

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique
Département de Génie Mécanique
Laboratoire de Génie Mécanique et Développement



Thèse de Doctorat en Science

Génie Mécanique

Intitulée

Impact du Vieillissement du Revêtement du Collecteur sur les Performances Energétiques des Centrales à Cheminée Solaire

Présentée par :

BOUALLEG Salim Mekki
Magister en Génie Mécanique

Devant le Jury composé de :

| | | | |
|---------------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------|
| Président : | Mr. BENKOUSSAS Bouzid | Professeur | ENP |
| Directeur de Thèse : | Mr. LARBI Salah | Professeur | ENP |
| Co- Directeur de Thèse : | Mr. BOUHDJAR Amor | Directeur de Recherche | CDER |
| Examineurs : | Mr. DIZENE Rabah | Professeur | USTHB |
| | Mr. MOHAMMEDI Kamal | Professeur | UMBB |
| | Mr. BELKACEMI Yacine | Maître de Conférence- A | ENP |
| | Mr. SEMAI Hakim | Maître de Recherche- A | CDER |
| Invité : | Mr. B. KALACHE | Docteur/Directeur ENR | Sonatrach |
| | Mr. A. SMAILI | Professeur | ENP |
| | Mr. A. BOUHELLAL | Maître de Conférence- A | ENP |

ENP 2023

ENP, 10, Avenue des Frères Oudek, Hassen Badi, BP.182, 16200 El Harrach, Alger, Algérie.

www.enp.dz



Thèse de Doctorat en Science

Génie Mécanique

Intitulée

Impact du Vieillissement du Revêtement du Collecteur sur les Performances Energétiques des Centrales à Cheminée Solaire

Présentée par :

BOUALLEG Salim Mekki
Magister en Génie Mécanique

Devant le Jury composé de :

| | | | |
|---------------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------|
| Président : | Mr. BENKOUSSAS Bouzid | Professeur | ENP |
| Directeur de Thèse : | Mr. LARBI Salah | Professeur | ENP |
| Co- Directeur de Thèse : | Mr. BOUHDJAR Amor | Directeur de Recherche | CDER |
| Examineurs : | Mr. DIZENE Rabah | Professeur | USTHB |
| | Mr. MOHAMMEDI Kamal | Professeur | UMBB |
| | Mr. BELKACEMI Yacine | Maître de Conférence- A | ENP |
| | Mr. SEMAI Hakim | Maître de Recherche- A | CDER |
| Invité : | Mr. B. KALACHE | Docteur/Directeur ENR | Sonatrach |
| | Mr. A. SMAILI | Professeur | ENP |
| | Mr. A. BOUHELLAL | Maître de Conférence- A | ENP |

ENP 2023

ENP, 10, Avenue des Frères Oudek, Hassen Badi, BP.182, 16200 El Harrach, Alger, Algérie.

www.enp.dz

ملخص: يتعلق العمل المقدم في هذه الأطروحة بتحليل تأثير الشيخوخة على أداء الطاقة لمحطات توليد الطاقة من المداخن الشمسية (CCS). وهو يتألف من إجراء اختبارات تجريبية على المادة المكونة للمجمع الشمسي المقترح. يتكون الأخير من فيلم بولي إيثيلين منخفض الكثافة يستخدم على نطاق واسع في الزراعة. تم تحديد أداء الطاقة لمحطة المدخنة الشمسية (CCS) على أساس موازين الطاقة على مكونات المحطة. تم استخدام معلمات النموذج الأولي التجريبي لـ CCS في Manzanarès في تحليل أداء الطاقة والتحقق من صحة النموذج الرياضي من خلال مقارنة نتائج الحساب مع البيانات التجريبية للموقع. أوضحت الدراسة وجود علاقة بين شيخوخة المجمع، ويرجع ذلك أساساً إلى الظروف المناخية، وتدهور خواصه الحرارية الفيزيائية. وبالفعل أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن الضغوط الميكانيكية (إجهادات التكسير والاستطالة) تنخفض بأكثر من 50% بعد فترة 3 سنوات من الاستخدام. على عكس النماذج الرياضية الكلاسيكية التي تعتبر أن الخصائص الحرارية الضوئية (الامتصاصية والنفذية) ثابتة، أظهرت النتائج التجريبية أن هذه الخصائص تتأثر بشدة بالشيخوخة وأن أداء الطاقة (القوى) في CCS قد انخفض (بمقدار 50 إلى 35 كيلوات) أي 30%. أظهرت الدراسة الفنية والاقتصادية أنه على مدار 24 عاماً، تظل CCS في LDPE جذابة اقتصادياً مقارنة بـ CCS في الزجاج.

الكلمات المفتاحية: أداء الطاقة؛ مصنع مدخنة شمسية؛ تحليل تجريبي؛ الشيخوخة؛ محاكاة رقمية؛ موقع مانزاناريس؛ دراسة فنية اقتصادية؛ البولي إيثيلين المنخفض الكثافة.

Abstract: The present work is dedicated to an analysis of aging impact on energy performances of solar chimney power plant (SCPP). It consists in carrying out experimental tests on the material constituting the proposed solar collector. The latter consists of a LDPE low density polyethylene film widely used in agriculture. The determination of energy performances of the solar chimney power plant (SCPP) is based on energy balances on the different components of the power plant. The parameters of experimental (SCPP) prototype of Manzanarès are used in analyzing energy performance and validation of the mathematical model used. The study demonstrated the existence of a relationship between the aging of the collector, mainly due to climatic conditions and the degradation of its thermo-physical properties. Indeed, the obtained results showed that the mechanical stresses (breaking and elongation stresses) are reduced by more than 50% after a period of 3 years of use. In contrast with classical mathematical models which consider the photo-thermal properties (absorptivity and transmittivity) constant, the experimental results showed that these properties are affected by aging and the energy performances (powers) of the (SCPP) are reduced (from 50 to 35 kW) i.e 30%. Furthermore technical and economic study showed that over a lifespan of 24 years, CCS in LDPE remains economically attractive compared to CCS in glass.

Keywords: Energy performance; Solar chimney power plant; Experimental analysis; Aging; Manzanarès site; Technical- economic study ; LDPE.

Résumé : Le travail présenté dans cette thèse est relatif à l'analyse de l'impact du vieillissement sur les performances énergétiques des centrales à cheminée solaire (CCS). Il consiste en la réalisation d'essais expérimentaux sur le matériau constituant le collecteur solaire proposé. Ce dernier consiste en un film en polyéthylène basse densité PEBD largement utilisé en agriculture. La détermination des performances énergétiques de la centrale à cheminée solaire (CCS) a été établie sur la base de bilans énergétiques sur les composantes de la centrale. Les paramètres du prototype expérimental de CCS de Manzanarès ont été utilisés dans l'analyse des performances énergétiques et la validation du modèle mathématique. L'étude a démontré l'existence d'une relation entre le vieillissement du collecteur, dû principalement aux conditions climatiques et la dégradation de ses propriétés thermo physiques. En effet, les résultats obtenus ont montré que les contraintes mécaniques (contraintes de rupture et d'allongement) diminuent de plus de 50% après une durée de 3 années d'utilisation. Contrairement aux modèles mathématiques classiques qui considèrent les propriétés photo-thermiques (absorptivité et transmittivité) constantes, les résultats expérimentaux ont montré que ces propriétés sont très affectées par le vieillissement et les performances énergétiques (puissances) de la CCS sont réduites (de 50 à 35 kW) c'est-à-dire de 30%. L'étude technico-économique a montré que sur une durée de vie de 24 ans, la CCS en PEBD reste économiquement attractive comparativement à la CCS en verre.

Mots clés : Performances énergétiques ; Centrale à cheminée solaire ; Analyse expérimentale ; Vieillesse ; Site de Manzanarès ; Etude technico-économique ; PEBD.

الحمد لله

الذي بنعمته تتم الصالحات

Dédicaces

A

Mon Père l'inspiration ;
Ma Mère le dévouement ;
Mon Epouse l'épaulement ;
Mes Frères et *Ma Sœur* le soutien ;
Mes Enfants l'horizon ;
« *NISSOU* » ma bouffée d'oxygène.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer mes vifs et sincères remerciements à mes encadreurs :

Mon directeur de thèse, LARBI Salah, Professeur à l'ENP, pour sa confiance, sa disponibilité, ses orientations et conseils, son aide et surtout sa patience et ses encouragements durant toute la période de préparation de cette thèse.

Mon Co- Directeur de thèse, Dr. BOUHDJAR Amor, Directeur de Recherche au CDER, pour ses conseils et orientations et pour l'aide précieuse qu'il m'a apportée, tout au long de la réalisation de ce travail de thèse.

Mes sincères remerciements vont au président de jury, Monsieur B. BENKOUSSAS, Prof. A l'ENP, de nous avoir honoré par sa présence ainsi qu'aux membres du jury d'avoir répondu favorablement à notre invitation en acceptant d'examiner ce travail : Messieurs, K. MOHAMMEDI, Professeur à l'UMBB ; R DIZENE, Professeur à l'USTHB ; H. SEMAÏ Maître de Recherche- A au CDER et Y. BELKACEMI, Maître de Conférence – A à l'ENP.

Mes sincères remerciements à Dr. REBAI Noura, pour son engagement et sa bienveillance. Je lui exprime ma profonde gratitude pour ces encouragements et pour son précieux soutien tout au long de ce travail.

Je remercie, tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce modeste travail :

A Madame Meddour Samira, chercheur au niveau du CDTA, pour sa précieuse contribution.

A Madame Amokrane, chef de département pédagogique « GRP » ainsi qu'à Madame Ait Ouakli, chef de département pédagogique « HSE », pour les facilitations et l'aide qu'elles m'ont apportées notamment durant la

réalisation des essais expérimentaux au sein des laboratoires de l'Institut Algérien du Pétrole.

Aux Dr. Bentriddi, Dr. Berkouk et Dr. Behar pour l'aide qu'ils m'ont apporté.

A Monsieur Kaci et Monsieur Meddour pour leurs conseils et orientations.

A Monsieur Yahiaoui, sous-directeur de scolarité et à Monsieur Taouli, directeur de l'école de l'IAP, et à Monsieur Guenoune directeur général de l'IAP, de pour leurs encouragements.

A mes collègues : Enseignants, staff pédagogique, staff administratif et aux responsables de l'Institut Algérien du Pétrole pour leurs encouragements.

Pour finir, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à tous mes enseignants, et particulièrement les enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique et de l'Institut Algérien du Pétrole ainsi qu'aux employés des bibliothèques de l'école polytechnique et de l'IAP pour leur facilitation.

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

| | |
|---|-----------|
| <i>Introduction Générale</i> | 17 |
| <i>Chapitre I Généralités sur les Centrales à Cheminée Solaire</i> | 22 |
| I.1 Introduction | 23 |
| I.2 L'Energie | 23 |
| I.2.1. Evolution de la consommation mondiale d'énergie | 24 |
| I.2.2. Les énergies renouvelables | 25 |
| I.2.2.1. Filières des énergies renouvelables | 26 |
| I.2.3. Transition énergétique | 26 |
| I.2.3.1. Programme algérien de développement des ENR et de EE | 27 |
| I.2.4. Les Centrales à Cheminée Solaire CCS | 29 |
| I.2.4.1. Le collecteur | 30 |
| I.2.4.2. Les Turbines | 31 |
| I.2.4.3. La cheminée | 32 |
| I.2.4.4. Principe de fonctionnement d'une tour solaire | 32 |
| I.2.4.5. Projets de Centrales à Cheminées Solaire | 33 |
| I.2.4.5.1. Le prototype chinois | 33 |
| I.2.4.5.2. Prototype de Manzanares | 34 |
| I.2.4.5.3. La centrale à cheminée solaire d'Arizona | 35 |
| I.2.4.5.4. Avantages et inconvénients | 36 |
| | |
| <i>Chapitre II Etat de l'Art</i> | 37 |
| II.1 Introduction | 38 |
| II.2 Historique | 38 |
| II.3 Etudes expérimentales sur les CCS | 41 |
| II.3.1. Centrale pilote de Manzanares | 41 |
| II.3.2. Diverses structures expérimentales à l'échelle laboratoire | 44 |
| II.3.2.1. Prototype de Sherif & al | 44 |
| II.3.2.2. Prototype de Akbarzadeh (Australie) | 45 |
| II.3.2.3. Prototype de Zhou & al. Wuhan (Chine). | 46 |
| II.3.2.4. Prototype de Ketlogetswe & al. (Botswana) | 47 |
| II.3.2.5. Prototype de Ferreria, Maia & al. (Brésil) | 48 |
| II.3.2.6. Prototype de Koyun; Turquie | 49 |
| II.3.2.7. Prototype de Bugutekin, Turquie | 49 |
| II.3.2.8. Prototype de CCS de Wuhai (Chine) | 50 |
| II.3.2.9. Prototype de Kasaeian & al. (Iran) | 51 |
| II.3.2.10. Prototype de Kerman project (Iran) 2012 | 52 |
| II.3.2.11. Prototype de l'Université de Damas (Syrie) | 54 |
| II.3.2.12. Prototype de centrale pilote en Jordanie. | 55 |
| II.3.2.13. Dispositif experimental de Borj Cedria, Tunisie (2016). | 56 |
| II.3.2.14. Nouveau concept, Turquie 2017 | 57 |
| III.2 Etudes Théoriques sur les CCS | 58 |

| | | |
|---------|---|----|
| II.4.1. | Performance du capteur solaire | 60 |
| II.4.2. | Performances de la cheminée | 61 |
| II.4.3. | Modélisation élaborée | 62 |
| II.4.4. | Caractéristiques de la turbine | 64 |
| II.4.5. | Etude adimensionnelle | 65 |
| II.4.6. | Effets environnementaux et atmosphériques | 65 |
| II.5. | Etudes économiques | 66 |
| II.6. | Nouveaux concepts | 68 |
| II.7. | Intégration de matériaux à changement de phase | 71 |
| II.8. | Utilisation de films plastiques dans les collecteurs de CCS | 71 |
| II.9. | Conclusion | 74 |

Chapitre III Matériaux et Dispositifs Expérimentaux **75**

| | | |
|------------------|--|----|
| III.1 | Introduction | 76 |
| III.2 | Matériaux utilisés | 77 |
| III.2.1. | Dispositifs solaires à effet de serre | 77 |
| III.2.2. | Matériaux absorbeurs | 77 |
| III.2.3. | Matériaux transparents | 78 |
| III.2.4. | Matériaux polymères | 79 |
| III.2.4.1. | Les Polymères | 79 |
| III.2.4.2. | Les amorphes | 80 |
| III.2.4.3. | Les semi cristallins | 80 |
| III.2.4.4. | Propriétés des polymères | 80 |
| III.2.4.4.1. | Volume spécifique | 80 |
| III.2.4.4.2. | Conductivité thermique | 81 |
| III.2.4.4.3. | Module d'élasticité | 81 |
| III.2.4.4.4. | Rhéologie | 81 |
| III.2.4.5. | Les films plastiques | 82 |
| III.2.4.5.1. | Les grandes familles de plastique | 82 |
| III.2.4.5.2. | Composition et fabrication des films plastiques | 82 |
| III.2.4.5.3. | Le polyéthylène (PE), description générale | 84 |
| III.2.4.5.4. | Différents types de polyéthylène | 85 |
| III.2.4.5.5. | Propriétés du PE | 86 |
| III.2.4.5.5.1. | Propriétés physiques | 86 |
| III.2.4.5.5.2. | Propriétés chimiques | 86 |
| III.2.4.5.5.3. | Vieillissement du polyéthylène | 87 |
| III.2.4.5.5.3.1. | Vieillissement physique | 88 |
| III.2.4.5.5.3.2. | Vieillissement chimique | 88 |
| III.2.4.5.5.3.3. | Stabilisation | 89 |
| III.2.4.5.6. | Propriétés du PEBD | 89 |
| III.2.4.6. | Problématique et dispositifs expérimentaux | 90 |
| III.3 | Protocole expérimental | 93 |
| III.3.1. | Vieillissement naturel des films de polyéthylène | 93 |
| III.3.2. | Matériaux étudiés | 94 |
| III.3.3. | Techniques expérimentales d'analyse | 95 |
| III.3.3.1. | Essais mécaniques | 95 |

| | |
|---|------------|
| III.3.3.1.1. Essai de traction | 96 |
| III.3.3.1.2. Essai de Dureté | 99 |
| III.3.3.2. Essais thermiques | 101 |
| III.3.3.2.1. Vieillissement accéléré (artificiel) | 101 |
| III.3.3.3. Tests physiques et rhéologiques | 102 |
| Chapitre IV Modélisation & Mise en équations | 115 |
| IV.1 Introduction | 116 |
| IV.2 Modélisation Mathématique | 116 |
| IV.2.1. Hypothèses simplificatrices | 116 |
| IV.2.2. Cycle Thermodynamique de la CCS | 116 |
| IV.2.3. Rendement thermique de la CCS | 118 |
| IV.2.4. Modélisation du collecteur | 118 |
| IV.2.5. Modélisation de la cheminée | 120 |
| IV.2.5.1. Vitesse de l'air | 121 |
| IV.2.5.2. Rendement de la cheminée | 122 |
| IV.2.5.3. Puissance et perte de charge totale | 122 |
| IV.2.5.4. Turbine à air« Aérogénératrice » | 122 |
| IV.2.5.5. Puissance maximale développée | 123 |
| IV.2.6. Puissance fournie au réseau | 124 |
| IV.2.7. Rendement global de la centrale à cheminée solaire | 124 |
| IV.2.8. Equation caractéristique du système CCS | 125 |
| V.3 Résolution du modèle mathématique | 126 |
| Chapitre V Résultats & Discussions | 128 |
| V.1 Introduction | 129 |
| V.2 Elaboration de la fiche technique de l'échantillon neuf | 129 |
| V.3. Comparaison entre échantillons par vieillissement accéléré | 130 |
| V.4. Résultats et interprétation | 141 |
| V.5. Résultats issus de la simulation et analyse | 151 |
| V.6. Discussions | 162 |
| V.7. Etude technico-économique | 165 |
| Conclusion Générale | 173 |
| Références Bibliographiques | 176 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure. I.1. Evolution des ENR dans le mix énergétique mondial | 24 |
| Figure. I.2. Evolution de la consommation d'énergie primaire par source | 24 |
| Figure. I.3. Photo de Tchernobyl, le 26 avril 1986 | 25 |
| Figure. I.4. Vue des principaux composants d'une cheminée solaire | 30 |
| Figure. I.5. Collecteur de la Tour Solaire d'Arizona | 30 |
| Figure. I.6. Turbines de la CCS : Projet d'Arizona et prototype de Manzanares et de chine | 31 |
| Figure. I.7. Cheminée de la CCS | 32 |
| Figure. I.8. Principe de Fonctionnement d'une centrale solaire à effet de cheminée | 33 |
| Figure. I.9. Prototype de la CCS chinoise | 34 |
| Figure. I.10. Prototype de Manzanares en Espagne | 34 |
| Figure. I.11. Impression d'artiste de la centrale d'Enviro- Mission en Arizona. | 35 |
| Figure. II.1. Moulin à convection Bennett, par Albert H. Holmes & Son, Londres, 1919-1928 | 39 |
| Figure. II.2. CCS Proposée par Isidoro Cabanyes en 1903 | 39 |
| Figure. II.3. CCS proposés par Bernard Dubos en 1926 (Cheminée construite sur une montagne en nord Afrique) | 40 |
| Figure. II.4. Prototype illustratif présenté par Günther, 1931 | 41 |
| Figure. II.5. Photo de la CCS de Manzanares | 42 |
| Figure. II.6. Photo de la CCS de Wuhai (Qin, 2013) | 42 |
| Figure. II.7. Relevé des vitesses d'air ascendant et la puissance développée de la CCS de Manzanares | 43 |
| Figure. II.8. Centrale à cheminée solaire conçu par le groupe de recherche du professeur Sherif | 44 |
| Figure. II.9. Etang solaire | 46 |
| Figure. II.10. Vue globale de la CCS et Aéro-génératrice placée à la base de la cheminée | 47 |
| Figure. II.11. Schéma de l'arrangement de la CCS étudiée | 48 |
| Figure. II.12. Prototype de la CCS de Ferreira & al. | 48 |
| Figure. II.13. Prototype de la CCS de Koyun et al. Campus de l' Université de Suleyman Demirel, Turquie | 49 |
| Figure. II.14. Vue générale du modèle de la CCS et de sa périphérie | 50 |

| | |
|---|-----|
| Figure. II.15. Le prototype de CCS de Wei. | 50 |
| Figure. II.16. Le prototype de CCS de Kasaeian | 51 |
| Figure. II.17. Le prototype pilote de la CCS de Kerman, Iran | 52 |
| Figure. II.18. Modèle de CCS de l'université de Téhéran | 53 |
| Figure. II.19. CCS avec miroirs d'intensification | 54 |
| Figure. II.20. Prototype de l'université de Damas, Syrie | 55 |
| Figure. II.21. Le premier prototype réalisé en Jordanie | 56 |
| Figure. II.22. Prototype réalisé en Tunisie | 56 |
| Figure. II.23. CCS à collecteur transpercé Unité expérimentale à Trakya, Université, Edirne, Turquie | 57 |
| Figure. II.24. CCS expérimentale avec hybridation du collecteur avec un système photovoltaïque. Université, Edirne, Turquie | 58 |
| Figure. II.25. CCS combinant le dessalement de l'eau de mer, schématisation du concept | 67 |
| Figure. II.26. Prototype de nouvelles approches de conception de CCS | 68 |
| Figure. II.27. Schéma représentant un système de CCS à latitude élevée | 69 |
| Figure. III.1. Toiture en verre du prototype de Manzanares. | 76 |
| Figure. III.2. Toiture en membranes plastiques utilisées dans le prototype de Manzanares. | 76 |
| Figure. III.3. Ligne de fabrication par extrusion à plat | 83 |
| Figure. III.4. Coextrusion de 5 couches | 84 |
| Figure. III.5. Procédé de revêtement | 84 |
| Figure. III.6. Le prototype de tour solaire de Manzanares en Espagne (années 1980) | 92 |
| Figure. III.7. PEBD utilisé comme couverture d'une serre agricole à Boumerdes | 94 |
| Figure. III.8. La presse, la découpe des éprouvettes et l'emporte-pièce. | 95 |
| Figure. III.9. Le pied à coulisse et Le micromètre. | 96 |
| Figure. III.10. Laboratoire Polymère IAP / La machine de traction. | 96 |
| Figure. III.11. Eprouvette placée dans la machine | 97 |
| Figure. III.12. Résultats après rupture de l'éprouvette | 98 |
| Figure. III.13. Photo d'un duromètre | 99 |
| Figure. III.14. Eprouvettes pour l'essai de dureté | 100 |
| Figure. III.15. Mesure de dureté | 100 |
| Figure. III.16. Installation des échantillons dans l'étuve | 102 |

| | |
|--|-----|
| Figure. III.17. Appareillage de mesure de l'Indice de Fluidité | 102 |
| Figure. III.18. Composants d'un plastomètre | 103 |
| Figure. III.19. Opération de nettoyage de l'appareil | 104 |
| Figure. III.20. Le réglage de la température | 104 |
| Figure. III.21. Le découpage des extrudats | 105 |
| Figure. III.22. Les extrudats | 105 |
| Figure. III.23. Photo d'un densimètre | 106 |
| Figure. III.24. L'installation des accessoires de densimètre | 107 |
| Figure. III.25. La mesure de poids d'extrudât non émergé | 107 |
| Figure. III.26. La mesure de poids d'extrudât émergé | 107 |
| Figure. III.27. Vue d'ensemble d'un Banc Kofler | 108 |
| Figure. III.28. Les solides étalons | 109 |
| Figure. III.29. Lecture de température de fusion | 110 |
| Figure. III.30. Nettoyage du Banc Kofler | 110 |
| Figure. III.31. Spectromètre UV-Visible | 111 |
| Figure. III.32. Mesure de l'UV-Visible | 112 |
| Figure. III.33. Appareillage de spectrométrie IR | 113 |
| Figure. III.34. Le pyranomètre | 114 |
| Figure. IV.1. Diagramme Température – Entropie pour un cycle à air standard | 117 |
| Figure. IV.2. Schéma d'une CCS montrant les différents points d'évolution du cycle | 118 |
| Figure. IV.3. Courbe caractéristique de la puissance développée P en fonction de Δp_s | 124 |
| Figure. IV.4. Organigramme de résolution | 127 |
| Figure. V.1. Photo des échantillons du film plastique « PEBD » utilisés dans les serres agricoles | 132 |
| Figure. V.2. Photo des échantillons soumis à un vieillissement artificiel accélééré dans une étuve ventilée | 134 |
| Figure. V.3. La contrainte à la rupture de PEBD jaune longitudinal Vieillissement Artificiel | 135 |
| Figure. V.4. La contrainte à la rupture de PEBD jaune transversal Vieillissement Artificiel | 135 |

| | |
|---|-----|
| Figure. V.5. La contrainte à la rupture de PEBD blanc; Vieillessement Artificiel | 136 |
| Figure. V.6. La contrainte à la rupture de PEBD blanc transversal Vieillessement Artificiel | 136 |
| Figure. V.7. L'allongement à la rupture de PEBD jaune longitudinal Vieillessement Artificiel | 138 |
| Figure. V.8. L'allongement à la rupture de PEBD jaune transversal Vieillessement Artificiel | 138 |
| Figure. V.9. L'allongement à la rupture de film PEBD blanc longitudinal Vieillessement Artificiel | 139 |
| Figure. V.10. L'allongement à la rupture de film blanc transversal Vieillessement Artificiel | 139 |
| Figure. V.11. Les modules de Young de PEBD jaune longitudinal Vieillessement Artificiel | 141 |
| Figure. V.12. Les modules de Young de PEBD jaune transversal Vieillessement Artificiel | 141 |
| Figure. V.13. Les modules de Young de PEBD blanc longitudinal Vieillessement Artificiel | 142 |
| Figure. V.14. Les modules de Young de PEBD blanc, Vieillessement Artificiel | 142 |
| Figure. V.15. Photo des échantillons soumis à un vieillissement artificiel accéléré : Etat du PEBD blanc après 35 jours d'exposition | 144 |
| Figure. V.16. Contrainte à la rupture du PEBD sens longitudinal, en fonction du temps d'exposition | 145 |
| Figure. V.17. Contrainte à la rupture de PEBD sens transversal en fonction du temps d'exposition | 145 |
| Figure. V.18. Allongement à la rupture du PEBD dans le sens longitudinal en fonction du temps | 147 |
| Figure. V.19. Allongement à la rupture du PEBD dans le sens transversal, en fonction du temps | 147 |
| Figure. V.20. Module de Young du PEBD sens longitudinal | 148 |
| Figure. V.21. Module de Young de PEBD sens transversal | 148 |
| Figure. V.22. Résultats de la spectroscopie UV-Visible d'échantillons neuf et vieillis | 151 |

| | |
|---|-----|
| Figure. V.23. Résultats IRTF du film neuf et des films vieillis naturellement. | 152 |
| Figure. V.24. Les mesures de l'irradiation solaire pour la journée du 18 juillet 2019 | 153 |
| Figure. V.25. Evolution de l'efficacité globale et du collecteur de la CCS pour les cas : Nouvel échantillon, 1 an, 2 ans et trois ans | 156 |
| Figure. V.26. Puissance effective, gain thermique et vitesse d'air pour les différents cas | 157 |
| Figure. V.27. Evolution de la puissance développée et de la vitesse d'air en fonction de Hch | 158 |
| Figure. V.28. Evolution du gain thermique, en fonction de l'irradiation solaire | 160 |
| Figure. V.29. Evolution du rendement du collecteur en fonction de l'irradiation solaire | 161 |
| Figure. V.30. Evolution de la puissance développée de la CCS en fonction de l'irradiation solaire | 161 |
| Figure. V.31. Evolution du gain thermique en fonction de la section de la cheminée | 162 |
| Figure. V.32. Evolution de la puissance de la CCS en fonction de la section de la cheminée | 162 |
| Figure. V.33. Evolution du rendement global et du rendement du collecteur en fonction du vieillissement pour une CCS commerciale | 165 |
| Figure. V.34. Evolution de la puissance développée et du gain thermique pour différentes valeurs de Dcoll | 167 |
| Figure. V.35. Représentation du potentiel solaire sur la région de Boumerdes | 171 |

Liste des tableaux

| | | |
|----------------|--|-----|
| Tableau II.1. | Les principaux paramètres de la CCS de Manzanares. | 43 |
| Tableau III.1. | Caractéristiques physiques de divers matériaux absorbeurs. | 78 |
| Tableau III.2. | Caractéristiques physico chimiques de diverses surfaces sélectives. | 78 |
| Tableau III.3. | Caractéristiques des couvertures transparentes. | 79 |
| Tableau V.1. | Caractéristiques de l'échantillon de film plastique vierge Jaune et blanc. | 130 |
| Tableau V.2. | La contrainte à la rupture de PEBD, jaune et blanc, Vieillissement Artificiel. | 131 |
| Tableau V.3. | L'allongement à la rupture de film PEBD jaune et blanc, vieillissement artificiel. | 134 |
| Tableau V.4. | Les modules de Young de PEBD jaune, et blanc Vieillissement Artificiel. | 137 |
| Tableau V.5. | Résultats de la contrainte à la rupture en fonction de types de vieillissement de PEBD jaune, après 2 mois d'exposition. | 140 |
| Tableau V.6. | Résultats des tests de dureté des films. | 146 |
| Tableau V.7. | Résultats de l'indice de fluidité. | 146 |
| Tableau V.8. | Masse volumique moyenne du film. | 147 |
| Tableau V.9. | Comparaison entre les valeurs mesurées et les résultats de simulation. | 151 |
| Tableau V.10. | Paramètres et données de la CCS de référence. | 152 |
| Tableau V.11. | Paramètres et données de la CCS de référence bis. | 157 |
| Tableau V.12. | Paramètres et données d'une CCS commerciale de 100 Mégawatt. | 161 |
| Tableau V.13. | Paramètres et données d'une CCS commerciale. | 169 |
| Tableau V.14. | Résultats de l'étude économique sur une période d'exploitation de 24 ans. | 169 |

Nomenclature

| | |
|--------------------|---|
| A : | Surface du collecteur, m^2 |
| A_c : | Section à la sortie du collecteur (entrée de la cheminée), m^2 |
| a_{ch} : | Section de la cheminée, m^2 |
| C_p : | Capacité calorifique de l'air, $J/kg\ K$ |
| D : | Diamètre du collecteur, m |
| d : | Diamètre de la cheminée, m |
| ep | Épaisseur de la paroi de la cheminée, m |
| g : | Accélération de la gravité, m/s^2 |
| H_{ch} : | Hauteur de la cheminée, m |
| I : | Rayonnement solaire incident par unité de surface, W/m^2 |
| \dot{m} : | Débit massique de l'air, kg/s |
| Δp_{tot} : | Perte de charge totale au niveau de la cheminée, Pa |
| Δp_s : | Perte de charge statique (Perte entre l'entrée et la sortie de l'aéro-turbine), Pa |
| Δp_d : | Perte de charge dynamique (Perte entre la sortie de la turbine et la sortie de la cheminée), Pa . |
| P_{tot} : | Puissance totale développée par le fluide, W |
| P_{arbre} : | Puissance à l'arbre de l'aéro-turbine, W |
| $P_{wt,max}$ | Puissance à l'arbre de l'aéro-turbine au point de fonctionnement optimum, W |
| $P_{solaire}$: | Puissance solaire reçue par le collecteur, W |
| P_{elec} . | Puissance électrique effective développée par la centrale, W |
| \dot{Q} : | Flux de chaleur reçu par le fluide au niveau du collecteur, W |
| R : | Rayon, m |
| S : | Surface, m^2 |
| T : | Température absolue, K |
| T_0 : | Température ambiante à l'entrée du collecteur, K |
| ΔT : | Différence de température entre l'entrée et la sortie du collecteur, K |
| U : | Coefficient d'échange thermique global du débit d'air de la cheminée vers l'air atmosphérique, W/m^2K |
| v : | Vitesse d'écoulement d'air, m/s |
| V | Volume, m^3 |
| LCOE | Coût actualisé de l'énergie (Levelized Cost of Energy), DZD/kWh |

- Dep Dépenses ajustées à l'effet de l'inflation, DZD
 I_0 Investissement initial correspondant à l'année 0, DZD

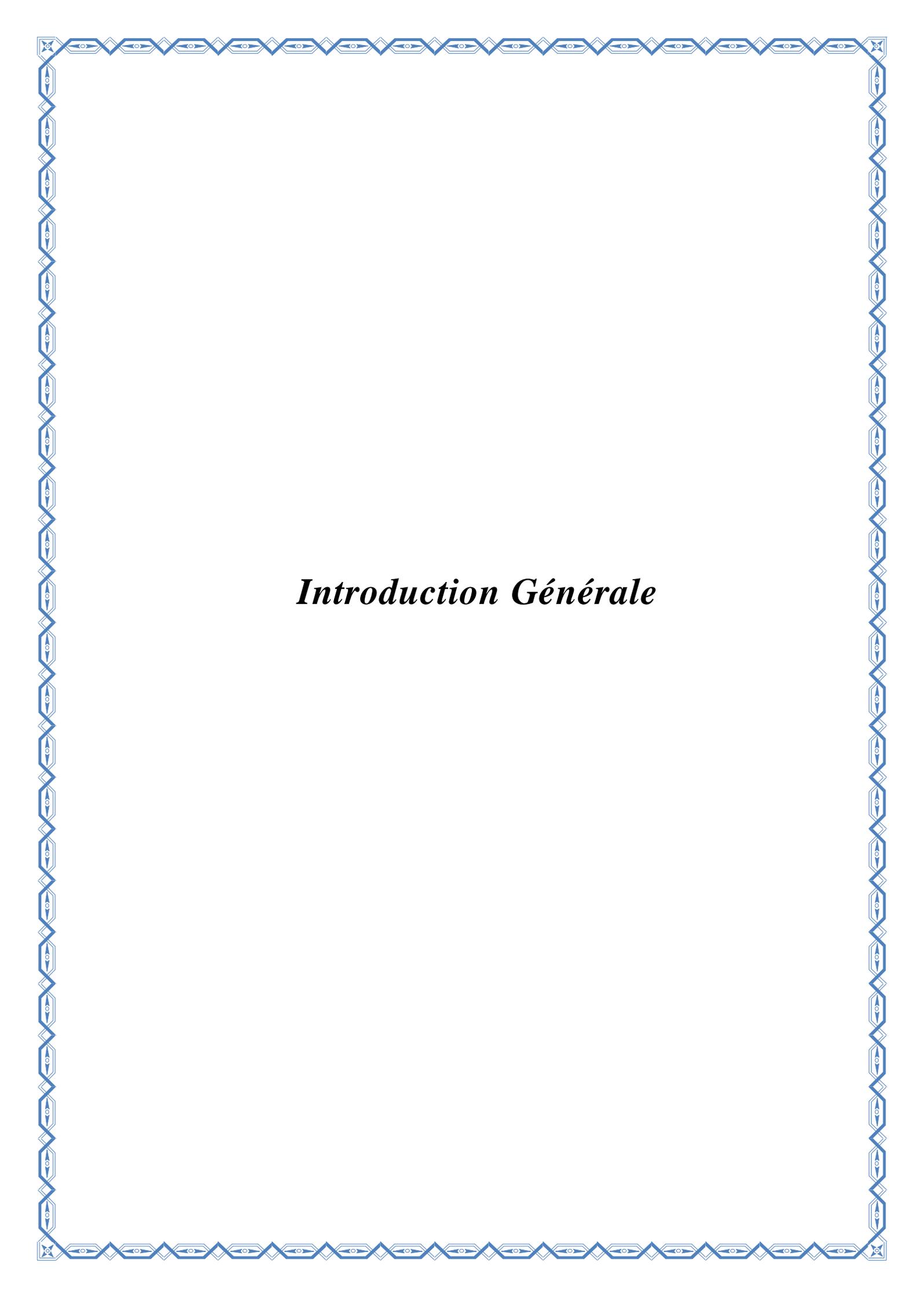
Symboles :

- α : Coefficient d'absorption effective du rayonnement solaire du collecteur
 β : Coefficient de perte énergétique par convection, par radiation et par stockage dans le sol, $W/m^2.K$
 τ : Coefficient de transmittance effective du rayonnement solaire du collecteur
 ρ : Masse volumique de l'air
 η : Rendement

Indices :

- e : Extérieur
 $coll$: Collecteur
 $tour$: Tour cheminée
 $glob$: Global
 ch, c : Cheminée
 $tw, turb$: Aéro-turbine

 glo : Global
 tot : Total
 s : Statique
 $\infty, 0$: Environnement



Introduction Générale

Introduction Générale

Les récentes analyses des scénarii de développement énergétique mondial indiquent que les sources renouvelables provenant de l'énergie éolienne et du solaire auront la part du lion dans le mix énergétique mondial dans les années à venir. Ceci réduira la concentration du dioxyde de carbone, CO₂, dans l'atmosphère et atténuera l'augmentation de la température moyenne de la terre [1].

