39,1	31,9	/	/	clair	moyen
11h00	43,2	52,8	55,1	59,4	33,4	/	/	//	//
12h00	49,5	64,9	66,2	68,1	34,5	57	57	//	//
13h00	53,3	71,4	73,9	72,8	36,4	78	135	//	//
14h00	53	72,8	75,9	75,2	36,3	95	230	//	//
15h00	53	71,3	74,5	75,1	35,3	95	325	//	//
16h00	50,7	68,5	69,5	72,5	35,8	87	412	//	//
17h00	48,9	65,2	65,7	69,6	35,8	70	482	//	//
18h00	43,9	58,7	57,8	62,1	33,9	52	534	//	//
19h00	34,5	46,9	45,2	44,8	29,5	30	564	//	calme
20h00	27,3	36,9	34,9	34,1	26,1	18	582	//	moyen
23 h30	20,9	25,1	25	23,4	23,5	20	602	//	calme
04 h30	19,5	20,9	20,6	20,3	20,1	19	621	couvert	moyen
9 h30	30,9	39,5	40,9	45,2	24,1	15	636	clair	//

Tableau des moyennes :

heure	T _{1mov}	T _{2mov}	T _{3mov}	T _{4mov}	T _{5mov}	Q _{mov}
à 20h	44,56	58,38	59,38	61,16	33,53	52,90
à 09h30	53,54	51,97	52,83	54,40	31,18	45,35

4.2.2 Tests d'exposition solaire avec film polymère sur support en acier :

Nous présenterons directement les résultats sous forme tableaux ainsi que des graphes avec des interprétations dans le chapitre 5. Sinon, on respecte les mêmes campagnes de tests et on fait les mêmes mesures de températures. Les différents tests effectués se sont déroulés durant

le mois de mai 2012. La campagne de tests a été axée sur les mesures de la température ambiante du milieu environnant, de la température de la surface extérieure de la vitre, de la température de l'eau salée, de la température de la surface extérieure de l'isolant et du débit de l'eau distillée en fonction du temps. En même temps nous avons procédé à la variation de certains paramètres pour constater leurs effets sur l'évolution de ceux mesurés. La concentration utilisée est : 5 g/l. Deux types d'isolations ont été testés à savoir premièrement l'application d'une couche de peinture blanche sur la surface extérieure toute entière y compris la base du boîtier et deuxièmement l'intégration d'un système en feuilles d'aluminium. On peut voir sur la **figure 27** la variation du rayonnement solaire reçu par une surface inclinée du distillateur selon les jours de l'expérience. Il est plus intense de 12h30 à 13h30 tandis qu'il est moins intense à la fin de la journée, puisque, la durée d'insolation est plus longue pendant la période estivale. La **figure 27** montre que les journées des expériences ont été claires sauf celles du 21/05/2012 et du 26/05/2012 où il y avait un passage des nuages discontinus ce qui a influé sur l'intensité solaire.

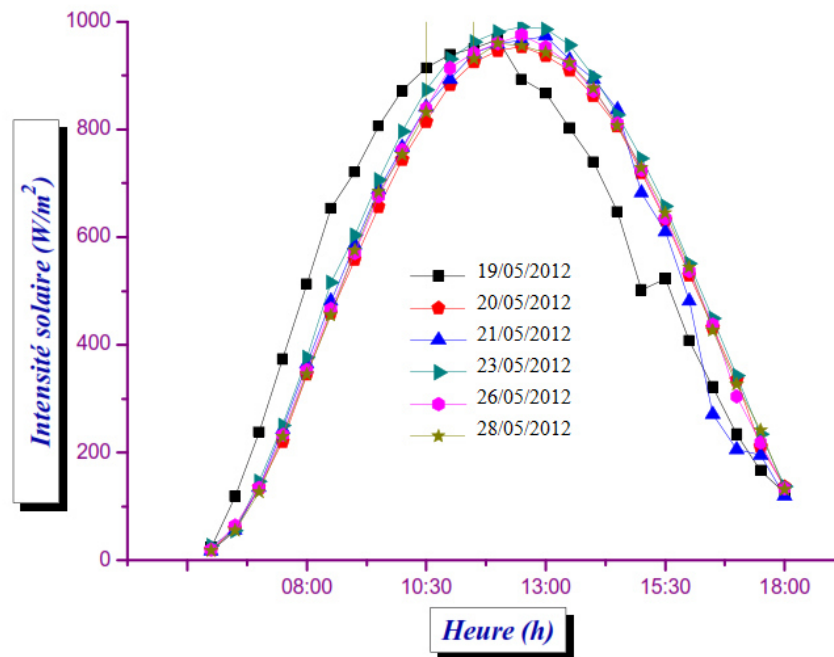


Figure 27 : Insolation des journées d'expérience.

Définitions les symboles utilisés : T_a : température ambiante du milieu environnant ($^{\circ}\text{C}$), T_s : température de l'absorbeur ($^{\circ}\text{C}$), T_v : température de la face externe de la vitre ($^{\circ}\text{C}$), T_B : température de la surface extérieure de l'isolant ($^{\circ}\text{C}$).

• **Test du jour 1 (19/05/2012) :** Le but du premier test est de faire fonctionner pour la première fois le distillateur solaire toute la journée et savoir comment le système fonctionne. Pour cela, on va tout résumer dans les tableaux suivant :

heure	Ta (°C)	Ts (°C)	Tv (°C)	T _B (°C)	état ciel	Vent
08h30	26	21	26	x	clair	Calme
9h00	27	21,6	26,6	28	//	//
10h00	28	25,5	30,7	29,8	//	//
11h00	31,6	32,4	30,3	33,5	//	//
12h00	32	41,1	35	34,5	//	//
12h20	36	43,5	36,8	34,8	//	//
12h35	37	45,1	37,6	36,4	//	//
13h00	33	47,2	39,6	36,7	//	//
13h25	34	48,4	39	38	//	//
14h25	36	54,5	44,2	41,5	//	//
15h25	33,9	56,3	44	38,2	//	//
16h25	35,4	54,1	41,2	38,6	//	//
17h30	34,5	52,4	40	39,2	//	//

Heure	Manipulations et observations	Résultats
08h 30	- Pour connaître le débit du bac de l'absorbeur, on l'a rempli avec 3 litres d'eau dans un récipient puis on fait descendre cette eau dans le distillateur. - Le récipient a mis 15 mn pour se vider. - Après quelques minutes de fonctionnement, l'eau n'arrivait pas en bas du distillateur incliné très légèrement. En effet, on a voulu par ce test, connaître la quantité de l'eau que peut emmagasiner notre bac absorbeur. C'est pour cela qu'on a ajouté 2 litres d'eau (total de 5 litres).	Le débit de la solution est de un litre par minute.
09h 05	- Arrivées des premières gouttes d'eau dans le réservoir en bas du distillateur. - Arrivée des premières gouttes du condensat dans le récipient.	La quantité emmagasinée dans le distillateur pour ce test est de 3,3 litres.
09h 50		
09h 55		
10h 00		Quantité d'eau distillée 0.06 l
10h 40	On a constaté la formation de gouttelettes le long de la vitre. On a donc mis un récipient pour collecter et mesurer la production d'eau distillée.	
11h 00		Production : 0,15 l.
12h 00		Production : 0,3 l.
13h 00		Production : 0,6 l.
14h 00		Production : 0,8 l.
15h 00		Production : 1 l.
16h 00		Production : 1,2 l.
17h 00		Production : 1, 3 l.
18h 00	Arrêt du système.	Production finale : 1.3 l

- **Test du jour 2 (20/05/2012)** : A partir des résultats du premier jour et pour mieux comprendre le fonctionnement de notre distillateur, un deuxième jour de test a été réalisé. Pour cela, on a commencé les tests plus tôt et on a mis une quantité plus grande d'eau. Pour cela, on va tout résumer dans les tableaux suivants :

heure	Ta (°C)	Ts (°C)	Tv (°C)	T _B (°C)	état ciel	vent
9h00	22	21,6	22,4	x	clair	un peu fort
10h00	23	26,8	24,4	23,9	//	fort
11h00	23,9	31,8	27,6	26,8	//	//
12h00	27,8	37	30,4	28,6	//	//
12h15	27,8	39,6	33,1	29,1	//	//
12h30	30	41,5	33,3	32,5	//	//
12h45	30	43,3	34,9	33,4	//	//
13h00	33,5	45,4	34,5	31,8	//	//
13h15	33,5	47,1	36,1	33,2	//	//
13h30	32,4	47,7	36,6	32	//	//
14h00	30	49,8	37,4	32	//	//
14h30	32	50,4	37,4	33,8	//	//
15h00	29,3	50,6	36,4	31	//	//
15h30	25,2	48	31,3	28	//	//

Heure	Manipulations et observations	Résultats
08h 15	Puisque on a vu que le distillateur emmagasinait 3,3 litres de solution, on a mis donc 4 litres et on a laissé le distillateur fonctionné.	
10h 40	Ajout de 2 litres d'eau. elle attire avec elle une quantité d'eau emmagasinée (liaison hydrogène). Total de la solution : 6 litres	Production : 0,2 l.
11h 00		Production : 0,25 l.
11h 35		Production : 0,35 l.
15h 30	Une grande production d'eau distillée durant mon absence. le distillateur fonctionne tout seul.	Production : 1,27 l.
18h 45	Arrêt du système.	Production finale : 1,5 l.

- **Test du jour 3 (21/05/2012):** Le 3^{ième} jour a pour but de faire d'autres tests et d'essayer de trouver des réponses aux différentes interrogations. C'est pour cela qu'on a versé 3 litre de solution la nuit précédant le test pour savoir si le distillateur va produire beaucoup plus d'eau distillée le matin ou pas. Mais, le climat ce jour-là n'était pas au beau fixe. Malgré cela, on a fait le test qui est synthétisé dans les tableaux suivants :

heure	Ta (°C)	Ts (°C)	Tv (°C)	T _B	état ciel	Vent
9h00	24	24	23,5	x	nuages	Calme
10h00	25	28,2	27,8	27,8	//	un peu fort
11h00	25,5	34,7	30,8	30,6	//	très fort
12h00	28	42,5	31,2	29,2	//	//
12h15	27,9	44,7	31,6	27,6	//	//
12h30	29	46,1	31,8	26	//	//
13h00	30,2	47,9	33,5	26,2	//	//
13h45	29,8	49,9	27,5	29,5	//	//
14h00	30	51,5	37,2	32,1	//	//
14h40	29,4	51,6	37,3	33,1	/	//
15h00	29,5	51,2	38,4	32,2	//	//
15h30	27,8	49,9	34,8	31,6	//	//
16h00	27,2	48	33,4	31,4	//	//

Heure	Manipulations et observations	Résultats
19h le 20/05	3 l de solution dans le distillateur	
08h le 21/05	Début du test. Vitre humide.	Pas de condensation
08h 45	Ajout de 2 litres d'eau	
09h 00	Arrivées des 1 ^{ères} gouttes d'eau dans le récipient.	
10h 00		Production : 0,1 l
11h 00	la météo n'est pas bonne (beaucoup de nuages).	
12h 00	Ciel bleu mais nuageux.	Production : 0,2 l
13h 50		Production : 0,6 l
17h 00		Production : 1,1 l
18h 00	Arrêt du système.	Production finale: 1,2 l

- **Test du jour 4 (23/05/2012)** : L'objectif de la 4^{ème} journée est de vérifier encore une fois la robustesse du distillateur et voir comment il réagit lorsqu'on met un plus grand volume d'eau. Le résumé détaillé de la journée est donné dans les tableaux suivants :

heure	Ta (°C)	Ts (°C)	Tv (°C)	T _B (°C)	état ciel	Vent
9h10	24,7	22,8	24,7	x	très clair	calme
10h10	24	35,8	29,8	26,5	//	un peu fort
11h10	29,4	48,3	31,8	27	//	//
12h00	27,3	55,4	41,2	30,7	//	//
12h20	29,6	56,3	43	31	//	//
12h40	32,2	59,4	42,6	32	//	//
13h00	34,3	59,7	44,6	31,9	//	//
13h20	30,8	59,9	45,7	32,3	//	//
13h40	31,8	60	45	31,7	//	//
14h00	32,4	57,1	43	33,2	//	Fort
14h30	31,3	56,3	39,5	29,9	//	//
15h00	29,5	53,4	37	33,4	//	//
16h00	33	52,3	37,5	32,8	//	//

Heure	Manipulations et observations	Résultats
08h 20	Démarrage. Condensation sur la vitre d'eau.	
08h 40	Ajout de 3 litres d'eau. Arrivée des 1 ^{ères} gouttes du condensat dans le récipient.	
08h 45	Ajout de 3 litres d'eau	
08h 50	Ajout de 3 litres d'eau. On a mis au total 9 l d'eau + une quantité du soir.	
10h 00	Faible rendement à cause du grand volume initial d'eau.	Production : 0,05 l.
10h 45		Production : 0,125 l.
11h 00		Production : 0,17 l.
11h 35	La condensation est plus grande et l'eau est plus chaude.	Production : 0,25 l.
11h 50		Production : 0,3 l.
12h 10		Production : 0,4 l.
12h 30		Production : 0,5 l.
12h 45		Production : 0,6 l.
13h 00		Production : 0,7 l.
13h 15		Production : 0,75 l.

13h 35		Production : 0,85 l.
13h 50		Production : 0,9 l.
14h 10		Production : 1 l.
14h 30		Production : 1,1 l
16h 00		Production : 1,4 l
17h 00		Production : 1,5 l
18h 10	Arrêt du système.	Production finale: 1,6 l

- **Test du jour 5 (26/05/2012)** : Cette journée 5 a pour but de tester le distillateur solaire après modifications et de mesurer la température Tampon du mélange air-vapeur à l'intérieur du distillateur et ceci en utilisant une sonde de température universelle. Le résumé du Jour 5 est donné dans les tableaux suivants :

heure	Ta (°C)	Ts (°C)	Tv (°C)	T _B (°C)	état ciel	Vent
9h00	22	20,8	21	x	clair	Fort
10h00	24	31,5	29	24	//	//
11h00	27	46,1	34,5	29,5	//	//
12h00	28	54,3	39	30,2	//	//
12h20	31	55,8	39,9	31,3	nuages	//
12h40	27,2	54,8	39,2	30,8	//	//
13h00	29,7	54,1	38,2	31,4	//	//
13h20	27,7	55,8	36,1	27,1	//	//
14h00	20,9	42,6	27,2	20,7	couvert	//
17h00	20,5	31,7	25,4	18,8		
18h00	20	29,5	25,1	18,4		

Heure	Manipulations et observations	Résultats
07h 30	Démarrage. Puisqu'on va être utilisé une sonde de Température, on a mis une quantité minimale de la solution (4 litres) pour que le distillateur fonctionne tout seul.	
07h 40	On a commencé à prendre les mesures de T° à l'intérieur et à l'extérieur du distillateur.	T _{ext} = 6°C, T _{a-v} = 12°C
09h 30		T _{ext} = 10°C, T _{a-v} = 32°C
09h 40		T _{ext} = 11°C, T _{a-v} = 33°C
09h 45		T _{ext} = 11°C, T _{a-v} = 34°C
09h 50		T _{ext} = 11°C, T _{a-v} = 36°C Production : 0,05 l.
10h 00		T _{ext} = 12°C, T _{a-v} = 37°C
10h 05		T _{ext} = 12°C, T _{a-v} = 38°C
10h 10		T _{ext} = 12°C, T _{a-v} = 39°C
10h 15		T _{ext} = 12°C, T _{a-v} = 40°C
10h 20		T _{ext} = 13°C, T _{a-v} = 41°C
10h 30		T _{ext} = 13°C, T _{a-v} = 42°C Production : 0,125 l.
10h 35		T _{ext} = 13°C, T _{a-v} = 43°C
10h 45		T _{ext} = 14°C, T _{a-v} = 44°C
11h 00		T _{ext} = 14°C, T _{a-v} = 45°C Production : 0,125 l.

11h 10		$T_{\text{ext}} = 14^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{a-v}} = 46^{\circ}\text{C}$
11h 20		$T_{\text{ext}} = 15^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{a-v}} = 47^{\circ}\text{C}$
11h 30		$T_{\text{ext}} = 15^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{a-v}} = 48^{\circ}\text{C}$ Production : 0,4 l.
11h 40		$T_{\text{ext}} = 16^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{a-v}} = 49^{\circ}\text{C}$
12h 00		$T_{\text{ext}} = 16^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{a-v}} = 49^{\circ}\text{C}$ Production : 0,6 l.
12h 10		$T_{\text{ext}} = 16^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{a-v}} = 49^{\circ}\text{C}$ Production : 0,7 l.
12h 15		$T_{\text{ext}} = 17^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{a-v}} = 50^{\circ}\text{C}$
12h 25		$T_{\text{ext}} = 17^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{a-v}} = 51^{\circ}\text{C}$ Production : 0,75 l.
12h 35		$T_{\text{ext}} = 18^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{a-v}} = 52^{\circ}\text{C}$ Production : 0,8 l.
12h 40	Présence de nuages	$T_{\text{ext}} = 18^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{a-v}} = 51^{\circ}\text{C}$
12h 45		$T_{\text{ext}} = 18^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{a-v}} = 52^{\circ}\text{C}$ Production : 0,9 l.
12h 50		$T_{\text{ext}} = 18^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{a-v}} = 53^{\circ}\text{C}$
13h 00	Toujours, présence de nuages	$T_{\text{ext}} = 18^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{a-v}} = 52^{\circ}\text{C}$ Production : 1 l.
13h 10		$T_{\text{ext}} = 18^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{a-v}} = 49^{\circ}\text{C}$
13h 15	On constate que $T_{\text{a-v}}$ diminue considérablement en présence des nuages (diminution de la radiation).	$T_{\text{ext}} = 17^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{a-v}} = 46^{\circ}\text{C}$
13h 20	Radiation solaire augmente un peu et la T° à l'intérieur du distillateur augmente mais la T° extérieure ne varie pas.	$T_{\text{ext}} = 18^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{a-v}} = 43^{\circ}\text{C}$
13h 25		$T_{\text{ext}} = 18^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{a-v}} = 44^{\circ}\text{C}$
13h 30	Nuages	$T_{\text{ext}} = 18^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{a-v}} = 41^{\circ}\text{C}$
13h 35		$T_{\text{ext}} = 18^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{a-v}} = 42^{\circ}\text{C}$
13h 40		$T_{\text{ext}} = 18^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{a-v}} = 43^{\circ}\text{C}$
14h 00	Vu qu'il y'avait beaucoup de nuages, on a laissé le distillateur fonctionné tout seul.	$T_{\text{ext}} = 18^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{a-v}} = 43^{\circ}\text{C}$ Production : 1,2 l.
17h 00	Le distillateur était sec et pas de condensation. Toute la solution qui s'y trouvée s'est évaporée. Donc, une perte pour la production en eau distillée. Ajout de 2,5 litres de solution.	$T_{\text{ext}} = 19^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{a-v}} = 37^{\circ}\text{C}$ Production : 1,5 l.
17h 15	Redémarrage de la condensation sur la vitre inclinée	$T_{\text{ext}} = 18^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{a-v}} = 34^{\circ}\text{C}$
17h 30	Arrivée des 1 ^{ères} gouttes du condensat dans le récipient	$T_{\text{ext}} = 18^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{a-v}} = 32^{\circ}\text{C}$
17h 45		$T_{\text{ext}} = 18^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{a-v}} = 32^{\circ}\text{C}$
18h 15	Arrêt du système.	$T_{\text{ext}} = 18^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{a-v}} = 28^{\circ}\text{C}$ Production finale : 1,6 l.

- **Test du jour 6 (28/05/2012)** : Le but du 6^{ème} jour des tests est d'étudier un autre paramètre, à savoir la position du distillateur par rapport au mouvement du soleil. Le distillateur sera orienté de façon à être toujours en face du soleil. Le détail du Jour 6 est donné par les tableaux suivants :

heure	Ta (°C)	Ts (°C)	Tv (°C)	T _B (°C)	état ciel	Vent
10h00	20,6	22,7	19	x	Nuages intermittants	très fort
11h00	23,6	32,4	27,8	22,5	//	//
12h05	23	41,8	28,5	25	//	//
12h30	23,2	45,6	30,4	25	//	//
13h00	24,9	49,7	31,2	25,6	//	//
13h30	25,4	51,8	33,7	29,9	//	//
14h00	25,1	55,6	35,4	29,3	clair	//
14h30	26,3	57,6	36,3	30,5	//	//
15h00	26	57,7	37,2	32,5	//	//
15h30	26,4	57,6	34,6	33,1	//	//
16h00	24	56,4	36	30,1	//	//

Heure	Manipulations et observations	Résultats
07h 45	Démarrage avec un apport initial de 3,5 l d'eau. Le distillateur est placé dans une position Est Sud-est.	
10h 00	Beaucoup de condensation.	Production: 0,25 l.
10h 20		Production : 0,4 l.
10h 30		Production : 0,5 l.
10h 45	Le distillateur en face du soleil.	Production : 0,6 l.
11h 00		Production : 0,7 l.
11h 10		Production: 0,75 l.
11h 20		Production: 0,85 l.
11h 35		Production : 0,9 l.
11h 45	La production est plus grande que les jours passés.	Production : 1 l.
11h 50		Production : 1,1 l.
12h 10	Changement de position du distillateur : Face Sud	Production : 1,2 l.
12h 20		Production: 1,25 l.
12h 30		Production: 1,35 l.
12h 45		Production : 1,4 l.
12h 55	Ajout d'1 litre d'eau. Un peu moins de la moitié d'eau a été évaporée et condensée ce qui représente un bon rendement.	Production : 1,5 l.
13h 10	Toute la solution à l'intérieur du distillateur est à l'arrêt, les deux derniers canaux sont toujours secs. Ajout d'1 litre de solution. Volume total 5,5 l.	Production : 1,6 l.
13h 20		Production : 1,7 l.
13h 30	changement de position du distillateur : Face Sud, Sud-ouest.	Production: 1,75 l.
13h 45		Production : 1,8 l.
14h 00		Production : 1,9 l.
14h 10		Production : 2 l.
14h 20		Production : 2,1 l.
14h 35	Changement de position du distillateur : Face Sud-Ouest, Ouest.	Production: 2,15 l.
14h 50		Production: 2,25 l.
16h 05	Retour. Assèchement de l'absorbeur. Ajout de 2,5 litres d'eau (ce volume n'est pas pris en compte dans le volume total). Il faut donc plus de temps à l'eau pour s'échauffer et	Production : 2,6 l.

	s'évaporer. On remarque que lorsqu'il n'y'a plus d'eau dans l'absorbeur, c'est que l'assèchement de l'absorbeur a commencé. Il faut donc laisser un certain temps à l'eau qui se trouve dans l'absorbeur à s'évaporer (diminution du volume, implique une plus grande évaporation), puis ajouter une petite quantité, de préférence goutte à goutte pour que le volume de l'eau qui se trouve dans le distillateur soit toujours minimum.	
17h 10	Arrêt du système.	Production finale : 2,7 l.

- **Test du jour 7 (29/05/2012) :** Le but du test du Jour 7 est de s'assurer du bon rendement du distillateur solaire (en suivant le mouvement du soleil) avec une plus grande quantité d'eau.

Le résumé détaillé du Jour 7 est donné dans les tableaux suivants :

heure	Ta (°C)	Ts (°C)	Tv (°C)	T _B (°C)	état ciel	Vent
9h20	25,3	22,6	24,6	x	clair	Calme
10h20	26,3	31,3	32	29,1	//	//
11h20	29,5	44,3	36	37,5	//	//
12h20	32,1	55,5	41,5	37,8	//	//
12h50	30,3	59,9	42,8	37,5	//	//
13h20	31	63,2	46,7	39,1	//	//
13h50	30,7	65,8	46,6	39,9	//	//
14h20	32,4	66,6	52,4	48,6	//	//
15h20	31,6	66,6	48,3	43	//	//
16h20	31,4	65,7	49,4	43,2	//	//
17h15	31,5	63,6	44,2	39,7	//	//

Heure	Manipulations et observations	Résultats
08h 30	Bac vide. Ajout d'6,6 litres d'eau dans le bac absorbeur.	
08h 40	Début de formation des gouttes du condensat sur une partie de la vitre.	
09h 15	1 ^{ère} descente du condensat le long de la vitre vers la gouttière.	
09h 10	La condensation augmente.	
09h 30		Production : 0,1 l.
09h 45		Production : 0,2 l.
10h 00		Production : 0,3 l.
10h 20		Production : 0,4 l.
10h 35		Production : 0,5 l.
10h 55		Production : 0,6 l.
11h 10		Production : 0,7 l.
11h 20		Production : 0,8 l.
11h 40		Production : 0,9 l.
11h 55		Production : 1 l.
12h 10	Changement de la position du distillateur : face sud.	Production : 1,1 l.
12h 35		Production : 1,2 l.

12h 55		Production : 1,3 l.
13h 10		Production : 1,4 l.
13h 25		Production : 1,5 l.
13h 35		Production : 1,6 l.
13h 45	Changement de position du distillateur : Face Sud / Sud-Ouest. Remarque importante : Pas d'assèchement du distillateur à cause du plus grand volume d'eau. Donc, puisque la journée est encore longue et puisque la surface de contact entre l'absorbeur et l'eau est plus grande pendant le Jour 7, l'évaporation de l'eau va croître plus rapidement que celle du Jour 6.	
13h 55		Production : 1,7 l.
14h 10		Production : 1,8 l.
14h 25		Production : 1,9 l.
14h 40		Production : 2 l.
14h 55		Production : 2,1 l.
15h 00	Changement de position : Face Sud-Ouest / Ouest.	
17h 00	Retour	Production : 2,7 l.
17h 20	Assèchement de l'absorbeur. Ajout d'1,5 l d'eau.	
19h 00	Fin des tests.	Production finale : 2,85 l.

4.3 Conception du capteur solaire :

4.3.1 Description du banc d'essai :

Le banc d'essai a été réalisé au sein du laboratoire d'énergétique et matériaux au niveau de la faculté de technologie de l'université de Tlemcen situé au Nord-ouest Algérien à une latitude $35,28^\circ$, une longitude de $-1,17^\circ$ et une altitude de 750m. Le site est caractérisé par un ensoleillement très important, avec une irradiation moyenne journalière estimée à 6000Wh/m^2 , une durée d'insolation d'environ 3000 heures par an et un indice de clarté K_t moyen estimé à 0,75 [18]. Le capteur plan solaire à un seul vitrage est représenté sur la **figure 28**, dont la surface totale est égale à $2,6\text{ m}^2$, et la surface d'ouverture égale à $2,4\text{ m}^2$. Il est monté sur une structure rigide en acier réglable à plusieurs niveaux d'inclinaison de 0° , 32° , 45° , 60° et 90° .



Figure 28 : Représentation du capteur solaire plan

Le capteur solaire plan est de forme parallélépipédique construit en tôle galvanisée de 1,5 mm d'épaisseur et renforcé à l'intérieur par des cornières métalliques et recouvert à l'extérieur par du bois en chêne liège comme isolant thermique et entre les deux il y a une couche de laine de verre de 5 cm d'épaisseur sur les surfaces latérales ainsi que sur la surface arrière. Son poids total à vide est de 36 kg et sa capacité géométrique est de 76,5 litres et sa capacité réelle mesurée après au gonflement dû à la pression du réseau est de 81 litres. Sa face avant, peinte en noire, à une surface de 0,76 m². A l'intérieur, on recouvre la tôle par un film noir en PE comme absorbeur de chaleur. La couverture transparente est constituée de deux vitres ordinaires de 4 mm d'épaisseur avec un espace entre les vitres de 1.5 cm. Comme conseillé dans la littérature [19], l'espace entre l'absorbeur et le vitrage est de 5 cm. Cela minimise l'effet de bord tout en assurant de faibles pertes par convection. Le bac (Figure 29) est réalisé en tôle noire de 1 mm d'épaisseur. Sur ses bords supérieurs sont fixées des cornières (Tôle pliée) qui supportent le jeu du double vitrage.

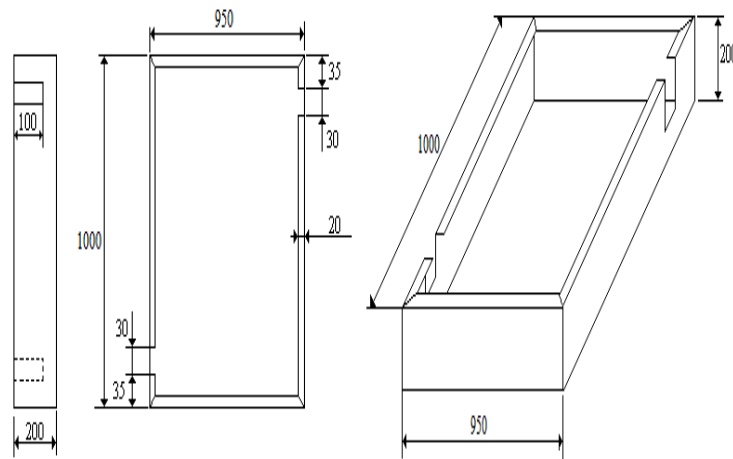


Figure 29 : Schéma descriptif du bac

Les caractéristiques techniques du capteur solaire plan objet de notre étude expérimentale sont résumées dans le **Tableau 2.6**.

Tableau 2.6 : Caractéristiques du capteur solaire

Désignation	Unité	Nature et dimensions	
Le bac :			
Matériau		tôle galvanisée	Film noir en PE
Epaisseur	mm	1	0.5
Dimensions	mm	1000*950*200	1000*950*200
La couverture transparente :			
Nature		Verre ordinaire	
Nombre		02	
Epaisseur	mm	4	
Dimensions		980*940	
Emissivité		0.898	

L'isolation thermique : Nature		Laine de verre	Chêne liège naturel expansé
Epaisseur arrière	mm	50	20
Epaisseur latérale	mm	50	20
Conductivité		0.04	0.04
La lame d'air :			
Entre vitrage	mm	15	
Entre absorbeur et vitrage	mm	50	

4.3.2 Mesures de l'éclairement :

Notre objectif est d'étudier l'effet de l'intensité de l'éclairement solaire et de l'angle d'inclinaison du capteur solaire plan sur le rendement instantané de ce dernier. Ce capteur existe déjà et fait partie d'un banc d'essai réalisé au laboratoire d'énergétique et matériaux de l'université de Tlemcen. Le rendement d'un capteur solaire plan en régime permanent, appelé également rendement instantané peut être évalué expérimentalement par deux méthodes, à savoir la méthode calorimétrique et la méthode du bilan thermique. Mais compte tenu de la faible précision de la première citée, c'est généralement la seconde qui est utilisée et qui fait l'objet des différentes normes. En effet une fois le régime permanent établi, un bilan thermique effectué aux bornes du capteur permet d'exprimer le rendement journalier du

système par l'équation suivant :

$$\eta_j = \frac{m \cdot C_p \cdot (T_{fs} - T_{fe})}{A_c \cdot G} \quad (13)$$

Où m : Débit massique du fluide caloporteur, C_p : Chaleur spécifique de l'eau, T_{fs} : Température de sortie du fluide, T_{fe} : Température d'entrée du fluide, A_c : Surface du capteur solaire, G : flux solaire global incident.

Les différents tests effectués se sont déroulés durant le mois d'Avril 2012. La prise de température initiale de l'eau se trouvant à l'intérieur du capteur solaire est prélevée chaque matin au début des tests alors que la température finale est prise en fin de journée pour chaque test et l'acquisition de données est déchargée sur un micro-ordinateur où l'on enregistre les données numériques pour faire les différents traitements. Les conditions des tests sont présentées sur les figures au-dessous où sont reportées les variations de l'éclairement solaire ainsi que la température ambiante sous lesquelles les tests ont été effectués.

Durant la journée du 21/04/2012, le ciel était dégagé et la température ambiante moyenne lors du test est de 31.77°C. Un vent moyen durant la matinée et on a noté un léger passage nuageux lors de l'après-midi (à partir de 15h30). Ce passage nuageux discontinu a réduit l'éclairement solaire comme montré sur la **figure 30**. Le rendement journalier moyen du capteur solaire est appréciable.

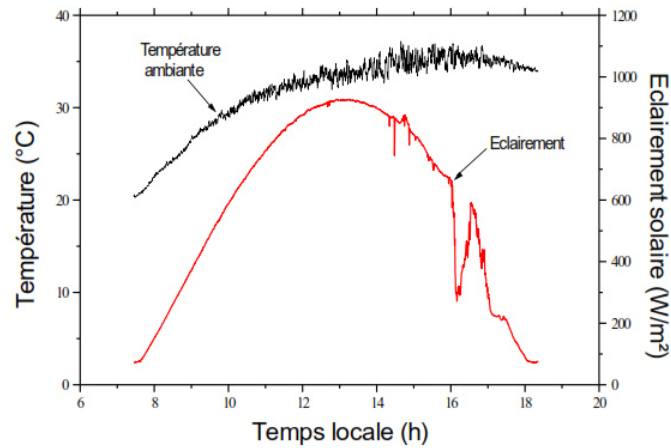


Figure 30 : Evolution de la température ambiante et de l'éclairement solaire global mesurée sur le plan d'ouverture du capteur lors de la journée du 21/04/2012. Le rendement journalier moyen est de 47%.

La journée du 22/04/2012 est caractérisée par un ciel clair avec quelques nuages légers et discontinus observés en après-midi. La température ambiante moyenne lors du test est de 34.07°C et le vent reste moyen. Le rendement journalier moyen qui est de 37% est un peu plus faible par rapport à celui de la journée précédente. Ceci est principalement dû au fait qu'au début du test. Le rendement du système sera alors plus faible car pour un système thermique solaire, le rendement est inversement proportionnel à sa température. Plus le système est chaud, plus les pertes sont élevées et le gain est réduit.

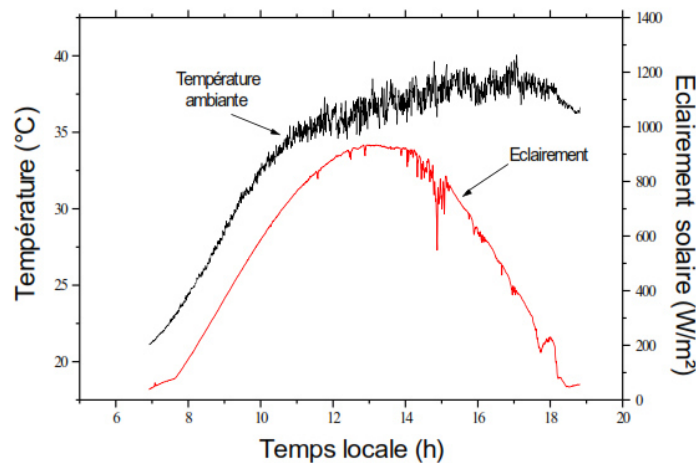


Figure 31 : Evolution de la température ambiante et de l'éclairement solaire global mesuré sur le plan d'ouverture du capteur lors de la journée du 22/04/2012. Le rendement journalier moyen est de 37%.

Durant la journée du 23/04/2012 beaucoup de nuages ont été observés et la composante directe du rayonnement solaire était pratiquement absente. La température ambiante moyenne lors du test est de 29.82°C c'est-à-dire un jour peu froid par rapport aux autres jours, le vent reste moyen. Le rendement journalier moyen du système est très faible de l'ordre de 16%. Ceci est principalement dû au faible éclairement solaire enregistré durant toute la journée.

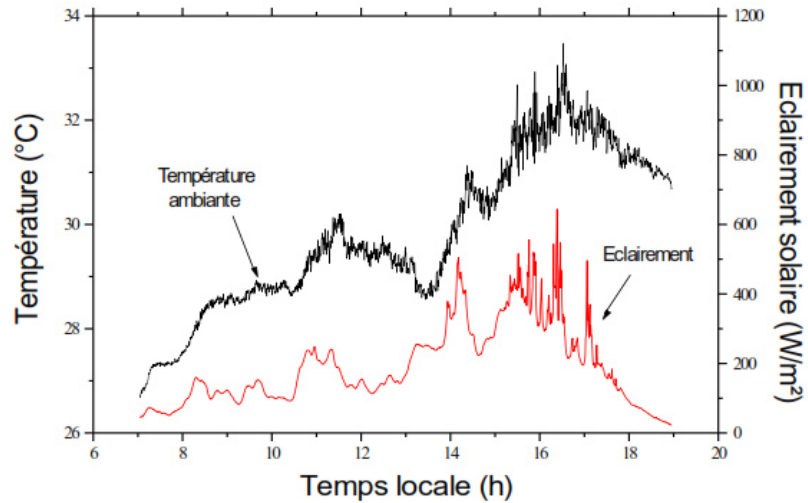


Figure 32 : Evolution de la température ambiante et de l'éclairement solaire global mesuré sur le plan d'ouverture du capteur lors de la journée du 23/04/2012. Le rendement journalier moyen est de 16%.

La journée du 24/04/2012 se caractérise par un ciel peu clair tel qu'on observe quelques nuages discontinus et à partir de 14 h 30 le ciel devient plutôt couvert. La température ambiante moyenne est de 33.07°C et le vent reste moyen. Le rendement journalier moyen du chauffe-eau durant cette journée est plutôt élevé (45%).

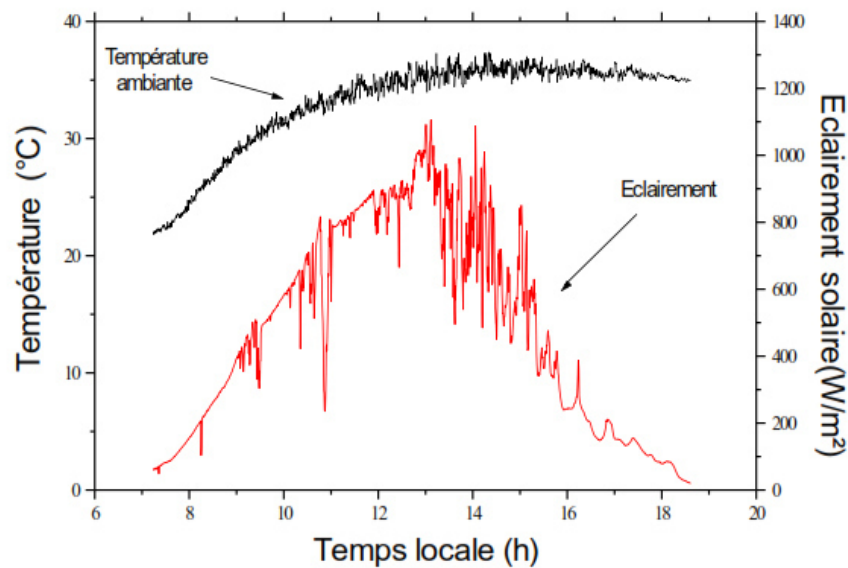


Figure 33 : Evolution de la température ambiante et de l'éclairement solaire global mesuré sur le plan d'ouverture du capteur lors de la journée du 24/04/2012. Le rendement journalier moyen est de 45%.

La journée du 25/04/2012 se caractérise par la présence de brume durant toute la journée. En effet la température ambiante est assez élevée (34.89°C) et c'est la composante diffuse qui prédomine dans l'éclairement solaire global. Le vent reste moyen et Le rendement journalier moyen du capteur solaire est moyen 39%.

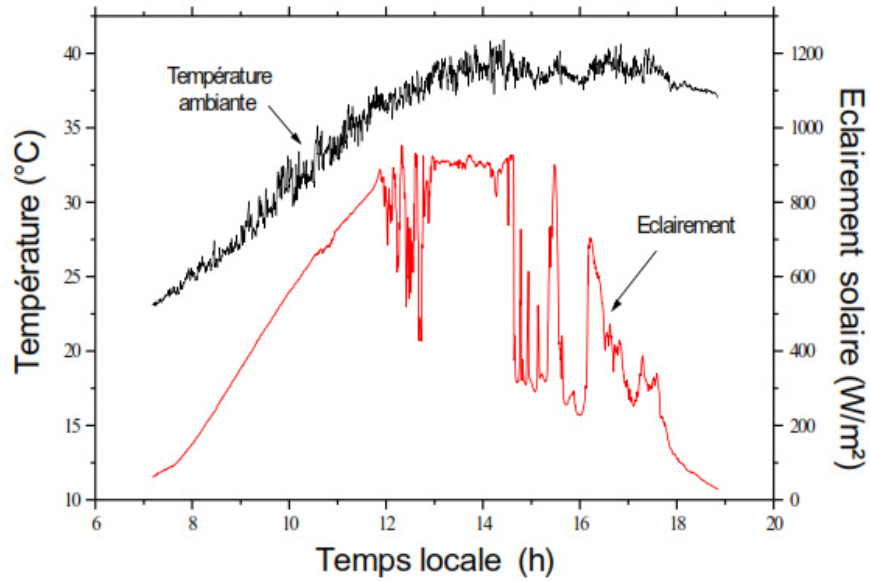


Figure 34 : Evolution de la température ambiante et de l'éclairement solaire global mesuré sur le plan d'ouverture du capteur lors de la journée du 25/04/2012. Le rendement journalier moyen est de 39%.

La journée du 26/04/2012 est pratiquement semblable à la précédente mais avec en plus un léger vent de sable. La température ambiante moyenne est de 34.18°C. Le rendement journalier moyen (42%) est un peu plus grand que celui de la journée précédente.

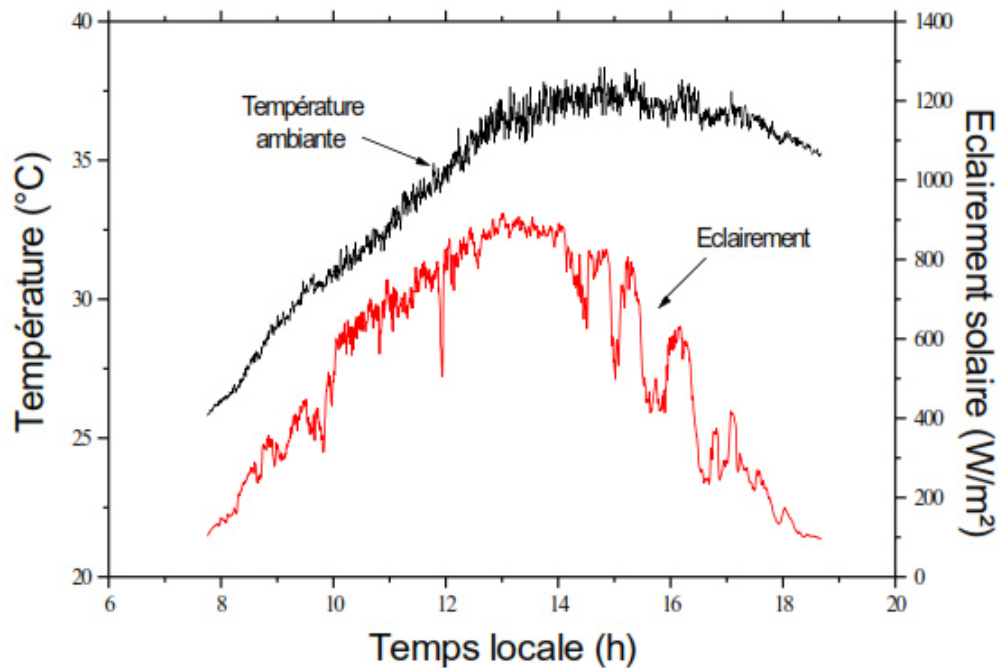


Figure 35 : Evolution de la température ambiante et de l'éclairement solaire global mesuré sur le plan d'ouverture du capteur lors de la journée du 26/04/2012. Le rendement journalier moyen est de 42%.

La journée du 28/04/2012 est similaire aux deux précédentes mais avec une température ambiante égale à 30,45°C. Le rendement journalier moyen est assez élevé (46%).

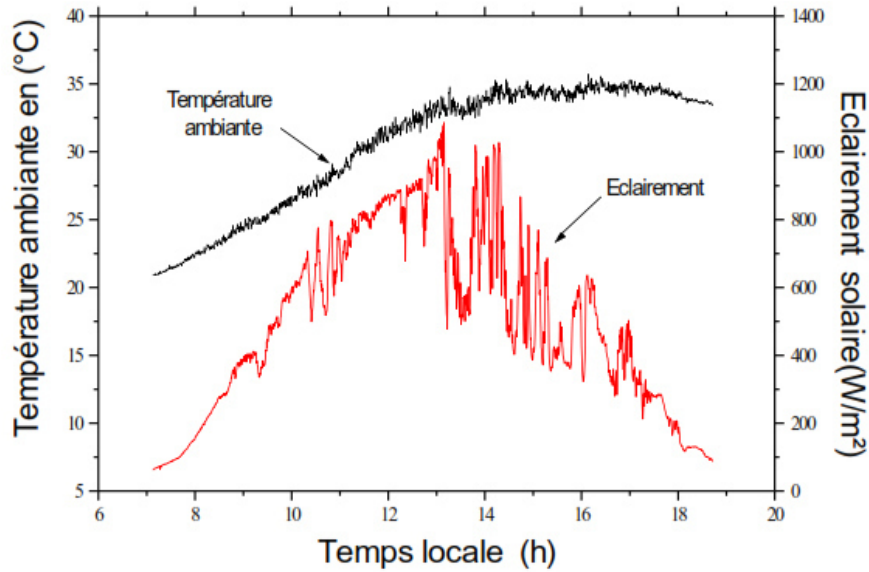


Figure 36 : Evolution de la température ambiante et de l'éclairement solaire global mesuré sur le plan d'ouverture du capteur lors de la journée du 28/04/2012. Le rendement journalier moyen est de 46%.

Lors de la journée du 29/04/2012, le ciel était pratiquement dégagé sauf un très léger passage enregistré aux alentours de 13h. La température ambiante moyenne est 29.85°C c'est-à-dire un jour peu froid par rapport aux autres jours et le vent reste moyen. Durant ce test, on note un rendement journalier moyen très élevé (49%) du fait que l'irradiation globale est importante.

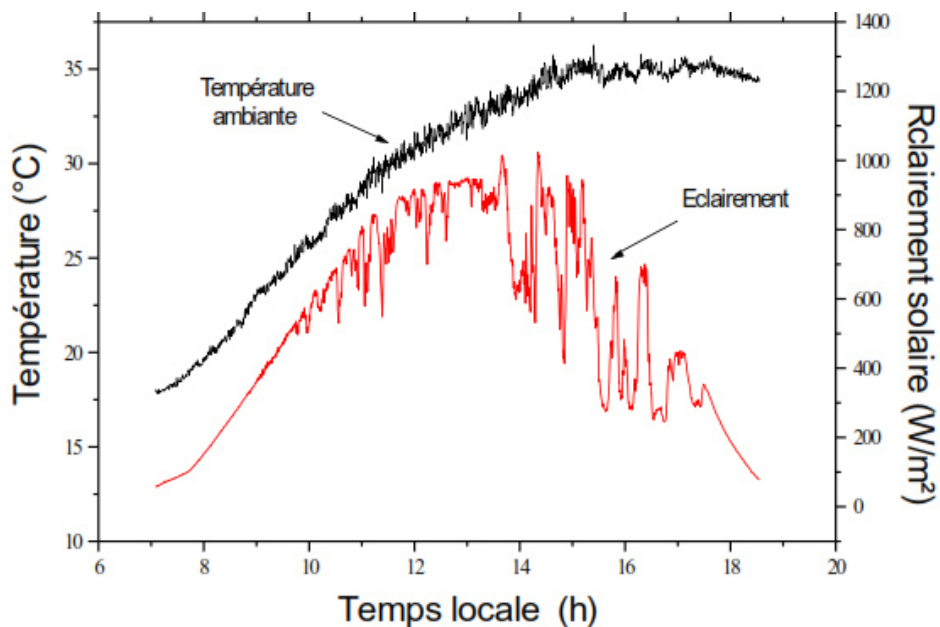


Figure 37 : Evolution de la température ambiante et de l'éclairement solaire global mesuré sur le plan d'ouverture du capteur lors de la journée du 29/04/2012. Le rendement journalier moyen est 49%.

Les résultats de cette campagne de tests sont regroupés dans le **tableau 2.7**.

Tableau 2.7 : Résultats des campagnes de tests.

Date	H_{in} (W.h/m ²)	T_s (°C)	Δt (h)	T_a (°C)	ΔT_j (°C)	I_j (W/m ²)	$A * H_{in}$ (KJ)	η_j	$\Delta T_j / I_j$ (°C.m ² /W)
21/04/2012	6374.02	56.3	10.91	37	11.17	584.23	17439.31	0.47	0.019
22/04/2012	6611.81	50.6	11.91	33.5	18.22	555.14	18089.91	0.37	0.032
23/04/2012	2274.95	51.6	11.91	30.2	16.57	191.01	6224.26	0.36	0.086
24/04/2012	5471.02	60	11.38	34.3	12.79	480.75	14968.71	0.45	0.026
25/04/2012	5768.5	55.8	11.66	31	15.36	494.72	15782.61	0.39	0.031
26/04/2012	5817.66	57.7	10.92	26.4	12.35	532.75	15917.12	0.42	0.023
28/04/2012	5797.57	63.2	11.60	33	7.17	499.79	15862.15	0.46	0.014
29/04/2012	6111.24	66.6	11.46	32.4	10.29	533.26	16720.35	0.49	0.019

V. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté le matériau étudié où on a étalé toutes ses caractéristiques théoriques et mesurées expérimentalement. Ensuite, les techniques de caractérisation du vieillissement ont été développées. Et enfin, on a clôturé cette partie par exposer les tests de l'exposition solaire comme application expérimentale du comportement énergétique du matériau étudié suivant trois dispositifs solaires à effet de serre.

Ainsi, la caractérisation physico-chimique, du polyéthylène basse densité, a montré que le matériau présente des valeurs de conductivité thermique, de diffusivité thermique et de capacité thermique lui permettant d'être utilisé comme matériau absorbant où la conversion du rayonnement solaire en chaleur est appréciable dans le dispositif à effet de serre considérés. Les valeurs de l'éclairement dans le site considéré qui est le site de Tlemcen, ont été effectuées. Et suite aux tests énergétiques, on confirme la bonne tenue du PE nous ramène à une température maximale atteinte au niveau du matériau absorbeur est de 105 °C, ce qui est suffisant pour la distillation solaire où un maximum d'eau distillé a été obtenu lorsque les conditions de températures extrêmes sont considérées.

Dans le chapitre 3, nous traitons la modélisation et simulation numérique du même comportement énergétique en présentant le modèle mathématique ainsi que sa partie algorithmique afin de faire la résolution du système d'équations différentielles par la méthode de RUNGE-KUTTA dans les dispositifs solaires.

VI. Références bibliographiques:

- [1] G. E. DIETER, "Engineering design, a materials and processing approach", McGraw-Hill.
- [2] G. PAHL, W. BEITZ, "Engineering design", Springer.
- [3] M. M. FARAG, "Selection of materials and manufacturing processes for engineering design", Prentice Hall.

- [4] BUDINSKI, “Engineering materials, properties and selection”, Prentice Hall.
- [5] E. H. CORNISH, “Materials and the designer”, Cambridge University Press.
- [6] F. CRANE, J. CHARLES, “Selection and use of engineering materials”, Butterworth.
- [7] E. Richaud, C. Monchy-Leroy, X. Colin, L. Audouin, J. Verdu, “Kinetic modeling of stabilization coupled with stabilizer loss by evaporation. Case of dithioester stabilized polyethylene”, *Polym. Degradation Stab.*, 94, 2004–2014, 2009.
- [8] D. Especel, S. Matteï, “Simultaneous measurement of emissivity and re_ectivity at room temperature”, 10th International Heat Transfer Conference, Brighton (UK), 2, 231-236, 1994.
- [9] D. Especel, S. Matteï, “Periodic techniques for low temperature radiative property measurements”, *Proceedings of the ASME Heat Transfer Division, International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Atlanta (USA) 1*, 179-185, 1996.
- [10] L. Ibos, S. Datcu, S. Matteï, « Mesure d'émissivité totale à température ambiante de matériaux inhomogènes à l'aide d'un émissomètre portable », 5^{ème} Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois -Thermique des Systèmes, Lyon, 73-80, 28-30 Mai 2001.
- [11] L. Ibos, M. Marchetti, A. Boudenne, S. Datcu, J. Livet, Y. Candau, “Infrared emissivity measurement device : Principle and applications”, *Measurement Science and Technology*, 17, 2950-2956, 2006.
- [12] M. Marchetti, L. Ibos, A. Boudenne, S. Datcu, Y. Candau, J. Dumoulin, J. Livet, « Analyse du comportement radiatif de matériaux de l'infrastructure routière : Principes et mesures de l'émissivité infrarouge », *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 272, 45-55, 2008.
- [13] S. Datcu, L. Ibos, Y. Candau, S. Mattéï, “Contribution to improvement of building wall surface temperature measurements by infrared thermography”, *Infrared Physics and Technology*, 46, 451-467, 2005.
- [14] E. Tang-Kwor, « Contribution au développement de méthodes périodiques de mesure de propriétés thermophysiques des matériaux opaques », Thèse Université Paris 12, 1998.
- [15] J. P. Eberhart, “Analyse structural et chimique des Matériaux”, Ed. Dunod, 1989.
- [16] K. Anandakumaran, D. J. Stonkus, “Assessment of oxidative thermal degradation of crosslinked polyethylene and ethylene propylene rubber cable insulation”, *Polymer Engineering & Science*, 32 (18), 1386-1393, 1992.
- [17] B. Wunderlich, “Macromolecular Physics. Volume I: Crystal Structure, Morphology, Defects Summary”, *Academic press ed.*, 1, New york and London, 549, 1973.

- [18] Ministère de l'Energie e des Mines, « Bilan énergétique nationale de l'année 2010 », Edition 2011. www.mem-algeria.org.
- [19] N. M. Nahar, P. Gupta Jagdish, “Studies on gap spacing between absorber and cover glazing in flat plate solar collectors”, International journal of energy research Vol. 13, 1989.

CHAPITRE 3 :

Modélisation et simulation numérique

Introduction :

La complexité de la simulation des dispositifs solaires à effet de serre réside principalement dans les bilans des différentes parties du dispositif lui-même, que ce soit pour la géométrie choisie ou pour les données des calculs. Cette difficulté a motivé de nombreuses approches différentes, allant de la géométrie la plus simple [1] qui présente une simple conception, à la modélisation d'un dispositif solaire simple [2], [3] et [4].

Dans notre étude, nous avons conçu et expérimenté deux types de dispositifs solaires à effet de serre qui sont un distillateur solaire simple et capteur solaire plan. Nous allons développer la modélisation de ces deux dispositifs solaires afin de prévoir leur comportement lorsqu'on fait varier les différents paramètres d'entrées et de sortie. Les températures des différents éléments constituant le système changent instantanément, et échangent de ce fait entre eux de la chaleur par conduction, convection, rayonnement et évaporation.

Ainsi, nous essayerons d'expliquer les différentes étapes nécessaires pour développer la simulation numérique afin de comprendre ses différents changements et échanges thermiques au sein des dispositifs solaires, avec quelques exemples d'applications qui seront suivis par une comparaison avec les résultats expérimentaux dans le but d'approcher au mieux les performances thermiques des deux dispositifs solaires.

I. Bilan énergétique :

Dans un premier temps, on considérera le bilan énergétique dans un distillateur solaire et dans un deuxième temps dans un capteur solaire.

1.1 Distillateur solaire :

1.1.1 Les paramètres et caractéristiques de fonctionnement du distillateur solaire :

On peut classer les échanges qui influent sur le fonctionnement du distillateur comme suit: Les paramètres externes et les paramètres internes.

➤ Échanges de chaleur à l'intérieur du distillateur :

- Échange de chaleur de l'eau entre l'absorbeur et la surface de condensation : L'eau reçoit de l'absorbeur un flux solaire ou de chaleur par convection naturelle et par conduction. L'eau cède un flux de chaleur par rayonnement et par convection naturelle aux surfaces de la condensation. Puisque il existe une évaporation, l'eau perd certain un flux de chaleur.

- Échange de chaleur entre la vitre et la surface d'eau : Les flux solaires incidents cédés par la nappe d'eau ne sont pas reçus intégralement par la surface de condensation. A cet égard et au cours du transfert, une partie est absorbée par l'atmosphère interne et les parois latérales. Les vitres reçoivent les flux incidents par convection naturelle, par rayonnement et par condensation de la vapeur d'eau.

➤ Échange de chaleur entre la vitre et l'ambiance : Le milieu extérieur cède le flux de chaleur par rayonnement solaire à la vitre, dont une partie est réfléchiée. La vitre cède au milieu extérieur le flux de chaleur par rayonnement et par convection naturelle.

1.1.2 Modélisation mathématique :

La théorie d'un distillateur solaire simple en forme de serre (**figure 1**) illustre les différents échanges de chaleur qui se produisent dans un distillateur solaire. Elle est fondée sur quatre bilans. En régime transitoire, les équations régissant le bilan thermique au niveau de chaque partie du distillateur, s'écrivent comme suit [5] :

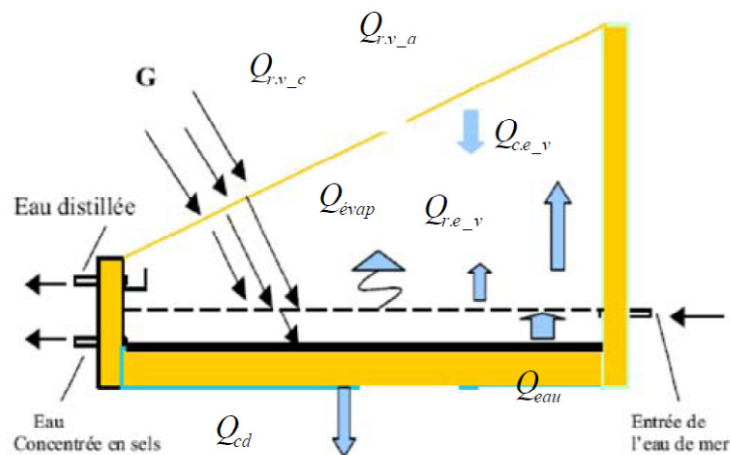


Figure 1 : Bilan énergétique d'un distillateur solaire

Avant d'écrire le bilan thermique, on doit tenir des hypothèses simplificatrices suivantes :

- La température de chaque composant est uniforme,
- Transfert de chaleur est unidimensionnel,
- Le soleil est assimilé à un corps noir,
- La couverture est propre,
- La condensation se fait uniquement sur la couverture (il n'y a pas de condensation sur les parois latérales),
- La saumure est statique sur le bassin,
- Le bassin est étanche,
- La condensation de l'eau sur la couverture est homogène et continue (le verre possède une bonne mouillabilité),
- La concentration de la saumure n'intervient pas dans les transferts de chaleur et de masse à partir de et vers la saumure,
- Les propriétés physiques des matériaux sont considérées constantes,
- Les parois latérales sont supposées adiabatiques,
- La chaleur perdue par addition d'eau d'appoint et celle emportée par le distillat sont supposées négligeables.

Considérons une section quelconque du système à l'instant t , soit i l'un des milieux représentés dans cette section, M_i sa masse en Kg, Cp_i sa chaleur spécifique en J/Kg.°C et sa température en °C.

Le bilan au nœud i donné par :

$$M_i \times Cp_i \times \frac{dT_i}{dt} = \sum_{j=1}^n Q_{ij} + P_i \quad (1)$$

P_i : Terme de puits.