Dans ce contexte, l'Algérie vise à produire plus d'énergie, en particulier renouvelable, dans le but d'augmenter son niveau de développement économique et social dans le souci de sortir de sa dépendance économique basée exclusivement sur les ventes du pétrole et du gaz au cours du demi-siècle dernier [2].

La simplicité technique de la centrale à cheminée solaire (CCS) la rend très attractive pour les pays ensoleillés. Elle présente de nombreux avantages, tels sa conception simple, la possibilité de fournir jusqu'à 200 MW de puissance électrique tout en étant sûr, fiable et avec un minimum d'entretien.

La CCS se compose de trois principales parties : le capteur solaire, la cheminée et l'aéro-turbine.

Notons qu'une CCS commerciale est une structure gigantesque et sa structure massive, nécessite un investissement initial important. L'optimisation économique d'une telle centrale peut être réalisée en utilisant des matériaux de construction bon marché pour la partie « collecteur » (film de plastique à la place du verre) afin de compenser le coût important lié à sa construction.

Le capteur, constitué par le sol et une couverture transparente située à quelques mètres au-dessus, a pour objectif principal de capter le rayonnement solaire et chauffer la masse d'air présente à l'intérieur. L'air chaud se dirige vers la cheminée située au centre du capteur par effet de flottabilité (buoyancy

effect). Une turbine est placée perpendiculairement à l'écoulement d'air pour convertir l'énergie cinétique de l'air en électricité à travers une génératrice de courant [3].

Le collecteur solaire (CS) est la partie de la CCS employée pour produire l'air chaud par effet de serre. Avec une toiture en verre ou en film plastique transparent, le CS couvre une très grande surface de plusieurs milliers de mètres carrés. En effet, recouvrir l'immense structure des collecteurs, jusqu'à plusieurs hectares, de polyéthylène basse densité (PEBD), réduira les coûts d'investissement initiaux, en améliorant la durée du retour sur investissement. Cela rendra la CCS plus attrayante sur le plan économique. Cependant, la dégradation du film altère ses performances mécaniques et photo-thermiques et réduira par conséquent l'efficacité globale du système.

La présente étude examine l'impact du vieillissement sur les performances de l'installation CCS en analysant l'utilisation d'un film PEBD stabilisé, comme couvercle du capteur solaire, pour principalement deux raisons :

- ✓ Améliorer l'efficacité économique de ces centrales électriques en utilisant des matériaux moins chers et ;
- ✓ Démontrer l'impact du vieillissement sur les performances de la CCS.

Le PEBD étant sujet à la détérioration, l'effet du vieillissement sur les propriétés initiales du matériau utilisé et son impact sur le fonctionnement et le rendement global du système sera analysé dans la présente étude.

Le vieillissement naturel a été privilégié au vieillissement accéléré en exposant le film étudié, pour une durée de 3 ans, à des contraintes environnementales similaires aux conditions locales sud méditerranéennes. Dans la présente étude, un PEBD stabilisé jaunâtre est considéré.

Dans ce contexte, le film PEBD, produit localement et largement utilisé dans les serres agricoles en Algérie, pourra se présenter comme solution

alternative au verre en raison de son faible prix et de ses propriétés physiques et thermiques.

La présente étude vise l'analyse expérimentale de l'effet du vieillissement du matériau constituant le revêtement du collecteur sur les performances des centrales à cheminée solaire par utilisation d'un film PEBD stabilisé, comme couvercle du capteur solaire. En plus de l'évaluation de la dégradation des matériaux, le travail analyse l'effet de la réduction de la transmittance solaire sur l'efficacité du système.

Si l'utilisation du film PEBD offre des possibilités d'optimisation, les différents modèles théoriques de description classique utilisés dans l'analyse des performances énergétiques des CCS (Modèles de Schlaich, de Gannon, de Dai, de Ming, de Zhoo et de Chitsomboon) considèrent les paramètres photo-thermiques (absorptivité et transmittivité) constants [4,5], ce qui n'est pas sans conséquence sur la précision des résultats obtenus en termes d'analyse de performances des CCS. L'un des objectifs de l'étude est de mettre en relief l'effet du vieillissement sur la dégradation des propriétés mécaniques et photo-thermiques du matériau utilisé dans le collecteur et ces conséquences sur les modèles mathématiques utilisés dans cette analyse.

Le travail ainsi présenté se compose des chapitres suivants :

Le premier chapitre est relatif à un aperçu sur les différentes formes d'énergie, l'enjeu de la transition énergétique, l'évolution des énergies renouvelables. Y sont décrits aussi l'énergie solaire et sa conversion. La dernière partie de ce chapitre explique le dispositif des centrales à cheminée solaire (CCS).

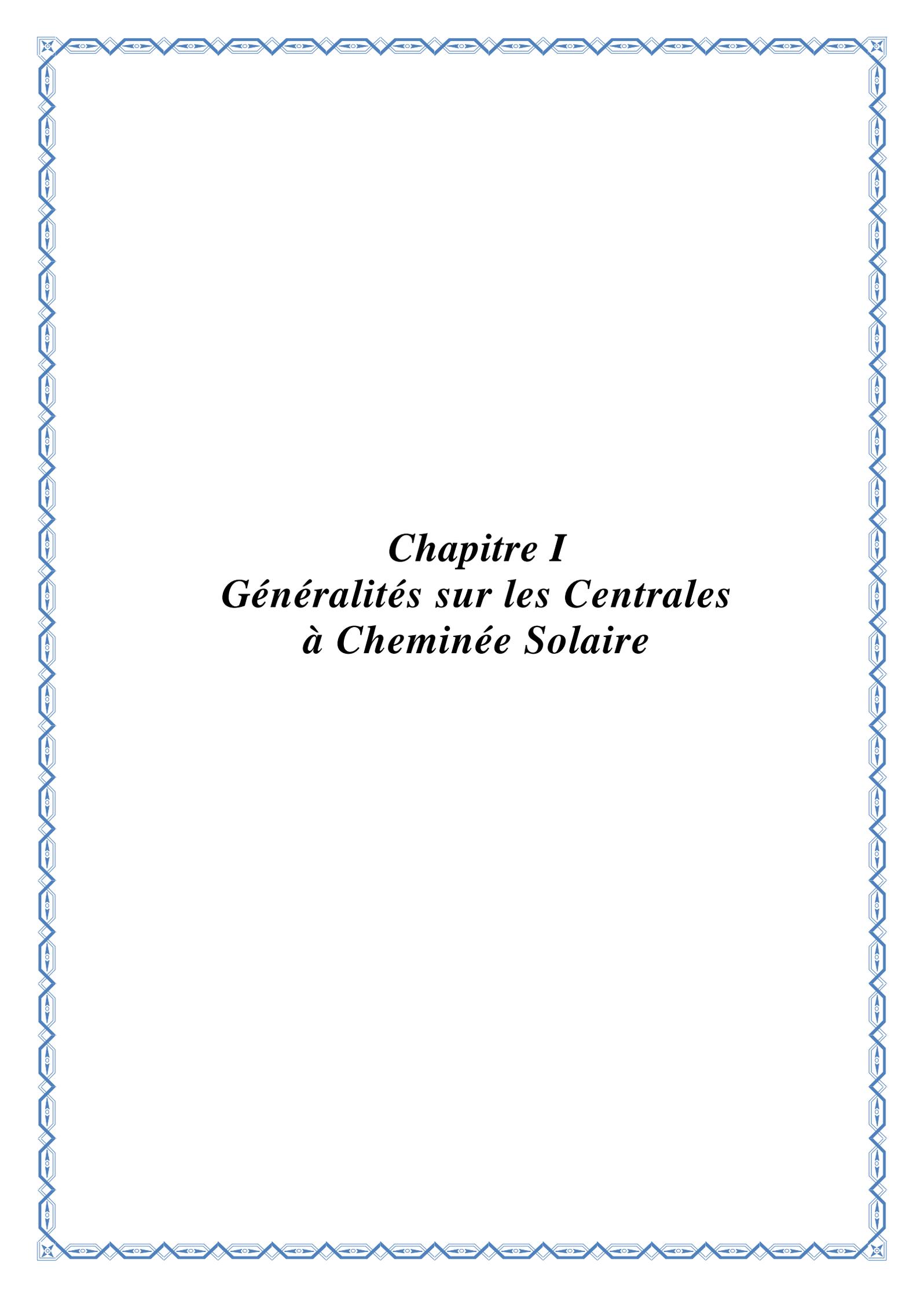
Le deuxième chapitre concerne l'état de l'art détaillé et actualisé dans le domaine des cheminées solaires. Y sont décrits les études expérimentales et les travaux se rapportant à la modélisation et la simulation de ces centrales. De ce chapitre découle l'importance et l'intérêt que suscitent les CCS dans le milieu scientifique.

Le troisième chapitre porte sur les types de polymères, leurs caractérisations, avantages et inconvénients. Il comporte les dispositifs et tests expérimentaux permettant la caractérisation des films plastiques utilisés dans les dispositifs de serre solaire. Finalement les différents tests effectués sont décrits.

Le quatrième chapitre est consacré à la description de la méthode de modélisation adoptée et y sont décrits aussi la méthode de résolution.

Au chapitre cinq, sont présentés, d'une part, les résultats expérimentaux, et l'analyse et la discussion de ces résultats. D'autre part, y sont reportées, les résultats de la simulation numérique ainsi que la discussion des différents résultats obtenus.

Pour terminer, une conclusion générale est présentée, faisant la synthèse des objectifs, des résultats obtenus et les perspectives futures pour la continuité de la présente étude.



Chapitre I
Généralités sur les Centrales
à Cheminée Solaire

Chapitre I : Généralités sur les Centrales à Cheminée Solaire

I.1 Introduction

Le présent chapitre vise à introduire des notions relatives à l'énergie en général et aux énergies renouvelables en particulier. Un aperçu de la scène énergétique mondiale et nationale est aussi présenté. Une analyse particulière est dédiée aux centrales à cheminée solaire.

I.2 L'Energie

L'origine du mot « **énergie** » remonte à l'antiquité. Le philosophe grec Aristote désignait par « *energeia* » (activité, efficacité) la force agissant grâce à laquelle le possible se réalise. Mais sa signification actuelle dans le champ des sciences naturelles ne remonte qu'au XIX^e siècle. La définition physique du terme est depuis la suivante : c'est « le travail contenu dans un système ou la capacité d'un système à exécuter un travail ».

L'énergie peut être transformée, stockée ou transportée. N'étant pas une matière, elle échappe à la perception sensorielle, seule la forme sous laquelle elle apparaît est perceptible. L'énergie apparaît sous différentes formes et peut être décomposée selon ses propriétés physiques en énergie mécanique, thermique ou chimique [6].

L'utilisation intensive des matières premières fossiles ces 150 dernières années a influencé l'équilibre énergétique. Au cours de cette période, l'énergie libérée a, en effet, été nettement supérieure aux flux énergétiques reçus par le système terre [7].

En raison des réactions thermo- nucléaires au sein du soleil, le rayonnement solaire produit, atteint non seulement l'atmosphère mais aussi la surface terrestre.

I.2.1. Evolution de la consommation mondiale d'énergie

Après la dominance du bois et du charbon au XIX^e siècle, le XX^e siècle a été caractérisé par un mix énergétique. Cependant le recours au charbon joue encore aujourd'hui un rôle important pour l'approvisionnement énergétique. La part du gaz naturel et de l'énergie nucléaire augmente tandis que le bois et l'hydraulique, sources traditionnelles d'énergie renouvelable, occupent une modeste place. La consommation et la production d'énergie à l'échelle mondiale ne cessent d'augmenter en raison de l'évolution démographique d'une part et, de l'évolution du mode de vie, d'autre part.

Les figures I.1 et I.2 montrent respectivement la croissance des énergies renouvelables et la consommation d'énergie primaire [8].

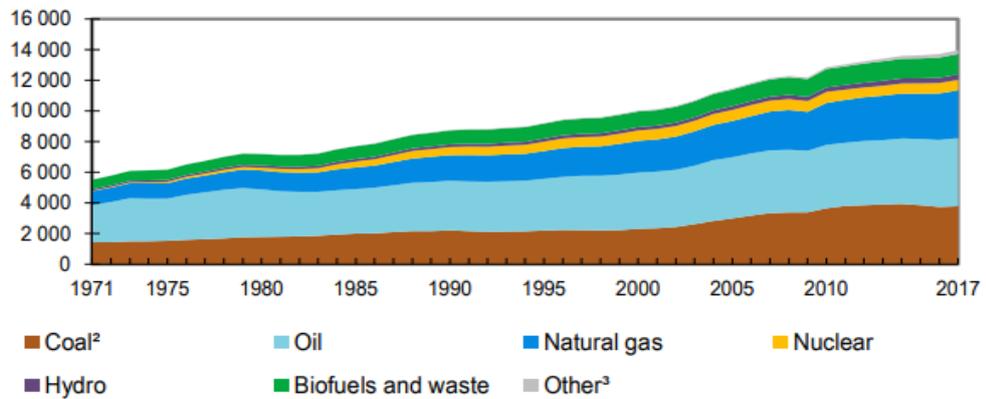


Figure I.1 Croissance de ENR dans le mix énergétique mondial [8].

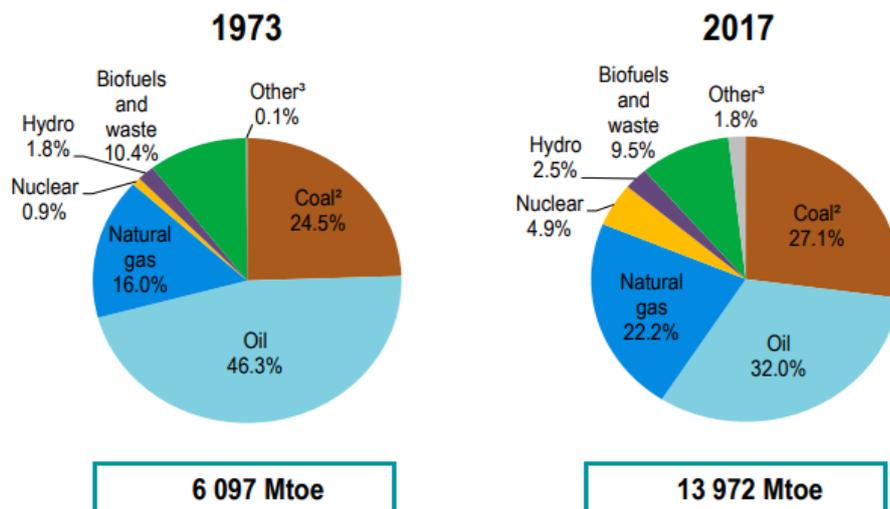


Figure I.2. Evolution de la consommation d'énergie primaire (en millions de tep) par source et comparaison entre les années 1973 et 2017 [8].

I.2.2. Les énergies renouvelables

Mise à part les formes traditionnelles d'utilisation de la biomasse, de l'énergie du vent et de l'eau, on assiste depuis le milieu des années 1970 à une utilisation croissante des sources d'énergies renouvelables et propres suite à l'engagement international pour la lutte contre le changement climatique [9].

Pour la plupart des applications, il est nécessaire de convertir l'énergie afin de la rendre compatible avec l'usage envisagé. Bien évidemment la nature, très ingénieuse, a mis au point les tout premiers convertisseurs énergétiques que sont les êtres vivants. Les plantes, par la photosynthèse, assurent la conversion de l'énergie rayonnante de la lumière en énergie chimique.

Depuis la catastrophe du réacteur nucléaire de Tchernobyl en 1986 (Figure I.3) (le réacteur n°4 de la centrale nucléaire soviétique de Tchernobyl, en Ukraine, explose, plongeant le monde dans la crainte d'une vaste contamination radioactive) ce phénomène s'est amplifié et les effets sont perceptibles depuis les années 1990.



Figure I.3. Photo de Tchernobyl, le 26 avril 1986, [9].

Profitant de conditions politiques favorables, on constate une croissance faible mais continue des agents énergétiques renouvelables. Par la suite, l'homme a inventé de très nombreux convertisseurs. Le premier est tout simplement le feu qui convertit de l'énergie chimique (combustion) en lumière et chaleur. Une voile transformant l'énergie éolienne en énergie mécanique.

En fait, de nombreux systèmes énergétiques sont l'association de plusieurs convertisseurs, tel le cas de la centrale à cheminée solaire « CCS ».

I.2.2.1. Filières des énergies renouvelables

Il existe plusieurs types d'énergies renouvelables, produites à partir de sources différentes. Les principales énergies renouvelables sont :

- ✓ La bioénergie
- ✓ Le solaire photovoltaïque
- ✓ Energie solaire thermique
- ✓ Le solaire thermique à basse température
- ✓ Le solaire thermique haute température
- ✓ L'énergie éolienne

I.2.3. Transition énergétique

Depuis la fin du XXe siècle, le climat est sous le feu des projecteurs. La concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère augmente continûment, les records chauds de température tombent les uns après les autres, la banquise arctique se réduit et le niveau des mers monte.

Dès la fin des années 1980, les scientifiques font un double constat, clair et préoccupant : le climat global se réchauffe rapidement et la concentration des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère due aux activités humaines atteint des niveaux sans précédent au cours du dernier million d'années. Cette observation conduit à la mise en place d'une évaluation de l'état des connaissances scientifiques sur le changement climatique, via des rapports périodiques produits par le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC), fondé en 1988 [10].

En parallèle, la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques, adoptée en 1992 à Rio, a été ratifiée par tous les pays. Elle vise à éviter les conséquences néfastes de l'influence des activités humaines sur le climat en stabilisant les concentrations de GES dans l'atmosphère. Entrée en vigueur en 1994, elle impose la publication des inventaires des émissions par pays, et l'organisation, chaque année, de la conférence des États « parties » de cette convention (les « COP »). Elle pose le principe d'une responsabilité commune mais différenciée entre pays.

En 1997, la 3^e COP (COP3) aboutit au protocole de Kyoto, engageant les 36 pays industrialisés qui l'ont ratifié à une baisse, avant 2012, de 5,2% de leurs rejets de GES par rapport à leur niveau de 1990. Ce protocole, qui devait être renégocié périodiquement, n'a pas été ratifié par le premier pays émetteur de l'époque, les États-Unis d'Amérique, et ne comporte pas d'engagement des pays en développement.

La transition énergétique est une voie vers la transformation du secteur énergétique mondial de l'énergie fossile à zéro carbone d'ici la seconde moitié de ce siècle. La nécessité de réduire les émissions de CO₂ liées à l'énergie pour limiter le changement climatique est au cœur de son action. La décarbonation du secteur énergétique nécessite une action urgente à l'échelle mondiale, et alors qu'une transition énergétique mondiale est en cours, des actions supplémentaires sont nécessaires pour réduire les émissions de carbone et atténuer les effets du changement climatique. Les mesures relatives aux énergies renouvelables et à l'efficacité énergétique peuvent potentiellement atteindre 90% des réductions de carbone requises [10].

I.2.3.1. Programme Algérien de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique

Le programme des énergies renouvelables revêt un caractère national et touche la majorité des secteurs d'activités. Sa mise en œuvre, placée sous l'égide du ministère de l'énergie, est ouverte aux opérateurs publics et privés. Le solaire constitue l'axe majeur du programme grâce aux différentes opportunités offertes. De plus, le pays est considéré parmi les régions les plus ensoleillées au monde avec un potentiel estimé à 169 TWh /m²/an. Il est constitué comme suit : régions côtières avec 1700 TWh, hauts plateaux avec 1900 TWh et le Sahara avec 2 650 TWh [11].

Les capacités en énergie renouvelables, seront installées selon les spécificités et les caractéristiques de chaque région :

- Région du Sud : pour l'hybridation des centrales existantes et l'alimentation des sites éparses, compte tenu de la disponibilité des espaces et de l'important potentiel solaire et éolien qui privilégie ces régions ;

- Région des Hauts Plateaux : pour leur potentiel d'ensoleillement et de vent avec possibilité d'acquisition des terrains ;
- Région du littoral : selon la disponibilité des assiettes de terrain avec l'exploitation de tous les espaces tels que les toitures et terrasses des bâtiments et autres espaces non utilisés. Les besoins complémentaires pour d'autres domaines d'application sont intégrés dans la capacité totale du photovoltaïque, tels que le résidentiel, l'agriculture, le pompage, les ressources en eau, l'industrie, l'éclairage public et les services.

Le nouveau programme de développement des énergies renouvelables se présente en deux phases :

- La première phase (2015-2020) : qui prévoit la production de 4525 MW d'énergies renouvelables, dont le photovoltaïque représentera 3000 MW.
- La deuxième phase (2021-2030) : la production estimée dans cette période est de 17475 MW, dont le photovoltaïque représentera 10575 MW.

L'adoption par les pouvoirs publics d'un programme national sur l'efficacité énergétique à l'horizon 2030, réaffirme cette dernière comme priorité. La réalisation de ce programme par une diversité d'actions et de projets, devrait favoriser l'émergence, à terme, d'un marché durable de l'efficacité énergétique en Algérie[2].

Ainsi donc grâce à diverses techniques, le rayonnement solaire peut être transformé en une autre forme d'énergie utile pour l'activité humaine, notamment, en chaleur et en électricité, dans ce qui suit, on abordera un système de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique à savoir la centrale à cheminée solaire.

I.2.4. Les Centrales à Cheminée Solaire CCS

Les énergies renouvelables dont l'énergie solaire constituent une alternative indéniable aux énergies classiques, périssables et polluantes. Dans plusieurs régions du monde, il y a une conscience croissante que les ressources énergétiques alternatives pourraient avoir un rôle important à jouer dans la production de l'électricité.

L'énergie solaire étant une ressource inépuisable et non polluante, pouvant contribuer aux besoins énergétiques actuels et futurs de l'homme. Cependant, il y a plusieurs méthodes pour exploiter l'énergie solaire, le choix et la bataille technologique sont de véritables enjeux sous-jacents à la question climatique et énergétique. L'appropriation d'une technologie solaire industrielle est cruciale et déterminante pour les pays du sud, qui bénéficient d'importants ensoleillements mais qui, souvent sont technologiquement dépendants.

La tour solaire à effet de cheminée est l'un des projets les plus ambitieux de la planète pour la production d'énergie alternative. C'est une usine d'énergie renouvelable qui pourrait fournir une puissance électrique importante de l'ordre de 200 MW, tout en étant sûr, propre et d'une technologie simple et fiable. La tour solaire associe trois techniques usuelles : La serre (Collecteur), la cheminée et les turbines éoliennes [12].

En 1978, le Professeur Jorg Schlaich [12] de l'université de Stuttgart, a eu l'idée de la production de l'électricité par un système hybride solaire – éolien composé de trois parties : Un collecteur, des aéro-génératrices, et une cheminée (Figure I.4). Son principal avantage est qu'elle peut fonctionner sans intermittence en utilisant le rayonnement du soleil direct et diffus. Même sous un ciel couvert, le rayonnement diffus peut être exploité par les CCS pour la production d'électricité.

Les différents composants des CCS sont les suivants : Le collecteur, la cheminée et la turbine.

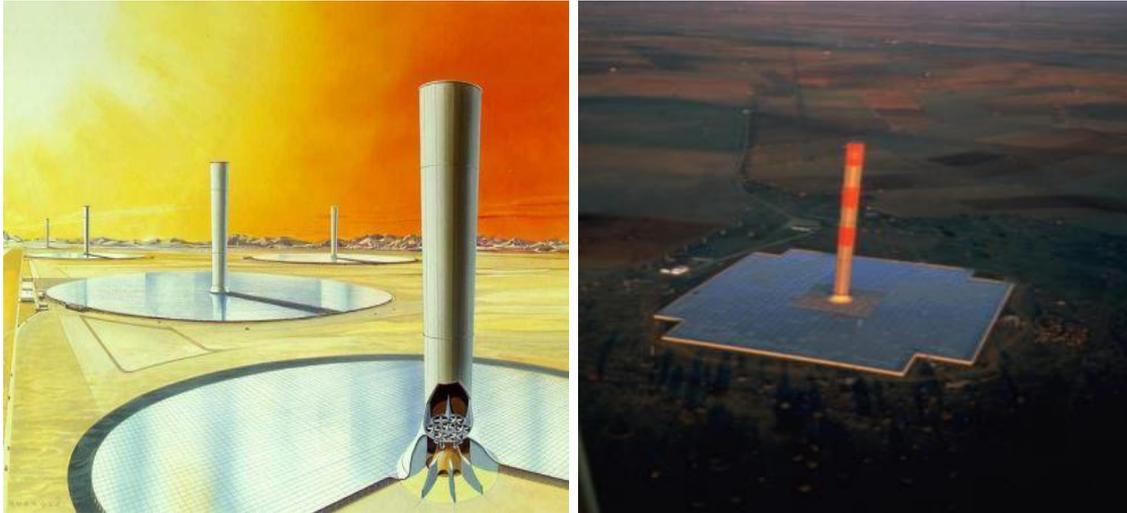


Figure I.4. Vue des principaux composants d'une cheminée solaire [12].

I.2.4.1. Le collecteur

Le collecteur est la partie employée pour produire l'air chaud par effet de serre. Sa hauteur va généralement de 2 à 6 mètres et recouvre une vaste surface de plusieurs milliers de mètres carrés. Sa toiture, en verre ou en plastique, est supportée par une structure en tiges résistantes (Figure I.5).

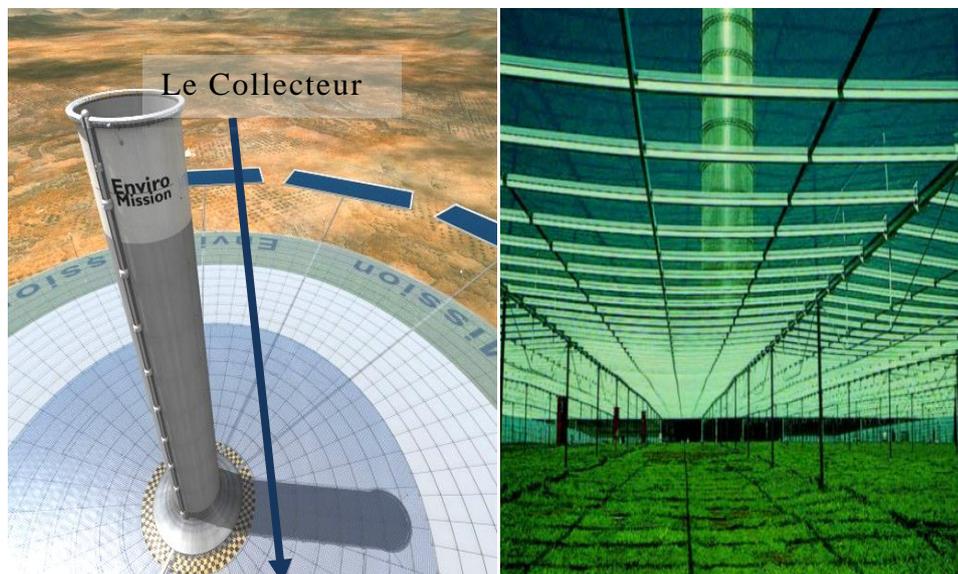


Figure I.5. Collecteur de la Tour Solaire projet d'Arizona et projet de Manzanares [12 ;16].

Il n'y a aucune limitation pour la superficie du collecteur : plus grande est la surface, plus grande est la quantité d'énergie produite par la tour solaire.

La hauteur sous la serre doit progressivement augmenter de l'extérieur vers le centre afin de diminuer les pertes par frottement. Divers matériaux peuvent constituer le couvercle de la serre comme du verre ou films plastiques.

Le plus efficace est le collecteur en verre, compte tenu de son rendement de conversion d'énergie solaire en chaleur qui pourra aller jusqu'à 70%. En outre, avec un entretien et une maintenance appropriée, sa durée de vie peut facilement atteindre 60 ans ou plus.

I.2.4.2. Les Turbines

Des turbines ou aéro-génératrices, servent à convertir le courant d'air ascendant en énergie mécanique, puis électrique (Figure I.6).



Figure I.6. Turbines de la CCS : Projet d'Arizona et prototype de Manzanares et de chine [12,16].

Les turbines éoliennes sont placées soit horizontalement dans le collecteur, soit verticalement dans la cheminée. Afin d'obtenir le maximum d'énergie à partir de l'air chauffé, les aubages des turbines doivent couvrir toute la section de la cheminée. Pour ces considérations, une grande turbine ou plusieurs petites turbines devraient être utilisées au pied de la cheminée.

I.2.4.3. La cheminée

La partie la plus importante de la tour solaire est la cheminée. Elle agit comme une machine thermique. Les pertes par frottements étant minimales, celle-ci agira comme un tube de pression (Figure I.7).



Figure I.7. Cheminée de la CCS [12].

Deux principaux types de cheminées sont possibles : celles autoportées (construites en dur : béton ou acier) et celles haubanées (structures plus légères constituées de tubes). La durée de vie des cheminées en béton est bien supérieure à celle des cheminées en membranes, une centaine d'années contre quelques années à peine pour ces dernières.

I.2.4.4. Principe de fonctionnement d'une tour solaire

Son principe de fonctionnement est basé sur le chauffage d'une couche d'air, sous une serre horizontale de grande taille autour d'une cheminée qui, par effet de tirage thermo-convectif, permettra la création d'un courant ascendant capté par la cheminée.

Des turbines placées, soit à la base de la tour, soit dans la tour elle-même, seront actionnées par le flux d'air canalisé et produiront de l'électricité. La puissance dépend de la différence de température, de la surface chauffée et de la hauteur de la cheminée (Figure I.8).

Le concept de base peut être amélioré en plaçant des accumulateurs de chaleur, des bâches à eau à titre d'exemple, pour emmagasiner de la chaleur sous la serre pendant le jour et la restituer pendant la nuit. Une autre alternative est de créer en dessous de la serre, des surfaces agricoles qui seraient de surcroît être irriguées par la condensation de l'humidité de l'air, lors des baisses de température dans la phase nocturne.

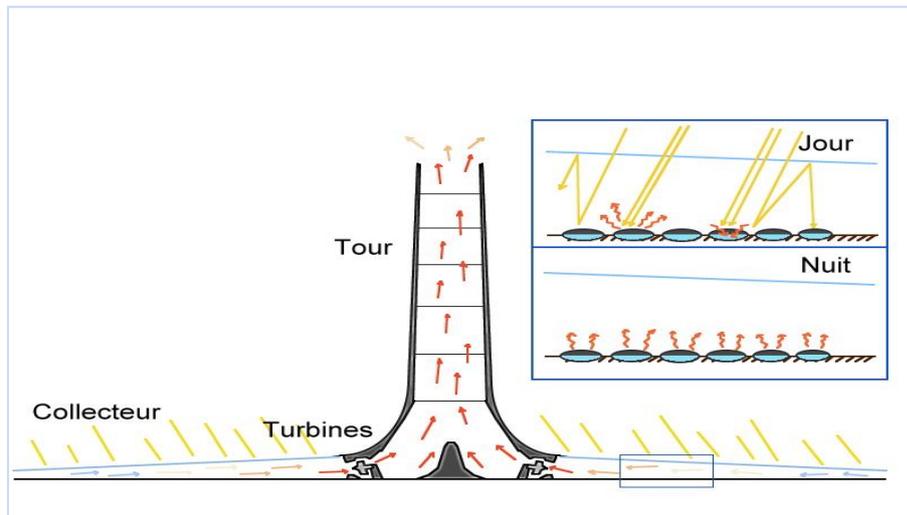


Figure I.8. Principe de fonctionnement d'une centrale solaire à effet de cheminée [12].

I.2.4.5. Projets de Centrales à Cheminées Solaire

De nombreux pays se sont engagés dans la construction de CCS, tel que la Chine, l'Espagne et les Etats unis.

❖ Le prototype chinois

Il s'agit d'un système de centrale électrique à cheminée solaire dans le Jinshawan, ville de Wuhai en Chine du Nord dans la région autonome de la Mongolie intérieure, où est installée la première usine du pays (Figure I.9). Elle combine l'énergie solaire et l'énergie éolienne pour la production d'électricité [13].

L'unité de production de 200 kW de puissance peut fournir 400.000 kWh d'électricité par an, épargnant ainsi l'équivalent des émissions de 100 tonnes de charbon et économisant 900 tonnes d'eau, par rapport à la production d'énergie au moyen d'une centrale thermique.



Figure I.9. Prototype de la centrale solaire à effet de cheminée chinoise [56].

❖ **Prototype de Manzanares**

Le premier prototype expérimental d'une centrale à cheminée solaire a été conçu par le bureau d'études Schlaich Bergemann et Partner de Stuttgart [14] et [15]. Le distributeur d'électricité espagnol « Union Electrica Fenosa » a proposé le site de Manzanares (ville espagnole située à 150 kilomètres de Madrid) et le ministère de la recherche allemand (BMFT) a financé ce projet. La construction du prototype a été terminée en 1982 et il a fonctionné pendant plus de 7 ans. La Figure I.10 donne un aperçu du prototype expérimental de Manzanares.



Figure I.10. Prototype de Manzanares en Espagne [14].

❖ La centrale à cheminée solaire d'Arizona

La firme australienne Enviro-Mission, spécialisée dans le développement de tours solaires productrices d'énergie, développe actuellement un projet technologique de grande envergure dans le désert de l'Arizona [16] (Figure I.11).

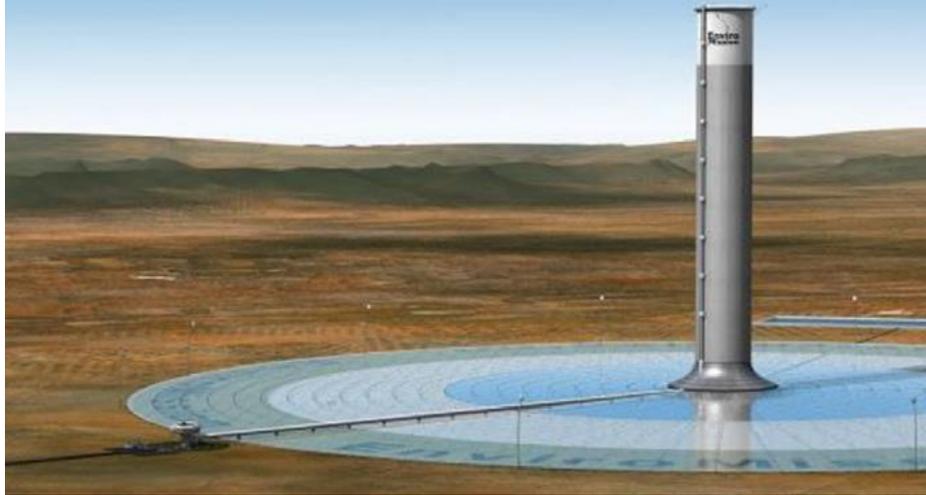


Figure I.11. Impression d'artiste de la centrale d'Enviro- Mission en Arizona [16].

Faithful & Gould, société nord-américaine de conseil en construction s'est associée au projet pour ériger cette centrale solaire de 200 MW. Avec la génération de cette puissance électrique, 150 000 foyers américains pourront être alimentés.

Cette nouvelle technologie fournira de l'énergie, que l'on peut considérer comme propre, pendant 80 ans et ce avec très peu d'entretien. La tour solaire d'Enviro-Mission est constituée de 3 éléments : La canopée, la tour et les turbines. La canopée est une énorme serre en verre où l'air emprisonné sous la verrière est chauffé par le soleil. La tour, placée au centre de la serre constitue le moteur thermique de cette technologie. Elle transforme la chaleur en énergie mécanique. L'air chaud, plus léger que l'air froid, remonte le long de la tour pour s'échapper et se refroidit en prenant de l'altitude, créant ainsi un courant d'air ascendant continu.

Plus la tour est haute, plus la vitesse du courant d'air est élevée et plus il est possible de l'exploiter. Pendant la journée, l'air sous la serre est tellement réchauffé (80 à 90°C) que le fonctionnement continu est assuré même une partie de la nuit. Cette structure gigantesque de 800 mètres de haut et 130 mètres de diamètre (au sommet), sera presque aussi haute que le plus grand building de la planète (Burj-Khalifa de

Dubaï). En cours d'ingénierie et d'acquisition des terrains, Enviro- Mission estime que cette centrale solaire générera 200 MW avec un bon rendement énergétique [16].

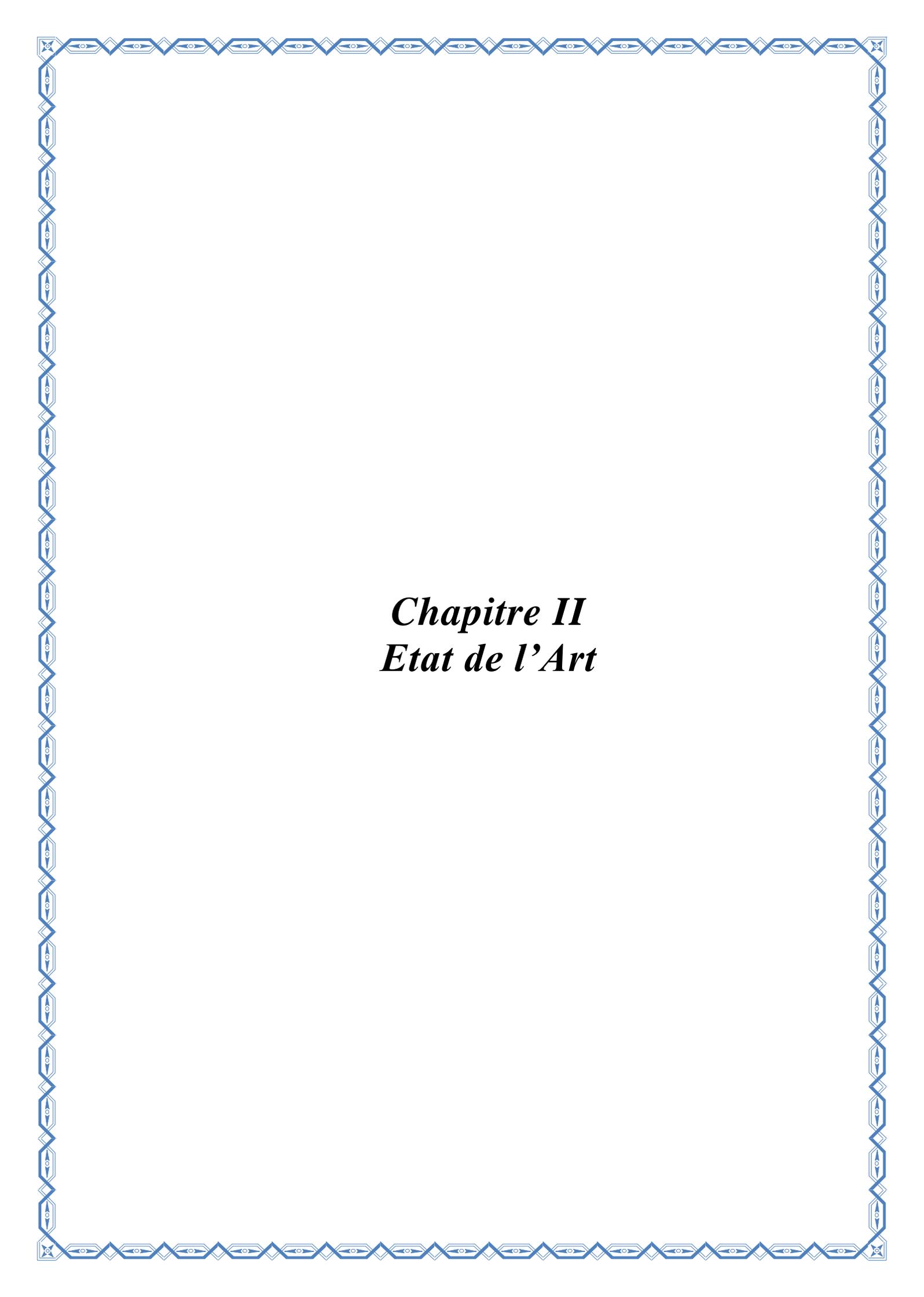
❖ **Avantages et inconvénients**

➤ **Avantage des CCS**

- Les Cheminées Solaires sont particulièrement adaptées à la production d'électricité dans les déserts et les terres arides sans valeur, mais riches en soleil.
- Elles produisent de l'électricité 24 heures par jour à partir d'énergie solaire uniquement et fonctionnent sans intermittence (jour et nuit).
- Aucun carburant n'est nécessaire.
- Elles ne nécessitent pas d'eau de refroidissement et sont adaptées à des régions où règne une sécheresse extrême.
- La Tour Solaire est particulièrement fiable et nécessite peu de maintenance comparativement aux autres usines de production d'électricité. Leur mécanique est simple et nécessite peu d'entretien.
- Les matériaux nécessaires à la construction d'une Cheminée Solaire : béton, verre, plastique, acier..., sont disponibles et en quantités suffisantes.
- Leur construction ne provoque pas de dommages écologiques et peut employer de la main d'œuvre locale.
- Leur fonctionnement ne consomme pas de ressources.
- Source d'énergie inépuisable et gratuite.
- Sans émissions polluantes.
- Impact visuel positif (certains y voient un symbole d'espoir, de vision à long terme).

➤ **Inconvénients**

- La structure elle-même est massive et requiert beaucoup d'expertise en ingénierie et de matériaux pour sa construction.
- L'investissement initial est important.
- Impact visuel négatif (certains y voient une dégradation du paysage).



Chapitre II
Etat de l'Art

Chapitre II : Etat de l'Art

II.1 Introduction

Le concept de CCS a fait l'objet de bon nombre d'articles et de publications scientifiques. Il a été développé et validé par des prototypes expérimentaux, ainsi que des calculs analytiques et de simulations numériques. De nombreux travaux de recherches sur les CCS sont publiés chaque année, prouvant ainsi l'importance et l'intérêt que suscite cette technologie. Ces travaux peuvent être, généralement, regroupés en trois grands axes principaux :

- Modélisations théoriques dont les objectifs sont :
 - Simulation des performances en fonction des paramètres pertinents ;
 - Design et estimation de la puissance des CCS ;
 - Etude de cas.
- Etudes expérimentales par la réalisation de prototype à échelle réduite, permettant d'estimer expérimentalement les performances des CCS ainsi que la validation des modèles théoriques proposés.
- Des études technico-économiques destinés à prouver la rentabilité économique et le retour sur l'investissement dans le cas des CCS commerciales.

Cependant, vu leurs caractères complémentaires et supplétives, il est difficile de séparer toutes ces études distinctivement suivant leurs axes thématiques. Toutefois nous tenterons dans ce qui suit, d'établir un état de l'art détaillé en ce qui concerne les études expérimentales, les principales modélisations théoriques ainsi que les études économiques.

I.4 Historique

Historiquement parlant, Leonardo da Vinci, en 1826, a schématisé le concept de la transformation de l'énergie des gaz ascendant d'une cheminée en force mécanique

motrice. En 1896, Alfred Rosling Bennett a publié, le premier brevet décrivant un moulin utilisant la force d'un courant d'air ascendant (Figure II.1). Ce prototype est actuellement exposé dans le musée des sciences à Londres [17].

Le concept, proprement dit des CCS, a été initialement proposé par un colonel espagnol Isidoro Cabanyes, dans la revue « La Energía eléctrica », en 1903 (Figure II.2) [18].

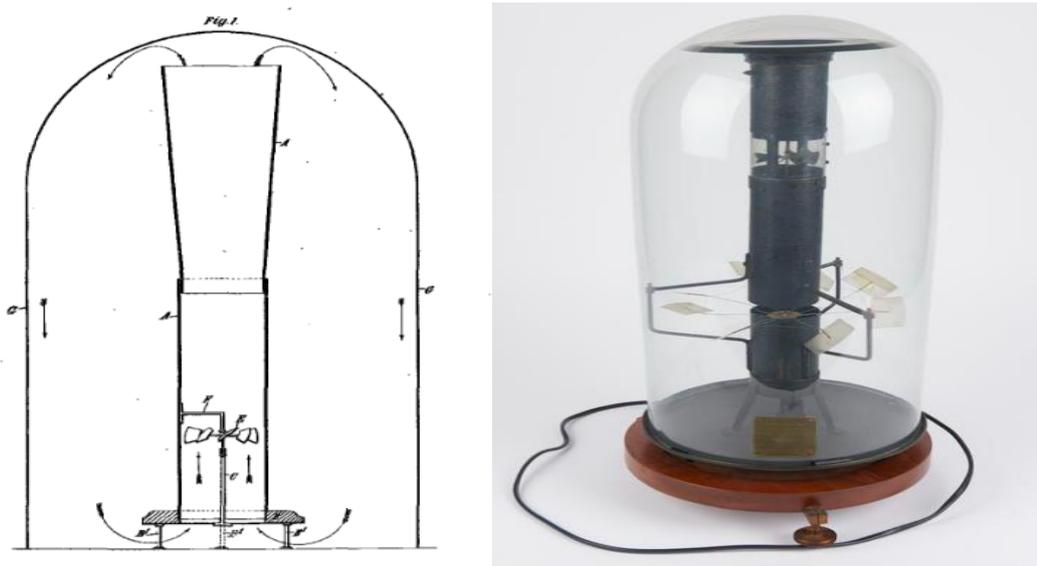


Figure II.1. Moulin à convection Bennett. Breveté par A. R. Bennett, 1897, Prototype, dans un coffret en verre, par Albert H. Holmes & Son, Londres, 1919-1928 [17].

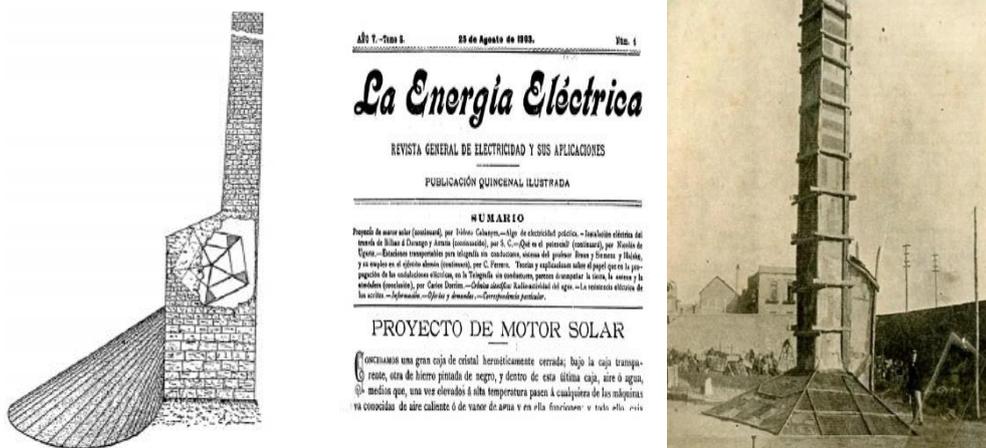


Figure II.2. CCS Proposée par Isidoro Cabanyes en 1903 [18].

En 1926 l'ingénieur Bernard Dubos a proposé à l'académie française des sciences, la construction d'une centrale aéro électrique, dans le nord de l'Afrique, dont la cheminée solaire suivrait la pente d'une très haute montagne (Figure II.3) [18].

Dans une publication parue en 1931, Hanns Günther, un chercheur allemand, a présenté un prototype expérimental expliquant le concept de la CCS, basé sur l'effet cheminée et l'effet de serre (Figure II.4) [18].

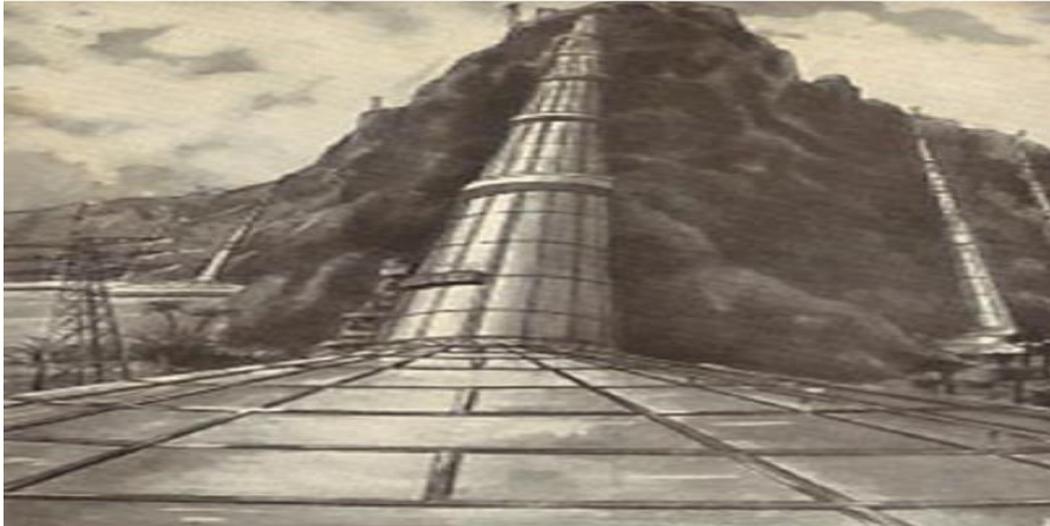


Figure II.3. CCS proposé par Bernard Dubos en 1926
(Cheminée construite sur une montagne en nord Afrique) [18].

Selon Günther (1931), la plaque et la lampe à alcool représentent le Sahara et la chaleur solaire, respectivement. La petite roue placée au-dessus représente l'éolienne (Figure. II.4.). Si la flamme chauffe la plaque, l'air chaud circule concentriquement à travers la plaque atteignant le tube. En conséquence, le flux ascendant entraîne la roue [18].

Après plusieurs décennies, le 1er prototype expérimental à échelle industrielle a vu enfin le jour, en Espagne (Manzanares, Ciudad Real, 150 Km au sud de Madrid). Il fut exploité durant les années 80 par J. Schlaich & al. [18,19]. La construction du prototype pilote de la CCS fut financé par le ministère de la recherche et de la technologie de la république fédérale d'Allemagne.

Le travail a été supervisé par le département de gestion de projet de recherche énergétique de Jülich GmbH (l'Établissement de recherche sur l'énergie nucléaire de

Jülich). Ce projet a constitué un pas exceptionnel dans le développement de cette technologie et représente un des succès les plus remarquables, prouvant la faisabilité et la fiabilité des systèmes de CCS [12].

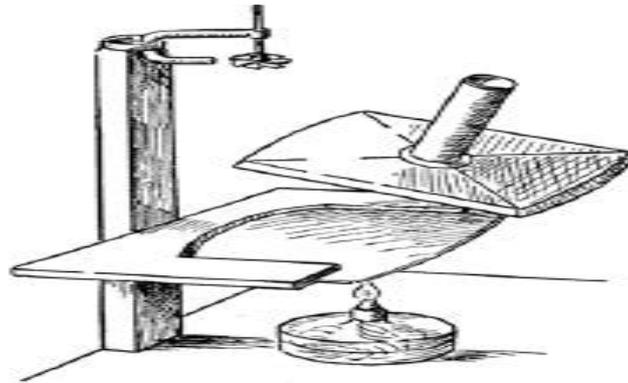


Figure II.4. Prototype illustratif présenté par Günther, 1931[18].

II.3 Etudes expérimentales sur les CCS

Divers prototypes expérimentaux de centrales à cheminée solaire ont été conçus, réalisés et testés. Le prototype de Manzanares est doté d'une cheminée métallique haubanée de 194,6 m de haut, de 0,00125 m d'épaisseur, de 10m de diamètre et d'un collecteur de rayon de 122 m (46000 m² de surface) couvert d'une toiture en verre et en polymère. Il constitue le premier prototype de centrale à cheminée solaire de puissance 50 kW (Figure II.5). Après la construction de ce prototype pilote, d'autres configurations expérimentales ont été réalisées et testées dont le prototype pilote chinois de Wuhai (2013) (Figure II.6) - en vue de mesurer les paramètres importants permettant d'étudier expérimentalement les CCS.

II.3.1. Centrale pilote de Manzanares

En 1981, l'ancien département de recherche du gouvernement d'Allemagne de l'ouest, en coopération avec la compagnie d'électricité espagnole, a fourni 15 millions de deutsche mark pour la construction du premier prototype de centrale électrique à cheminée solaire au monde, à Manzanares – Espagne.

La centrale de Manzanares a été exploitée pendant huit ans : de 1982 à 1989. Le tableau II.1, résume les principaux paramètres structurels de la centrale.

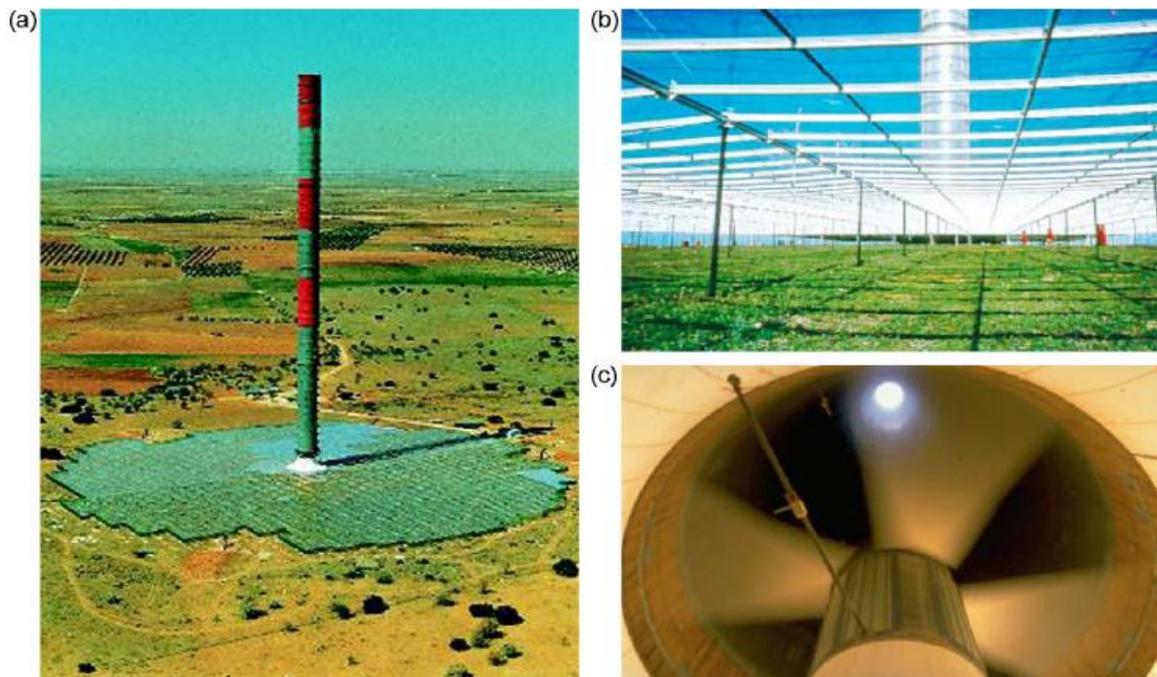


Figure II.5. Photo de la CCS de Manzanar [12].

a) vue globale de la centrale, b) Collecteur, c) Turbine



Figure II.6. Photo de la CCS de Wuhai (Qin, 2013) [18].

Les principales données opérationnelles de la CCS de Manzanar, à savoir, l'irradiation, la vitesse du courant d'air ascendant et la puissance développée, ont été relevées pour une journée typique (8 Juin 1987) voir Figure. II.7 [15].

Tableau II.1. Principaux paramètres de la CCS de Manzanares [12].

| Item | Value |
|---|------------------------------------|
| SC height (m) | 194,6 |
| SC radius (m) | 5,08 |
| Mean collector radius (m) | 122 |
| Mean roof height (m) | 1,85 |
| Number of turbine blades | 4 |
| Turbine blade profile | FX W-151-A |
| Blade tip speed to air transport velocity ratio (m) | 10:01 |
| Operation modes | stand-alone or grid connected mode |
| Typical collector air temperature rise (k) | $\Delta T = 20$ |
| Nominal power output (KW) | 50 |
| Collector covered with plastic membrane (m ²) | 40,000 |
| Collector covered with glass (m ²) | 6000 |

La Figure II.7 montre que le profil de puissance produit est en étroite corrélation avec le profil d'insolation pendant la journée, pour ce prototype de centrale sans système de stockage d'énergie supplémentaire. De plus, au cours de la nuit il y'a toujours un courant ascendant en raison de la capacité de stockage thermique naturel du sol, ce qui permet de produire de l'électricité pendant les premières heures de la nuit [15].

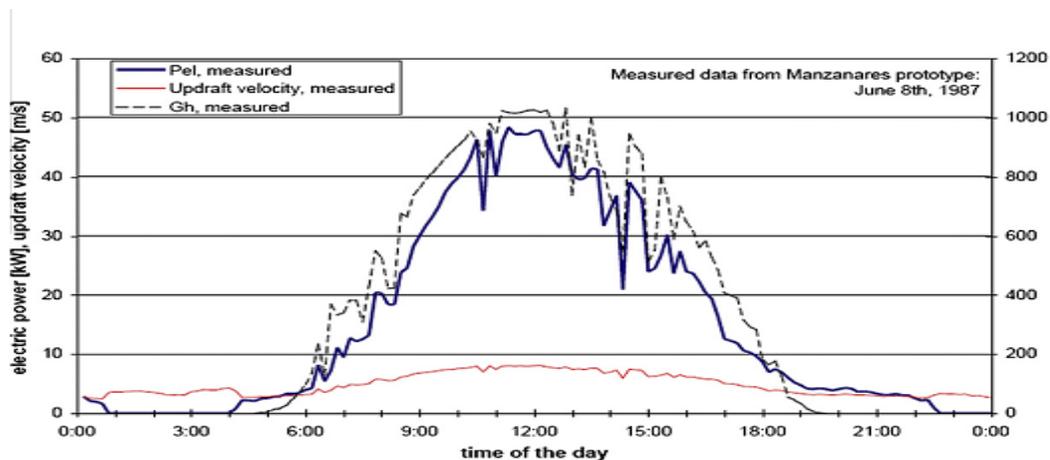


Figure II.7. Relevé des vitesses d'air ascendant et la puissance développée de la CCS de Manzanares pour une journée typique (08 Juin 1987) [15].

Notons que la CCS de Manzanares a permis aux chercheurs de valider bon nombre de modèles mathématiques, grâce aux résultats expérimentaux reportés.

II.3.2. Diverses structures expérimentales à l'échelle du laboratoire

Depuis lors, de nombreux chercheurs de différents pays ont construit des systèmes expérimentaux de centrales à cheminée solaire de différentes tailles et types.

En 1983, Krisst [20] a construit une petite installation expérimentale à West Hartford, Connecticut, aux USA, de 10W de puissance. Le diamètre de la base du collecteur et la hauteur de la cheminée étaient de 6 m et 10 m respectivement.

En 1985, un micro-modèle, d'une puissance moyenne de 0.14 W, doté d'une cheminée de 2 m de haut et de 7 cm de diamètre et un collecteur de 9 m² a été réalisé par Kulunk en Turquie Izmit [21]. Kulunk a rapporté que la puissance à l'arbre de la turbine était de 0,45 W, le rendement de production d'électricité était de 31%, la différence de température entre l'admission et la sortie de la cheminée était de 4 K et la différence de pression était de 200 Pa.

II.3.2.1. Prototype de Sherif & al

Dans les années 1990, le groupe de recherche de Sherif & al.[22] a mis en place différentes configurations de centrales à cheminée solaire de petite échelle à l'université de Gainesville en Floride-USA (Voir Figure II.8).

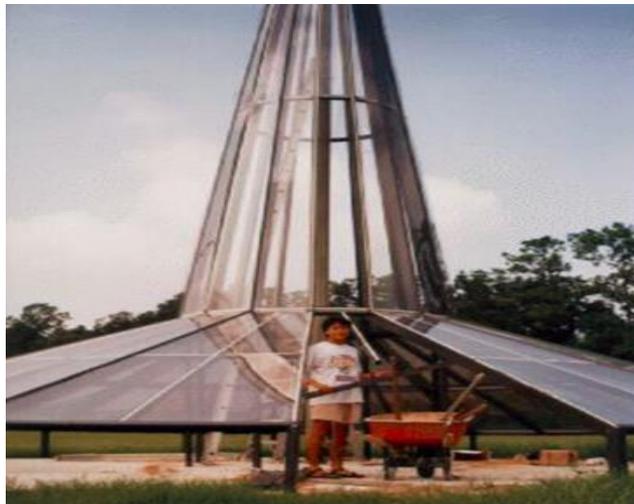


Figure II.8. Centrale à cheminée solaire conçu par le groupe de recherche du professeur Sherif [22].

Le collecteur de 18.30 m de diamètre avait une toiture en polycarbonate (Lexan). Le dispositif était doté d'une cheminée de 7,92 m de haut, dont le diamètre diminuait graduellement de 2,44 m à l'entrée pour atteindre 0,61 m au sommet. Un absorbeur en plaque d'aluminium a été prévu pour couvrir la base du collecteur (Configuration de type I).

Une série d'expériences a été menée par la suite sur cette configuration dite de « type I », visant à vérifier le fonctionnement du mécanisme et à étudier les performances énergétiques. Une extension du collecteur a été réalisée pour former le collecteur de configuration « Type II ». Du polyane (Visqueen) noir clair avec une transparence d'environ 60% a été utilisé respectivement comme absorbeur et toiture pour la partie étendue. Un absorbeur en toile (canevas) a été introduit entre le toit et l'absorbeur en plaque d'aluminium, afin d'améliorer le stockage thermique du collecteur et former le collecteur de configuration de type « III ».

La hausse de la température de l'air mesurée et la distribution de vitesse à différents endroits du collecteur sont illustrées pour les trois configurations du collecteur pour un ensoleillement de 650 W/m² [22].

L'extension de la zone du collecteur a contribué à élever la température de l'air, et le milieu de stockage thermique a non seulement augmenté la température moyenne de l'air, mais aussi son débit massique. Ces deux modifications ont augmenté aussi la puissance de sortie du système [23].

En menant des expériences détaillées sur le système, les chercheurs ont vérifié les effets du rayonnement solaire, de la hauteur de la cheminée, du rayon de collecteur et du stockage thermique sur la température du courant d'air, sa vitesse et sur la puissance développée par le système. Les chercheurs ont estimé le coût d'investissement pour différentes échelles de CCS et les résultats étaient encourageants. Ce qui indique que le système à cheminée solaire à grande échelle est réalisable.

II.3.2.2. Prototype de Akbarzadeh (Australie)

Un étang solaire de 3000 m², constituant une partie des installations de la compagnie Pyramide Salt, a été construit à Pyramid Hill dans le nord de Victoria-Australie (Figure II.9) [24].

L'étang mis en service en Juin 2001, a atteint une température de 55°C en Février 2002, avec une capacité de production d'au moins 50 kW d'énergie thermique, sur une base continue. Par la suite, le concept de la combinaison d'un étang solaire à gradient

de salinité avec une cheminée solaire pour produire de l'électricité dans les zones affectées par le sel a été examiné [24]. Suite à l'introduction de ce concept, le design préliminaire d'une centrale prototype, intégrant un étang solaire de 6 hectares de superficie et de 3 m de profondeur, avec une cheminée de 200 m de haut et de 10 m de diamètre a été proposé.

La performance, la puissance développée et le rendement de la centrale proposée, ont été analysés pour le cas d'exploitation dans le nord Victoria [24].



Figure II.9. Etang solaire [24].

L'image de gauche de la figure II.9 montre un petit bassin solaire expérimental de 4,2 m de diamètre et 1,85 m de profondeur qui a été utilisé en combinaison avec une cheminée de 8 m de haut et de 0,35 m de diamètre pour démontrer la génération d'un flux d'air ascendant à travers une cheminée en utilisant la chaleur extraite de l'étang. L'aérogénérateur à la base de la cheminée flexible est représenté en arrière-plan.

L'image de droite montre l'échangeur de chaleur eau-air installé à la base de la tour.

II.3.2.3. Prototype de Zhou & al. Wuhan (Chine)

Afin d'étudier la variation du champ de température au cours du jour, une installation pilote de cheminée solaire (Figure II.10) constituée d'un collecteur de 10 m de diamètre et une cheminée de 8m de hauteur, formée de pipe en PVC de 0.70 m de diamètre a été réalisée à Wuhan, en Chine, par Zhou et al. [25], en Décembre 2002.



Figure II.10. Vue globale de la CCS et Aéro-génératrice placée à la base de la cheminée [25].

Zhou & al. [25] ont montré que la différence de températures entre la sortie du collecteur et la température ambiante pouvait atteindre en général $24,1\text{ }^{\circ}\text{C}$

Cette structure a été remodelée afin d'étudier l'impact des dimensions du collecteur et de la cheminée sur les performances du système [26]. Pour cette raison le diamètre du collecteur a été varié de 2 à 10m. La hauteur de la cheminée a été variée de 1 à 8m. Une aéro turbine a été conçue pour tester la puissance développée par le prototype en combinant les dimensions du collecteur et de la cheminée [26].

II.3.2.4. Prototype de Ketlogetswe & al. (Botswana)

Un système pilote de cheminée solaire a été construit par Ketlogetswe et al. [27] au Botswana, en 2005. Le système était doté d'une cheminée en polyester renforcé de diamètre intérieur de 2 m et d'une hauteur de 22 m. La surface de base du collecteur est d'environ 160 m^2 . Les auteurs ont observé que la température maximale de pointe a été enregistrée après la période d'irradiation de pointe, ceci est dû au fait que le sol absorbe une partie de l'énergie solaire entrante, celle-ci est restituée plus tard (Figure II.11).

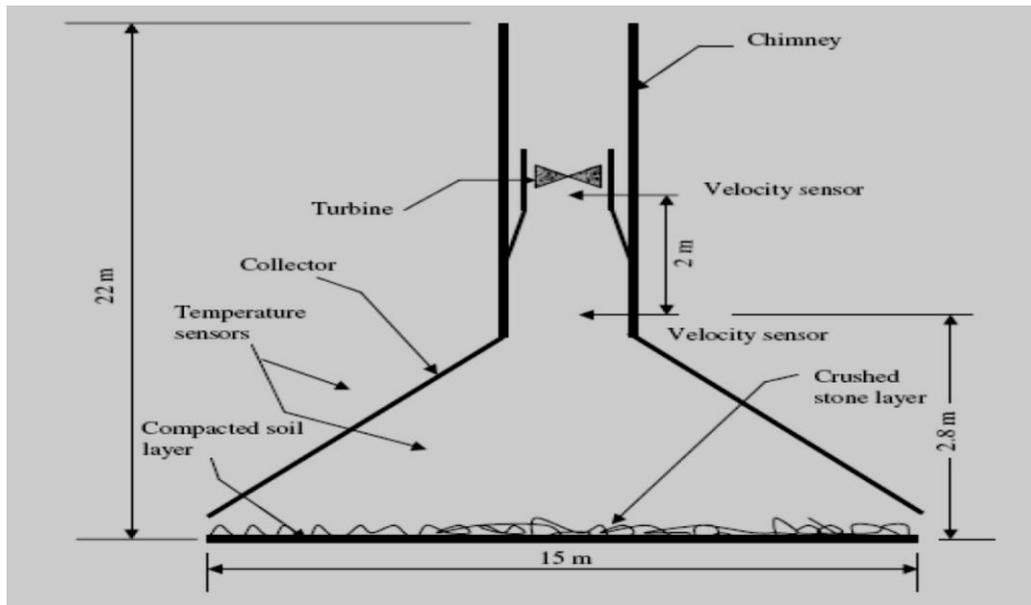


Figure II.11. Schéma de l'arrangement de la CCS étudiée [27].

II.3.2.5. Prototype de Ferreria, Maia & al. (Brésil)

En 2007, Ferreira et al. [28] ont construit un prototype pilote pour le séchage des aliments, à Belo Horizonte, au Brésil. La cheminée solaire de 12,3 m de haut et de 1.0 m de diamètre était construite par des feuilles de bois et recouverte de fibre de verre. Le couvercle du capteur solaire, de 25 m de diamètre, était construit à partir d'un film plastique thermo-diffuseur et soutenu par une structure métallique à une hauteur de 0,5 m. L'absorbeur en béton, était peint en noir opaque (Figure II.12).