- Bilan du vitrage : La quantité de chaleur reçue par la vitre est évacuée par conductivité à travers celle-ci, soit :

➤ Face extérieure :
$$\frac{M_v Cp_v}{2 \times A_v} \frac{dT_{ve}}{dt} = \left(\frac{\lambda_v}{\delta_v} \right) (T_{vi} - T_{ve}) - Q_{r:v.e_ciel} - Q_{c:v.a} + \frac{P_v}{2} \quad (2)$$

➤ Face intérieure :
$$\frac{M_v Cp_v}{2 \times A_v} \frac{dT_{vi}}{dt} = \left(\frac{\lambda_v}{\delta_v} \right) (T_{vi} - T_{ve}) - Q_{r:e.v.i} - Q_{c:e.v.i} + Q_{evap} + \frac{P_v}{2} \quad (3)$$

$Q_{r:e.v.i}$: Flux thermique par rayonnement entre le film d'eau et le vitrage,

$Q_{c:e.v.i}$: Flux thermique par convection entre le film d'eau et le vitrage,

Q_{evap} : Flux thermique par évaporation-condensation entre le film d'eau et le vitrage,

$Q_{r:v.e_ciel}$: Flux thermique perdu par la vitre par rayonnement vers l'extérieur,

$Q_{c:v.a}$: Flux thermique perdu par convection par la vitre vers l'extérieur,

λ_v : Conductivité thermique de la vitre, δ_v : Épaisseur de la vitre.

- Bilan de la saumure :
$$\frac{M_e Cp_e}{A_e} \frac{dT_e}{dt} = Q_{c:b_e} - Q_{c:e_v} - Q_{evap} - Q_{r:e.v.i} + P_e \quad (4)$$

$Q_{c:b_e}$: Flux thermique par convection entre le fond du bac et le film d'eau.

- Bilan du bassin inférieur :
$$\frac{M_b Cp_b}{A_b} \frac{dT_b}{dt} = P_b - Q_{c:b_e} - Q_{cd:b_iso.i} \quad (5)$$

Q_{cd} : Flux thermique perdu par conduction du bac.

- Bilan de l'isolant : Pour réduire les pertes de chaleur à travers la base, nous utilisons un isolant thermique. Le côté intérieur du distillateur reçoit la chaleur perdue de l'absorbeur et le côté extérieur cède de la chaleur vers l'extérieur par rayonnement et par convection.

➤ Face intérieure :
$$\frac{M_i Cp_i}{2 \times A_i} \frac{dT_{iso.i}}{dt} = Q_{cd:b_iso.i} - \frac{\lambda_i}{\delta_i} (T_{iso.i} - T_{iso.e}) \quad (6)$$

$Q_{cond.b_i}$: Flux thermique par conduction entre le bac et l'isolant thermique.

➤ Face extérieure :
$$\frac{M_i Cp_i}{2 \times A_i} \frac{dT_{iso.i}}{dt} = \frac{\lambda_i}{\delta_i} (T_{iso.i} - T_{iso.e}) - Q_{r:iso-soll} - Q_{c:iso-a} \quad (7)$$

- Le débit du condensât :
$$\frac{dM_c}{dt} = h_{evap} \frac{T_e - T_v}{L_v} \quad (8)$$

M_c : Masse du condensât, L_v : Chaleur latente de vaporisation, T_e : Température de l'eau et T_v : Température de la vitre.

- Expression des différents coefficients de transfert de chaleur : Les expressions pour les divers termes des équations données ci-dessus sont :

➤ Par rayonnement eau-vitre :
$$Q_{r.e_v} = h_{r.e_v}(T_e - T_{v.i}) \quad (9)$$

$h_{r.e_v}$ est le coefficient de transfert de chaleur par rayonnement entre le film d'eau et la vitre et

est donnée par :
$$h_{r.e_v} = \varepsilon_{eff} \times \sigma \times (T_e^2 - T_{v.i}^2) \times (T_e - T_{v.i}) \quad (10)$$

ε_{eff} est l'émissivité effectif donnée par :
$$\varepsilon_{eff} = \left[\frac{1}{\varepsilon_e} + \frac{1}{\varepsilon_v} - 1 \right]^{-1} \quad (11)$$

σ : Constante de Steffan Boltzmann, ε_e : Émissivité de l'eau et ε_v : Émissivité de la vitre.

➤ Par convection eau-vitre :
$$Q_{c.e_v} = h_{c.e_v}(T_e - T_{v.i}) \quad (12)$$

$h_{c.e_v}$ est le coefficient de transfert de chaleur par convection entre le film d'eau et le vitrage

[6] donné par :
$$h_{c.e_v} = 0.884 \left[T_e - T_{v.i} + \frac{(p_e - p_v)(T_{v.i} + 273.15)}{268.9 \cdot 10^3 - p_e} \right]^{1/3} \quad (13)$$

p_e : Pression de vaporisation en T_e , p_v : Pression de vaporisation à la température $T_{v.i}$.

➤ Par évaporation :
$$Q_{evap} = h_{evap}(p_e - p_{v.i}) \quad (14)$$

h_{evap} est le coefficient de transfert de chaleur par évaporation-condensation entre le film

d'eau et le vitrage [7] donné par :
$$h_{evap} = 16.273 \cdot 10^3 h_{c.e_v} \frac{(p_e - p_{v.i})}{(T_e - T_{v.i})} \quad (15)$$

La pression de la vapeur d'eau est estimée par la relation suivante [8] :

$$P = 133.32 \exp \left(18.6686 - \frac{4030.1824}{T + 273.15} \right) \quad (16)$$

D'autre part, KAMAL [9] propose un polynôme du troisième degré en fonction de la température :

$$P = 0.148 \times T - 0.3652 \times 10^{-2} \times T^2 + 0.11242 \times 10^{-3} \times T^3 \quad (17)$$

➤ Par rayonnement vitre-ambiance :
$$Q_{r.v_ciel} = h_{r.v_ciel}(T_{v.e} - T_{ciel}) \quad (18)$$

$h_{r.v_ciel}$: Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement par la vitre vers l'extérieur.

$$h_{r.v_ciel} = \varepsilon_v \times \sigma \times (T_{v.e}^2 - T_{ciel}^2) \times (T_{v.e} - T_{ciel}) \quad (19)$$

T_{ciel} : Température du ciel donnée par :
$$T_{ciel} = T_a - (6ou12)$$

La température du ciel est donnée par la relation approximative [10]:

$$T_{ciel} = 0.0552(T_a)^{1.5} \quad (20)$$

➤ Par convection vitre-ambiance :
$$Q_{c.v_a} = h_{c.v_a}(T_{v.e} - T_a) \quad (21)$$

$h_{c.v_a}$: Coefficient de transfert de chaleur par convection entre la vitre et l'extérieur.

Le coefficient d'échange par convection entre la face externe de la vitre et l'air est donné par la relation suivante [11]:

$$h_{c.v_a} = 5.7 + 3.8 \cdot V \quad (22)$$

➤ Par convection bassin-eau :
$$Q_{c.b-e} = h_{c.b-e}(T_b - T_e) \quad (23)$$

$h_{c.b-e}$ est le coefficient de transfert de chaleur par convection entre le fond du bac et le film

d'eau donné par :
$$h_{c.b-e} = \frac{Nu \cdot \lambda_f}{L} \quad (24)$$

Dans ce type de problème, les corrélations expérimentales aboutissent à des relations de la forme :

$$Nu = c(Gr Pr)^n \quad (25)$$

Avec Gr est le Nombre de GRASHOF, Pr Nombre de PRANDL, c et n sont des constantes dépendant de la géométrie du système et de la nature de l'écoulement (laminaire ou turbulent).

De plus, on a :

$$Pr = \frac{\mu_e \cdot Cp_e}{\lambda_e} \text{ et } Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot \rho^2 \cdot L^3 \cdot \Delta T}{\mu^2} \quad (26)$$

Avec : β est le coefficient d'expansion volumétrique de l'eau en (K^{-1}), L est la longueur du bac absorbant en (m), ρ est la masse volumique de l'eau en (Kg/m^3), g est l'accélération en (m^2/s) et μ est la viscosité dynamique en ($Kg/m.s$).

- Si $Gr < 10^5 \Rightarrow Nu = 1$ alors l'échange thermique entre la saumure et le bac absorbant se fait uniquement par conduction.

- Si $10^5 < Gr < 2 \times 10^7 \Rightarrow Nu = \frac{\lambda_e}{L} 0.54 \times (Gr Pr)^{0.25}$

- Si $Gr > 2 \times 10^7 \Rightarrow Nu = 0.14 \times (Gr Pr)^{0.33}$

Les pertes thermiques du bassin par conduction thermique à travers l'isolation sont données comme suit :

$$Q_{cd.b_{iso.i}} = K_b \times (T_b - T_{iso.i}) \quad (27)$$

T_b : Température du bac et $T_{iso.i}$: Température de l'isolant,

Avec : $K_b = \frac{\lambda_b}{\delta_b}$ où λ_b : Conductivité thermique du bac et δ_b : Épaisseur du bac.

➤ Par conduction Isolant - bassin :

$$Q_{cd.iso.i_b} = \frac{\lambda_b}{\delta_b} (T_b - T_i) \quad (28)$$

➤ Par conduction à travers l'isolant :

$$K_i = \left(\frac{\delta_{soi}}{\lambda_{iso}} \right) \times (T_{iso.i} - T_{iso.e}) \quad (29)$$

λ_{iso} : Conductivité de l'isolant, δ_{soi} : Épaisseur de l'isolant.

➤ Par convection entre l'isolant et l'extérieur :

$$Q_{c.iso.i_a} = h_{c.iso.i_a} (T_{iso.e} - T_a) \quad (30)$$

$T_{iso.e}$: Coefficient de transfert de chaleur par convection entre l'isolant et l'airextérieur.

➤ Par rayonnement entre l'isolant et le sol :

$$h_{r.e_v} = \varepsilon_{iso} \times \sigma \times (T_{sol}^2 - T_{iso.e}^2) \times (T_{iso.e} - T_{soli}) \quad (31)$$

• Calcul des puissances absorbées par les différents composants du distillateur :

➤ Puissance absorbée par la vitre : Pour un distillateur simple à effet de serre la puissance absorbée et donnée par la relation suivante [12] :

$$P_v = I_D \cdot \alpha_{vD} + I_a \cdot \alpha_{vd} \quad (32)$$

Où α_{vD} et α_{vd} sont les coefficients d'absorption pour respectivement le rayonnement direct et le rayonnement diffus. α_{vD} est calculé comme suit [13] :

$$\alpha_{vD} = 1 - R_D - \tau_D \quad (33)$$

Avec τ_D : Coefficient de transmission global du rayonnement direct, il est calculé par la relation suivante :

$$\tau_D = \rho_r \cdot \alpha_a$$

ρ_r : Coefficient de transmission dû à la réflexion donné par :

$$\rho_r = \frac{(1-R_D)}{(1+R_D)} \quad (34)$$

α_a : Coefficient de transmission dû à l'absorption donné par :

$$\alpha_a = \exp\left(\frac{-K_v \cdot \delta_v}{\cos(\theta)}\right) \quad (35)$$

Où K_v : Coefficient d'extinction du verre [m^{-1}], δ_v : Épaisseur de la vitre [m],

$$R_D: \text{Caractéristique de la réflectivité de la vitre, il est donné par : } R_D = \left(\frac{R_N + R_P}{2} \right) \quad (36)$$

$$\text{Avec } R_N = \left(\frac{\sin^2(\theta-i)}{\sin^2(\theta+i)} \right) \text{ et } R_P = \left(\frac{\text{tg}^2(\theta-i)}{\text{tg}^2(\theta+i)} \right)$$

Tel que θ : Angle de réfraction du rayon au niveau de la vitre. i et θ sont reliés par la relation de **SNELL-DESCARTES** suivante :

$$n_1 \times \sin(i) = n_2 \times \sin(\theta) \quad (37)$$

Où n_1 : indice de réfraction absolue du milieu traversé par le rayon incident,

n_2 : Indice de réfraction absolue du milieu traversé par le rayon réfracté.

Le coefficient d'absorption pour le rayonnement diffus se calcule comme étant celui du rayonnement direct avec un angle d'incidence [14] égal à $i = 60^\circ$: $\alpha_{vd} = 1 - R_d - \tau_d$ (38)

$$\text{➤ Puissance absorbée par la nappe d'eau : } P_e = I_D \cdot \alpha_{eD} + I_d \cdot \alpha_{ed} \quad (39)$$

α_{eD} et α_{ed} sont respectivement les coefficients d'absorption de la saumure pour le rayonnement direct et le rayonnement diffus tel que :

$$\alpha_{eD} = I_D [\alpha_e + \tau_e \cdot \alpha_b] \quad (40)$$

Avec α_e : Coefficient d'absorption de la saumure (constant),

τ_e : Coefficient de transmission de la saumure donné par $\tau_e = \alpha_e - R_e$

R_e : Coefficient de réflexion de la saumure, il se calcule par la relation :

$$R_e = \left(\left(\frac{\sin^2(\theta-i)}{\sin^2(\theta+i)} \right) + \left(\frac{\text{tg}^2(\theta-i)}{\text{tg}^2(\theta+i)} \right) \right) \quad (41)$$

$$\text{Où } \theta \text{ est l'angle de réfraction calculé selon la relation : } \theta = \arcsin \left[\left(\frac{n_1}{n_3} \right) \sin(i) \right] \quad (42)$$

Où n_1 : Indice de réfraction de l'air, n_3 : Indice de réfraction de la saumure,

α_b : Coefficient d'absorption du bac absorbant.

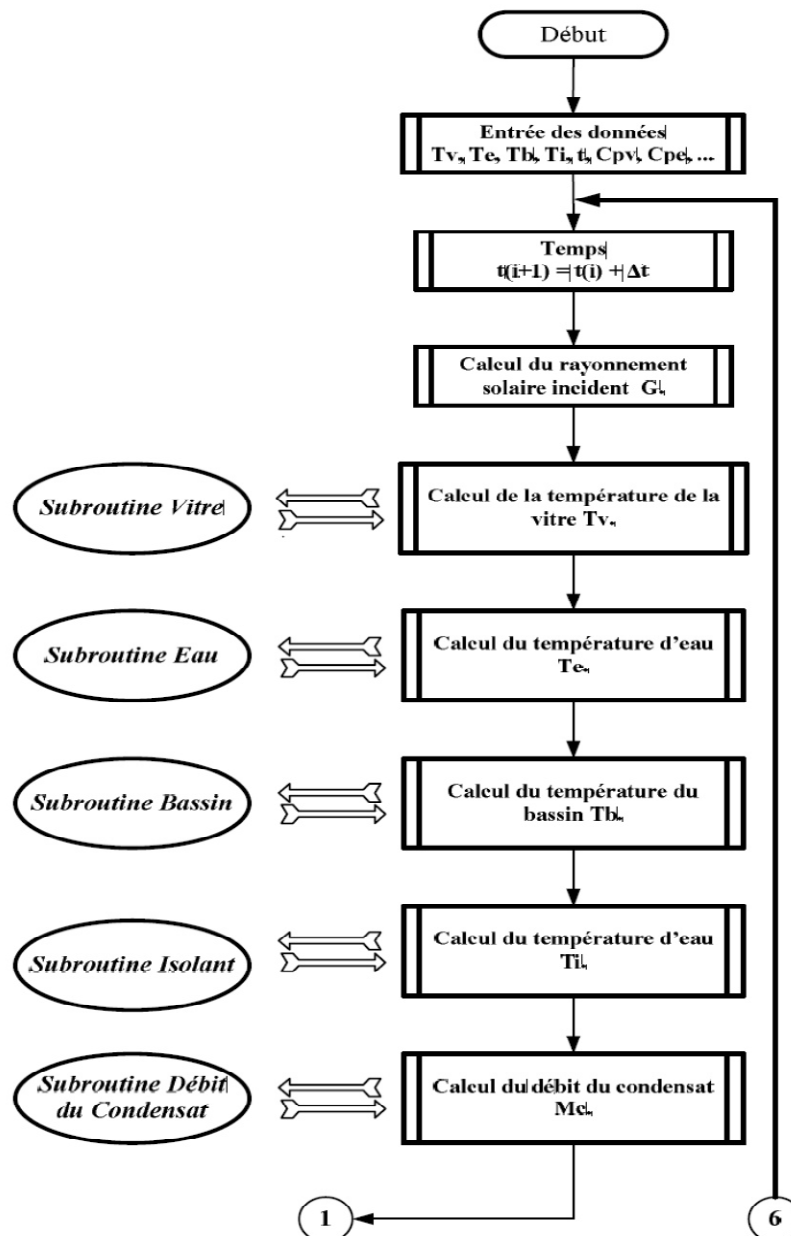
Le coefficient d'absorption pour le rayonnement diffus α_{ed} varie par rapport à α_{eD} .

$$\text{➤ Puissance absorbée par le bac absorbant : Si } \alpha_b \text{ est le coefficient d'absorption du bac absorbant, on déduit la puissance } P_b: \quad P_b = \alpha_b \frac{(I_D \times \tau_D) + (I_d \times \tau_d)}{1 - (1 - \alpha_b) \times R_d} \quad (43)$$

1.1.3 Simulation numérique :

Le programme informatique élaboré est écrit en **Langage Fortran**. Il contient essentiellement un programme principal, sept sous-routines et deux sous-programmes fonctions. L'exécution de ce programme permet de calculer les différents flux de chaleur échangés (convection, rayonnement, évaporation, conduction), la variation des températures des éléments du distillateur, le taux de condensat, l'efficacité globale et interne du distillateur et le facteur de performance. Les sous-programmes fonctions sont réalisés pour calculer l'éclairement solaire en fonction du temps et les sous-routines permettent de calculer la température de la vitre, la température de l'eau, la température du bac absorbant, la température de l'isolant, le taux de condensat, la pression de saturation et l'efficacité globale et interne. Avant le lancement du programme, on donne les données météorologiques, telles que les températures initiales (vitre,

eau, bassin et isolant), l'éclairement solaire, la vitesse du vent, la latitude avec les temps initial et final et les propriétés physiques telles que l'absorptivité, la réflectivité, la transmittivité et l'émissivité de la vitre et de l'eau et du bac absorbant, etc. L'implémentation détaillée est réalisée par un programme qui charge les données météorologiques et physiques. Le programme principal prend les valeurs initiales et appelle la subroutine Rung-Kutta, il calcule les températures des différentes parties du distillateur. Puis, il calcule le flux global incident, les différents flux (convection, rayonnement, évaporation, conduction), les différents coefficients d'échange de chaleur, les pertes de chaleur, la masse du condensat, l'efficacité globale, l'efficacité interne et le facteur de performance à l'aide des sous-routines pour chaque constituant. Par la suite, il détermine les pressions de saturation et le facteur de performance. Nous présenterons ci-dessous, l'organigramme principal correspondant à cette modélisation et ceux des sous-routines de calcul des différents paramètres.



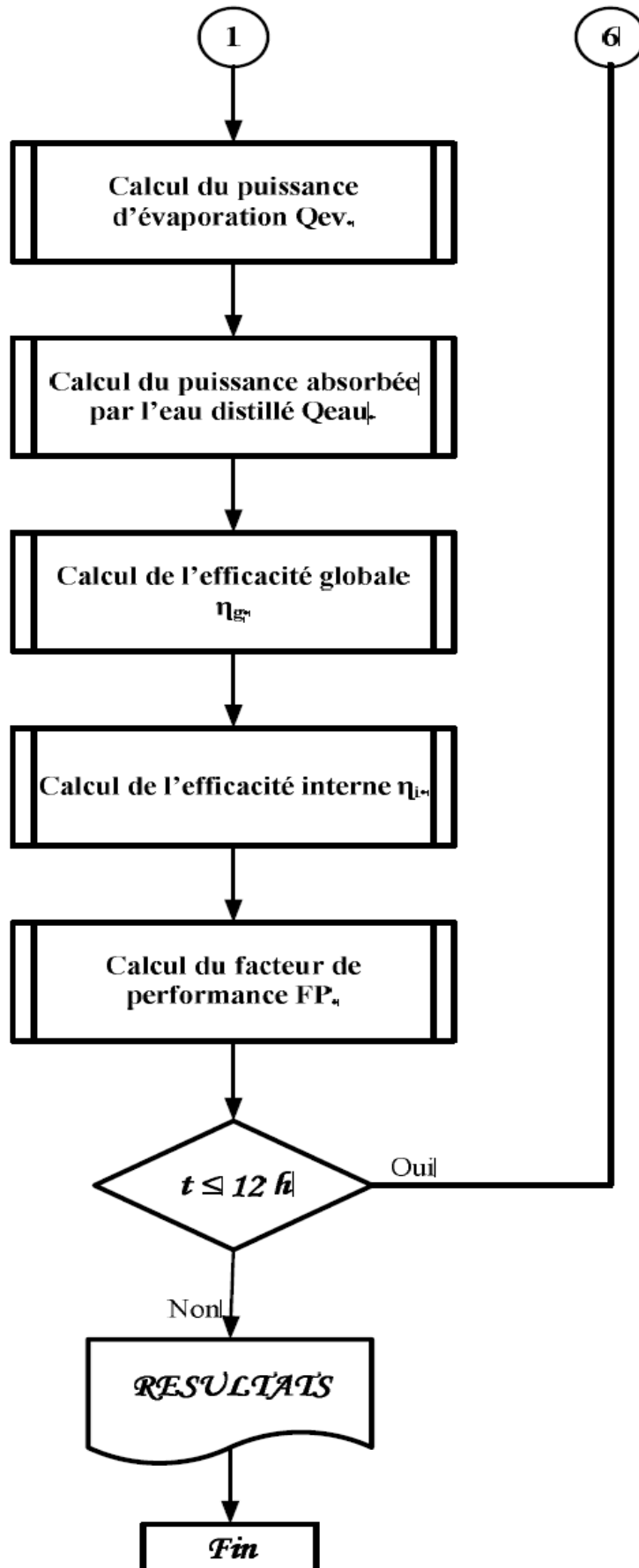
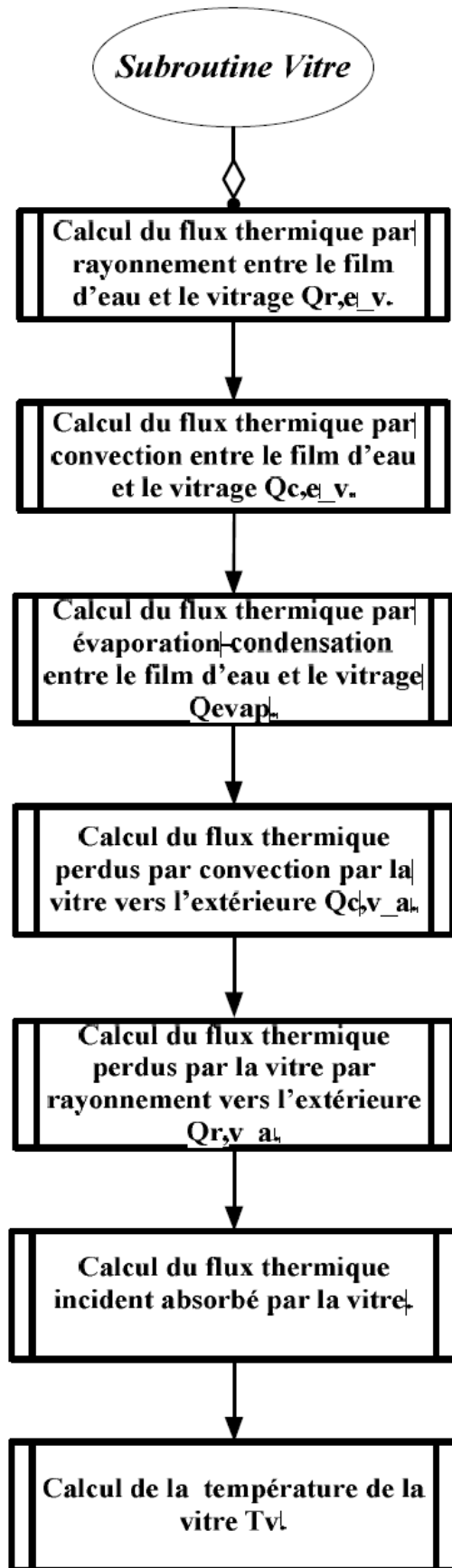
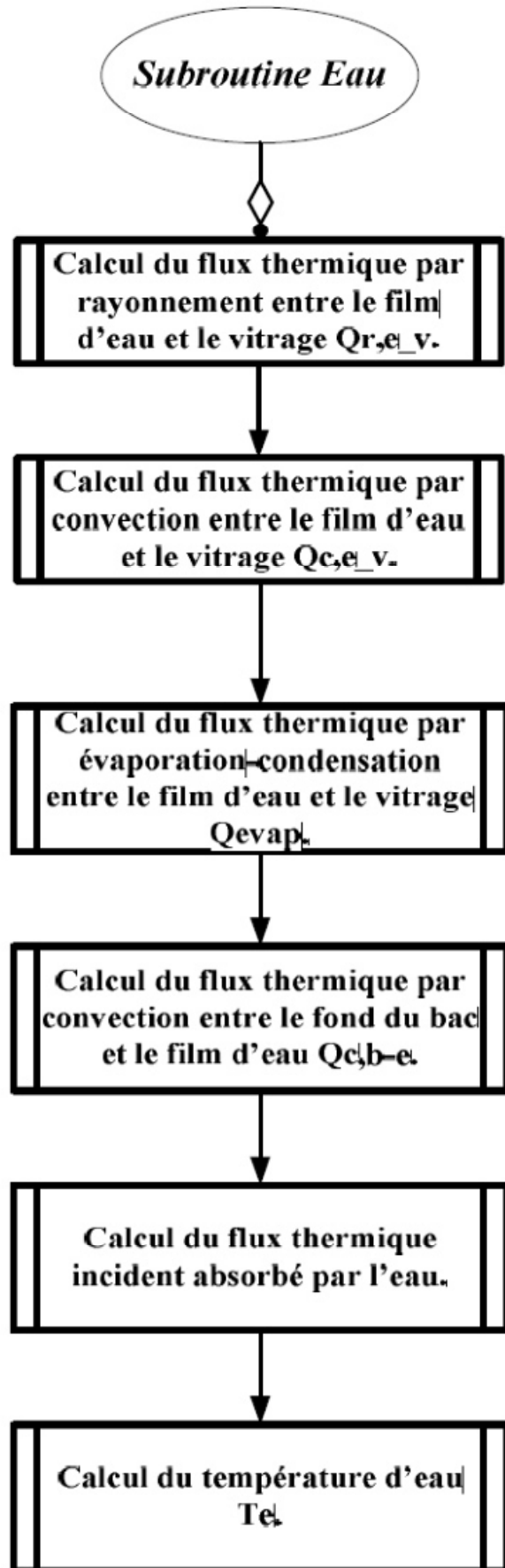


Figure 2 : Organigramme principale



Subroutine vitre



Subroutine eau

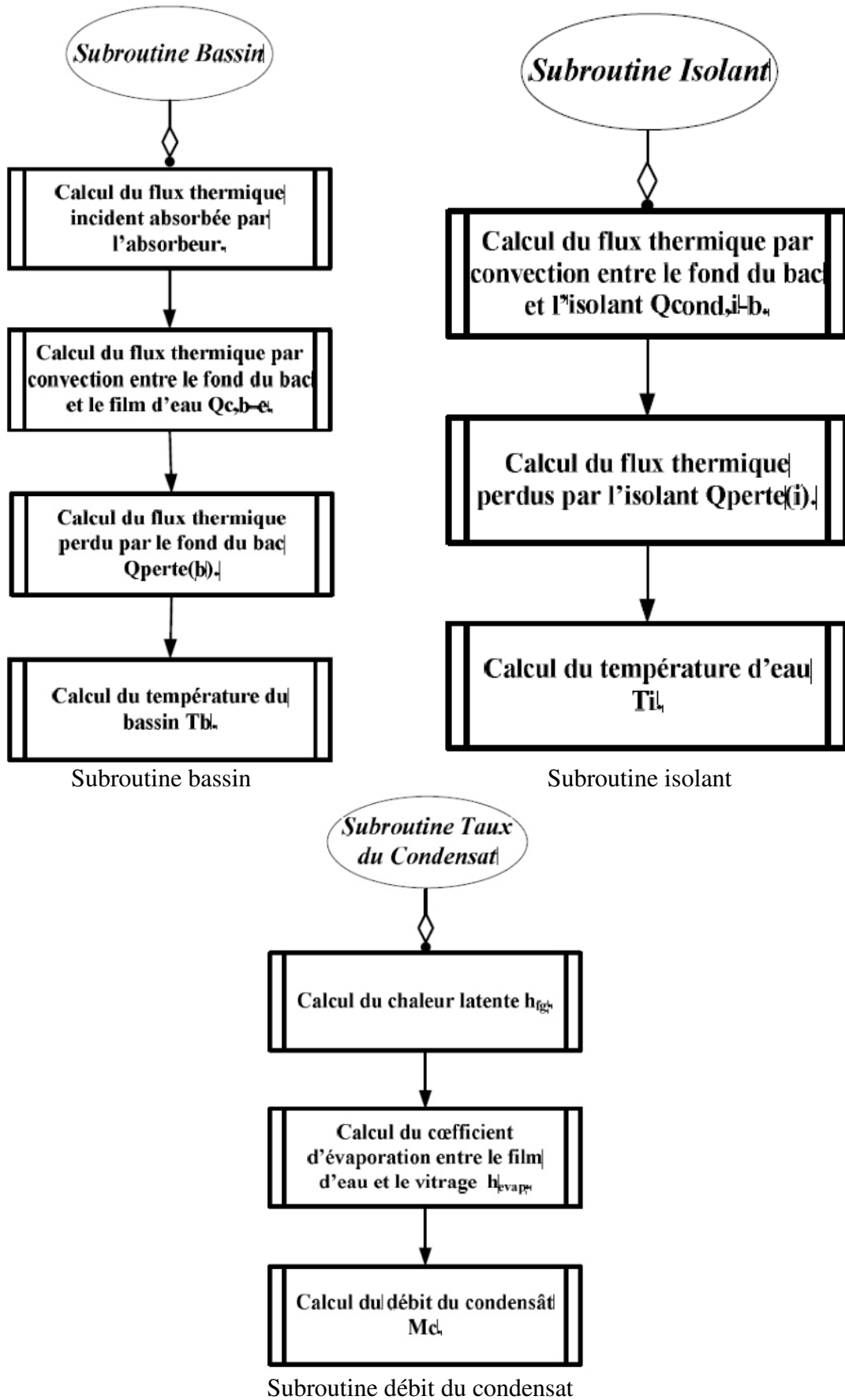


Figure 3 : Organigramme des sous-routines

Nous présenterons les résultats de cette simulation numérique dans le chapitre 4.

1.2 Capteur solaire :

Un capteur solaire est défini comme tout système recevant l'énergie solaire et la transformant en une énergie utile. Il est essentiellement constitué d'une surface absorbante exposée au rayonnement solaire, qui échange avec un fluide caloporteur, les calories produites par absorption du rayonnement incident, et émet en s'échauffant un rayonnement thermique de plus grande longueur d'onde. Il s'établit alors un équilibre thermique entre l'absorbeur et le milieu ambiant. On capte ainsi peu d'énergie. Pour réduire les pertes par la face arrière du capteur, l'absorbeur est placé à l'intérieur d'un coffre dont les parois internes sont recouvertes d'un isolant thermique (laine de verre ou mousse synthétique, par exemple). L'isolation thermique de la face avant est réalisée en interposant entre l'absorbeur et l'air, un matériau opaque au rayonnement thermique, mais transparent au rayonnement solaire. Les verres et certains matériaux synthétiques sont transparents pour le rayonnement solaire, et opaque pour le rayonnement infrarouge lointain. Ils sont donc utilisés en tant que couvertures transparentes des capteurs solaires. Dans un capteur équipé d'une couverture transparente, le rayonnement thermique émis par l'absorbeur est absorbé par la couverture transparente qui s'échauffe et rayonne à son tour par les deux faces. Une certaine quantité du rayonnement se disperse dans le milieu extérieur et l'autre est réémise vers l'absorbeur qui est à l'origine de l'effet de serre. Les couvertures ont également pour rôle de limiter les pertes par convection, étant donné que les échanges thermiques entre deux plaques séparées par une lame d'air immobile, se font essentiellement par conduction et qu'il est connu que l'air immobile est un bon isolant thermique. Cet effet d'isolation croît avec l'épaisseur de la lame d'air séparant les deux surfaces, tant que le phénomène de transfert reste conductif (2 à 3 cm d'épaisseur). Au-delà, les effets de la convection naturelle viennent contrarier l'effet recherché. Une autre méthode pour réduire les pertes du capteur est la réalisation, sur la surface de l'absorbeur, d'un revêtement sélectif, présentant un coefficient d'absorption le plus élevé possible pour les longueurs d'onde du spectre solaire (inférieures à 2,5 μm) tout en ayant la plus faible émissivité possible dans le domaine de l'infrarouge correspondant au rayonnement de l'absorbeur (longueurs d'onde supérieures à 2,5 μm). De tels revêtements sélectifs sont réalisés par dépôt chimique ou par traitement électrochimique de la surface absorbante.

1.2.1 Paramètres et caractéristiques de fonctionnement des capteurs solaires :

On peut les classer en deux catégories : paramètres externes et paramètres internes :

- Les paramètres externes : Il y a le paramètre d'ensoleillement (éclairage énergétique dû au rayonnement global, position du soleil, durée d'insolation), la température extérieure sèche, la vitesse du vent sur le capteur.

- Les paramètres internes : Comme paramètres internes, il y a :

➤ *Paramètres géométriques* : Ils se spécifient par le paramètre de position (inclinaison, orientation du capteur), la superficie du capteur qui représente un paramètre important, la dimension des différentes parties du capteur (épaisseur, longueur et largeur).

➤ *Paramètres de fonctionnement* : C'est la température d'entrée du fluide dans le capteur, le débit du fluide caloporteur, la température des différentes parties du capteur.

Ces caractéristiques sont très importantes car elles permettent, en tenant compte du coût, d'effectuer un choix parmi les différents types de capteur, dont entre autres : la température de sortie du fluide et la puissance thermique utile du capteur.

1.2.2 Paramètres de performance des capteurs solaires :

L'énergie utile Q_c délivrer par un capteur solaire plan de surface A (en négligeant les effets transitoires) est donnée par [15] :

$$Q_c = A_c \cdot F' \cdot [G \cdot \eta_0 - U_m \cdot (T_{cm} - T_a)] \quad (44)$$

U_m : Coefficient globale de perte de chaleur du capteur [$W/m^2\text{°C}$], T_{cm} : Température moyenne du fluide dans le capteur [°C], T_a : Température ambiante [°C], G : Intensité des radiations solaire dans le plan du capteur [W/m^2], F' : Facteur d'efficacité du capteur, η_0 : Efficacité optique donné par la relation suivante : $\eta_0 = \tau \cdot \alpha$.

Cependant, la température T_{cm} n'est pas connue alors l'équation précédente est remplacée par l'équation [16] :

$$Q_c = A_c \cdot F_R \cdot [G \cdot \eta_0 - U_m \cdot (T_{fe} - T_a)] \quad (45)$$

T_{fe} : Température d'entrée du fluide dans le capteur [°C]

F_R : Facteur caractérisant les pertes thermiques du capteur, il représente le rapport du transfert actuel de chaleur au maximum du transfert possible, c'est la mesure des performances du capteur comme un échangeur de chaleur F_R est lié à F' par la relation suivante [16] :

$$\frac{F_R}{F'} = \frac{(m \cdot C_p)_c}{A_c \cdot U_m \cdot F'} \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-A_c \cdot U_m \cdot F'}{(m \cdot C_p)_c}\right) \right] \quad (46)$$

m_c : Débit de fluide passant à travers le capteur [kg/s]

C_p : Coefficient spécifique de transfert de chaleur du fluide [$W/m^2\text{°C}$]

L'avantage d'utilisé l'équation HWB (Équation 45) par rapport à l'équation (Équation 44) est que la température d'entrée du fluide (T_{fe}) est généralement connu ou spécifiée au contraire de (T_{cm}). La spécification de $F_R \cdot \eta_0$ et $F_R \cdot U_m$ permet d'estimée Q_c avec les variations des conditions climatiques. L'énergie globale captée par le fluide passant à travers le capteur est [17] :

$$Q_c = m \cdot C_p \cdot (T_{c0} - T_{fe}) \quad (47)$$

A partir de laquelle la température de sortie du fluide T_{c0} peut être calculée.

Les paramètres de performances des capteurs plans $F_R \cdot \eta_0$ et $F_R \cdot U_m$ peuvent être calculés théoriquement à partir de l'analyse de base du transfert de chaleur, du fait que leur configuration géométrique est simple, ce pendant avec l'étendu sophistication de technologie de fabrication, il est préférable de déterminer ces paramètres expérimentalement par des essais. En effet, même pour les capteurs de simple configuration, les essais expérimentaux sont essentiels du fait de l'écart entre les résultats théorique et pratique qui peuvent avoir lieu. La procédure la plus utilisée est les essais en état stationnaire, ou des mesures sont effectuées à partir du débit, température d'entrée du fluide dans le capteur, température ambiante de l'air et des radiations incidentes dans le plan du capteur. L'efficacité instantanée du capteur sous radiations solaires normales est [17] :

$$\eta_c = \frac{Q_c}{A_c \cdot G} \quad (48)$$

$$\eta_c = \frac{m \cdot C_p \cdot (T_{c0} - T_{fe})}{A_c \cdot G} \quad (49)$$

$$\eta_c = F_R \cdot \eta_n - F_R \cdot U_m \frac{(T_{fe} - T_a)}{G} \quad (50)$$

A partir des données des essais, les valeurs de η_c en fonction du terme température $\frac{(T_{fe} - T_a)}{G}$ sont calculées puis une courbe est établie de ces données de laquelle les valeurs de $F_R \cdot \eta_n$ et $F_R \cdot U_m$ peuvent être déduites [18]. Le rendement est maximum au point A. L'intersection de la courbe d'efficacité avec l'axe des Y donne $\eta_0 = F_R \cdot \eta_n = A$, et l'intersection de la courbe d'efficacité avec l'axe des X donne la valeur B qui permet d'estimer $F_R \cdot U_m = \frac{A}{B}$. Le rendement décroît linéairement suivant AB, lorsque le quotient $\frac{(T_{fe} - T_a)}{G}$ croit.

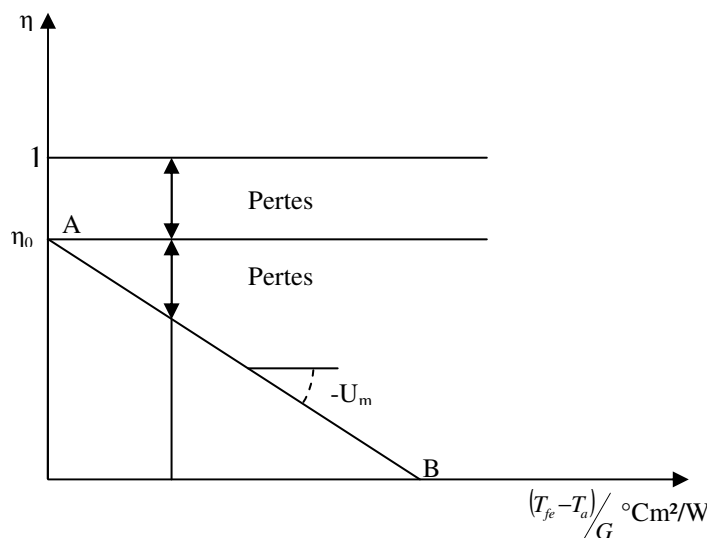


Figure 4 : Caractéristiques et fonctionnement des capteurs solaires plans

Cette décroissance est d'autant plus accentuée que U_m est grand, U_m est de nature thermique est fonction des matériaux utilisés, de leur dispositions et du dimensionnement en d'autre terme du plan d'exécution du capteur. Pour un capteur donné ($F_R \cdot \eta_n$ et $F_R \cdot U_m$ connus) le rendement est d'autant plus grand que $\Delta T = (T_{fe} - T_a)$ est petit et G est grand.

1.2.3 Transfert thermique dans les capteurs solaires :

Les capteurs solaires ont un bilan énergétique qui fait intervenir des pertes par rayonnement, convection et conduction. La connaissance de ces phénomènes est donc nécessaire pour établir, prévoir ou améliorer le bilan thermique. Les applications de mise en forme et l'amélioration des qualités d'un capteur solaire, nécessitent la prédiction des pertes thermiques au sein de ce dernier ; la détermination des pertes tient compte à son tour des différents échanges thermiques existants (**Figure 5**).

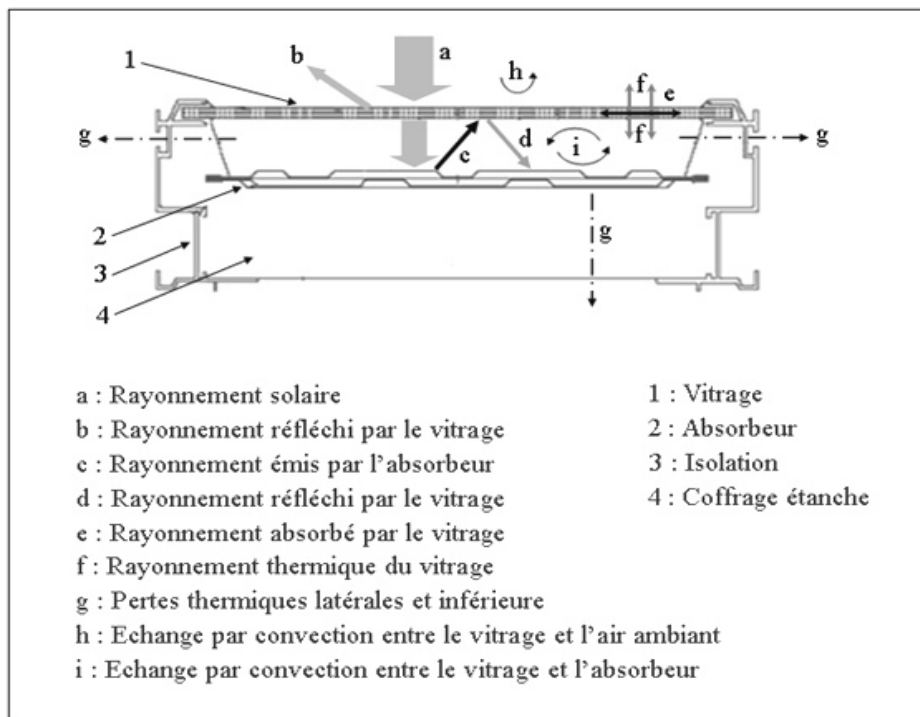


Figure 5 : Les différents échanges thermiques dans un capteur solaire

Les ouvrages généraux sur les capteurs solaires proposent des bilans énergétiques, sans préciser la nature de leur étude (expérimentation, simulation numérique ou étude théorique). De plus, ces références précisent rarement les caractéristiques du système étudié (sélectivité de l'absorbeur, épaisseur d'isolant, couverture, ...). C'est pourquoi, ces résultats sont à prendre avec précaution et surtout à titre indicatif. Ainsi, on peut citer le travail de Cardonnel [19], qui propose un bilan (**figure 6**) sans préciser les hypothèses d'obtention de ces valeurs.

Les auteurs s'accordent à dire que les pertes latérales et arrières restent négligeables devant les pertes thermiques face avant du capteur qui demeurent les plus importantes ; on appelle face avant, la partie du capteur orientée vers le ciel entre l'absorbeur et l'extérieur.

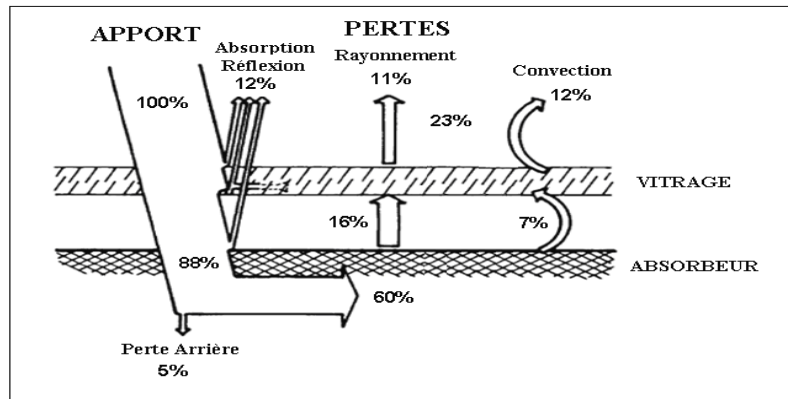


Figure 6 : Bilan thermique d'un capteur solaire plan vitré [19]

➤ *Pertes thermiques vers l'avant du capteur* : Ces pertes peuvent être scindées en deux parties, les pertes entre la vitre et l'extérieur et les pertes entre l'absorbeur et la vitre.

- Pertes entre la vitre et l'extérieur : La vitre est soumise à un échange convectif avec l'air ambiant d'une part et un échange radiatif avec la voûte céleste d'autre part.

Pertes convectives : Aux échanges par convection naturelle, on peut ajouter des échanges par convection forcée, pour la prise en compte du vent dans le cas du transfert convectif externe. Les corrélations utilisées pour quantifier les échanges par convection forcée sont très nombreuses et un aperçu sur certaines de ces corrélations est donné dans le **tableau 3.1**.

Tableau 3.1 : Différentes corrélations sur les échanges par convection forcée

Auteurs	Equation	Validité
Incorpera [21] Convection forcée	$Nu_L = 0,66 \cdot Re_L^{1/2} Pr^{1/3}$	Régime laminaire
Incorpera [21] Convection naturelle	$Nu_L = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra_L^{1/6}}{\left[1 + \left(0,492 / Pr \right)^{9/16} \right]^{4/9}} \right\}^2$	Pour tous les régimes
Incorpera [21] Convection mixte	$Nu_L = \sqrt[3]{Nu_{forced}^3 + Nu_{natural}^3}$	
Onur[28]	$Nu_L = 0,568 \cdot Re^{0,524}$	Inclinaison 30° du toit
Sparrow [24-25]	$h_w = \frac{0,86 \cdot \rho \cdot C_p \cdot W}{Pr^{2/3} \cdot Re^{1/2}}$	$2 \cdot 10^4 < Re < 9 \cdot 10^4$ $4.5 < w < 24 \text{ m/s}$
McAdams[22]	$h_w = 5,7 + 3,8 \cdot W$ $h_w = 6,47 \cdot W^{0,78}$	$W < 5 \text{ m/s}$ $W > 5 \text{ m/s}$
Watmuff[23]	$h_w = 2,3 + 3 \cdot W$ $h_w = 2,8 + 3 \cdot W$	$0 < W < 7 \text{ m/s}$ $W \leq 5 \text{ m/s}$
Kumar[26]	$h_w = 10,03 + 4,687 \cdot W$	$0 < w < 4 \text{ m/s}$
Sharples[27]	$h_w = 8,3 + 2,2 \cdot W$ Direction du vent $h_w = 6,5 + 3,3 \cdot W$ ($i=0^\circ$ et $i=90^\circ$)	$0.8 < w < 6.5 \text{ m/s}$
Test [29-30]	$h_w = 8,55 + 2,56 \cdot W$	

La corrélation qui a été largement utilisée dans les capteurs solaires est celle suggérée par Jurges pour une surface verticale de 0,5 x 0,5 m² et référencée par Macadams [22] et Duffie & Beckman [20]. Elle est de la forme :

$$h_{v1-a} = 5,7 + 3,8 \cdot W \quad (51)$$

Où W est la vitesse du vent.

Selon Duffie [20] l'équation (51) n'est pas adaptée pour de longueurs de plaque supérieures à 0,5 m malgré cela elle est souvent appliquée à des capteurs solaires plans de plus de 0,5 m, en raison de l'absence d'une équation fiable.

Watmuff et al. [23] ont suggéré que probablement dans cette relation (51) l'effet du rayonnement est inclus, pour cette raison ils ont proposé l'expression suivante, qui a également été utilisée pour les capteurs solaires :

$$h_{v1-a} = 2,8 + 3 \cdot W \quad (52)$$

Dans les conditions réelles, la vitesse instantanée ainsi que la direction de l'air varient rapidement, ces corrélations sont alors fortement imprécises mais faute de mieux, elles restent très utilisées.

Pertes radiatives : La densité de flux de chaleur échangée par rayonnement entre le vitrage et l'air ambiant est donnée par l'équation :

$$Q_{rad(v1-c)} = \varepsilon_v \cdot \sigma \cdot (T_v^4 - T_c^4) \quad (53)$$

Où ε_v est l'émissivité de la vitre, σ est la constante de Stéphan-Boltzmann, T_v est la température de la vitre et T_c la température du ciel.

En linéarisant les températures, la densité de flux peut s'écrire :

$$Q_{rad(v1-c)} = h_{rve} \cdot (T_v - T_{amb}) \quad (54)$$

$$\text{Où} \quad h_{rve} = \varepsilon_v \cdot \sigma \cdot (T_{ciel} + T_v) \cdot (T_{ciel}^2 + T_v^2) \cdot \frac{(T_v - T_{ciel})}{(T_v - T_{amb})} \quad (55)$$

La température du ciel qui correspond à la température de la voûte céleste est donnée en fonction de la température ambiante T_a . Plusieurs corrélations permettent de l'évaluer, la plus utilisée est celle donnée par Swinbank [32] telle que : $T_c = 0,0522 (T_{amb})^{1,5}$. Ensuite, ces mêmes auteurs [21-32] ont fait une mise à jour de l'expression de la température du ciel.

D'autres corrélations sont obtenues pour différentes conditions, dans les cas, d'un ciel nuageux, un ciel clair, etc. EN [31] et Swinbank [32] utilisent la température ambiante (T_a) pour calculer la température du ciel, Bliss [33] et Berdahl et al. [34] utilisent la température de rosée (T_{dp}), Brunt [35] et Aubinet [36] utilisent la pression de la vapeur d'eau (P_d) et l'indice de limpidité du ciel ($K_0 = G/G_0$: rapport entre l'irradiation solaire horizontale globale G et l'irradiation solaire incidente G_0). Toutes ces corrélations sont résumées dans le **tableau 3.2**.

Tableau 3.2 : Différentes corrélations sur les échanges radiatifs

Auteurs	Equation	Validité
EN 6946[31]	$T_c = T_{amb}$	Ciel nuageux
Swinbak[32][20]	$T_c = 0,0522 \cdot (T_{amb})^{1,5}$ $T_c = 0,037536 \cdot (T_{amb})^{1,5} + 0,32 \cdot T_a$	Ciel clair
Bliss[33]	$T_c = T_{amb} \cdot (0,8004 + 0,00396 \cdot T_{dp})^{1/4}$	
Berdahl et al. [34]	$T_c = T_{amb} \cdot (0,711 + 0,0056 \cdot T_{dp} + 0,0000737 \cdot T_{dp}^2)^{1/4}$	Ciel clair
Aubinet[36]	$T_c = 94 + 12,6 \cdot \ln(p_d) - 13 \cdot K_0 + 0,341 \cdot T_{amb}$	

T_{dp} est calculée en utilisant l'équation de Berger [37] :

$$T_{dp} = \frac{5179,25}{20,519 - \ln\left(\frac{760 \cdot p_d}{101325}\right)} \quad (56)$$

p_d est donnée par humidité relative produite à air ambiant et la pression saturée de la vapeur

d'eau (p_d'') à température ambiante T_{amb} [36] :

$$T_{dp} = \frac{5179,25}{20,519 - \ln\left(\frac{760 \cdot p_d}{101325}\right)} \quad (57)$$

- Pertes entre l'absorbeur et la vitre :

Pertes convectives : Avant de décrire le transfert thermique dans le capteur, on va d'abord donner un petit aperçu sur la convection dans les cavités confinées inclinées. Dans les cavités fermées inclinées, le mouvement de la couche fluide apparaît dès qu'il y a présence d'un gradient de température à l'intérieur. Un mouvement de base unicellulaire et bidimensionnel caractérisé par un courant ascendant le long de la paroi inférieure, chaude, et descendant le long de la paroi supérieure, froide, prend forme. Dans la zone centrale, le transfert se fait essentiellement par conduction, le phénomène de la convection n'affecte que les extrémités de la cellule. A ce régime et avec l'augmentation du nombre de Rayleigh des rouleaux longitudinaux se forment et instaurent un régime à caractère tridimensionnel. Lorsqu'on continue d'accroître le nombre de Rayleigh, il peut apparaître dans la couche fluide des phénomènes instationnaires qui précèdent le passage à la turbulence.

Calcul du transfert convectif : Le calcul du coefficient d'échange par convection naturelle, h_{cV} , a fait l'objet de nombreuses études expérimentales. Celles-ci ont établi des expressions valables sous certaines hypothèses. Parmi ces corrélations, celle de Hollands et al. [38] est largement utilisée. Elle traite la convection naturelle pour une lame d'air dans une cavité inclinée, chauffée par le bas. Cette corrélation est valable pour $1708 \leq Ra \cdot \cos \alpha \leq 5 \cdot 10^4$ et $15^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$ (α est l'inclinaison de la cavité) :

$$\overline{Nu} = 1 + 1,44 \cdot \left[1 - \frac{1708 \cdot (\sin 1,8\alpha)^{1,6}}{Ra \cdot \cos \alpha} \right] \cdot \left[1 - \frac{1708}{Ra \cdot \cos \alpha} \right] \cdot \left[\left(\frac{Ra \cdot \cos \alpha}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right] \quad (58)$$

Pertes radiatives : La densité de flux de chaleur échangé par rayonnement entre l'absorbeur

et le vitrage s'écrit :

$$Q_{rad(av-2)} = h_{rad(av-2)} \cdot (T_{abs} - T_{V2}) = S \cdot \sigma \cdot \frac{(T_{abs}^4 - T_{V2}^4)}{\frac{1}{\epsilon_{abs}} + \frac{1}{\epsilon_{V2}} - 1} \quad (59)$$

Avec :

$$h_{rad(av-2)} = \frac{\sigma \cdot (T_{abs} + T_{V2}) \cdot (T_{abs}^2 + T_{V2}^2)}{\frac{1}{\epsilon_{abs}} + \frac{1}{\epsilon_{V2}} - 1} \quad (60)$$

Le coefficient globale des pertes avant U_{av} sera alors donné par :

$$U_{av} = \frac{1}{\frac{1}{h_{cVe} + h_{rVe}} + \frac{1}{h_{cav} + h_{rav}}} \quad (61)$$

- Pertes thermiques vers l'arrière du capteur : Les pertes arrière sont peu importantes devant les pertes avant. En effet, le capteur étant généralement bien isolé à l'arrière. L'expression permettant d'évaluer le coefficient d'échange est donnée par :

$$U_{arr} = \frac{K_{is}}{E_{is}} \quad (62)$$

Où : K_{is} est la conductivité thermique de l'isolant et E_{is} est son épaisseur.

A ces pertes peuvent se rajouter les pertes thermiques latérales mais qui restent relativement faibles à celles des pertes arrières car la surface latérale est peu importante :

$$U_{lat} = \frac{K_{is} \cdot A_{lat}}{E_{is} \cdot A_c} \quad (63)$$

Où : U_{lat} est la surface des parois latérales et A_c est la surface du capteur.

Le coefficient des pertes thermiques globales vers l'extérieur U_t est la somme des trois coefficients déterminés ci-dessus :

$$U_t = U_{lat} + U_{arr} + U_{av} \quad (64)$$

Bilan thermique d'un capteur solaire : Le bilan thermique en régime stationnaire d'un capteur solaire exprime que la puissance absorbée ($\tau \alpha G$) se répartit entre la puissance utile P_u et les pertes thermiques P_p , ainsi on peut écrire :

$$\tau \alpha G = P_u + P_p \quad (65)$$

Avec τ le facteur de transmission du vitrage et α le facteur d'absorption de l'absorbeur.

Si l'on considère que le capteur est à une température T_c et que l'environnement est à une température T_a , alors P_p sera donnée par :

$$P_p = U_t \cdot (T_c - T_a) \quad (66)$$

Si le fluide caloporteur rentre dans le capteur avec un débit massique \dot{m} à une température T_e et sort à une température T_s , la puissance utile P_u est :

$$P_u = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_s - T_e) \quad (67)$$

Où C_p est la chaleur spécifique du fluide caloporteur.

Le rendement du capteur η est défini comme étant le rapport entre la puissance utile et la puissance incidente, soit :

$$\eta = \frac{P_u}{S \cdot G} \quad (68)$$

Bien entendu, en régime transitoire il faut rajouter dans le bilan la puissance stockée pour amener la température du capteur au régime permanent.

1.2.4 Modélisation mathématique :

Dans cette étude on s'intéresse à la partie avant d'un capteur plan, la chaleur provient des rayons solaires qui passent à travers la vitre du système et sont absorbés par la face interne de la paroi placée sur la face opposée (l'absorbeur). La géométrie spatiale considérée est illustrée sur la **figure 7**. Il s'agit d'une cavité parallélépipédique constituée de l'absorbeur (face inférieure), d'une couverture en verre (face supérieure) et des parois latérales isolantes, inclinée d'un angle $\alpha = 45^\circ$, d'épaisseur e , de longueur L et de largeur l . La longueur L est fixée à 1 m, la largeur prend les valeurs 0,2 m et 0,1m et l'épaisseur de la lame d'air qui prend des valeurs égales à $H = 1 - 0,7 - 0,6 - 0,5$ cm. L'épaisseur du verre étant $e_v = 4$ mm. La face inférieure est soumise à un flux de chaleur constant. Ce flux de chaleur simule l'énergieréçue par le rayonnement solaire sur une face d'épaisseur négligeable.

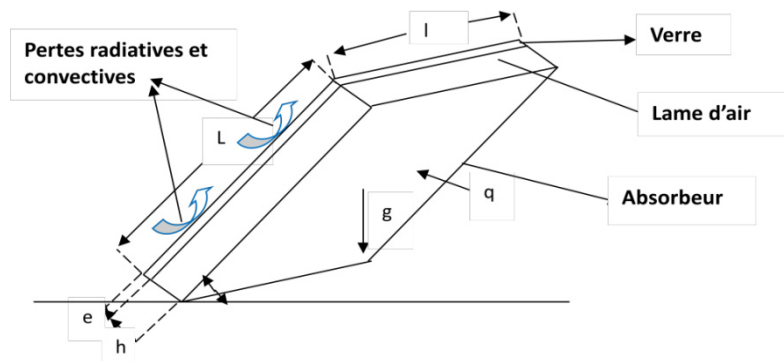


Figure 7 : Configuration géométrique du modèle 3D domaine d'étude

➤ Equations gouvernantes : La convection naturelle est régie par trois équations : l'équation de conservation de la masse, l'équation de conservation de la quantité de mouvement et l'équation de conservation de l'énergie. Ces équations s'écrivent comme suit :

- L'équation de continuité :
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \rho \vec{u} = 0 \quad (69)$$

- Les équations de la quantité de mouvement :
$$\rho \cdot \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \rho \vec{u} \vec{u} = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot \vec{\tau} + \rho \vec{g} \quad (70)$$

$\vec{\tau}$: Tenseur des contraintes de viscosité du fluide défini par :
$$\vec{\tau} = 2\mu \vec{D} - \nu_v \vec{\nabla} \vec{u} I_d \quad (71)$$

Où I_d est le tenseur identité, μ est la viscosité dynamique du fluide et ν_v est la viscosité de volume, généralement négligeable (la viscosité de volume ne peut avoir d'effet pour les écoulements incompressibles).