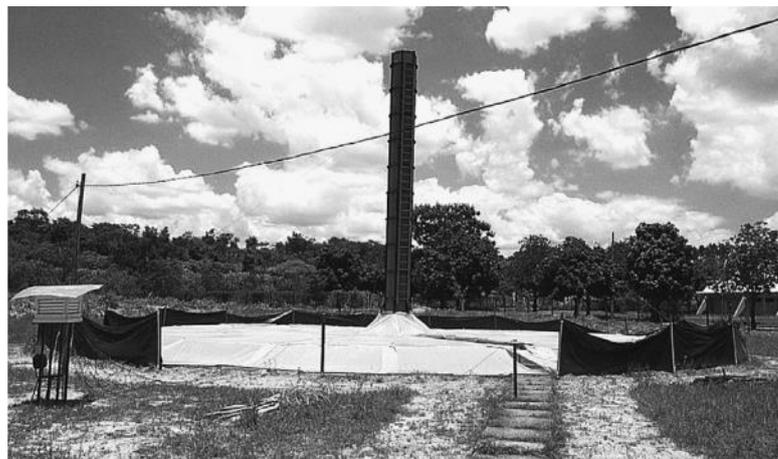


Figure II.12. Prototype de la CCS de Ferreira & al. [28].

Maia & al. [29, 30, 31] ont présenté une série d'analyses théoriques et des expériences sur ce système de séchage, ainsi qu'une analyse exergetique de ce prototype.

Les résultats ont montré que la hauteur et le diamètre de la cheminée sont les grandeurs physiques les plus importantes pour la conception de ce genre de modèle.

II.3.2.6. Prototype de Koyun; Turquie

En 2007, une station pilote de CCS a également été construite sur le campus de l'Université de Suleyman Demirel - RACRER (Research and Application Center for Renewable Energy Resources), à Isparta, Turquie (Figure II.13).



Figure II.13. Prototype de la CCS de Koyun et al. [32].
Campus de l'Université de Suleyman Demirel, Turquie

La structure était dotée d'une cheminée solaire de 15 m de haut et 1,19 m de diamètre et d'un collecteur de 16 m de diamètre avec une toiture en verre. La superficie du collecteur était de 200 m². Koyun & al. [32] ont mené des études expérimentales et théoriques pour tester le système.

II.3.2.7. Prototype de Bugutekin, Turquie

Bugutekin [33] a mis au point un système de cheminée solaire près du campus de l'Université Adiyaman Turquie et a analysé l'effet de la température de l'environnement, de la hauteur de la cheminée, du diamètre du collecteur et du rayonnement solaire sur les performances de ce système (Figure II.14).



Figure II.14. Vue générale du modèle de la CCS et de sa périphérie [33].

L'étude a démontré que le taux d'absorption du sol sous le collecteur au rayonnement solaire est un paramètre affectant les performances et l'efficacité des CCS. Il a été montré aussi qu'en minimisant la hauteur d'entrée d'air du collecteur, les performances du système seront meilleures.

II.3.2.8. Prototype de CCS de Wuhai (Chine)

Située dans la région désertique de Jinshawan, (région autonome de la Mongolie intérieure en Chine du Nord), la centrale de Wuhai a été mise en fonction (raccordée au réseau) en Octobre 2010 (Figure II.15).



Figure II.15. Le prototype de CCS de Wei. (Entrée d'air et système) et vue de l'aéro-génératrice autour de la cheminée [34].

Dotée d'une cheminée de 53 m de haut et 10 m de diamètre, d'un collecteur couvrant une superficie de 6170 m², la centrale permet de produire environ 3 kW de puissance sous des vents ambiants relativement faibles (Vitesses du vent inférieures à 2 m/s) [34].

Différente de la CCS de Manzanares, elle est dotée d'ouvertures au niveau de sa périphérie permettant le control du débit massique d'air ambiant entrant dans le collecteur.

Les diverses mesures ont montré que les vents ambiants ont une influence significative sur le débit massique de l'air à l'intérieur de cette centrale, bien que son collecteur soit plus petit, de 13.4%, par rapport à celui de Manzanares [34].

II.3.2.9. Prototype de Kasaeian & al. (Iran)

Afin de mener des études expérimentales et théoriques sur les CCS, Kasaeian & al. [35] ont conçu un prototype de CCS à l'Université de Zanzan, Iran.

En raison de sa résistance à la chaleur et à son faible prix, un tuyau en polyéthylène (PE) de 25 cm de diamètre a été utilisé pour la réalisation de la cheminée de 12m de haut (Figure II.16). Le collecteur de 10 m de diamètre, avait une toiture en feuilles de polycarbonate (PC).

Le fond du collecteur a été totalement couvert par un film de polyéthylène noir.



Figure II.16. Prototype de CCS de Kasaeian [35].

Le phénomène d'inversion de température a été constaté. Ce phénomène disparaît avec l'élévation de la température du jour. Kasaeian & al. [35] ont reporté aussi que la diminution de la taille d'entrée du collecteur avait un effet positif sur le rendement énergétique de la cheminée solaire

II.3.2.10. Prototype de Kerman project (Iran) 2012

Afin d'évaluer la faisabilité de la CCS, une centrale pilote a été construite dans la région désertique de Kerman, Iran, vu l'intensité d'irradiation solaire moyenne dans cette région [36, 37]. La cheminée de 60 m de haut avait un diamètre de 3 m (Figure II.17). Son collecteur, vitré, couvre une superficie de 40m x 40 m. L'unité était capable de produire près de 400 Watts de puissance électrique pour une radiation solaire de 800 W / m².



Figure II.17. Prototype pilote de la CCS de Kerman, Iran [37].

Najmi et al. [37] ont étudié les paramètres effectifs d'optimisation de la performance de la cheminée solaire et ont effectué une analyse économique. Il a été suggéré que l'utilisation de l'asphalte ou le caoutchouc au fond du collecteur, des verres à double vitrage pour la toiture du collecteur, une hauteur de collecteur réduite à 1,3 m, et l'installation de forme conique à l'entrée de la cheminée pourrait augmenter la puissance de ce type de système.

Afin d'améliorer le fonctionnement de ce prototype, E. Gholamalizadeh & S.H. Mansouri [38] ont présenté l'influence du diamètre et de la hauteur de la cheminée ainsi que de la dimension du collecteur sur la puissance développée [38].

Kasaeian & al [39] ont réalisé un nouveau prototype expérimental à l'université de Tehran, pour mener des études sur l'impact des paramètres géométriques sur les performances des CCS (Figure II.18).



Figure II.18. Modèle de CCS de l'université de Téhéran [39].

Les données de sortie pour différentes hauteurs d'entrée du collecteur ont été obtenues [39] et le rapport montre que la réduction de la taille de l'entrée a un effet positif sur la performance de la cheminée solaire. L'inversion de l'air n'a pas été observée et il a été conclu que ce phénomène était directement associé avec la géométrie de la CCS [39]. La hauteur de la cheminée est 2 m, son diamètre est 20 cm et le rayon du collecteur est 3 m

Dans une autre étude Kasaeian et al. [40] ont reporté que l'influence du diamètre de la cheminée était plus importante que celle de la hauteur.

En 2014, Shahreza et Imani [41] ont étudié expérimentalement un nouveau modèle à petite échelle d'une cheminée solaire dans laquelle deux miroirs ont été installés autour de la centrale pour concentrer le rayonnement solaire (Figure II.19). Les auteurs ont constaté que l'utilisation de miroirs augmente la vitesse d'air dans la cheminée.

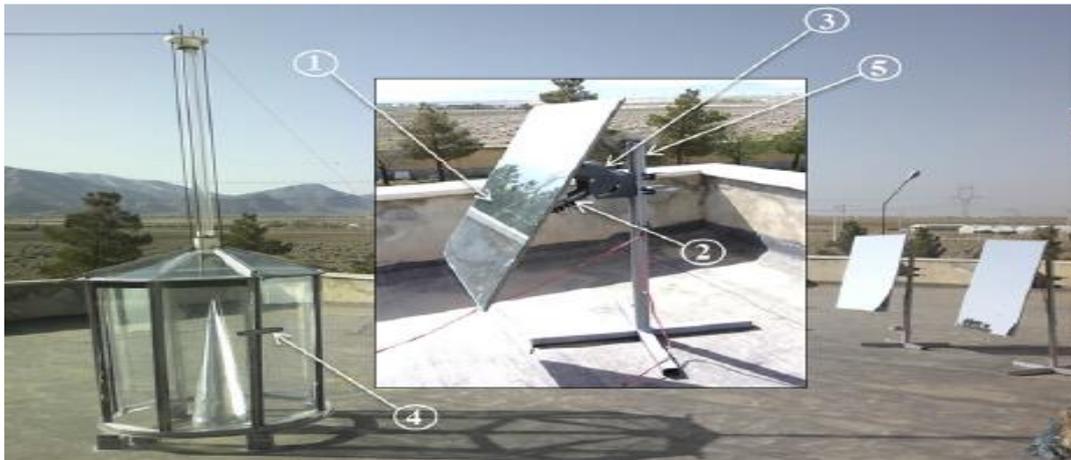


Figure II.19. CCS avec miroirs d'intensification.

(1) Miroirs plats, (2) diapositive de maintien, (3) moteur DC, (4) Capteurs internes et externes et (5) Pied.

II.3.2.11. Prototype de l'Université de Damas (Syrie)

En 2012, une centrale à cheminée solaire pilote, à collecteur incliné, a été construite au sud du campus de l'Université de Damas, en Syrie par Kalash& al. [42, 43].

Le capteur solaire de 12,5 m², incliné de 35° vers le sud-est de forme triangulaire avait un couvercle en verre de 4 mm d'épaisseur, fixé grâce à une armature métallique [42]. La cheminée de 0,31 m de diamètre et 9 m de hauteur, était formé de tuyau en PVC (Figure II.20).

Dix-huit instruments ont été installés à l'intérieur de la serre solaire pour mesurer les températures du verre, de l'air et du collecteur à différents points de l'installation.

Des mesures ont été enregistrées toutes les 10 minutes pour un total de 40 jours consécutifs, pour examiner les changements de température dans le collecteur incliné.

Bien que les mesures ont été prises au cours de la saison d'hiver, la température de l'air a augmenté pour atteindre un gain en température ΔT maximale de 19° C, générant une vitesse maximale de courant d'air ascendant de 2,9 m/s [42].

Cette expérience a montré que le changement du rayonnement solaire et de la température ambiante a un impact direct sur la variation de la température de l'air entre l'entrée et la sortie du collecteur [42]. Les variations de température durant la journée ont montré que la température de la couche d'absorption (sol) est plus élevée que la température de l'air à l'intérieur du collecteur ainsi que la température du couvercle de verre [42].



Figure II.20. Prototype de l'université de Damas, Syrie : (a) Photo pendant la construction du prototype ; (b) La CCS prototype pendant la collecte de données [42].

Kalash et al. [43] ont reporté que, d'après les résultats enregistrés, la différence entre la température ambiante et la température d'entrée de la cheminée était pratiquement la même en hiver qu'en été, d'où l'avantage d'avoir un capteur solaire incliné.

II.3.2.12. Prototype de centrale pilote à courant ascendant en Jordanie.

Il s'agit de la première centrale électrique pilote à courant ascendant, construite en Jordanie pour évaluer cette technologie dans la région de Mutah (Figure II.21.).

Une attention particulière a été accordée aux mesures de la vitesse de l'air, de la température, du rayonnement solaire et de la tension électrique.

La centrale avait une cheminée de 4 m de haut et un rayon de $R_c = 0,29$ (m), un collecteur solaire en plastique $A_{coll} = 36$ (m²), La hauteur du toit du collecteur est de 1 m. Le diamètre de l'aéro-turbine est $D_{fan} = 0,5$ m ; il est lié à un petit générateur de 6 V [44].



Figure. II.21. Premier prototype réalisé en Jordanie [44].

II.3.2.13. Dispositif expérimental de (CRTE_n), Borj Cedria, Tunisie (2016).

Jemli & al. [45] ont mené des études sur un dispositif expérimental d'une CCS (Un collecteur de 8 m de diamètre et une cheminée de 2 m de hauteur.) construite et testée au Centre de Recherche et de Technologies de l'Energie (CRTE_n), Borj Cedria, Tunisie (Figure II.22).



Figure II.22. Prototype réalisé en Tunisie [45].

Le prototype est le premier en Tunisie en termes d'implémentation ou d'étude de l'effet de cheminée des tours solaires. Au cours de cette étude, l'influence des conditions climatiques du site de Borj Cédria a été étudiée. La distribution et l'évolution de la température à différentes positions du prototype ainsi que l'énergie électrique produite ont été déterminées.

L'énergie électrique obtenue est de l'ordre de $0,3 \text{ W} / \text{m}^2$ en été et de $0,1 \text{ W} / \text{m}^2$ en hiver. Les auteurs ont conclu que la production d'électricité est proportionnelle à la surface ensoleillée et à la hauteur de la cheminée et est influencée par la température ambiante.

Suite à une investigation expérimentale, Ayadi et al. [46] ont conclu qu'une diminution de la hauteur de la toiture du collecteur augmenterait la puissance produite par le système.

II.3.2.14. Nouveau concept, Turquie 2017

Un nouveau prototype de tour solaire à courant ascendant consistant en un collecteur solaire perforé est étudié (Figure II.23). Son principe de fonctionnement et ses performances thermiques expérimentales sont présentées pour la première fois en 2017 Dogan et al. [47].

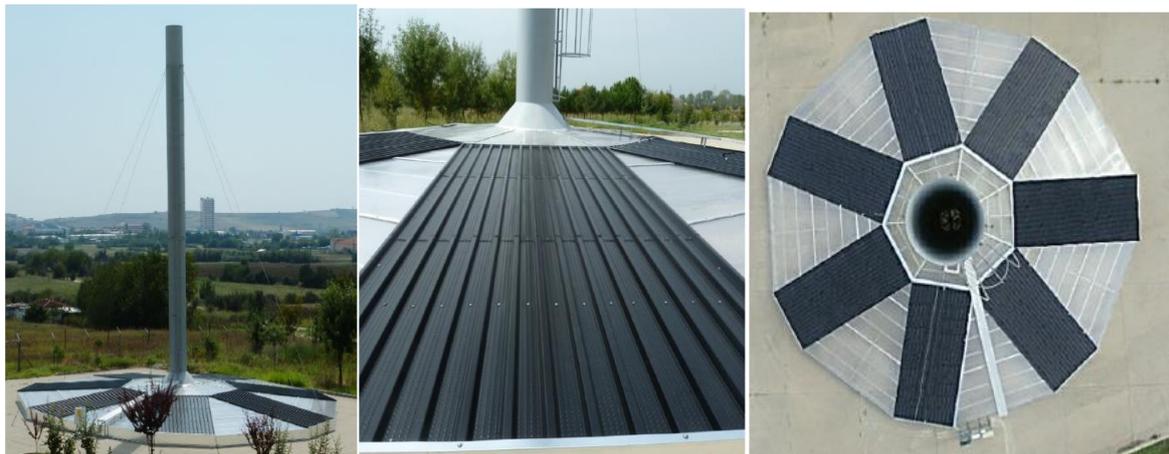


Figure. II.23. CCS à collecteur transpercé
Unité expérimentale à Trakya, Université, Edirne, Turquie [47].

Les résultats ont montré que l'efficacité du collecteur solaire perforé varie de 60% à 80%. L'augmentation de la température de l'air dans le collecteur est entre 16-et 18°C

pour un jour ensoleillé typique. Son efficacité est trois fois supérieure par rapport aux collecteurs à vitre classiques. Avec une efficacité thermique accrue, les grandes surfaces de capteur solaire des CCS peuvent être réduites considérablement [47].

Les auteurs ont aussi proposé l'hybridation du système avec un dispositif photovoltaïque (Figure. II.24). Ceci a permis l'atteinte un rendement thermique global du système de 16 à 18%.



Figure. II.24. CCS expérimentale hybridation du collecteur avec système photovoltaïque. Unité expérimentale à Trakya, Université, Edirne, Turquie [47].

II.4 Etudes Théoriques sur les CCS

De nombreuses études théoriques visant la modélisation et/ou la simulation des CCS ont été élaborées pour dimensionner et estimer les performances des centrales à cheminée solaire, ou pour démontrer leur faisabilité ainsi que leur rentabilité. En effet, le travail pionnier de J. Schlaich [12] sur le concept de la CCS pour l'exploitation de l'énergie solaire en vue de la production d'électricité a été suivi par de nombreux travaux visant notamment la modélisation des CCS à grande échelle.

Schlaich et al. [18, 19] ont étudié l'extrapolation des données expérimentales du prototype de Manzanares aux grandes centrales (5, 30 et 100 MW). En se basant sur un modèle mathématique, Schlaich a démontré qu'il n'existe pas de dimension optimale pour une centrale à cheminée solaire. Cependant si le coût de réalisation est pris en considération, la centrale peut être optimisée thermodynamiquement [18].

L'efficacité de la conversion énergétique des centrales à cheminée solaire est un facteur important en thermodynamique. Alors que dans les premières recherches sur les

systèmes à cheminée solaire de conversion d'énergie thermique en électricité, Schlaich et al. [12, 18, 19] et Haff et al. [14, 15] ont élaboré des modèles mathématiques pour calculer le rendement de conversion énergétique de ce genre de système. Dans son étude, Haaf a reporté les résultats des tests préliminaires menés sur la CCS de Manzanares pour valider son modèle théorique en comparant les résultats calculés aux résultats mesurés. Il a démontré par la suite que le rapport coût/énergie est très favorable pour les CCS commerciale malgré le faible rendement de l'installation [15].

D'autres modèles mathématiques ont été développés pour analyser les performances des CCS, dont :

Le modèle de Pasumarthi & Sherif [22]. Les auteurs ont mené une étude pour démontrer la viabilité de la centrale à cheminée solaire comme technologie alternative, appropriée et adaptable à des zones climatiques chaudes telles que celles de la Floride. Un modèle mathématique a été élaboré pour estimer la température et la puissance développée par les cheminées solaires ainsi que l'étude de l'effet des conditions ambiantes et des dimensions structurelles sur la puissance de sortie. Les résultats ont été validés par les essais effectués sur leur modèle expérimental [22].

Les mêmes auteurs [23] ont entrepris la prédiction des performances d'une cheminée solaire pilote à grande échelle à Gainesville en Floride. Les auteurs ont présenté une étude théorique d'une cheminée solaire typique basée sur un modèle d'écoulement unidimensionnel pour évaluer l'effet des différents paramètres de fonctionnement et de construction sur la température de l'air, sa vitesse et la puissance produite par la cheminée solaire. Ces derniers, ont adopté le modèle simplifié de Betz pour la turbine dans la cheminée, ce qui n'est pas très précis, car le fonctionnement d'un aérogénérateur dans une cheminée solaire diffère des éoliennes.

Pretorius [48] a effectué des études approfondies sur les flux d'air et de transfert de chaleur dans les CCS de grande échelle. Il a montré, suite à une étude numérique, que la puissance développée est fonction de la hauteur intérieure de la toiture du collecteur et de sa forme.

Une étude complémentaire utilisant le même modèle numérique précédent a permis à Pretorius & Kröger [49] d'évaluer l'influence des différentes expressions du coefficient de transfert thermique et autres paramètres sur les performances prédites d'une CCS. Dans cette étude, les auteurs ont critiqué l'évaluation des performances d'une CCS à grande échelle et ont présenté plus particulièrement les effets résultant de l'utilisation de diverses expressions pour le coefficient de transfert thermique par convection.

Ultérieurement, les auteurs [50, 51] ont comparé la puissance annuelle produite, calculée avec deux estimations du coefficient de perte dû au changement de passage de section horizontale/verticale « HTVTS » respectivement.

II.4.1. Performance du capteur solaire

Gannon et von Backström [52] ont considéré les différentes étapes d'évolution du fluide (air) dans la CCS, par similarité au cycle thermodynamique standard de Brayton.

- ✓ L'évolution du fluide de travail de l'entrée à la sortie du collecteur, est un échauffement isobare.
- ✓ De l'entrée de la cheminée à sa sortie, le fluide de travail subit une détente adiabatique.
- ✓ Le refroidissement de l'air de la température de sortie de la cheminée à la température de l'environnement est un refroidissement isobare,
- ✓ Alors que son évolution aux conditions entrée du collecteur est une compression adiabatique.

Les paramètres du procédé et les équations des quatre évolutions sus- cités ont été développés, afin d'étudier l'efficacité globale du système. Les auteurs ont analysé tout d'abord le cycle standard pour un gaz idéal dans la CCS, et mirent en avant la relation entre la limitation des performances, l'efficacité idéale, et les principales variables caractérisant les CCSs.

Ils ont aussi effectué une analyse détaillée des pertes d'énergie pour chaque partie du système, en considérant les frottements et les pertes cinétiques dans la cheminée, les pertes de chaleur dans le collecteur et les pertes énergétiques au niveau de la turbine.

Ils ont élaboré la relation entre la performance limite du système, l'efficacité idéale et les principales variables caractéristiques.

En se basant sur le prototype espagnol, Gannon & al. [52] ont effectué une étude et analyse des résultats pour valider leur modèle théorique. Ils ont également prédit les paramètres prépondérants influençant l'efficacité et la puissance de sortie des systèmes à grande échelle.

II.4.2. Performances de la cheminée

Dans son analyse, Ming et al. [53] ont introduit un modèle analytique pour l'étude de la distribution de la pression statique relative dans les CCSs. Complémenté par une étude numérique, leur modèle a permis d'évaluer les performances d'une CCS et de mettre en évidence les effets de plusieurs paramètres tels que la hauteur de la cheminée solaire et son diamètre, le diamètre du collecteur ainsi que l'irradiation solaire sur la puissance développée et l'efficacité du système.

Ming et al. [54] ont présenté deux analyses numériques des CCS, avec stockage d'énergie, et une simulation de l'aéro-turbine.

Dans d'autres études, Ming et al. [55, 56] ont présenté des études numériques des CCS. Ils ont montré que le rendement idéal et réel du cycle d'air dans une CCS (analogiquement au cycle Brayton) pour une mégastucture de CCS ($H_{ch}=1000m$) est respectivement de 3.33% et 0.9%.

Von Backstrom et al, [57] ont caractérisé l'aéro- turbine pour exprimer l'efficacité de la turbine. Le modèle a été validé par un dispositif d'une aéro-turbine de 720 mm de diamètre.

Dans leur article, Zhou et al. [58] ont étudié la hauteur optimale de la cheminée pour une puissance maximale. Leur modèle théorique a été validé avec les mesures sur le prototype de Manzanares.

II.4.3. Modélisation élaborée

Petela [59] a introduit dans son modèle une analyse exergetique. Il a analysé le processus thermodynamique des différents constituants de la CCS. En prenant comme exemple une CCS recevant 36,81 MW d'énergie solaire, il a développé le diagramme de distribution des flux énergétique et exergetique sur les différentes composantes de la CCS. Ceci constitue le premier travail incluant le concept d'exergie mécanique pour l'étude des CCS.

Dans leur étude, Koonsrisuk et al. [60] ont décrit la « Théorie constructale » dont l'objectif est d'augmenter la production d'énergie sur la zone occupée par la CCS. Le rapport hauteur/rayon, le débit massique maximum et la puissance maximale sous les contraintes d'un espace et volume fixe ont été déterminés. Les auteurs ont constaté que l'énergie produite par unité de surface est proportionnelle à l'échelle de longueur de la centrale.

En se basant sur la seconde loi de la thermodynamique, Koonsrisuk [61] a réalisé une étude comparative entre une CCS conventionnelle et une CCS à collecteur incliné. Les résultats pour une centrale de 5 MW ont montré qu'il existe une dimension optimale du collecteur correspondant à une génération d'entropie minimale.

Mullett [62] a établi un modèle mathématique pour le calcul de l'efficacité globale des CCS. Il a étudié les principaux facteurs influençant l'efficacité du système et a analysé l'efficacité des CCS en faisant des recherches sur le modèle espagnol et sur des modèles de CCS avec des capacités de production d'électricité de 10, 100, et 1000 MW. Les résultats des calculs ont montré que le rendement du système global était étroitement lié à sa taille. Plus grand était le système, plus important était son rendement global.

Michaud [63] a appliqué l'évolution d'un cycle thermodynamique fermé d'un gaz idéal, pour analyser le processus d'ascension d'air atmosphérique par convection naturelle, et a effectué une comparaison au cycle à turbine à gaz de Brayton. Le rendement de conversion de la chaleur en travail, a été calculé, en utilisant la température moyenne d'échange thermique pour simuler la source chaude et la source

froide. Michaud a conclu que le rendement de conversion de la chaleur de l'air en travail, dans ce genre de système, est proche du rendement du cycle de Carnot.

Ninic [64] a présenté la CCS comme une centrale thermique solaire à basse température utilisant l'air atmosphérique comme fluide de travail. Sur cette base, Ninic a établi la relation entre l'énergie disponible dans l'air, la chaleur absorbée, l'humidité de l'air, la pression atmosphérique, et la hauteur de la cheminée. Une analyse de l'influence de l'air sec et l'air humide sur les performances des CCS a été présentée.

Yan et al. [65] ont développé un modèle analytique en introduisant des corrélations permettant la détermination du débit et la vitesse d'écoulement d'air ainsi que la puissance et l'efficacité de la CCS. Il est à noter que le modèle présenté par les auteurs considère la turbine de la cheminée solaire comme une éolienne d'où l'application de la loi de Betz.

Bernardes et al. [66] ont présenté une analyse théorique d'une cheminée solaire fonctionnant en régime stationnaire et en convection naturelle laminaire. Après avoir effectué une recherche bibliographique assez riche, les auteurs [67] ont élaboré une analyse visant le développement d'un modèle analytique et numérique permettant de décrire les performances des cheminées solaires. Les résultats ont montré que la hauteur de la cheminée, le facteur de chute de pression à la turbine, le diamètre et les propriétés optiques du collecteur sont des paramètres importants pour la conception des cheminées solaires. Bernardes et al. [68] ont analysé l'effet du transfert de flux dans le collecteur.

Dai et al. [13] ont étudié les performances d'une CCS fictive et fonctionnant dans trois régions de l'ouest de la chine. Les auteurs ont conclu que la puissance produite est fortement influencée par l'augmentation de la radiation solaire en comparaison avec la température ambiante. La puissance produite augmente de manière non linéaire avec l'augmentation de la surface de captation et de la hauteur de la cheminée. Cette augmentation devient moins sensible dans le cas des cheminées à grande échelle par rapport aux cheminées de faibles tailles. Les auteurs ont conclu qu'une centrale cheminée solaire constituée d'un capteur à air de 500 m de rayon, d'une tour de 200 m de hauteur et de 10 m de diamètre est capable de produire de 110 à 190 kW d'électricité.

Des analyses numériques ont été effectuées pour simuler la performance interne, tels que les champs de pression, de vitesse et de température et le rendement de la turbine.

Pastohr et al. [69] ont utilisé le logiciel FLUENT (code CFD) pour modéliser la centrale CCS semblable géométriquement à celle de Manzaranes dans le but d'effectuer une analyse avec plus de détail du mode de fonctionnement et du rendement du système. Ils ont confirmé que la chute de pression dans la turbine et le débit massique sont des éléments décisifs sur l'efficacité du système et ne peuvent être déterminés uniquement par l'accouplement de toutes les parties d'une centrale CCS.

L'étude de Chergui et al. [70] fut basée sur la modélisation du transfert thermique et de l'écoulement d'air dans les CCS avec comme hypothèse un écoulement laminaire en convection naturelle. Le modèle a été résolu par la méthode des volumes finis ce qui a permis de déterminer le champ de vitesse et de température.

Dans leur analyse, Larbi et al. [71] ont étudié les performances d'une CCS pour l'application dans le sud algérien. Les résultats obtenus ont montré qu'une CCS similaire à celle de Manzanara, installée dans la région d'Adrar, pourra fournir une puissance de 140 à 200 kW. Une puissance suffisante pour l'alimentation en énergie des régions isolées. L'analyse des performances de la CCS a montré que l'efficacité du collecteur et de la turbine jouent un rôle important dans la performance du système. La puissance générée dépend de l'irradiation solaire de la température ambiante, de la hauteur de la cheminée et de la surface du collecteur.

Dans une étude comparative de différents modèles analytiques présentés dans la littérature, Boualleg et al. [5] ont souligné que les différentes études présentées dans la littérature, considèrent comme constants les paramètres physiques des matériaux tout au long du cycle de vie d'exploitation de SCC.

Ming et al. [72] ont étudié l'influence du ratio hauteur/diamètre de la cheminée sur les performances de la CCS. Ils ont conclu qu'une valeur optimale du ratio serait entre 6 à 8.

II.4.4. Caractéristiques de la turbine

Denantes et Bilgen. [73] ont développé et validé un modèle pour l'étude de l'efficacité et la performance des turbines à contre rotation. La conception et les performances sont investigués pour trois installations de cheminées solaires de

différentes tailles. Il est démontré que les turbines contre-rotatives sans aubes directrices ont des performances plus élevées qu'une turbine à un seul rotor ainsi qu'un couple réduit sur chaque axe par rapport à la turbine mono-roue.

Fluri et von Backstrom. [74] ont proposé différentes configurations pour le turbo-générateur et comparé leurs performances à l'aide de modèles analytiques et de techniques d'optimisation. Ils ont conclu que la disposition à rotor unique sans aubes de guidage sont inefficaces. Les dispositions à contre-rotation fournissent les rendements de crête les plus élevés, mais à des vitesses relativement faibles, ce qui conduit à un couple plus élevé indésirable pour la même puissance de sortie. Fluri et al. [75] ont comparé le rendement énergétique de trois configurations (axe vertical unique, axe vertical multiple et la configuration de la turbine à axes horizontaux multiples).

Gannon et al. [76, 77] ont constaté que, pour une cheminée de 1500 m de haut, la densité de l'air de sortie sera sensiblement inférieure à la densité d'entrée. Ainsi ils ont présenté une approche d'écoulement compressible unidimensionnel pour le calcul des variables thermodynamiques en fonction de la hauteur de la cheminée, de la friction et du changement de section [76]. Il s'avère que la perte de charge associée à l'accélération verticale de l'air est environ trois fois la perte de charge associée au frottement de la paroi [76]. Enfin, Gannon et Von Backstrom ont présenté une étude expérimentale des performances d'une aéro-turbine pour CCS [77].

II.4.5. Etude adimensionnelle

Koonsrisuk et Chitsomboon [78] ont proposé des variables sans dimension, pour l'étude et la modélisation de l'eau et de l'air en tant que deux fluides de travail. L'étude montre que l'air est plus approprié que l'eau comme fluide de travail. Les mêmes auteurs [79] ont proposé une seule variable de similarité sans dimension pour la modélisation de la centrale solaire à cheminée et ont établi une similitude dynamique entre un prototype et ses modèles à l'échelle.

II.4.6. Effets environnementaux et atmosphériques

Onyango et Ochieng [80] ont montré qu'il existe des valeurs seuils des rapports de température auxquels une puissance significative peut être produite par une cheminée solaire de dimensions spécifiques.

Harte et van Zijl [81] ont étudié la stabilité structurelle des tours de cheminée solaire en béton exposées à l'action dynamique du vent

Van Reken et Nenes [82] ont étudié théoriquement l'impact des nuages sur la performance d'une CSS de dimension réelle.

Zhou et al, [83, 84] ont étudié l'influence d'un courant d'air transversal sur les performances d'une tour solaire ascendante.

Bernardes et al. [85] ont proposé des stratégies de contrôle opérationnel applicables aux centrales solaires à cheminée.

II.5. Etudes économiques

Haaf et al. [14] ont montré que l'augmentation des dimensions de l'installation diminue les coûts spécifiques et donc les coûts de production d'électricité. Le choix des matériaux pour les installations à grande échelle dépendra principalement des coûts de production d'électricité qui en résultent. Les différentes variantes étudiées de CSS commercial montrent que le retour sur l'investissement le plus court (3,6 ans) est pour une conception avec un cylindre de cheminée en béton et un collecteur avec une couverture en plastique.

Nizetic et al. [86] ont réalisé une analyse technico-économique sur une CCS pour deux sites méditerranéens sélectionnés. Ils ont conclu que la construction de centrales électriques CCS dans la région méditerranéenne n'est rentable qu'à long terme.

Fluri et al. [87], ont présenté une comparaison entre les modèles économiques de la littérature avec le nouveau modèle développé. Aussi, l'impact de la réduction carbone a également été étudié.

Zhou et al. [88] ont analysé les flux de trésorerie pendant toute la période de service d'une centrale solaire flottante à cheminée de 100 MW.

Dans leur analyse économique, Najmi et al. [37] ont montré que le coût de la production d'énergie électrique d'une CCS diminue avec l'augmentation de la longueur de la cheminée.

Cao et al. [89] ont effectué une analyse économique de la CCS classique et de la CCS à cheminée en pente avec étude de cas pour éventuelle réalisation dans le nord-ouest de la Chine.

Babkir et al. [90] ont proposé une méthodologie d'optimisation des CCS en prenant en compte les paramètres technico-économiques. Pour une centrale solaire à cheminée de 100 MW, les auteurs ont calculé une période de retour sur l'investissement de 4,29, 23,47 et 16,88 ans pour une conception de cheminée flottante, une cheminée en béton armé et une conception de capteurs inclinés respectivement.

Lu Zuo et al. [91] ont établi un modèle d'analyse économique d'une CCS combinant le dessalement d'eau de mer, la chaleur résiduelle et une suralimentation éolienne combinant le dessalement de l'eau de mer et la chaleur résiduelle (Figure. II.25).

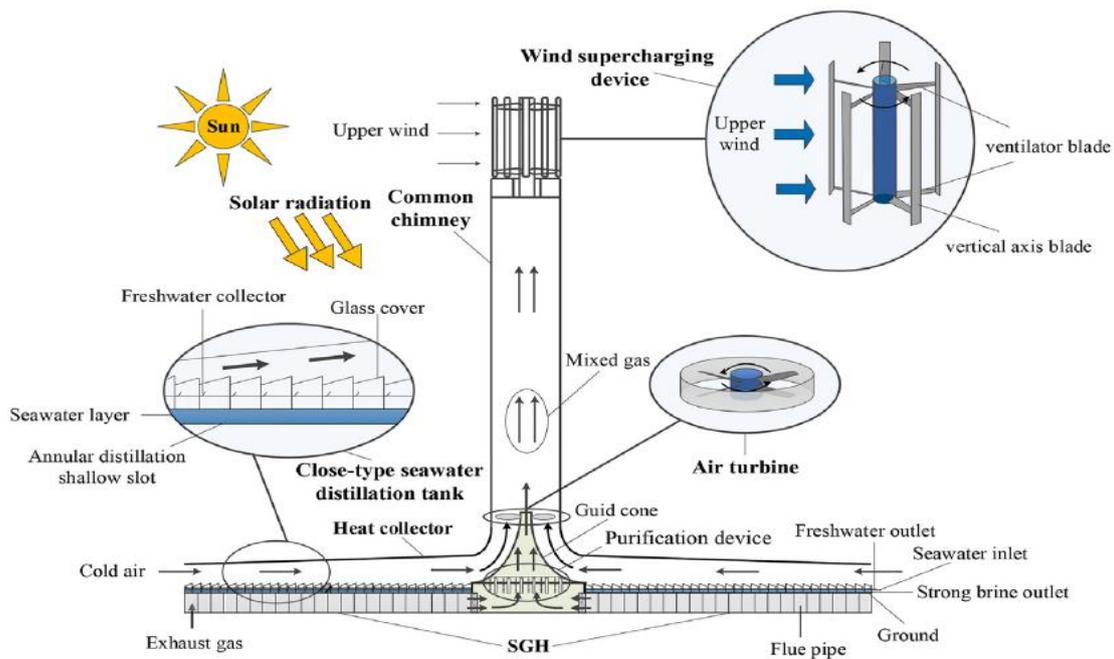


Figure II.25. CCS combinant le dessalement de l'eau de mer, schématisation du concept [91].