\vec{D} est le tenseur des taux de déformation, défini par :
$$\vec{D} = \frac{1}{2} \cdot \left(\vec{\nabla} \vec{u} + \vec{\nabla}^t \vec{u} \right).$$

- L'équation d'énergie :
$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \rho U \vec{u} = -\vec{\nabla} \cdot \vec{q} + \overline{\overline{\tau}} : \vec{\nabla} \vec{u} - p \vec{\nabla} \cdot \vec{u} \quad (72)$$

U : Energie interne massique [J /kg], u : vitesse du fluide [m/s]

$-\vec{\nabla} \cdot \vec{q}$: Densité du flux de chaleur fourni au système

$-p \vec{\nabla} \cdot \vec{u}$: Puissance des forces de viscosité

$\overline{\overline{\tau}} : \vec{\nabla} \vec{u}$: Puissance des forces de viscosité

► Equations de transfert et hypothèses simplificatrices : Pour une formulation simple du problème, nous avons considéré l'approximation de Boussinesq. Elle suppose que le fluide est incompressible mais il conserve bien entendu le terme de poussée d'Archimède « le moteur de la convection » directement lié à la dilatation ou à la contraction thermique du fluide. On suppose donc que la variation de la densité n'est prise en compte que dans le terme généralisé de la convection naturelle soit le terme $\rho \vec{g}$ de l'équation de Navier Stokes du fluide. Ainsi, $\rho = \rho_0$ sauf pour : $\rho \vec{g} = \rho_0 \cdot [1 - \beta \cdot (T - T_0)] \cdot \vec{g}$. La masse volumique varie linéairement avec la température et ceci reste valable tant que $(T - T_0) \ll T_0$.

Sachant que : $\beta = -\frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$ est le coefficient de dilatation à pression constante.

ρ_0 : La masse volumique à la température de référence T_0

- On suppose que le fluide est newtonien de viscosité constante et incompressible.

$$\overline{\overline{\tau}} = \rho \mu \left(\overline{\overline{\nabla} \vec{u}} + \overline{\overline{\nabla}^t \vec{u}} \right) \quad (73)$$

- On néglige l'apport de l'énergie interne dû à la dissipation visqueuse.

$$\overline{\overline{\tau}} : \vec{\nabla} \vec{u} \ll \left| \overline{\overline{\nabla} \vec{q}} \right| \quad (74)$$

- En écoulement incompressible on a : $dU = C_p dT$ où C_p est la capacité thermique massique à pression constante [J.kg⁻¹.K⁻¹].

- On suppose que la conductivité thermique est constante : $\vec{q} = -k_f \cdot \vec{\nabla} T$

En appliquant ces approximations, les équations (69), (70) et (72) deviennent respectivement :

- Equation de continuité :
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0 \quad (75)$$

- Equation de mouvement :
$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{u} \vec{u} = -\frac{1}{\rho_0} \vec{\nabla} p - \beta (T - T_0) \vec{g} + \nu \cdot \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) \quad (76)$$

- Equation d'énergie :
$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot T \vec{u} = a \nabla^2 T \quad (77)$$

Où : ν est la viscosité cinématique du fluide à la température T_0 : $\nu = \frac{\mu}{\rho_0}$ [m²/s]

a est la diffusivité thermique du fluide : $a = \frac{k_f}{\rho \cdot C_p}$ [m²/s]

En se plaçant dans le cadre de ces hypothèses et vu que l'écoulement est instationnaire et tridimensionnel, les équations représentatives du problème étudié s'écrivent :

- Equation de continuité :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (78)$$

- Equation de la quantité de mouvement suivant X :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} - \beta \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot (T - T_0) + \nu_0 \cdot \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (79)$$

- Equation de la quantité de mouvement suivant Y :

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} - \beta \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot (T - T_0) + \nu_0 \cdot \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (80)$$

- Equation de la quantité de mouvement suivant Z :

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu_0 \cdot \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (81)$$

1.2.5 Méthode numérique de résolution :

Cette partie est consacrée principalement aux différentes étapes numériques pour la résolution de l'écoulement dans une cavité parallélépipédique fermée, inclinée (**figure 7**) : le maillage, la méthode de résolution, le choix des conditions aux limites, le post-traitement des résultats. Le développement des techniques numériques a servi à mettre au point des codes traitant tous les problèmes de mécanique des fluides, notamment : le transfert de chaleur, la turbulence, le transfert de masse, les écoulements multiphasiques ...

Dans la présente étude, le calcul est mené à l'aide d'un code de calcul du logiciel COMSOL Multiphysics3.5 qui utilise la méthode des volumes finis, nécessitant un maillage conçu par le logiciel « COMSOL Script » où l'on décrit la géométrie et le maillage du problème à traiter ainsi que le type des conditions aux limites. Il permet de mailler en utilisant des éléments de type (tétraèdre, hexaèdre ..., ou mixte). Il permet aussi de définir le type des différentes frontières du système ainsi que la nature du (des) domaine(s) décrit(s) globalement (solide ou fluide). Dans notre étude les quatre frontières sont considérées comme des parois indépendantes, donc on les nomme et on leur donne un type. COMSOL est écrit en langage C++ et globalement la démarche numérique utilisée s'initie par la lecture de la géométrie et le maillage, on passe après au type de solveur inclus dans COMSOL Multiphysics 3.5 avec une formulation implicite pour un cas tridimensionnel en régime instationnaire, puis la discrétisation des équations modélisantes dans le menu « Solve », la résolution des systèmes d'équations discrétisées et enfin le post-traitement. On initialise l'ensemble des cinq variables à calculer sur tous les points du maillage, c'est-à-dire la pression, les trois composantes de la

vitesse et la température. Ensuite on gère la progression du calcul itératif par le biais du suivi des résidus des équations se rapportant à chacune des variables.

Donc sous COMSOL, le travail va consister à assurer successivement :

- Le choix des équations traitées,
- La description des conditions aux limites,
- La gestion de la résolution,
- L'analyse des résultats.

Les étapes pour le déroulement des simulations sur COMSOL sont résumées sur la **figure 8**.

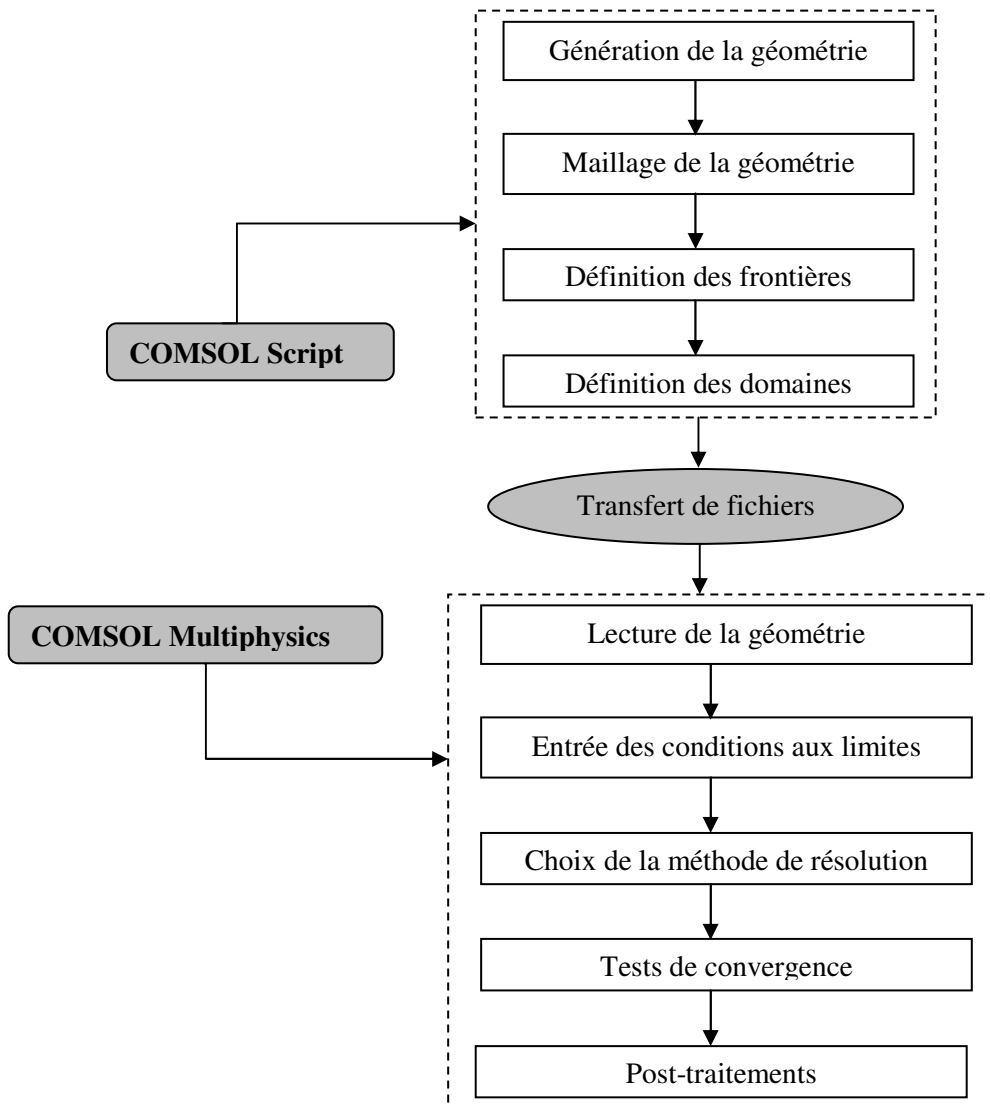


Figure 8 : Etapes de résolution de notre modélisation

Donc, nous nous sommes attachés à décrire l'approche numérique que nous avons utilisée. Tout d'abord, nous avons formulé mathématiquement l'écoulement de l'air dans la cavité fermée qui servira de simuler la cavité formée par l'absorbeur et la vitre du capteur solaire thermique. Par la suite, nous avons décrit la résolution numérique adoptée qui permettra d'aboutir aux résultats qui seront présentés au chapitre 4.

Conclusion :

Nous avons considéré dans ce chapitre une modélisation et une simulation numérique des transferts thermiques dans un distillateur solaire rempli d'eau et dans un capteur solaire à air. Les résultats ont montrés que les échanges thermiques font intervenir des pertes par rayonnement, convection et conduction qui sont différents dans les deux capteurs considérés. Les résultats seront présentés et discutés dans le chapitre suivant.

Références bibliographiques :

- [1] A. S. Muhammad, K. M. Umar, T. Majeed, N. Ahmad, "Design And Performance of a Simple Single Basin Solar Still", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2005.
- [2] A. Mousa, Y. Zurigat, H. Al-Hinai, S. AlHiddabi, "Modelling and Performance Analysis of a Solar Unit With Double Glass Cover Cooling", Desalination, 143, 173-182, 2002.
- [3] H. Z. Yousef, K. Mousa, "Modelling And Performance Analysis of a Regenerative Solar Desalination Unit", Applied Thermal Engineering, 24, 1061-1072, 2004.
- [4] A. Mousa, H. Z. Yousef, "Year-Round Comparative Study of Three Types of Solar Desalination Units ", Desalination, 172, 137-143, 2005.
- [5] A. KHEDIM, « Mesure et caractéristique Thermodynamique d'une nouveau Système solaire de Dessalement de l'Eau de Mer avec Récupérateur de Chaleur », Revue Energies Renouvelables, 11^{ième} journées Internationales de thermique, 2003.
- [6] M. ABU-ARABIE, Y. ZURIGAT, H. AL-HINAI, S. ALHIDDABI, « Modelling and Performance Analysis of a Solar Unit with Double-Glass Cover Cooling », Desalination, 143, 173-182, 2002.
- [7] R.V. DUNKLE, « The Roof Type and multiple diffusion of Still », Commonwealth scientific and industrial research organization, Solar water distillation, 895-902, 1961.
- [8] M. BENHAMMOU, B. OMARI, M. GAHGAH, L. AMER, A. BOUBGHAL, « Réalisation et Expérimentation d'un Distillateur Solaire Couple à un Condenseur », Station d'Expérimentation des Equipement Solaires en Milieu Saharien, Adrar - Algérie, 2003.
- [9] W. A. KAMAL, « A Theoretical and Experimental study of the basin-type solar still under the Arabian Gulf Climatic Condition », Solar & wind technology, 5 (2), 147, 1988.
- [10] A. HACHEMI, « Contribution à l'optimisation des performances thermiques des insolateurs plans à air à lit garnis de rangées d'obstacles aux pas serrés. Amélioration par interaction entre le rayonnement et la convection », Thèse de doctorat, Université de Valenciennes, 1992.
- [11] F. KREITH, « Transmission de la chaleur et thermodynamique », 484-488, 1967.

- [12] A. A. SFEIR, G. GURRACINO, « Ingénierie des systèmes solaire. Application à l'habitant », technique et documentation, Paris, 1981.
- [13] R. SIEGAL, « Thermal Radiation, heat transfer, hemisphere », publishing corporation, 1981.
- [14] P. T. TSILINGIRIS, « An accurate upper estimate for the transmission of solar radiation in salt gradient ponds », *Solar Energy*, 40 (1), 41–48, 1988.
- [15] N. DONATIEN, « Étude thermique du comportement d'un capteur solaire plan à air à couverture combinée plastique-vitre », *Revue Générale de Thermique*, 37, 973-980, 1998.
- [16] W. A. BECKMAN, S. A. KLEIN, J. A. DUFFIE, « Solar heating design by the f-chart method », Édition John Wiley, New York, 1977.
- [17] S. A. KLEIN, W. A. BECKMAN, « A general design method for closed-loop solar energy systems », *Solar Energy*, 22, 1979.
- [18] A. MOUMMI, « Étude globale et locale du rôle de la géométrie dans l'optimisation des Capteurs solaires plans à air », Thèse doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut, 1994.
- [19] C. Cardonnel, « Solaire actif et passif (Conception, bilan thermique, habitat) », Les éditions parisiennes, CFP Chaud Froid Plomberie, 1983, 239.
- [20] J. A. Duffie, W. A. Beckman, "Solar Engineering of Thermal Processes", 3rd edition, Wiley et Sons, Inc., 2006.
- [21] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, "Fundamentals of heat and mass transfer", 4th edition, Wiley, New York, 1996.
- [22] W. H. McAdams, "Heat Transmission", 3rd edition, McGraw-Hill, 1954, 249.
- [23] J. H. Watmuff, W. W. W. Charters, D. Proctor, "Solar and wind induced external coefficients for solar collectors", *Int. Revue d'Hellio-technique*, 2, 1977, 56.
- [24] E. M. Sparrow, K. K. Tien, "Forced convection heat transfer at an inclined and yawed square plate, application to solar collectors", *J. Heat Transfer*, 99, 1977, 507-512.
- [25] E. M. Sparrow, S. C. Lau, "Effect of adiabatic co-planar extension surfaces on wind related solar-collector heat transfer coefficient", *J. Heat Transfer*, 103, 1981, 268-271.
- [26] S. Kumar, V. B. Sharma, T. C. Kandpal, S. C. Mullick, "Wind induced heat losses from outer cover of solar collector", *Renewable Energy*, 10(4), 1997, 613-616.

- [27] S. Sharples, P. S. Charlesworth, “Full-scale measurements of wind-induced convective heat transfer from a roof-mounted FPC”, *Solar Energy*, 62(2), 1998, 69-77.
- [28] O. Turgut, N. Onur, “Three dimensional numerical and experimental study of forced convection heat transfer on solar collector surface”, *Int. C. in Heat Mass Transfer*, 36, 2009, 274–279.
- [29] F. L. Test, R. C. Lessmann, “An experimental study of heat transfer during forced convection over a rectangular body”, *J. Heat Transfer*, 102, 1980, 146-151.
- [30] F. L. Test, R. C. Lessmann, A. Johary, “Heat transfer during wind flow over rectangular bodies in the natural environment”, *J. Heat Transfer*, 103, 1981, 262-267.
- [31] EN 6946, “Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance », calculation method, 1996.
- [32] W. C. Swinbank, “Long-wave radiation from clear skies. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*”, 89, 1963, 339-348.
- [33] R. A. Bliss, “Atmospheric radiation near the surface of the ground: a summary for engineers”, *Solar Energy*, 5, 1961, 103-120.
- [34] P. Berdahl, M. Martin, “Emittance of clear skies”, *Solar Energy*, 32, 1984, 663- 664.
- [35] D. Brunt, “Notes on radiation in the atmosphere, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*”, 58, 1932, 389-418.
- [36] M. Aubinet, “Longwave sky radiation parametrizations”, *Solar Energy*, 53, 1994, 147-154.
- [37] X. Berger, D. Buriot, F. Garnier, “About the equivalent radiative temperature for clear skies”, *Solar Energy*, 32, 1984, 725-733.
- [38] K. G. T. Hollands, T. E. Unny, G. D. Raithby, “Free convective heat transfer across inclined air layers”, *J. Heat Transfer*, 98, 1976, 189-193.

CHAPITRE 4 :

Résultats et discussions

Introduction :

L'étude dans le cadre de ce projet a portée sur le comportement énergétique et en vieillissement d'un polymère thermodurcissable (le polyéthylène) utilisé comme matériau absorbant dans les capteurs solaires à eau et à air. L'étude comporte deux parties, une investigation en laboratoire qui nous a permis de caractériser le matériau d'étude du point de vue physico-chimique : Emissivité, conductivité thermique, masse volumique, diffusivité thermique, et du point de vue de sa caractérisation en vieillissement. L'exposition solaire, en utilisant le polyéthylène dans les systèmes de captation, nous a permis de relever les différentes valeurs de température au niveau de l'absorbeur, du vitrage et de la température ambiante. La deuxième partie de cette étude est une modélisation et une simulation des échanges thermiques en utilisant deux systèmes solaires de captation : Distillateur rempli d'eau et capteur solaire à air et en utilisant les paramètres trouvés dans la simulation expérimentale. Les températures des différents éléments constituant le système changent instantanément, et échangent de ce fait entre eux de la chaleur par conduction, convection, rayonnement et évaporation.

I. Propriétés du matériau d'étude :

Le PE, utilisée dans cette étude, est fabriqué au complexe pétrochimique de Skikda (Algérie). Le film commercial de polyéthylène basse densité (PEBD) a 117 μm environ. Nous avons mesuré quelques propriétés de notre matériau le PE (voir chapitre 2), et nous résumons les résultats obtenus comme suit :

1.1 Emissivité :

On présente les résultats obtenus pour le matériau étudié, le film en PE, dans le **tableau 4.1**.

Tableau 4.1 : Les résultats de mesure de l'émissivité du matériau d'étude

Valeur de l'émissivité		Incertitude type composée	Incertitude élargie
8 - 14 μm	1-20 μm		
0,980	0,970	0,004	0,007

Les valeurs ont été obtenues après étalonnage sur une feuille d'aluminium rugueux, en considérant la même valeur d'émissivité dans les deux bandes de mesure. Les mesures ont été réalisées à température ambiante ($21^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$). On note que la valeur d'émissivité est légèrement plus élevée dans la bande 8-14 μm que dans la bande 1-20 μm .

1.2 Masse volumique :

La masse volumique du film polymère en PE a été caractérisée en utilisant un pycnomètre (voir chapitre 2). La valeur de la masse volumique retrouvée par la mesure $\rho_{PE} = (0,929 \pm 0,01) \text{ g.cm}^{-3}$.

1.3 Conductivité thermique, Diffusivité thermique et Capacité thermique massique :

Nous présentons les résultats obtenues sur un film polymère en PE utilisé comme absorbeur de chaleur dans les dispositifs à effet de serre. Les valeurs de la conductivité et la diffusivité thermique du film polymère en PE sont caractérisées par la méthode périodique présentée au chapitre 2. La valeur de la conductivité thermique obtenue est $k_{PE} = (0,48 \pm 0,01)$ et la valeur de la diffusivité thermique est $a_{PE} = (0,314 \pm 0,02)$. La valeur de la capacité thermique massique du film polymère en PE est donnée par le calcul de la valeur de C_{pPE} à partir des valeurs de la masse volumique mesurée, de la conductivité et de la diffusivité thermique en utilisant la

relation suivante :

$$C_p = \frac{k}{a \cdot \rho} \quad (1)$$

On obtient la valeur de la capacité thermique massique suivante : $C_{pPE} = (1,645 \pm 0,012)$.

1.4 Autres propriétés :

Nous récapitulons quelques propriétés intrinsèques au film en PE dans le **tableau 4.2**.

Tableau 4.2 : Quelques propriétés du matériau d'étude

Propriétés	Unité	Valeur
Densité		$0,943 \pm 0,001$
Température de fusion	°C	$127,6 \pm 0,1$
Taux de cristallinité	%	40 ± 2
Masse molaire moyenne en poids	Kg / mol	220
Module d'élasticité	Mpa	345 ± 50
Température de transition vitreuse	°C	✓ 110
Coefficient de dilatation	K ⁻¹	$2 \cdot 10^{-4}$

II. Comportement énergétique du polyéthylène sous exposition solaire :

2.1 Distillateur solaire :

Nous présenterons deux études sur le même distillateur solaire. Dans la première, nous utiliserons un film polymère noir en PE comme absorbeur de chaleur et, dans la deuxième étude, nous mettons un bac en fer galvanisé peint en noir et recouvert d'un film polymère noir en PE comme absorbeur de chaleur. Nous présenterons les résultats expérimentaux dans les deux cas.

2.1.1 *Distillateur avec film PE seul :*

Nous représentons uniquement les courbes d'évolution des températures de l'eau saumâtre et de la vitre en fonction du temps respectivement en trait noir pour la saumure et en trait rouge pour la vitre. Les données de quantité d'eau distillée produite présentent une certaine dispersion. Pour chaque nuage de points nous avons déterminé une courbe de tendance polynomiale d'ordre 4. Nous résumons notre interprétation sous forme d'observation des tendances du système que nous avons pu constater lors des différentes journées de tests [1].

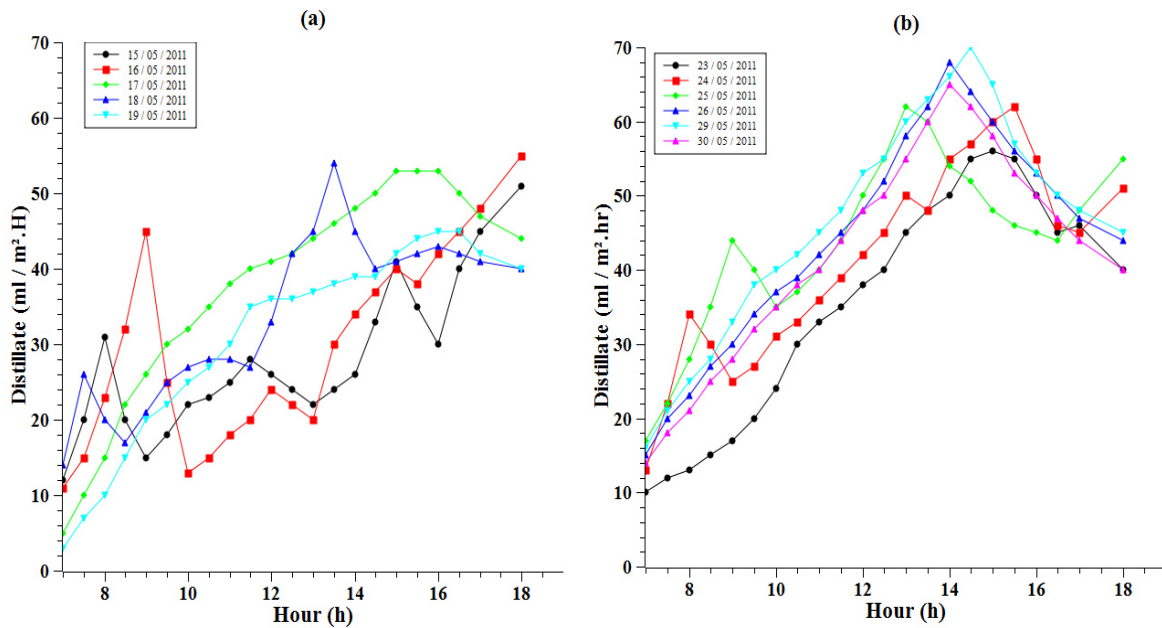


Figure 1 : courbes d'évolution de la quantité d'eau distillée en fonction du temps pour Différentes journées

- Journée du 15 mai 2011** : Au début la température de la vitre est nettement au-dessus de celle de l'eau saumâtre, cela est dû au fait que la solution nouvellement préparée est au début presque à la température nocturne de la salle et la vitre à la température du milieu ambiant extérieure. Le phénomène ne s'inverse qu'après environ 02 heures de marche. Cette évolution marginalise la production du système qui ne reste nulle après une mise en marche d'environ 05 heures. L'évolution de température entre la vitre et l'eau saumâtre illustre le phénomène par la faible différence entre les deux courbes. On ne constate une production qu'au environ de 14h30min où la différence de température atteint 10°C.

$h = 5\text{cm}$; $C = 7,85\text{g/l}$; Isolant : boîtier peint avec une peinture blanche.

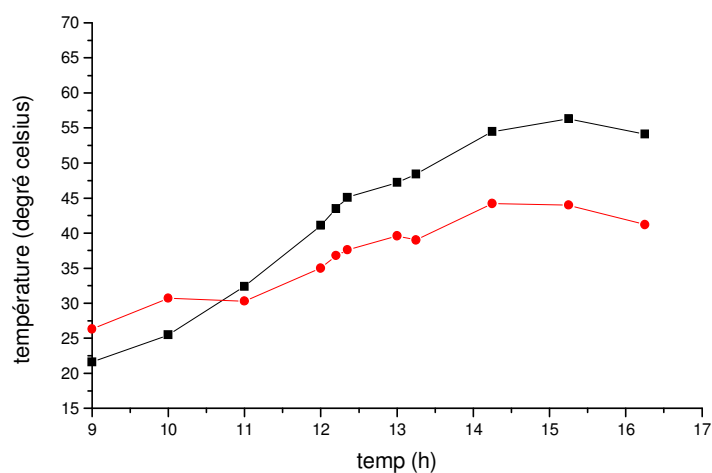


Figure 2 : Courbes d'évolution des températures de l'eau saumâtre et de la vitre en fonction du temps

- Journée 16 mai 2011** : La différence de température est presque nulle au début. La solution n'ayant pas été renouvelée conserve une légère hausse de température par rapport à

celle de la salle ; car le dispositif étant isolé perd très lentement la chaleur emmagasinée pendant la journée. Pour cette journée la température de l'eau saumâtre reste sensiblement inférieure à celle de l'eau saumâtre de la journée du 15 mai 2011, mais par ailleurs la différence de température entre l'eau saumâtre et la vitre est nettement élevée et conduisant à une production plus grande. La différence de température nettement élevée s'explique par l'état de vent fort pour cette journée qui contribue à la chute de température de la vitre, donc on peut dire que le vent influe positivement sur la production du système.

$h = 4,114 \text{ cm}$; $C = 10\text{g/l}$; Isolant : boîtier peint avec une peinture blanche.

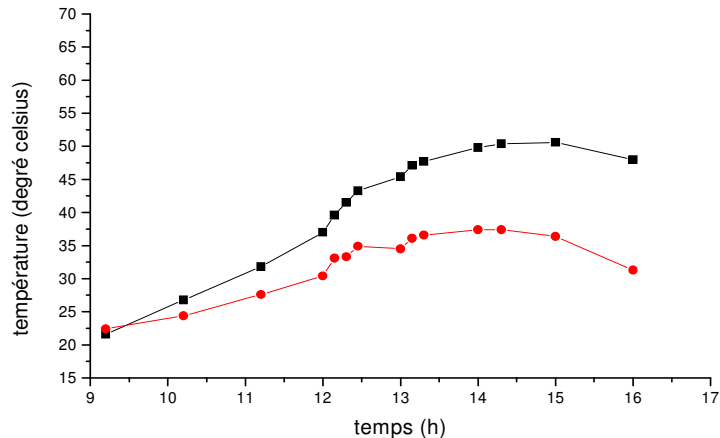


Figure 3 : Evolution des températures de l'eau saumâtre et de la vitre en fonction du temps

- **Journée du 17 mai 2011 :** Les conditions météorologiques (ciel clair et vent fort) sont similaires à celles du 16 mai 2011. On remarque que les écarts de températures pour les deux journées suivent la même évolution. La légère hausse de production est due à la température initiale de l'eau saumâtre qui est un peu élevée permettant ainsi au système d'atteindre le régime de fonctionnement relativement plus vite.

$h = 4.114 \text{ cm}$; $C = 10\text{g/l}$; Isolant : boîtier peint avec une peinture blanche.

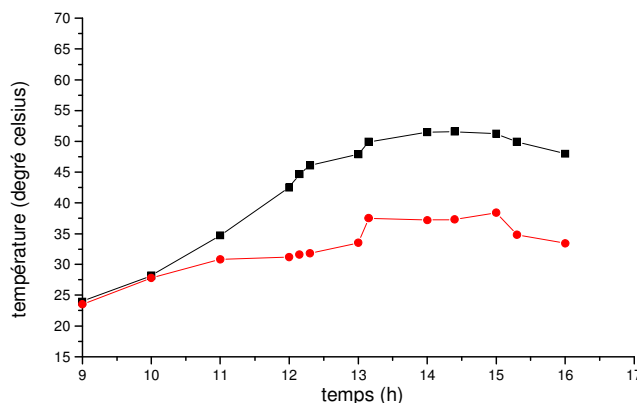


Figure 4 : Evolution des températures de l'eau saumâtre et de la vitre en fonction du temps

- **Journée du 18 mai 2011 :** La hauteur de l'eau saumâtre est égale à 1 cm. Les conditions météorologiques sont comparables à celles des journées précédentes. Dans ces conditions, on constate que les températures augmentent très vite atteignant des valeurs très élevées et de

même les écarts de températures entre l'eau saumâtre et la vitre sont appréciables, mais on constate aussi une décroissance très rapide des températures du système avec une diminution de l'écart. Ceci montre que la diminution de l'épaisseur de la nappe d'eau saumâtre à une influence favorable sur la production du système, mais pendant une période de fonctionnement trop pointue. Par ailleurs la courbe de la quantité d'eau produite présente des points trop dispersés. Cela parce que la faible épaisseur de la nappe d'eau saumâtre provoque des fluctuations au niveau des écarts de températures ressenties sur la quantité d'eau produite.

$h = 1\text{cm}$; $C = 5\text{g/l}$; Isolant : boîtier peint avec une peinture blanche.

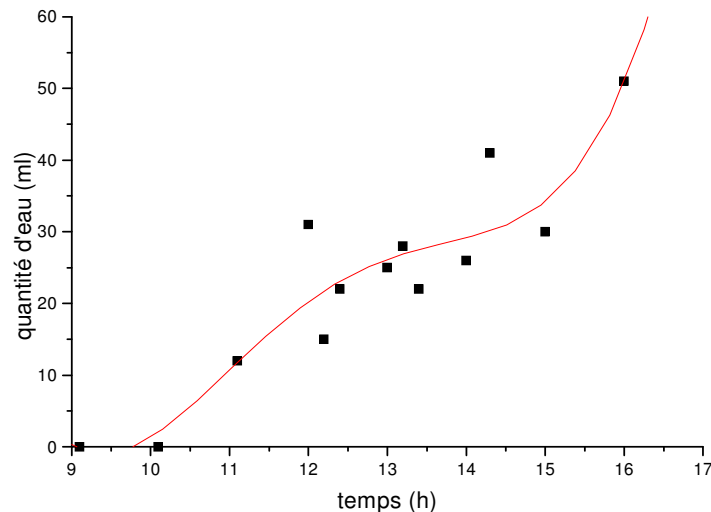


Figure 5 : Graphe de nuage de points et courbe de tendance polynomiale de la quantité d'eau en fonction du temps

$h = 1\text{cm}$; $C = 5\text{g/l}$; Isolant : boîtier peint avec une peinture blanche.

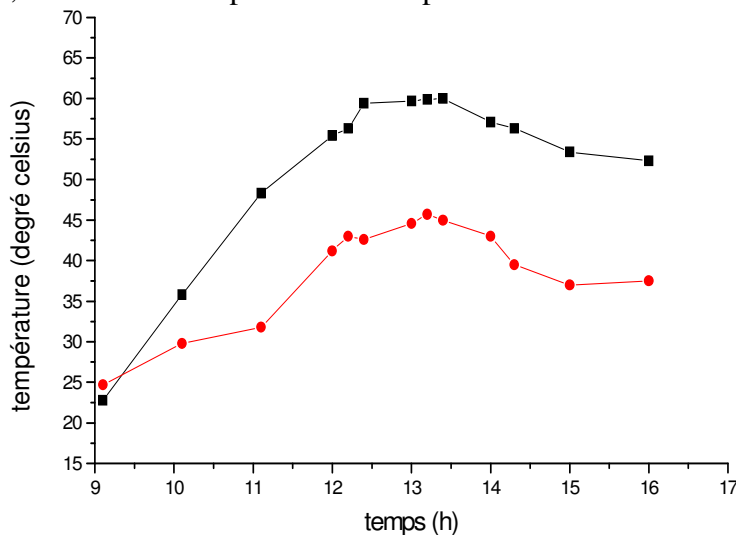


Figure 6 : Evolution des températures de l'eau saumâtre et de la vitre en fonction du temps

- **Journée du 19 mai 2011 :** Les observations de la journée du 23 mai 2011 sont valables pour ces courbes aussi. Le changement brutal des conditions climatiques confirme bien la sensibilité du système pour les faibles épaisseurs de nappe.

$h = 1\text{cm}$; $C = 5\text{g/l}$; Isolant : boîtier peint avec une peinture blanche.

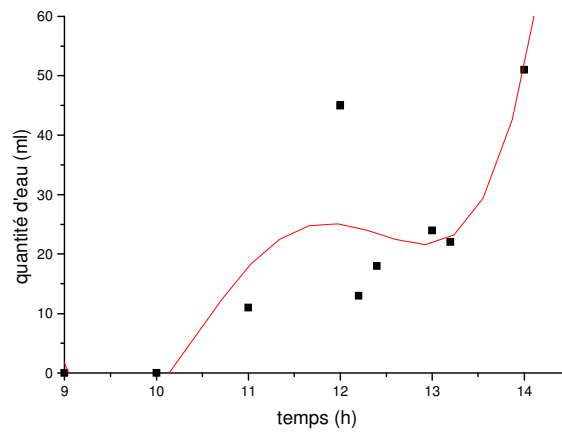


Figure 7 : Graphe de nuage de points et courbe de tendance polynomiale de la quantité d'eau en fonction du temps

$h = 1\text{cm}$; $C = 5\text{g/l}$; Isolant : boîtier peint avec une peinture blanche.

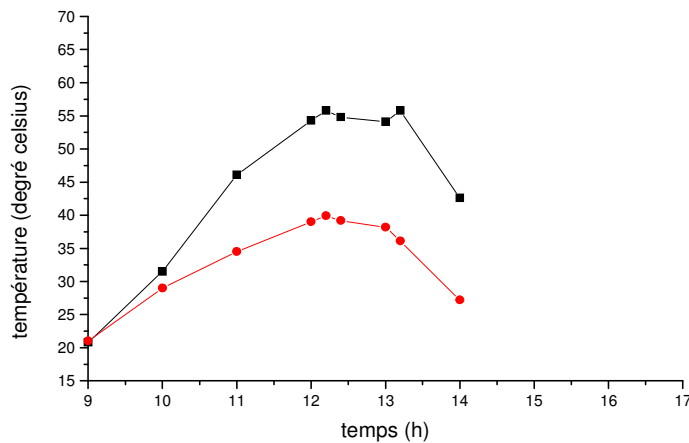


Figure 8 : Evolution des températures de l'eau saumâtre et de la vitre en fonction du temps

- Journée du 28 mai 2011 :** Avec une épaisseur égale à trois fois celle utilisée pour les journées du 18 et 19 mai 2011 et des conditions météorologiques plus mauvaises. Ayant modifié le paramètre isolation (boîtier peint avec peinture blanche+ feuille d'aluminium), on constate que les températures du système augmentent très vite dépassant celles atteintes pour l'épaisseur de 1cm pour atteindre le maximum suivi d'une diminution par contre très lente ; ceci montre l'importance de l'isolation pour un bon fonctionnement du système. Dans ce cas on constate une évolution bien polynomiale de la production du système. Cette évolution est expliquée par le faite, que suite à la bonne isolation du système les pertes de chaleur sont faibles et ayant une nappe d'eau saumâtre d'épaisseur relativement grande, la chaleur emportée par la vapeur d'eau évaporée est faible par rapport à la chaleur sensible emmagasinée par la nappe d'eau. On constate aussi une production nocturne, phénomène non observé avec l'épaisseur de 1cm. La production nocturne est due à la grande chaleur sensible emmagasinée par le système pendant la journée qui permet au système de fonctionner pendant un bon moment même après le coucher du soleil lorsqu'on a une bonne isolation.

$h = 3\text{cm}$; $C = 5\text{g/l}$; Isolant : boîtier peint avec une peinture blanche + feuille d'aluminium.

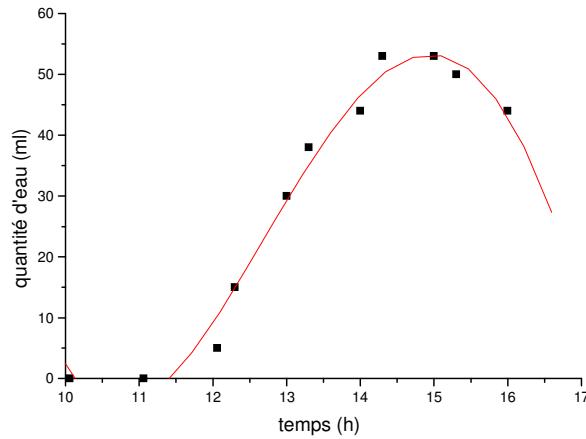


Figure 9 : Graphe de nuage de points et courbe de tendance polynomiale de la quantité d'eau en fonction du temps

$h = 3\text{cm}$; $C = 5\text{g/l}$; Isolant : boîtier peint avec une peinture blanche+ feuille d'aluminium.

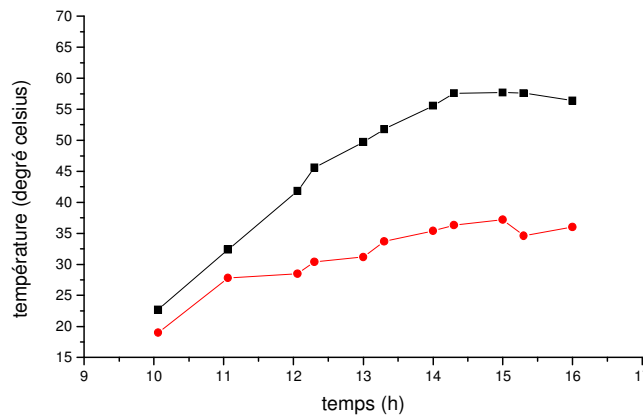


Figure 10 : Evolution des températures de l'eau saumâtre et de la vitre en fonction du temps

- **Journées du 29 et 30 mai 2011** : Les observations sont les mêmes que pour la journée du 28 mai 2011. La légère hausse de la production pour le 29 mai 2011 est due à l'amélioration des conditions météorologique (ciel clair et vent un peu fort). La baisse de production pour la journée du 30 mai 2011 est due à un état de ciel clair et un vent calme provoquant une légère augmentation de la température de la vitre.

$h = 3\text{cm}$; $C = 5\text{g/l}$; Isolant : boîtier peint avec une peinture blanche + feuille d'aluminium.

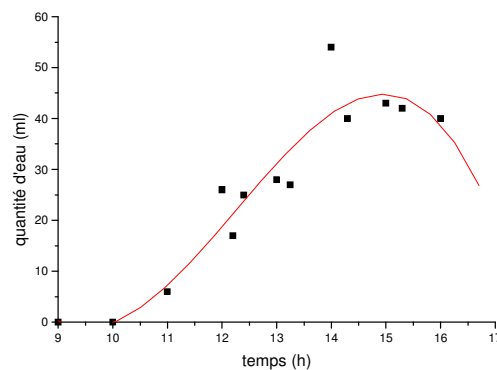


Figure 11 : Graphe de nuage de points et courbe de tendance polynomiale de la quantité d'eau en fonction du temps

$h = 3\text{cm}$; $C = 5\text{g/l}$; Isolant : boîtier peint avec une peinture blanche + feuille d'aluminium.

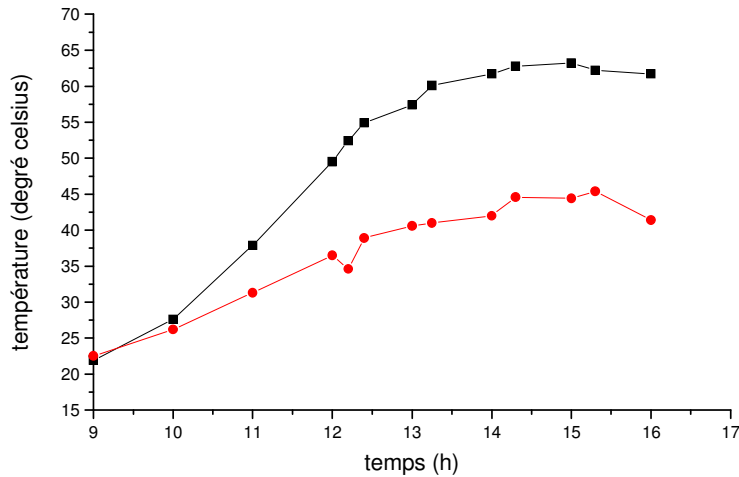


Figure 12 : Evolution des températures de l'eau saumâtre et de la vitre en fonction du temps

$h = 3\text{cm}$; $C = 10\text{g/l}$; Isolant : boîtier peint avec une peinture blanche + feuille d'aluminium.

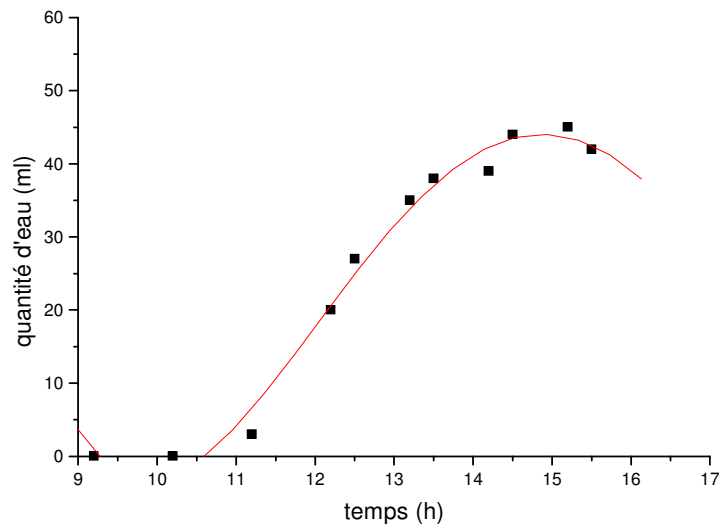


Figure 13 : Graphe de nuage de points et courbe de tendance polynomiale de la quantité d'eau en fonction du temps

$h = 3\text{cm}$; $C = 10\text{g/l}$; Isolant : boîtier peint avec une peinture blanche + feuille d'aluminium.

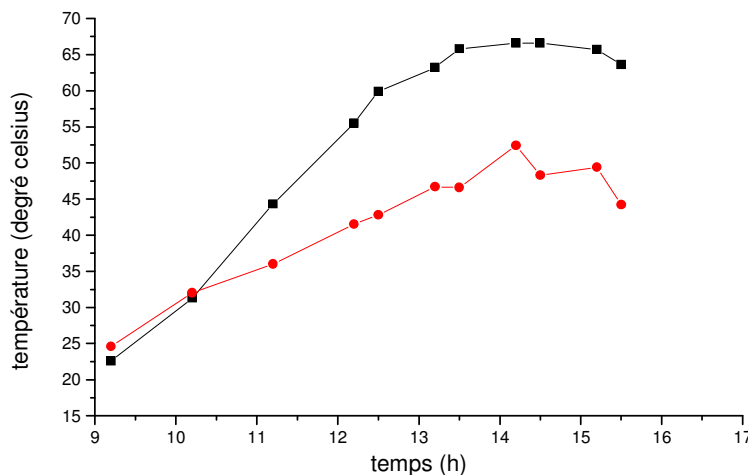


Figure 14 : Evolution des températures de l'eau saumâtre et de la vitre en fonction du temps

- Influence de quelques paramètres :
 - **Épaisseur de la nappe d'eau saumâtre** : Pour les autres paramètres géométriques fixes, les épaisseurs de 4,114 et 5 cm arrivent à peine à donner une production en fonction du temps sur l'intervalle de temps d'exposition considéré et pour une épaisseur de 1cm, on constate une production d'eau après seulement 02 heures du début de la mise en marche, d'où l'influence de l'épaisseur favorable à la production lorsqu'elle diminue. Le phénomène de dispersion des points de la quantité d'eau distillée produite pousse dans le sens du choix d'une épaisseur optimale.
 - **Isolation** : Une bonne isolation a pour conséquence l'augmentation de la production par l'obtention de températures très élevées au niveau de l'eau saumâtre. Elle permet ainsi, d'assurer pendant un intervalle variable selon l'épaisseur de la nappe le fonctionnement du système après la disparition de l'éclairement solaire. Son effet est bien illustré par les tests du 28 allant au 30 mai 2011.
 - **La salinité de l'eau saumâtre** : Ce paramètre a une influence négligeable sur le fonctionnement du système dans le cas des eaux saumâtres qui ont une limite de salinité fixée à 10g/l.

Maintenant, on va donner les résultats calculés issus de la simulation. Ces résultats concernent essentiellement la variation des différentes températures au cours du temps, l'ensoleillement, la production journalière, l'efficacité interne et globale et enfin le facteur de performance pour les deux systèmes (sans et avec préchauffage), l'effet des paramètres externes et internes sur le fonctionnement du distillateur. Les résultats sont présentés sous forme de graphes, en tenant compte des considérations suivantes:

- ✓ Les calculs sont effectués à partir d'un instant initial "t" pour chaque composant du distillateur, à une température initiale et avec un pas de temps égal à une heure,
- ✓ L'étude est effectuée sur un distillateur plan d'une surface absorbante $A_b = 1\text{m}^2$ et d'une épaisseur $\delta_b = 4\text{mm}$, une surface d'eau saumâtre $\delta_e = 2\text{cm}$, un vitrage d'aire $A_v = 5\text{mm}$ et d'un isolant d'épaisseur $\delta_{iso} = 5\text{cm}$ et une surface $A = 1.5\text{cm}$. Le distillateur plan est incliné de 30° par rapport à l'horizontal et orienté vers le sud,
- ✓ La vitesse du vent est constante et égale à 4m/s .

- **Variation des puissances solaires absorbées** : Le choix du distillateur dépend principalement de ses caractéristiques de fonctionnement. L'irradiation solaire, étant le paramètre le plus influant sur le fonctionnement du système, Il serait intéressant d'étudier son effet sur ces caractéristiques. La **figure 15** montre l'évolution temporelle du rayonnement solaire global (I), reçue par mètre carré de surface plane horizontale et des puissances absorbées par la saumure (P_e), par la vitre (P_v) et par l'absorbeur (P_a) pour un distillateur

simple. On peut remarquer que la puissance atteint son maximum entre 12h et 13h. La puissance absorbée par la vitre n'est pas considérable et reste toujours inférieure à celle absorbée par la saumure et par l'absorbeur. Ceci est dû à ses caractéristiques géométriques (épaisseur faible $E_v = 4\text{mm}$) et optiques (coefficient d'absorption faible et coefficient de transmission élevé). La puissance absorbée par l'absorbeur est très importante, elle (prendre la grande partie de la puissance global absorbée (I_g)), et supérieure à celle absorbée par la nappe d'eau. Ceci est dû aux caractéristiques géométriques de la nappe d'eau (épaisseur faible $E_e = 2\text{cm}$) et optiques de l'absorbeur (coefficient d'absorption important).

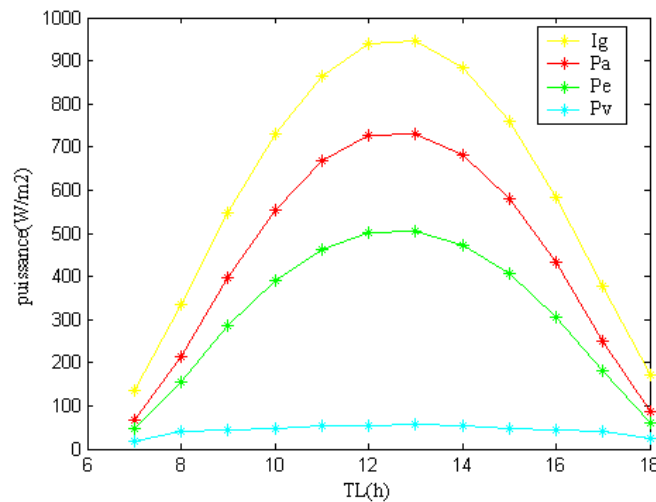


Figure 15: Variations temporelles du rayonnement global et les puissances absorbées par l'absorbeur, la nappe d'eau et la vitre

- **La variation de la température ambiante et la température du ciel :** La figure 16 présente la variation de la température ambiante et de la température du ciel en fonction du temps. La température du ciel varie en fonction de la température ambiante, et qui ont la même allure (figure 16). Ceci peut être expliqué par le comportement de T_c par rapport T_a . Elles atteignent leurs valeurs maximales à 14h.

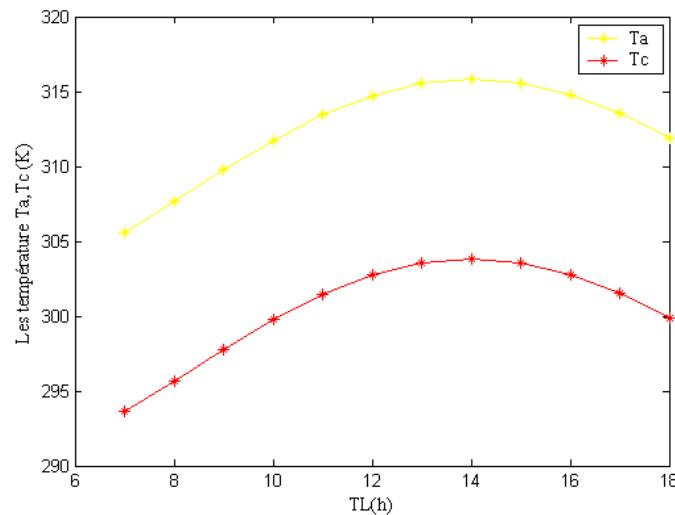


Figure 16 : Variations temporelles de la température ambiante et la température de ciel

La variation des températures en fonction du temps de chaque composant des deux systèmes étudiés, avec et sans aluminium est illustrée par les **figures 17 a** et **17 b**.

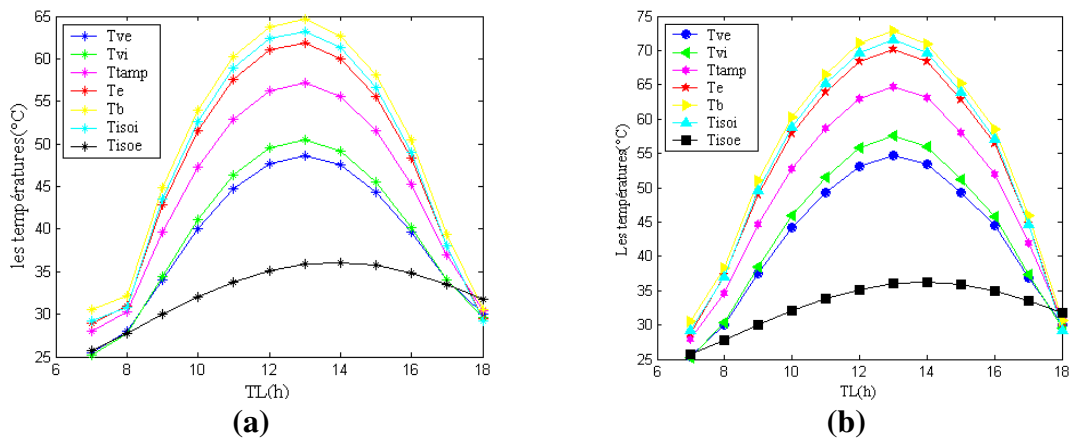


Figure 17 : Variation des températures de différents éléments du distillateur (a) sans aluminium et (b) avec aluminium

Dans la **Figure 17 a**, relative au distillateur solaire sans aluminium, nous constatons que le film absorbant et la face intérieure de l'isolant ont les températures les plus élevées : la température du film atteint une valeur maximale de 65°C, résultant de la puissance absorbée par l'absorbeur qui est importante et supérieure à celle absorbée par la saumure et la vitre. Par ailleurs l'isolant étant placé au-dessous de l'absorbant d'une conductivité thermique élevée, où la température de la face intérieure de l'isolant est importante. L'élévation des températures du vitrage intérieur et extérieur est due à l'absorption par la vitre du rayonnement solaire incident et de la chaleur cédée par la surface d'évaporation (la saumure) par rayonnement, évaporation et convection naturelle. La température de la face intérieure est légèrement supérieure à celle de la face extérieure, ceci s'explique par la quantité importante du flux reçu par la face intérieure tandis que la face extérieure est soumise à l'action du vent. Par absorption du flux solaire, l'eau s'échauffe entraînent ainsi l'élévation de sa température. La température du bac absorbant est légèrement supérieure à celle de la saumure à cause des caractéristiques de l'absorbeur (coefficient d'absorption élevé). La zone tampon est le domaine de la vapeur saturée, où la température est assez élevée. On a une variation classique en forme de cloche du rayonnement solaire. L'allure de la variation temporelle de la température de chaque composant du distillateur est similaire à celle résultats qui présentés par Bilal, Mohsen, Nayfeh, concernant son étude expérimentale [2]. Qui ont trouvé une augmentation de la température de l'eau jusqu'à atteindre une valeur 63°C, même que le travail expérimental de Badran, et Tahaineh [3], qui ont constaté à des résultats similaire pour un système sans aluminium.

On observe à travers la **figure 17 b** que la variation des températures de chaque composant du distillateur à la même allure que dans le cas du système sans aluminium, sauf que les valeurs

des températures sont plus élevées. Cette augmentation montre que le rajout du réflecteur en aluminium provoque un pré échauffement de la face intérieur de l'isolant, du film absorbeur, de l'eau et la face intérieure de la vitre. Des travaux de Menina, Ben Moussa, Zemmouri et Moussaoui [4], ainsi que ceux de Badran, et Tahaineh [3], ont abouti à des résultats similaires.

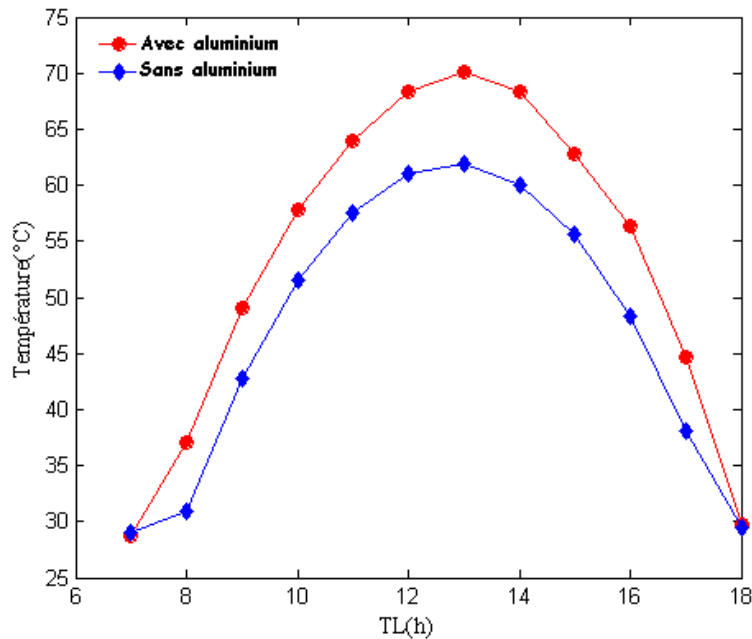


Figure 18 : Variation temporelle des températures de l'eau avec et sans aluminium

La **figure 18**, montre la variation temporelle de la température de l'eau saumâtre sans et avec aluminium. Les valeurs maximales sont 70.14°C pour le distillateur avec aluminium et de 61.84°C pour le distillateur sans aluminium. Ces résultats sont en bon accord avec le travail de Menina, Ben Moussa, Zemmouri et Moussaoui [4].

- La variation de La production du distillateur sans et avec Aluminium :

✓ En fonction du temps local : La production horaire dans les deux systèmes (distillateur plan, avec et sans aluminium) est quasi si nulle pendant les premières heures de la journée (avant 8h du matin) pendant la quelles le système doit, partant de la température ambiante, atteindre sa température de fonctionnement. A partir de ce moment il apparaît une différence de la production entre le distillateur et le système couplé, qui augmente avec la croissance du rayonnement solaire pour atteindre une valeur maximale à 13h, où la production horaire du distillateur plan est de $0,57 \text{ l/m}^2.\text{h}$, alors que celle du système couplé atteint $0,86 \text{ l/m}^2.\text{h}$. par la suite cette différence décroît avec le temps solaire, qui explique que le rajout de l'aluminium augmente la différence entre la température de l'eau et la température de la vitre intérieure dans le distillateur, qui a un effet direct sur l'augmentation du taux d'évaporation. Il en résulte une amélioration de la production totale de distillat. L'allure de la variation temporelle de la production avec et sans aluminium est similaire à celle résultats qui présentés par Badran, et Tahaineh [3], qui en trouve une augmentation 36%.

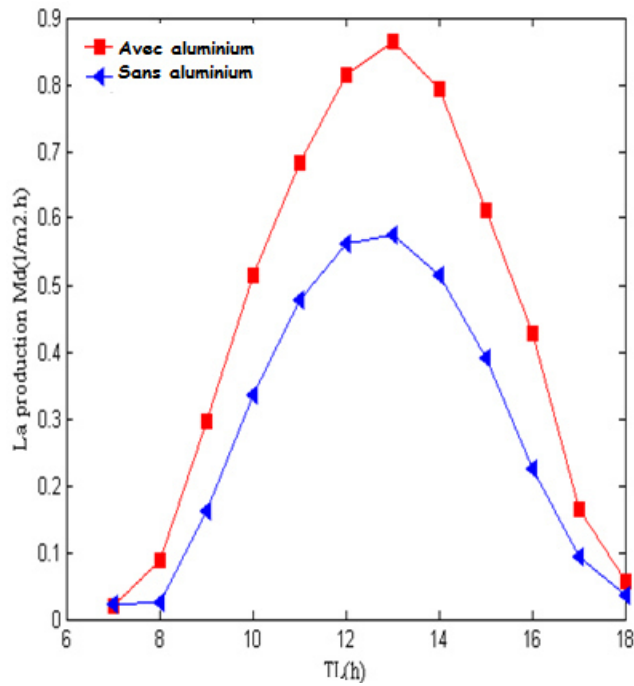


Figure 19 : la variation temporelle de la production pour un distillateur plan sans et avec aluminium

✓ L'effet de la température de l'eau sur la Production : La **Figure 20**, montre que la production augmente progressivement avec la température de l'eau. En effet cette augmentation de la température de l'eau provoque le réchauffement de l'eau à l'intérieur du distillateur solaire (surface d'évaporation), ce qui entraîne une élévation de la température de cette dernière, et par conséquent une augmentation de la condensation. Ces résultats concordent avec les résultats qui ont été obtenus par Z. Haddad, A. Chaker et N. Boukerzaza [5], qui ont constaté que la production augmente progressivement avec la température du préchauffage, au-delà d'une valeur approximativement égale à 85 °C, la production chute.