II.6. Nouveaux concepts

Kashiwa et Kashiwa [92] ont proposé l'installation d'un séparateur à cyclone pour condenser et récupérer l'eau présente dans l'atmosphère. Placée à la base de la cheminée, le séparateur est constitué d'un vortex fortement rotatif dans lequel la température est bien inférieure au point de rosée de l'air de la serre. L'article fournit une base d'une étude de faisabilité du cyclone solaire pour la production de l'électricité et de l'eau.

Zhou et Yang [93] ont proposé un nouveau concept de CCS, en intégrant un capteur solaire à un creux artificiel dans une montagne faisant office de cheminée (Fig. II.26.a.).

Zhou et al. [94] ont aussi proposé ce nouveau concept d'une centrale solaire thermique cette fois avec une cheminée flottante épousant le flanc d'une montagne segment par segment (Figure II.26.b).

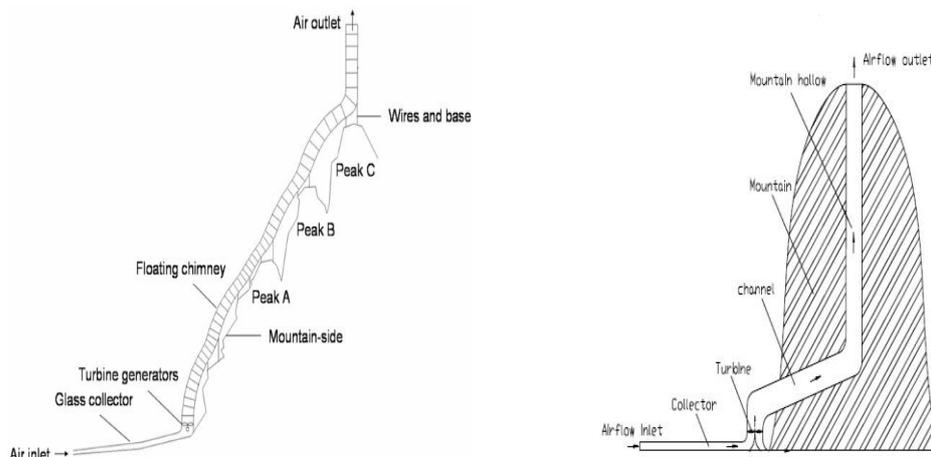


Figure II.26. Prototype de nouvelles approches de conception de CCS [93] :
 a- Avec cheminée flottante épousant les reliefs d'une montagne, par segment.
 b- Avec un forage dans l'axe d'une montagne

Bilgenet Rheault [95] ont étudié un système de CCS à des latitudes élevées (Figure.II.27). Trois localités au Canada, à savoir Ottawa, Winnipeg et Edmonton, ont été investies. Le collecteur en pente épousant le relief des collines fonctionne également comme une cheminée. Une cheminée de faible hauteur est installée à la verticale. Les

résultats ont montré que les centrales solaires à cheminée à hautes latitudes produiraient 85% des CCS classiques équivalentes.

Hamdan [96] a effectué une analyse thermodynamique simplifiée pour un flux d'air constant à l'intérieur d'une cheminée solaire pour une application dans la région du golfe Arabe.

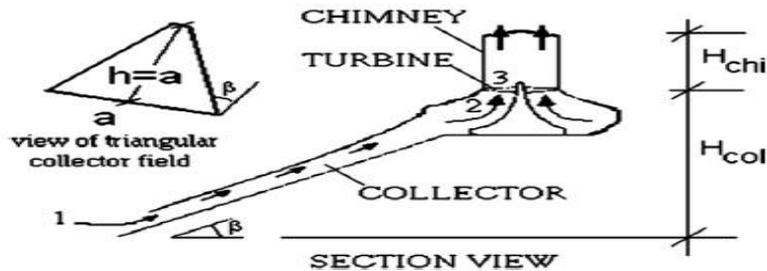


Figure II.27. Schéma représentant un système de CCS à latitude élevée [96].

Chen et al. [97], ont proposé une CCS pour réutiliser la chaleur résiduelle à basse température. Ils ont présenté un modèle mathématique du système basé sur le premier et le deuxième principe de la thermodynamique.

Guo et al. [98] ont développé un modèle théorique instationnaire en considérant le stockage thermique du sol, afin d'étudier le comportement thermodynamique d'une CCS tout au long d'un cycle de fonctionnement quotidien. Ils ont également examiné les performances du système dans différentes conditions de travail : stationnaire, sans stockage de chaleur et instationnaire avec stockage de chaleur. Différents matériaux de stockage de chaleur ont été utilisés.

Dans leur revue, Molana et al. [99] ont rapporté que les études expérimentales étaient principalement axées sur les systèmes à petite échelle. Les études réalisées n'ont pas analysé l'impact du vieillissement sur les performances du système. La recherche a fortement suggéré la construction d'une CCS échelle usine pour fournir des références plus fiables pour les études théoriques et de modélisation.

Penghua Guo et al. [100] ont conclu dans leur revue, que la recherche et le développement de technologies de construction et la découverte de nouveaux matériaux

et de nouveaux concepts, la CCS jouera un rôle important dans le mix énergétique tout en contribuant à la réduction des rejets de GES.

Al-Kayiem et al. [101] ont étudié l'amélioration d'une cheminée solaire en récupérant l'énergie thermique des gaz d'échappement pour chauffer l'air dans le collecteur de cheminée solaire.

Nasraoui et al. [102] ont réalisé une nouvelle conception de collecteur avec un mode à contre-courant à double passage, ce qui a permis d'augmenter son efficacité de 28%.

Siamak et al. [103] a proposé l'utilisation de panneaux photovoltaïques semi-transparents comme toiture du collecteur de la CCS pour améliorer la rentabilité du système.

Seyyed et al. [104] ont comparé le cas du collecteur à la rugosité naturelle et artificielle. Ils ont enquêté sur son impact sur les performances du CCS dans la région de Semnan, en Iran.

Sedighi et al. [105] ont étudié les effets de la porosité du sol sur la puissance de sortie et l'efficacité énergétique de la CCS. Ils ont constaté que les terrains avec faible porosité sont les plus appropriés pour la construction de CCS.

Erdem Cuce [106] ont suggéré une nouvelle approche tridimensionnelle axisymétrique pour l'analyse numérique de la mécanique des fluides (CFD) en considérant le prototype de Manzanares comme référence.

Rahimi et al. [107] ont étudié les performances des CCS à cheminée inclinée en présence de vents ambiants transversales. Les résultats ont indiqué qu'à un angle d'inclinaison de la cheminée de 15°, la puissance de sortie augmente entre 5% et 20% selon les vitesses des vents ambiants par rapport à la cheminée verticale aux mêmes vitesses de vent transversal.

II.7. Intégration de matériaux à changement de phase

Wei Chen [108] a proposé l'introduction d'un nouveau concept de stockage de chaleur à changement de phase. En effet des capsules à changement de phase (CCP) ont été empilées sur différents lits de tamis pour former plusieurs couches de stockage de chaleur poreuses. L'étude a analysé l'effet du matériau à changement de phase, la porosité et la taille des particules des CCP sur l'efficacité du système. Une augmentation d'environ 7% et 25% de temps de stockage thermique plus élevé se produit dans la couche de PCC par rapport au tuf et au basalte. La porosité et la taille des particules dans la couche poreuse ont un impact sur le stockage thermique, et les meilleures performances de stockage thermique peuvent être obtenues pour un rapport optimisé du diamètre de la cheminée à l'épaisseur du lit dans le système.

Saman Rashidi [109] ont évalué les progrès concernant l'utilisation des matériaux à changement de phase dans les centrales solaires à cheminée. Différentes techniques utilisées dans le stockage de l'énergie thermique ont été discutées. Les applications des matériaux à changement de phase dans les CCS sont également analysées.

II.8. Utilisation de films plastiques dans les collecteurs de CCS

Le collecteur solaire (CS) est la partie de la CCS employée pour produire l'air chaud par effet de serre. Avec une toiture en verre ou en film plastique transparent, le CS couvre une très grande surface de plusieurs milliers de mètres carrés. En effet, recouvrir l'immense structure des collecteurs, jusqu'à plusieurs hectares, de polyéthylène basse densité (PEBD), réduira les coûts d'investissement initiaux, en améliorant la durée du retour sur investissement. Cela rendra la CCS plus attrayante sur le plan économique. Cependant, la dégradation du film altère ses performances mécaniques et photo-thermiques et réduira par conséquent l'efficacité globale du système.

Ikhlef et al. [133] se sont penchés sur l'analyse de l'effet de différents types de stockage thermique sur les performances des CCS. Dans leur travail les auteurs ont listé les études expérimentales utilisant comme couvercle de la CCS, le verre, le plastique ou les deux matériaux (Hibridation). Cependant ces études n'abordent pas l'impact du vieillissement sur les performances énergétiques des CCS [133].

Dans leur étude Pfund et al. [134], les auteurs ont étudié l'évolution des propriétés optiques du verre au fil du temps, en exposant des échantillons à l'air ambiant pendant des périodes allant de quelques heures à plusieurs mois. Les résultats ont montré que le vieillissement naturel du verre peut engendrer une réduction de sa transmittance. La durée de dégradation du verre en vieillissement naturel peut varier en fonction des conditions environnementales. Le verre trempé utilisé dans les serres à une durée de vie allant de 10 à 15 ans.

Dans leur article, Gunnaret al. [135] ont rapporté les avantages et les défis de l'utilisation de matériaux plastiques dans les technologies solaires. Les auteurs ont souligné que l'utilisation de plastiques offre des avantages significatifs tels que la réduction des coûts et l'amélioration de certaines propriétés mécaniques telles que la résistance aux chocs.

Par ailleurs, les propriétés du plastique sont affectées par les conditions météorologiques et par l'exposition au soleil, ce qui peut réduire sa durée de vie et son efficacité à long terme. D'où la nécessité de les caractériser.

Les méthodes d'essai utilisées pour les plastiques en général sont également appliquées aux couvertures de serre, malgré d'importantes différences fonctionnelles [110]. Dans leur étude, Papadakis et al. [110] ont signalé l'urgence de dégager un consensus sur les méthodes d'essai et normes internationales dédiés au test des propriétés physiques des matériaux de couverture des serres. Les auteurs ont souligné aussi l'excellente transmittance des films PEBD. Ils ont indiqué que ce matériau de couverture est dominant et qu'il s'agit du film plastique le moins cher dans les régions méditerranéennes. Ils ont rapporté que le PEBD est le film plastique dominant et le moins coûteux dans les régions méditerranéennes.

Dehbi et al. [111] ont étudié les films PEBD monocouches et tri-couches utilisés comme couverture des serres. Les auteurs ont expliqué que la conception du film tri-couches permet de ralentir la détérioration du film, le rendant plus durable. Cependant, la superposition de plusieurs couches du film (Dans ce cas le film PEBD tri-couches) entraîne une réduction de la transmittance du film qui aura un impact sur l'efficacité énergétique du système.

Dilara et al. [112] ont discuté différentes méthodes de test des propriétés mécaniques des films de polyéthylène utilisés dans les serres. Les facteurs affectant le vieillissement du PEBD utilisé comme couverture de serre ont été également présentés. Les auteurs ont indiqué que les tests de vieillissement artificiel ne peuvent fournir qu'une estimation approximative du comportement réel du film plastique lorsqu'il est exposé aux facteurs environnementaux réels et complexes qui affectent le plastique pendant son utilisation. Les auteurs ont souligné la nécessité d'étudier l'effet des différents facteurs et leurs effets combinés sur la dégradation. Cela permettra d'améliorer les systèmes d'évaluation de la qualité et de la durée de vie des films plastiques utilisés comme matériaux de couverture des serres.

Satoto et al. [113] 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 varie entre 3°C et 25°C au cours de l'année et, pour d'autre part, à Bandung (Indonésie) où la température reste constante à 23°C +/-2°C, met en évidence une différence en termes de vitesse de formation des carbonyles. La vitesse de formation des carbonyles dépendrait de la température.

D'autres auteurs se sont intéressés à l'étude du vieillissement accéléré en enceinte UV. Tidjani et Arnaud [114] ont, 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, 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 hydro-péroxydes et des cétones plus rapides dans le cas du vieillissement accéléré. Ainsi, Tidjani et Arnaud [114] 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 hydro-péroxydes en serait dépendante.

La large utilisation des plastiques est due en partie à leur faible prix et au fait qu'il présente une multitude de formes avec des propriétés spécifiques.

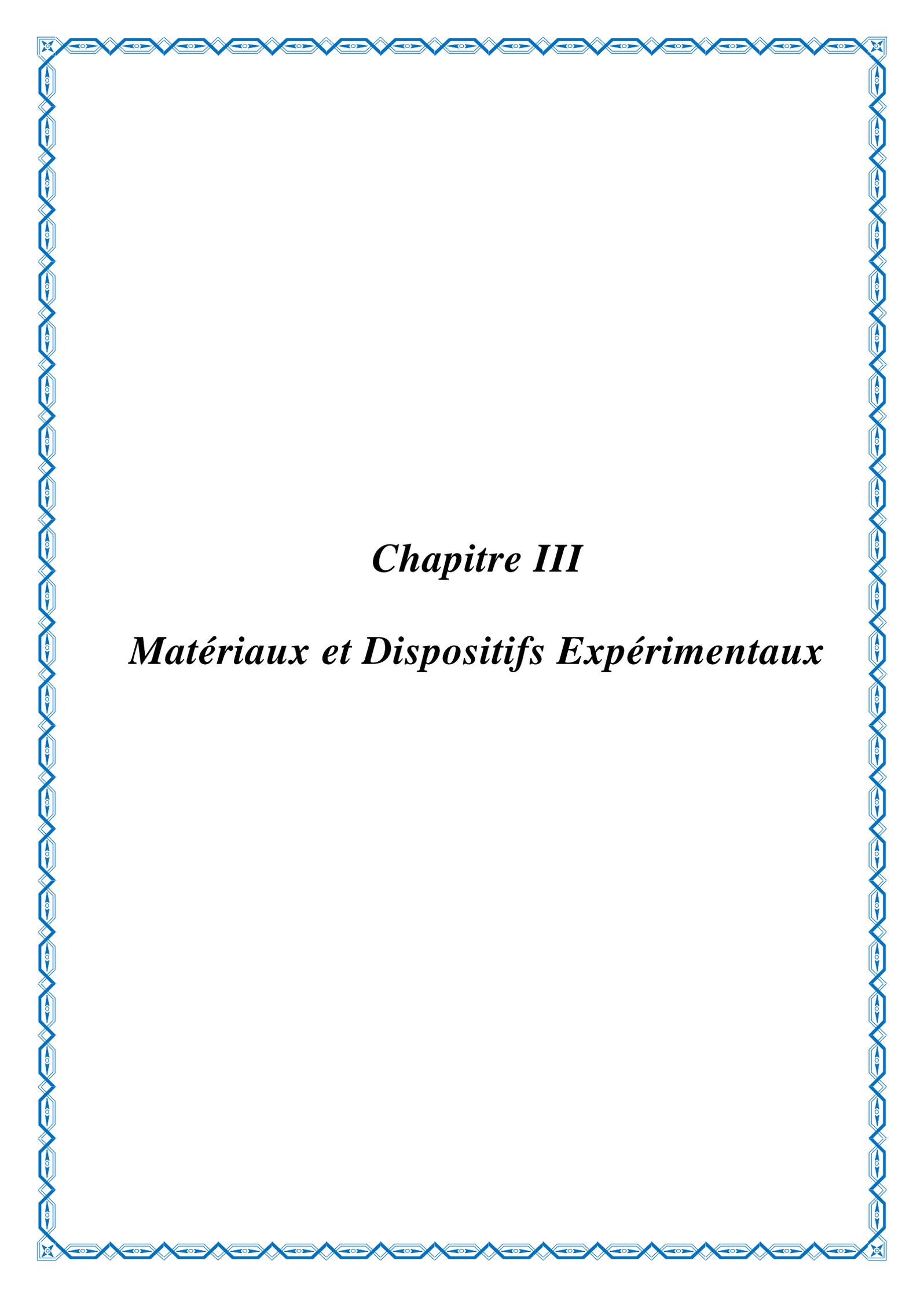
Ils peuvent être rigides ou flexibles, transparents ou opaques, électriquement isolants ou semi-conducteurs, insensibles à l'humidité et relativement légers [115].

De plus, leur procédé de fabrication permettant l'obtention de formes complexes sans usinage. Cependant, les polymères se détériorent souvent dans les applications extérieures. La cause la plus importante de dégradation est l'irradiation solaire et la durée de vie des plastiques dépend du climat. Plus la température est élevée, plus les réactions chimiques sont rapides, ce qui rend les plastiques vulnérables [116].

Dans leur étude sur la photo-dégradation de films de polyéthylène transparents, non colorés et non stabilisés, Adelhafidi et al. [117] ont rapporté qu'après 8 mois d'exposition, les échantillons sont devenus trop fragiles pour résister à la force du vent. C'est la raison pour laquelle le présent travail a pris en considération un film en PEBD stabilisé.

II.9. Conclusion

De la revue bibliographique présentée on note que peu de travaux ont été publiés sur les études expérimentales et l'évaluation de l'effet des conditions ambiantes sur les propriétés des matériaux. Les différents modèles de simulation existants dans la littérature supposent que les propriétés thermo-physiques sont constantes et sans aucune perte de production d'énergie, même lors de l'utilisation de couverture en polymères pour la configuration expérimentale. Le présent travail évalue la dégradation des matériaux utilisés dans le revêtement des collecteurs des CCS, tout en analysant son impact sur les performances de la CCS et la réduction de la transmittance solaire sur l'efficacité du système.



Chapitre III

Matériaux et Dispositifs Expérimentaux

Chapitre III : Matériaux et Dispositifs Expérimentaux

III.1 Introduction

Le revêtement du collecteur de la CCS ne doit pas seulement être transparent mais doit également être durable et à un prix rentable à long terme. Divers types de toitures, en films plastiques et en verre, ont été expérimentées afin d'établir le meilleur rapport qualité prix (Figures III.1 et III.2).



Figure III.1. Toiture en verre du prototype de Manzanares. Des averses de pluie occasionnelles ont permis l'auto nettoyage du système.



Figure III.2. Toiture en membranes plastiques utilisées dans le prototype de Manzanares afin d'établir une étude comparative avec la toiture en verre.

Le plastique, bien que beaucoup moins cher que le verre, se détériore plus rapidement avec le temps comparativement au verre. Les propriétés physiques du matériau, qu'elles soient mécaniques, optiques ou thermique..., pèsent dans la prise de décision, pour le choix du matériau le plus adéquat. C'est une question qui est souvent posée autant économique que technique.

Dans le cadre de cette étude, nous allons opter pour les films plastique, utilisés dans les serres agricoles, vu leur abondance, leur prix bon marché, leur fabrication au niveau national en plus de leurs propriétés thermiques avérées.

III.2 Matériaux utilisés

III.2.1. Dispositifs solaires à effet de serre

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 thermiques tels les matériaux absorbeurs, les matériaux transparents et les matériaux isolants.

III.2.2. Matériaux absorbeurs

L'absorbeur joue un rôle principal dans le capteur solaire. C'est généralement un corps noir qui capte le rayonnement solaire et le converti 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.

Deux fonctions incombent à l'absorbeur :

- Absorber la plus grande partie du rayonnement solaire possible ;
- Transmettre l'énergie captée au fluide caloporteur avec un minimum de perte.

Du fait de leur conductivité thermique élevée, les absorbeurs sont généralement métalliques (Cuivre, Acier ou Aluminium). Les polymères sont utilisés dans le cas des milieux agressifs.

L'emploi des polymères entraine des différences notables comparées aux métaux :

Ils ont l'avantage d'être légers, possibilité de les teinter en masse et sont peu sensibles à la corrosion. Toutefois, ils sont susceptibles au vieillissement dû au rayonnement U.V et se dégradent rapidement dans les températures élevées.

Le tableau III.1 donne quelques caractéristiques de ces matériaux.

Tableau III.1. Caractéristiques physiques de divers matériaux absorbeurs à 20°C [118].

| Matériaux | Conductivité thermique(W/m.°C) | Coefficient de dilatation (1/°C) 10 ⁻⁶ |
|-----------|--------------------------------|--|
| Aluminium | 230 | 23.8 |
| Cuivre | 380 | 16.5 |
| Zinc | 112 | 29.0 |
| Acier | 52 | 12 |
| Inox | 52 | 13 |

En général, un absorbeur efficace a une bonne absorptivité et une faible émissivité. Comme les surfaces métalliques tendent à réfléchir la lumière d'où une perte d'énergie elles sont souvent enduites d'une couche sélective qui d'une part absorbe le rayonnement solaire de courtes longueurs d'onde avec un rendement élevé et le transforme en IR [118]. Les caractéristiques des quelques surfaces sélectives sont données dans le tableau III.2.

Tableau III.2. Caractéristiques physico-chimiques de diverses surfaces sélectives [118].

| 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 | 0,90 | 0,16 | Peu d'effets |
| Acier et couche organique sur chrome | 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 | |

III.2.3. Matériaux transparents

Du fait de sa résistance aux chocs, aux contraintes mécaniques (grêle, neige) et aux chocs thermiques, le verre trempé est principalement utilisé comme couverture transparente. 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, mais elles sont plus légères, moins chères et plus facile à mettre en œuvre [119]. Le Tableau III.3 donne les caractéristiques optiques des matériaux utilisés comme couverture transparente.

Tableau III.3. Caractéristiques des couvertures transparentes [119].

| 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 |

III.2.4. 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. Le problème majeur rencontré dans ces matériaux est leur durée de vie [119, 120].

III.2.4.1. Les Polymères

Un polymère est un enchaînement de groupes organiques identiques appelés monomères. Un monomère est une suite d'atomes de carbone liés entre eux et aussi avec d'autres éléments (H,N,Si,Cl...). On distingue les homo- polymères, 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 consiste en l'existence d'une transition du second ordre appelée transition vitreuse, à la température, T_g , pour les amorphes, alors que les semi-cristallins ont une température de transition visqueuse plus une température de fusion, T_f .

III.2.4.2. 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. Une variation importante est observée, de certaines propriétés, à la solidification. La transition du second ordre 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.

III.2.4.3. 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.

L'autre phase présente est une phase amorphe. La notion de taux de cristallinité, χ_c , représente la fraction massique ou molaire d'unités structurales cristallisées par rapport à la totalité des unités présentes. Les thermo-plastiques 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.

III.2.4.4. Propriétés des polymères**❖ 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.

❖ **Conductivité thermique**

La conductivité thermique des polymères est faible, de l'ordre de 0,1 W/m.K. Pour un amorphe, le maximum de conductivité se situe à la température de transition vitreuse. Pour un semicristallin, on observe une conductivité plus forte de la phase cristalline

❖ **Module d'élasticité**

La rigidité d'un matériau a été définie d'après les observations de Thomas Young.

En effet, Thomas Young 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 de Young ou module d'élasticité longitudinal, se calcule via la loi de Hooke : $\sigma = E \varepsilon$

Où : σ est la contrainte ; E, le module d'Young et ε , la déformation.

Le module de 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 de Young est très élevé ($>10^5$ Pa) qu'il est rigide. Le module de Young des polymères est faible : environ un centième de celui du métal. Il est de plus sensible à la température.

❖ **Rhéologie**

La viscosité d'un fluide traduit l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement. La viscosité est habituellement notée, η , par les rhéologues alors que la notation usuelle des mécaniciens des fluides est, μ . Pour un fluide Newtonien, la viscosité est une fonction constante et indépendante du taux de cisaillement. La viscosité des polymères fondus est généralement non Newtonienne : Elle est thermo et piezo- dépendante [121, 122].

III.2.4.5. Les films plastiques

Les polymères qui composent les films plastiques sont des thermoplastiques, c'est-à-dire qu'ils peuvent par un processus thermique revenir à l'état original sans changement de leurs propriétés physiques ou chimiques [120]. La structure chimique des polymères est pratiquement indépendante du processus de fabrication, par contre la structure physique est largement déterminée par les étapes de transformation (changement de température, de force d'étirement, de temps de rétention...).

❖ Les grandes familles de plastique

Parmi les 5000 types de plastiques connus, seule une cinquantaine présente un intérêt économique. Plus de 90% de la production mondiale se compose des familles de plastique suivantes :

- Polyéthylène (PE) comprend le polyéthylène à basse densité (PEBD) et le polyéthylène à haute densité (PEHD) ;
- Polypropylène (PP) ;
- Chlorure de polyvinyle (CPV) ;
- Polystyrène solide (PS) et polystyrène expansé (PSE) ;
- Polyéthylène téréphtalate (PET).

❖ Composition et fabrication des films plastiques

Les films plastiques se classent en deux catégories : Les monocouches et les multicouches. En effet, lorsqu'il s'agit simplement d'assurer une protection aux objets (cas des sachets par exemple), les films sont constitués d'une seule couche faite en polymère standard comme le PP, le PE ou le PET. Par contre, pour le conditionnement des aliments (produit frais, pain, fromage...), les films sont multicouches : en effet, une couche interne, dite « barrière », composée de polymères comme l'EVA ou le nylon est ajoutée aux couches standard.

L'une des techniques de fabrication de films plastiques les plus communes est l'extrusion à plat. Le principe de cette technique (Figure III.3.) est le suivant :

- Le plastique stocké sous forme de granulés (« pellets » en anglais) est introduit à débit constant dans l'extrudeuse (étape 1 de la Figure III.3.) ;
- Les granulés sont chauffés à une température suffisante (200 °C pour le PE par exemple) et ramollis sous forme d'une pâte, elle-même malaxée dans

une vis d'extrusion et poussée simultanément vers les lèvres de la filière plate afin de la calibrer ;

- Le film plastique est ensuite mis en forme et refroidi. Il est qualifié de « cast », à ce stade de fabrication ;
- Pour produire du film mono-orienté, le film cast est étiré dans l'axe de défilement (étape 2 de la Figure III.3.) [123] ;

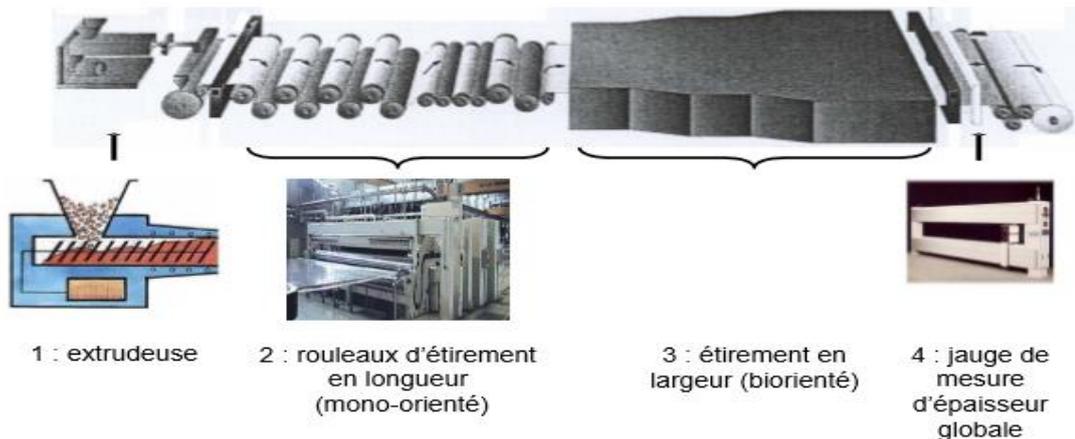


Figure III.3. Ligne de fabrication par extrusion à plat.

- Le film mono-orienté est ensuite enroulé, découpé et stocké en bobines ou en plaques (feuilles) ;
- Pour produire du film bi-orienté, le film mono-orienté subit, après l'étape 2, des étirements perpendiculairement à l'axe du défilement, sous l'action de pinces (étape 3 de la Figure III.3) ;
- La mesure d'épaisseur globale en ligne (étape 4 de la Figure III.3) intervient juste après l'étirement du film de façon à adapter l'action des pinces et la vitesse des rouleaux pour atteindre la valeur d'épaisseur désirée. Les taux d'étirage dépendent du polymère.

L'étirement bi-axial améliore très sensiblement la résistance mécanique des films selon les deux axes et entraîne une transparence parfaite ou une diminution de la perméabilité aux gaz par exemple.

En ce qui concerne la fabrication des films multicouches, le développement de la technique dite co-extrusion (Figure III.4.), permet l'obtention de propriétés meilleures.

Celle-ci associe, grâce à plusieurs vis d'extrusion, plusieurs couches de polymères, ainsi que des additifs.

Il est possible à l'heure actuelle de co-extruder jusqu'à neuf couches différentes, chacune ayant ses propres qualités [124]. Pour des raisons techniques de simplicité, un polymère est parfois extrudé sur un film déjà constitué : c'est le procédé de revêtement (extrusion coating) (Figure III.5) [124].

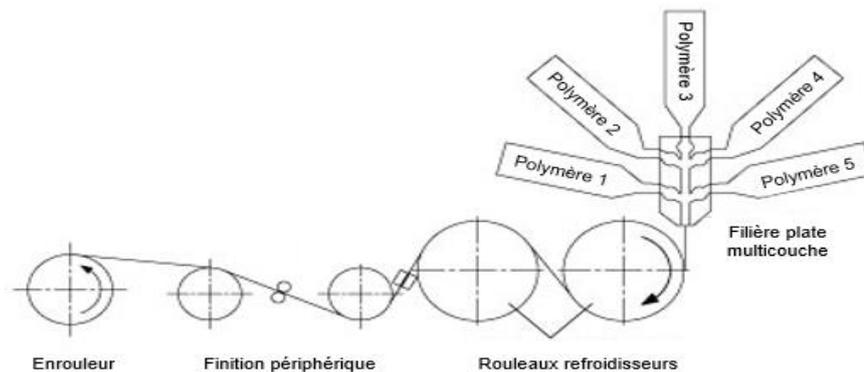


Figure III.4. Coextrusion de 5 couches.

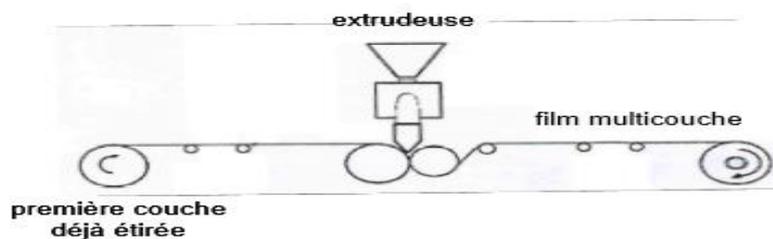


Figure III.5. Procédé de revêtement.

❖ Le polyéthylène (PE), description générale

La recherche de solutions permettant de réduire les déperditions thermiques des serres a permis l'utilisation de matériaux de couverture possédant des propriétés optiques particulières et notamment dans l'infrarouge thermique.

Le film plastique en polyéthylène, est l'un des matériaux les plus utilisés dans le domaine. Il trouve bon nombre d'application tels : la serre agricole, le distillateur solaire...etc. Son rôle principal étant de diminuer de façon significative les pertes thermiques au niveau de la toiture, mais également au niveau du microclimat interne du système soit nocturne ou diurne.

Le PE est un matériau [124] :

- Thermo- plastique commercial semi-cristallin (Typiquement 70-80%), semi opaque ;
- Ecologique : sa fabrication est propre, ne produit que peu de déchets et n'émet pas de substances nocives ; recyclable à 100% et dont le traitement nécessite peu d'énergie ;
- L'utilisation de PE est appliquée dans plusieurs domaines tels : l'agriculture (film, filet de pêche, pipe d'irrigation, cageots), l'industrie (cosmétiques, alimentaire (bidons d'huile), les produits d'entretien ;
- Emballage : pipe gaz naturel et eaux, pièces techniques et automobile.

❖ **Différents types de polyéthylène**

Les polyéthylènes sont classés en fonction de leur densité. Celle-ci dépend du nombre et de la longueur des ramifications présentes sur leurs chaînes moléculaires [124].

- Le procédé « haute pression » est historiquement le plus ancien (1933). Ce procédé en masse ou en émulsion nécessite de comprimer l'éthylène gazeux à plus de 1000 bars (température de 150 à 200 °C). Ces procédés conduisent à un polyéthylène radicalaire comportant des ramifications difficilement cristallisables, ce qui améliore la tenue mécanique, en résistance à la déchirure. Il est nommé **Polyéthylène Basse Densité (PEBD)**.

Les différents polyéthylènes basse densité (0.860 à 0.935 g/cm³) sont caractérisés par un module de Young allant de 10 MPa à 500 MPa, par de bonnes propriétés diélectriques, par une faible perméabilité à la vapeur d'eau et une bonne résistance à la fissuration [125].

- Les procédés « basse pression » (procédé Ziegler- Natta), sont basés sur l'utilisation de catalyseurs et nécessitent des pressions faibles de 40 à 60 bars (température de 60 à 120°C) [120]. Ils permettent d'obtenir des chaînes

macromoléculaires linéaires facilement cristallisables. Le PE plus cristallin que le PEBD, donc plus dense, est appelé Polyéthylène Haute Densité (PEHD). Les principales qualités de PEHD sont : Résilience même à basse température, résistance aux produits chimiques, faible sensibilité à l'eau, imperméabilité à la vapeur d'eau [119].

❖ **Propriétés du PE**

➤ **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.

- ✓ **Cristallinité** : 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). Une deuxième méthode de mesure de la cristallinité utilise la diffraction des rayons X aux faibles angles [119]. Le polyéthylène basse densité (PEBD) est obtenu par polymérisation radicalaire de l'éthylène sous haute pression. Sa cristallinité est de l'ordre de 35 à 50 %. Les propriétés optiques du PEBD s'améliorent avec la cristallinité.
- ✓ **Tenue à l'U.V** : Une exposition aux UV trop longue entraînera 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.
- ✓ **Tenue au gel** : La grande souplesse du film en PE lui permet de bien résister au gel. En effet le PE se prête à la déformation puis reprend sa forme initiale au dégel. Il peut supporter des températures pouvant aller jusqu'à -40°C [120].

➤ **Propriétés chimiques**

- ✓ **Résistance chimique** : Le PE 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 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.

✓ Perméation : La perméation du PE aux produits pétroliers est très faible. La perméation est un phénomène qui est fonction, entre autres des matériaux, de l'épaisseur et de la température. Le PE de dernière génération présente de très bonnes résistances à la Perméation.

✓ 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 sa conduite. En effet, il ne se corrode pas et ne se pique 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 sa conduite.

➤ **Vieillessement du polyéthylène**

En environnement extérieur plusieurs facteurs tels que le lessivage par l'eau de pluie, les rayonnements ultra-violetts (UV) et les variations saisonnières de température peuvent entraîner la dégradation chimique du polymère et, à terme sa fragilisation [118]. La durabilité des polyéthylènes a retenu l'attention de nombreuses équipes de recherches et elle a donné lieu à la publication de dizaines d'ouvrages et de 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. Dans ce qui suit, un bref rappel des différents agresseurs environnementaux pouvant induire des dégradations sur ce type de polymère est présenté.

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'aura 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.

– **Vieillissement physique**

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

- ✓ Les vieillissements physiques avec transfert de masse dans lesquels de la matière est adsorbée ou dé-adsorbée par le matériau ;
- ✓ Les vieillissements physiques sans transfert de masse concernent les vieillissements sous contrainte mécanique.

– **Vieillissement 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 différents modes de dégradation chimique tels que la dégradation thermochimique, radiochimique, hydrolytique ou photo- chimique. Dans les applications aux serres, le vieillissement photo chimique est le plus courant [126].

Le vieillissement par photo-oxydation se développe sous l'action conjointe des ultraviolets et de l'oxygène. C'est l'une des principales causes du vieillissement des polymères. Il appartient à la classe des vieillissements chimiques associés aux phénomènes d'oxydation. Il entraîne des modifications chimiques des chaînes macromoléculaires, de façon préférentielle en surface des échantillons. L'épaisseur dégradée étant une 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 [127].

– **Stabilisation**

La plupart des polymères nécessitent 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 [128].

Selon de nombreux auteurs, les deux principales voies de stabilisation seraient de capter les radicaux libres afin d'entraver la propagation de l'oxydation [129].

❖ **Propriétés du PEBD**

- **Propriétés physico-chimiques**

Le PEBD est un polymère semi-cristallin de densité située entre 0.91 et 0.92. Son taux de cristallinité est d'environ 43% à 50% et sa température de fusion cristalline est située entre 105°C et 115°C [125]. En général, le PEBD présente une bonne résistance chimique, il est :

- Très résistant aux acides faibles ;
- Résistant aux acides forts non oxydants ;
- Très résistant aux bases faibles et fortes.

- **Propriétés mécaniques**

Les propriétés mécaniques du PEBD dépendent essentiellement de sa masse molaire et de sa cristallinité. Nous pouvons citer entre autres [125] :

- La résistance à la traction variant de 9 à 23 MPa.
- L'allongement à la rupture variant de 150% à 1000%.
- Le module d'élasticité en traction variant de 200 à 500MPa.

- **Propriétés électriques**

Le PEBD est une substance non polaire caractérisée par une permittivité relative faible (≈ 2 à 3), un facteur de pertes diélectriques faible et une rigidité diélectrique élevée [125].

III.2.4.6. Problématique et dispositifs expérimentaux

❖ Problématique

La simplicité de la centrale à cheminée solaire (CCS) la rend très attrayante. Le collecteur solaire (CS) est la partie de la CCS employée pour produire l'air chaud par effet de serre. Avec une toiture en verre ou en film plastique transparent, le CS couvre une très grande surface de plusieurs milliers de mètres carrés.

Plusieurs études expérimentales ont utilisé comme matériaux de couverture du collecteur de la CCS, soit le verre ou le plastique, ou bien une hybridation verre plastique [12, 133], cependant ces études supposent que les propriétés thermo-physique sont constantes durant toute la durée de vie de la CCS, donc sans aucun impact sur les performances énergétiques de l'installation.

Dans leurs études [12, 14, 15], les auteurs ont testé plusieurs matériaux comme couverture de la toiture du collecteur. Cependant, aucune étude pour démontrer l'impact de cette dégradation sur la production énergétique et l'efficacité énergétique de la CCS n'a été menée. En effet les diverses études de modélisation supposent les propriétés du matériau de capteur solaire constantes dans le temps.

La détérioration des propriétés notamment optiques du couvercle du collecteur par effet de vieillissement, que ce soit pour le verre [134] ou le plastique [135] réduit le rendement de ce dernier, impactant ainsi la performance énergétique globale de la CCS. Les propriétés du plastique sont affectées par les conditions météorologiques et par l'exposition au soleil, ce qui peut réduire leur durée de vie et leur efficacité à court terme par rapport au verre. De ce fait, l'exposition des matériaux de la CCS à l'environnement nécessite l'analyse de l'impact du vieillissement sur ces performances énergétiques.

Dans la présente étude le choix est tombé sur le polyéthylène basse densité (PEBD), vu son abondance sur le marché. En effet, recouvrir l'immense structure des collecteurs, jusqu'à plusieurs hectares, avec du film en (PEBD), matériau produit localement et largement utilisé dans les serres agricoles en Algérie, présente une alternative au verre en raison de son faible prix et de ses propriétés physiques et thermiques. Il permettra la réduction des coûts d'investissement initiaux, rendant la CCS plus attrayante sur le plan économique, puisque le coût du collecteur représente jusqu'à 40 % du coût global de la CCS [86].

Cependant, la dégradation du film altère ses performances mécaniques et photothermiques et réduit par conséquent l'efficacité globale du système. Dans la présente étude, le vieillissement naturel est réalisé par l'exposition du film à l'environnement réel. Les différents modèles de simulation issus de la littérature supposent les propriétés thermo-physiques du matériau constituant le revêtement du collecteur constantes sans aucune perte de production d'énergie, même en utilisant des couvertures en polymère dans les montages expérimentaux.

La présente étude examine l'impact du vieillissement naturel sur les performances de l'installation CCS en analysant l'utilisation d'un film PEBD stabilisé, comme couvercle du capteur solaire, afin de :

- ✓ Démontrer l'impact du vieillissement sur les performances énergétiques de la CCS et ;
- ✓ Améliorer l'efficacité économique de ces centrales électriques en utilisant des matériaux moins chers.

Le PEBD étant sujet à la détérioration, l'effet du vieillissement sur les propriétés initiales du matériau utilisé et son impact sur le fonctionnement et le rendement global du système sont analysés dans la présente étude.

Une serre agricole a été conçue pour exposer le film étudié, sur une durée de 3 ans, à des contraintes environnementales similaires aux conditions locales sud

méditerranéennes, ainsi le vieillissement naturel a été privilégié au vieillissement accéléré.

Vu que la structure massive du CS, nécessite un investissement initial important, l'utilisation d'un film plastique produit localement (Polyéthylène basse densité : PEBD) comme couverture de collecteur de la CCS permet de réduire le coût d'investissement. En effet, la combinaison d'un matériau très peu coûteux avec une solution d'une simple technicité rend le dispositif plus attractif. Néanmoins, le PEBD étant sujet à la détérioration, l'effet du vieillissement sur les propriétés initiales du matériau utilisé et son impact sur le fonctionnement et le rendement global du système doit être analysé.

Les méthodes d'essai utilisées pour les plastiques en général sont également appliquées aux couvertures de serre, malgré d'importantes différences fonctionnelles. Les protocoles des tests seront décrits dans ce qui suit.

❖ Description du collecteur de la CCS

Le collecteur solaire (CS) est la partie employée pour produire l'air chaud par effet de serre. Sa hauteur varie de 2 à 6 mètres et recouvre une vaste surface de plusieurs milliers de m² (Figure III.6).

Avec une toiture en verre ou en film plastique transparent, le CS couvre une très grande surface de plusieurs milliers de mètres carrés. Le choix du matériau recouvrant ce type de capteur a un impact direct et important sur l'investissement initial, d'où l'importance du choix du matériau à utiliser [12].

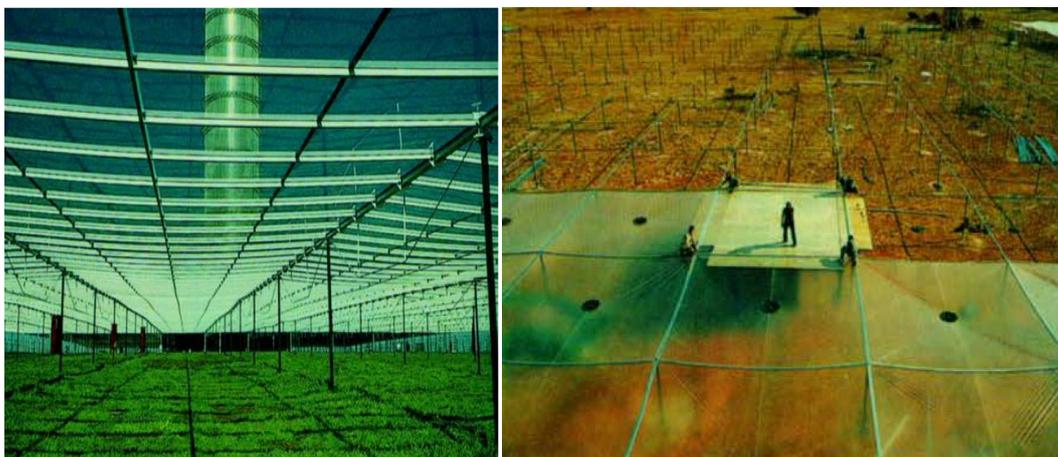


Figure III.6. Prototype de tour solaire de Manzanares en Espagne (années 1980) [12]. Le collecteur : a) En verre b) En plastique

Dans ce contexte, le film PEBD produit localement et largement utilisé dans les serres agricoles en Algérie, peut être intéressant comme solution alternative au verre en raison de son faible prix et de ses propriétés physiques et thermiques.

La large utilisation des plastiques est due en partie à leur faible prix et au fait qu'ils présentent une multitude de forme avec des propriétés spécifiques. Ils peuvent être rigides ou flexibles, transparents ou opaques, électriquement isolants ou semi-conducteurs, insensibles à l'humidité et relativement légers [120].

De plus, leur procédé de fabrication permet l'obtention de formes complexes sans usinage. Cependant, les polymères se détériorent souvent dans les applications extérieures. La cause la plus importante de dégradation est l'irradiation solaire, d'où la durée de vie des plastiques dépend du climat. Plus la température est élevée, plus les réactions chimiques sont rapides, ce qui rend les plastiques vulnérables dans les climats chauds [118].

III.3 Protocole expérimental

La couverture du capteur solaire des CCS est soumise à des contraintes mécaniques et climatiques (irradiation, vent, pluie, gradients de température élevés...) ce qui accélère sa dégradation. Les performances d'un capteur solaire (CS) sont influencées par ces phénomènes, qui affectent ainsi le rendement global du système. Dans la présente étude et dans un premier lieu, la caractérisation technique du film plastique proposé comme couverture de la CCS a été établie.

III.3.1. Vieillessement naturel des films de polyéthylène

L'inconvénient majeur des matériaux à base de polymères reste leur forte sensibilité aux conditions atmosphériques due à la dégradation des chaînes macromoléculaires ou des interfaces sous l'action du soleil, la chaleur, l'humidité et l'oxygène. L'initiation de cette dégradation est provoquée essentiellement par l'absorption d'énergie radiative du soleil conduisant à des réactions photochimiques spécifiques, telle que la rupture des chaînes, la peroxydation et la réticulation. Quel que soit le type de la réaction, elle conduit à des changements indésirables dans les propriétés tels que : La coloration, la fissuration, la diminution de la température de

transition vitreuse, le changement de la résistance et de l'allongement à la rupture ...etc., réduisant fortement la durée de vie de ces matériaux. Le rayonnement solaire et plus particulièrement le rayonnement ultraviolet est le principal facteur à l'origine de la dégradation des polymères en milieu naturel [118].

Pour privilégier le vieillissement naturel, le film a été utilisé dans une serre montée et installée dans la région de Boumerdès (45 km à l'est d'Alger) et exposé à des contraintes environnementales similaires à celles d'une CCS installée dans la même région (Figure. III.7). Le climat de Boumerdès est classé comme chaud et tempéré (Climat sud méditerranéen).

A différents intervalles de temps d'exposition, des échantillons ont été testés, jusqu'à l'âge de 3 ans. Des tests mécaniques, rhéologiques, physiques, spectroscopiques, photo-thermiques et de dureté, ont été réalisés sur des échantillons de films de même nature.



Figure. III.7. Serre agricole et PEBD utilisé comme couverture d'une serre agricole à Boumerdès.

III.3.2. Matériaux étudiés

- Film PEBD jaunâtre

Le matériau étudié dans ce travail est un polyéthylène à basse densité (PEBD), largement utilisé dans les serres agricoles. C'est un matériau thermoplastique semi-cristallin. Il est fabriqué sous sa forme de film par la société Sarl M.A.M Plastique située à Oued Smar (Alger).

III.3.3. Techniques expérimentales d'analyse

La durée de vie d'un film dépend de ces caractéristiques techniques et des conditions d'utilisation, ainsi que de la qualité et des combinaisons particulières des stabilisants U.V et des antioxydants qui le protègent contre les effets nocifs de la lumière UV et de la chaleur pour des périodes très longues [110, 125]. Les différents essais réalisés pour sa caractérisation sont :

III.3.3.1. Essais mécaniques

Les éprouvettes ont été préparé selon la norme ISO/R291 [130].

✓ Préparation des éprouvettes

Les éprouvettes sont découpées au moyen d'emporte-pièces approprié et par une presse, pour obtenir une découpe parfaite (Figure III.8).



Figure III.8. La presse, la découpe des éprouvettes et l'emporte-pièce.

Les caractéristiques des films varient selon l'orientation. Dans le présent travail les films sont testés dans les deux directions (longitudinale et transversale).

❖ Mesure des dimensions

Après découpage, les largeurs des éprouvettes sont mesurées à l'aide d'un pied à coulisse. Les épaisseurs sont mesurées à l'aide d'un micromètre selon la norme ISO 4591 pour les films très minces [131].



Figure III.9. Le pied à coulisse et Le micromètre.

Les moyennes de la largeur (L) et de l'épaisseur (E) pour chaque éprouvette, prises entre trois à dix différents points, de la partie calibrée sont enregistrées.

❖ Essai de traction

L'essai de traction est l'essai mécanique le plus fréquemment utilisé. Il consiste à soumettre une éprouvette du matériau étudié à une contrainte de traction et de mesurer son allongement. La courbe contrainte-déformation permet l'analyse du comportement mécanique du matériau [131].

❖ Appareillage

Les essais ont été réalisés sur une machine de traction-compression de capacité 50 kN de marque ZWICK-Z050. La machine se compose d'un bâti fixe, et d'une traverse mobile (Figure III.10).



Figure III.10. Laboratoire Polymère IAP / La machine de traction.

❖ **Logiciel de pilotage**

TestXpert est un logiciel d'essai universel utilisé depuis 1996 pour le test des matériaux composites ou pièces fines. La plage d'utilisation du logiciel TestXpert couvre les machines d'essais traditionnelles de la gamme ZWICK (machine de traction, compression et flexion) [132].

❖ **Mode opératoire**

- Tout d'abord l'éprouvette est placée entre les mâchoires de la machine d'essai, de façon à ce que la distance entre les mors soit égale à 100 mm. Les marques de références doivent être dans la partie centrale et disposées symétriquement entre les mors. Les mors sont bien serrés pour éviter tout glissement et l'endommagement des éprouvettes ;
- La vitesse de l'essai est réglée à 20 mm/min ;
- Les valeurs moyennes L et E de l'éprouvette sont introduites via l'interface du logiciel ;
- La mise en marche et de l'opération de mesure ;
- L'enregistrement des résultats, via le logiciel TestXpert, après la rupture de l'éprouvette.

Les figures III. 11 et III.12 montrent respectivement l'emplacement de l'éprouvette dans la machine et les résultats après rupture de l'éprouvette.

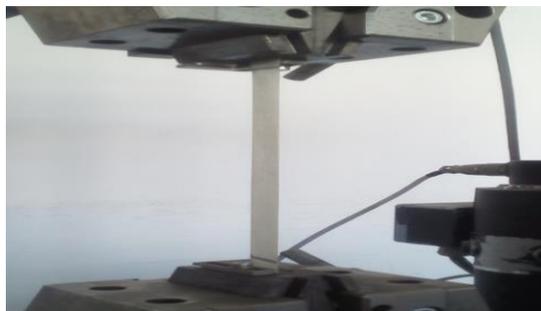


Figure III.11. Eprouvette placée dans la machine.

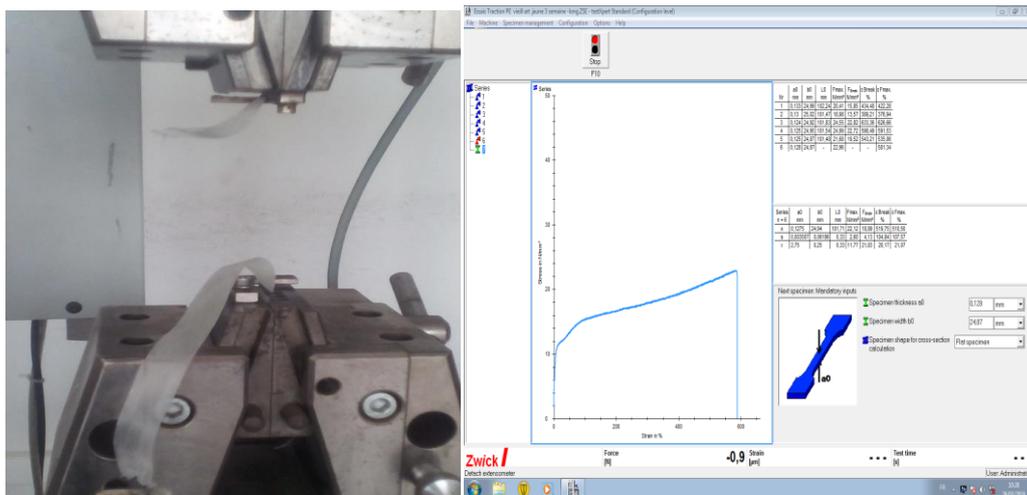


Figure III.12. Résultats après rupture de l'éprouvette.

❖ **La courbe obtenue**

La courbe tracée lors de l'essai traduit la contrainte en fonction de l'allongement : $\sigma = f(\epsilon)$. Les grandeurs obtenues de la courbe sont la contrainte à la rupture et l'allongement à la rupture, exprimées respectivement par :

$$\sigma_R = \frac{F_R}{S} \quad \text{et} \quad \epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Où :

F_R : Force à la rupture en Newton.

S : Surface de la partie calibrée de l'éprouvette en mm^2 .

σ_R : Contrainte à la rupture en N/mm^2 .

ϵ : Allongement relatif en %.

ΔL : $L - L_0$ avec L la longueur de l'échantillon testé et L_0 représente la longueur initiale.

❖ **Détermination du module de Young**

Le module de Young (ou module d'élasticité) est une mesure du rapport entre la contrainte et la variation de la déformation. Il représente la pente de la partie en ligne droite d'une courbe de contrainte-déformation. En ce qui concerne les tests de traction, il peut être appelé Module de Traction. Il est proportionnel à la pente de la droite dans la zone élastique et est obtenu par l'expression :

$$E_m = \frac{\text{Différence de contrainte entre deux points sur la droite tangente à la portion initiale de la courbe}}{\text{Différence de déformation entre les deux même points}}; E_m = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

❖ Essai de Dureté

Afin de compléter la caractérisation de nos échantillons de polyéthylène à basse densité, des essais de dureté shore A selon la norme ISO 868-1978 ont été réalisés. Selon la norme internationale ISO 868-1978, la dureté est mesurée au moyen de deux types de duromètres : Le duromètre type A, utilisé pour les plastiques souples et le duromètre type D pour les plastiques durs [131]. Dans notre cas, le duromètre « Shore A » a été utilisé. Comme indiqué par la norme, il est préconisé pour des duretés comprises entre 30 et 85.

❖ Appareillage

Le dispositif est constitué de :

- **Pied presseur** : Percé d'un trou de diamètre compris entre 2.5 et 3.5mm, centré à au moins 6mm des bords du pied.
- **Pénétreur** : Constitué d'une barre d'acier trempé de diamètre compris entre 1.10 et 1.40mm.
- **Appareil indicateur** : Permettant de lire directement la valeur de l'enfoncement du pénétreur.
- **Ressort étalonné** : Pour appliquer une force sur le pénétreur (duromètre type A) selon l'équation $F = 549 + 75.12H_A$ avec F La force appliquée en milli newtons ; H_A : La dureté lue sur le duromètre [130].

La Figure III.13 montre une photo d'un duromètre.



Figure III.13. Photo d'un duromètre.

❖ Les éprouvettes

Les dimensions des éprouvettes doivent être telles qu'elles permettent d'effectuer des mesures à au moins 12mm de chaque bord sur une surface plane et une épaisseur minimale de 5mm. Il est recommandé de faire plusieurs couches de film pour avoir l'épaisseur demandée (40 couches pour notre cas). La Figure III.14 montre une photo d'éprouvettes utilisées pour les essais de dureté.

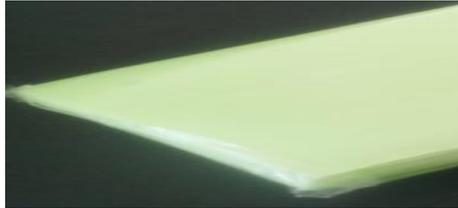


Figure III.14. Eprouvettes pour essais de dureté.

❖ Mode opératoire

- 1- L'éprouvette est placée sur une surface rigide, plane et horizontale.
- 2- Le duromètre est tenu en position verticale 12mm au bord de l'éprouvette.
- 3- Un poids de 1kg est centré sur l'axe du pénétrateur.
- 4- Le pied presseur est appliqué sur l'éprouvette aussi rapidement que possible, sans choc.
- 5- Une pression est appliquée juste pour obtenir un contact étroit entre le pied presseur et l'éprouvette.
- 6- La valeur pointée par l'indicateur de l'appareil est lue au bout de 15 ± 1 s.
- 7- Les mesures de dureté sont effectuées en cinq emplacements différents de l'éprouvette, distants au moins 6mm. La moyenne représente la valeur mesurée.

La Figure III.15 montre le dispositif utilisé pour la mesure de la dureté.



Figure III.15. Mesure de dureté.

III.3.3.2. Essais thermiques

Le vieillissement thermique des thermoplastiques se manifeste par une dégradation irréversible de leurs propriétés physiques, chimiques et mécaniques. Ce phénomène de dégradation traduit la « durée de vie » du matériau, c'est-à-dire le temps nécessaire pour qu'une propriété atteigne un seuil critique en dessous duquel le matériau n'a plus les propriétés attendues [130]. Cependant, deux types de vieillissement sont possibles : Vieillissement naturel et vieillissement accéléré ou artificiel.

❖ Vieillissement accéléré (artificiel)

Le vieillissement accéléré dans le laboratoire permet de prédire la durée de vie d'un matériau. Pour ce faire, de hautes températures sont souvent utilisées, et les données recueillies sont extrapolées pour prédire le comportement du matériau à des températures d'usage [131].

❖ Appareillage :

Une étuve à circulation d'air a été utilisée pour la simulation du vieillissement thermique des polymères.

❖ Mode opératoire :

- 1- Fixer la température à 100 °C et attendre sa stabilisation.
- 2- Préparer les échantillons : 100 échantillons de film (50 dans le sens longitudinal et 50 dans le sens transversal).
- 3- suspendre les échantillons dans les étagères de la machine.

La figure III.16 montre une photo de l'emplacement des échantillons dans l'étuve.



Figure III.16. Installation des échantillons dans l'étuve.

III.3.3.3. Tests physiques et rhéologiques

❖ Détermination de l'indice de fluidité à chaud (MFI)

L'indice de fluidité à chaud ou « MFI » est un moyen de caractérisation des polyoléfines. Dans le cas du polyéthylène, il est plus pratique de mesurer sa fluidité à chaud car il n'est pas soluble dans les solvants à froid. Le polymère est ainsi introduit dans un capillaire rhéomètre au-dessus duquel est appliqué un poids bien déterminé tout en fixant la température (Figure III.17).



Figure III.17. Appareillage de mesure de l'Indice de Fluidité (Melt Flow Index MFI)

Le débit « flow Rate » connu sous le nom « MFI » est mesuré par la suite.

- La température de travail est de $190^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$.
- Le poids du piston plus charge est de 2160g.

❖ **La norme internationale de l'essai :**

La norme internationale, ISO1133-1918(F), spécifie la méthode de détermination de l'indice de fluidité à chaud des thermoplastiques, dans des conditions définies de températures et de pression. Cette méthode peut être utilisée pour caractériser la vitesse d'écoulement à l'état fondu de cette matière [131]. L'appareillage se compose principalement d'un plastomètre d'extrusion opérant à la température fixée. Sa forme générale est représentée à la Figure III.18.

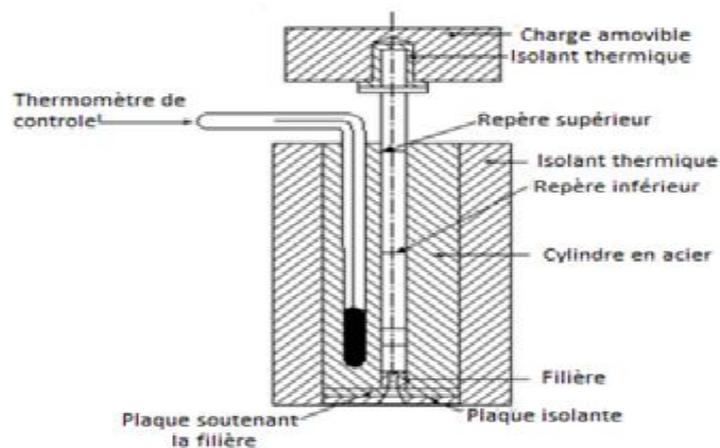


Figure III.18. Composants d'un plastomètre.

Le thermoplastique contenu dans un cylindre vertical en métal est extrudé à travers une filière au moyen d'un piston chargé [131].

❖ **Mode opératoire :**

- 1- L'appareil est réglé à la température à 190°C ensuite nettoyé par du polyéthylène (neuf) blanc.
- 2- La température est contrôlée au moyen de thermomètre placé dans le cylindre pour obtenir 190°C. Elle est maintenue durant au moins 15min.
- 3- 4 à 8 g de l'échantillon sont chargés dans le cylindre.
- 4- Le piston est introduit dans le cylindre. Après 4min, le piston est chargé d'un poids de 2160 g.
- 5- Sous l'action de la pesanteur le piston s'enfonce dans le cylindre jusqu'à ce que le repère inférieur atteigne 5 à 10mm (au-dessus) le bord supérieur du cylindre. La durée de cette opération ne doit pas dépasser 1min.

6- Une fois le repère inférieur du piston atteint le bord supérieur du cylindre la première matière extrudée est éliminée et le chronomètre est déclenché.

7- Par la suite, la matière extrudée est recueillie successivement à des intervalles de temps dépendant de l'indice de fluidité à chaud de sorte que la longueur d'un extrudat coupé soit comprise entre 10 et 20mm.

8- Arrêt du découpage une fois le repère supérieur de la tige du piston atteint le bord du cylindre.

9- Pesage individuel des extrudats et calcul de la masse moyenne.

Les figures III.19 et III.20 montrent respectivement l'opération de nettoyage de l'appareil ainsi que le réglage de la température.



Figure III.19. Opération de nettoyage de l'appareil.



Figure III.20. Réglage de la température.

❖ L'expression donnant l'indice de fluidité est:

$$MFI = \frac{600 \cdot m}{t}$$

Où :

m : masse de l'extrudat en grammes.

t : temps d'écoulement en seconde.

« MFI » Melt Flow Index en g/10min.

Les figures III.21 et III.22 montrent le découpage des extrudats et une vue d'extrudats.



Figure III.21. Découpage des extrudats



Figure III.22. Photo des extrudats.

- ❖ **Détermination de la masse volumique**
 - **Mesure de la densité par pesée hydrostatique**

C'est une méthode utilisée pour déterminer la masse volumique des solides et des liquides. Cette technique de densitométrie repose sur le principe de la poussée d'Archimède. En effet, les échantillons dont on veut déterminer la masse volumique sont pesés successivement à l'air libre et dans un liquide de densité inférieure à celle du matériau de l'échantillon. Dans le présent cas, le milieu choisi est le méthanol, de masse volumique $\rho_{\text{méthanol}} = 0,79 \text{ g/cm}^3$ à 23 °C, tandis que l'air à cette même température possède une masse volumique de $\rho_{\text{air}} = 1,204 \text{ g/cm}^3$ [130].

❖ Appareillage

Le dispositif est constitué d'une balance METTLER Toledo (référence AB54-S, précision de +/- 0,01 mg) supportée par des amortisseurs qui assurent sa stabilité mécanique. La balance est placée dans une enceinte régulée en température. Les pesées dans le méthanol sont effectuées à l'aide d'un bécher à double paroi.

Les figures III. 23 et III.24 montrent respectivement une photo d'un densimètre ainsi que l'installation de ses accessoires.



Figure III.23. Photo d'un densimètre.

❖ Les éprouvettes

Les extrudats de (MFI) sont utilisés comme échantillon pour réaliser le test.

❖ Mode opératoire

- 1- Mettre le densimètre en équilibre.
- 2- Remplir le bécher de 250ml de méthanol.
- 3- Introduire le bécher, le plateau et le tamis (immergé dans le méthanol) dans le densimètre.

- 4- Mettre le 1^{er} extrudât sur le plateau et noter la valeur A1.
- 5- Calibrer le densimètre.
- 6- Enlever l'extrudat précédent et peser dans le tamis immergé dans le méthanol et noter la valeur P1.
- 7- Refaire les mêmes étapes avec 5 extrudat.



Figure III.24. Installation des accessoires du densimètre.

Les figures III. 25 et III.26 montrent la mesure du poids d'extrudat non immergé et d'extrudat immergé.



Figure III.25. Mesure de poids d'extrudât non immergé.



Figure III.26. Mesure du poids de l'extrudat immergé.

❖ **Expression donnant la masse volumique de l'extrudat :**

$$\rho_e = \rho_{\text{Méthanol}} * \left(\frac{A}{P} \right)$$

Avec :

$$\rho_{\text{Méthanol}} = 0.79 \text{ g/cm}^3$$

A : poids de l'extrudat non immerger dans le méthanol.

P : poids de l'extrudat immergé totalement dans le méthanol.

ρ_e : La masse volumique de l'extrudats en g/cm^3 .

❖ **Détermination de la température de fusion**

La mesure de la température de fusion permet de vérifier la pureté d'un composé chimique. Différents appareils de mesure existent, cependant le banc Kofler est le plus communément rencontré en laboratoire.

❖ **Appareillage**

Le banc Kofler est une plaque constituée d'un alliage métallique recouvert d'un acier anticorrosion. L'alimentation électrique permet le chauffage d'une des extrémités à environ 260 °C. L'autre extrémité n'est pas chauffée, il s'établit donc un gradient de température le long de la plaque [130].

Le solide dont on cherche à déterminer la température de fusion est déposé sur le banc puis poussé à l'aide d'une spatule fournie avec le banc. Un curseur rabattable permet de repérer la position à laquelle le solide fond. Il est relié à un chariot mobile horizontalement qui permet de lire la valeur de la température de fusion grâce à un index dont l'extrémité indique la température sur une échelle graduée. L'index est lui-même mobile verticalement, ce qui permet d'étalonner le banc [130].

La figure III.27 montre une vue d'ensemble d'un Banc Kofler.

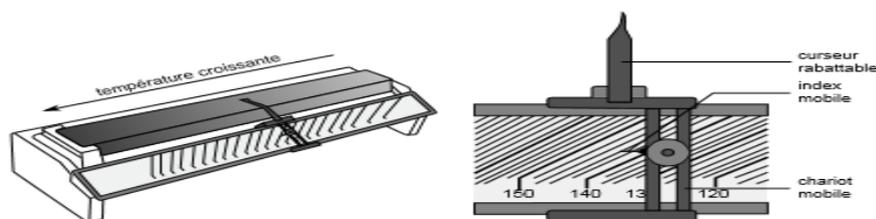


Figure III.27. Vue d'ensemble d'un Banc Kofler.

❖ Etalonnage du banc

Avant chaque mesure il est nécessaire d'étalonner le banc Kofler. Pour cela un solide étalon, dont la température de fusion est tabulée, est utilisé. Si la température de fusion du produit à caractériser est connue, le solide étalon est choisi tel que sa température de fusion soit proche de celle du produit que l'on veut étudier. Le banc doit être allumé au moins 30 min avant son utilisation dans une pièce sans courants d'air.

Dans notre cas, la température de fusion de PEBD est de 85 à 140 °C, donc sont choisis l'Acétanilid de température de fusion de 114.5 °C avec le Phenacetin de 134.5 °C, comme des solides étalons (Figure III.28).



Figure III.28. Les solides étalons.

- Déposer une faible quantité de solide étalon à une dizaine de degrés en dessous de sa température de fusion ;
- Déplacer les grains du solide étalon par petites touches successives au moyen de la spatule. Le déplacement vers la zone chaude, doit être suffisamment lent pour permettre l'établissement de l'équilibre thermique entre le banc et le solide. Faire avancer les grains en essayant de garder une ligne droite au milieu du banc. Une fois que la fusion commence, il est obtenu une partie du composé à l'état liquide et l'autre à l'état solide. Cela augmente la précision de la lecture ;
- Repérer la limite de fusion à l'aide du curseur rabattable en le déposant à la frontière entre la partie solide et la partie fondue ;
- Déplacer l'index verticalement de sorte à amener son extrémité sur la valeur de la température de fusion du solide étalon ;
- Nettoyer le banc.

❖ Mode opératoire

- 1- Procéder comme décrit ci-dessus en remplaçant le solide étalon par des petits morceaux de film PEBD jaune ;
- 2- Positionner le curseur à l'endroit où le solide fond.

- 3- Lire la température de fusion du solide à l'aide de l'index mobile (Figure III.29).



Figure III.29. Lecture de température de fusion.

- 4- Nettoyer le banc avec un morceau de coton imprégné d'éthanol. Cette méthode de nettoyage est à proscrire entre l'étalonnage et la mesure puisque l'évaporation de l'éthanol au contact de la plaque chaude refroidit le banc et le retour à l'équilibre thermique peut prendre plusieurs minutes (Figure III.30).
- 5- Éteindre le banc.



Figure III.30. Nettoyage du Banc Kofler.

❖ Tests spectroscopiques

➤ Spectroscopie UV-Visible

La spectroscopie UV-Visible est la mesure de l'absorbance de lumière à une longueur d'onde spécifique dans un échantillon.

La spectrophotométrie correspond à l'étude des variations de grandeurs photométriques spectrales ou de leur équivalent énergétique résultant de l'interaction du rayonnement avec une substance placée sur le faisceau. Le domaine de longueur d'onde de l'UV se situe entre 10 nm à 400 nm, celui du visible se situe entre 400 nm à 800 nm [130].

❖ **Appareillage**

L'appareillage utilisé est un spectromètre UV-Visible de marque Perkin Elmer lambda 25 (Figure III.31). Il est doté d'un logiciel de pilotage UV Wind.



Figure III.31. Spectromètre U.V-Visible. Laboratoire de spectroscopie-moléculaire, département CSE/ IAP de Boumerdès.

Les éléments de base du spectromètre sont :

- Une base de spectromètre ;
- Une source lumineuse ;
- Un support pour l'échantillon ;
- Un monochromateur.

❖ **Les éprouvettes**

Les échantillons utilisés sont découpés sous forme d'éprouvettes (3 X 1 cm).