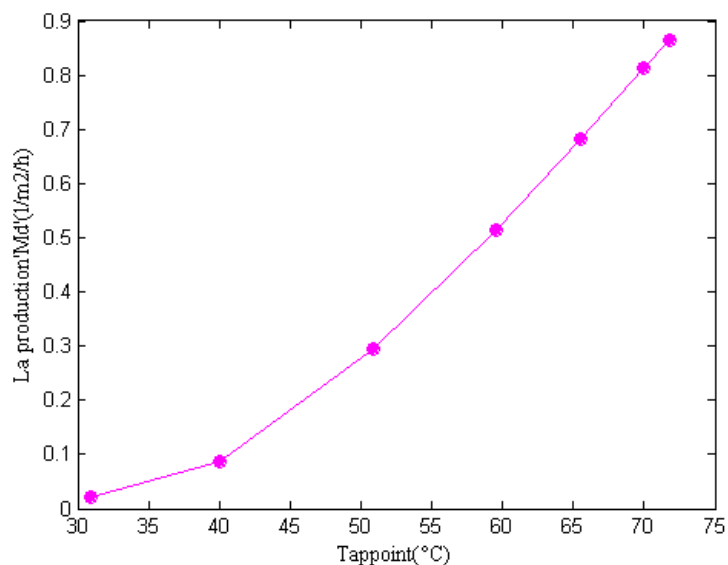


Figure 20 : La variation production en fonction de la température de l'eau

2.1.2 Distillateur solaire avec Bac + PE :

Les tests expérimentaux du distillateur solaire avec Bac + PE ont été réalisés durant le mois de Mai 2012. Pour bien expliquer ses tests, on donne tout d'abord la production journalière d'eau distillée par le distillateur solaire, puis on prendra chaque jour à part et on présentera plus d'interprétations sur les tests.

La production journalière d'eau distillée durant sept jours d'expérimentation (les jours sont numérotés de 1 à 7) est donnée par la **figure 21**.

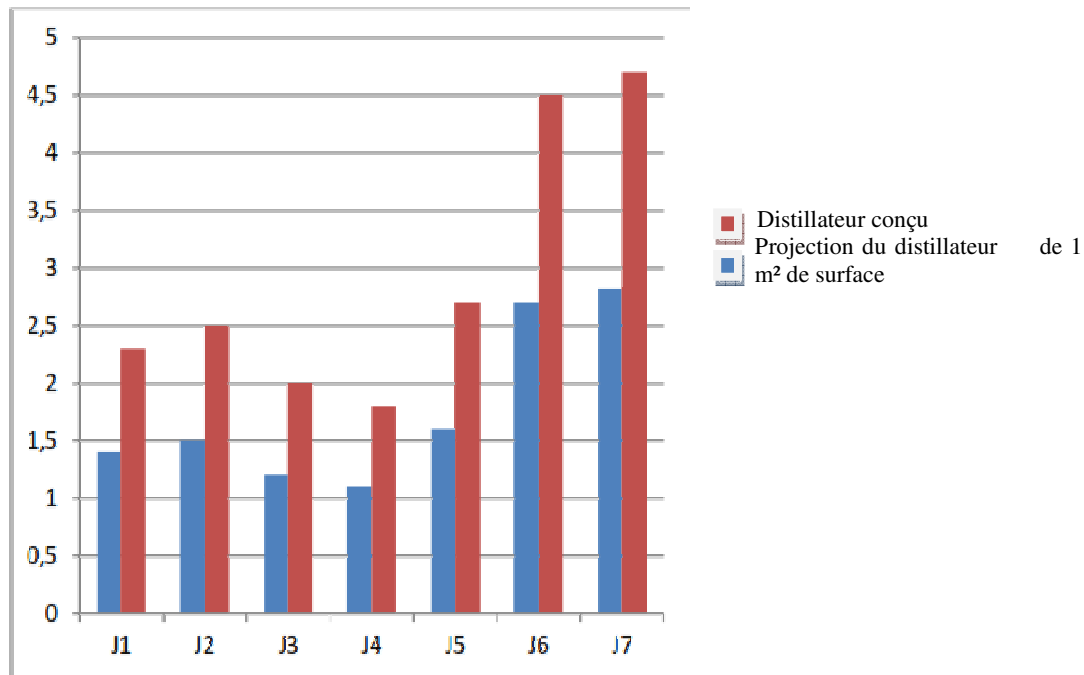


Figure 21 : Production d'eau distillée (en litre) du distillateur solaire à canaux en fonction du nombre de jours testés

L'histogramme de la **figure 21** représente la production journalière réelle d'eau distillée du distillateur solaire conçu et sa projection si la surface était de 1 m² pour pouvoir comparer avec la production d'autres distillateurs solaires dans le monde. On constate que la quantité d'eau distillée est assez importante pour ce qui est de la distillation solaire, surtout durant le 6^{ème} et 7^{ème} jour. En effet 2,82 litres (4,7 litres/m²) est une bonne production comparativement à d'autres distillateurs solaires conçus dans le monde, et surtout avec les premiers tests faits en 2011. On fait remarquer que durant tous les tests, le distillateur solaire étudié avait toujours la même position presque horizontale pour qu'on puisse l'utiliser comme Distillateur plan (stagnation de la solution dans l'absorbeur). Pour avoir plus d'interprétations sur les expériences réalisées, chaque jour va être traité à part.

- **Test du jour 1 (19/05/2012)** : On constate que la production d'eau distillée de la journée change avec le temps (**figures 22 et 23**) et qu'elle augmente d'une façon significative entre 12h 00 et 16h 00.

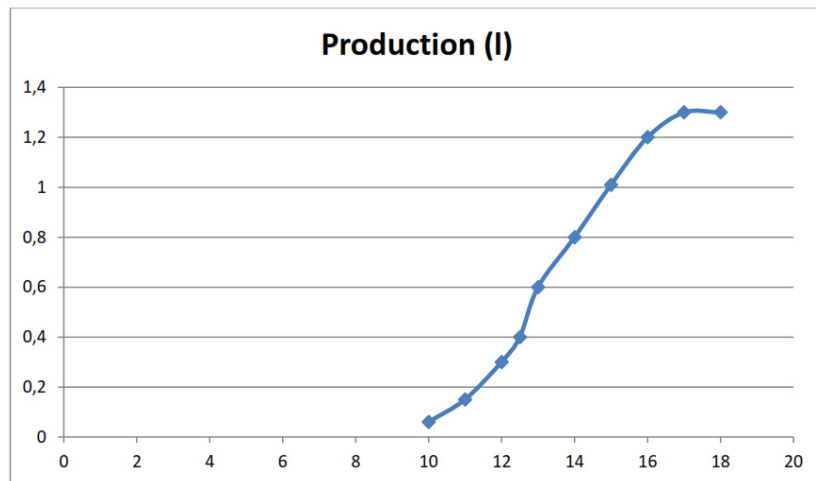


Figure 22 : Production d'eau distillée (l) durant la journée du 19/05/2012

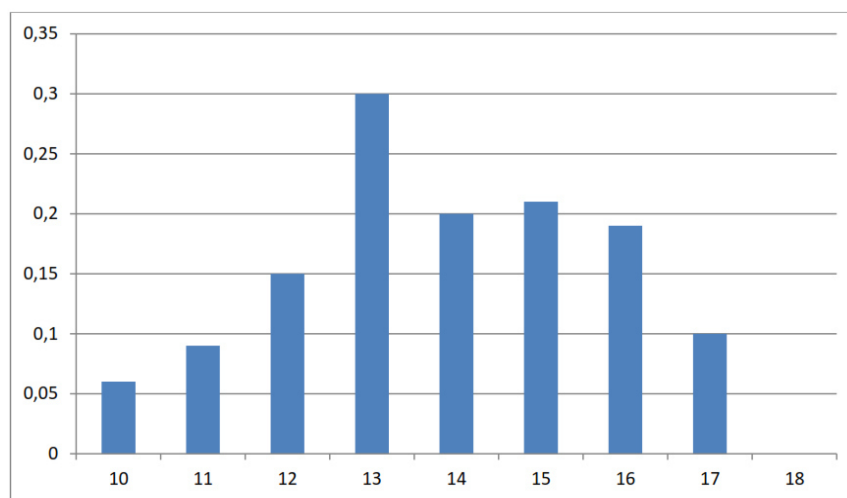


Figure 23 : Production horaire d'eau distillée (l) de la journée du 19/05/2012

Ce changement de production est dû essentiellement au changement climatique.

🚧 **Test du jour 2 (20/05/2012) :** On constate que la production d'eau distillée du Jour 2 est supérieure à celle du Jour 1 de 0,2 litre (**figures 24 et 25**).

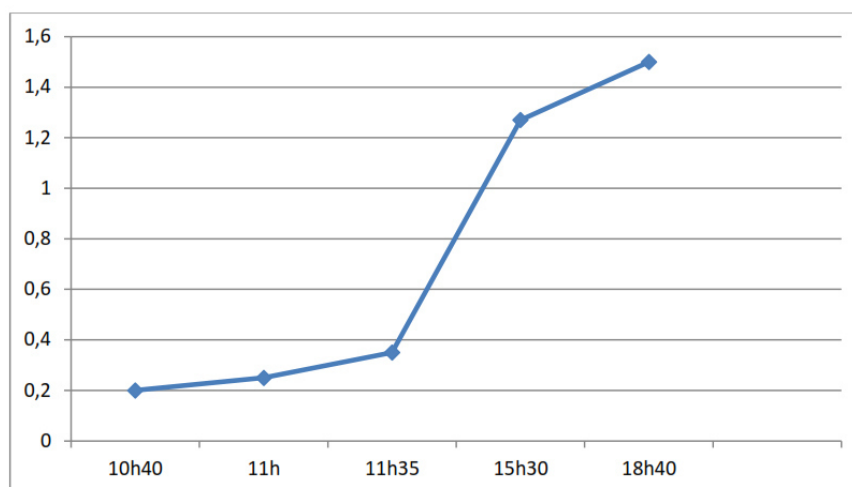


Figure 24 : Production d'eau distillée (l) durant la journée du 20/05/2012

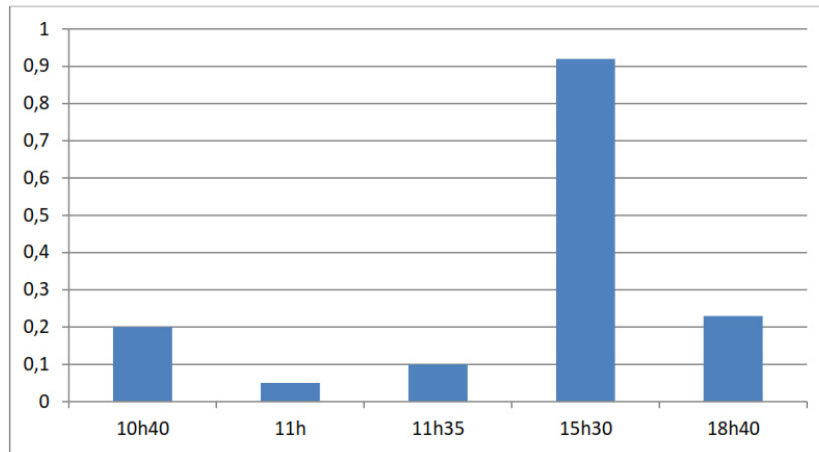


Figure 25 : Production horaire d'eau distillée (l) de la journée du 20/05/2012

Cette petite augmentation de la production est dû ou bien à l'augmentation de la quantité d'eau qui a séjourné dans le distillateur durant Jour 2 (6 litres) par rapport au Jour 1 (5 litres) et aux variations des paramètres météorologiques.

✚ Test du jour 3 (21/05/2012): Malgré le fait que le ciel n'était pas dégagé, le test a été réalisé pour mieux cerner les performances du distillateur dans les différentes conditions atmosphériques. Comparativement au rendement de Jour 1 (1,3 l) et de Jour 2 (1,5 l), la production de Jour 3 (1,2 l) est assez appréciable (**figure 26**).

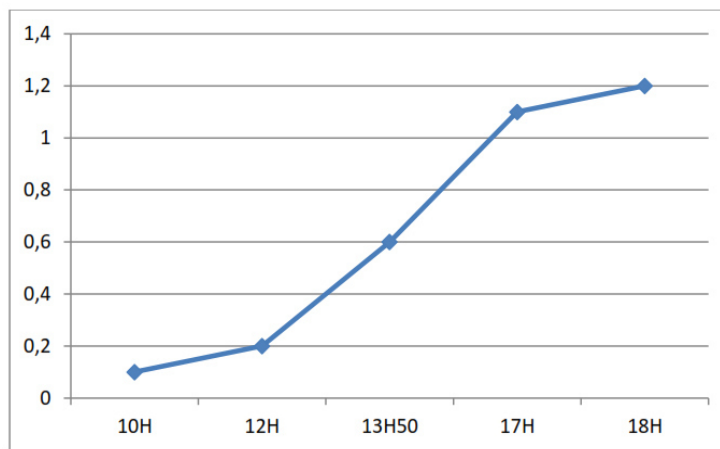


Figure 26 : Production d'eau distillée (l) durant la journée du 21/05/2012

Il y a une chute brutale de la radiation solaire entre 10h 30 et 12h 30 (passage de nuages). Cette période est le moment idéal pour le chauffage et l'évaporation de l'eau dans le bac (parce que le soleil est presque au-dessus du distillateur). Cette chute de la radiation a refroidi l'eau (production de 0,2 l à 12h) et donc, il a fallu plus de temps pour qu'elle se réchauffe et s'évapore encore une fois (production de 0.6 l à 13h 50).

✚ Test du jour 4 (23/05/2012) : On constate que malgré un apport continu d'une plus grande quantité d'eau, la production en eau distillée de Jour 4 est supérieure aux autres jours (**figures 27 et 28**).

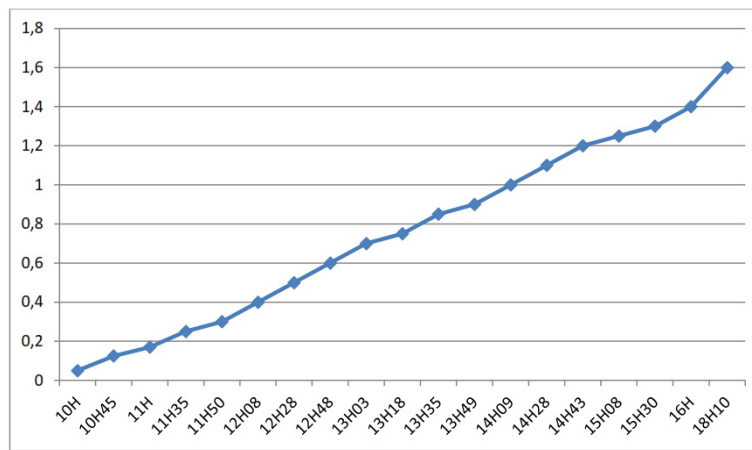


Figure 27 : Production d’eau distillée (l) durant la journée de 23/05/2012

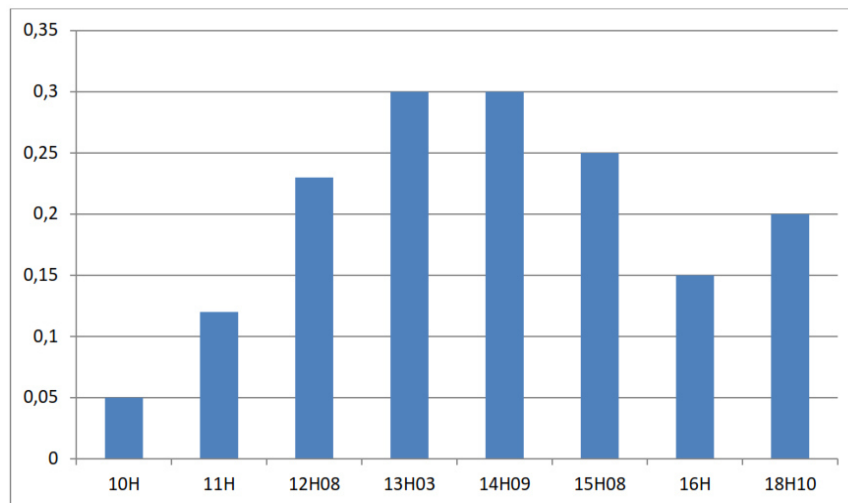


Figure 28 : Production horaire d’eau distillée (l) de la journée de 23/05/2012

Malgré que la radiation solaire de Jour 4 soit inférieure à celle de Jour 2, la production de Jour 4 est plus grande. Par contre, lorsque le débit initial d’eau est grand, la production est faible. C’est ce qu’on a constaté au début du test du Jour 4. En effet, le volume initial (c.à.d. épaisseur initiale) de l’eau était de 9 litres, ce qui nous a donné une production de 0.05 litre qui est une quantité faible par rapport aux autres jours. Donc, pour un certain temps de fonctionnement, plus le débit est grand, plus on a moins d’évaporation et ceci à cause de la chaleur spécifique de la solution.

🚧 Test du jour 5 (26/05/2012) : On constate que malgré qu’une partie de la journée ait été nuageuse, la production d’eau distillée n’a pas chuté par rapport aux autres jours (**figures 29** et **30**). Ceci s’explique par l’ajout du film en aluminium comme isolant thermique à l’extérieur du distillateur solaire, qui a réduit à néant la condensation sur la face interne du distillateur. De ce fait, toute la vapeur s’est condensée sur les vitres. Lorsqu’il n’y avait pas de film en aluminium, la différence de température entre les faces interne ($T_{in} = T_{a-v}$) et externe (T_{ext}) du distillateur était grande ; ce gradient de température a été à l’origine de la condensation de la vapeur sur le distillateur. Lorsque ce dernier a été isolé thermiquement, la

température du mélange (T_{a-v}) et la température interne (T_{in}) du distillateur sont presque égales et par conséquent la condensation a été annihilée.

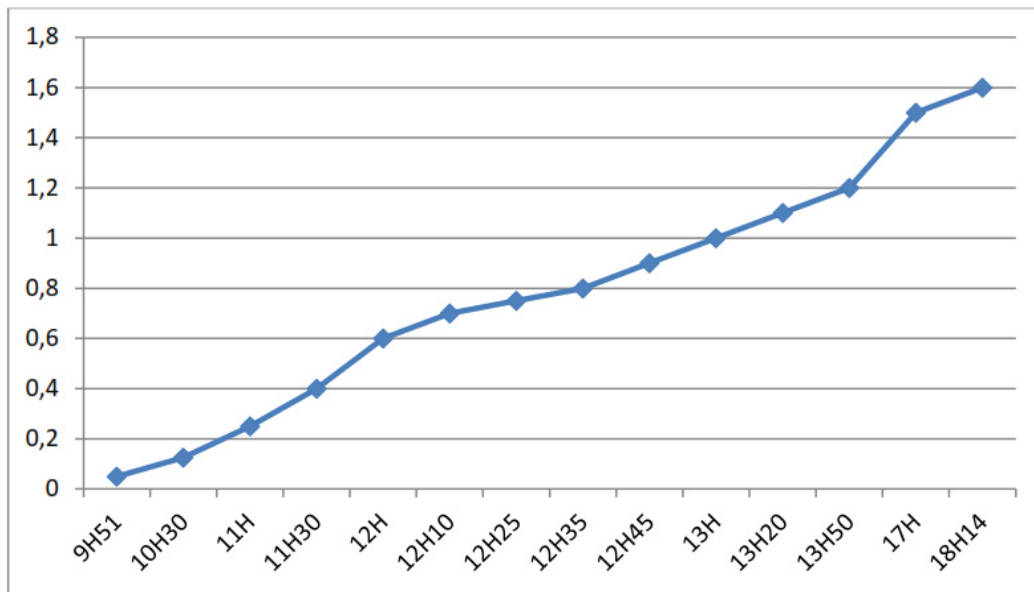


Figure 29 : Production d'eau distillée (l) durant la journée du 26/05/2012

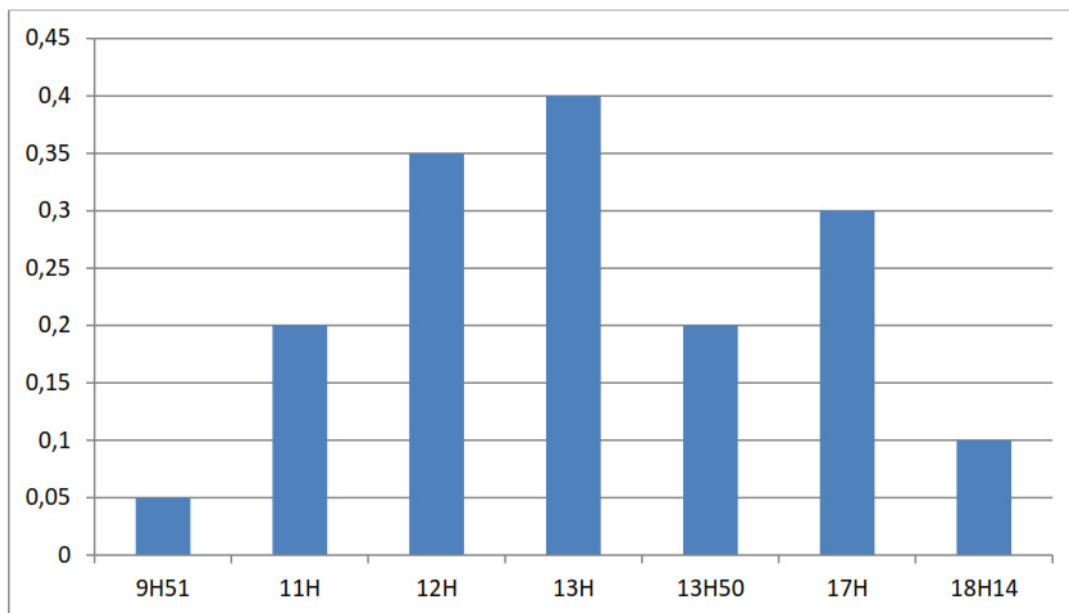


Figure 30 : Production horaire d'eau distillée (l) de la journée du 26/05/2012

On constate que la production horaire d'eau distillée augmente jusqu'à 13h, puis diminue à cause de la chute de la radiation solaire. En effet, à 13h 30, la radiation solaire chute puis augmente de nouveau à 15h 30 et rechute ensuite. Cette dernière augmentation de la radiation solaire (due au dégagement du ciel). Cela explique l'évaporation de la solution et le séchage du distillateur de 13h 50 à 17h.

🚩 Test du jour 6 (28/05/2012) : Le 6^{ème} jour de tests a été très riche en informations. Celles-ci, ont apporté un certain nombre d'éclaircissements sur le mécanisme de fonctionnement du distillateur à savoir son orientation par rapport au soleil et l'apport en solution en vue

d'optimiser la production d'eau distillée et d'éviter l'assèchement de l'absorbeur. La production en eau distillée du jour 6 a été beaucoup plus importante que les autres jours (**figures 31 et 32**). Elle a atteint un volume appréciable de l'ordre de 2,7 litres. Cette augmentation est due essentiellement à la poursuite du soleil.

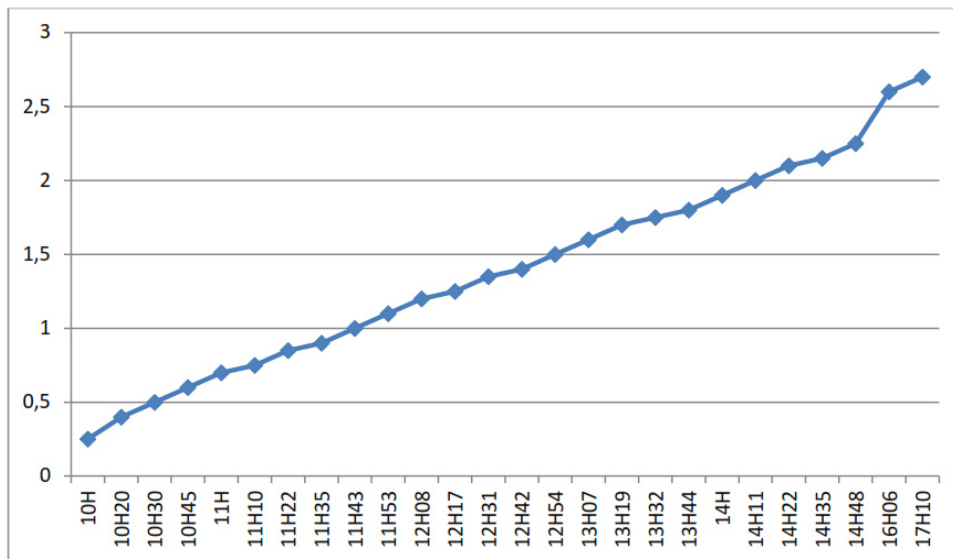


Figure 31 : Production d'eau distillée (l) durant la journée du 28/05/2012

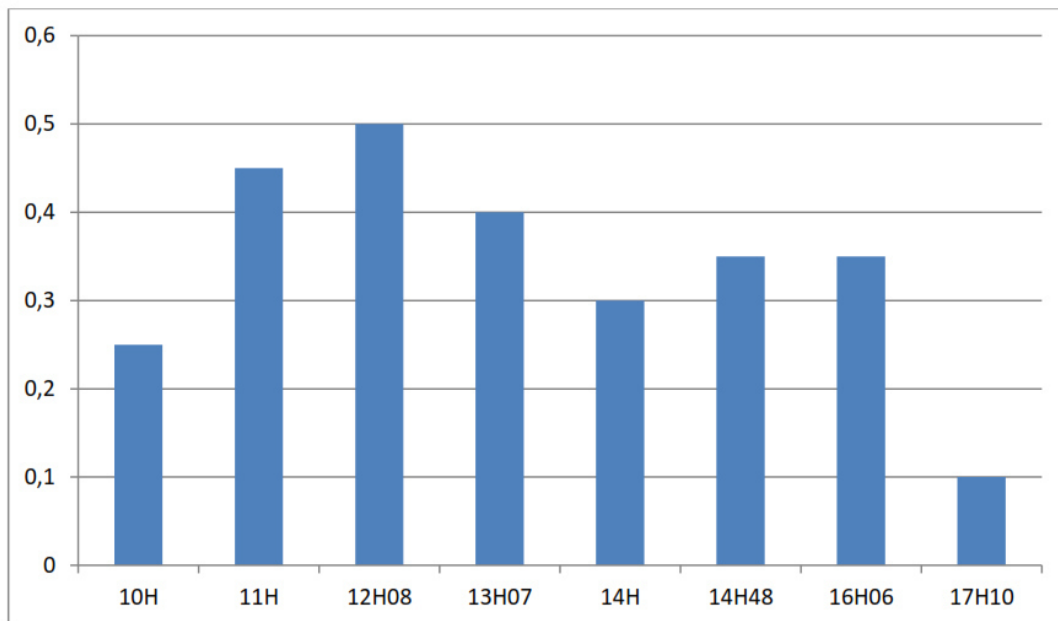


Figure 32 : Production horaire d'eau distillée (l) de la journée du 28/05/2012

Pour conclure, on peut dire que la poursuite du soleil par le distillateur solaire est nécessaire pour augmenter le rendement en eau distillée. Cela, peut être réalisé pour des prototypes individuels et ceci par l'utilisation d'un moteur programmé à cet effet qui va les faire pivoter en fonction du mouvement du soleil (projets en perspectives).

🚩 Test du jour 7 (29/05/2012) : Comme on peut le constater, cette journée a été très positive et ceci pour différentes raisons :

- Augmentation du rendement du distillateur solaire (2,82 l) (**figures 33 et 34**),
- Influence de la quantité d'eau sur le rendement horaire du distillateur (poursuite du soleil) durant deux journées 6 et 7 (**figure 35**).

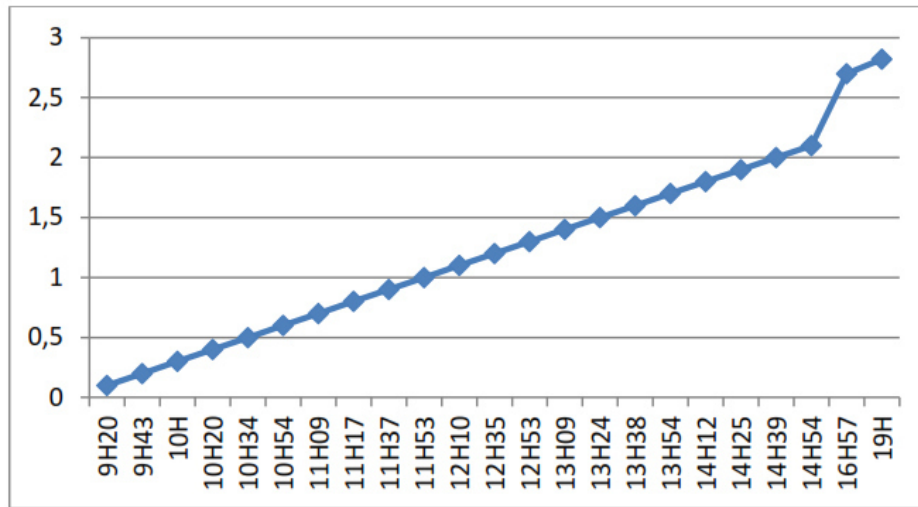


Figure 33 : Production d'eau distillée (l) durant la journée du 29/05/2012.

On constate que l'augmentation de la production est linéaire durant toute la journée.

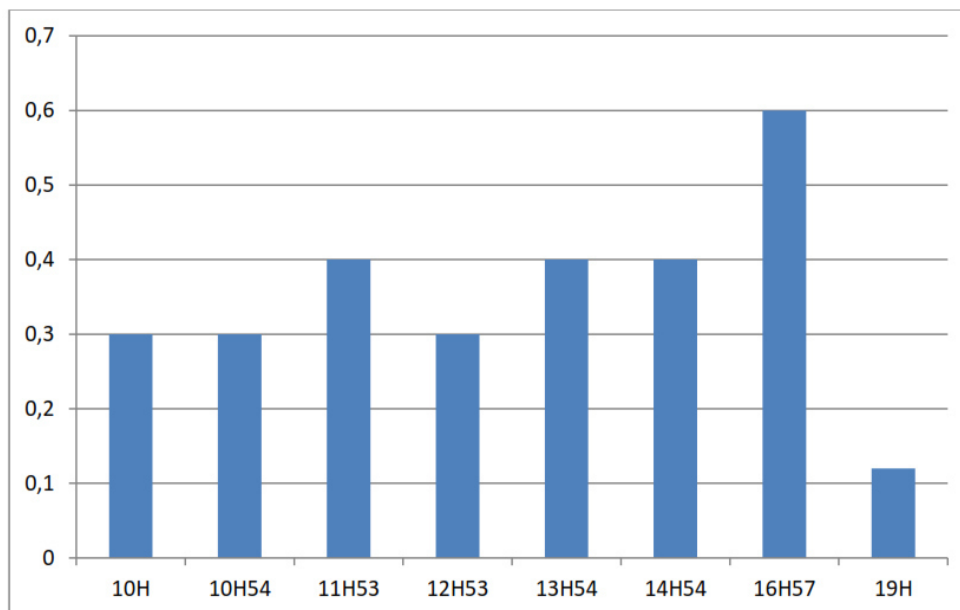


Figure 34 : Production horaire d'eau distillée durant la journée du 29/05/2012

La production horaire du distillateur est presque constante (0,3-0,4 l) tout au long de la journée. Après 17h, elle a chuté à cause de la baisse de la radiation solaire. Cette constatation, comme celle du Jour 6 et à la différence des autres jours, est due à la position du soleil par rapport au distillateur. Tout le temps, le soleil était en face de la vitre pendant les tests des Jours 6 et 7, contrairement aux autres journées où le distillateur avait une position fixe (le soleil n'était pas toujours en face de la vitre).

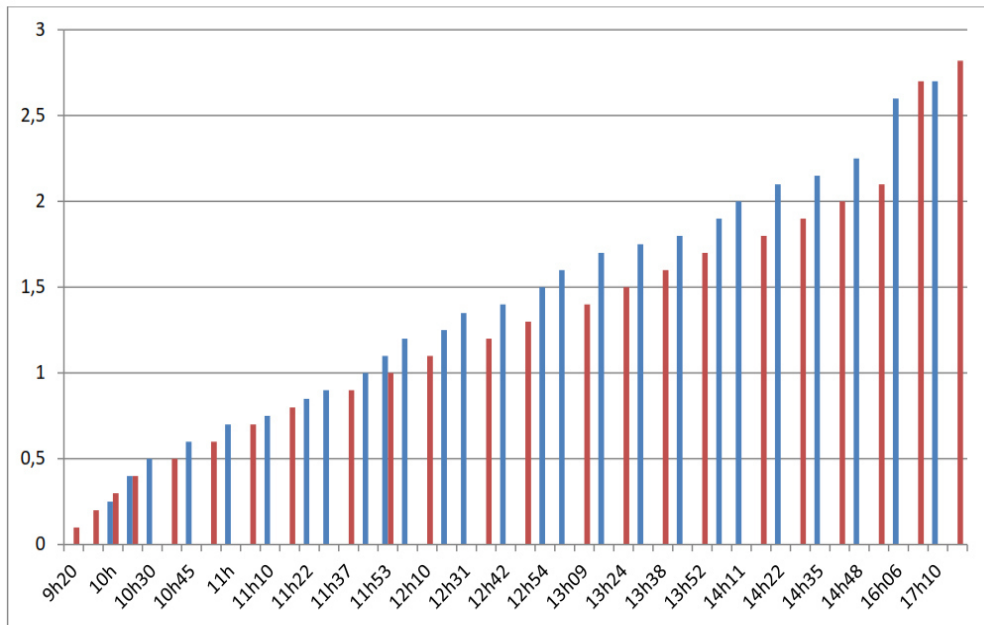
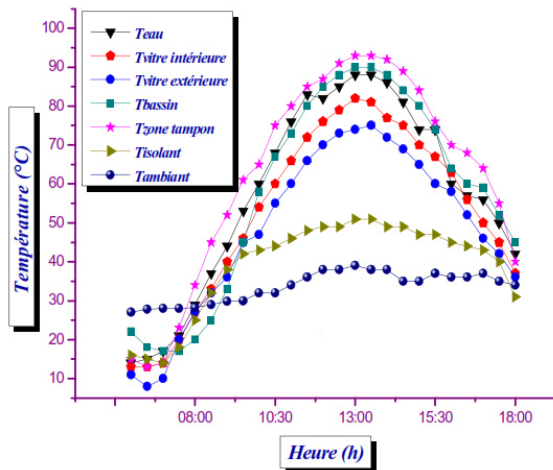


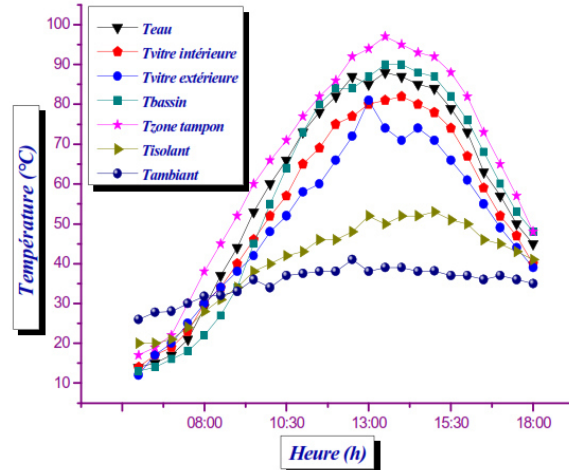
Figure 35 : Diagramme comparatif de la production (l) des Journées 6 et 7

La **figures 36** présente la variation des températures T_{eau} , $T_{\text{vitre intérieure}}$, $T_{\text{vitre extérieure}}$, T_{bassin} , $T_{\text{zone tampon}}$ et T_{isolant} pendant les 7 jours des expériences du mois de Mai 2012. On remarque en premier lieu que les températures augmentent proportionnellement avec le temps et atteignent une valeur limite pour chaque élément. On constate le long de l'intervalle du temps (12 heures) que la température ne dépasse pas 110°C . La température de la vitre (extérieure) augmente progressivement au matin à cause de l'absorption du rayonnement solaire incident, mais, au cours de la période de 12h 30 à 14h, la vitre reçoit un flux de chaleur par condensation et par convection naturelle de la zone tampon et par rayonnement infrarouge de la surface d'évaporation ce qui favorise l'élévation de sa température mais cette élévation devient lente à cause du flux qui n'est pas tellement variable dans la période de 6h à 12h 30 et aux pertes thermiques par conduction, convection et rayonnement aux profit du milieu extérieur. Parallèlement, on a mesuré la température de la vitre intérieure, on a observé la même variation que la température extérieure. On remarque que l'écart entre ces deux températures est important. Par absorption du flux énergétique, le bac absorbant s'échauffe entraînant l'échauffement rapide de l'eau qui reste toujours moins chaude que le bac. L'accroissement de la température est lent, car une fraction du flux énergétique utile sert à l'évaporation de l'eau. On remarque que l'accroissement de l'énergie d'évaporation et la diminution du flux solaire incident provoquent la chute de la température de l'eau. Le bac absorbe le maximum de flux solaire, en raison de sa couleur noir, ce qui provoque l'accroissement progressif et rapide de sa température. Le flux solaire est variable, pour favoriser l'évaporation, le bac transmet toute l'énergie interceptée à l'eau. En raison de la capacité calorifique de l'eau, il s'ensuit alors un décroissement de la température du bac, tout en restant supérieure à celle de

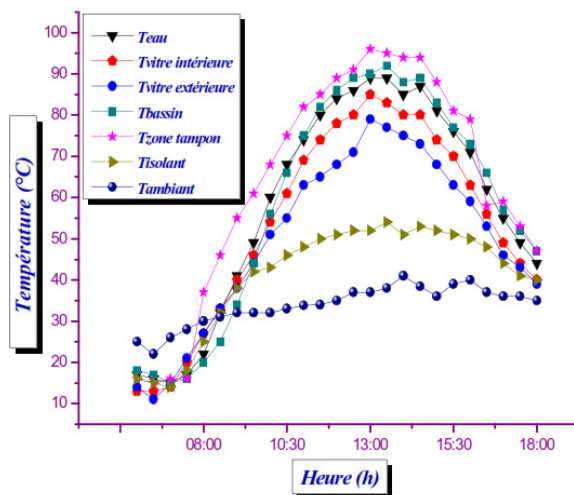
l'eau. L'élévation de la température de la zone tampon est due aux chaleurs cédées par la vitre et la surface d'évaporation et cela par convection naturelle. L'élévation de la température devient lente au fait de l'importance des pertes thermiques, et au flux qui devient constant pendant la période 12h 30 à 14h. La température chute légèrement tout en restant supérieure à la température de la vitre.



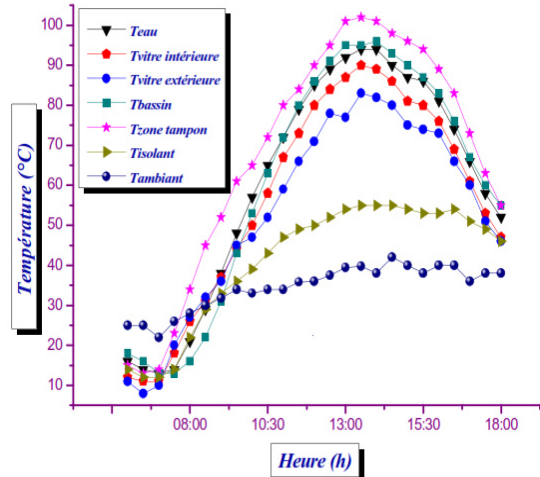
19/05/2012



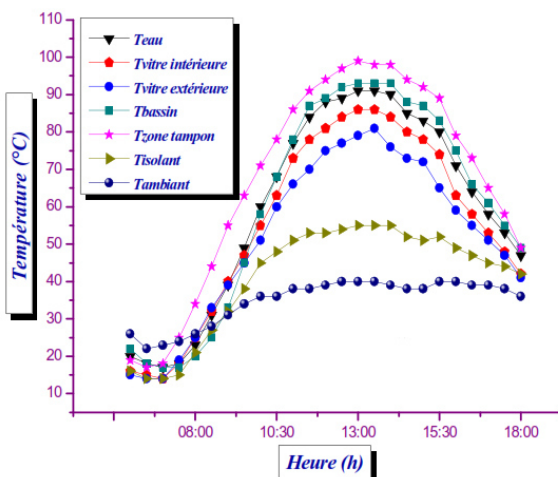
20/05/2012



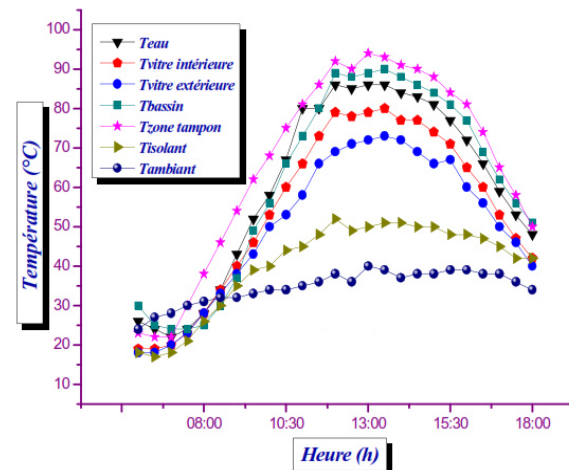
21/05/2012



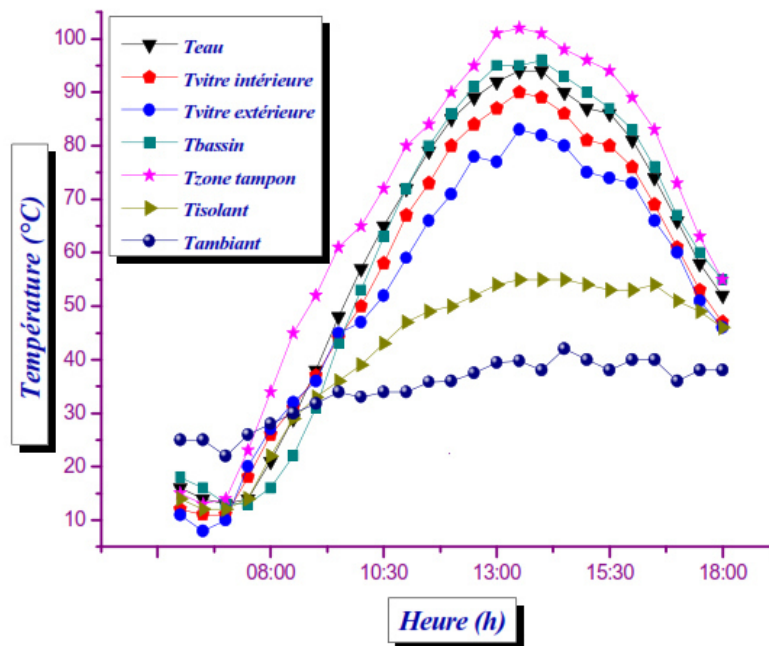
23/05/2012



26/05/2012



28/05/2012



29/05/2012

Figure 36 : Variation des températures au cours des journées des expériences

L'eau distillée conserve des ions qui sont présent dans l'eau d'origine, minéraux compris. L'étape de distillation ne permet pas d'enlever tout ce que l'eau contient. L'eau déminéralisé est censée être de l'eau très pure avec quasiment aucune impureté, mais contient des sels. Le **tableau 4.3** présente les grandeurs suivantes : Taux De Salinité (TDS), PH, conductivité, salinité avant est après la distillation.

Tableau 4.3 : Caractéristiques chimiques de l'eau distillée

Distillation	TDS (mg/l)		PH		Conductivité (µS/cm)		Salinité (ppm)	
	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après
19/05/2012	506	20,4	8,24	6,09	948	39,3	0,5	0
20/05/2012	504	32,6	8,34	7,09	915	64,4	0,5	0
21/05/2012	496	17,5	8,24	6,98	931	33,6	0,4	0
23/05/2012	496	36,6	8,47	7,74	932	68,6	0,4	0
26/05/2012	485	41,8	8,14	7,29	810	79	0,4	0
28/05/2012	490	50,1	8,07	7,07	920	31,5	0,4	0
29/05/2012	490	62,4	8,17	7,33	920	99,6	0,4	0,1

Les variations des paramètres avant la distillation sont dues aux couches géologiques de la terre, par exemple en hiver la conductivité augmente, la pluie a aussi une influence ; c'est-à-dire elle fait diminuer la conductivité, le TDS et la salinité. Le PH, décrit la concentration des ions hydrogénés dans un liquide. Ceci détermine dans les termes chimiques si l'eau est par exemple acide, neutre ou basique. L'eau pure a une valeur neutre de 7. Des valeurs inférieures démontrent qu'un liquide est acide et des valeurs supérieures démontrent qu'un liquide est basique (alcalin). Dans notre expérience le PH dépend de la teneur en espèce carbonaté (CO₂,

Bicarbonate et carbonate), le CO_2 influe sur le PH puisque le CO_2 est un acide quand il s'évapore le PH augmente, cela prouve que l'eau est saturée au Bicarbonate. Les tests après la distillation montrent qu'il y a une diminution des grandeurs citées ci-dessus à cause de l'absence des sels puisque le pourcentage de la salinité devient 0 dans la plupart des tests, lorsqu'on dit les sels on dit la conductivité, PH et TDS. Enfin, on peut dire que notre distillateur fonctionne bien, est donne des bons résultats. Tous les résultats présentés ci-dessus sont issus de l'expérience. Maintenant, on va présenter quelques résultats théoriques (à partir de la modélisation) concernant le deuxième distillateur solaire.

La **figure 37** présente la variation des températures en fonction du temps. La température du bac atteint une valeur maximale de 90°C , ceci s'explique par le coefficient d'absorption assez élevée de la peinture noire. La température de l'eau est proche de celle du bac, cette dernière est chauffée surtout par convection et d'un degré moindre par conduction (convection naturelle). La faiblesse de la température de la vitre à celle de l'eau s'explique par l'échange convectif avec l'ambiant, ceci permet à la vapeur d'eau de se condenser sur la face intérieure de la vitre. La zone tampon est le domaine de la vapeur saturée, où la température est assez élevée. On a une variation classique en forme de cloche du rayonnement solaire.

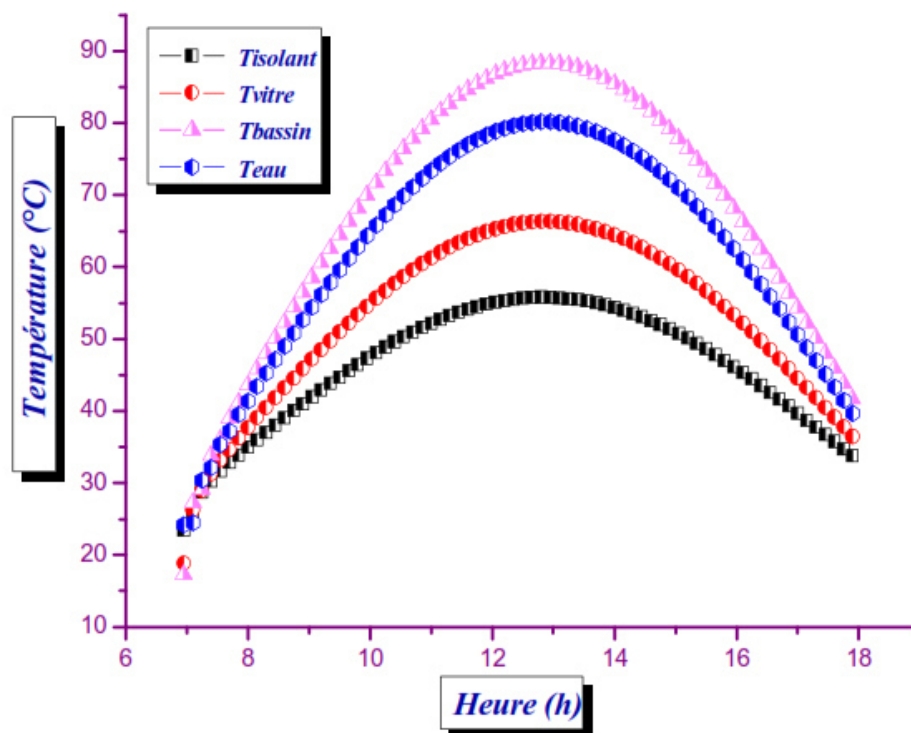


Figure 37 : Variation des températures des différents éléments du distillateur.

On observe dans la **figure 38** l'influence de la vitesse du vent sur la température de la vitre, l'écart de la température varie graduellement pour atteindre une valeur maximale de 8°C environ à midi solaire vrai. Par contre, on constate une faible influence du vent sur la température de l'eau, c'est l'effet de serre proprement dit.

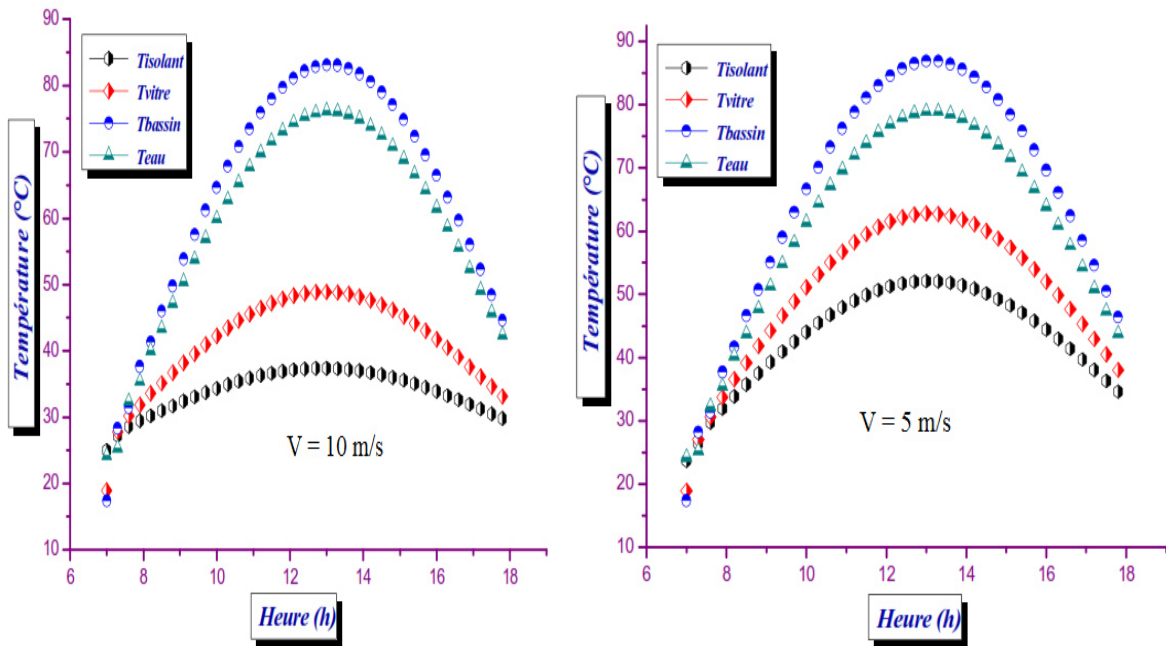


Figure 38 : Influence de vent sur les températures de distillateur.

Il apparaît nettement, sur la **figure 39** que l'efficacité globale d'un distillateur solaire est une fonction croissante avec le temps, cependant cette croissance s'atténue pour des valeurs élevées de l'irradiation solaire.

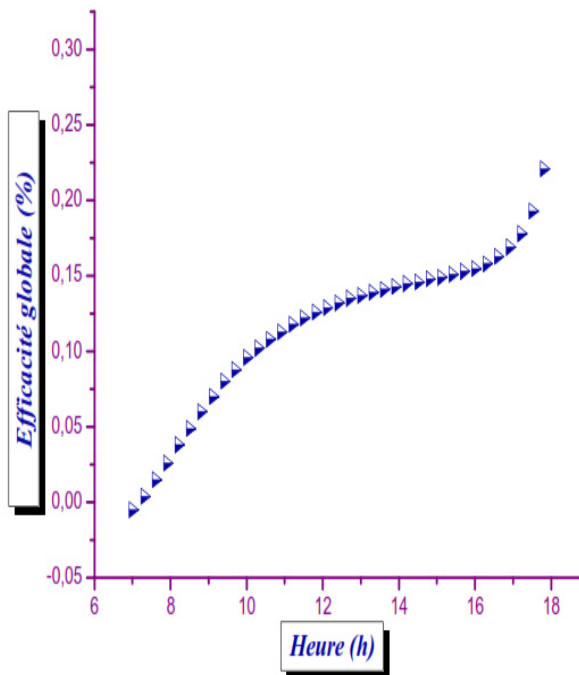


Figure 39 : Efficacité globale.

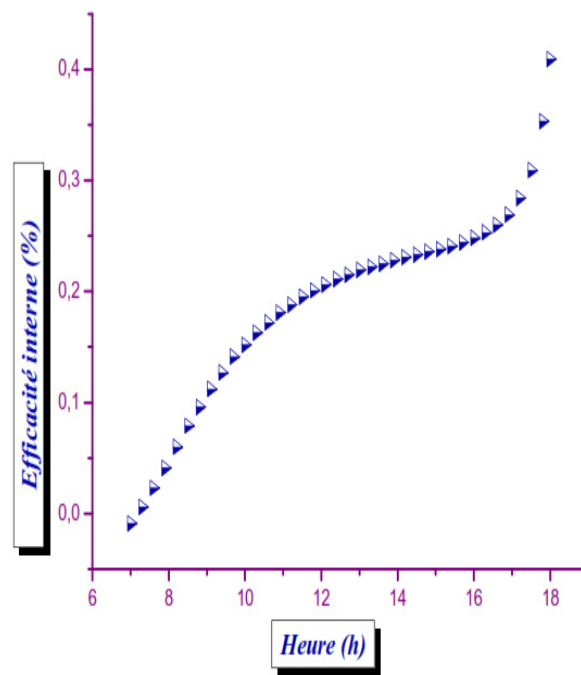


Figure 40 : Efficacité interne.

Nous remarquons sur la **figure 40**, comme précédemment que l'efficacité interne du distillateur solaire conventionnel a une allure croissante.

D'après les résultats de la **figure 41** relatifs au facteur de performance du distillateur, on peut constater que quel que soit l'état du ciel le facteur de performance du distillateur reste faible.

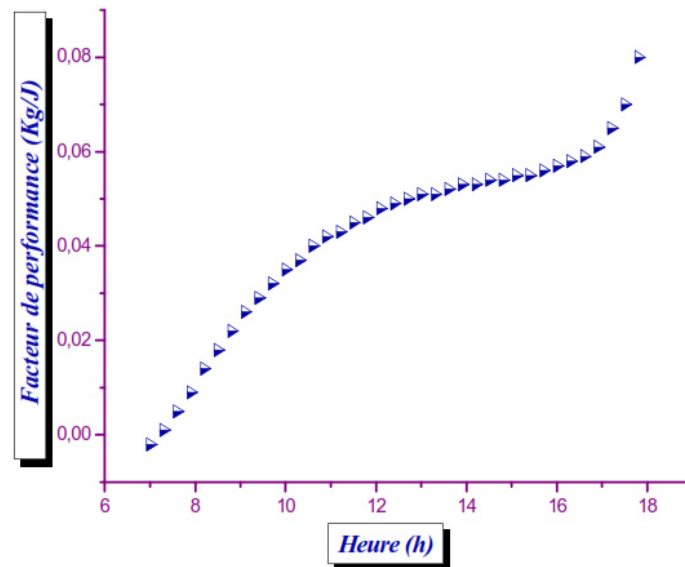


Figure 41 : Facteur de performance.

La comparaison entre la théorie et l'expérience a été faite pendant la période allant de 8h à 18h dans laquelle on a pu constater l'allure des courbes des températures en fonction du temps et du flux solaire transmit par la vitre au milieu intérieur du distillateur. Cette comparaison donne plus de précision sur l'allure de la courbe, que sur les valeurs des températures. Malgré la précision de mesures, on a pu constater une analogie entre la théorie et l'expérience. On notera que les températures des différents constituants du distillateur varient en fonction du flux solaire incident. Elles augmentent plus vite que la température ambiante, c'est la qui commence l'effet de serre.

D'après les courbes qui vont suivre, on observe qu'il y a un écart entre les valeurs numériques et expérimentales, cet écart est probablement dû aux hypothèses faites pour la modélisation.

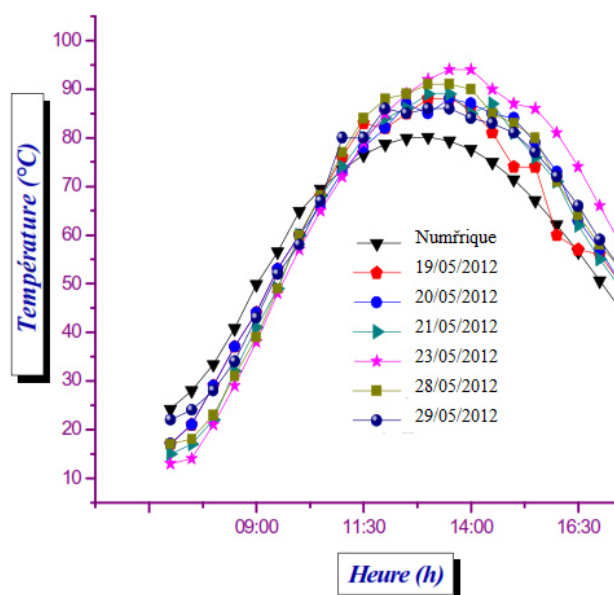


Figure 42 : Températures de l'eau.

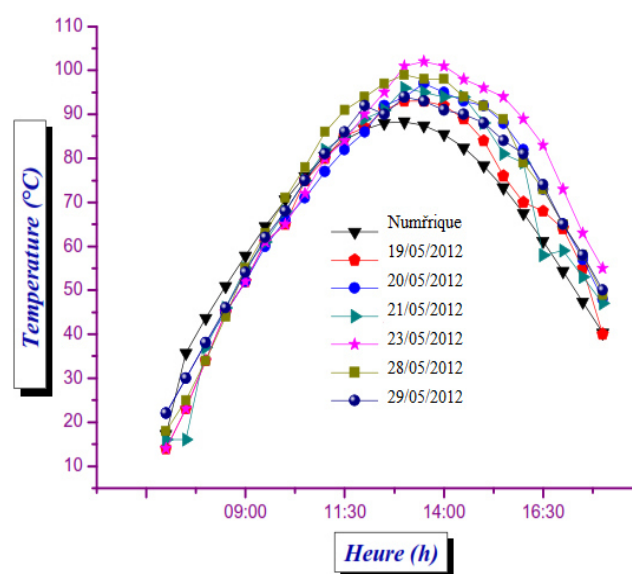


Figure 43 : Températures du bac.