❖ **Mode opératoire**

- Préparation des échantillons et mise en marche du spectromètre,
- Etalonnage du spectromètre à la même longueur d'onde de l'essai.
- Fixation de la longueur d'onde et insertion d'une cuve vide (à blanc) dans la chambre de prélèvement

- Mise en place d'une cuve contenant l'échantillon à mesurer dans le support du spectromètre.
- Le résultat s'affiche à l'écran sous forme de spectre ou bien un graphe qui présente l'absorbance en fonction de la longueur d'onde.

La figure III.32 montre la mesure de l'U.V- Visible.



Figure III.32. Mesure l'UV-Visible.

➤ Spectrométrie IR à transformée de Fourier (IRTF)

La lumière du soleil se compose de différentes longueurs d'onde qui sont combinées pour produire « la lumière du jour », c'est ce que l'on voit chaque matin. La lumière infrarouge se situe dans les longueurs d'onde inférieure du spectre. Elle n'est pas visible à l'œil humain, mais c'est ce qui produit la chaleur que nous ressentons durant les belles journées ensoleillées.

La spectrométrie infrarouge est la mesure de la diminution de l'intensité du rayonnement traversant un échantillon en fonction de la longueur d'onde. Le rayonnement infrarouge dispense suffisamment d'énergie pour stimuler les vibrations moléculaires à des niveaux d'énergie supérieurs. La spectrométrie infrarouge est utilisée principalement pour l'analyse qualitative d'une molécule en mettant en évidence la présence de liaisons entre les atomes (fonctions et groupements).

La majorité des applications se situe entre 2,5 et 15 μm soit en nombre d'ondes de 4000 cm^{-1} à 670 cm^{-1} (IR moyen).

Un spectre infrarouge est traditionnellement présenté en transmission (fraction de l'intensité transmise par rapport à l'intensité incidente) exprimée en pourcentage et l'axe

des abscisses en fonction du nombre d'onde (inverse de la longueur d'onde), sur un axe dirigé vers la gauche [130].

❖ **Appareillage**

L'essai a été effectué au moyen d'un spectromètre infrarouge Shimadzu IRTracer-100 au niveau du laboratoire de spectroscopie-moléculaire, département CSE/ IAP de Boumerdes (Figure III.33).

❖ **Les éprouvettes**

Les échantillons utilisés sont découpés sous forme d'éprouvettes du (3 X 2 cm) vierge et vieillis naturel.

❖ **Mode opératoire**

L'échantillon à analyser est inséré dans le spectromètre en utilisant un porte échantillon (Figure III.33).



Figure III.33. Appareillage de spectrométrie IR.

La chambre de mesure doit être purgée afin d'éliminer la présence de tout autre constituant susceptible de fausser les mesures.

Le déroulement de l'essai est complètement automatisé, un PC relié directement au spectromètre permet l'acquisition et le traitement des données. Cette analyse est effectuée à l'aide d'un logiciel **eFTIR**.

❖ **Mesure du rayonnement solaire incident pour un dispositif de serre thermique**

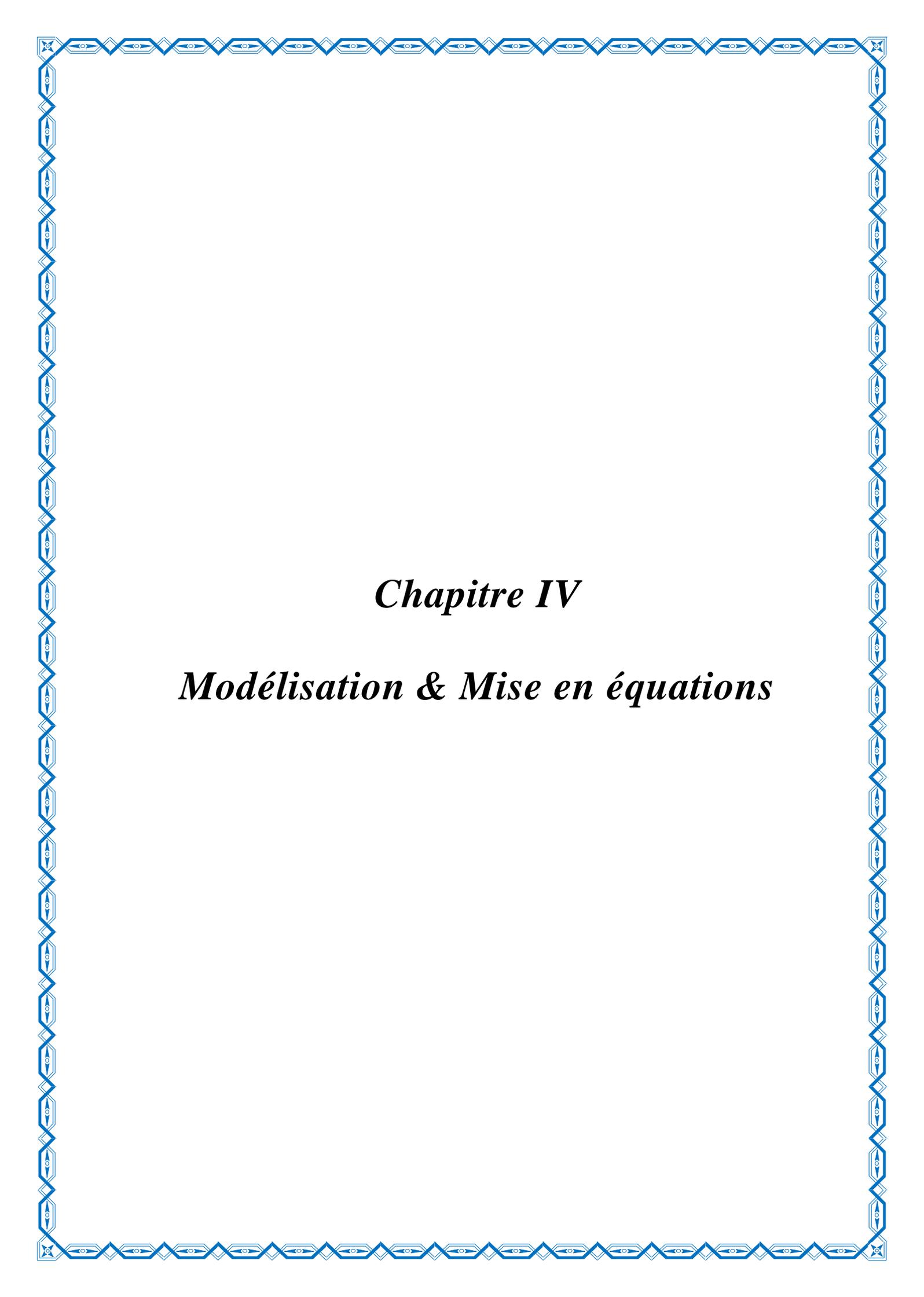
La connaissance du rayonnement solaire est essentielle à la détermination des performances des systèmes liés au solaire, pour cela des mesures de l'intensité du rayonnement solaire incident ont été effectuées. L'objectif étant d'élaborer une comparaison entre les films à différents âges afin de déterminer l'évolution de la transmittance avec la dégradation du matériau.

L'essai a été effectué à Boumerdes, le 18 juillet 2019, de l'aube au coucher du soleil. Les mesures relevées depuis le lever du soleil jusqu'au coucher, ont permis la mesure du rayonnement incident direct et le rayonnement solaire incident à travers les films de différents âges. L'appareil utilisé pour mesurer le rayonnement est un pyranomètre de type PYR 1307 (Figure III.34) et le dispositif expérimental pour la mesure du rayonnement incident.



Figure III.34. Photo d'un pyranomètre.

Les résultats des différents essais et test décrits dans ce chapitre seront présentés et discutés dans le chapitre V. La modélisation du système est décrite dans le chapitre suivant.



Chapitre IV

Modélisation & Mise en équations

Chapitre IV : Modélisation et Mise en Equations

IV.1 Introduction

Les différents modèles mathématiques présentés dans la littérature ont permis l'évaluation des performances énergétiques globales des CCS [5]. La plupart des études menées sur ce type de système se sont focalisées sur la détermination du rendement de ces centrales en fonction des paramètres caractéristiques ainsi que sur l'analyse de l'interdépendance des différentes parties constituantes des CCS en définissant les paramètres influents sur la puissance générée. Cependant, afin de mettre en évidence l'impact du vieillissement, un modèle plus élaboré de la CCS est toutefois nécessaire.

IV.2 Modélisation Mathématique

IV.2.1. Hypothèses simplificatrices

La modélisation mathématique est basée sur les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Régime stationnaire ;
- L'effet de la poussière, des impuretés et de l'ombre portée sur l'absorbeur sont négligeables ;
- Le collecteur est considéré de forme circulaire ;
- L'effet d'évaporation dans le collecteur est négligeable ;
- L'écoulement est axisymétrique ;
- Le gradient transversal de la température dans le collecteur est négligeable ;
- L'air est considéré comme étant un gaz parfait ;
- L'unique gain de chaleur dans le système est le gain net acquis dans le collecteur ;
- Les pertes par frottement dans le collecteur et la cheminée sont considérées négligeables.

IV.2.2. Cycle Thermodynamique de la CCS

Le diagramme entropique (Figures IV.1 et IV.2) illustre le cycle parfait de l'air dans une centrale à cheminée solaire « CCS » :

* (2-3) : Représente l'évolution à l'intérieur du collecteur et est considérée isobare

- * (3-4) : Evolution à travers la turbine et la cheminée, considéré adiabatique
 - L'extraction à travers la turbine (3-3te), n'est pas totale, puisqu'une partie de cette puissance est nécessaire pour soulever l'air à travers la cheminée (3te-4).
- * (4-1) : Refroidissement de l'aire à la sortie de la cheminée vers l'atmosphérique à pression constante
- * (1'-2) : Compression isentropique durant l'écoulement d'air de l'atmosphère à l'entrée du collecteur

Afin de déterminer le rendement de la CCS, une modélisation des différentes parties de la centrale est nécessaire.

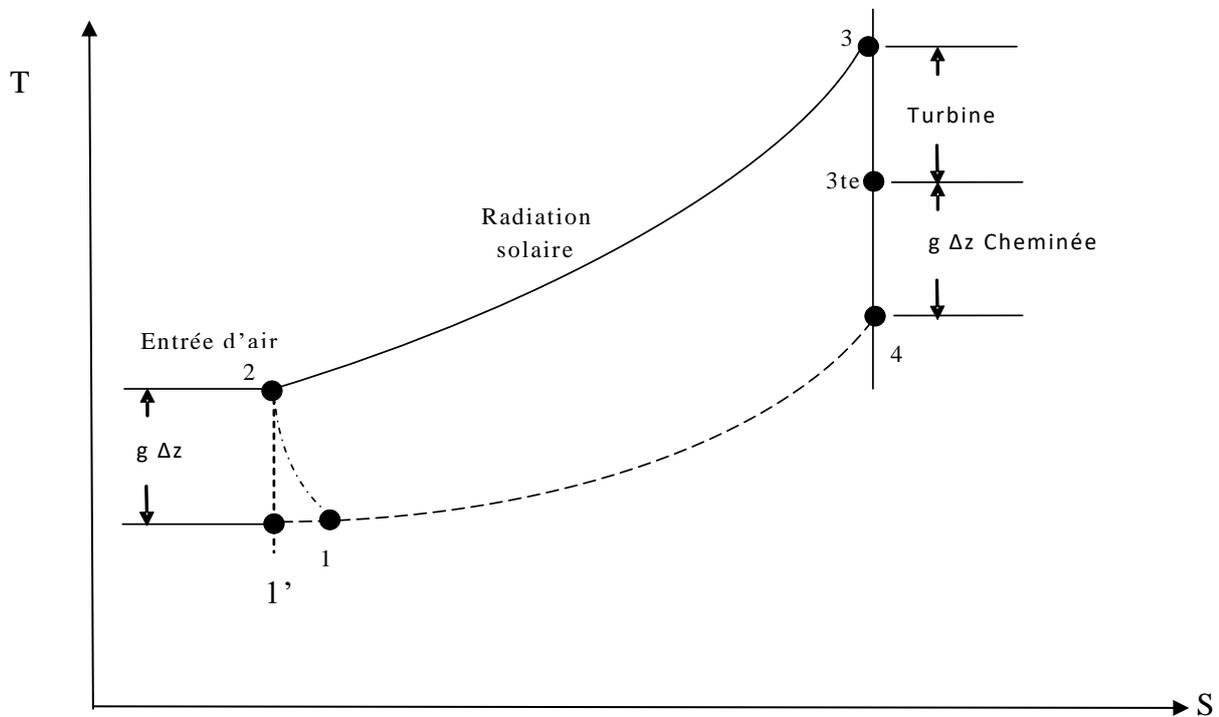


Figure IV.1. Diagramme Température – Entropie pour un cycle à air

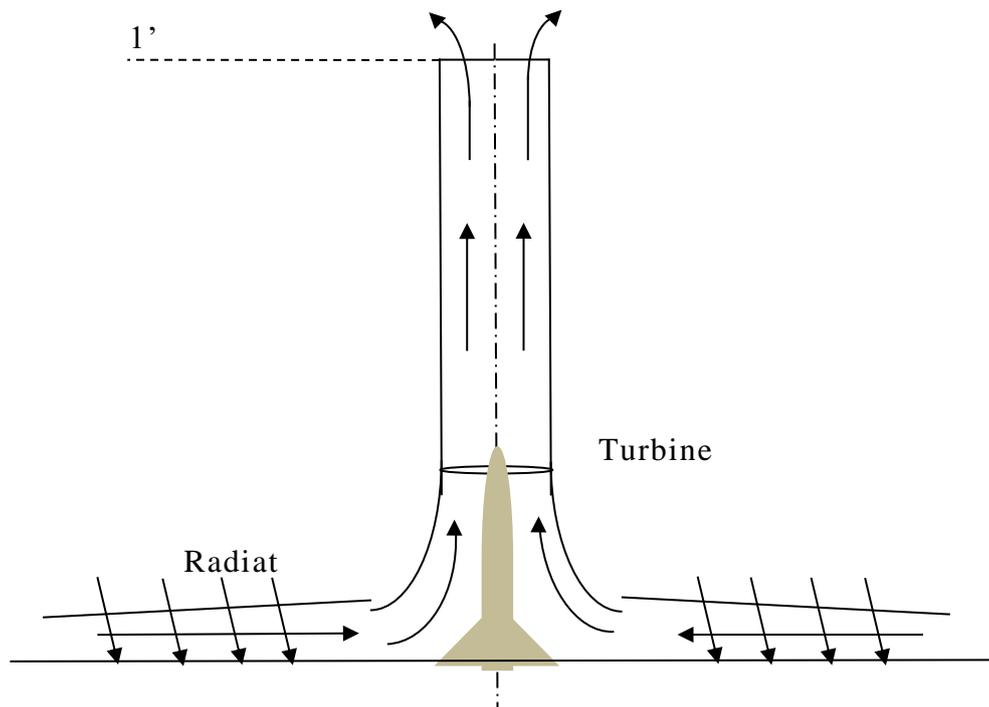


Figure IV.2. Schéma d'une CCS montrant les différents points d'évolution du cycle

IV.2.3. Rendement thermique de la CCS

Le rendement thermique de la centrale CCS est défini par :

$$\eta_{ccs} = \frac{P_{arbre}}{P_{solaire}} \quad (4.1)$$

Où : P_{arbre} , représente la puissance à l'arbre de l'aéro-turbine et $P_{solaire}$ la puissance solaire reçu par le collecteur de CCS.

Le rendement thermique de la centrale peut s'exprimer aussi par la multiplication des rendements respectifs de ses constituants :

$$\eta_{ccs} = \eta_{coll} \cdot \eta_{tur} \cdot \eta_{ch} \quad (4.2)$$

IV.2.4. Modélisation du collecteur

Le rendement thermique du collecteur est représenté par la fraction du gain thermique de l'air sous le collecteur sur la quantité de chaleur incidente.

$$\eta_{coll} = \frac{\dot{Q}}{A I_0} \quad (4.3)$$

Le gain en chaleur du fluide caloporteur, dans notre cas l'air sous le collecteur, s'exprime par :

$$\dot{Q} = \eta_{coll} (A I_0) \quad (4.4)$$

Avec :

\dot{Q} : Le flux de chaleur reçu par le fluide (l'air) au niveau du collecteur ;

η_{coll} : Rendement thermique du collecteur ;

A : Surface du collecteur ;

I_0 : Rayonnement solaire incident par unité de surface

En élaborant le bilan énergétique sur un volume de contrôle, l'énergie reçue par le fluide, entre l'entrée et la sortie du collecteur peut s'exprimer ainsi :

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T \quad (4.5)$$

\dot{m} : Débit massique de l'air

c_p : Capacité calorifique de l'air

ΔT : Différence de température entre l'entrée et la sortie du collecteur.

Le débit massique d'air peut s'exprimer en fonction de la vitesse :

$$\dot{m} = \rho_{ch} v_{ch} a_{ch} \quad (4.6)$$

Où :

ρ_{ch} : Masse volumique de l'air ;

v_{ch} : Vitesse de l'air ;

a_{ch} : Section de la cheminée.

D'autre part, le gain thermique peut s'exprimer en fonction de paramètres caractéristiques du collecteur

$$\dot{Q} = \tau \alpha A I_0 - \beta \Delta T A \quad (4.7)$$

Où :

τ : Coefficient de transmittance solaire du collecteur ;

α : Coefficient d'absorption effective du rayonnement solaire du collecteur ;

β : Coefficient de perte énergétique englobant les pertes par convection, par radiation et par stockage du sol.

En combinant les équations (4.5, 4.6 et 4.7) on obtient :

$$\left(\tau\alpha - \frac{\beta \Delta T}{I_0}\right) A I_0 = \rho_{ch} v_{ch} a_{ch} c_p \Delta T \quad (4.8)$$

IV.2.5. Modélisation de la cheminée

Le rôle de la cheminée est de convertir la chaleur du fluide, \dot{Q} , acquise dans le collecteur en énergie cinétique (Courant convectif) et en énergie potentielle (Chute de pression au niveau de la turbine). Le gain en température au niveau du collecteur est transformé en force motrice (Voir schéma représentatif Figure. IV.2).

La différence de pressions entre l'entrée (La base de la cheminée) et la sortie de la cheminée est donnée par :

$$\Delta p_{tot} = g \int_0^{H_c} (\rho_e - \rho_c) dh \quad (4.9)$$

Avec :

g : Accélération de la pesanteur ;

H_c : Hauteur de la cheminée ;

ρ_e et ρ_c désignent respectivement la masse volumique de l'air dans l'environnement extérieur et dans la cheminée.

Δp_{tot} est proportionnel à la hauteur de la cheminée.

En négligeant les pertes de charge par frottement, la différence de pression peut être subdivisée en composantes, statique et dynamique :

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_s + \Delta p_d \quad (4.10)$$

Δp_{tot} : Perte de charge totale au niveau de la cheminée ;

Δp_s : Perte de charge statique (Perte entre l'entrée et la sortie de l'aéro-turbine) ;

Δp_d : Perte de charge dynamique (Perte entre la sortie de la turbine à la sortie de la cheminée).

Si on élimine la turbine, la perte de charge statique s'annule et par conséquent la perte de charge totale est l'accélérateur du fluide dans son mouvement de la base de la cheminée à sa sortie vers l'environnement.

La puissance totale, développée par le fluide est :

$$P_{tot} = \Delta p_{tot} v_c A_c \quad (4.11)$$

Or dans le cas optimal où $\Delta p_{tot} = \Delta p_d$ la puissance totale sera égale à l'énergie dynamique :

$$P_{tot} = \frac{1}{2} \dot{m} v_c^2 \quad (4.12)$$

IV.2.5.1. Vitesse de l'air

L'équation du mouvement appliquée sur une section différentielle de la cheminée [18] s'exprime par :

$$\rho v_c \frac{d(v_c)}{dz} = -\frac{d(p)}{dz} - (\rho - \rho_0) g \quad (4.13)$$

D'où l'on peut déduire après transformation, l'expression de la vitesse de l'air dans la cheminée :

$$v_c = \sqrt{\frac{2}{\rho} \left(\int_0^{H_c} dp - \int_0^{H_c} (\rho - \rho_0) g dz \right)} \quad (4.14)$$

En éliminant dans une première phase la turbine afin d'obtenir la vitesse optimale dans la cheminée, les pertes par frottement étant négligeables du fait que la cheminée à un rapport surface volume optimal, la vitesse du fluide sera alors :

$$v_c = \sqrt{-\frac{2}{\rho} \left(\int_0^{H_c} (\rho - \rho_0) g dz \right)} \quad (4.15)$$

En appliquant l'approximation de Boussinesq [4] avec introduction du coefficient de dilatation thermique β , pour le cas d'un gaz parfait, on aura :

$$v_c = \sqrt{2 g H_c \frac{\Delta T}{T_0}} \quad (4.16)$$

Avec : T_0 : Température ambiante à l'entrée du collecteur.

Pour rappel [136], le coefficient de dilatation thermique est :

$$\beta = \left(- \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p = - \frac{1}{\rho_0} \frac{\rho_{ch} - \rho_0}{(T_{ch} - T_0)} = \frac{1}{\rho_0} \frac{\rho_0 - \rho_{ch}}{(T_{ch} - T_0)}$$

Et pour un gaz parfait $\rho = p / (r T)$: $\beta = \left(- \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p = \frac{1}{T}$

En introduisant le rendement de la turbine :

$$v_c = \sqrt{2 g (1 - \eta_{turb}) H_c \frac{\Delta T}{T_0}} \quad (4.17)$$

IV.2.5.2. Rendement de la cheminée

Le rendement de la cheminée (η_c) est défini comme étant :

$$\eta_c = \frac{P_{tot}}{\dot{Q}} \quad (4.18)$$

Avec : P_{tot} la puissance totale développée par le fluide.

En combinant les équations 4.5, 4.12, 4.16 et 4.18, le rendement de la cheminée s'exprime par :

$$\eta_c = \frac{g H_c}{T_0 c_p} \quad (4.19)$$

IV.2.5.3. Puissance et perte de charge totale

La puissance totale peut être déduite comme suit :

$$P_{tot} = \eta_c \dot{Q} = \frac{g}{T_0} H_c \rho_c v_c A_c \Delta T \quad (4.20)$$

En combinant 4.11 et 4.20 :

$$\Delta p_{tot} = \frac{g}{T_0} H_c \rho_{coll} \Delta T \quad (4.21)$$

De 4.21, il est remarquable que la cheminée agit de manière analogique à une charge hydraulique.

IV.2.5.4. Turbine à air « Aéro-génératrice »

Installée à la base de la cheminée, l'aéro- turbine a pour rôle la conversion de l'énergie thermique du flux ascendant en énergie de rotation.

La perte de pression au niveau de la turbine est déduite par :

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_s + \Delta p_d \Rightarrow \Delta p_s = \Delta p_{tot} - \frac{1}{2} \dot{m} v_c^2 \quad (4.22)$$

La puissance théorique de la turbine étant :

$$P_{wt} = v_c A_c \Delta p_s \quad (4.23)$$

Soit \dot{V} le produit $v_c A_c$, ainsi :

$$\dot{V} = \sqrt{\frac{\rho_k}{2} (\Delta p_{tot} - \Delta p_s)} \quad (4.24)$$

Avec :

$$\rho_k = \frac{4 A_c}{\rho_c} \quad (4.25)$$

IV.2.5.5. Puissance maximale développée

En combinant les équations (4.23) et (4.24) :

$$P_{wt} = \sqrt{\frac{\rho_k}{2} (\Delta p_{tot} - \Delta p_s)} (\Delta p_s) \quad (4.26)$$

En dérivant cette équation afin de trouver le point optimum :

$$\frac{\partial P_{wt}}{\partial \Delta p_s} = 0 \Rightarrow \Delta p_s = \frac{2}{3} \Delta p_{tot} \quad (4.27)$$

La puissance P_{wt} est maximale entre les deux extrémités de la surface du rectangle représentatif de la puissance « Figure IV.3 », le point optimal étant :

$$\Delta p_s = \frac{2}{3} \Delta p_{tot},$$

d'où :

$$V_{c,ppm} = \sqrt{\frac{2 \Delta p_{tot}}{3 \rho_c}} \quad (4.28)$$

Avec : $v_{c,ppm}$, la vitesse du fluide pour le point de puissance maximal.

La puissance maximale est atteinte lorsque 2/3 de la charge est converti par la turbine. Cependant Δp_s est implicitement dépendante de la vitesse, $V_{c,ppm}$.

En combinant les équations (4.20, 4.27 et 4.28), la puissance maximale à l'arbre de la turbine au point optimum est :

$$P_{wt,max} = \frac{2}{3} \frac{g H_c}{c_p T_0} \eta_{coll} A_{coll} G \quad (4.29)$$

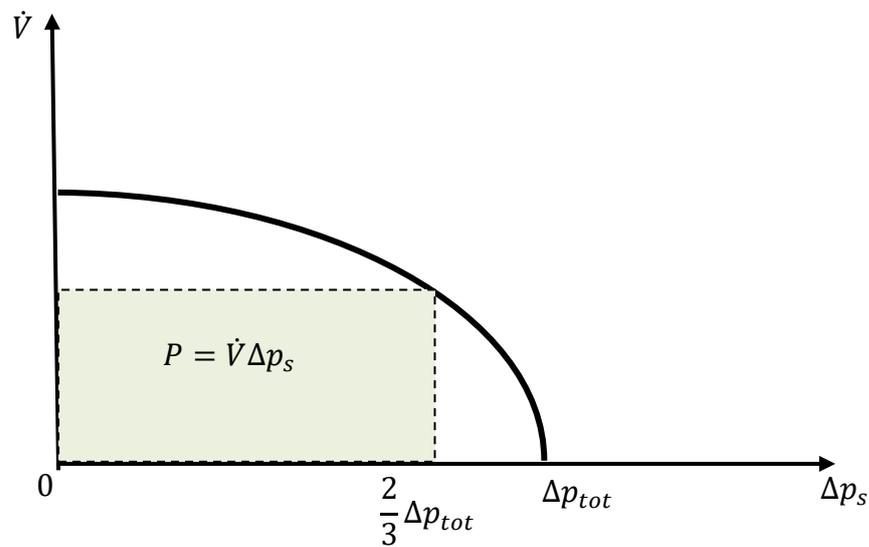


Figure IV.3. Courbe caractéristique de la puissance développée en fonction de Δp_s

IV.2.6. Puissance fournie au réseau

En introduisant le rendement de la turbine η_{turb} considérant le rendement des pales et la transmission au générateur, $\eta_{\text{gén}}$ le travail effectif fourni par la centrale à cheminée solaire CCP est :

$$W_{\text{eff}} = \eta_{\text{coll}} \eta_{\text{turb}} \eta_{\text{ch}} A I_0 \quad (4.30)$$

IV.2.7. Rendement global de la centrale à cheminée solaire

Le rendement thermique de la centrale à cheminée solaire est le rapport de la puissance produite par celle-ci, sur l'énergie reçu par le collecteur.

Le modèle développé considère chaque sous-système partie de la CCS. Les données de sortie de chaque sous-système constituent les données d'entrées du sous-système suivant.

De ce fait le rendement global de la centrale peut s'exprimer aussi, comme étant le produit du rendement de chaque composant de la CCS :

$$\eta_{glob} = \eta_{coll} \cdot \eta_c \cdot \eta_{tw} \quad (4.31)$$

Avec : η_{glob} : Rendement global de la CCS ;
 η_{coll} : Rendement du collecteur ;
 η_c : Rendement de la cheminée ;
 η_{tw} : Rendement de la turbine à air.

IV.2.8. Equation caractéristique du système CCS

En couplant et réaménageant les différentes équations développées précédemment, l'équation caractéristique de la CCS sera :

Or en combinant et substituant les équations 4.4, 4.5 et 4.30 dans 4.18, le rendement de la cheminée peut s'écrire :

$$\eta_c = \frac{\frac{1}{2} \dot{m} v_{ch}^2}{\dot{m} c_p \Delta T} = \frac{v_{ch}^2}{2 c_p \Delta T} \quad (4.32)$$

L'expression de v_{ch}^2 de l'équation 4.17, est remplacée dans l'équation 4.32 :

$$\eta_c = \frac{v_{ch}^2}{2 c_p \Delta T} = \frac{2 (1 - \eta_{turb}) g \Delta T H_{ch}}{2 c_p \Delta T T_0} = \frac{(1 - \eta_{turb}) g H_{ch}}{c_p T_0} \quad (4.33)$$

Les équations 4.4 et 4.5 peuvent être reformulée ainsi :

$$\dot{Q} = \eta_{coll} (A I_0) = \dot{m} c_p \Delta T \quad (4.34)$$

$$\eta_{coll} (A I_0) = (\rho_{ch} v_{ch} a_{ch}) c_p \Delta T \quad (4.35)$$

$$\left(\tau \alpha - \frac{\beta \Delta T}{I_0} \right) (A I_0) = \left(\rho_{ch} \left(\sqrt{\frac{2 (1 - \eta_{turb}) g \Delta T H_{ch}}{T_0}} \right) a_{ch} \right) c_p \Delta T \quad (4.36)$$

Avec réarrangement l'équation (4.36) devient :

$$c_1 \left(\frac{\Delta T^{3/2}}{1 + \frac{\Delta T}{T_0}} \right) + c_2 \Delta T + c_3 = 0 \quad (4.37)$$

Avec :

$$c_1 = \rho_0 c_p \sqrt{\frac{(1 - \eta_{turb}) 2gh}{T_0}}$$

$$c_2 = - \beta \frac{A}{a}$$

$$c_3 = - \tau \alpha \frac{A}{a} I$$

V.3 Résolution du modèle mathématique

La résolution des équations régissant le système des CCS permet de prédire les performances énergétiques des centrales à cheminée solaire, d'étudier et d'analyser l'influence des différents paramètres dominants et de prévoir l'impact du vieillissement du matériau utilisé sur ses performances.

Un programme a été développé pour la résolution du modèle mathématique et le calcul des différents paramètres de la CCS telle la puissance, la vitesse, les rendements...

Les équations gouvernantes ont été résolues numériquement en utilisant la méthode de Newton- Raphson avec les conditions, initiale et aux limites, suivantes :

- La température du fluide d'entrée collecteur est considérée égale à la température ambiante (Condition de continuité) : $T_0 = T_{amb}$
- La pression du fluide d'entrée collecteur considéré égale à la pression ambiante : $P_0 = 1 \text{ atm}$
- L'air à l'intérieur du collecteur est considéré comme gaz parfait : $\rho = \frac{P}{rT}$
- ΔT : Le gain thermique est initialisé pour les besoins du calcul. Sa valeur initiale est supposée égale à : $\Delta T = 10$.

La Figure IV.4 donne l'organigramme de résolution des équations du modèle mathématique.

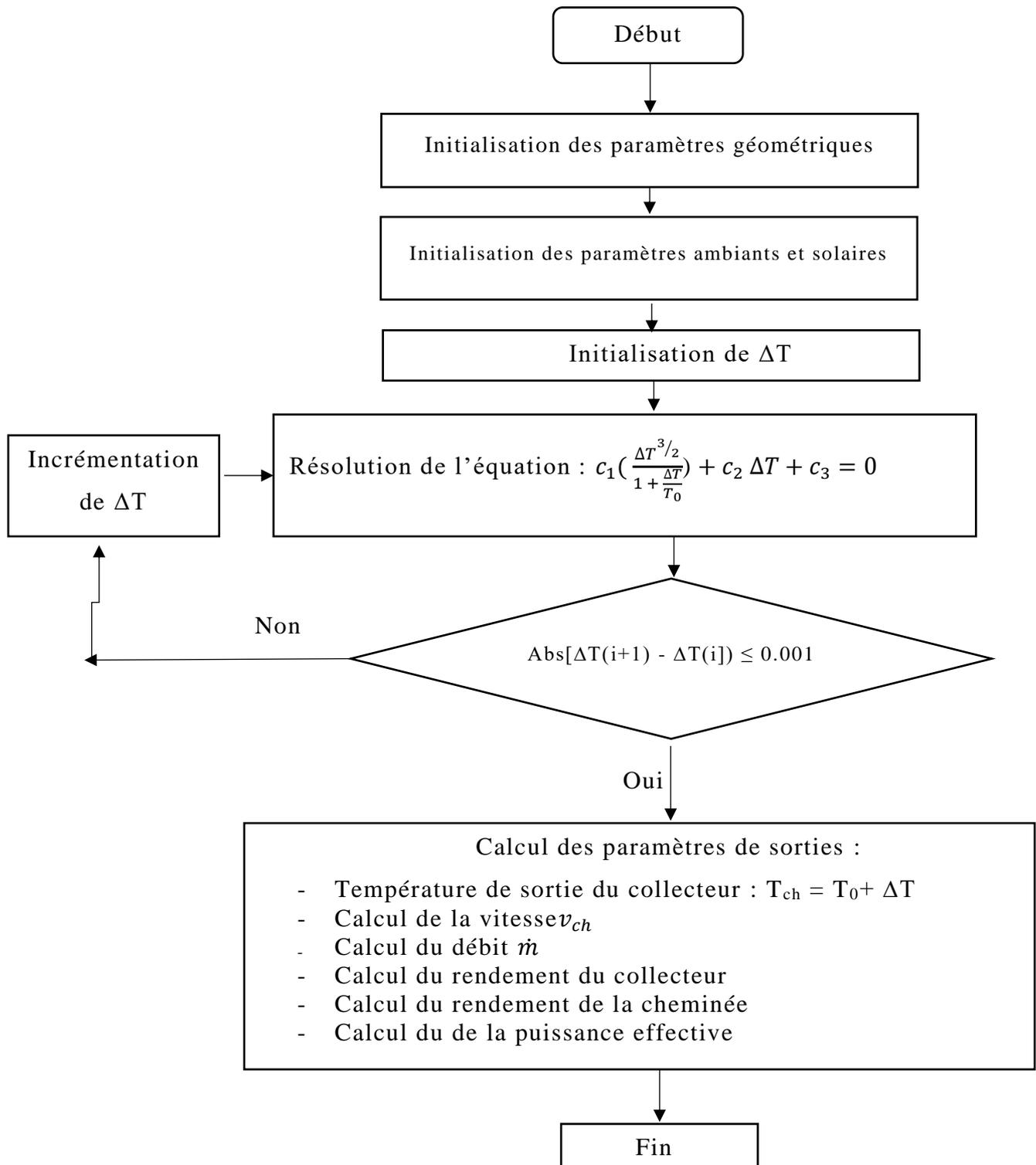
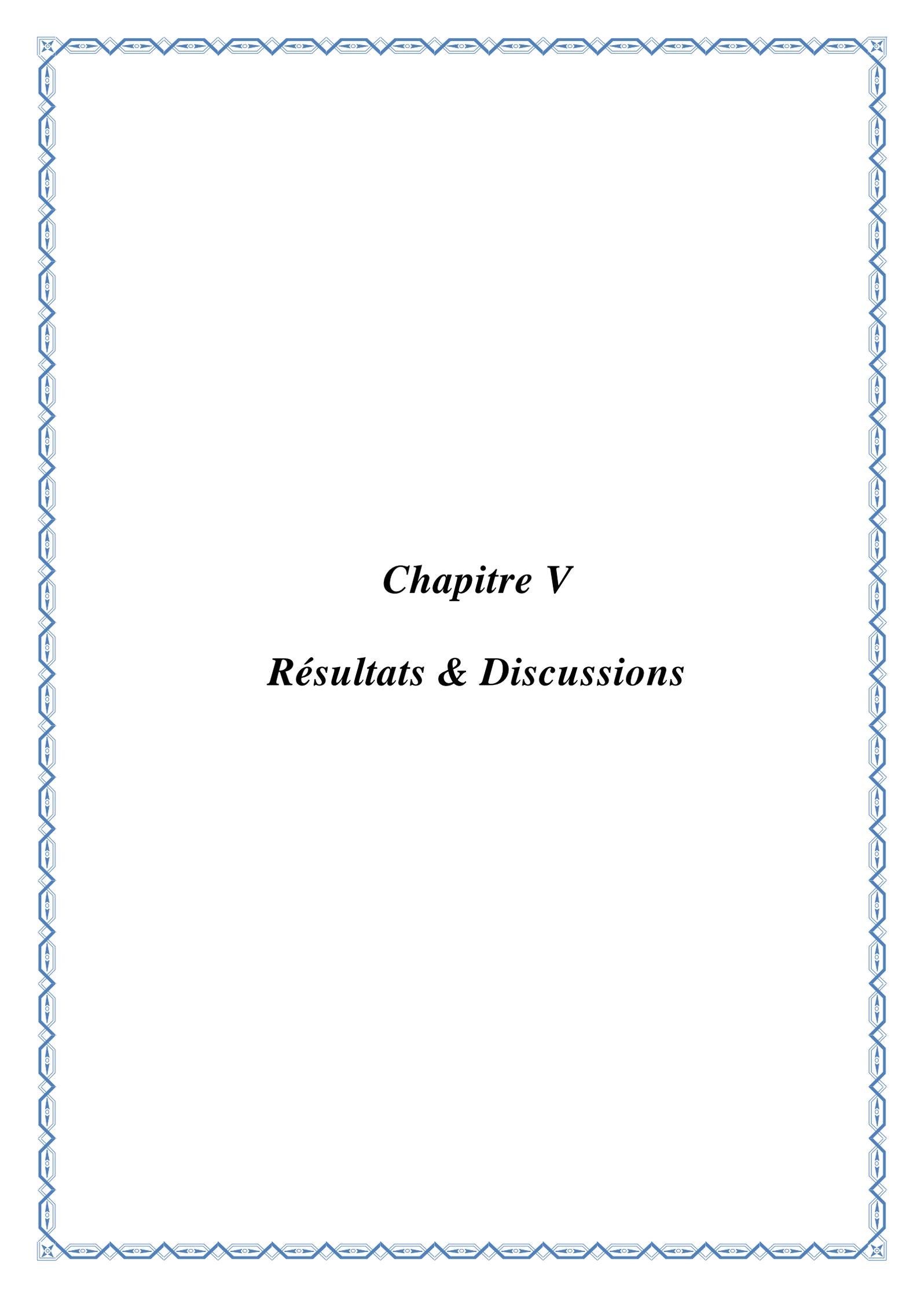


Figure IV.4. Organigramme de résolution.