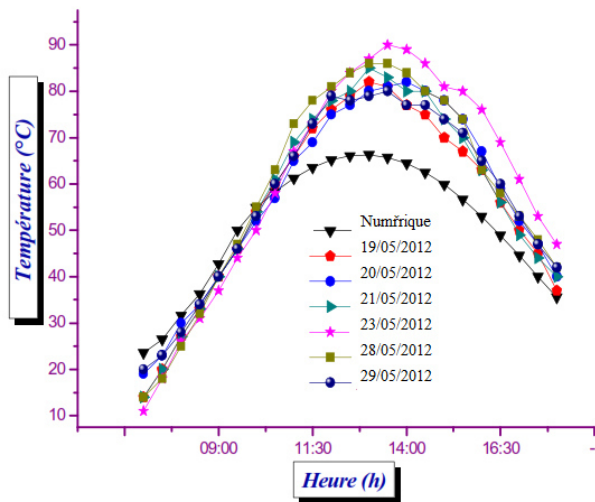


Figure 44 : Températures de la face extérieure de la vitre.

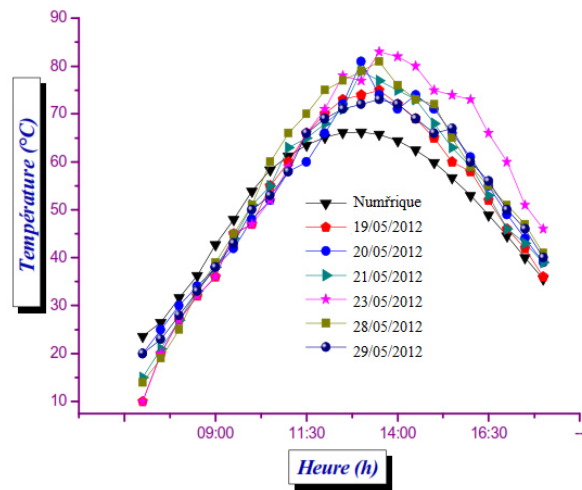


Figure 45 : Températures de la face intérieure de la vitre.

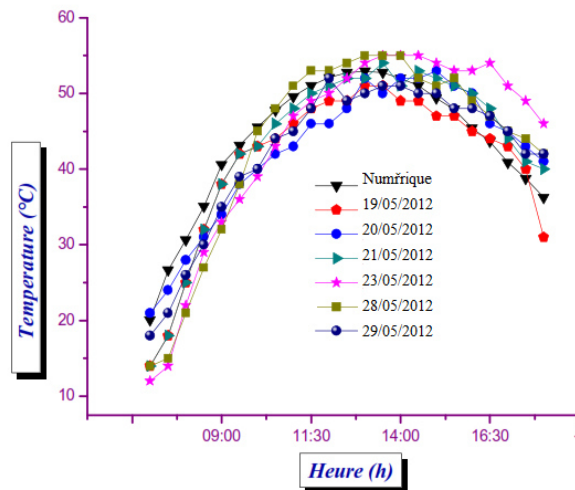


Figure 46 : Températures de l'isolant.

Après la présentation, des graphes cités ci-dessus, on a calculé l'erreur relative et on a trouvé que la valeur de l'erreur est importante dans l'intervalle [6h - 9h], et pendant l'intervalle [15h 30 -18h]. Dans l'intervalle [9h -15h 30], l'erreur est acceptable, elle est comprise entre [0,2%, -0,2%].

Ayant modélisé et simulé numériquement le distillateur solaire, on a remarqué que dans la durée d'insolation, la température des différents éléments du distillateur suit l'évolution du rayonnement solaire. D'où les maxima se trouvent là où le rayonnement solaire est maximal.

- Application numérique : Les performances énergétiques du distillateur solaire que nous avons réalisé au laboratoire sont déterminées à partir du calcul du bilan énergétique. Les données sont prises pour une heure de production d'eau douce choisie entre 12h à 15h où on a un maximum d'ensoleillement :

$$\begin{array}{llll}
 T_b = 59.309^\circ\text{C} & T_v = 44.09^\circ\text{C} & T_a = 19.739^\circ\text{C} & G = 619.87 \text{ W/m}^2 \\
 t = 14.35167 \text{ h} & \dot{m}_e = 0.065 \text{ l/m}^2/\text{h} & X_1 = 0.64\text{m} &
 \end{array}$$

Le but de ce calcul est de déterminer la relation entre la température, la pression et le rendement du distillateur solaire étudié.

Voici quelques coefficients essentiels pour une bonne plénitude de nos calculs :

$$Nu = \frac{h_{cw} \times X_1}{\lambda} ; Nu = C(Gr \cdot Pr)^n ; Gr = \frac{X_1 \rho^2 g \beta' \Delta T}{\mu^2} ; Pr = \frac{C_p \mu}{\lambda} ; R_e = \frac{\rho \cdot V \cdot X_1}{\mu}$$

La température moyenne T_m d'après la relation :

$$T_m = \frac{T_\infty + T_p}{2} = \frac{T_b + T_v}{2} \Rightarrow T_m = \frac{59.309 + 44.09}{2} = 51.6995^\circ C \Rightarrow T_m = 51.6995^\circ C$$

Les valeurs des constantes sont calculées pour une température $T_m = 51.6996^\circ C$:

$$\begin{aligned} \rho &= 929 \text{ Kg} / \text{m}^3 & C_p &= 1,645 \text{ KJ} / (\text{Kg}^\circ \text{C}) & k &= 0,48 \text{ W} / \text{m}^\circ \text{C} \\ \mu &= 0.53610^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s} & \beta' &= 4.5910^{-4} \text{ K}^{-1} & \nu &= 0.54310^{-3} \text{ m}^2 / \text{s} \\ Pr &= 1.8369 & Gr &= 1.317510^{11} & Gr \times Pr &= 2.42010^{11} \\ Nu &= 841.27675 & C &= 0.135 \text{ et } n = 1/3 \end{aligned}$$

Tel que les coefficients sont pris du tableau suivant :

$Gr \times Pr$	C	n
10^{-3} à $5,10^2$	1.18	1/8
$5,10^2$ à $2,10^7$	0,54	1/4
$2,10^7$ à 10^{13}	0,135	1/3

Les propriétés de transmission du verre : ce matériau est pratiquement transparent pour le rayonnement solaire ($\tau_v = 0.95$) situé dans le visible. Tous les corps transparents $\alpha \approx 0.05$, en tenant compte de l'eau salée, on prend $\alpha_w = 0.08$ en supposant que l'absorption est faite par un corps noir non brillant, soit $\alpha_b \approx 1$.

$$\tau_v = 0.95 \quad \rho_v = 0.05 \quad \rho_w = 0.02 \quad \alpha_b \approx 1$$

Tous les résultats de calcul sont donnés dans le **tableau 4.4**.

Tableau 4.4 : Résumé de différentes performances énergétiques

Grandeur	Valeur calculée
Chaleur de vaporisation entre eau et bassin q_e	$43.001 \text{ W} / \text{m}^2$
Quantité de chaleur par convection entre le bassin et vitrage $q_{conv,b-v}$	$9.6025 \text{ KW} / \text{m}^2$
Quantité de chaleur par rayonnement $q_{rad,b-v}$	$106.5506 \text{ W} / \text{m}^2$
Quantité de chaleur par rayonnement $q_{rad,v-a}$	$211.64092 \text{ W} / \text{m}^2$
Quantité de chaleur par convection entre vitrage et ambiante $q_{conv,v-a}$	$416.4021 \text{ W} / \text{m}^2$
Coefficient d'échange par convection h_{cw}	$630.9575 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot ^\circ \text{C}$
Quantité de chaleur d'eau q_w	$-454.9611 \text{ W} / \text{m}^2$

Le signe négatif de la quantité de chaleur d'eau c'est -à -dire la direction du q_w c'est inverse dans le bilons énergétique d'un distillateur simple effet entre le bois et l'eau salée.

La valeur de la quantité chaleur d'eau salée devienne $q_w = 454.961W / m^2$.

La relation entre la température et la pression d'après la loi suivant : $P = R_1 \cdot T + R_2$ (1)

On trouve les constantes R_1 et R_2 de saturation par vaporisation entre pression et température

et l'équation devient : $P = 348,883 \cdot T + 152,9 \cdot 10^3$ (2)

D'autres caractéristiques énergétiques sont données dans le **tableau 4.5**.

Tableau 4.5 : Caractéristiques énergétiques

$h_1 = 7.00011W / m^2 \cdot C$	$\rho = 929Kg / m^3$	$C_p = 1.645KJ / (Kg \cdot C)$
$h_2 = 25.2901W / m^2 \cdot C$	$A = 0.69 m^2$	$U = 0.058479W / m^2 \cdot C$
$h_{eff} = 2.82529W / m^2 \cdot C$	$M_v \frac{dT_v}{dt} = 70.49265W / m^2$	
$h_3 = \frac{454.961}{\theta_{x=0} - T_w}$	$M_w \times \frac{dT_w}{dt} = (1 - \rho_v) \times (1 - \alpha_v) \times \alpha_w G - q_{rad.bv} - q_{conv} + q_w$	

Les valeurs de h_3 et $M_w \frac{dT_w}{dt}$ ne peuvent être calculés que si on a les valeurs de la température d'eau salée, qu'il faut mesurer dans l'eau salée qui donne la variation de température T_w par rapport au temps t.

Le rendement de distillateur est estimé soit par la production journalière ou soit par la

capacité du distillateur exprimée par la relation suivante : $\eta = \frac{q_u}{A \cdot G} = \frac{m_w \cdot L}{A \cdot G}$ (3)

Avec q_e : Quantité de chaleur qui est absorbé par la vaporisation de l'eau

A : Surface d'échange du vitrage.

L : Chaleur latente de vaporisation de l'eau salée (w h/kg)

m_w : Débit distillat (kg/h)

G : L'éclairage global incident sur le vitrage (w/m²)

La chaleur latente de vaporisation de l'eau est donnée par : $L = 883 - 0.6687(T_w + 273.15)$ (4)

Où $T_w = 44,09^\circ C$ est la température de l'eau.

L'application numérique donne un rendement de 64.622 % pour une heure de fonctionnement entre 12h et 15h.

Les paramètres énergétiques de la conversion thermique par rayonnement solaire ont été mesurés avec des appareils limités par les incertitudes de mesures, les températures mesurées T_v et T_b avec les thermocouples ayant une incertitude $\pm 0.1^\circ C$ et la température ambiante avec une incertitude de $0.65 \pm ^\circ C$. Les calculs du bilan énergétique du distillateur étudié sont basés sur les températures mesurés avec incertitudes. Les résultats peuvent varier mais n'influe pas beaucoup sur le rendement et les caractéristiques énergétiques afin de minimiser les erreurs de mesures et de calculs.

✚ *Conclusions* : L'étude expérimentale a permis de concevoir et de tester un nouveau distillateur solaire. Le prototype conçu est démontable et autonome. Parmi ses éventuelles utilisations, son usage en milieu agricole serait d'un apport plus qu'indispensable (essai de l'utilisation d'un distillateur en élevage avicole). Les sept jours de tests qui ont été effectués durant le mois de Mai, nous ont permis de comprendre le fonctionnement du distillateur solaire, de vérifier sa conception et de mesurer son rendement (production) en eau distillée. Les résultats des tests nous ont conduits aux conclusions suivantes :

- Une bonne conception du distillateur solaire : rendement élevé, hermétiquement bien fermé, pas de rechute des gouttelettes dans l'eau, facilement démontable (pour le nettoyage, réparations et transport), autonome en énergie et facile à concevoir,
- Une production maximale de 2,82 l d'eau distillée est un bon rendement comparativement aux distillateurs conçus à travers le monde et surtout à celui de 2011,
- L'effet le plus important sur le rendement du distillateur solaire est la radiation solaire,
- La poursuite du mouvement du soleil par le distillateur fait augmenter considérablement son rendement,
- Plus la quantité de la solution qui séjourne dans le distillateur est faible, plus il y a d'évaporation, mais cela ne veut pas dire qu'il y a plus de production (un séchage de la plaque absorbante, diminue la surface de contact entre la solution et l'absorbeur),
- La pose de l'aluminium comme isolant thermique sur la face externe du distillateur solaire a fait augmenter la production d'eau distillée,
- La température du mélange air-vapeur à l'intérieur du distillateur varie en fonction de la radiation solaire.

2.2 Capteur solaire :

L'évolution du rendement journalier et les équations de caractérisation du capteur solaire plan étudié par le calage hivernal est représentée graphiquement. La **figure 47** est relative au lissage de premier degré et la **figure 48** est relative au lissage de second degré.

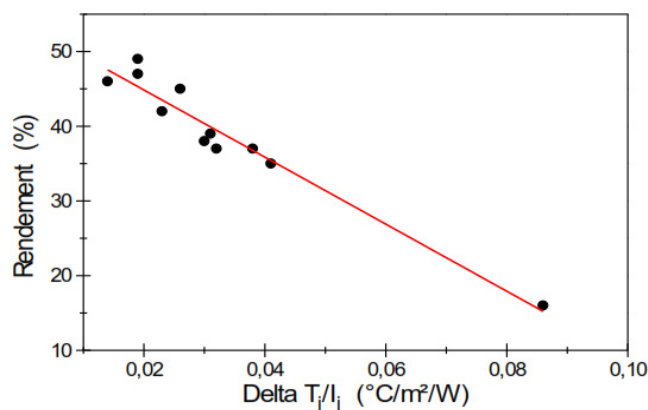


Figure 47 : Evolution du rendement journalier η_j en fonction de $\Delta T_j / I_j$ avec un lissage linéaire de premier degré.

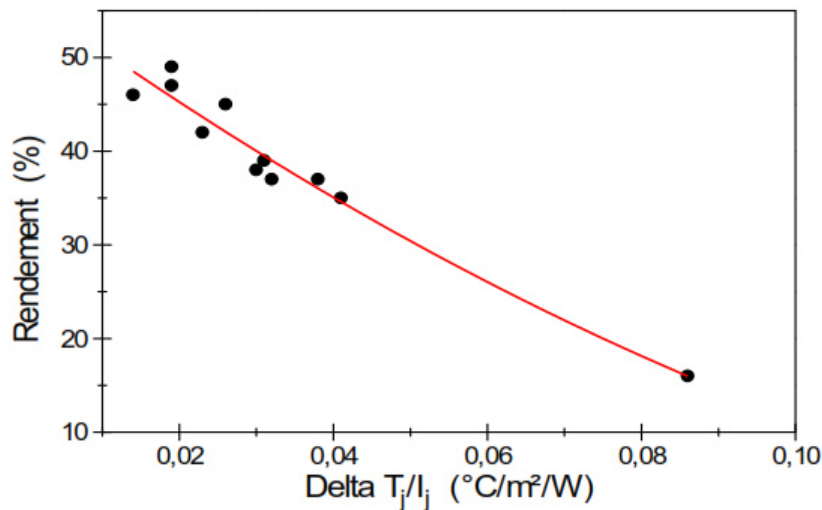


Figure 48 : Evolution du rendement journalier η_j en fonction de $\Delta T_j/I_j$ avec un lissage non linéaire de second degré.

Les équations de caractérisation du capteur solaire étudié en calage hivernale testé en période d'été sont données comme suit :

- Lissage du premier degré avec une déviation standard :
$$\eta_j = 0,53 - 4,49 \cdot \frac{\Delta T_j}{I_j} \quad (5)$$

- Lissage du second degré avec une déviation standard :
$$\eta_j = 0,56 - 5,94 \cdot \frac{\Delta T_j}{I_j} + 14,21 \cdot \left(\frac{\Delta T_j}{I_j} \right)^2 \quad (6)$$

L'analyse des différents résultats obtenus par cette première série de tests montre que pendant la durée de captation du rayonnement solaire au voisinage de la température ambiante le capteur solaire a un bon rendement qui est aux alentours de 50%. Cette performance s'explique par les plus faibles pertes optiques et thermiques à travers le vitrage du système. En tenant compte des moyens de réalisation de notre système, de sa simplicité et de son prix de revient qui est assez faible et par comparaison avec les performances d'autres capteurs solaires plus sophistiqués trouvés dans la littérature, nous pouvons conclure que notre prototype reste compétitif avec un rapport qualité/prix très appréciable. D'après les tests expérimentaux sur notre système et les différents résultats obtenus, nous retrouvons que plus l'éclairement solaire est perpendiculaire sur la surface de captation plus la quantité de chaleur absorbé est considérable, parce que la transmittivité de vitrage ainsi que l'absorptivité de la plaque absorbante sont inversement proportionnelles à l'angle d'incidence du rayonnement solaire. Il est donc très important de bien choisir l'inclinaison du capteur solaire en fonction des saisons pour mieux tirer profit du système. De façon générale, nous recommandons les inclinaisons suivantes :

- En période d'hiver : La latitude du lieu considéré augmenté de 15° ($35,28$ [latitude de Tlemcen par exemple] + 15°).
- En période estivale : La latitude du lieu considéré.

En ce qui concerne l'évolution des températures d'entrée et de sortie de l'air, la comparaison des résultats affichés par notre application informatique est effectuée par rapport au travail expérimental qui a été mené au sein du laboratoire d'énergétique et matériaux au niveau de la faculté de technologie de l'université de Tlemcen situé au Nord-ouest Algérien à une latitude $35,28^\circ$, une longitude de $-1,17^\circ$ et une altitude de 750m. On a confronté les résultats fournis expérimentalement avec ceux délivrés numériquement et ils sont illustrés dans les figures affichées ci-dessous. La **figure 49** représente la variation temporelle des températures de chaque élément du capteur. Dans cette figure, l'absorbeur et la face intérieure de l'isolant ont des températures les plus élevées, ceci est dû à la puissance absorbée par l'absorbeur qui est importante et qui est supérieure à celle absorbée par la vitre, ainsi l'isolant est placé au-dessous de la plaque absorbante, ce dernier possède une conductivité thermique élevée. La température la plus basse est celle de l'isolant de la face arrière, indiquant que l'isolant possède une faible conductivité thermique. L'augmentation des températures du vitrage intérieure et extérieure est due à l'absorption par la vitre du rayonnement solaire incident et de la chaleur cédée par l'absorbeur (par convection et par rayonnement). La température de la face intérieure est légèrement supérieure à celle de la face extérieure, ceci s'explique par l'emprisonnement du rayonnement solaire infra rouge à l'intérieur du capteur augmentant ainsi la température à l'intérieur de la vitre par rapport à l'extérieur, qui est affectée à l'action du vent. La température de sortie du fluide caloporteur est légèrement inférieure à celle de l'absorbeur, à cause des pertes.

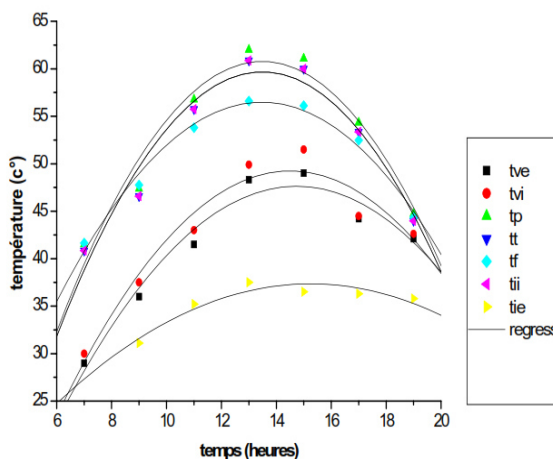


Figure 49 : Variation temporelle des températures de chaque élément du capteur.

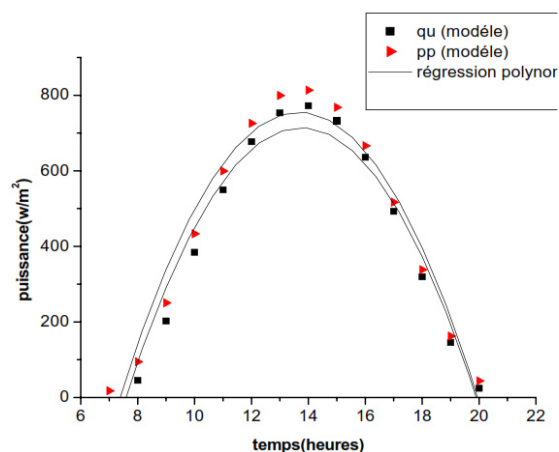


Figure 50 : Variation de la puissance absorbée par l'absorbeur et la puissance utile au cours du temps.

On remarque que la puissance utile à la même allure que celle de la puissance absorbée, où la puissance maximale atteint son maximum lorsque la puissance absorbée par l'absorbeur se trouve au maximum. Mais les valeurs de la puissance utile reçue par le fluide caloporteur sont inférieures à celles de la puissance absorbée par l'absorbeur, qui est dû aux pertes au niveau

de l'absorbeur, mais la différence reste modeste. Ceci conduit à conclure que l'augmentation de la puissance absorbée par l'absorbeur influe directement sur la puissance transmise au fluide caloporteur. (**Figure 50**).

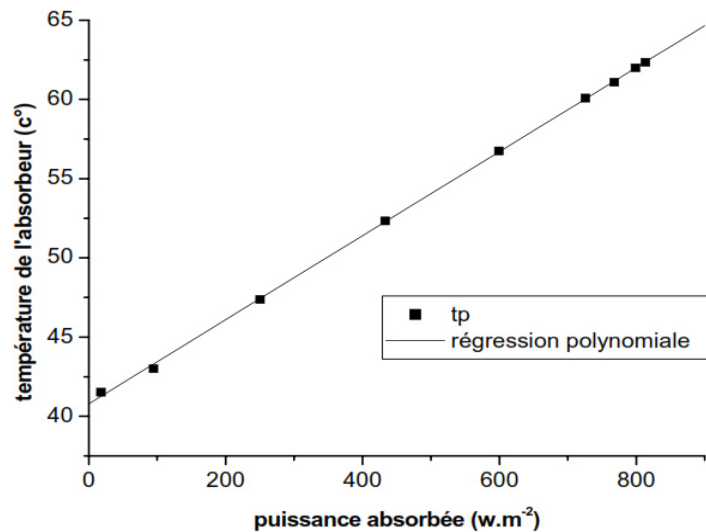


Figure 51 : variation de la température de l'absorbeur en fonction de la puissance absorbée

On remarque aussi que la température de l'absorbeur est d'autant plus grande que la puissance absorbée par l'absorbeur est plus forte (**Figure 51**).

Les résultats représentés sur les figures ci-dessus montrent qu'il y a un rapprochement entre les résultats expérimentaux et ceux de la modélisation, par rapport à un capteur solaire et pour les mêmes données d'entrée. A titre d'exemple, pour le 19/05/2012, la valeur expérimentale maximale est de $56,3^{\circ}C$ à 13 heure, correspondant ainsi à une valeur maximale fournie par la simulation numérique égale à $57,31^{\circ}C$ à la même heure, Cet écart est dû probablement au fait que le profil d'évolution de la température par approximation d'un polynôme de 4 degré, présente seulement la variation partielle au cours de la durée des expériences, par contre le profile évalué par la simulation numérique présente la variation de la température du levé jusqu'au coucher du soleil.

L'évolution temporelle de la température de sortie de l'air pour les différents sites fait montrer la confrontation entre les résultats obtenus expérimentalement et ceux fournis par la simulation numérique, et permet d'observer qu'ils sont très proches les uns des autres pour le site de Tlemcen, où la valeur maximale de la température de sortie de l'ordre de $76^{\circ}C$ par le travail expérimental alors qu'elle est aux environs de $73^{\circ}C$ par la simulation numérique.

2.2.1 Variation des pertes de chaleur :

On constate que le coefficient d'échange par convection entre l'absorbeur et le vitrage varie légèrement avec l'écart de température entre l'absorbeur et la vitre (**figure 52**), on constate aussi que le coefficient d'échange par rayonnement entre l'absorbeur et la vitre varie légèrement avec l'écart de température entre l'absorbeur et le vitrage (**figure 53**).

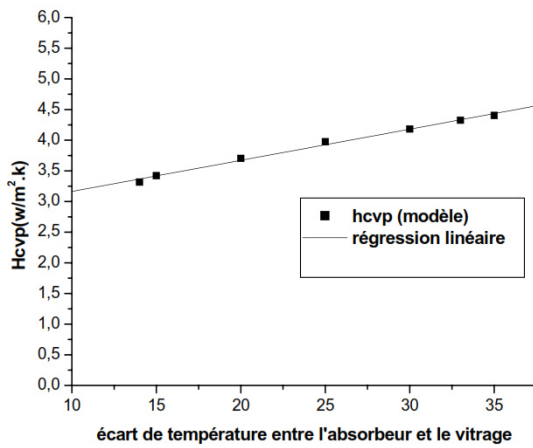


Figure 52 : Variation **Hcvp** en fonction de l'écart de température entre l'absorbeur et le vitrage.

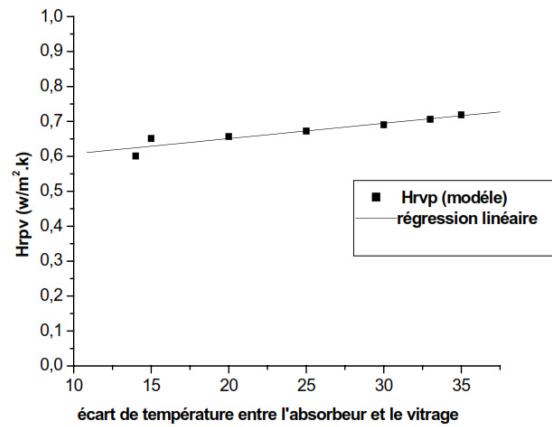


Figure 53 : Variation **Hrvp** en fonction de l'écart de température entre l'absorbeur et le vitrage.

D'autre part le coefficient des pertes globales varie légèrement avec la température de l'absorbeur, même pour des températures plus élevées de l'absorbeur le coefficient des pertes reste presque constant (**figure 54**).

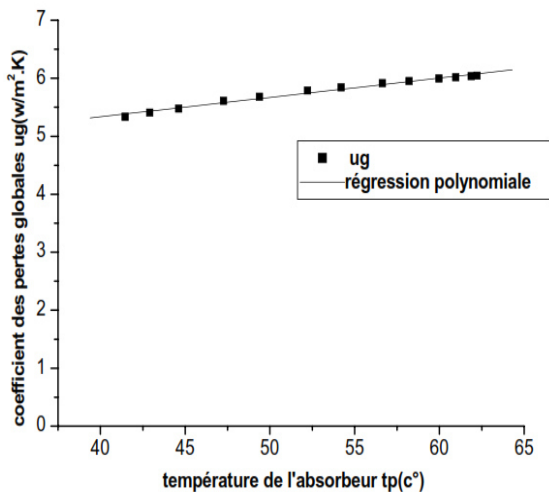


Figure 54 : Variation du coefficient des pertes globales (U_g) avec la température de l'absorbeur (T_p)

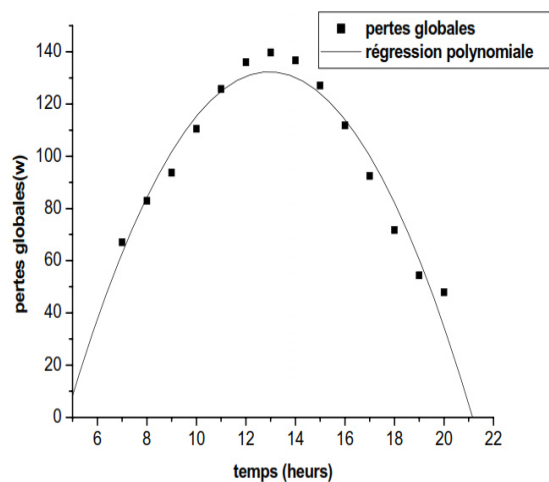


Figure 55 : Variation des pertes globales avec le temps.

Les pertes globales augmentent avec le temps jusqu'à atteindre le maximum puis elles descendent (**figure 55**). Cette augmentation est conditionnée par l'augmentation de la température de l'absorbeur.

2.2.2 Variation du rendement thermique en fonction de l'écart de température :

La **figure 56** montre que lorsque la température de l'absorbeur augmente, il y a une augmentation en même temps de la quantité de chaleur transmise au fluide et des pertes de chaleur, malgré cette évidence, le rendement continue à augmenter avec la température de l'absorbeur.

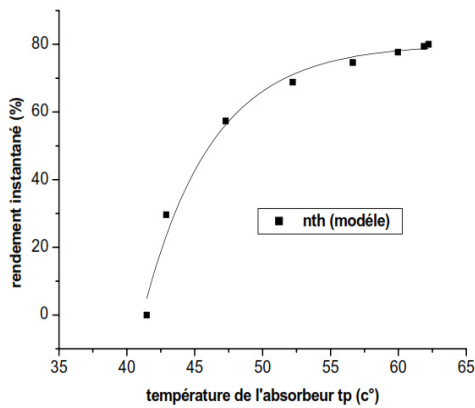


Figure 56 : Variation du rendement thermique instantané avec la température de l'absorbeur

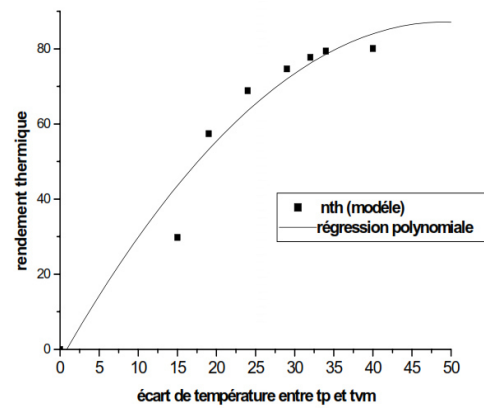


Figure 57 : variation du rendement thermique en fonction de l'écart de température entre l'absorbeur et la vitre

Selon la **figure 57**, le rendement thermique augmente aussi avec l'augmentation de l'écart de température entre le vitrage et l'absorbeur. L'augmentation de la température de l'absorbeur fait augmenter la puissance utile récupérée par le fluide caloporteur, même si les pertes augmentent aussi. L'analyse de la variation de l'allure du rendement thermique instantané montre que le rendement augmente graduellement pour atteindre des valeurs maximales de 80%, bien que l'irradiation solaire commence à décroître à partir de 12 h, ce qui semble en bon accord avec les résultats rencontrés dans la littérature, où l'écart est moins important, qui est dû certainement à la méthode empruntée durant la modélisation des équations caractéristiques, qui est faite par le procédé pas à pas, par contre, le cas de notre travail, nous avons utilisé la méthode globale au cours de la modalisation des performances thermiques du capteur solaire plan à air.

D'autre part, l'analyse des résultats montre successivement une bonne concordance entre les résultats fournis par la modélisation et ceux rencontrés dans la littérature, cependant, on tient à signaler que les écarts existants par rapport aux travaux expérimentaux et théoriques citées, comparativement avec ceux de notre modélisation, sont dû au phénomène de vieillissement des éléments constituant du capteur solaire, quand il s'agit de saisir les valeurs correspondantes aux paramètres thermophysiques et optiques, d'autre part les modèles d'éclaircissements considérés semblent inconvenables sous certaines conditions spécifiques .

III. Comportement en vieillissement du polyéthylène sous exposition thermique :

Comme pour la plupart des matériaux polymères, les propriétés du film en PE évoluent d'une manière défavorable et irréversible en fonction du temps lorsqu'ils sont soumis à des agressions solaires ou/et thermiques. Nous aborderons l'étude du vieillissement artificiel en vue de comprendre les mécanismes d'oxydation qui modifient les chaînes du film polymère en PE. Pour cela, nous procéderons, d'une part, à l'étude de la photo-oxydation accélérée du film PE et, d'autre part, à celle de la thermo-oxydation. L'évolution chimique du film en PE sera

utilisée comme critère de dégradation. L'étude de la variation des propriétés physiques macroscopiques, conséquence indirecte des modifications subies par le film en PE à l'échelle moléculaire au cours du vieillissement, a également été réalisée. En dernier lieu, l'examen de la γ -oxydation nous apportera des informations très utiles, pour la compréhension du mécanisme générale de photo-oxydation. Enfin, dans le but d'examiner les "dégâts" occasionnés par la photo-oxydation sur la surface des polymères, nous avons fait appel à la microscopie électronique.

3.1 Échantillonnage :

Le choix d'étudier des films minces se justifie par la volonté de découpler les différents mécanismes impliqués dans le processus de thermooxydation. En effet, dans le cas de films minces, on s'affranchit des phénomènes de diffusion de l'oxygène et des antioxydants.

3.2 Conditions de vieillissement :

Le film polymère en PE a subi un vieillissement accéléré à différentes températures à l'air sous pression atmosphérique. Les films de PE ont été vieillis à des températures mesurées à l'intérieur des dispositifs à effet de serres étudiés.

3.3 Etude analytique du vieillissement :

Dans ce paragraphe, il s'agit principalement de réaliser la caractérisation initiale du matériau étudié en vérifiant la nature du matériau fourni du PE, et de suivre le vieillissement thermique du PE.

3.3.1 Caractérisation initiale :

Avant le vieillissement, la composition chimique des films minces de PE a été vérifiée par spectrométrie infrarouge (IR) en mode transmission. Cette technique permet d'identifier et de doser les fonctions chimiques présentes au sein du matériau.

Sur le spectre IR du PE pur (**Figure 58**), nous avons retrouvé toutes les bandes d'absorption caractéristiques du PE identifiées par Gulmine et al. [6] et par George et al. [7]. Ceci confirme que notre matériau est un PE. Le **tableau 4.6** résume les principales bandes d'absorption IR du PE et leurs attributions [8] :

Tableau 4.6 : Bandes d'absorption IR du PE et leurs attributions

Nombre d'ondes ^a (cm ⁻¹)	Nombre d'ondes ^b (cm ⁻¹)	Attribution
2919		Elongation asymétrique du CH ₂
2851		Elongation symétrique du CH ₂
1473 et 1463	1460	Déformation de flexion du CH ₂
1377		Elongation symétrique du CH ₃
1366 et 1351	1362 et 1350	Déformation de balancement du CH ₂ de la phase amorphe
1306	1304	Déformation de torsion du CH ₂
	1076	Déformation de balancement du C-C de la phase amorphe
731 à 720	720	Déformation de rotation du CH ₂

^aResultats de Gulmine et al. [6], ^bResultats de George et al. [7].

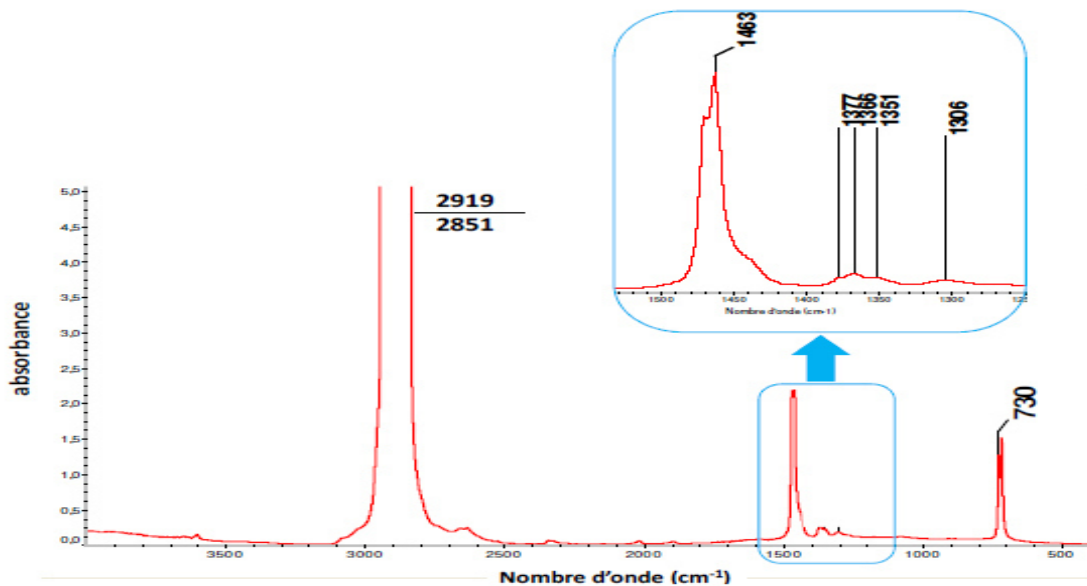


Figure 58 : Spectre IR en transmission d'un film de PE. La représentation inclut un zoom de la zone $1\ 550 - 1\ 300\ \text{cm}^{-1}$ pour montrer toutes les bandes d'absorption du PE.

D'autre part et afin de vérifier que notre matériau est un PE, nous avons eu recours à la densimétrie qui a permis d'évaluer précisément, au moyen d'une balance, la masse du corps et celle du même volume de solvant (l'eau dans cette étude) déplacé en utilisant le principe d'Archimède. La mesure de la densité a été réalisée à l'aide d'une balance analytique équipée d'un kit de mesure de densité avec une précision de 0,1 mg. Les 5 mesures (pour intégrer la dispersion des résultats) ont été réalisées assez rapidement (moins de 30 secondes) pour ne pas laisser le temps à l'eau de pénétrer dans les films.

La calorimétrie différentielle à balayage (DSC) a permis de déterminer la température de fusion T_f et le taux de cristallinité χ_c du PE. 5 essais ont été effectués afin de tenir compte de la dispersion des résultats. Le matériau dont nous disposons a une masse volumique de $\rho_{PE} = (0,929 \pm 0,01)\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, une température de fusion de $T_f = 115\ \text{°C}$ et un taux de cristallinité de $\chi_c = 39 \pm 0,02$. Ceci nous a permis de confirmer que le matériau est un polyéthylène basse densité (PEbd).

Nous avons réalisé des vieillissements accélérés sur le film mince du PE. Plusieurs techniques expérimentales ont été utilisées pour suivre l'apparition des produits d'oxydation, la perte des antioxydants, le temps d'induction à l'oxydation et la prise d'eau. Dans cette section, une attention particulière a été portée à l'évolution de la composition chimique du PE industriel, déterminée par spectrométries infrarouge et ultraviolet. Le film de PE a été exposé dans des étuves ventilées, à des températures entre 80 et 120 °C jusqu'à 40 jours. A intervalle de temps régulier, les échantillons ont été prélevés et analysés, notamment, par spectrométrie IR et UV. Nous avons suivi les produits d'oxydation du PE selon deux approches :

- L'approche classique qui consiste à suivre la concentration totale des produits carbonyles (C=O) et hydroxyles (-OH) à partir des absorbances des pics IR composites a $\approx 1720 \text{ cm}^{-1}$ et a $\approx 3400 \text{ cm}^{-1}$.
 - L'approche plus rigoureuse qui consiste à mettre en œuvre des techniques de dérivation chimique pour déterminer les concentrations élémentaires des différents produits d'oxydation.
- Dans l'approche classique, les produits d'oxydation du PE vieilli ont été analysés de façon globale par spectrométrie IR. La concentration totale des produits carbonyles (C=O) a été déterminée à partir de l'absorbance du pic IR composite centre vers 1720 cm^{-1} (**Figure 59**) en utilisant la loi de Beer-Lambert et un coefficient d'extinction molaire $\epsilon_{\text{C=O}}$ moyen.

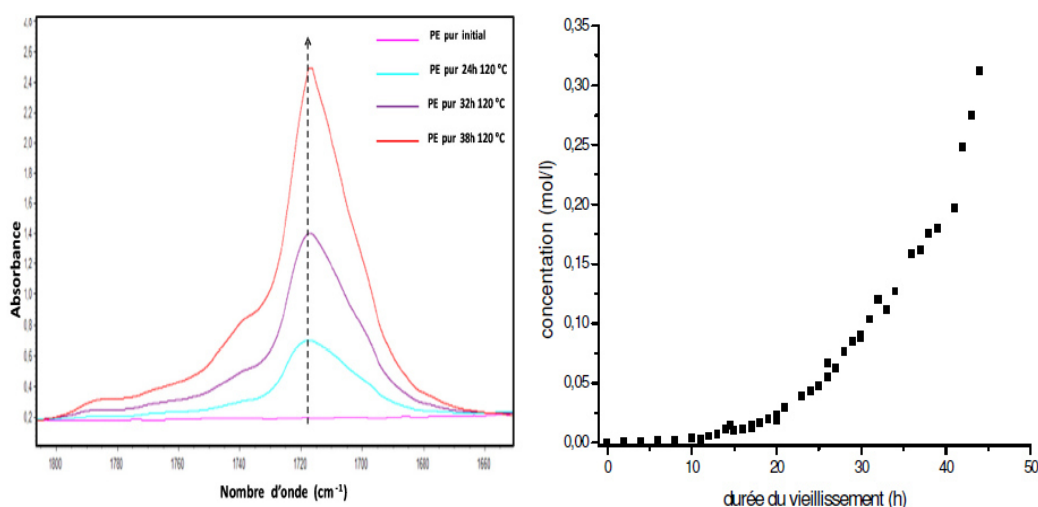


Figure 59 : Accumulation des espèces carbonyles (C=O) au cours du vieillissement thermique du PE pur dans l'air à 120 °C .

La valeur du coefficient d'extinction molaire moyen $\epsilon_{\text{C=O}}$ dépend à la fois des coefficients d'extinction molaire élémentaires des différents groupes carbonyles ϵ_i , mais aussi de leurs proportions molaires $\%_{\text{mol}}$. Typiquement, les coefficients d'extinction molaire élémentaires des carbonyles (C=O) varient entre $\approx 150 \text{ L.mol}^{-1}.\text{cm}^{-1}$ pour les aldéhydes et $680 \text{ L.mol}^{-1}.\text{cm}^{-1}$ pour les acides carboxyliques (**Tableau 4.7**).

En première approximation, nous avons choisi une valeur moyenne pour $\epsilon_{\text{C=O}}$ de $360 \text{ mol.L}^{-1}.\text{cm}^{-1}$. Cette valeur tient compte des proportions et des coefficients molaires des différents groupes carbonyles formés entre 80 et 120 °C dans l'air.

Tableau 4.7 : Coefficients d'extinction molaire utilisés pour déterminer la concentration des différentes espèces carbonyles par spectroscopie IR.

Nombre d'ondes (cm^{-1})	Composé	ϵ ($\text{mol L}^{-1} \text{cm}^{-1}$)
1718 - 1700	Acides carboxyliques	680 [9]
1735 - 1718	Cétones	350 [10]
1730 - 1736	Aldéhydes	155 [9]
1738 - 1746	Esters	590 [10]

Dans le cas des produits hydroxyles (-OH), la concentration totale a été déterminée à partir de l'absorbance du pic IR composite centre vers 3370 cm^{-1} (**Figure 60**) en utilisant la loi de Beer-Lambert et un coefficient d'extinction molaire $\epsilon_{\text{O=H}}$ moyen.

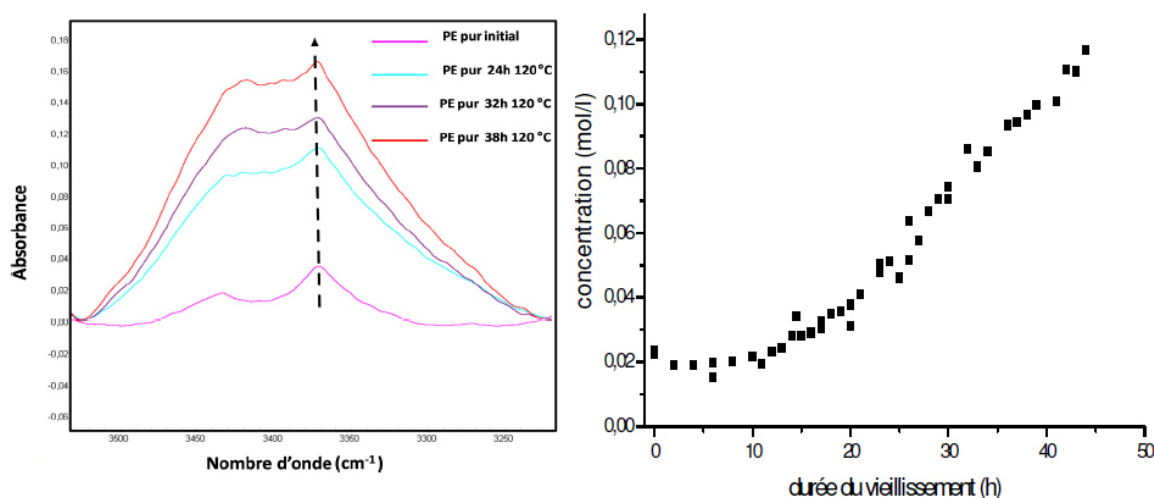


Figure 60 : Accumulation des espèces hydroxyles (-OH) au cours du vieillissement thermique du PE pur dans l'air à $120\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Cependant, les coefficients d'extinction molaire élémentaires des hydroxyles (-OH) c'est-à-dire des hydroperoxydes, des acides et des alcools sont du même ordre de grandeur $\approx 70\text{ mol.L}^{-1}.\text{cm}^{-1}$ (**Tableau 4.8**). Nous avons donc gardé cette valeur moyenne pour $\epsilon_{\text{O=H}}$.

Tableau 4.8 : Coefficients d'extinction molaire utilisés pour déterminer la concentration des différentes espèces hydroxyles par spectroscopie IR.

Nombre d'ondes (cm^{-1})	Composé	ϵ ($\text{mol L}^{-1} \text{cm}^{-1}$)
3550	hydroperoxydes libre (ROOH)	70 [11]
3415	hydroperoxydes associés (ROOH)	70 [11]
3550 – 3200	alcool/phenol	70 [10]
3200 - 2500	Acide	70 [10]

Les courbes d'accumulation des produits carbonyles (C=O) au cours du vieillissement thermique du PE à différentes températures dans l'air (**Figure 61**) mettent en évidence trois étapes successives de la cinétique d'oxydation :

- Une période d'induction (ou d'incubation) avant l'apparition des premiers produits d'oxydation,
- Une auto accélération brutale de l'oxydation au terme de cette période d'induction,
- Un régime stationnaire à vitesse d'oxydation constante.

On note également, sur cette courbe, que le temps d'induction et la vitesse maximale d'oxydation sont thermoactifs.

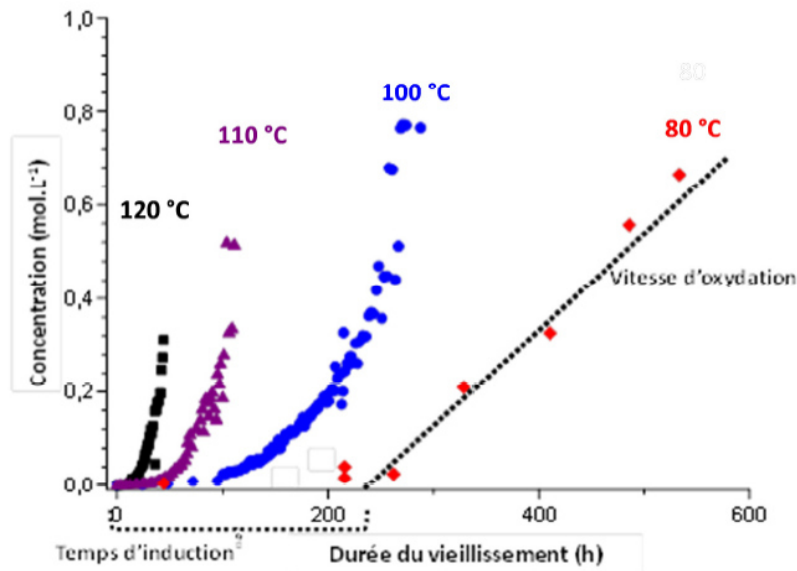


Figure 61 : Accumulation des espèces carbonyles (-C=O) au cours du vieillissement thermique du PE pur dans l'air a 80, 100, 110 et 120 °C.

La **Figure 62** présente le graphe d'Arrhenius du temps d'induction a l'oxydation a partir des données de la littérature compilées par Khelidj [12] (points en bleu), complétées par celles des travaux de Tireau [13] (points en rouge) et par celle de cette étude (points verts). On remarque que ce paramètre est indépendant de la nature du PE (taux de cristallinité, mode de polymérisation, degrés de branchement, etc. [12]). On remarque également que, de part et d'autre d'une température critique située vers ≈ 90 °C, le temps d'induction à l'oxydation (t_i) obéit a une loi d'Arrhenius : Si $T > 90$ °C alors $t_{i0} = 2,7 \cdot 10^{-10}$ s et $E_a = -108$ kJ.mol⁻¹, Si $T < 80$ °C alors $t_{i0} = 1,5 \cdot 10^{-07}$ s et $E_a = -89$ kJ.mol⁻¹.

L'origine de cette température critique a été discutée par Khelidj [12] dans sa thèse.

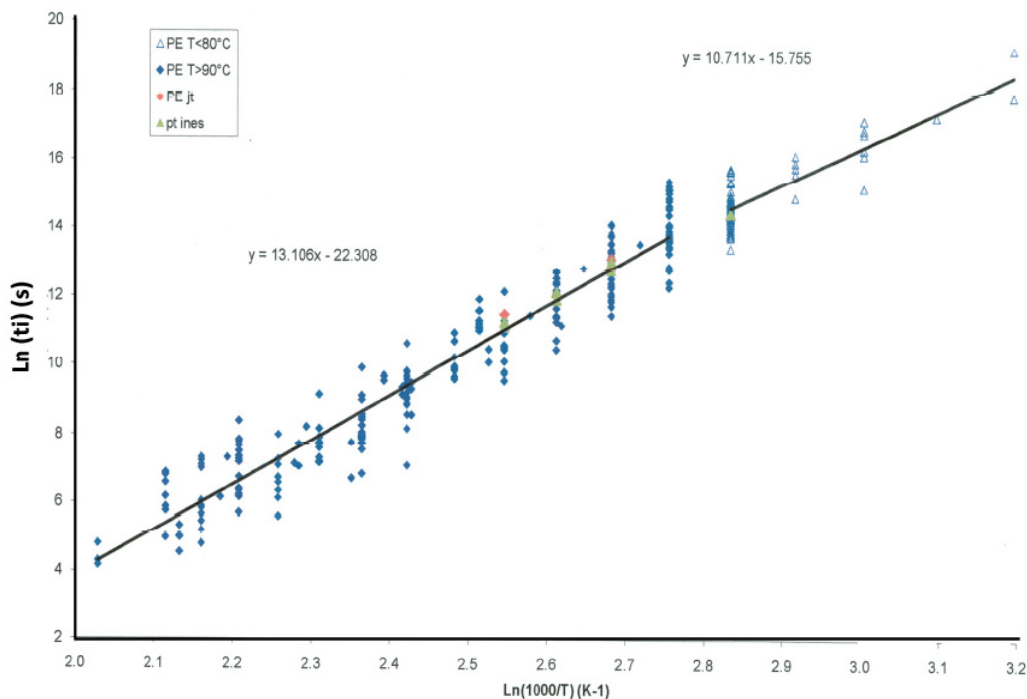


Figure 62 : Graphe d'Arrhenius du temps d'induction à l'oxydation (t_i) du PE dans l'air.

L'intérêt de différencier entre les différents groupes carbonyles et hydroxyles est double. Il s'agit d'une part, de calculer leur concentration exacte à partir de la loi de Beer-Lambert et des coefficients d'extinction molaire élémentaires correspondant, et d'autre part, d'identifier les groupes susceptibles d'interagir le plus fortement avec l'eau pour déterminer, par la suite, l'évolution (au cours du vieillissement thermique) des propriétés de l'eau saumâtre au sein du distillateur solaire. Cependant, la distinction entre ces différents groupes n'est pas facile sur le plan théorique et expérimental comme en témoigne la **Figure 62**. En effet, le massif carbonyle centre vers 1720 cm^{-1} correspond à la superposition d'un grand nombre de bandes d'absorption élémentaires possibles, attribuées aux aldéhydes, acides carboxyliques, cétones, esters, etc. [13, 14].

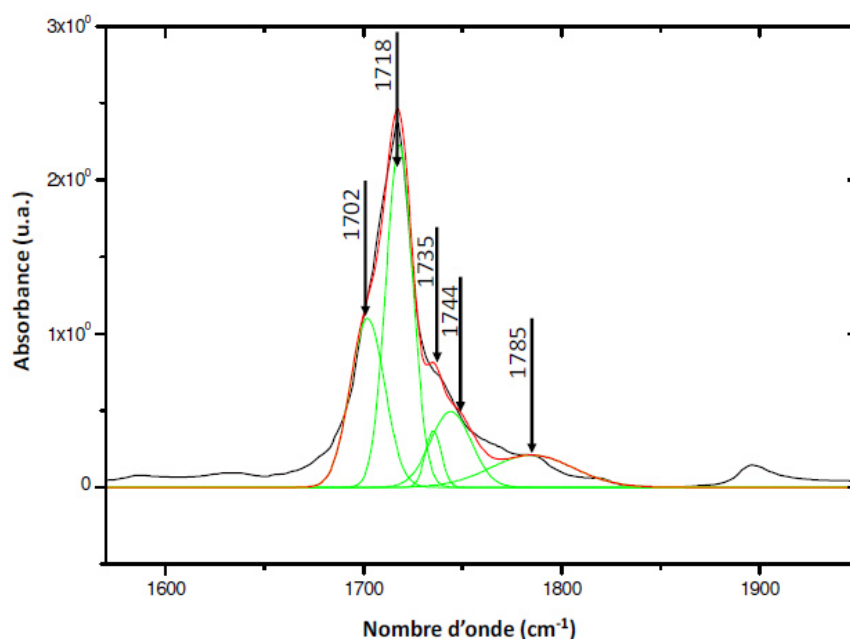


Figure 63 : Exemple de Déconvolution mathématique du massif carbonyle centre vers 1720 cm^{-1} du PE oxydé.

On voit qu'il est difficile d'identifier la contribution de chacune de ces espèces car le massif est relativement large et les bandes d'absorption sont nombreuses et assez proches. La Déconvolution mathématique, par exemple par le logiciel Originlab (**Figure 63**), est possible mais en prenant au moins 5 bandes d'absorption, ce qui conduit à un fort risque d'erreur. C'est la raison pour laquelle nous avons opté pour une déconvolution expérimentale par traitement chimique (souvent appelée dérivation chimique). Ce traitement consiste à exposer des films de PE pur vierges et vieillis dans des ambiances gazeuses réactives pour transformer complètement certains produits carbonyles ou hydroxyles en d'autres produits stables ayant des bandes d'absorption dans d'autres régions du spectre IR. L'avantage de cette méthode est double. D'une part, nous pouvons calculer la concentration des produits carbonyles ou hydroxyles ayant été complètement transformés à partir de l'absorbance de ces nouveaux pics

IR et de la loi de Beer-Lambert. D'autre part, il devient alors possible d'analyser le massif carbonyle ou hydroxyle résiduel, qui s'est alors considérablement simplifié, pour en déduire la concentration des produits carbonyles ou hydroxyles n'ayant pas réagi.

Dans cette étude, nous avons choisi d'exposer le film de PE dans une ambiance d'ammoniaque (NH₃) pendant une semaine à température ambiante. Ce traitement va agir sur [15] les acides carboxyliques en les transformant en carboxylates d'ammonium, ce qui déplace leur bande d'absorption vers 1550-1600 cm⁻¹ : $\text{RCOOH} + \text{NH}_3 \rightarrow \text{RCOO}^- \text{NH}_4^+$

Et sur les esters en les transformant en amides primaires, ce qui déplace leur bande d'absorption vers 1620-1680 cm⁻¹ : $\text{RCOOR}' + \text{NH}_3 \rightarrow \text{RCOONH}_2 + \text{R}'\text{OH}$

La **Figure 64**, montre l'évolution du spectre IR d'un PE oxyde, dans la zone des carbonyles, avant et après traitement par NH₃ pendant 7 jours. Nous notons une forte diminution de la bande d'absorption des carbonyles centrée vers 1720 cm⁻¹ et l'apparition d'une bande d'absorption intense des carboxylates vers 1555 cm⁻¹. Il y a donc eu transformation des acides carboxyliques en carboxylates. Par contre, on n'observe pas la formation d'amides ce qui indique qu'il n'y aurait pas de groupes esters parmi les produits d'oxydation du PE.

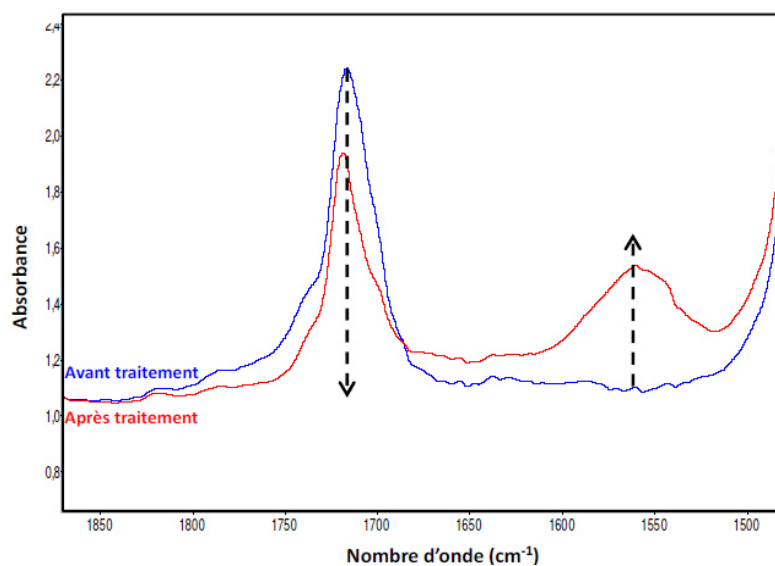


Figure 64 : Evolution du spectre IR d'un PE oxyde avant et après traitement par NH₃ pendant 7 jours.

Les produits carbonyles résultant de l'oxydation du PE sont donc :

- les acides carboxyliques : bande à 1720 cm⁻¹ déplacée vers 1550-1600 cm⁻¹ par traitement NH₃,
- les cétones : bande à 1720 cm⁻¹ (non déplacée),
- les aldéhydes : bande à 1742 cm⁻¹ (non déplacée).

Les courbes d'accumulation de ces trois groupes carbonyles au cours du vieillissement thermique du PE entre 80 et 120 °C dans l'air sont présentées sur la **Figure 65** et la **Figure 66-a**.

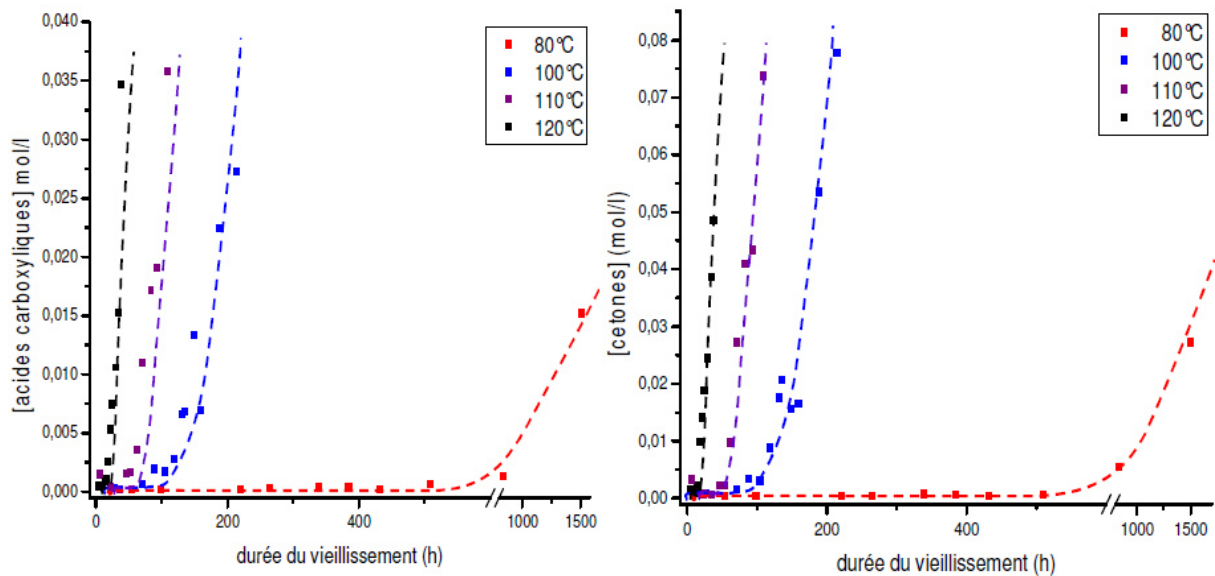


Figure 65 : Accumulation des groupes acide carboxylique (a) et cétone (b) au cours du vieillissement thermique du PE pur dans l'air à 80, 100, 110 et 120 °C.

On remarque que, à une température donnée (**Figure 66-b**), le temps d'induction est quasi identique pour toutes les espèces carbonyles étudiées. Par contre, leurs concentrations ne sont pas identiques.

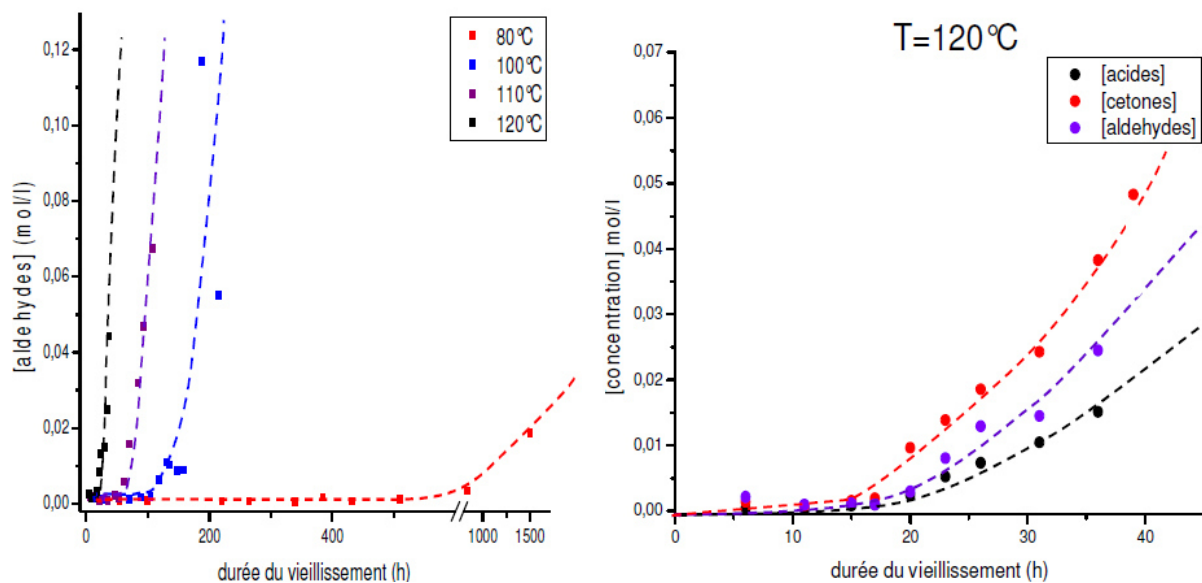


Figure 66 : (a) : Accumulation des groupes aldéhydes au cours du vieillissement thermique du PE dans l'air à 80, 100, 110 et 120 °C. (b) : Comparaison des courbes d'accumulation des trois principaux groupes carbonyles dans l'air à 120 °C.

Par ailleurs, nous avons déterminé les proportions molaires des différents produits carbonyles entre 80 et 120 °C dans l'air. Ces données sont regroupées sur la **Figure 67**. On observe une différence notable de comportement de part et d'autre d'une température critique située vers ≈ 90 °C (**Figure 67**) :

- Quand $T < 90$ °C, les aldéhydes (≈ 45 %) sont les produits carbonyles majoritaires devant les cétones (≈ 35 %) et les acides (≈ 20 %),

En revanche quand $T > 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, les cétones deviennent les produits carbonyles majoritaires ($\approx 45\%$) devant les aldéhydes ($\approx 35\%$), sans que la proportion d'acides carboxyliques soit affectée ($\approx 20\%$).

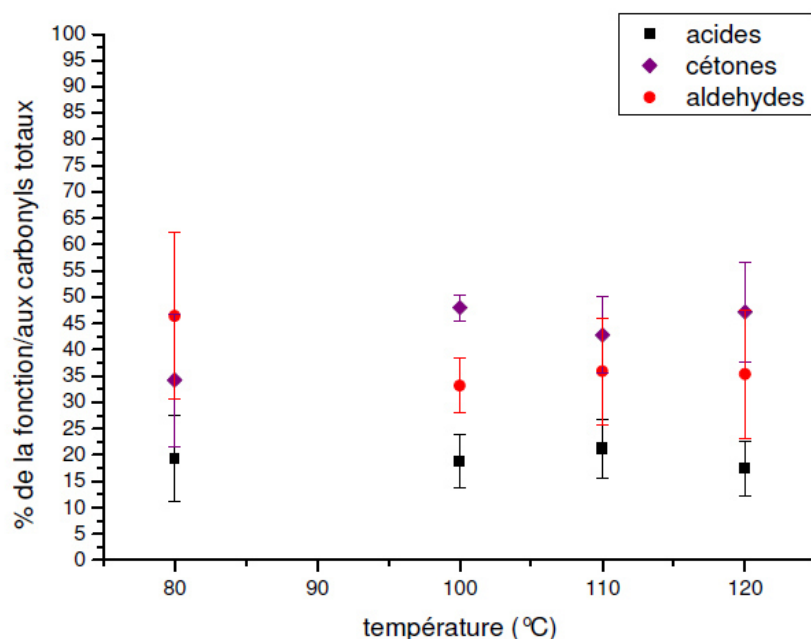


Figure 67 : Proportions (molaires) des produits carbonyles entre 80 et 120 °C dans l'air. Nous nous sommes alors basés sur la distribution moyenne de ces espèces carbonyles (**Tableau 4.9**) pour ajuster le coefficient d'extinction molaire moyen de l'ensemble des espèces carbonyles ($\epsilon_{\text{C=O}}$).

Tableau 4.9 : Proportions molaires des groupes carbonyles dans l'air à $T < 90\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Groupe Carbonyle	Proportion molaire (%)	Ecart type	ϵ ($\text{mol L}^{-1} \text{cm}^{-1}$)
Acides carboxyliques	19	8	680
Cétones	34	12	350
Aldéhydes	46	15	155

Nous avons obtenu une valeur moyenne de $\epsilon_{\text{C=O}}$ de $323 \text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ pour $T < 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ et pour $T > 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, nous avons obtenu une valeur moyenne de $\epsilon_{\text{C=O}}$ de $355 \text{ mol L}^{-1} \text{cm}^{-1}$.

Tableau 4.10 : Proportions molaires des groupes carbonyles dans l'air à $T > 90\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Groupe Carbonyle	Proportion molaire (%)	Ecart type	ϵ ($\text{mol L}^{-1} \text{cm}^{-1}$)
Acides carboxyliques	21	5	680
Cétones	33	6	350
Aldéhydes	46	9	155

Ces deux valeurs ne sont pas très différentes, compte tenu des dispersions non négligeables des données expérimentales.

Par la suite, pour des températures d'essais supérieures à $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, nous avons choisi (arrondi) une valeur du coefficient d'extinction molaire des carbonyles de $360 \text{ mol L}^{-1} \text{cm}^{-1}$.

3.3.2 *Prise d'eau :*

Dans la bibliographie, plusieurs auteurs [16-19] considèrent que la présence, même infime, de groupes oxygènes peut augmenter de manière sensible l'affinité avec l'eau. De plus, ils considèrent que toutes les fonctions oxygénées n'ont pas la même affinité et donc ne contribuent pas de la même manière à la prise d'eau. Ainsi, dans notre approche de la problématique de la prise d'eau au cours du vieillissement thermique du PE, nous avons émis l'hypothèse selon laquelle l'accumulation des produits d'oxydation augmente la polarité du matériau et donc induit une prise d'eau supplémentaire. Pour valider cette hypothèse nous avons procédé comme suit :

- Nous avons d'abord déterminé expérimentalement la prise d'eau d'un PE que nous avons comparé à la valeur calculée,
- Nous avons ensuite tenté d'élucider les relations structure-prise d'eau à l'aide des dispositifs expérimentaux de Karl-Fisher et DVS en utilisant des copolymères d'éthylène modelés, chacun contenant l'un des principaux produits d'oxydation du PE.

Nous avons réalisé plusieurs mesures de prise d'eau par la technique Karl-Fisher sur des échantillons de PE non oxydes préalablement séchés dans une étuve à vide à température ambiante pendant au moins une semaine. La mise en place de cette expérience a nécessité beaucoup de temps, car c'est un essai très sensible et nous étions proches de la limite de détection de l'appareil estimée à environ 20 ppm. Au départ, nous avons une grande dispersion des résultats. Mais, une fois la méthode validée, en particulier grâce à une expertise inter-laboratoire, nous avons pu diminuer sensiblement la dispersion expérimentale de nos résultats. La valeur moyenne de prise d'eau pour un PE non oxyde, ayant un taux de cristallinité de $\chi_c \approx 39\%$ est de 38 ± 8 ppm, ce qui correspond à environ 108 ppm pour 100 % de phase amorphe. D'autre part, nous avons calculé la concentration théorique d'eau absorbée par la phase amorphe du PE non oxyde à l'aide de l'approche de Van Krevelen [18] :

$$[H_2O] = 5 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{18}{14} = 64,3 \cdot 10^{-6} \text{ g/g} \quad (7)$$

Où $5 \cdot 10^{-5}$ est la contribution molaire élémentaire à l'absorption d'eau (en mole/mole) du groupe méthylène (CH₂), 18 g.mol^{-1} est la masse molaire de l'eau, et 14 g.mol^{-1} est la masse molaire du groupe méthylène.

La valeur obtenue est de $64,3 \cdot 10^{-6}$ gramme d'eau par gramme de phase amorphe, ce qui correspond à 64,3 ppm d'eau dans 100 % de phase amorphe. On remarque que cette valeur théorique (64 ppm) est plus faible que la valeur expérimentale (108 ppm). Cette différence est probablement due au fait que le PE de cette étude a été légèrement pré-oxyde pendant la mise

en œuvre. En effet, si on considère, à titre d'exemple, une concentration de 10^{-4} mol.L⁻¹ de groupes hydroperoxydes alors, on induit une prise d'eau supplémentaire de 51 ppm.

En conclusion, cette partie a été consacrée à la caractérisation initiale et au suivi du vieillissement du PE. Notre étude a montré que :

- Le PE industriel étudié est un PEbd ayant une cristallinité $\chi_c \approx 39$ %,
- Lors de l'oxydation du PE, les proportions des groupes carbonyles sont de 21 % en moles d'acides carboxyliques, 33 % en moles d'aldéhydes et 46 % en moles de cétones,
- L'augmentation de la concentration en groupes polaires implique une augmentation quasi-exponentielle de la probabilité de trouver deux groupes polaires très proches, ce qui augmente exponentiellement la concentration d'eau à l'équilibre dans le polymère.

3.3.3 Caractérisation du vieillissement :

Par la suite, nous appellerons "matériaux modèles" les deux nuances de PE suivantes :

- **PE neuf** : la nuance injectée à partir des granulés utilisés pour l'extrusion des films neufs commerciaux. Cette nuance est pourvue de 2,25% de noir de carbone, et est par conséquent de couleur noire. Elle correspondra pour nous à un film neuf, non vieilli.
- **PE "vieilli"** : la nuance de faible masse molaire. Cette nuance ne contient pas de noir de carbone, et est par conséquent blanche. Elle correspondra pour nous à un film vieilli artificiellement au contact de désinfectants, de façon homogène dans l'épaisseur.

Ces deux nuances ont été injectées sous forme de plaques de 120 mm x 120 mm et d'épaisseur 4 mm. Elles ont été recuites pendant 24h à 80°C afin que la morphologie atteigne un pseudo équilibre entre phase amorphe et phase cristalline.

Nous chercherons dans un premier temps à déterminer leurs caractéristiques physiques et microstructurales avant de nous assurer de leur représentativité, vis-à-vis d'un film neuf et d'un polyéthylène oxydé.

🚦 Chromatographie d'exclusion stérique : La Chromatographie à Exclusion stérique (CES) a été utilisée ici pour déterminer précisément la masse molaire de nos matériaux modèles. Les caractéristiques de chaque nuance sont données dans le **tableau 4.11**.

Tableau 4.11 : Masses molaires et indice de polymolécularité, déterminés par CES, pour les deux nuances de PE

Caractéristiques	PE neuf	PE vieilli
Masse molaire moyenne en poids M_w	10,2 kg/mol	13,8 kg/mol
Masse molaire moyenne en nombre M_n	206,52 kg/mol	76,3 kg/mol
Indice de polymolécularité I_p	20,2	5,5

Plusieurs points ressortent de ces résultats :

- Tout d'abord, le PE "vieilli" présente bien une masse molaire en poids M_w plus faible que celle du PE neuf. Cependant, elle reste supérieure à la masse molaire critique du PE ($M_{wc} =$

40 kg/mol), en-dessous de laquelle un film de PE vieilli de façon homogène perd sa ductilité. Ce PE dit "vieilli" ne représentera donc pas le cas le plus critique,

- Les résultats montrent également une chute de l'indice de polymolécularité I_p . Ces résultats laissent donc penser que le PE "vieilli" est bien représentatif d'un état oxydé du PE. Certaines caractéristiques restent cependant à confirmer, comme l'évolution du taux de cristallinité.

Analyse enthalpique différentielle : L'Analyse Enthalpique Différentielle (AED) a été utilisée ici principalement pour déterminer le taux de cristallinité χ_c des 2 grades de PE. Cette technique permet également de mesurer la température de fusion T_f . Les mesures ont été réalisées sur des pastilles de 10 mg prélevées au cœur des plaques injectées. Les mesures ont été répétées trois fois pour nous assurer de la reproductibilité de nos résultats. Les thermographes des deux nuances de PE (PE neuf et PE vieilli) sont présentés à la **Figure 68**.

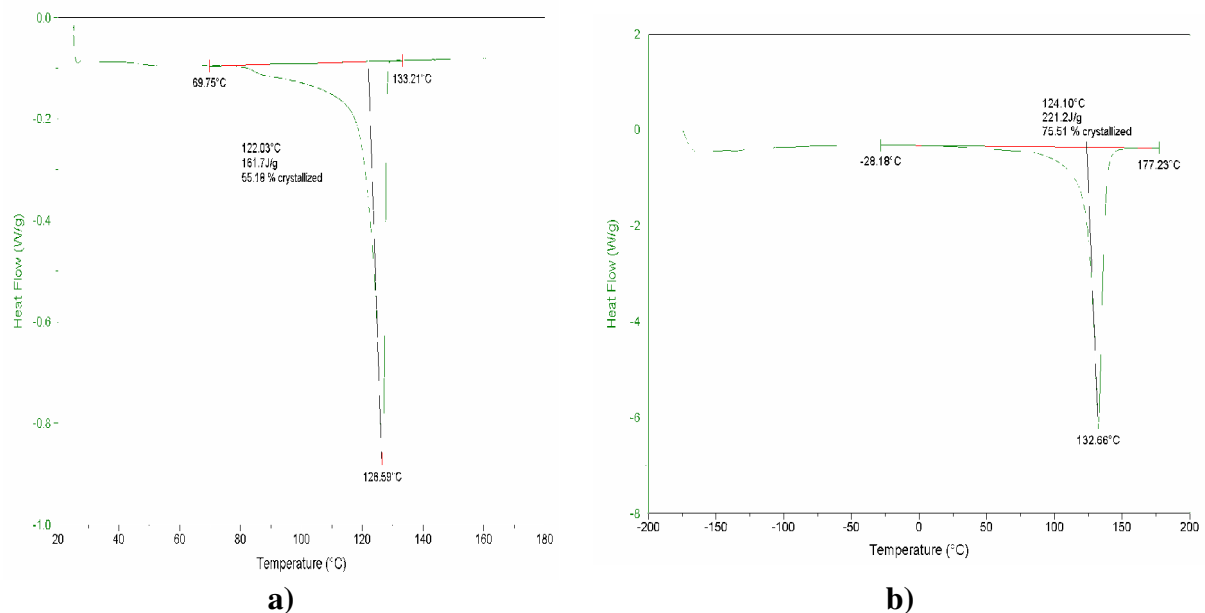


Figure 68 : Détermination du taux de cristallinité et de la température de fusion par DSC, a) du PE neuf et b) du PE vieilli

Une moyenne sur les trois essais réalisés sur chaque nuance donne les résultats énumérés dans le **tableau 4.12**.

Tableau 4.12 : Comparaison des résultats de DSC pour les deux nuances de PE

Caractéristiques	PE neuf	PE vieilli
Température de fusion T_f	115 °C	116°C
taux de cristallinité χ_c	39 %	45 %

On constate tout d'abord que le PE "vieilli" présente un taux de cristallinité plus élevé que le PE neuf, malgré des conditions de mise en œuvre similaires (même température et même vitesse pour les phases d'injection et de refroidissement). Il a été proposé que la fraction cristalline résulte d'un pseudo-équilibre entre cristallisation et blocage de la croissance de celle-ci par les enchevêtrements rejetés dans la phase amorphe [20]. Autrement dit, en

considérant que le polymère atteint ce pseudo-équilibre après le recuit, la fraction cristalline est d'autant plus élevée que la masse molaire moyenne en poids est faible.

Cette observation est un argument supplémentaire en faveur de la légitimité de ces matériaux modèles.

Microstructure : De même que pour la caractérisation d'un tube neuf, la structure sphérolitiques des deux nuances de PE a été révélée par attaque chimique et observée au microscope électronique à balayage (MEB). Les observations sont présentées à la **Figure 69** pour le PE neuf et à la **Figure 71** pour le PE "vieilli".

✓ *PE neuf* : Un échantillon prélevé au cœur d'une plaque de PE neuf, et préparé au préalable par cryomicrotomie a subi la même attaque chimique que celle utilisée pour révéler la microstructure d'un film neuf. La microstructure de la nuance de PE neuf a ainsi pu être révélée (**Figure 69**). Les sphérolites sont enchevêtrées les unes dans les autres, il est donc difficile d'en déterminer un diamètre moyen. On l'estime toutefois à environ 2 μm . Ces observations microscopiques indiquent également la présence de charges, probablement du noir de carbone (particules blanches de l'ordre de 0,1 à 0,5 μm de diamètre). Elles montrent également qu'il y a très peu de porosité dans cette nuance. Une seule a été observée, de l'ordre de 0,2 μm de diamètre. On peut se poser la question de savoir si ces porosités sont dues au procédé de mise en œuvre.

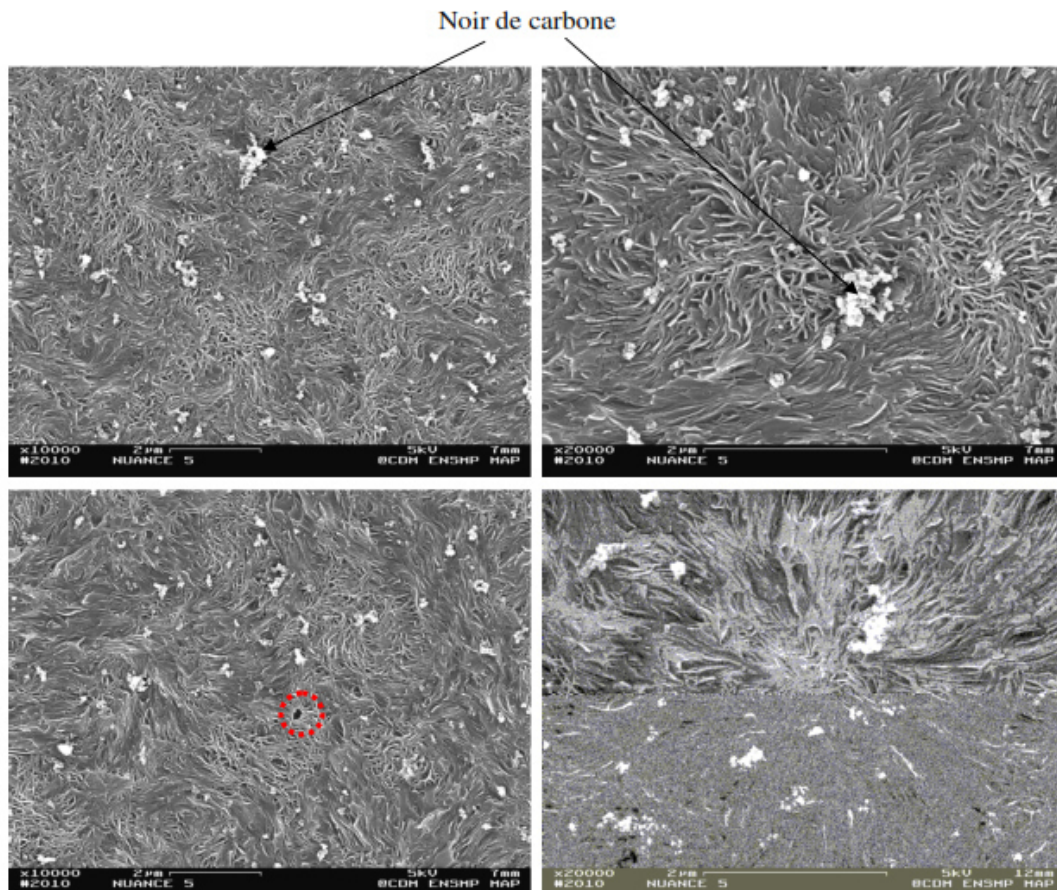


Figure 69 : Observations MEB de la microstructure sphérolitiques du PE neuf

L'observation de surfaces de rupture obtenues par cryofractographie d'un échantillon de PE neuf a permis de mettre en évidence un faciès de rupture semblable à celui obtenu pour un tube de PE neuf (**Figure 70**). L'hypothèse d'un faciès fragile est privilégiée, cependant, la surface semble beaucoup plus lisse, matée, sans la présence de fibrilles. Des observations complémentaires nous auraient permis de statuer complètement sur le type de faciès.

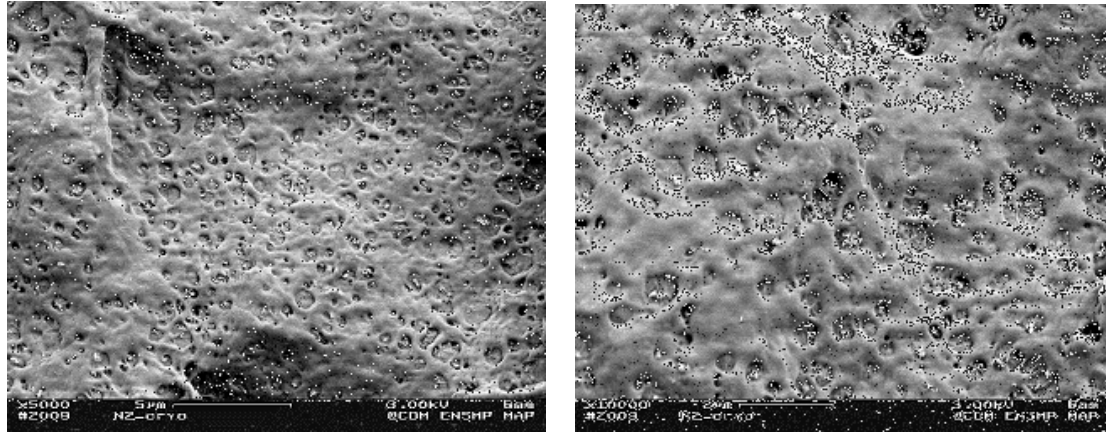


Figure 70 : Observations microscopiques des surfaces de rupture obtenues par cryofractographie d'un échantillon issu d'une plaque de PE neuf

✓ PE "vieilli" : Le même protocole a été utilisé pour révéler la microstructure sphérolitiques du PE "vieilli". Les résultats sont présentés à la **Figure 71**.

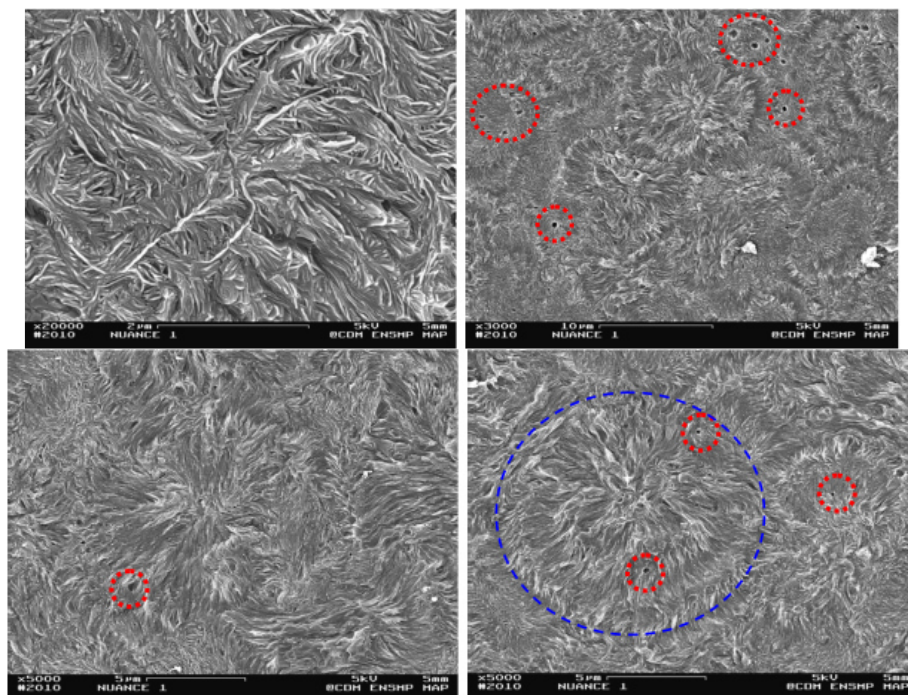


Figure 71 : Observations MEB de la microstructure sphérolitique du PE "vieilli"

Les sphérolites semblent plus faciles à isoler pour cette nuance : le cercle en pointillés bleu délimite un sphérolite. On estime le diamètre moyen d'un sphérolite à environ $7,5 \mu\text{m}$ avec une incertitude de $2,5 \mu\text{m}$. On remarque également la présence d'une seule population de cavités, de diamètre moyen $0,5$ à $1 \mu\text{m}$ environ.

Contrairement aux échantillons issus d'un film de PE neuf, les faciès de rupture obtenus par cryofractographie d'un échantillon de PE "vieilli" semblent plutôt ductiles. On observe la présence de fibrilles caractéristiques d'une rupture ductile (**Figure 72**). On parle alors de micro-ductilité : bien que la surface de rupture soit ductile, l'échantillon ne présente pas de déformation plastique macroscopique importante.

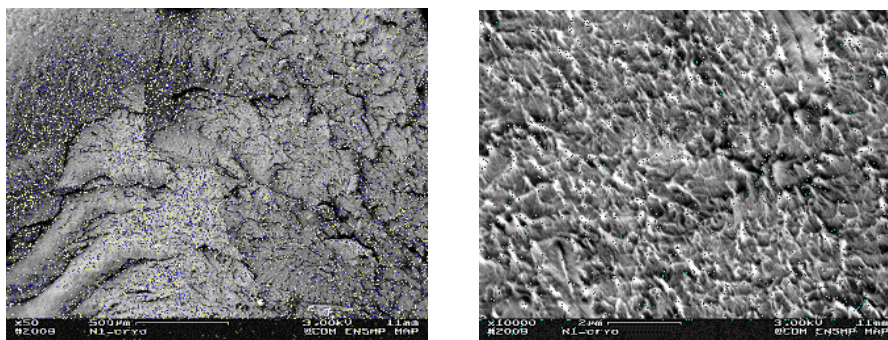


Figure 72 : Observations microscopiques des surfaces de rupture obtenues par cryofractographie d'un échantillon issu d'une plaque de PE "vieilli"

3.3.4 Représentativité du PE :

La représentativité du PE "vieilli" a déjà été largement évoquée lors de la présentation des caractérisations physiques de chacune des nuances. Plusieurs points ont confirmé leur légitimité pour représenter un PE vieilli naturellement au contact de désinfectants :

- Une chute de la masse molaire et de l'indice de polymolécularité,
- et une augmentation du taux de cristallinité et de la rigidité.

Cependant, les caractéristiques du PE neuf doivent être comparée à celles d'un film neuf extrudé, afin de vérifier si le mode de mise en forme influe de façon significative, ou pas, sur la morphologie semi-cristalline. Le matériau est donc le même, seul le mode de mise en forme diffère.

Les caractéristiques issues des chromatographies d'exclusion stérique, des spectroscopies mécaniques, des analyses enthalpiques différentielles et des observations microstructurales sont comparées dans le **tableau 4.13**.

Tableau 4.13 : caractéristiques des chromatographies d'exclusion stérique

Caractéristiques	PE neuf	PE vieilli
Masse molaire moyenne en poids M_w	/	206,5 kg/mol
Indice de polymolécularité I_p	/	20,2
Température de transition vitreuse T_g	-120,6 °C	-117 °C
Température de fusion T_f	115 °C	116°C
taux de cristallinité χ_c	39 %	45 %
Diamètre moyen des sphérolites	1 à 2 μm	2 μm

Notons que la mesure de masse molaire par CES a été réalisée sur des échantillons issus des films de PE neuf. Les résultats de DSC indiquent un écart de 1°C sur la température de fusion,

et des taux de cristallinité du même ordre de grandeur. De même, le diamètre moyen des sphérolites déterminé par observations microscopiques après attaque chimique, est identique pour le PE neuf sous forme de plaques et les films neufs.

3.3.5 Etude analytique par spectrométrie :

Les films PE ont été exposés aux radiations UV à différents temps d'irradiation (0h, 100h, 140h, 200h) pour modifier la microstructure des chaînes de polymère par formation de structures oxygénées et essayer d'améliorer le vieillissement en milieu naturel. La **figure 73** montre les changements dans le spectre infrarouge du film PE pendant le processus de vieillissement au rayonnement UV et à l'air, les changements les plus significatifs dans le spectre IR-TF du film PE sont dans la région du carbonyle, des hydroperoxydes, du groupe ester et des doubles liaisons carbone-carbone.

On remarque que les bandes d'absorption augmentent continuellement avec le temps d'irradiation. Les pics correspondent aux groupes fonctionnels suivants : 1720 cm^{-1} carbonyle ($\text{C}=\text{O}$), 1630 cm^{-1} doubles liaisons vinyliques ($\text{C}=\text{C}$), 908 cm^{-1} ($\text{H}_2\text{C}=\text{C}$) doubles liaisons à l'extrémité de la chaîne, et 1080 cm^{-1} groupe éther.

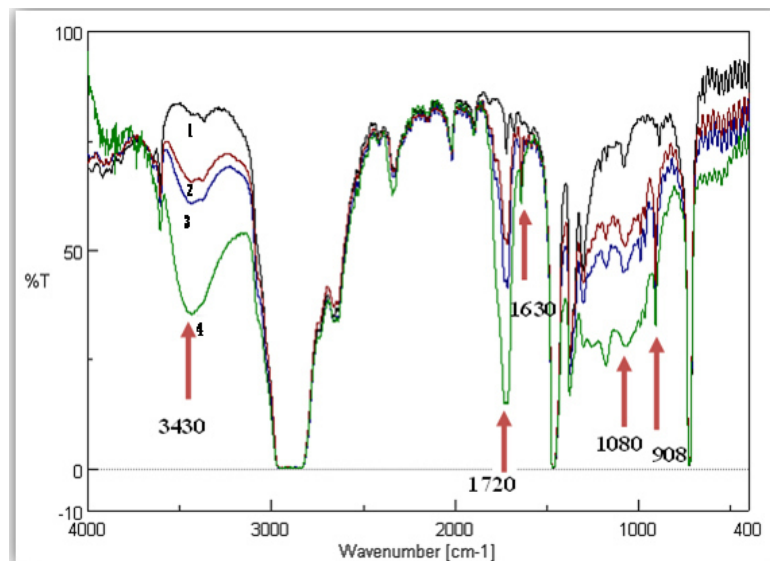


Figure 73 : Spectres IR du film PE superposés après différentes durées d'irradiation.

1) 0 h, 2) 100 h, 3) 140 h, 4) 200 h.

Pour évaluer le degré de vieillissement du film PE, nous avons utilisé l'indice de carbonyle qui correspond au rapport de l'absorbance du groupe carbonyle centrée à 1720 cm^{-1} à l'absorbance à 2020 cm^{-1} invariable des groupes méthylène ($-\text{CH}_2-$). L'absorbance à 2020 cm^{-1} utilisée comme référence interne pour compenser les différences dans la mesure des épaisseurs des films de polymère.

3.4 Pertes des antioxydants au cours du vieillissement thermique :

Dans cette partie, on va étudier les pertes physiques et chimiques du PE lors du vieillissement thermique dans l'air et dans l'eau.

3.4.1 Cas du vieillissement dans l'air :

Des films de PE ont été exposés en étuve ventilée à des températures de 20, 40, 60 et 80°C pendant près de 316 jours. A intervalles de temps réguliers, certains échantillons ont été prélevés puis analysés par spectroscopie IR et UV et par DSC.

✓ Suivi par spectroscopie infrarouge : Les analyses IR révèlent une diminution de l'absorbance à 1740 cm⁻¹ attribuée aux groupements ester du film PE (**Figure 74**). Ces fonctions n'étant pas impliquées dans les réactions de stabilisation [21], nous pouvons en déduire que cette diminution ne peut correspondre qu'à une perte physique de l'antioxydant et plus particulièrement à son évaporation.

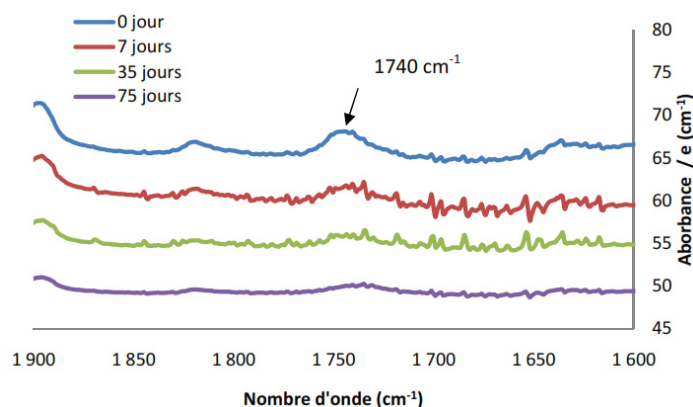


Figure 74 : Evolution des spectres IR, entre 1600 et 1900 cm⁻¹ d'un film PE au cours du vieillissement thermique à 80°C dans l'air.

Comme attendu, le coefficient d'évaporation du film PE diminue avec la température pour devenir quasiment négligeable à 40°C (**tableau 4.14**).

Tableau 4.14 : coefficient d'évaporation du film PE

Température d'exposition dans l'air (°C)	Coefficient d'évaporation β _{air} (s ⁻¹)
40	3 · 10 ⁻⁸
60	6,4 · 10 ⁻⁸
80	1,2 · 10 ⁻⁷

Le graphe d'Arrhénius du coefficient d'évaporation dans l'air est présenté sur la **Figure 75**.

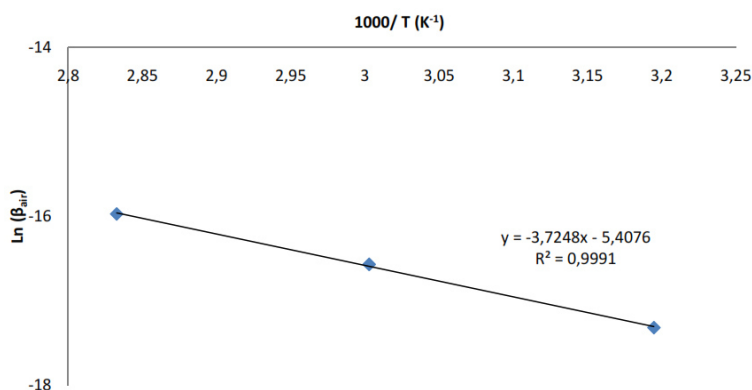


Figure 75 : Droite d'Arrhénius de la vitesse d'évaporation du film PE en fonction de la température d'exposition sous air.

Ce coefficient suit une loi de type Arrhénius :

$$\beta_{air} = \beta_{air_0} \cdot \exp\left(-\frac{E_{év}}{R \cdot T}\right) \quad (8)$$

Où β_{air_0} est le facteur pré exponentiel, $E_{év}$ est l'énergie d'activation de l'évaporation, R la constante des gaz parfaits et T la température absolue.

Cette analyse montre que le mécanisme d'évaporation est thermiquement activé avec une énergie d'activation de l'ordre de 31 kJ/mol.

✓ Suivi par spectroscopie ultraviolet : Après avoir étudié les pertes physiques par évaporation du film PE, nous allons maintenant tenter de dégager les pertes dues à la consommation chimique, au moyen de la spectroscopie UV.

Les analyses UV révèlent une diminution de l'absorbance à 280 nm attribuée aux fonctions phénol sur le film PE (**Figure 76**). Les pertes de ces espèces peuvent être d'ordre physique (évaporation) ou d'ordre chimique (réaction avec les radicaux issus de l'oxydation du polyéthylène). Par ailleurs, nous constatons une légère diminution de l'absorbance à 320 nm pouvant être attribuée aux quinones. Dans l'hypothèse où l'oxydation des phénols entraînerait la formation de quinones, ces réactions devraient favoriser l'augmentation de l'absorbance située à 320 nm. Or, nous observons une légère diminution de cette absorbance, ce qui semble indiquer une prédominance du processus d'évaporation par rapport à la consommation chimique des antioxydants à 80°C.

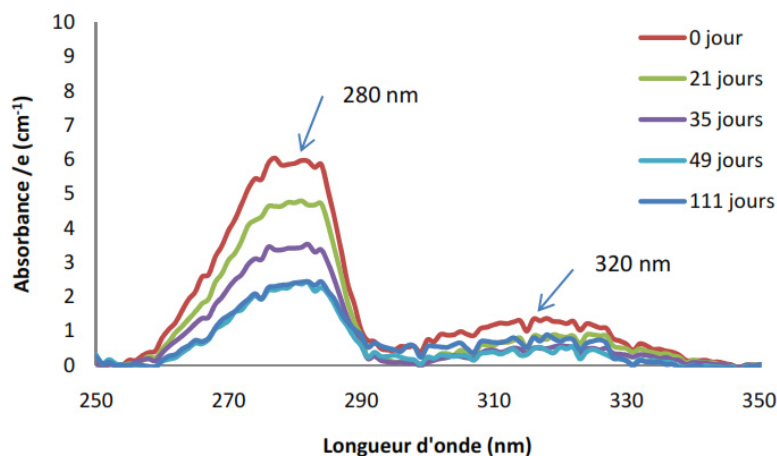


Figure 76 : Evolution du spectre UV, entre 250 et 350 nm, du film PE au cours du vieillissement thermique à 80°C dans l'air.

✓ Caractérisation par calorimétrie différentielle à balayage : Rappelons que le temps d'induction à l'oxydation évolue linéairement avec la concentration dans le PE. Ainsi, la variation du TIO permet de suivre l'évolution de la concentration dans le PE lors du vieillissement thermique dans l'air et de vérifier les résultats précédemment obtenus par spectroscopie IR et UV. Les mesures DSC ont permis de révéler une diminution du TIO au cours de l'exposition à 80°C, dans l'air, du film PE (**Figure 77**). Comme dans le cas des caractérisations par spectroscopie UV, cette diminution de TIO peut être associée à une perte

en espèces stabilisantes par évaporation et/ou par réaction chimique avec les radicaux issus de l'oxydation du polyéthylène.

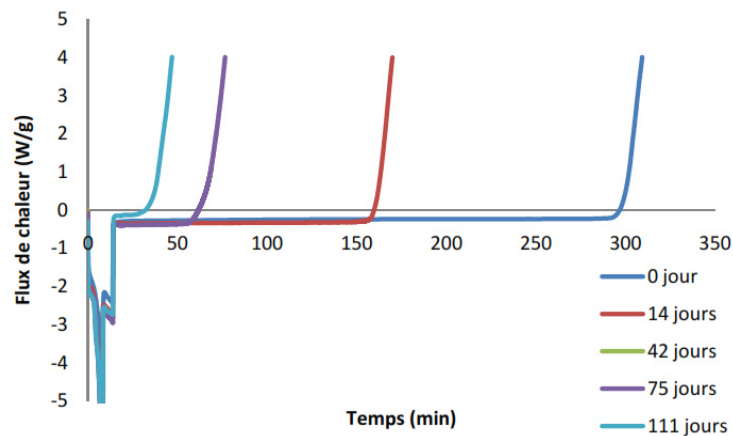


Figure 77 : Evolution des thermogrammes du film PE au cours du vieillissement thermique à 80°C sous air

Les courbes, obtenues à partir des mesures de TIO par DSC et d'absorbance du pic à 280 nm par spectroscopie UV, permettent de mettre en évidence des évolutions quasi-similaires. Ainsi ces deux techniques de caractérisation permettraient de quantifier les pertes à la fois liées à l'évaporation et aux réactions chimiques car toutes les deux sont basées sur la quantification des fonctions phénols actives dans le processus antioxydant.

✓ Comparaison des résultats obtenus par les différentes techniques de caractérisation : Comme nous avons pu le remarquer précédemment, les différentes techniques de caractérisation utilisées pour suivre l'évolution du film PE au cours du vieillissement thermique, nous donnent des informations complémentaires. La spectroscopie infrarouge permet de suivre l'évolution en esters. Ces derniers étant considérés comme stables face à la thermo-oxydation [21], leur perte résulte essentiellement de phénomènes d'évaporation. La spectroscopie UV et les mesures de TIO permettent de suivre l'évolution en phénols. Ces fonctions participent à la stabilisation du PE vis-à-vis de la thermo-oxydation. Ainsi, la consommation des phénols comprend à la fois l'évaporation et les pertes chimiques liées aux réactions entre les phénols et les radicaux formés au cours de l'oxydation. Dans cette partie, nous tenterons d'exploiter cette complémentarité des techniques, afin de quantifier la contribution propre à la consommation chimique des antioxydants.

Au cours des 20 premiers jours, les pertes mesurées par les trois techniques apparaissent identiques. Ainsi, nous pouvons en déduire que pendant cette période, seule l'évaporation contribue à la diminution de la concentration du film PE. Au-delà, les pertes estimées par spectroscopie IR apparaissent être plus faibles que celles mesurées par analyses UV ou DSC. Cette différence peut être attribuée aux pertes chimiques. Au bout de 40 jours d'exposition dans l'air à 80°C, lorsque les pertes semblent se stabiliser, les pertes par évaporation

constituent environ 50% des pertes totales. Ce pourcentage apparaît être similaire pour les vieillissements à 60°C. Ces résultats vont à l'encontre de ceux présentés par Lundback et al. [22]. En effet, ces auteurs avaient étudié les pertes lors des vieillissements thermiques dans l'air et dans l'azote pour des températures comprises entre 75 et 95°C. N'observant pas de différence de perte entre les deux milieux, ils en avaient conclu que les pertes chimiques étaient négligeables. Cette disparité entre nos résultats et ceux de Lundback et al. [22] laisse penser que la généralisation du comportement des antioxydants phénoliques face aux vieillissements thermiques n'est pas vérifiée.

Toujours en supposant que les différences entre analyses par spectroscopies IR et UV proviennent des pertes chimiques, la soustraction point par point des résultats obtenus par ces deux techniques donnerait accès aux pertes chimiques.

Ainsi, la présence d'un temps d'induction avant le début des pertes chimiques à 60 et 80°C laisse supposer que les pertes chimiques sont essentiellement dues à la réaction chimique, d'après les données de la littérature, activée thermiquement et présenterait une énergie d'activation de l'ordre de 40 kJ.mol⁻¹.

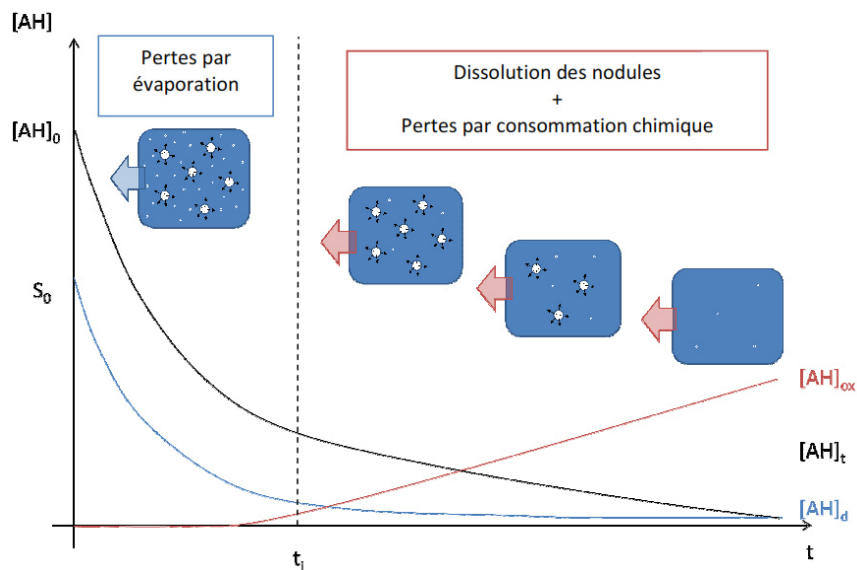


Figure 78 : Evolution schématique de phase amorphe [AH] dissous dans la phase amorphe [AH]_d et antioxydants oxydés après réaction avec les radicaux peroxydes [AH]_{ox} et de la concentration totale [AH]_t au cours du vieillissement dans l'air.

Après avoir dissocié la contribution des pertes physiques (évaporation) de celle liée aux pertes chimiques (réaction avec les radicaux peroxydes), nous sommes en mesure d'apporter des précisions concernant l'évolution globale de la concentration en antioxydant phénolique. Les pertes globales peuvent être décrites à l'aide de deux régimes cinétiques distincts (**figure 78**) :

Un premier régime, compris entre 0 et t, au cours duquel la vitesse de consommation chimique des antioxydants resterait très faible. Ainsi, la diminution quasi-exponentielle de la concentration globale du film PE serait uniquement attribuée à l'évaporation des antioxydants

dissous dans la phase amorphe du polymère. Ceci supposerait que l'antioxydant ne soit pas dissous totalement dans la matrice polymère et se trouve aussi sous forme de nodules. Ces nodules pourraient se présenter à l'état cristallin. Ainsi, la vitesse d'évaporation des molécules d'antioxydants dissous dans la phase amorphe pourrait apparaître plus rapide que la dissolution des nodules et laisserait supposer qu'au bout d'un temps t_1 , la quantité d'antioxydants dissous atteindrait des valeurs très faibles.

✚ Pour des durées d'exposition plus longues, la concentration d'antioxydants dissous dans la phase amorphe apparaîtrait très faible. Ainsi, la stabilisation de la phase amorphe par capture des radicaux ne serait plus totalement assurée. La concentration en radicaux pourrait donc augmenter avec la durée d'exposition et les antioxydants libérés progressivement par la dissolution des nodules seraient rapidement consommés chimiquement. Ainsi on aurait :

- vitesse de dissolution des nodules \gg vitesse d'évaporation,
- et vitesse de consommation chimique \approx vitesse de dissolution des nodules.

En résumé, il apparaît que les différentes techniques (spectroscopies IR et UV, DSC) utilisées afin de déterminer les pertes au cours du vieillissement thermique sont très complémentaires. Elles ont permis de montrer que les pertes par évaporation et par consommation chimique, des phénols par les radicaux peroxydes, étaient thermiquement activées. Initialement, les molécules d'antioxydants se trouveraient sous deux phases : une phase dissoute dans le polymère et une phase non dissoute présente sous forme de nodules.

Dans un premier temps, les pertes physiques apparaîtraient comme les seules responsables de la diminution de la concentration du film PE. Puis, au-delà d'un temps d'induction t_i , les pertes physiques diminueraient à cause de l'évaporation quasi-totale des antioxydants dissous dans la phase amorphe du film PE. A ce stade, la concentration en radicaux augmenterait avec la durée d'exposition et les antioxydants, issus de la progressive dissolution des nodules, seraient rapidement consommés chimiquement. Par la suite, nous tenterons d'élucider la nature des mécanismes mis en jeu dans le cas d'un vieillissement thermique dans l'eau à différentes températures.

3.4.2 Cas du vieillissement dans l'eau :

Des films de PE ont été immergés dans l'eau saumâtre à 20, 40, 60 et 80°C pendant 316 jours. Des échantillons ont été régulièrement prélevés et analysés par spectroscopies IR et UV ainsi que par DSC. Les résultats obtenus sont présentés et discutés dans les paragraphes qui suivent.

✓ Suivi par spectroscopie infrarouge : Les analyses IR, réalisés sur des films de PE, ont montré une diminution de l'absorbance à 1740 cm^{-1} attribuée aux groupements ester du PE (**Figure 79**). Ces fonctions étant thermiquement stables [21] mais sensibles à l'hydrolyse [23], nous pouvons imputer ces variations à la combinaison des pertes physiques, liées à

l'extraction par l'eau, et de pertes chimiques par hydrolyse. D'après Bertholdo et Ciardelli [23], l'hydrolyse Du film PE concernerait essentiellement les fonctions ester et entraînerait la formation d'acides (III) et d'alcools (II). Le schéma de réaction proposé par ces auteurs est résumé sur la **Figure 80**.

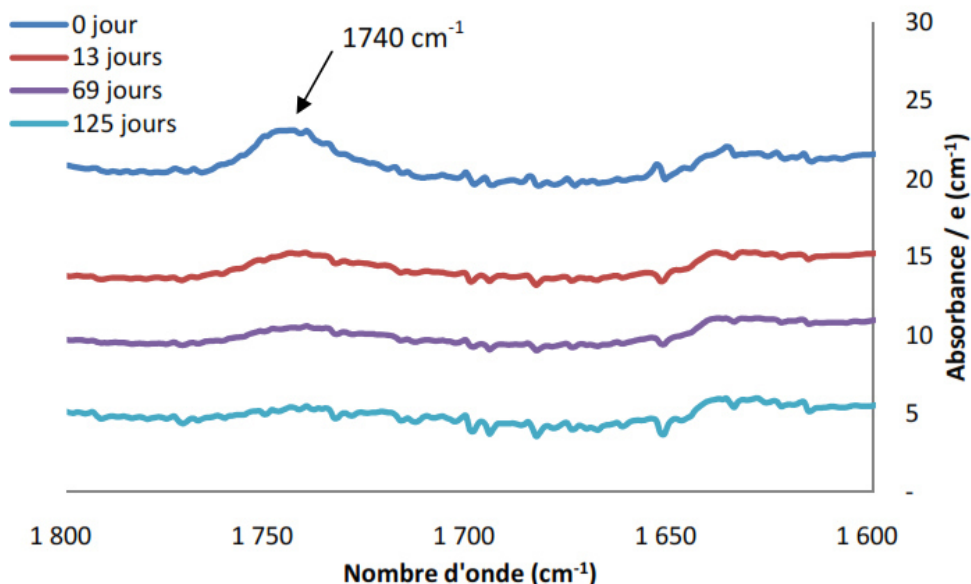


Figure 79 : Evolution des spectres IR d'un film PE au cours du vieillissement à 80°C dans l'eau.

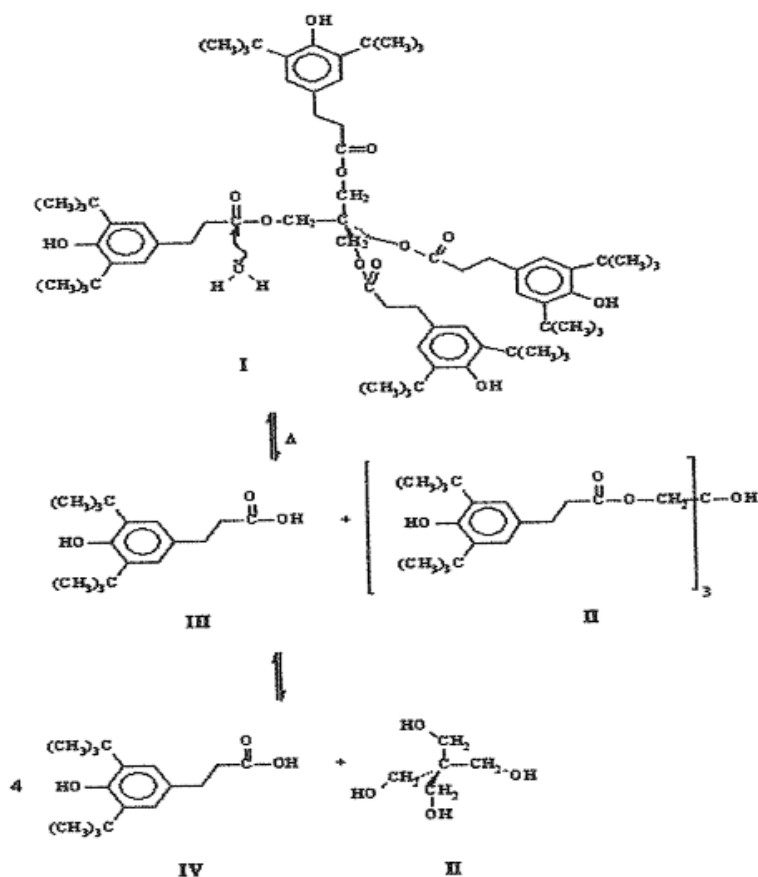


Figure 80 : Schéma d'hydrolyse des fonctions ester Du film PE [23].

Cependant les spectres IR des films de PE ne révèlent pas l'apparition de pics d'absorbance relatifs aux acides ou aux alcools au cours du vieillissement dans l'eau. Nous en concluons donc que l'hydrolyse des esters peut être négligée dans notre étude et ainsi, que les pertes observées par spectroscopie IR correspondraient uniquement à l'extraction d'antioxydants par l'eau.

Comme dans le cas des vieillissements thermiques dans l'air, les pertes par extraction dans l'eau seront explicitées par la suite après avoir quantifié les pertes en antioxydants causées par la consommation chimique.

La cinétique d'extraction des antioxydants dans l'eau serait d'ordre 1. Pour vérifier cette hypothèse, l'évolution du logarithme de la concentration en antioxydants a été tracée en fonction de la durée d'exposition à des températures de 20, 40, 60 et 80°C (**Figure 81**).

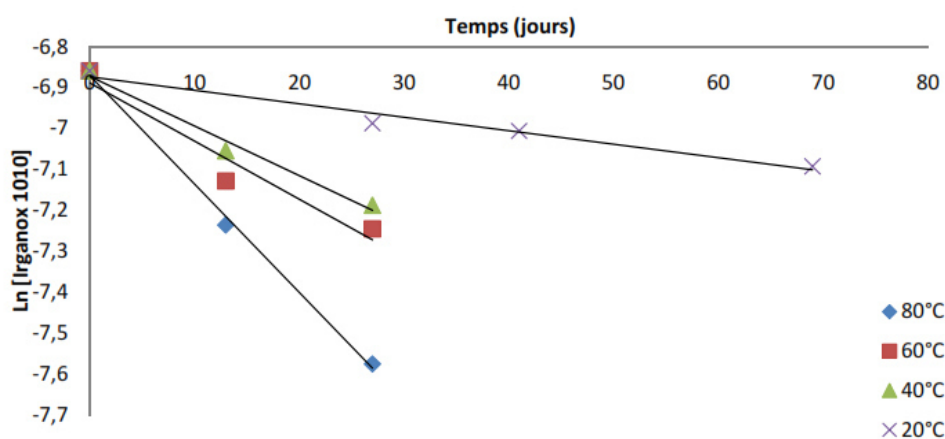


Figure 81 : Droite d'Arrhénius de l'absorbance des esters en fonction du temps d'exposition à 20 ; 40 ; 60 et 80°C dans l'eau.

Nous constatons que ces évolutions sont linéaires avec le temps et donc nous pouvons écrire :

$$\text{Ln}[AH] = -\beta_{\text{eau}} \cdot t + \text{Ln}[AH]_0 \quad (9)$$

Où β_{eau} est le coefficient d'extraction du film PE par l'eau, égal à la pente de la droite d'étalonnage.

Tableau 4.15 : Récapitulatif des coefficients d'extraction du film PE par l'eau entre 20 et 80°C.

Température d'exposition dans l'eau (°C)	Coefficient d'évaporation β_{eau} (s ⁻¹)
20	$3,82 \cdot 10^{-8}$
40	$1,4 \cdot 10^{-7}$
60	$1,64 \cdot 10^{-7}$
80	$3,07 \cdot 10^{-7}$

Le coefficient d'extraction β_{eau} diminue avec la température pour devenir quasiment négligeable à 20°C (**tableau 4.15**). Ce coefficient apparaît suivre une loi d'Arrhénius (**Figure**

82) du type :

$$\beta_{\text{eau}} = \beta_{\text{eau}_0} \cdot \exp\left(-\frac{E_{\text{ext}}}{R \cdot T}\right) \quad (10)$$

Où β_{eau_0} est le facteur pré exponentiel, $E_{év}$ est l'énergie d'activation de l'évaporation, R la constante des gaz parfaits et T la température absolue.

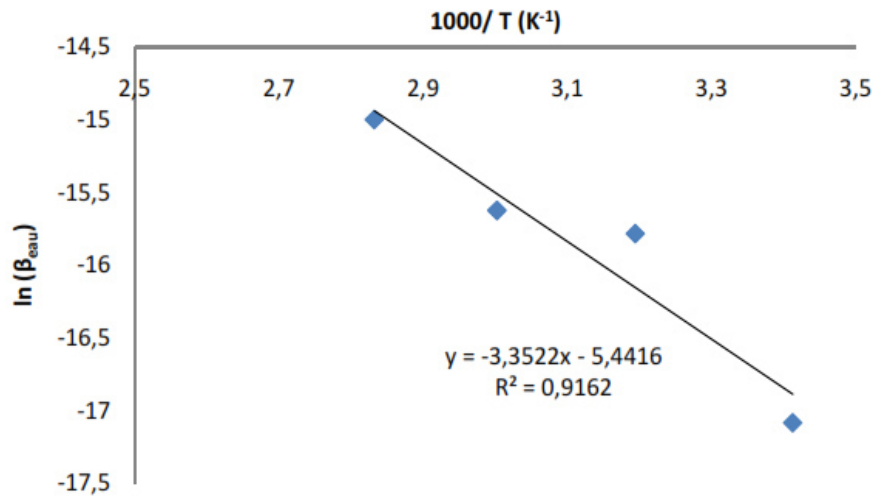


Figure 82 : Droite d'Arrhénius de la vitesse d'extraction du PE en fonction de la température d'exposition dans l'eau.

Ainsi, le mécanisme de perte par extraction du PE serait thermiquement activé, avec une l'énergie d'activation E voisine de 27 kJ/mol.

✓ Suivi par spectroscopie UV : Après avoir étudié les pertes par extraction, nous allons essayer de quantifier les pertes liées aux réactions chimiques par spectroscopie UV. Les spectres obtenus sur les échantillons de films vieillis dans de l'eau saumâtre, jusqu'à 83 jours, à 80°C sont présentés sur la **Figure 88**. Il apparaît une diminution de l'absorbance à 280 nm, attribuée aux fonctions phénol [24], et une importante augmentation d'un massif centré à 314 nm, attribué à la formation de quinones [25].

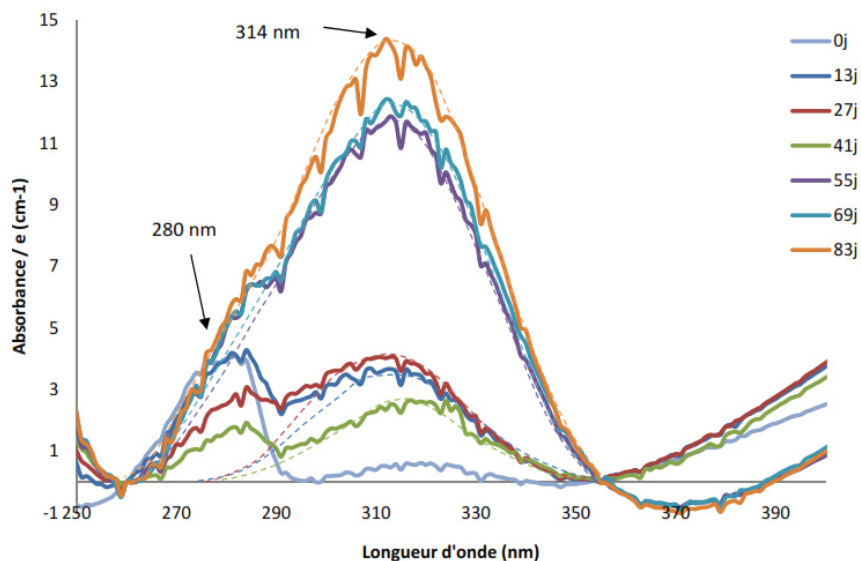


Figure 83 : Evolution des spectres UV de PE au cours du vieillissement à 80°C dans l'eau
Globalement, le massif d'absorption, attribué aux quinones, augmente au cours du vieillissement à 80°C dans l'eau (**Figure 83**), alors que ce même massif semblait diminuer

dans le cas du vieillissement à 80°C dans l'air (**Figure 76**). Les quinones devraient présenter une solubilité encore plus faible du fait qu'elles ne possèdent pas de fonction polaire. Partant de cette hypothèse, la rapide saturation en quinones dans l'eau (31 ml) pourrait expliquer le fait que ces espèces s'accumulent dans le polyéthylène lors du vieillissement dans l'eau. Par contre, au cours du vieillissement dans l'air en étuve ventilée, les quinones peuvent s'évaporer sans jamais atteindre la limite de pression de vapeur saturante. Outre le massif centré à 314 nm, l'immersion dans l'eau de films de PE fait apparaître une diminution de l'absorbance à 280 nm. Comme explicité précédemment, cette perte en absorbance peut être corrélée avec les pertes physiques (par extraction) et les pertes chimiques (réactions des phénols avec les radicaux peroxydes issus de l'oxydation du polymère).

Nous pouvons à présent comparer les résultats obtenus au moyen des différentes techniques de caractérisation afin de quantifier les pertes liées spécifiquement aux réactions chimiques.

✓ Comparaison des résultats obtenus par les différentes techniques de caractérisation : Comme pour le vieillissement dans l'air, les différentes techniques de caractérisation utilisées, pour suivre l'évolution de la concentration des antioxydants nous donnent accès à des informations complémentaires. En effet, l'évolution de la concentration en esters a été suivie par spectroscopie IR. Ces derniers étant thermiquement stables [21], leur consommation se résume à une perte physique par extraction dans l'eau. Les analyses par spectroscopie UV et les mesures de TIO par DSC, quant à elles, fournissent des informations sur l'évolution de la concentration de l'espèce antioxydante active (phénols), et donc à la fois sur les pertes par extraction et par consommation chimique.

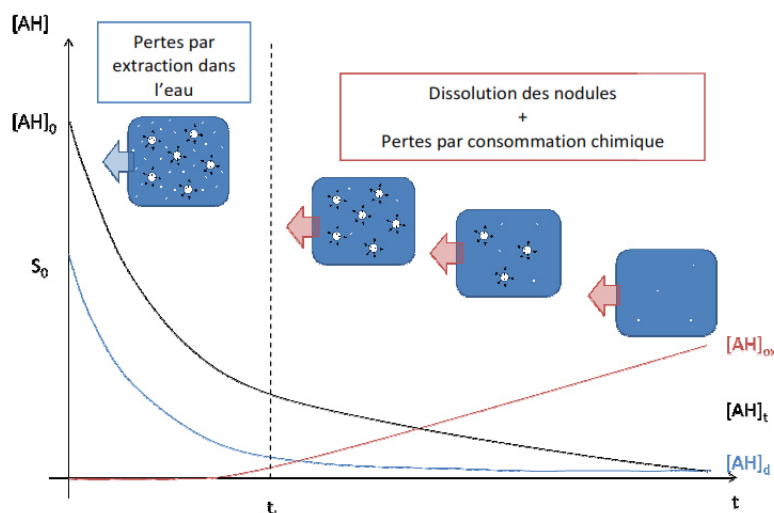


Figure 84 : Evolution schématique de la concentration en antioxydants dissous dans la phase amorphe $[AH]_d$ et antioxydants oxydés après réaction avec les radicaux peroxydes $[AH]_{ox}$ et de la concentration totale $[AH]_t$ au cours du vieillissement dans l'eau.

Après avoir dissocié la contribution des pertes physiques (évaporation) de celle liée aux pertes chimiques (réaction avec les radicaux peroxydes), nous sommes en mesure d'apporter des

précisions concernant l'évolution globale de la concentration en antioxydant phénolique. Les pertes globales peuvent être décrites à l'aide de deux régimes cinétiques distincts (**figure 84**) :

✚ Un premier régime, compris entre 0 et t_1 , au cours duquel la vitesse de consommation chimique des antioxydants resterait très faible. Ainsi, la diminution quasi-exponentielle de la concentration globale du film PE serait uniquement attribuée à l'évaporation des antioxydants dissous dans la phase amorphe du polymère. Ceci supposerait que l'antioxydant ne soit pas dissous totalement dans la matrice polymère et se trouve aussi sous forme de nodules. Ces nodules pourraient se présenter à l'état cristallin. Ainsi, la vitesse d'évaporation des molécules d'antioxydants dissous dans la phase amorphe pourrait apparaître plus rapide que la dissolution des nodules et laisserait supposer qu'au bout d'un temps t_1 , la quantité d'antioxydants dissous atteindrait des valeurs très faibles.

✚ Pour des durées d'exposition plus longues, la concentration d'antioxydants dissous dans la phase amorphe apparaîtrait très faible. Ainsi, la stabilisation de la phase amorphe par capture des radicaux ne serait plus totalement assurée. La concentration en radicaux pourrait donc augmenter avec la durée d'exposition et les antioxydants libérés progressivement par la dissolution des nodules seraient rapidement consommés chimiquement. Ainsi on aurait :

- Vitesse d'extraction \ll vitesse de dissolution des nodules,
- Et la vitesse de consommation chimique \approx vitesse de dissolution des nodules.

IV. Conclusion :

La caractérisation physico-chimique du polyéthylène basse densité a montrée que le matériau présente des valeurs de conductivité thermique, de diffusivité thermique et de capacité thermique lui permettant d'être utilisé comme matériau absorbant où la conversion du rayonnement solaire en chaleur est appréciable dans le dispositif à effet de serre considérés.

Les tests solaires ont montrés que la température atteinte au niveau du matériau absorbeur est de 105 °C, ce qui est suffisant pour la distillation solaire où un maximum d'eau distillé a été obtenu lorsque les conditions de températures extrêmes sont considérées. Le système d'isolation a une influence sur les échanges thermiques. Les résultats de tests solaires, en utilisant le film d'aluminium brillant, ont donné de meilleurs résultats.

Les résultats de la simulation numérique sont en concordance avec les résultats de la simulation expérimentale où un maximum d'échange a été enregistré à midi vrai (13h).

Les tests de vieillissements ont montrés que les propriétés du film en polyéthylène évoluent d'une manière défavorable et irréversible en fonction du temps lorsqu'ils sont soumis à des expositions solaires ou à des expositions thermiques. Cela se traduit par des mécanismes d'oxydation qui modifient les chaînes de polymère tant en photo oxydation ou en thermo oxydation. Lors de l'oxydation, les proportions des groupes de carbonyles sont dz 21 % en

mol d'acide carboxylite, de 33 % en mode d'aldéhydes et de 46 % en mode de cétone. Les observations microscopiques obtenues par MEB ont montrés la différence de microstructure sphérolitiques dans les échantillons du PE vieilli et dans le PE non soumis au vieillissement.

V. Références bibliographiques :

- [1] N. BABA AHMED, A. BENMOUSSAT, "Experimental study for the performance of solar distiller", *Journal of Energy and Power Engineering*, 7 (11), 2045-2053, 2013.
- [2] B. A. AKASH, S. M. MOUSA, W. NAYFEH, "Experimental study of the basin type solar still under local climate conditions", Renewable Energy Research Center, Department of Mechanical and Industrial Engineering, Applied Science, University Amman, 11931, Jordan, 1999.
- [3] O.O. BARDAN, H.A. AL- TAHAINEH: « The Effect of Coupling a Flat-Plate Collector on The Solar Still Productivity » Presented at the Conference on Desalination and the Environment, Santa Mergherita, Italy, 22-26-May 2005.
- [4] R. MENINA, H. BEN MOUSSA, L. ZEMMOURI, A. MOUSSAOUI, « Etude Expérimentale de l'Effet du Préchauffage sur la Productivité d'un Distillateur Solaire (Type : Hot - Box) », *Rev. Energ. Ren., Journées de Thermique (2001)* 145-150.
- [5] Z. HADDAD, A. CHAKER, N. BOUKERZAZA, « Etude du couplage d'un distillateur solaire avec un capteur plan », *Revue des Energies Renouvelables, ICRES-07, Tlemcen*, 179 – 186, 2007.
- [6] J. V. Gulmine et al., "Polyethylene characterization by FTIR", *Polymer Testing*, 21(5), 557-563, 2002.
- [7] G. A. George et al., "Real-time analysis of the thermal oxidation of polyolefins by FT-IR emission", *Polymer Degradation and Stability*, 48(2), 199-210, 1995.
- [8] S. Krimm, C.Y. Liang, G. B. B. M. Sutherland, "Infrared Spectra of High Polymers. II. Polyethylene", *The Journal of Chemical Physics*, 25(3), 549-562, 1956.
- [9] D. J. Carlsson, D. M. Wiles, "The Photodegradation of Polypropylene Films. III. Photolysis of Polypropylene Hydroperoxides", *Macromolecules*, 2(6), 597-606, 1969.
- [10] J. Lacoste, D. J. Carlsson, "Gamma-, photo-, and thermally-initiated oxidation of linear low density polyethylene: A quantitative comparison of oxidation products", *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 30(3), 493-500, 1992.
- [11] M. H. Tabankia, J.-L. Philippart, J.-L. Gardette, "Photo-oxidation of block copoly(ether-ester) thermoplastic elastomers", *polymer degradation and stability*, 12(4), 349-362, 1985.
- [12] N. Khelidj, « Vieillissement d'isolants de câbles en Polyéthylène en ambiance nucléaire », ENSAM Paris, 2006.

- [13] J. Tireau, « Propriétés à long terme des gaines de polyéthylène haute densité utilisées pour les ponts à hauban », Arts et Métiers Paris Tech: Paris, 2011.
- [14] N. González, M. J. F.-B., “Application of Fourier transform infrared spectroscopy in the study of interactions between PVC and plasticizers: PVC/plasticizer compatibility versus chemical structure of plasticizer”, *Journal of Applied Polymer Science*, 101(3), 1731-1737, 2006.
- [15] A. Rivaton, “Photochemical and thermal oxidation of poly(2,6-dimethyl-1,4-phenylene oxide)”, *polymer degradation and stability*, 49(1), 11-20, 1995.
- [16] A. Maccoll, “Heterolysis and the Pyrolysis of Alkyl Halides in the Gas Phase”, *Chemical Reviews*, 69(1), 33-60, 1969.
- [17] D. W. McCall et al., “Solubility and diffusion of water in low-density polyethylene”, *Macromolecules*, 17(9), 1644-1649, 1984.
- [18] D. W. Van Krevelen, “Properties of polymers, their correlation with chemical structure, their numerical estimation and prediction from additive group contributions”, 4 edition, 1972, Amsterdam-The Netherlands, Oxford-UK: Elsevier.
- [19] J. Verdu, « vieillissement des plastiques », AFNOR technique, ed. A.F.d. Normalisation. 1984, eyrolles: Paris.
- [20] B. Fayolle, E. Richaud, X. Colin, J. Verdu, Review: degradation-induced embrittlement in polyethylene. *Polymer Degradation and Stability*, 92, 231-238, 2008.
- [21] E. Richaud, « Durabilité des géotextiles en polypropylène », PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2006.
- [22] M. Lundback, C. Strandberg, A.C. Albertsson, M.S. Hedenqvist, U.W. Gedde, “Loss of stability by migration and chemical reaction of santonox r in branched polyethylene under anaerobic and aerobic conditions”, *Polymer Degradation and Stability*, 91, 1071–1078, 2006.
- [23] M. Bertoldo, F. Ciardelli, “Water extraction and degradation of a sterically hindered phenolic antioxidant in polypropylene films”, *Polymer*, 45(26), 8751–8759, 2004.
- [24] K. Möller, T. Gevert, “A solid-state investigation of the desorption/evaporation of hindered phenols from low density polyethylene using ftir and uv spectroscopy with integrating sphere: The effect of molecular size on the desorption”, *Journal of Applied Polymer Science*, 61, 1149–1162, 1998.
- [25] P.P. Klemchuk, P.L. Horng, “Transformation products of hindered phenolic antioxidants and colour development in polyolefins”, *Polym. Degradation Stab.*, 34, 333–346, 1991.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'étude dans le cadre de ce projet a pour objectif de comprendre le comportement énergétique des matériaux utilisés dans les systèmes de captation solaire. Le choix des matériaux et leurs sélectivité pour optimiser l'absorption et réduire les transferts thermiques à travers l'isolation ou encore les matériaux transparents pour diminuer les réflexions et obtenir le maximum de rayonnement convertis est la problématique de l'étude. On distinguera deux grandes catégories de matériaux :

- les matériaux de structure qu'on utilise essentiellement pour leurs capacités à soutenir des sollicitations mécaniques et thermiques.
- les matériaux fonctionnels qu'on utilise pour leurs propriétés physiques, telles que conductivité thermique ou électrique, magnétisme, propriétés optiques et radiatives ... comme dans les dispositifs solaires à effet de serre.

Certains matériaux se trouvent à la frontière entre les applications mécaniques et physiques, comme les matériaux polymères qui ont vu leur utilisation croître dans divers domaines vu leur facilité de mise en œuvre, leur faible coût de production et leurs caractéristiques physico-chimiques.

Nous avons étudié le comportement énergétique du polyéthylène basse densité utilisé comme matériau absorbant par une simulation expérimentale dans un prototype de distillateur solaire et par une simulation numérique. L'étude a été complétée par une caractérisation en vieillissement du matériau où le problème majeur que l'on rencontre pour les polymères thermoplastiques tel que le PE concerne leur durée de vie où de nombreux travaux ont été menés. La compréhension et la prédiction de la durabilité de ces matériaux par rapport à leur dégradation sont, d'une façon générale, moins avancées et assez disparates selon le mode de vieillissement. Tous les matériaux utilisés dans les dispositifs à effet de serre se caractérisent surtout par leur instabilité plus au moins rapide dans le temps vis-à-vis du rayonnement solaire et surtout sa fraction ultraviolette (UV).

En comportement énergétique sous exposition solaire, le PE a présenté un maximum d'échanges thermiques caractérisés par une grande absorption et une faible réflexion. Le distillateur solaire conventionnel est basé sur le principe de l'effet de serre. Lors de la distillation, l'augmentation de la température fait réchauffer l'eau saumâtre qui s'évapore. Cette capacité d'évaporation grandit au fur et à mesure que la température augmente jusqu'à ce que l'air atteigne sa saturation en vapeur d'eau. La vapeur d'eau ainsi obtenue se condense sous le vitrage. Les gouttelettes d'eau s'écoulent vers la partie inférieure. Les variations des températures nous suggèrent à dire que la production d'eau distillée dépend évidemment de l'énergie solaire incidente et aussi de la surface absorbante ; entre autre un volume de 2 litres de distillat de très bonne qualité a pu être récupéré en fin de journée. On a

constaté également un fort gradient de température entre la nappe d'eau, la zone tampon saturée de vapeur d'eau et la vitre, ce qui favorise la condensation et l'évaporation.

Lors de la distillation solaire l'influence de l'écart de température entre l'absorbeur et la vitre sur l'efficacité de l'échange thermique est à considérer.

En simulation numérique, l'outil choisit pour la résolution numérique est la méthode de Range-Kutta, bien adaptée à ce genre de problème. La validité de notre travail a été appréciée en comparant les résultats expérimentaux avec ceux donnés par la simulation numérique. A travers les résultats obtenus, on a constaté une forte concordance entre les résultats de la simulation numérique et ceux de la simulation expérimentale. Les faibles écarts des températures obtenues sont dus probablement d'une part à la précision de la mesure et d'autre part aux hypothèses utilisées dans la simulation numérique.

Pour ce faire, nous avons utilisé un modèle numérique permettant de simuler le fonctionnement d'un capteur solaire. Un programme de calcul a été développé. Il a été utilisé pour obtenir les variations de certains paramètres, en fonction de certains facteurs à la région de Tlemcen, qui est une région bénéficiant d'un bon ensoleillement, surtout durant la d'été.

Nous avons étudié à cet effet, l'influence de cet écart sur les différentes quantités échangé, les résultats obtenus nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- L'augmentation de la puissance absorbée par l'absorbeur augmente la température de l'absorbeur,
- L'augmentation de la température de l'absorbeur augmente la puissance utile reçue par le fluide caloporteur qui est l'air,
- L'augmentation de la température de l'absorbeur a pour effet d'augmenter la température du fluide caloporteur (l'air),
- Les pertes globales augmentent avec l'augmentation de l'écart de température entre l'absorbeur et la vitre,
- Une augmentation de l'écart de température entre l'absorbeur et la vitre augmentera le rendement du capteur solaire,
- Une augmentation de l'écart de température entre l'absorbeur et le vitrage minimisera l'entropie du système.

A la fin on pense que des études peuvent être développées sur :

- Les pertes de chaleur, car la diminution de ces pertes à un grand effet sur l'efficacité des capteurs solaires,
- Les pertes de charge, qui ont une grande influence sur le rendement du capteur solaire, et leurs effets sur la minimisation de l'entropie et la maximisation de l'énergie,
- Déterminer les facteurs responsables de la génération de l'entropie du fluide caloporteur.

En comportement en vieillissement sous exposition thermique du PE comporte les conclusions suivantes :

- Le vieillissement thermique du PE dans l'air consiste en une perte physique et une consommation chimique suivies immédiatement par une oxydation brutale du polymère,
- Dès que la totalité des antioxydants a disparu, le PE s'oxyde brutalement et se fragilise. On peut donc raisonnablement considérer que la durée de vie du PE correspond au temps d'induction de l'oxydation qui, lui-même correspond au temps nécessaire pour perdre l'ensemble des antioxydants ($t_f \approx t_i = t_s$),
- Les produits d'oxydation les plus polaires, c'est-à-dire les groupements alcools et acides carboxyliques, sont les principaux contributeurs à l'absorption d'eau d'un PE non oxyde, ayant un taux de cristallinité de 39 %, est extrêmement faible ≈ 18 ppm.

En perspective de cette étude, les limites de la distillation solaire évoquées suscitent différentes voies de recherche à développer et différents matériaux à tester. Il s'agit de poursuivre le développement d'un distillateur solaire sous des normes pouvant travailler dans n'importe quelles conditions de travail afin de valider son utilisation pour n'importe quel lieu. Par ailleurs, l'introduction de nouveaux matériaux légers et efficaces sont à considérer. L'introduction d'un système de refroidissement autonome pouvant refroidir le vitrage périodiquement dans le but d'augmenter la condensation est souhaitable.

Une étude future serait souhaitable en utilisant le polyéthylène haute densité comme matériau absorbant et qui présente de meilleures caractéristiques physico-chimiques relatives aux échanges thermiques.

La simulation numérique peut être améliorée en diminuant les hypothèses et en développant d'autres codes de calcul.

ANNEXE

Experimental Study for the Performance of the Solar Distiller

Nassim Baba Ahmed and Abderrahim Benmoussat

Material and Environment Research of LAEPO Laboratory, Aboubekr Belkaid University of Tlemcen, Tlemcen 13000, Algeria

Received: December 27, 2012 / Accepted: March 05, 2013 / Published: November 30, 2013.

Abstract: This article describes the experimental results obtained by the solar distiller by specifying the radiative properties of materials, the analysis of various types of losses in the system and the establishment of the energy assessment of the system being the main question to consider. The experiment was undertaken in Tlemcen-Algeria by working out a solar distiller in order to measure the various temperatures of the system. Salt was added to study the negotiable effect of the salinity of water on solar distillation and it is noted that the production of distilled water decreases with salinity. The distiller is forwarded to a constant global solar flow. Experimental results obtained in heat transfer of natural convection in the pure and simultaneous heat and mass transfer, proven that these phenomena are in the boundary layer. This enables people to admit that the existence of a stagnant zone inside of distiller is called the “buffer zones”.

Key words: Desalination, solar distiller, Tlemcen-Algeria, condensation, evaporation.

Nomenclature

V	Wind speed ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
h_{ca}	The exchange coefficient by convection ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)
β	The coefficient of denunciation of the brine ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
ρ	The reflectance of aluminum
λ	Thermal conductivity ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)
B	The inclination of the glass ($^{\circ}$)
ρ_E	The density of the brine ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
C_p	The specific heat of brine ($\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)
L_v	Latent heat of vaporization ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
T_{vi}	Interne temperature of the glass ($^{\circ}\text{C}$)
T_{ve}	Extern temperature of the glass ($^{\circ}\text{C}$)
T_e	Temperature of water ($^{\circ}\text{C}$)
T_{tamp}	Temperature of buffer zone ($^{\circ}\text{C}$)
T_{isoi}	Intern temperature of insulation ($^{\circ}\text{C}$)
T_{isoe}	Extern temperature of insulation ($^{\circ}\text{C}$)
T_b	Temperature of vat ($^{\circ}\text{C}$)
η	Dynamic viscosity of brine ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)

1. Introduction

The thermal distillation uses the solar energy

Corresponding author: Nassim Baba Ahmed, Dr., research fields: energy physics, materials science (fatigue damage and vieillissement materials) and heat the buildings. E-mail: nassimbaba@yahoo.fr.

conversion (radiation) into heat energy [1, 2] for producing potable water from saline water. The solar distiller of a single effect is the first device that has attracted the attention of scientists by using the solar energy and produce potable water from saline water. Efforts are always looking to research materials with properties that balance performance and economy. The goal is the design of a laboratory prototype of the distiller single greenhouse and then studies the effect of some parameters on the distiller performances; the authors choose the following parameters:

- (1) the brackish water with different salinity degrees;
- (2) the height variation of the brackish water allowed in the pool;
- (3) the use of different insulation systems.

For its various parameters, the study focuses on the temperature evolution in different parts of distiller: in brackish water, at the outer surface of the glass, in the insulation, of atmosphere and finally the flow of distilled water.

The results will be used to modeling heat transfer by natural convection. For that, there exists a stagnant zone inside the distiller to be called “buffer zone”, which the proposition of one model based on global balance.

2. Measuring Principle

Solar stills operate on the same principles that produce rainfall (Fig. 1). The sun is allowed into and trapped in the still. The high temperatures produced destroy all pathogens. The water evaporates and in this process, only pure water vapor rises in the still, only to condense on the glass. The glass is sloped to the south, and the condensed water runs down the glass and is collected in a trough. The water is allowed out of the collector through silicone tubing, and is collected in 5 gallon glass jugs. There are no moving parts in the solar still, and only the sun’s energy is required for operation.

The design of the solar still began with many hours spent researching previous designs, successes and failures. The goal for the still project was to design and develop plans for a still which could be replicated using “off the shelf” materials.

A design of still which is easy to replicate with using standard building materials [3], of which 95% are available “off the shelf”. The exterior materials were chosen for their ability to withstand the desert climate with minimal maintenance. The still produces an average of 3 gallons per day in the summer months. Winter production is expected to be 1/2 that amount. The solar still can utilize a standard size patio glass replacement, 34 “X76”.

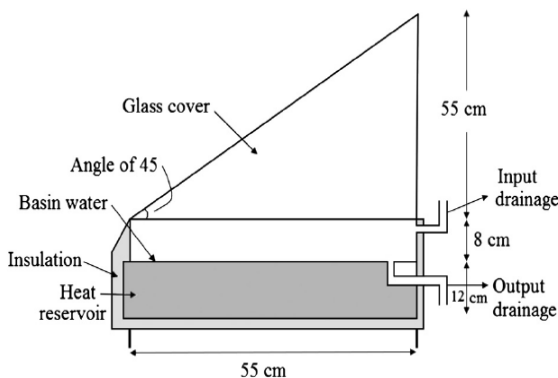


Fig. 1 Working principle of solar distiller [5].

Brackish water is carefully placed inside solar still via an inlet near the base of the still. As sunlight warms the black silicone bottom and heat is transferred to the water, the top of the water evaporates on to the inside of the glass cover, which is tilted toward the fresh water drain. Approximately 8 square feet (of glass cover) will distill around 1 gallon of water per day, over 5 h of full sunlight.

The most important elements of the design are the sealing of the base with black [4], high temperature silicone rubber and creating a good seal between the glass cover and the bottom of the box.

3. Materials and Methods

Heat reservoir (absorber): A black paint available is used at hardware stores for first applied on the basis of the case, and a plain black plastic hardware [6]. The latter acts as a moisture barrier to water leakage. It is deposited at the bottom of the basin of the housing so that the shape of the basin. Since it is very thin, the error on the evaporation surface is insignificant.

Insulation [7]: Insulation is one of the parameters wanted to study the influence on system performance. For this, two types of insulation in succession are used to reinforce the action of wood (Table 1) that is the first layer, but which has a coefficient of a low conductivity ($\lambda = 0.13$ to $0.40 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) and therefore a relatively high heat loss.

In this system, it is to enjoy the excellent reflectance of aluminum ($\rho = 0.95$) that coating a hot surface without touching it. It returns the infrared radiation it emits, thus limiting its heat loss by radiation and property of poor conductor of plastic limiting heat loss by convection from the hot surface. This isolation was used for testing from May 23-31, 2011.

Sealing system: The sealing of the assembly was performed by using an ordinary transparent cover (Table 2) that adheres to wood and glass.

Hardware white paint applied over the entire outer surface of the timber for testing from May 15-19, 2011.

A film of aluminum foil available at hardware store

Table 1 The housing of solar distiller.

Distiller	Observation
Nature	Wood
Thickness of the wood	0.008 (m)
Inner surface of the basin	0.69 (m ²)
Rear height of the housing	0.345 (m)
Height front cover	0.12 (m)
Evaporation surface	0.53 × 0.73 (m ²)

Table 2 Transparent cover of solar distiller.

Window	Observation
Nature	Ordinary window
Number	1
Thickness of the glass	0.5
Tilt the glass on the case	18°
Dimension of the outer surface	0.55 × 0.75 (m ²)

is superimposed on a film of transparent plastic hardware. The latter serving as a support for aluminum resistance and is contributing very fragile at the same properties as its poor heat conductor [8]. This system is superimposed on the previous system housing with white paint, taking care to leave a space between the two systems.

Collection system: A hollow rubber plate was used in the shape of a half cylinder of smooth surface properly prepared along the glass so to collect all the droplets flowing on the surface of the glass. It is then used a syringe to pump the condensate.

Land of experimentation: The solar distiller was conducted in the laboratory of thermodynamics and materials science of Abou Bekr Belkaïd University of Tlemcen in Algeria and testing on the ground adjacent to the same block of time on exposures ranging from 7 h to 18 h.

Geographic coordinates of Tlemcen:

Altitude	Latitude	Longitude
750 m	+35°28' N	-1°17'

The distiller deposited on a high table had a south-north orientation.

Test campaign: The campaign of tests was based on measurements of the temperature of the surrounding environment, the temperature of the outer surface of the glass, the temperature of salt water, the temperature of the outer surface of the insulation and the flow of distilled water with time. At the same time, some

changes are made in certain parameters to see their effects on the evolution of those measured.

The parameters that vary are:

The salt concentration of brackish water: Brackish water used is synthetic. It is prepared by dissolving a known amount of ordinary table salt in a known amount of distilled water. The concentrations used are as follow: 5 g/L, 7 g/L, 7.85 g/L and 10 g/L.

Insulation: Two types of insulation have been tested namely: first, applying a coat of white paint on the exterior surface to a whole range of the base case and second, the integration of a sheet of aluminum.

Temperature measuring devices: It was used for temperature measurements, the thermocouple type K (temperature measurement of the brackish water and of the surrounding environment) and digital thermometer (temperature measurement of glass and insulation). The K-type thermocouple is a junction of chromel and alumel. It has a wide measuring range from -100 °C to +1,370 °C. The measurements are made after 5 min for each thermometer. The results are summarized in Table 3.

4. Results and Discussion

In Fig. 2, the evolution of the quantity of water distilled according to time for various days (May 15-30, 2011) was negotiated. The experimental results concern essentially the variation of distillate according to time by taking account of sunlight, daily production, internal efficiency and overall and finally the performance factor for both systems (with and without the aluminum foil). These results have proven to be consistent with the experimental results by Boubekri and Chaker [9].

In Fig. 3, the influence of wind speed on the temperature of the glass was observed, where the difference in temperature varies gradually. There is little

Table 3 The temperature measurements devices.

Type of thermometer	Thermocouple type K	Digital thermometer
Temperature indicators at 0 °C	-0.13	0.00
Temperature indicators at 100 °C	94.45	98.70

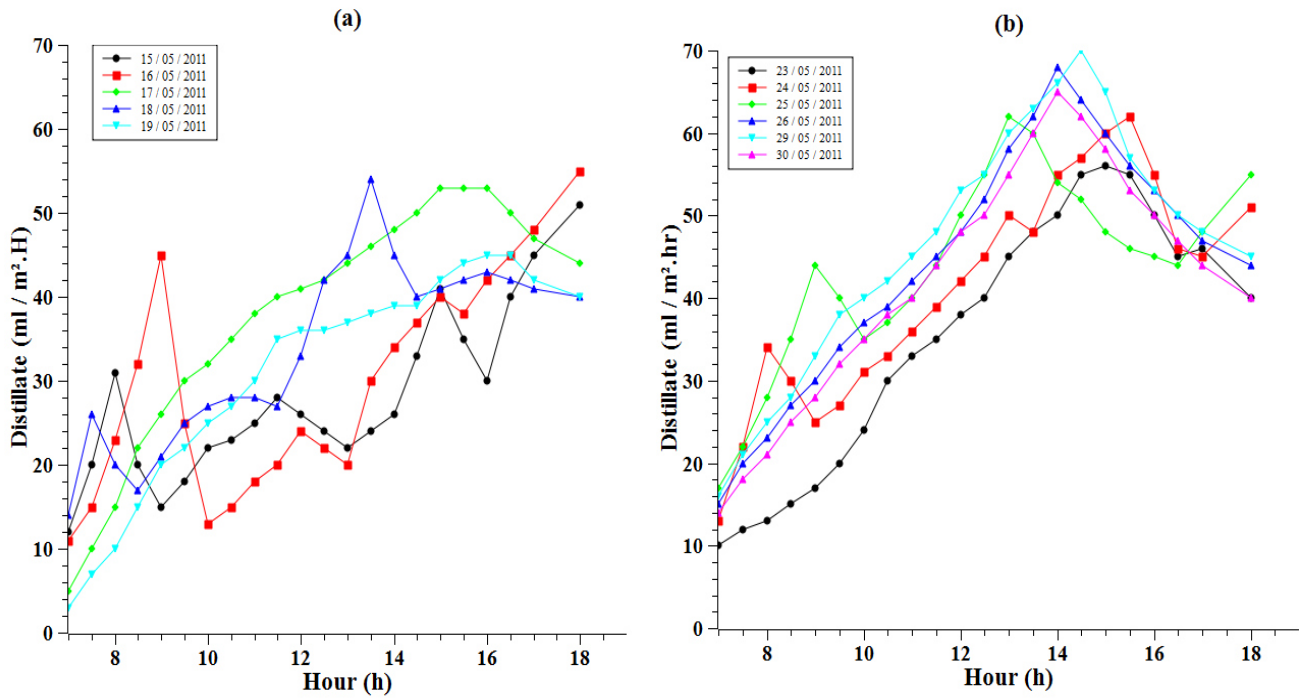


Fig. 2 Changes in the amount of distillate water versus time for different days: (a) simple distiller without aluminum foil; (b) simple distiller with aluminum foil.

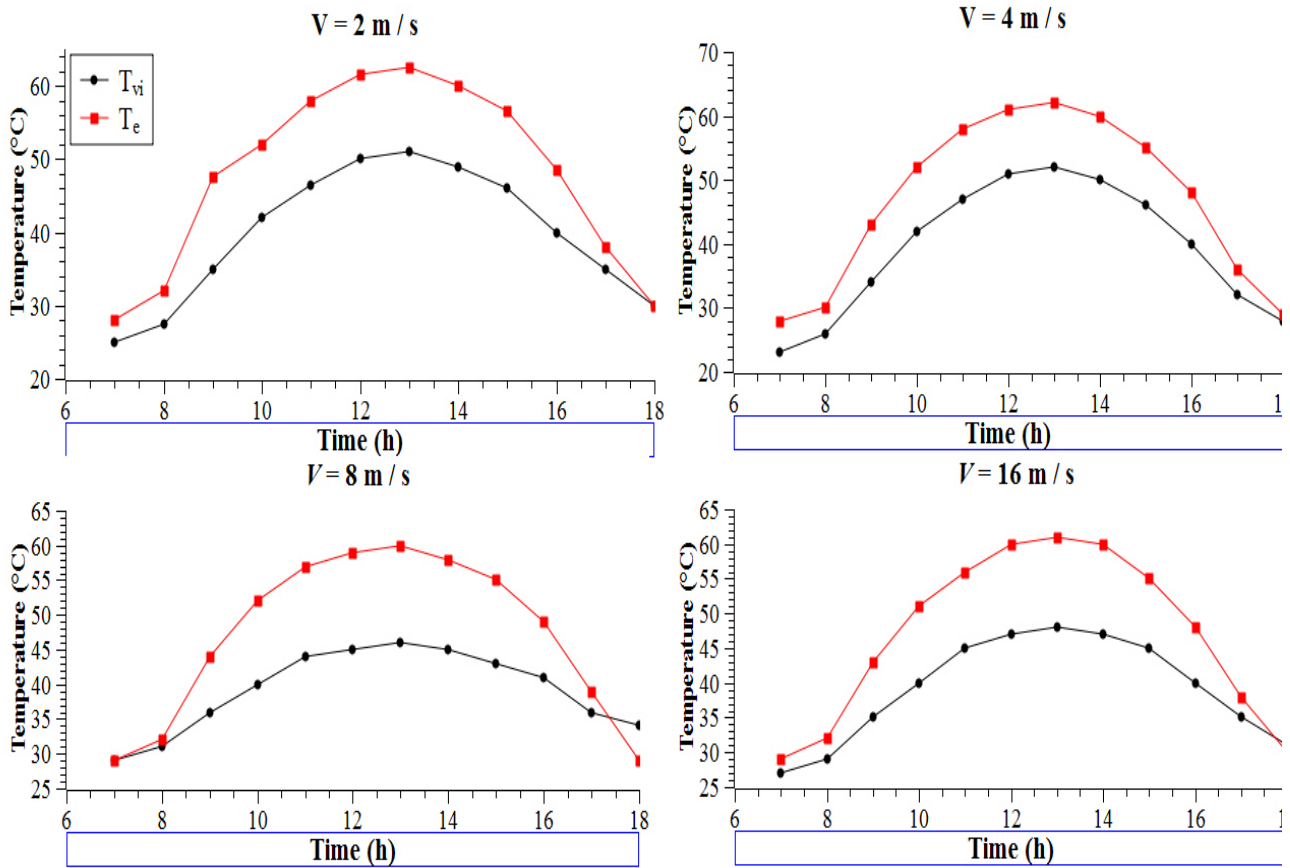


Fig. 3 Influence of wind speed on temperatures of the various elements of the distiller.

influence of wind on water temperature, which is the greenhouse effect itself. So the effect of wind on the production schedule shows that solar distills.

The increase in wind speed leads initially to increased production of the distiller, but beyond a critical value, the opposite occurs. Indeed, when the wind speed increases slightly, the evaporation process is accelerated which increases the temperature difference between brine and the glass, this leads to an increase in production. High speeds cause the cooling of the outer surface of the glass, resulting in a decrease in brine temperature on the one hand and increased convection losses at the glass (outer surface) which are related to wind speed by the exchange coefficient by convection ($h_{ca} = 5.7 + 3.8 \times V_v$), leading to a drop in production.

As seen in Fig. 4, the increase in the inclination of the glass decreases the production, the production is better between 0° and 30° , then decreases from a slope greater than 30° (the rate evaporation decreases).

The effect of the thickness of the brine on production, a distiller plan is shown in Fig. 5, which shows clearly that in all cases the decrease in the thickness of the layer water leads to the increase of the characteristics of distillers.

In Fig. 6, it is easily seen the illustrate for the temporal evolution of the thermal conductivity, coefficient of denunciation, and the specific heat of brine that will reach maximum values between 11:00 a.m. and approximately 2:00 p.m. and have the same speed. The brine temperature directly affects these characteristics.

Thus, and as shown in Fig. 7, production varies in the same direction as the thermophysical characteristics (thermal conductivity and specific heat). Fig. 8 illustrates the change in output as a function of latent heat, dynamic viscosity and density of the brine. It is noted that production increases when these parameters decrease.

In Fig. 9, the production increases when the temperature difference between the water table and the inner surface of the glass increases.

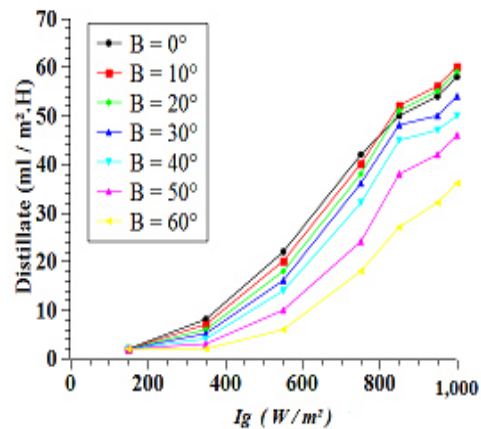


Fig. 4 Effect of temperature on the production depending on the overall intensity of solar radiation.

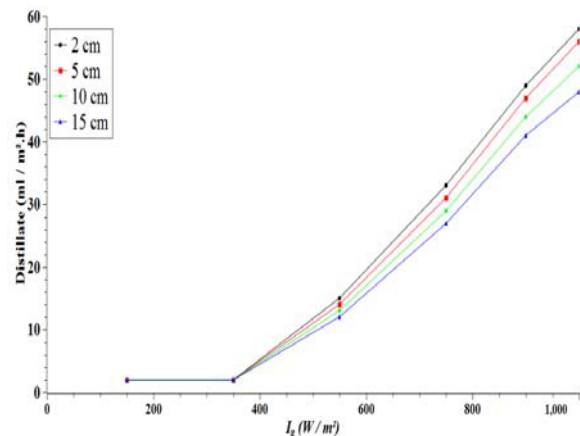


Fig. 5 The influence of the thickness of the sheet of water on the amount of distilled.

Distillate production is an increasing function of the temperature of the brine. However, this growth diminishes for high values of the latter Fig. 10. This shows that increasing the temperature of the brine has a positive effect on these results and is in agreement with the experimental results given by Chaker and all. This result does not mean a decrease in the production of solar distiller with T_e but an increase in the production.

In Fig. 11a, the tray and absorbent inner surface of the insulation have the highest temperatures: The temperature of the tank reaches a maximum value of 65°C , resulting from the power absorbed by the absorber is large and above that absorbed by the brine and the glass. Also the insulation is placed below the absorbency of a high thermal conductivity, where the temperature of the inside of the insulation is important.

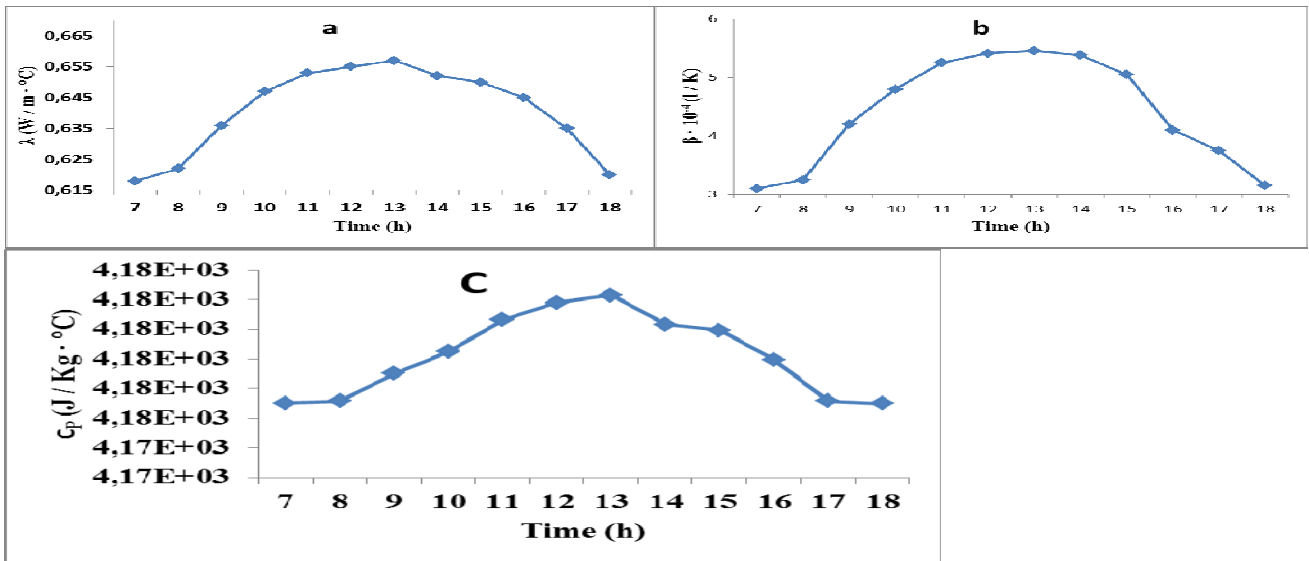


Fig. 6 Temporal variation of (a) the thermal conductivity of the brine; (b) the coefficient of denunciation of the brine; (c) of the specific heat of brine.

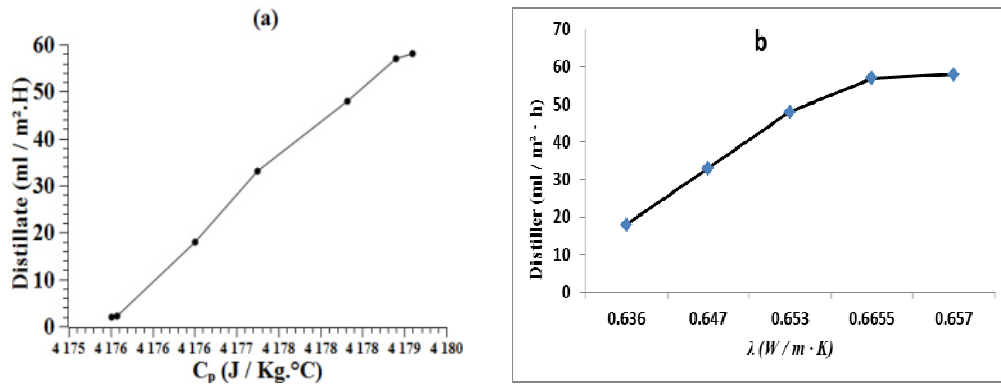


Fig. 7 The change in output depending on: (a) the specific heat; (b) thermal conductivity.

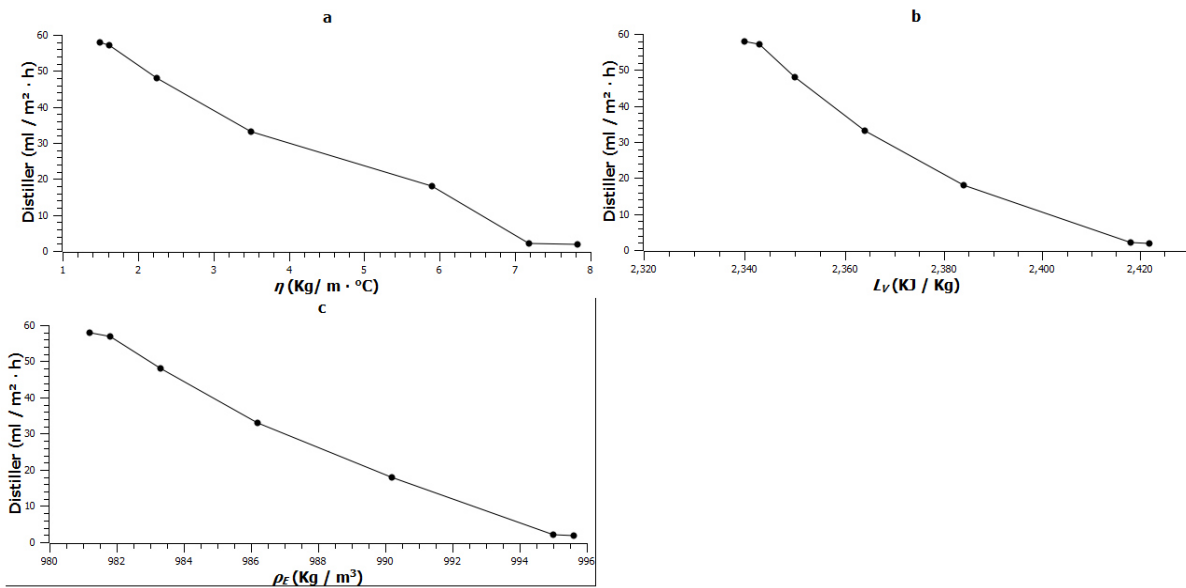


Fig. 8 Change in output as a function of: (a) dynamic viscosity; (b) the latent heat; (c) the density of the brine.

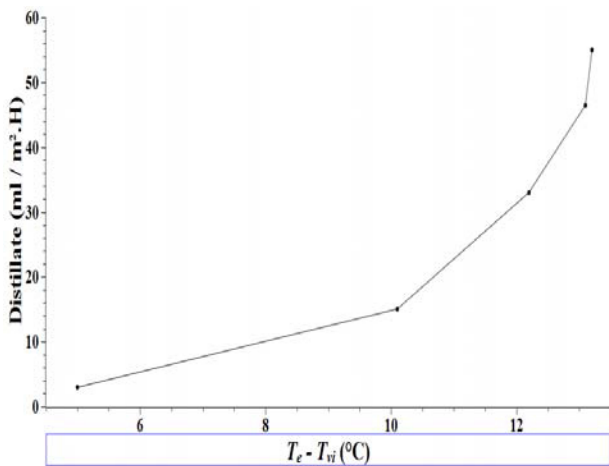


Fig. 9 Change in output depending on the temperature difference between the water table and surface of the glass.

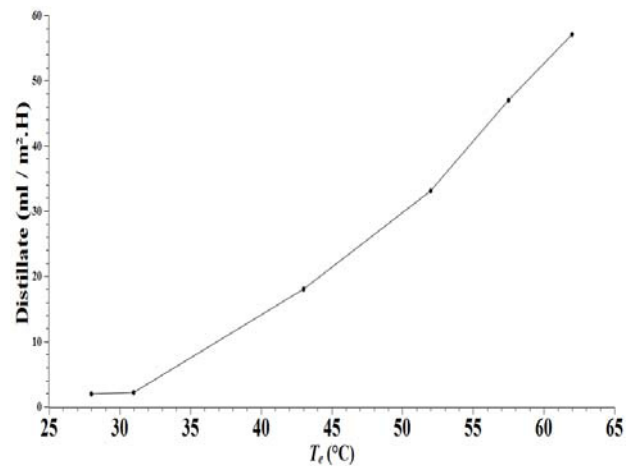


Fig. 10 Change in output depending on the temperature of the brine.

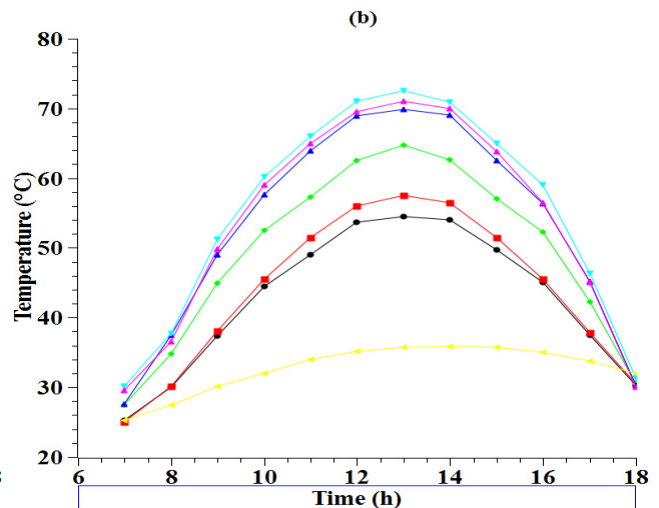
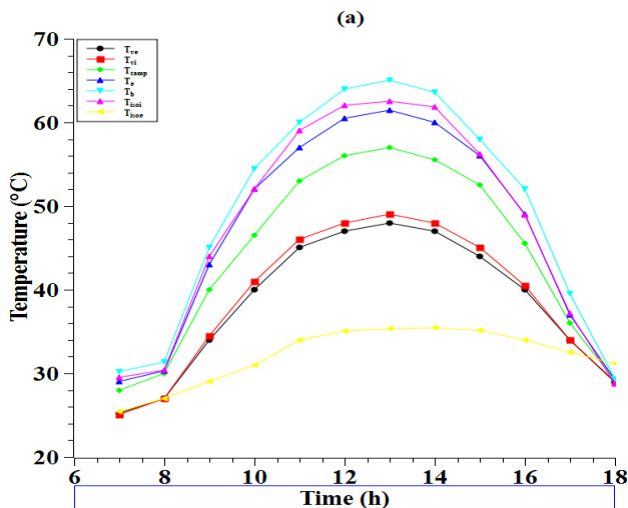


Fig. 11 Temperature variation of different elements of the distiller: (a) with white paint; (b) with aluminum foil.

Rising temperatures inside and outside of the glass is due to absorption by the glass of the incoming solar radiation and heat transferred by the evaporation surface (brine) by radiation, convection and evaporation.

The temperature of the inner surface is slightly higher than the outside; this is explained by the large amount of flux received by the inside while the outside is subject to wind action. Absorption of solar flux, the water heats up and cause the elevation of the temperature. The temperature of the absorbent tray is slightly higher than the brine due to the characteristics of the absorber (high absorption coefficient). The buffer zone is the area of saturated steam, the

temperature is high enough. It was a classical variation bell-shaped solar radiation.

The shape of the temporal variation of the temperature of each component of the distiller is similar to the results presented by Deliou et al. [10] on their experimental study. They found an increase in water temperature reaches a value up to 63 °C, as well as work of Deliou et al., who found similar results to our system.

There through the Fig. 11b, the temperature variation of each component of the still looks the same as in the case with aluminum foil, except that the temperature values are higher. This increase shows that the aluminum foil causes a pre-heating of the inside of

the insulation of the tank, water and the inside of the glass [11].

Fig. 12 shows that output increases with total irradiation. For however, great powers for both systems with and without preheating, the production is even higher than the radiation received is more important. So the coupling with a sensor involves an additional surface to capture solar radiation to warm the water to be distilled, which leads to an improvement in the processes of evaporation and therefore a better production for a system with a warm system with preheating. These results agree with theoretical results obtained by Barka et al. [12] and Haddad et al. [13], also led to similar conclusions.

Fig. 13 shows that the production increases with temperature. In fact, this increase in temperature causes

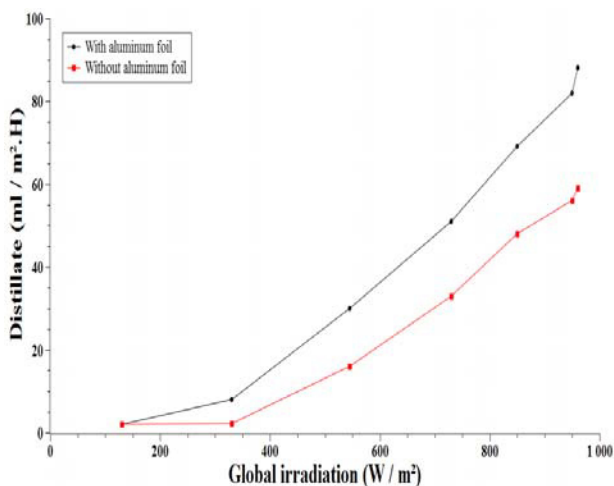


Fig. 12 The change in production as a function of global radiation for a distiller without and with aluminum foil.

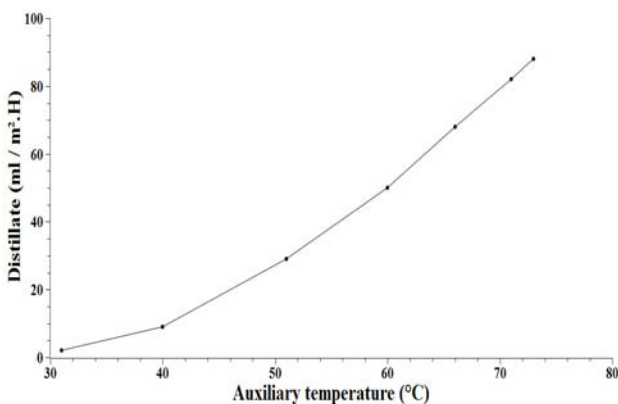


Fig. 13 The variation of the production in function of temperature.

the warming of the water inside the tank of water (evaporation surface), causing a temperature rise of the latter, and consequently an increase in condensation. These results are consistent with results obtained by Haddad et al. [13], who found that the production increases with temperature beyond a value approximately equal to 85 °C, an output fell.

5. Conclusions

The present study was aimed mainly conventional solar still, it is based on the principle of the greenhouse effect. The distiller consists of a basin covered with a black absorbing layer and a transparent cover ordinary glass or sometimes plastic set slope. The increase in temperature due to the greenhouse effect warms the water and evaporates. The evaporation capacity grows gradually as the temperature increases until the air reaches its saturation with water vapor. The resulting water vapor condenses in the glass. The droplets of water flow to the bottom of the window in a gutter leading to a storage tank for recovering the distillate.

The results highlight the influence of external and internal parameters on the operating characteristics of the solar still including production, internal efficiency, overall efficiency and the factor of performance.

The solar radiation that is the parameter most influencing these characteristics, and that the latter is at the same pace as the temporal variation of solar irradiance and the increase in temperature leads to an increase of these characteristics (output, internal efficiency, overall efficiency and the factor of performance). The increase in wind speed leads to improvement in the exchange, up to wait for a critical value at which an adverse effect on these parameters. It shown that increasing water depth to the opposite effect and thus leads to a decrease in water production.

The thermophysical parameters of the brine significantly affect the production, since they depend on the temperature of the brine and they are even influenced by the parameters of sunshine and atmosphere.

Through the results, it was found that must be maintained:

A large temperature difference between the evaporation surface and the surface of condensation, a water temperature booster higher would have a conductivity high heat, a high specific heat and high thermal diffusivity and also a cinematic and a low coefficient of expansion high heat.

Through the results, there was a strong concordance between the results of numerical simulation and those of the experiment. The small differences in temperature are probably due partly to the measurement accuracy and also to assumptions used in the simulation.

Changes in temperatures it suggest that the production of distilled water obviously depends on the incident solar energy and also the absorbing surface, among other things a volume of 2 L of high quality distillate was recovered in the end of the day. It also found a strong temperature gradient between the water table, the buffer saturated with water vapor and the glass, which promotes condensation and evaporation.

Reference

- [1] G.N. Tiwari, H.N. Singh, R. Tripathi, Present status of solar distillation, *Solar Energy* 75 (5) (2003) 367-373.
- [2] H.S. Aybar, *Solar Desalination for the 21st Century*, Springer, 2007, pp. 207-214.
- [3] R. Dev, S.A. Abdul-Wahab, G.N. Tiwari, Performance study of the inverted absorber solar still with water depth and total dissolved solid, *Applied Energy* 88 (1) (2011) 252-264.
- [4] M. Thirugnanasambandam, S. Iniyan, R. Goic, A review of solar thermal technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (1) (2010) 312-322.
- [5] N. Setoodeh, R. Rahimi, A. Ameri, Modeling and determination of heat transfer coefficient in a basin solar still using CFD, *Desalination* 268 (2001) 103-110.
- [6] Y.Z. Guo, Y.L. Jian, B.S. Hai, J. Luoa, Y.F. Yuan, J.C. Zhao, Isolation and characterization of an ewly isolated polycyclicaromatic hydrocarbons degrading janibacter anopheles strain JY11, *Journal of Hazardous Materials* 172 (2009) 580-586.
- [7] P. Qin, G. Fang, Z. Wei, F. Xi, Z. Qiao, C. Fei, et al., Influence of thermal radiation during aluminum thermal evaporation on organic solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 95 (12) (2011) 3311-3317.
- [8] P.T. Tsilingiris, The glazing temperature measurement in solar stills—Errors and implications on performance evaluation, *Applied Energy* 88 (2011) 4936-4944.
- [9] M. Boubekri, A. Chaker, Yield of an improved solar still: Numerical approach, *Energy Procedia* 6 (2011) 610-617.
- [10] A. Deliou, N. Bessas, Z. Belgroun, H. Aburideh, A. Lounis, A. Chikouche, Etude expérimentale des caractéristiques d'un distillateur solaire à effet de serre, *Revue des Energies Renouvelables CICME'08, Sousse, 2008*, pp. 109-118.
- [11] A.A. El-Sebaï, S. Aboul-Enein, M.R.I. Ramadan, A.M. Khallaf, Thermal performance of an ASBS (active single basin solar) still coupled to SSP (shallow solar pond), *Desalination* 280 (1-3) (2011) 183-190.
- [12] A. Barka, J.J. Bernard, B. Benyoucef, Thermal behavior of a conductor submitted to skin effect, *Applied Thermal Engineering* 23 (10) (2003) 1261-1274.
- [13] Z. Haddad, A. Chaker, N. Boukerzaza, Etude du couplage d'un distillateur solaire avec un capteur plan, *Revue des Energies Renouvelables, ICRESO-07, Tlemcen, 2007*, pp. 179-186.



**MESURES EXPERIMENTALES, ANALYSE ET MODELISATION DE LA
DEPENDANCE DE L'EMISSIVITE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE.**

N. Baba Ahmed*, A. Benmoussat, T. Benouaz

Departement de physique, Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen B.P. 119 13000

Tlemcen Algerie

E-mail: nassimbaba@yahoo.fr

Reçu le 01 février 2010, reçu sous forme révisée le 17 avril 2010 accepté le 02 juin 2010

Accessible en ligne le 30 juin 2010

Abstract

We propose a direct method of measurement of the total emissivity of opaque samples on a range of temperature around the ambient one. The method rests on the modulation of the temperature of the sample and the infra-red signal processing resulting from the surface of the sample we model the total emissivity obtained in experiments according to the temperature to establish linear correlations. This leads us to apply the method of optimal linearization associated the finite element method with the nonlinear problem of transfer of heat if thermal conductivity, the specific heat and the emissivity of studied material depend on the temperature. We obtain a good agreement between the resolution of the nonlinear equation of heat and the results obtained by the experimentation. .

Keywords: Emissivity, Température, optimal Linearisation, finite elements.

Résumé

Nous proposons une méthode directe de mesure de l'émissivité totale d'échantillons opaques sur une gamme de température autour de l'ambiante. La méthode repose sur la modulation de la température de l'échantillon et le traitement de signal infrarouge issu de la surface de l'échantillon. Nous modélisons l'émissivité totale obtenue

expérimentalement en fonction de la température pour établir des corrélations linéaires. Ceci nous amène à appliquer la méthode de linéarisation optimale associée à la méthode des éléments finis au problème non linéaire de transfert de chaleur dans le cas où la conductivité thermique, la chaleur spécifique et l'émissivité du matériau étudié dépendent de la température. Nous obtenons un bon accord entre la résolution de l'équation non linéaire de la chaleur et les résultats obtenus par l'expérimentation.

Mots clé : Emissivité, Température, Linéarisation optimale, éléments finis.

Introduction

La modélisation des transferts thermiques nécessite une bonne connaissance des propriétés radiatives des matériaux. Dans le cas des matériaux opaques, le paramètre le plus pertinent pour décrire les transferts radiatifs est l'émissivité totale. Cette émissivité dépend d'un grand nombre de facteurs, en particulier de la composition chimique du matériau (diélectrique ou conducteur), de la géométrie et du type de surface (rugosité, oxydation, salissures...) du matériau, de la température, de l'angle de mesure, de l'épaisseur du matériau, de la bande spectrale de cette mesure et de la longueur d'onde à laquelle s'effectue la mesure...

L'émissivité exprime la capacité des matériaux à absorber ou à émettre l'énergie infrarouge. Sa valeur est comprise entre 0 et 1. Dans la majorité des cas, les valeurs de l'émissivité doivent être complétées et vérifiées par des mesures.

Nous proposons une méthode directe [1] de mesure de l'émissivité totale d'échantillons opaques sur une gamme de température autour de l'ambiante. La méthode repose sur la modulation de la température de l'échantillon et le traitement de signal infrarouge issu de la surface de l'échantillon. Nous lui associons la méthode de l'hémisphère réfléchissant pour la mesure de l'émissivité de la référence (peinture noire) car au départ nous n'utilisons pas une référence d'émissivité, source importante d'erreur dans ce type de mesures. Cette méthode radiométrique périodique est d'autant plus efficace lorsque le flux réfléchi est très important, notamment lors des mesures d'émissivité à basses températures.

Des corrélations entre l'émissivité totale [2] et la température existent dans la littérature, mais aucune vérification expérimentale, à notre connaissance, n'a encore été effectuée aux basses températures. Ainsi, nous modélisons l'émissivité totale obtenue expérimentalement en fonction de la température. Ceci nous amène à résoudre une

équation non linéaire de transfert de chaleur (la non linéarité est due essentiellement à la dépendance entre l'émissivité et la température).

Nous utilisons pour cela un couplage de deux méthodes numériques : La méthode de linéarisation optimale [3] qui permet d'optimiser les paramètres à l'origine de la non linéarité, puis nous résolvons notre équation devenue linéaire optimale par la méthode des éléments finis.

Principe de la méthode de mesure

La technique utilisée [4] est une méthode de mesure directe par radiométrie périodique en régime modulé (figure 1). La température de l'échantillon est donnée par la relation suivante :

$$T = \bar{T} + T_0 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t + \varphi) \quad (1)$$

Où \bar{T} , T_0 et f_0 sont respectivement la température moyenne de l'échantillon, l'amplitude de modulation et la fréquence.

Le détecteur infrarouge mesure le flux total issu de l'échantillon et fournit la tension sinusoïdale $U(t)$ dont la transformée de Fourier s'écrit :

$$\tilde{U}(f_0) = \tilde{K}(f_0) \cdot \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot S}{\pi} \cdot \tilde{T}^4(f_0) \quad (2)$$

Où $\tilde{K}(f_0)$ est la transformée de Fourier de la constante de la chaîne de mesure $k(t)$.

La puissance thermique générée par les sources de chaleur est décrite par l'effet Joule et est donnée par :

$$P(\Omega, t) = \frac{(U(T, t))^2}{\rho(T)} = \left(\frac{K \cdot \sigma}{\pi} \right)^2 \cdot \frac{[\varepsilon(T)]^2}{\rho(T)} \cdot T^8 \quad (3)$$

Où $U(T)$ est la densité de tension électrique $V \cdot m^{-2}$ et $\rho(T)$ est la résistivité électrique en $\Omega \cdot m$ et Ω est le domaine décrit par l'échantillon.

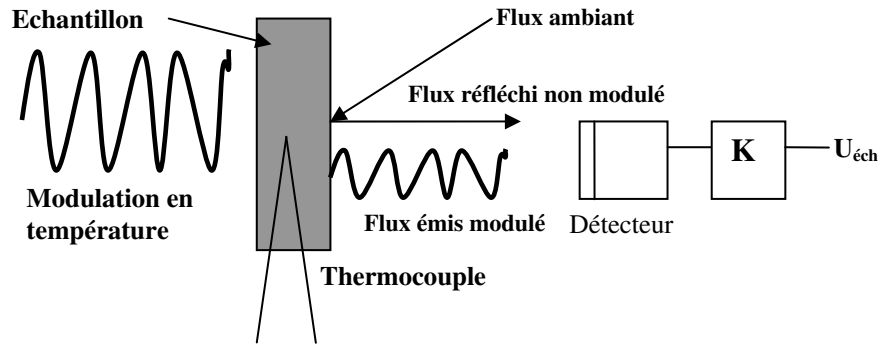


Figure 1: Principe de la méthode de mesure radiométrique en régime modulé.

Pour déterminer l'émission de l'échantillon, il est nécessaire d'effectuer deux mesures : une sur l'échantillon et l'autre sur une surface de référence d'émissivité connue. On aboutira à la relation suivante :

$$\varepsilon_{éch} = \varepsilon_{réf} \cdot \frac{|\tilde{U}_{éch}(f_0)| \cdot |\tilde{T}_{réf}^4(f_0)|}{|\tilde{U}_{réf}(f_0)| \cdot |\tilde{T}_{éch}^4(f_0)|} \quad (4)$$

D'après cette relation, on peut déterminer l'émissivité de l'échantillon à condition de connaître l'émissivité de la référence, ainsi que les amplitudes des signaux pour l'échantillon et pour la référence. 10 paires de mesures [5] ont été réalisées successivement sur la référence noire d'émissivité connue ($\varepsilon_{PN} = 0.975 \pm 0.002$) et sur l'échantillon de Nickel. Les résultats des mesures directionnelles de l'émissivité du Nickel sont présentés dans le tableau suivant :

Temperature (°C)	0	10	20	33	42	54	60
ε_{Ni}	0.0410	0.0429	0.04397	0.0500	0.0512	0.0515	0.0532
Incertitude-type élargie	0.0012	0.0010	0.00052	0.0015	0.0022	0.0012	0.0017

A partir des résultats trouvés sur l'émissivité en fonction de la température, plusieurs corrélations [6] sont possibles. Parmi elles, nous proposons les relations suivantes :

$$\varepsilon_1(T) = 1.35 \cdot \sqrt{\rho(T) \cdot T} - 0.017 \quad (5)$$

$$\varepsilon_2(T) = -2.6 \cdot \sqrt{\rho(T) \cdot T} + 144 \cdot \rho(T) \cdot T - 1435 \cdot \sqrt{(\rho(T) \cdot T)^3} \quad (6)$$

$$\varepsilon_3(T) = 2.85 - 182 \cdot \sqrt{\rho(T) \cdot T} + 3931 \cdot \rho(T) \cdot T - 27902 \cdot \sqrt{(\rho(T) \cdot T)^3} \quad (7)$$

Résolution du problème non linéaire

Le modèle mathématique non linéaire unidimensionnel de transfert de chaleur par conduction dans un milieu homogène et isotrope prend la forme de l'équation suivante :

$$\lambda(T) \cdot \nabla^2 T + \frac{d\lambda(T)}{dT} \cdot |\text{grad}T|^2 = \gamma(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - \left(\frac{K \cdot \sigma}{\pi} \right)^2 \cdot \frac{[\varepsilon(T)]^2}{\rho(T)} \cdot T^8 \quad (8)$$

Elle est soumise aux conditions aux limites suivantes :

$$\begin{aligned} T|_{x=0} &= \bar{T} + T_0 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t) \\ \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_0} + \frac{h}{\lambda_0} \cdot T(x_0) &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Où h est le coefficient d'échange de chaleur convective ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$).

Nous considérons que :

$$\begin{aligned} \lambda(T) &= \lambda_0 \cdot (1 + \alpha' \cdot T) \\ \gamma(T) &= \gamma_0 \cdot (1 + \beta \cdot T) \\ \rho(T) &= \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T) \end{aligned} \quad (10)$$

Par la suite, nous allons faire un couplage de la méthode des éléments finis à la méthode de linéarisation optimale [7] pour pouvoir résoudre notre problème. Pour cela, ce couplage est illustré par l'algorithme (fig. 2).

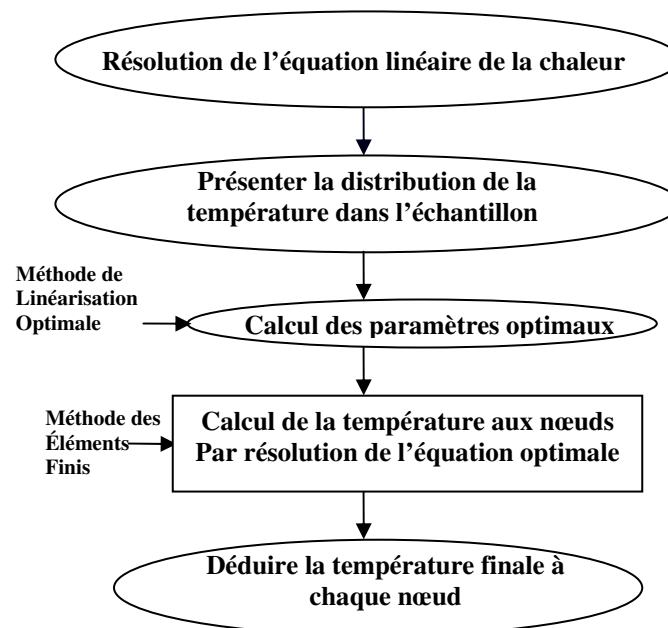


Figure 2: Algorithme caractérisant le couplage entre la méthode des éléments finis et la méthode de linéarisation optimale.

Résolution de l'équation linéaire

L'équation linéaire correspondante à notre problème s'écrit :

$$\lambda_0 \cdot \nabla^2 T = \gamma_0 \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - \left(\frac{K \cdot \sigma}{\pi} \right)^2 \cdot \frac{\varepsilon_0^2}{\rho_0} \cdot T^8 \tag{11}$$

Elle est soumise aux conditions aux limites décrites auparavant. La résolution de l'équation linéaire de la chaleur nous guide vers la solution suivante [8]:

$$T(x,t) = T_0 \cdot \exp \left(- \sqrt{\frac{\omega \cdot \gamma_0}{2 \cdot \lambda_0}} \cdot x \right) \cdot \sin \left(\omega \cdot t - \sqrt{\frac{\omega \cdot \gamma_0}{2 \cdot \lambda_0}} \cdot x \right) \tag{12}$$

Elle est représentée sur la figure 3. La solution (15) rend compte que pour chaque instant t on a des oscillations amorties de la température à une distance x du point de référence.

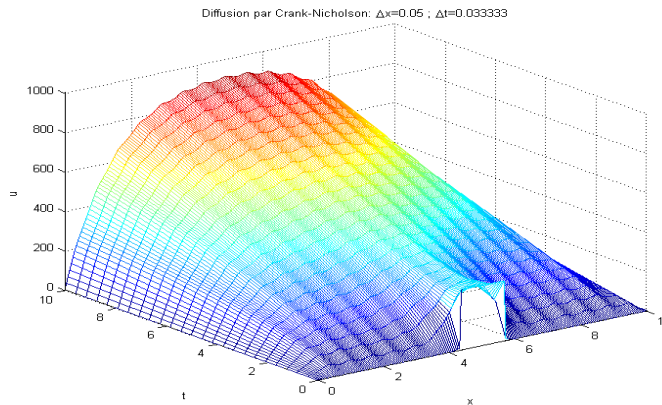


Figure 3: Représentation graphique de la solution de l'équation linéaire de la chaleur.

Calcul des paramètres optimaux

Pour le calcul de ces paramètres, nous utilisons la méthode de linéarisation optimale [9] qui est une méthode approximative qui remplace une équation non linéaire par une équation linéaire optimale. Le principe de la méthode consiste à minimiser la quantité :

$$J(K) = \int_0^{t_1} \int_{\Omega} \Delta^2 \cdot dv \cdot dt \tag{13}$$

Où $\Delta = (LT - NLT)$ qui s'écrit :

$$\Delta = K_1 \cdot \nabla^2 T - \left[\lambda(T) \cdot \nabla^2 T + \frac{d\lambda(T)}{dT} \cdot |\text{grad}T|^2 \right] - [K_2 - \gamma(T)] \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \left(\frac{K \cdot \sigma}{\pi} \right)^2 \cdot T^8 \cdot \left[K_3 - \frac{[\varepsilon(T)]^2}{\rho(T)} \right] \tag{14}$$

et K_1, K_2, K_3 sont les paramètres optimaux qui remplacent respectivement

$$\lambda_0, \gamma_0, \frac{\varepsilon_0^2}{\rho_0}.$$

Après calcul, la quantité (6) s'écrit :

$$J(K_1, K_2, K_3) = A \cdot K_1^2 + B \cdot K_2^2 + C \cdot K_3^2 + (E - F - I) \cdot K_1 + (G + H - M + N) \cdot K_2 + (O + Q + R - V) \cdot K_3 + \\ + W \cdot K_1 \cdot K_2 + X \cdot K_2 \cdot K_3 + Y \cdot K_1 \cdot K_3 + D \quad (15)$$

Tel que :

$$A = \int_0^{t_1} \int_0^{x_0} (\nabla^2 T)^2 \cdot dx \cdot dt$$

$$B = \int_0^{t_1} \int_0^{x_0} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)^2 \cdot dx \cdot dt$$

$$C = \int_0^{t_1} \int_0^{x_0} \left(\frac{K \cdot \sigma}{\pi} \right)^2 \cdot T^8 \cdot dx \cdot dt$$

$$E = \int_0^{t_1} \int_0^{x_0} \gamma(T) \cdot \nabla^2 T \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \cdot dx \cdot dt$$

$$F = \int_0^{t_1} \int_0^{x_0} \nabla^2 T \cdot \left(\frac{K \cdot \sigma}{\pi} \right)^2 \cdot T^8 \cdot \frac{[\varepsilon(T)]^2}{\rho(T)} \cdot dx \cdot dt$$

$$G = \int_0^{t_1} \int_0^{x_0} \lambda(T) \cdot (\nabla^2 T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \cdot dx \cdot dt$$

$$H = \int_0^{t_1} \int_0^{x_0} \frac{\partial T}{\partial t} \cdot \frac{d\lambda(T)}{dT} \cdot |\text{grad}T|^2 \cdot dx \cdot dt$$

$$M = 2 \cdot \int_0^{t_1} \int_0^{x_0} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)^2 \cdot \gamma(T) \cdot dx \cdot dt$$

$$N = 2 \cdot \int_0^{t_1} \int_0^{x_0} \left(\frac{K \cdot \sigma}{\pi} \right)^2 \cdot T^8 \cdot \frac{[\varepsilon(T)]^2}{\rho(T)} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \cdot dx \cdot dt$$

$$O = \int_0^{t_1} \int_0^{x_0} \lambda(T) \cdot (\nabla^2 T) \cdot dx \cdot dt$$

$$Q = \int_0^{t_1} \int_0^{x_0} \frac{d\lambda(T)}{dT} \cdot |\text{grad}T|^2 \cdot dx \cdot dt$$

$$R = \int_0^{t_1} \int_0^{x_0} \left(\frac{K \cdot \sigma}{\pi} \right)^2 \cdot T^8 \cdot \gamma(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \cdot dx \cdot dt$$

$$V = \int_0^{t_1} \int_0^{x_0} \left(\left(\frac{K \cdot \sigma}{\pi} \right)^2 \cdot T^8 \right)^2 \cdot \frac{[\varepsilon(T)]^2}{\rho(T)} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \cdot dx \cdot dt$$

$$W = -2 \cdot \int_0^{t_1} \int_0^{x_0} \nabla^2 T \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \cdot dx \cdot dt$$

$$X = -2 \cdot \int_0^{t_1} \int_0^{x_0} \left(\frac{K \cdot \sigma}{\pi} \right)^2 \cdot T^8 \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \cdot dx \cdot dt$$

$$Y = 2 \int_0^{t_1} \int_0^{x_0} \nabla^2 T \cdot \left(\frac{K \cdot \sigma}{\pi} \right)^2 \cdot T^8 \cdot dx \cdot dt$$

Le dernier terme D ne dépend ni de K_1 ni de K_2 et ni de K_3 .

La minimisation de la fonctionnelle (6) nous ramène à la résolution du système (11) de trois équations à trois inconnus pour obtenir le point critique.

$$\begin{pmatrix} 2 \cdot A & W & Y \\ W & 2 \cdot B & X \\ Y & X & 2 \cdot C \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} E - F - I \\ G + H - M + N \\ O + Q + R - V \end{pmatrix} \quad (16)$$

Application numérique

Les données physiques que nous avons considérées sont les paramètres thermophysiques du Nickel à la température ambiante 20 °C. Elles sont données par :

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= 90.7 \dots W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1} \\ c_0 &= 444 \dots J \cdot Kg^{-1} \cdot K \\ \delta_0 &= 8900 \dots Kg \cdot m^{-1} \\ x_0 &= 1 \dots m \\ t_0 &= 4500 \dots \text{sec ondes} \\ \rho_0 &= 6.9 \cdot 10^{-8} \dots Ohm \cdot m \\ \alpha &= 4.47761 \cdot 10^{-4} \dots K^{-1} \\ \alpha' &= -12.021276 \cdot 10^{-4} \dots K^{-1} \\ \beta &= 5.88235 \cdot 10^{-4} \dots K^{-1} \end{aligned}$$

On considère que l'émissivité est définie par la relation (5). A partir des relations données par (10), nous obtenons :

$$\begin{aligned} A &= 2.58399998 \ 9010746 \cdot 10^{20}, & B &= 3.97005536 \ 6683190 \cdot 10^4, \\ C &= 7.81798197 \ 3445822 \cdot 10^{-11}, & E &= 1.35462660 \ 2016684 \cdot 10^{17}, \\ F &= -4.829057985416327 \cdot 10^{36}, & G &= -2.324405392531057 \cdot 10^{19}, \\ H &= 5.52409062 \ 9658345 \cdot 10^{20}, & M &= 3.13005727 \ 0778295 \cdot 10^{11}, \\ O &= 2.77753241 \ 0758307 \cdot 10^{19}, & Q &= -2.319614284974487 \cdot 10^{19}, \\ N &= 1.28263331 \ 2683677 \cdot 10^7 + 7.34640431 \ 3070699 \cdot 10^6 \cdot i, \\ V &= -7.6205556 \ 0753063 \cdot 10^{12} - 7.58309975 \ 5205132 \cdot 10^{12} \cdot i, \\ R &= 1.31721243 \ 895034 \cdot 10^{10}, & W &= 2.505622033533654 \cdot 10^{16}, \\ X &= 5.17441316418627, & Y &= -1.3312771412 \ 39237 \cdot 10^{19}. \end{aligned}$$

La résolution de ce système (29) de trois équations à trois inconnus nous permet d'obtenir les trois points critiques suivants :

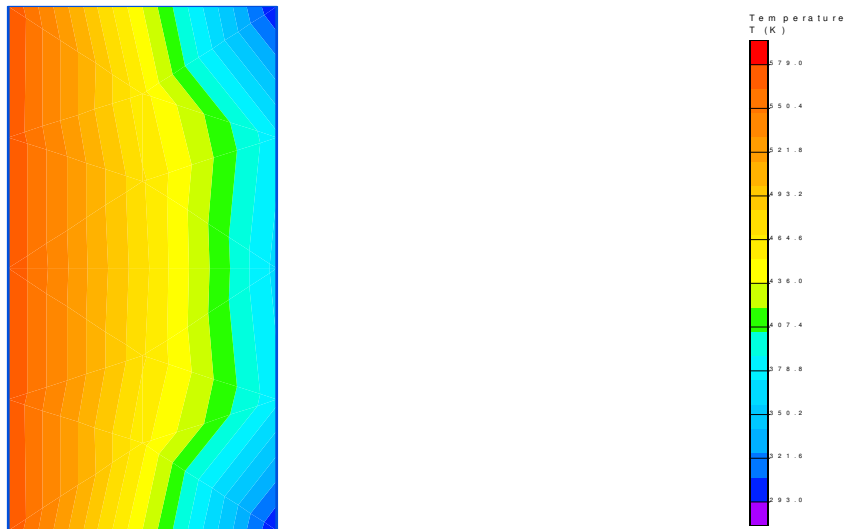
$$\begin{aligned}
 K_1 &= 102.04016071\ 907489 \\
 K_2 &= 6688527.68\ 7813 \\
 K_3 &= 36272.6155\ 523328
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

Résolution de l'équation linéaire optimale

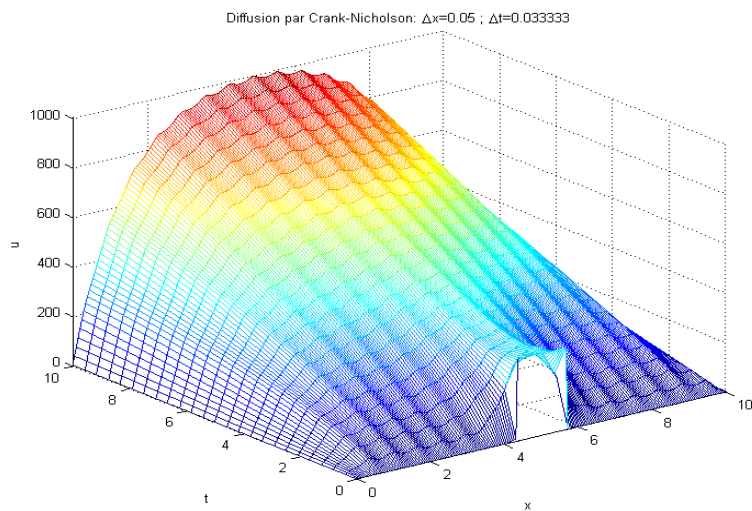
L'équation linéaire optimale s'écrit :

$$K_1 \cdot \nabla^2 T = K_2 \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - \left(\frac{K \cdot \sigma}{\pi} \right)^2 \cdot K_3 \cdot T^8
 \tag{18}$$

Après résolution de cette équation, on obtient le graphe suivant :



Ce graphe nous permet de bien voir les oscillations amorties de la température tout au long de notre échantillon. La figure qui suit nous permet de visualiser l'amortissement spatial de la température en fonction de x.



La variation de la température tout au long de l'échantillon est bien sous forme périodique et amortie puisqu'il y a l'effet de l'absorption du rayonnement thermique par l'échantillon qui fait perdre une partie de la puissance par effet Joule et par conséquent la température baisse spatialement et temporairement. Le phénomène de diffusion a dégénéré, à pulsation ω fixée, en un phénomène de propagation vers les x positifs avec une célérité C égale à :

$$C(\omega) = \left(\frac{2 \cdot \lambda_0 \cdot \omega}{\gamma_0} \right)^{1/2}.$$

La célérité est dispersée en fréquence et l'analyse spectrale du phénomène de diffusion montre que, à fréquence faible, les signaux se propagent lentement et en étant fortement atténués en

$$\exp\left(-\sqrt{\frac{\omega \cdot \gamma_0}{2 \cdot \lambda_0}} \cdot x\right).$$

Conclusion

Nous avons montré que la technique radiométrique est applicable à la mesure de l'émissivité totale sur un large domaine de température autour de l'ambiante et l'étude sur le Nickel a montré principalement que les mesures sous faible incidence sur un échantillon brillant pouvaient être effectuées avec une précision.

Le couplage de la méthode des éléments finis à la méthode de linéarisation optimale effectué a confirmée la modulation de température suite à la dépendance de l'émissivité en fonction de la température. Cette modulation est traduite par un amortissement de température dans le temps et dans l'espace puisque dans l'échantillon il y a une partie de la puissance énergétique qui sera absorbée.

Références

- [1] Mattei S., Especel D., N'guessan Y. Revue générale de thermique, 2004, 499.
- [2] Foote P. Bull. Bur. Std. 1915, 11, 607-612.
- [3] Khaldi S.(1987). Linéarisation optimale binaire et son application aux problèmes non linéaires de transfert de chaleur, Thèse de Magister, Université Abou Bakr BELKAID Tlemcen.
- [4] Tang-Kwar E. (1998). Contribution au développement de méthodes périodiques de mesure des propriétés Thermophysiques des matériaux opaques, Thèse de doctorat, Université Paris 12 – Val de Marne.
- [5] Baba Ahmed N. (1999). Mesure de l'émissivité totale directionnelle d'un métal à basse température, Rapport de Stage de D.E.A, Université Paris 12 – Val de Marne.

[6] Foote P. Bull. Bur. Std. 2008, 115.

[7] Bouayed F N. (1986). Application de la méthode des éléments finis aux problèmes non linéaires de transfert de chaleur, Thèse de Magister, Université Abou Bakr BELKAID Tlemcen.

[8] De Vriendt A B. (1984) Transmission de la chaleur , Tome 1, Volume 2.

[9] Vujanovic B. Int. Jou. Heat Mass Transfer. 1973, 16, 1111 – 1117.



STUDY ON THE ENERGETIC PARAMETERS IN A PHOTOTHERMIC SENSOR WITH BLACK POLYMERIC FILM

A. Benmoussat*, N. Baba Ahmed, S. Ainad Tabet and B. Belahcene

*Engineering Faculty, Abou Bekr Belkaid University - Tlemcen BP 230 –Chetouan
13000 – Tlemcen Algérie*

Email: abbenmoussa@gmail.com

Reçu le 01 février 2010, reçu sous forme révisée le 17 avril 2010 accepté le 02 juin 2010

Accessible en ligne le 30 juin 2010

Abstract

Renewable energies such as thermal solar energy are accessible energy hydrous for desalination water, recycling and hot water production. Heat is produced by greenhouse effect in the sensor. It is no polluting form of energy according to the sustainable development.

In this paper the design of sensor photothermic prototype with polymeric film absorbing, the materials radiation properties, the analysis of different energy losses in the system and the energy balance will be presented. The evolution of incidental solar illumination on the horizontal plan of sensor and the temperature distribution are studied.

Results showed that the temperature obtained by thermal conversion depends on the absorbing characteristics of the polymeric film, radiation intensity and time exposure.

Keys words: film, solar energy, greenhouse effect, design, radiation, illumination.

Résumé

Les énergies renouvelables telles que le solaire thermique sont des énergies accessibles pour le dessalement de l'eau, le recyclage et la production d'eau chaude. La

chaleur est produite par effet de serre dans le capteur. C'est une forme d'énergie non polluante en accord avec le développement durable.

Dans cet article la conception du prototype de capteur photothermique avec l'absorbeur en film de polymère, les propriétés de rayonnement des matériaux, l'analyse de différentes déperditions d'énergie dans le système et le bilan énergétique seront présentés. L'évolution du rayonnement solaire incident sur le plan horizontal du capteur et la distribution de la température sont étudiées.

Les résultats ont montrés que la température obtenue par conversion thermique dépend des caractéristiques absorbantes du film polymère, de l'intensité de rayonnement et du temps d'exposition.

Mots clés : film, énergie solaire, effet de serre, conception, radiation, éclairnement.

Introduction

La demande croissante en eau douce pour les populations, l'agriculture et l'industrie devient un problème qui s'accroît quand la sécheresse peut sévir pendant des années. L'eau n'est pas répartie selon les besoins de chaque région, certaines régions sont affectées de pénuries chroniques comme le désert alors que d'autres affichent des surplus [1]. La distillation par effet de serre est l'une des applications énergétiques du solaire thermique à basse température qui consiste à la conversion de l'énergie solaire (rayonnement) en énergie thermique pour produire de l'eau à partir d'une eau saline, où elle s'adapte en mode individuel ou collectif à des régions éloignées ou isolées qui nécessitent des consommations réduites [2]. Le choix des matériaux absorbants du capteur thermique en augmentant leurs caractéristiques d'absorption conditionne le rendement énergétique avec le choix des matériaux transparents [3].

Nous sommes intéressés dans ce travail à l'étude des paramètres énergétiques de la distillation solaire et des transferts thermiques résultant par suite de la conversion du rayonnement solaire en chaleur par effet de serre dans un prototype de distillateur à plan incliné à surface d'évaporation horizontale réalisé dans notre laboratoire à base d'absorbeur en film noir polymère et de vitrage transparent en verre non traité.

Le dimensionnement du capteur, l'évolution de l'éclairage solaire incident, les variations du taux de salinité, la hauteur de l'eau saline admise dans le capteur, le système d'isolation, l'évolution de la température en différents points du distillateur, la

température ambiante et la quantité de l'eau distillée sont étudiés et nous terminerons par une modélisation de la distribution de la température dans le système étudié.

Matériels et méthodes

Description et principe de fonctionnement du capteur

La figure (1) présente un prototype de distillateur à plan incliné, il est constitué d'un bac ouvert sur le coté exposé aux rayonnements solaires, le fond et les parois latérales sont isolés par une couche isolante. Le bac est fermé au dessus par un vitrage incliné d'un certain angle par rapport à l'horizontal, jouant le rôle de surface de condensation. Les radiations solaires qui traversent le vitrage sont absorbées par le polymère noir qui réémet l'énergie sous forme de radiations de grande longueur d'onde. Comme ces radiations ne peuvent pas traverser la vitre, la température de la plaque d'absorption s'élève et chauffe la masse d'eau contenue dans le bac et fait évaporer sa couche superficielle. Au moyen de la convection naturelle la vapeur de l'eau s'élève est arrive au niveau de la surface intérieur du vitrage où la température de ce dernier est relativement inférieure par rapport à celle de la vapeur, et donc se condense. Les gouttelettes d'eau condensées glissent sur la surface inclinée du vitrage intérieure et se rassemblent dans un canal de récupération (rigole).

Pour obtenir un meilleur rendement, l'ensemble est placé dans une boîte vitrée isolante afin d'obtenir un effet de serre. Avec un ensoleillement important, et si les besoins en énergie sont modérés, l'absorbeur, est chauffé par le rayonnement solaire et transmet la chaleur à l'eau qui s'évapore et se condense sur la partie inférieure de la vitre transparente. Bien que le distillateur soit d'une construction très simple, et peu coûteuse, son rendement en matière d'eau distillée reste encore très faible c'est pourquoi la conception d'autres modèles de distillateurs ont été envisagés en vue d'augmenter le rendement.

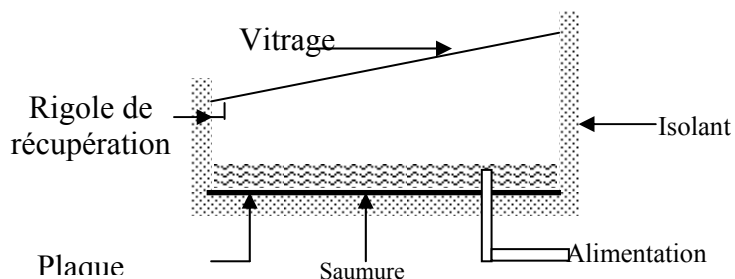
Compte tenu des moyens dont nous disposons au laboratoire, nous avons réalisés ce prototype à partir de matériaux disponibles en commerce

Tableau 1: Caractéristiques des matériaux isolants et des matériaux transparents

Isolant (Bois sec ordinaire)	Dimensions	Vitrage (vitre ordinaire)	
Epaisseur du bois	0.008 m	Nombre	1
Surface intérieure (base du boîtier)	0.69 m²	Epaisseur de la vitre	0.59 mm
Hauteur arrière du boîtier	0.345 m	Inclinaison de la vitre	18°
Hauteur avant du boîtier	0.12 m	Dimension de la surface	0.323 x 0.74 m ²
Surface d'évaporation	0.31x 0.69 m²		

Nous avons utilisé deux types d'isolations successivement pour renforcer l'action du bois qui présente un coefficient de conductibilité un peu élevé ($\lambda = 0.13$ à 0.40 W/m.K); et par conséquent une perte de chaleur relativement élevée; une peinture blanche appliquée sur toute la surface extérieure du bois pour les premiers essais et un film de feuille d'aluminium fin ayant un pouvoir réflecteur élevé ($\rho=0.95$) afin de limiter les pertes par convection thermique de la surface chaude qui sera superposé par un film de plastique transparent pour les seconds essais. Ce dernier servant de support résistant pour l'aluminium très fragile et contribuant en même tant par ses propriétés de mauvais conducteur thermique.

Les matériaux absorbeurs utilisés sont la peinture noire du commerce que nous avons appliqué sur la base interne du capteur et un film polymère noir disponible sur le commerce. Ce dernier jouant le rôle d'absorbeur et de membrane étanche. Il est déposé au fond du capteur de telle sorte qu'il épouse sa forme.

**Figure (1a):** Schéma du distillateur solaire plan incliné**Figure (1b):** Distillateur solaire réalisé

L'énergie thermique disponible à partir d'un tel capteur est équivalente à l'énergie incidente diminuée des pertes dues à la réflexion, la réémission du rayonnement, la convection et la conduction. Toute utilisation du rayonnement solaire doit prendre en compte les diverses caractéristiques du rayonnement incident telle que les variations instantanées, horaire et journalière, et annuelle de l'éclairement qui présente une dépendance vis à vis des caractéristiques du climat local et régional [3]. Pour le site de Tlemcen, les coordonnées géographiques sont : Altitude : 750 m, Latitude + 35°28' N et Longitude - 1°17'

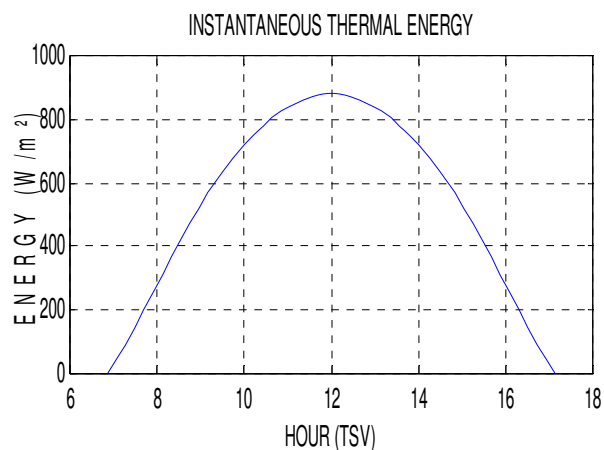
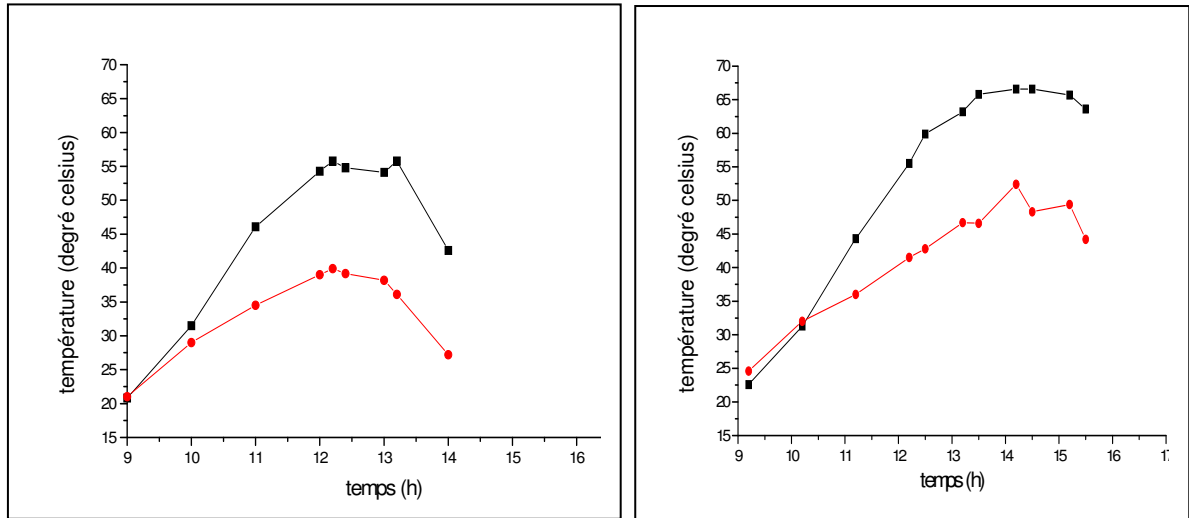


Figure 2: Radiations solaires incidentes sur le plan horizontal

Tests

Le prototype réalisé a été installé sur un plan horizontal et orienté en plein sud pour avoir un maximum d'ensoleillement (figure 1b). Les tests ont été effectués sur le terrain contigu au laboratoire pendant la période allant du 15 au 26 mai 2009. L'eau saumâtre a été préparée au laboratoire avec des concentrations en sel NaCl allant de 5 à 10 g/l. Le distillateur a été rempli à des hauteurs variant de 1 à 5 cm. La campagne de tests a été axée sur les mesures de la température par thermocouple de type K et par thermomètre digital pour les mesures de la température de la vitre et de l'isolant et du débit de l'eau distillée en fonction du temps.



3a

3b

Figure 3: Evolution des températures de l'absorbeur en film polymère et de la vitre non traitée en fonction du temps montrant l'effet de l'isolation thermique externe (3a sans réflexion, 3b avec réflexion), ($h = 1$ à 3 cm et $C = 5$ à 10 g/l)

Tableau 1: Journée du 30 mai 2009

h = 3cm ; C = 10 g/l							
temps	Te (°C)	Ta (°C)	Tv (°C)	T _i (°C)	Q (ml)	état ciel	Vent
9h20	25,3	22,6	24,6	X	0	Clair	Calme
10h20	26,3	31,3	32	29,1	0	Clair	Calme
11h20	29,5	44,3	36	37,5	3	Clair	Calme
12h20	32,1	55,5	41,5	37,8	20	Clair	Calme
12h50	30,3	59,9	42,8	37,5	27	Clair	Calme
13h20	31	63,2	46,7	39,1	35	Clair	Calme
13h50	30,7	65,8	46,6	39,9	38	Clair	Calme
14h20	32,4	66,6	52,4	48,6	39	Clair	Calme
14h50	31,6	66,6	48,3	43	44	Clair	Calme
15h20	31,4	65,7	49,4	43,2	45	Clair	Calme
15h50	31,5	63,6	44,2	39,7	42	Clair	Calme
Quantité total = 293 ml					PH eau distillée = 6,9		

- T_e : température ambiante du milieu extérieur ($^{\circ}\text{C}$),
- T_a : température de l'absorbeur ($^{\circ}\text{C}$),
- T_v : température de la face externe de la vitre ($^{\circ}\text{C}$),
- C : concentration de l'eau saumâtre (g/l).
- T_i : température de la surface extérieure de l'isolant ($^{\circ}\text{C}$),
- Q : débit d'eau distillée (ml),
- h : la hauteur de l'eau saumâtre dans le bassin (cm),

Modélisation de la distribution de la température

Les phénomènes de transfert de chaleur pure et de transfert simultané de chaleur et de masse à l'intérieur et à l'extérieur du capteur, chauffé par un flux solaire global constant et distillant une charge d'eau pure maintenu constante montre que la température n'est pas uniformément répartie selon les dimensions du capteur et dépend de l'isolation externe, comme le montre la figure 4. Pour le système sans réflexion de l'aluminium, la température oscille autour de 300 K en moyenne au niveau de la face avant de la vitre, tandis que pour un système avec réflexion la température est de l'ordre de 330K en moyenne.

Pour notre dispositif, nous avons obtenu la répartition axiale de la distribution de la température avec une modélisation par les éléments finis en utilisant le logiciel Quick Field [4]

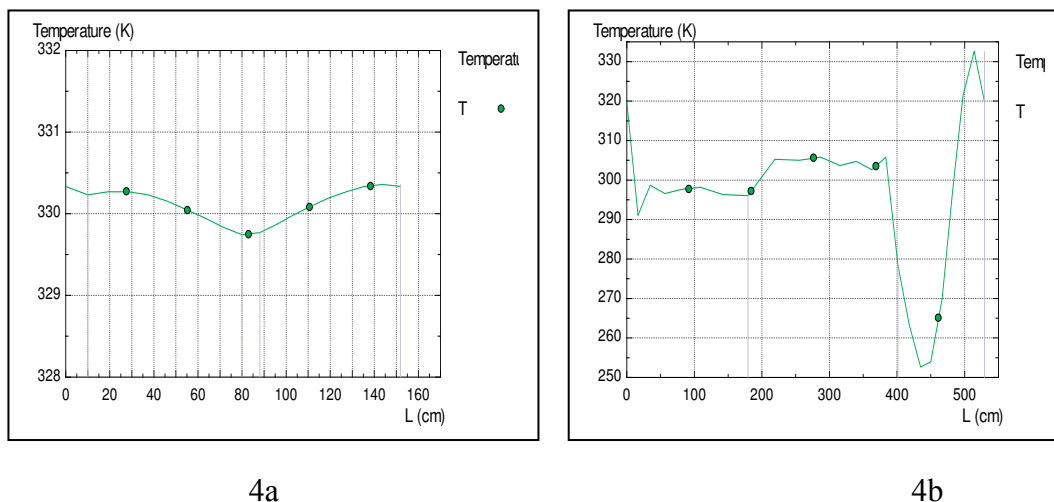


Figure 4: Distribution de la température ($^{\circ}\text{K}$) en fonction de la largeur L (cm) du distillateur (4a – sans isolation en film aluminium, 4b- avec isolation en film aluminium)

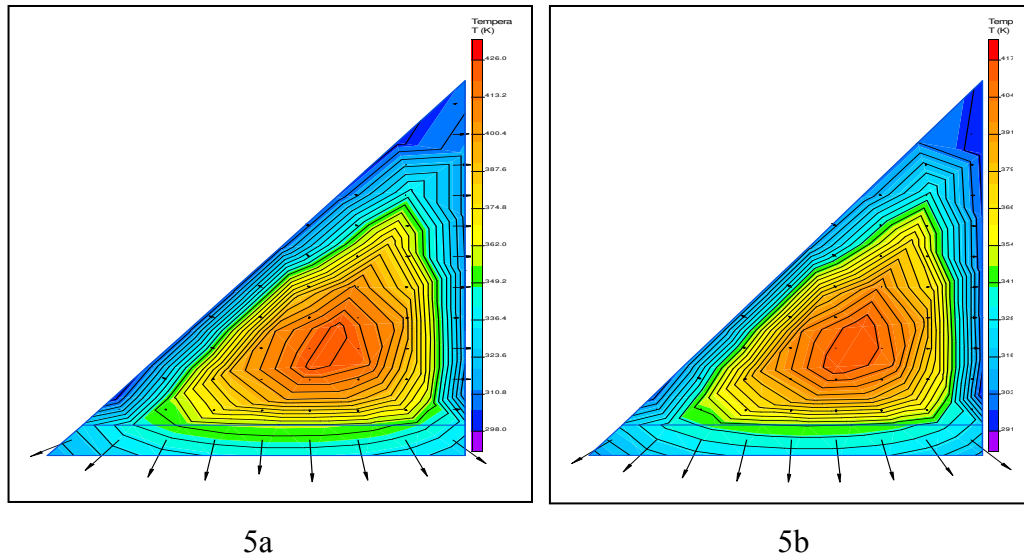


Figure 5: Répartition axiale de la distribution de la température
(5a sans réflexion par film d'aluminium - 5b avec réflexion par film d'aluminium)

Résultats et discussions

Tests de distillation

L'énergie solaire reçue en un point du globe dépend de la latitude du lieu, ainsi vers l'équateur l'angle d'incidence est proche de 90° donc la surface éclairée est plus petite et l'énergie est plus concentrée, et dépend aussi de la nébulosité (nuages), qui est importante à l'équateur et plus faible en milieu intertropical. Le potentiel solaire en Algérie [4] estimé en énergie moyenne reçue [$\text{KWh/m}^2/\text{an}$] est de 1700 en régions côtières et de 2650 au Sahara est l'un des meilleurs gisements au monde non encore exploité.

Les tests de distillation solaire ont été effectués suivant des conditions météorologiques favorables en exposition solaire en cette période de l'année (ciel clair avec vent à faible vitesse), les températures maximales qu'on peut atteindre dans le modèle réalisé compte tenu du système d'isolation et des déperditions sont de l'ordre 45.7°C à 13h20 et 52.4°C à 14h20 sur le vitrage et de l'ordre de 56.3°C à 15h25 et 66.6°C à 14h50 au niveau de l'absorbeur respectivement pour les deux journées (19 mai et 30 mai 2009). Ces températures ont été obtenues au temps TSV.

Cette différence de température entre l'absorbeur et le vitrage conduit au fonctionnement du capteur elle est d'autant plus grande que la quantité d'eau distillée produite est plus grande. Nous avons constaté qu'à des périodes où le vent soufflant

même à faible vitesse contribue au refroidissement de la vitre et par conséquent à une diminution de la température, ce qui accentue le processus de condensation de vapeur. L'absorbeur en film polymère est un corps noir absorbant théoriquement toute l'énergie électromagnétique qu'il reçoit dont le spectre ne dépend que de sa température. Vu la mince couche du polymère en contact avec la couche de peinture noire, nous n'avons pas atteint des températures élevées où il a été suggéré d'interposer une couche d'une tôle en cuivre présentant de meilleures caractéristiques d'absorption. Les données sur les quantités d'eau produite présentent une certaine dispersion. Pour chaque nuage de points nous avons déterminé une courbe de tendance polynomiale d'ordre 4. Nous avons obtenu un maximum de débit pour une exposition solaire après le temps TSV, un système d'isolation renforcé de l'extérieur par le film d'aluminium qui joue un rôle important dans la réflexion des rayons solaires ; et une diminution de la hauteur de la nappe à distiller avec une hauteur optimale permet un échange thermique. Ce qui permet au système de fonctionner encore en période nocturne avant de s'annuler. La salinité de l'eau saumâtre pour des teneurs titrant moins que 10 g/l ont une influence négligeable sur le fonctionnement du système.

Distribution de la température

Les résultats des essais ont montré que la température n'est pas uniformément répartie selon les dimensions du capteur et dépend de l'isolation externe. La figure 5a représente une répartition axiale de la distribution de la température tout au long du distillateur pour un essai sans aluminium isolant qui montre une concentration de la température dans la zone tampon. Aux parois du distillateur la température est de l'ordre de 300 K, elle augmente au fur et à mesure qu'elle se concentre vers le milieu tampon, elle est de l'ordre de 417 K, et pour la figure 5b avec un essai avec aluminium isolant la répartition axiale de la distribution de la température tout au long de distillateur montre une concentration de la température dans la zone tampon. La température du milieu tampon est de l'ordre de 426 K.

Ces résultats sont en accord avec les résultats expérimentaux, malgré un décalage par suite du problème de déperdition dû à un mauvais système d'isolation.

Conclusion

Le distillateur solaire est un dispositif réalisable facilement avec des matériaux locaux, ce qui lui donne l'avantage d'être facilement exploitable pour des utilisateurs

peu qualifiés on atteint des températures où la distillation et la condensation devient possible.

La conception du prototype de capteur photothermique avec l'absorbeur en film de polymère et les différents tests effectués ont montrés que les matériaux qui constituent le capteur ont une influence sur la distillation de l'eau saumâtre et par conséquent sur la quantité d'eau produite qui reste encore insignifiante pour ce modèle de prototype. Des efforts ont été envisagés pour la conception d'autres modèles de distillateurs en vue d'augmenter le rendement en améliorant les propriétés des matériaux.

L'énergie thermique disponible à partir d'un tel capteur est équivalente à l'énergie incidente diminuée des pertes dues à la réflexion, la réémission du rayonnement, la convection et la conduction.

La distillation dépend de plusieurs paramètres dont l'intensité de l'éclairement incident qui est variable en fonction du temps d'exposition, de la latitude du lieu et de l'état du ciel et la nébulosité (nuages). Elle dépend des propriétés absorbantes du film noir et des propriétés de transmission du verre et particulièrement du système d'isolation.

La température atteinte au niveau de l'absorbeur est de 66.6 °C, que nous avons estimée suffisante pour le fonctionnement du système. En période nocturne, le stockage d'une quantité d'énergie absorbée au fil du soleil par la couche d'eau inférieure a permis au système de fonctionner pour distiller une quantité supplémentaire d'eau.

La différence de température entre l'absorbeur et le vitrage conduit au fonctionnement du capteur elle est d'autant plus grande que la quantité d'eau distillée produite est plus grande. Le débit de production d'eau ne devient mesurable que lorsque le gradient de température entre l'absorbeur et le vitrage avoisine 10°C. Nous avons constaté qu'à des périodes où le vent soufflant même à faible vitesse contribue au refroidissement de la vitre et par conséquent à une diminution de la température, ce qui accentue le processus de condensation de vapeur.

Les résultats de la distribution de la température ont montrés que la température n'est pas uniformément répartie selon les dimensions du capteur et dépend de l'isolation externe. La répartition axiale de la distribution de la température tout au long du distillateur montre une concentration de la température dans la zone tampon. Les résultats sont en accord avec ceux obtenus expérimentalement, malgré un décalage par suite du problème de déperdition dû à un mauvais système d'isolation en absence de la réflexion par film d'aluminium.

L'étude peut être étendue en améliorant les caractéristiques physiques des matériaux par le choix des surfaces sélectives pour la transmission du rayonnement et le choix du fluide caloporteur comme l'air pour le séchage par ventilation forcé ou le chauffage.

Remerciements

Les auteurs remercient les contributions de la part des chercheurs de l'université de Tlemcen et des techniciens de laboratoire pour la réalisation du prototype de capteur thermique et remercient l'étudiante ayant choisi le sujet

Références

- [1] Ghaffour N. (2008). Ressources en eau et dessalement en Algérie, Workshop on R.O desalination process, engineering practices, MEDREC Research Centre, Oman, Blida university of Algeria, Tipaza. 197 -209p.
- [2] Bandelier et Deranzier J C, "Procédés thermiques de dessalement à haut rendement" GRETH, Grenoble, groupe de recherche CLEFS CEA N° 44 /2000 2001.
- [3] Amara S. (2004). Optimisation d'un procédé économique de chauffage d'une habitation solaire: Application pour le site de Tlemcen, thèse de Magister, université de Tlemcen.
- [4] Ainad T S. (2007). modélisation des transferts thermiques dans un distillateur solaire, PFE ingénieurs, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen.
- [5] Rauzier E. revue Phys. Appl. 1980, 15, 411- 415.
- [6] Kahlen S and Gernot M. (2007). Wallner, Aging behavior of polymeric materials for solar thermal absorber applications, Proceedings of ISES Solar World Congress: Solar Energy and Human Settlement. 519 – 523p.
- [7] Baba Ahmed N and Benmoussat A. (2007). Emissivity influence on the radiative thermal properties of opaque materials according to the temperature. ICRE '07, Conférence internationale sur les énergies renouvelables, Bejaia, 25-29p.
- [8] Mokhtari F et Semmar D. Revue des Energies Renouvelables. 2001, 159-162.



Prof. Abderrahim BENMOUSSAT
Email: abbenmoussa@gmail.com

Tlemcen, le 27 janvier 2014

A Monsieur
Le Président du comité scientifique du département de génie mécanique

Objet : Appréciation sur la thèse
De doctorat de Mr Baba Ahmed

Monsieur,

J'ai l'honneur de vous informer que le professeur Bo NORDELL de l'université de technologie de Lulea au cours de sa visite du mois de janvier 2014 (19 au 26 janvier) à l'unité de recherche en énergies renouvelables (URMER) de l'université de Tlemcen a assisté à une présentation de la thèse de Mr Baba Ahmed Nassim le 22 janvier 2014 dans notre laboratoire de recherche LAEPO en présence des doctorants et des enseignants de l'université de Tlemcen.

Après la présentation et les discussions sur le contenu de la thèse, particulièrement sur le choix, les propriétés et le comportement en vieillissement thermique du polyéthylène (PE) utilisé comme matériaux absorbant dans le capteur solaire, le professeur était très satisfait de ce travail (lettre jointe) et souhaite que ce travail soit présenté devant le jury d'examen qui sera désigné par le comité scientifique du département de génie mécanique.

Respectueusement

Abderrahim BENMOUSSAT
Professeur
aux Universités

**Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering
Division of Architecture and Water
Renewable Energy Group**

Professor Bo Nordell
Visiting address: LTU Campus, Porsön, Luleå
Postal address: SE-971 87 Luleå, Sweden
Room: F659C
Phone: +46 (0)920 491 646
Mobile: +46 (0)725 390 736
bon@ltu.se
<http://www.ltu.se/staff/b/bon>



Prof. Abderrahim Benmoussat
LAEPO research laboratory
Dept. Mechanical Engineering
Tlemcen University, TU
BP 230 Chetouan 13000- Tlemcen,

APPRECIATION LETTER

The undersigned was visiting the Research unit of Renewable Energy (UEMER) at Tlemcen University, 19-26 Jan 2014. During this visit I attended the pre-presentation of Mr. Baba Ahmed's doctoral thesis "Energy Study and behavior damage of a black polymeric film for solar still applications" at LAEPO research laboratory of Tlemcen University, on 22th Jan.

Presented work was about one of the polymer applications in solar energy such as polyethylene film (PE) as a thermal absorbent material on solar still. The characterization of the study material including the chemical and physical properties: polymerization, microstructure, crystallinity, melting point, emissivity, thermal conductivity and diffusivity were used in material's selection. The study contains three parts: testing material in photo-thermal solar conversion, modeling temperature on solar still and damage behavior after solar exposure. The presentation was illustrated by many graphs and figures in order to explain the thermal and damage behavior of PE polymers.

I really appreciated this interesting research work and hope that Baba Ahmed's work will be presented for evaluation group designed by the scientific committee of Mechanical Department.

Tlemcen, 27th of January 2014

Yours sincerely

A handwritten signature in blue ink that reads 'Bo Nordell'.

Bo Nordell

Résumé : L'étude dans le cadre de ce projet a pour objectif de comprendre le comportement énergétique des matériaux utilisés dans les systèmes de captation solaire. Le choix des matériaux et leurs sélectivité pour optimiser l'absorption et réduire les transferts thermiques à travers l'isolation ou encore les matériaux transparents pour diminuer les réflexions et obtenir le maximum de rayonnement convertis est la problématique de l'étude.

Nous avons étudié le comportement énergétique du polyéthylène basse densité utilisé comme matériau absorbant par une simulation expérimentale dans un prototype de distillateur solaire et par une simulation numérique. L'étude a été complétée par une caractérisation en vieillissement du matériau où le problème majeur que l'on rencontre pour les polymères thermoplastiques tel que le PE concerne leur durée de vie où de nombreux travaux ont été menés. La compréhension et la prédiction de la durabilité de ces matériaux par rapport à leur dégradation sont, d'une façon générale, moins avancées et assez disparates selon le mode de vieillissement. Tous les matériaux utilisés dans les dispositifs à effet de serre se caractérisent surtout par leur instabilité plus au moins rapide dans le temps vis-à-vis du rayonnement solaire et surtout sa fraction ultraviolette (UV).

Mots clés : Polyéthylène – Capteurs solaires – Comportement énergétique – Vieillessement.

Abstract: The study under this project aims to understand the energy behavior of materials used in systems for solar collection. The choice of materials and their selectivity to maximize absorption and reduce heat transfer through the insulation or transparencies to reduce reflections and get the maximum converted radiation materials is the problem of the study.

We studied the energy behavior of low density polyethylene used as an absorbent in an experimental simulation of a prototype solar still and a digital simulation material. The study was complemented by material aging characterization where the major problem encountered for thermoplastic polymers such as PE about their life where many studies have been conducted. Understanding and predicting the durability of these materials with respect to their degradation are, in general, less advanced and quite disparate depending on the mode of aging. All materials used in the devices greenhouse is characterized by their instability more slower over time vis- à-vis the solar radiation and especially its ultraviolet fraction (UV).

Keywords: Polyethylene - Solar distiller - Energy Behavior – Aging mode.

الملخص : تهدف الدراسة في هذا المشروع لفهم سلوك الطاقة من المواد المستخدمة في نظم جمع الطاقة الشمسية. اختيار المواد والانتقائية الرامية إلى تحقيق أقصى قدر من الاستيعاب و تقليل انتقال الحرارة عبر العزل أو الشفاف للحد من انعكاسات والحصول على الحد الأقصى لل مواد الإشعاع المحولة هي مشكلة الدراسة .

درسنا سلوك الطاقة من البولي ايثيلين منخفض الكثافة استخدامها بوصفها مادة في محاكاة تجريبية من النموذج الأولي لا يزال الشمسية و المواد المحاكاة الرقمية . وقد استكملت الدراسة التي توصيف المواد الشبخونة أين تكمن المشكلة الرئيسية التي واجهتها ل البوليمرات الحرارية مثل البولي ايثيلين من حياتهم حيث تم إجراء العديد من الدراسات. فهم و التنبؤ متانة هذه المواد فيما يتعلق تدهورها هي ، بصفة عامة، أقل تقدما و المتباينة جدا تبعا لوضع الشبخونة. وتتميز جميع المواد المستخدمة في الأجهزة المسببة للاحتباس الحراري بسبب عدم الاستقرار على نحو أكثر أبطأ مع مرور الوقت وجمال وجه مع الإشعاع الشمسي و خصوصا في جزء الأشعة فوق البنفسجية (UV) .

الكلمات الرئيسية: بولي ايثيلين - مجمعات الطاقة الشمسية - سلوك الطاقة - الشبخونة.