Chapitre V

Résultats & Discussions

Chapitre V : Résultats & Discussions

V.1 Introduction

Une prospection du marché a montré la présence de deux principaux types de films plastiques PEBD utilisés par les agriculteurs de la région de Boumerdes : le 1^{er} type est un film transparent jaune-verdâtre et le 2^{eme} est de couleur blanchâtre transparente (Figure V.1.).



Figure V.1. Photo des échantillons du film plastique « PEBD » utilisés dans les serres agricoles.

V.2 Elaboration de la fiche technique de l'échantillon neuf

En premier lieu, la fiche technique de chaque type de film neuf (Jaunâtre et blanchâtre) a été dressée, en caractérisant au niveau des laboratoires de l'Institut Algérien du Pétrole (IAP), un échantillon neuf de chaque type, en termes de propriétés mécaniques, masse volumique, indice de fluidité, température de fusion, dureté etc... Les résultats obtenus sont résumés dans le Tableau V.1.

Tableau V.1. Caractéristiques de l'échantillon de film plastique vierge Jaune et blanc.

| Propriétés | | Résultats | | Unités |
|--------------------------------------|--------------|----------------|-----------------|-------------------|
| | | Jaune | Blanc | |
| Indice de fluidité à chaud (MFI) | | 0.66 ± 0.007 | 0.15 ± 0.006 | g/10 min |
| Masse volumique (ρ) | | 0.913 ± 0.011 | 0.9158 ± 0.0035 | g/cm ³ |
| Température de fusion (T_f) | | 123 | 118 | °C |
| Dureté | | 56 ± 3.22 | 37.34 ± 3.0724 | Shore A |
| Module de Young (E) | Longitudinal | 1.95 ± 0.10 | 1.65 ± 0.25 | GPa |
| | Transversal | 1.76 ± 0.04 | 1.75 ± 0.03 | |
| Contrainte à la rupture (σ) | Longitudinal | 21 ± 0.91 | 14.67 ± 0.5 | N/mm ² |
| | Transversal | 21 ± 0.63 | 14.38 ± 0.4 | |
| L'allongement (ϵ) | Longitudinal | 537.31 ± 20.58 | 511.31 ± 25.83 | % |
| | Transversal | 758.61 ± 17.2 | 643.56 ± 25.47 | |
| Transmittance (τ) | | 80 | 95 | % |

La comparaison entre la fiche technique des deux types de films montre que le film jaunâtre présente des caractéristiques mécaniques meilleures comparativement au film blanchâtre. Cependant la transmittance du film neuf blanc transparent (Initialement vitreux) est meilleure que le film jaunâtre.

V.3. Comparaison entre les deux échantillons, par vieillissement accéléré

Afin de pouvoir justifier le choix du type de PEBD, qui sera utilisé pour la suite de cette étude, chaque type a été soumis à une contrainte d'air chaud permanent dans une étuve ventilée en laboratoire (Figure V.2.) pour simuler un vieillissement accéléré.

Le vieillissement artificiel consiste à imposer des conditions opératoires sévères : Échantillons suspendus, température de l'étuve fixée à 100°C, 7/7 et 24/24.



Figure V.2. Photo des échantillons soumis à un vieillissement artificiel accéléré dans une étuve ventilée. Laboratoire Polymère IAP-Ecole de Boumerdes.

V.3.1. Tests pour le cas du vieillissement accéléré

V.3.1.1 Contrainte à la rupture

Les résultats obtenus de la contrainte à la rupture des échantillons jaunes et des échantillons blancs, en fonction du temps d'exposition, sont regroupés dans le Tableau V.2 et les figures V.3, V.4, V.5 et V.6.

Tableau V.2. La contrainte à la rupture de PEBD, jaune et blanc, Vieillissement Artificiel.

| Temps (Semaine) | σ_{break} (N/mm ²) | | | |
|-----------------|--|-------------|-------------|-------------|
| | Longitudinal | | Transversal | |
| | Jaune | Blanc | Jaune | Blanc |
| 0 | 21 ±0,91 | 14,67 ±0,5 | 21 ±0,63 | 14,38 ±0,4 |
| 1 | 19,04 ±0,22 | 14,42 ±0,08 | 19,02 ±0,22 | 11,86 ±0,06 |
| 2 | 19,01 ±0,1 | 14,4 ±0,15 | 18,7 ±0,11 | 11,46 ±0,21 |
| 3 | 17,98 ±0,03 | 14,31 ±0,2 | 16,26 ±0,23 | 10,76 ±0,2 |
| 4 | 16,53 ±0,16 | 13,39 ±0,13 | 16,21 ±0,14 | 10,7 ±0,1 |

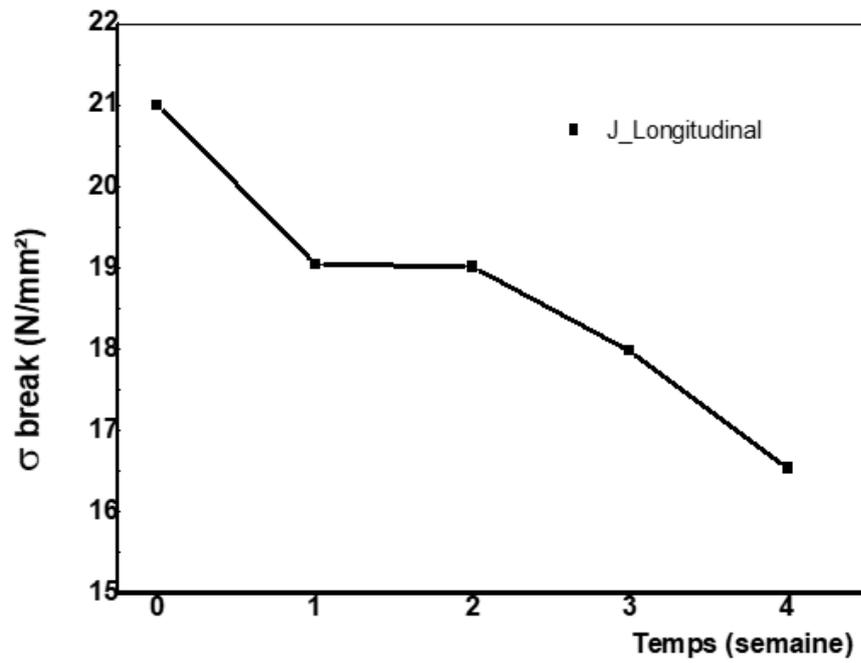


Figure V.3. La contrainte à la rupture de PEBD jaune longitudinal ;
Vieillessement Artificiel.

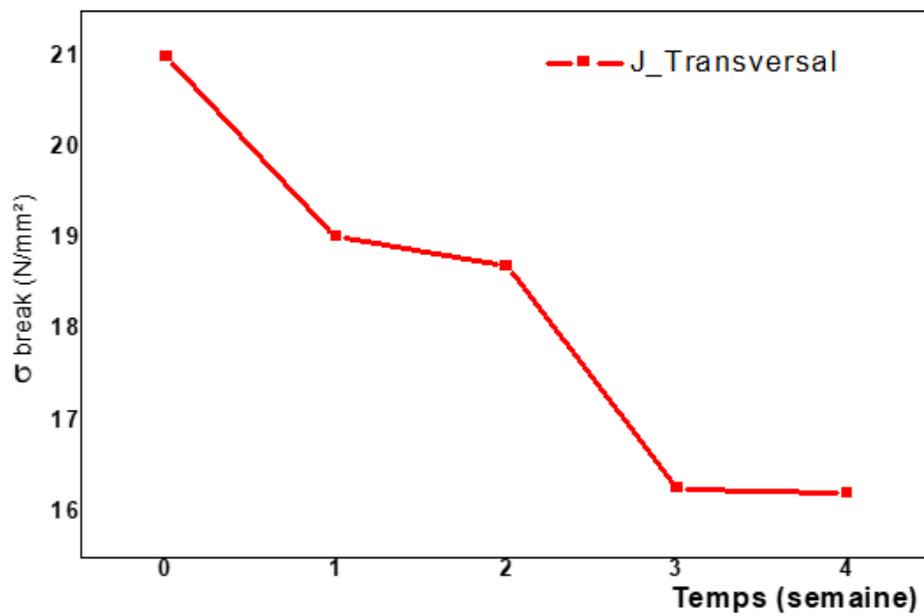


Figure V.4. La contrainte à la rupture de PEBD jaune transversal ;
Vieillessement Artificiel.

L'analyse de ces graphes permet d'observer une réduction de la contrainte à la rupture en fonction de la durée du vieillissement. Il est constatable que la dégradation pour les échantillons dans le sens transversal est plus importante par rapport à celle dans le sens longitudinal (Fig.V.3. ; Fig. V.4.). Ces résultats peuvent être expliqués par l'effet de l'orientation des deux directions pour le sens transversal par rapport au sens longitudinal, c'est-à-dire le sens machine.

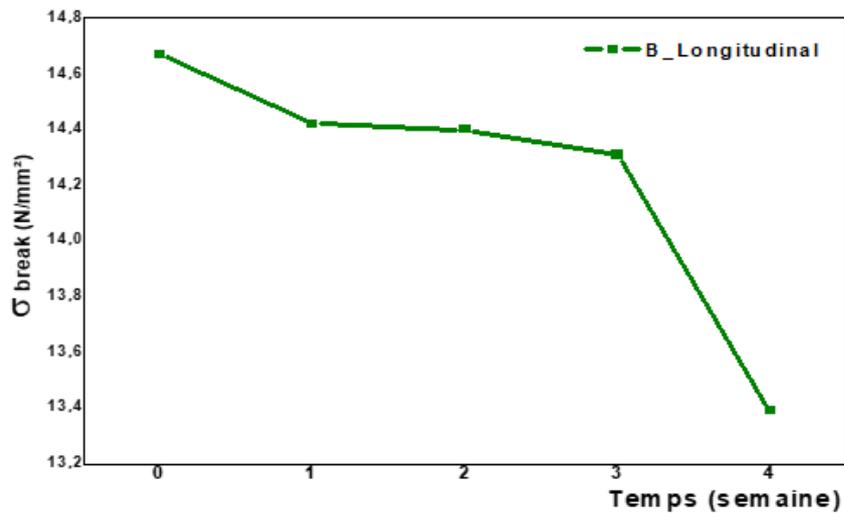


Figure V.5. La contrainte à la rupture de PEBD blanc ;
Vieillessement Artificiel.

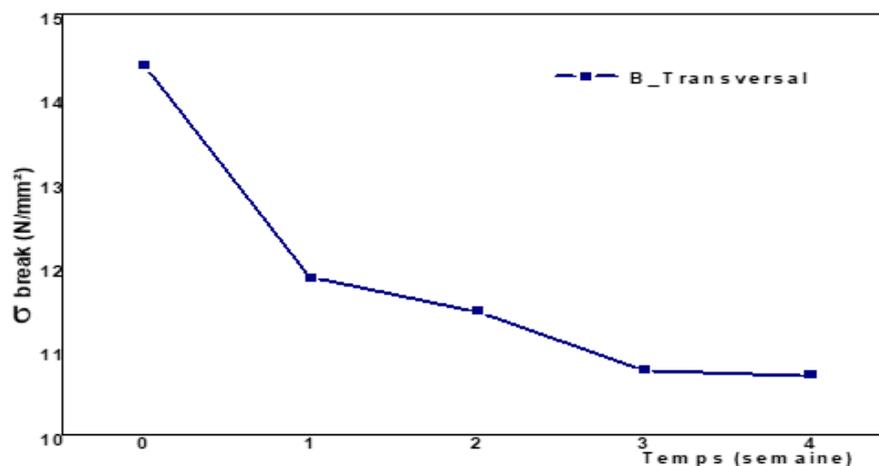


Figure V.6. La contrainte à la rupture de PEBD blanc transversal ;
Vieillessement Artificiel.

L'essai de traction effectué sur les échantillons blancs, montre une réduction de la résistance à la rupture dans les deux sens en fonction du temps d'exposition (Fig. V.5. ; Fig. V.6.). Cette dégradation est plus significative pour le cas de la 4^{ème} semaine. En effet une dégradation totale à partir de la 5^{ème} semaine (1 mois) rend le film inexploitable.

V.3.1.2 Allongement à la rupture

Les résultats de l'allongement en fonction du temps de vieillissement, pour le film jaune et blanc, sont présentés dans le Tableau. V.3., Figure. V.7., Figure. V.8., Figure. V.9. et Figure. V.10. respectivement.

Tableau V.3. L'allongement à la rupture de film PEBD jaune et blanc, vieillissement artificiel.

| Temps (Semaine) | $\epsilon_{\text{break}}(\%)$ | | | |
|--------------------|-------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| | Longitudinal | | Transversal | |
| | Jaune | Blanc | Jaune | Blanc |
| 0 | 537,31 ± 20,58 | 511,31 ± 25,83 | 758,61 ± 17,2 | 643,56 ± 25,47 |
| 1 | 497,83 ± 12,07 | 432,85 ± 22,22 | 715,32 ± 20,1 | 564,25 ± 17,94 |
| 2 | 487,34 ± 19,11 | 422,94 ± 23,97 | 679,27 ± 15,2 | 437,08 ± 25,48 |
| 3 | 486,59 ± 10,36 | 422,01 ± 17,19 | 675,27 ± 19,38 | 414,32 ± 15,01 |
| 4 | 430,49 ± 18,15 | 411,96 ± 15,01 | 642,93 ± 16,1 | 184,01 ± 20,48 |

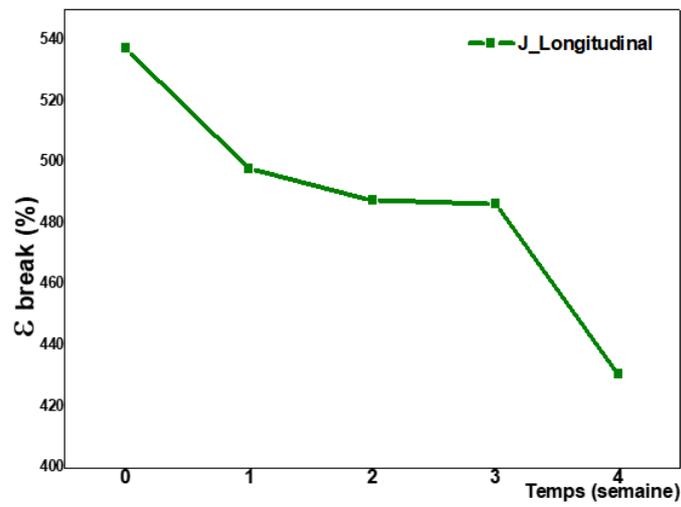


Figure V.7. L'allongement à la rupture de PEBD jaune longitudinal ; vieillissement artificiel.

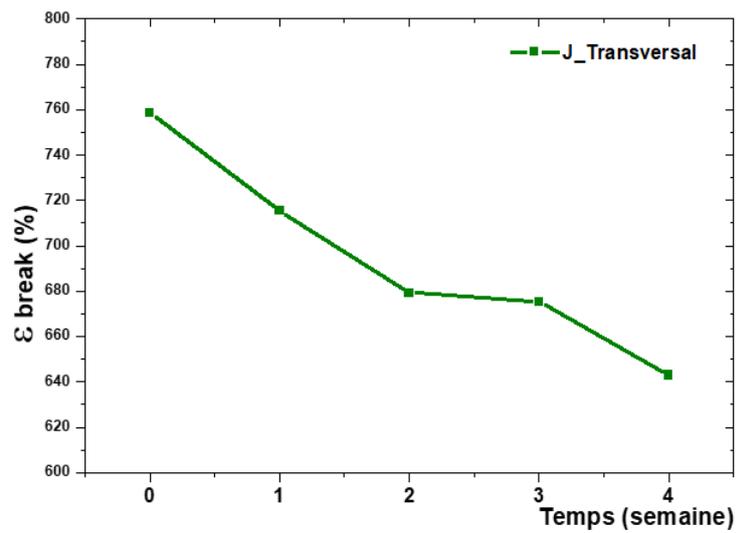


Figure V.8. L'allongement à la rupture de PEBD jaune transversal ; vieillissement artificiel.

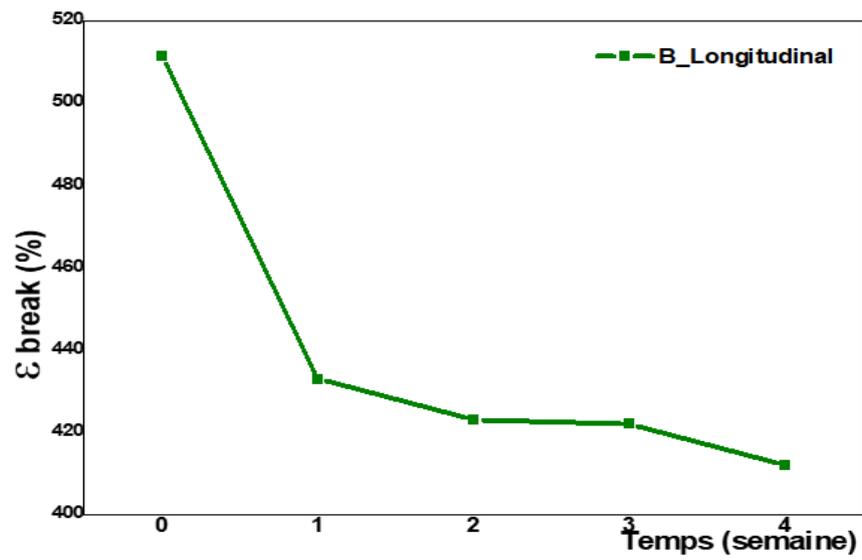


Figure V.9. L'allongement à la rupture de film PEHD blanc longitudinal ;
Vieillessement Artificiel.

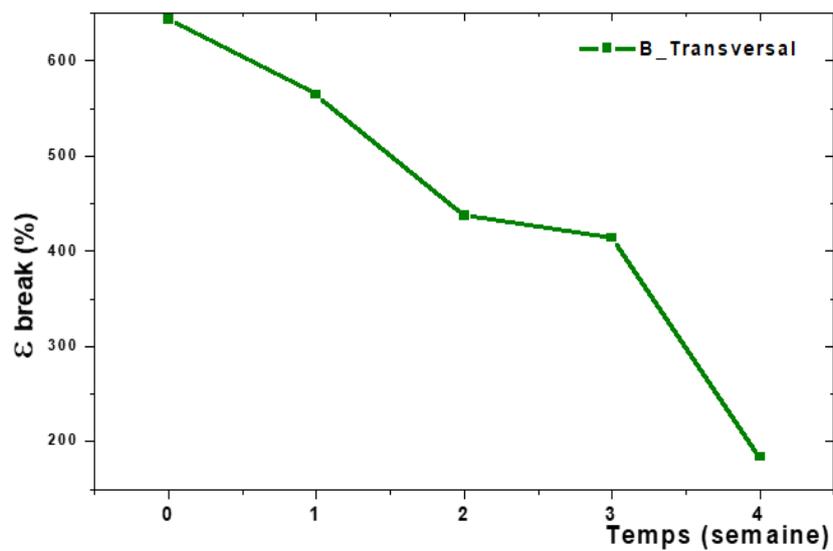


Figure V.10. L'allongement à la rupture de film blanc transversal ;
Vieillessement Artificiel.

L'observation de la diminution de l'allongement à la rupture en fonction du temps d'exposition, montre que le film jaune bien qu'exposé à des conditions sévères (étuve à circulation d'air, température de 100°C) présente une meilleure résistance à la dégradation (Figure. V.7. ; V.8.). par rapport à l'échantillon blanc (Figure. V.9. ; V.10.). Ces résultats sont probablement dû à une meilleure cristallinité du film jaune.

V.3.1.3 Module de Young

Le Tableau V.4. et les Figures, V.11., V.12., V.13. et V.14 illustrent la variation du module de Young obtenue en fonction du temps d'exposition pour le cas du vieillissement accéléré des échantillons jaune et blanc, respectivement, et cela dans les deux directions longitudinal et transversal.

Tableau V.4. Modules de Young de PEBD jaune, et blanc Vieillessement Artificiel.

| Temps (Semaine) | E (GPa) | | | |
|--------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| | Longitudinal | | Transversal | |
| | Jaune | Blanc | Jaune | Blanc |
| 0 | 1,76 ± 0,04 | 1,65 ± 0,25 | 1,95 ± 0,1 | 1,75 ± 0,03 |
| 1 | 1,72 ± 0,06 | 1,61 ± 0,16 | 1,67 ± 0,08 | 1,66 ± 0,21 |
| 2 | 1,56 ± 0,13 | 1,56 ± 0,48 | 1,48 ± 0,19 | 1,58 ± 0,14 |
| 3 | 1,46 ± 0,17 | 1,42 ± 0,45 | 1,45 ± 0,2 | 1,43 ± 0,15 |
| 4 | 1,32 ± 0,16 | 1,29 ± 0,38 | 1,38 ± 0,36 | 1,05 ± 0,19 |

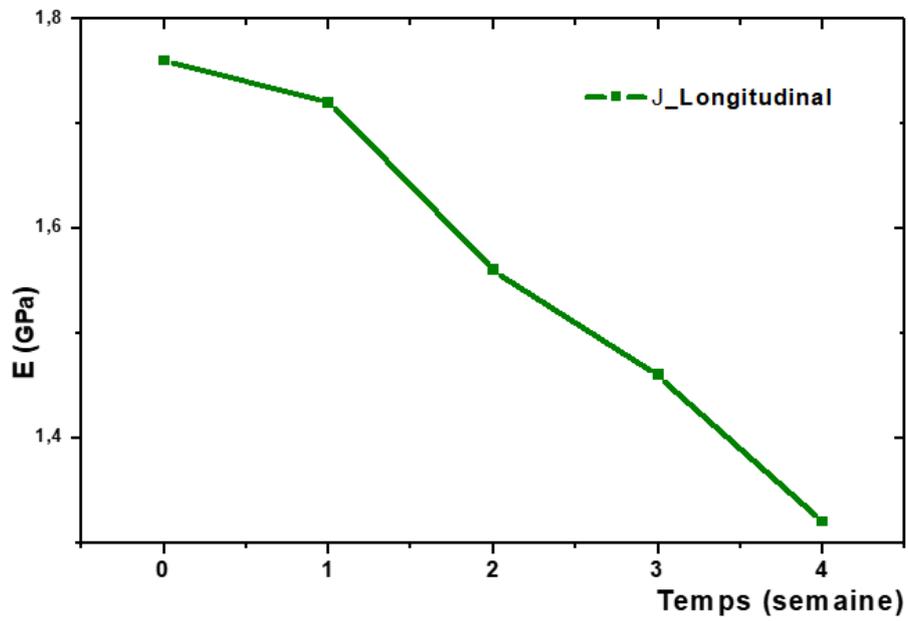


Figure V.11. Les modules de Young de PEBD jaune longitudinal ; Vieillessement artificiel.

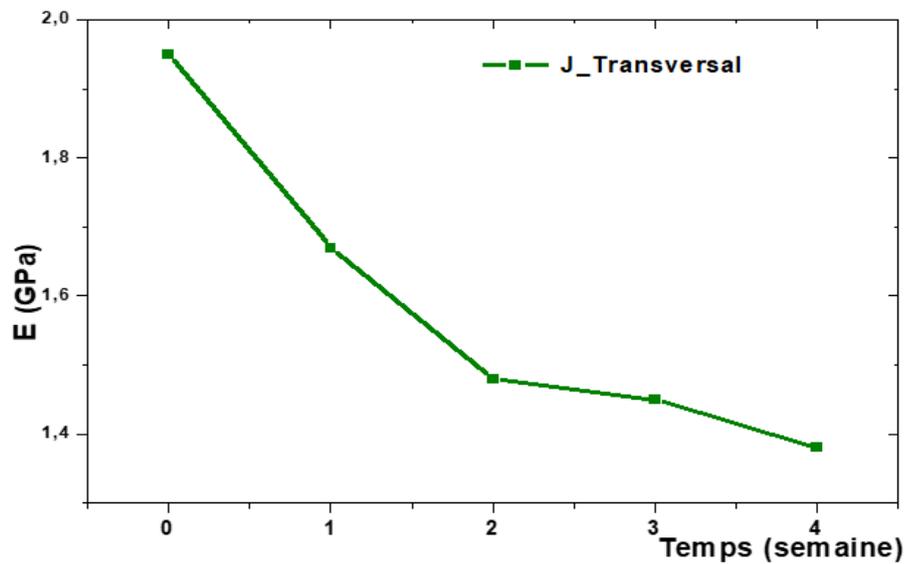


Figure V.12. Les modules de Young de PEBD jaune transversal, Vieillessement Artificiel.

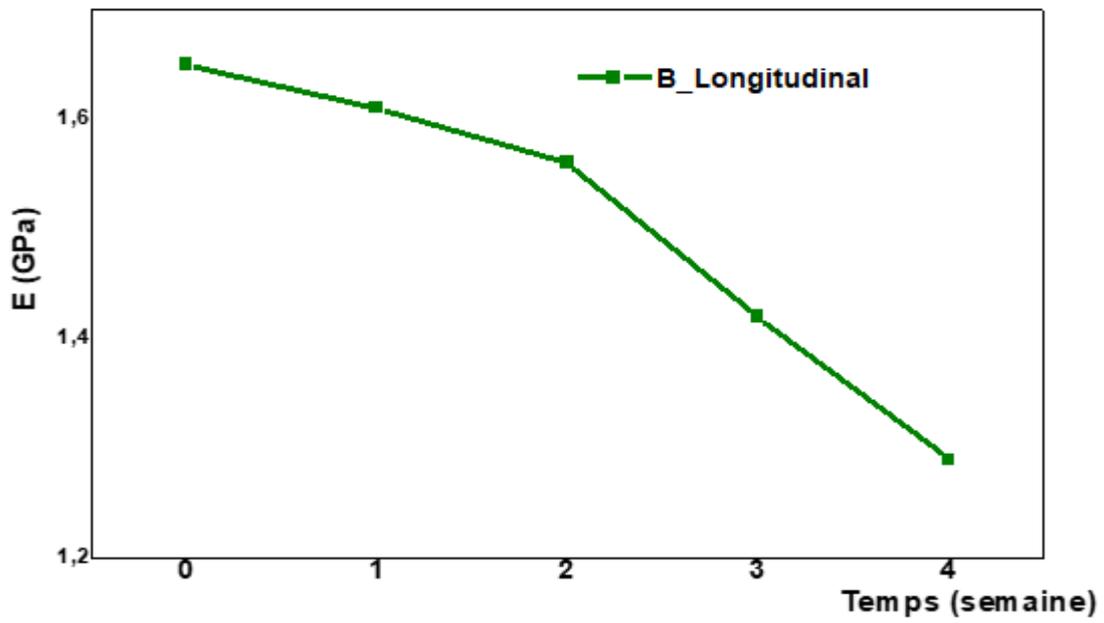


Figure V.13. Les modules de Young de PEHD blanc longitudinal, Vieillissement Artificiel.

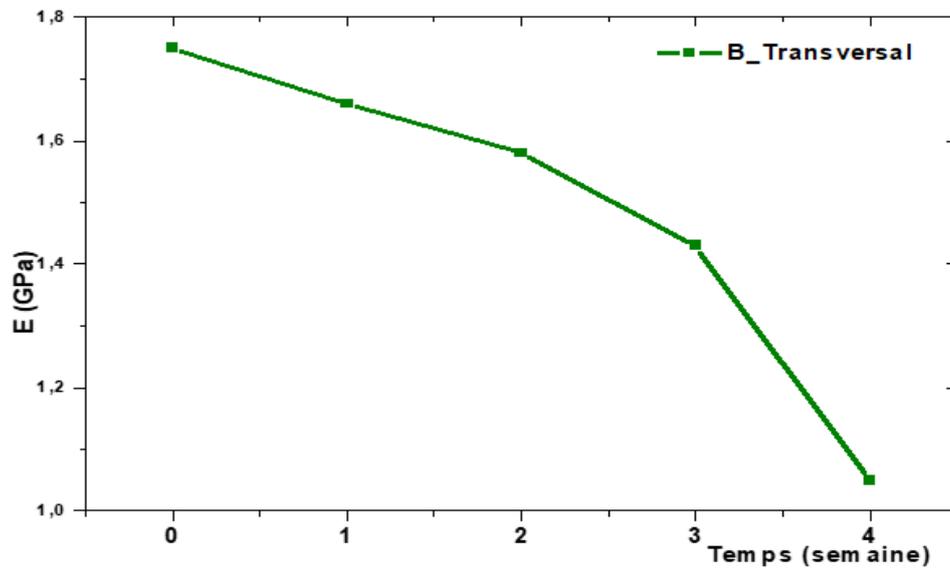


Figure V.14. Les modules de Young de PEHD blanc, Vieillissement Artificiel.

Ces figures démontrent une diminution du module de Young en fonction de la durée d'exposition, pour les deux films vieilliss artificiellement. Néanmoins, la diminution du module d'élasticité est moindre pour le film jaune (Figure. V.11., Figure. V.12) comparativement au film blanc (Figure V.13., Figure V.14.)

V.3.2. Synthèse des résultats de traction pour les deux types de vieillissement

Pour comparer l'influence des deux types de vieillissement sur les propriétés mécaniques du PEBD, les résultats de vieillissement du film jaune, exposé pendant deux mois, naturellement et artificiellement sont comparés (Tableau V.5.).

Le tableau suivant, présentent la variation de la contrainte à la rupture des deux types de film jaune et blanc, et cela dans les deux sens longitudinal et transversal à l'état neuf et après vieillissement naturel et artificiel.

Tableau V.5. Résultats de la contrainte à la rupture en fonction de types de vieillissement de PEBD jaune, après 2 mois d'exposition.

| Contrainte à la rupture σ_{break} (N/mm ²) | Film Jaune | Echantillon Neuf | Vieillissement naturel 2mois | Vieillissement artificiel 2 mois |
|--|--------------|------------------|------------------------------|----------------------------------|
| | Longitudinal | 21 | 14,82 ± 0,7 | 12,53 ± 0,3 |
| | Transversal | 21 | 15,34 ± 0,3 | 12,21 ± 0,1 |

D'après les résultats obtenus nous remarquons que les échantillons vieilliss artificiellement sont plus dégradés que ceux vieilliss naturellement et ceci pour les deux sens d'orientation longitudinal et transversal.

Cette dégradation importante via le vieillissement artificiel est traduite par les conditions opératoires sévères (échantillons suspendus, température de l'étuve fixée à 100°C 7/7 et 24/24, étuve ventilée avec de l'air 7/7 et 24/24) contrairement aux conditions climatiques où la température est largement inférieure à 100°C. Elle varie selon le jour et la nuit, mais aussi au fil des saisons.

V.3.3. Conclusion

Après 30 jours d'exposition dans l'étuve, les résultats des tests de la contrainte à la rupture ont révélé une réduction de la résistance à la rupture de 25% du film blanc (Tableau V.2.). En effet l'essai de traction effectué après vieillissement des échantillons confirme que le film jaune reste assez résistant par rapport à l'échantillon blanc.

L'observation de l'état des échantillons dans l'étuves montrent que le film que le film blanc résiste pendant une période d'un mois uniquement. En effet, dépassant cette période, le film blanchâtre se déforme et devient inexploitable (Figure V.15.) ce qui justifie le choix du film jaunâtre pour la suite de l'étude.



Figure V.15. Photo des échantillons soumis à un vieillissement artificiel accéléré : Etat du PEBD blanc après 35 jours d'exposition

V.4. Résultats et interprétation

La couverture du collecteur d'une centrale à cheminée solaire est soumise à des contraintes mécaniques et climatiques (Irradiation, vent, pluie...). Elle sera aussi exposée à des gradients de températures saisonnières élevées, accélérant ainsi sa dégradation. Le rendement du collecteur sera influencé par ce processus et par conséquent les performances du système global aussi. Pour cela le vieillissement naturel a été privilégié afin de reproduire des conditions environnementales réelles.

V.4.1. Essais de traction

Les figures V.16 et V.17 représentent l'évolution de la contrainte à la rupture des échantillons vieillis naturellement en fonction du temps dans les deux directions, longitudinale et transversale, respectivement. La direction longitudinale se réfère à la direction d'extrusion lors du processus de production du film plastique ; la direction perpendiculaire à cette dernière est la direction transversale de l'échantillon.

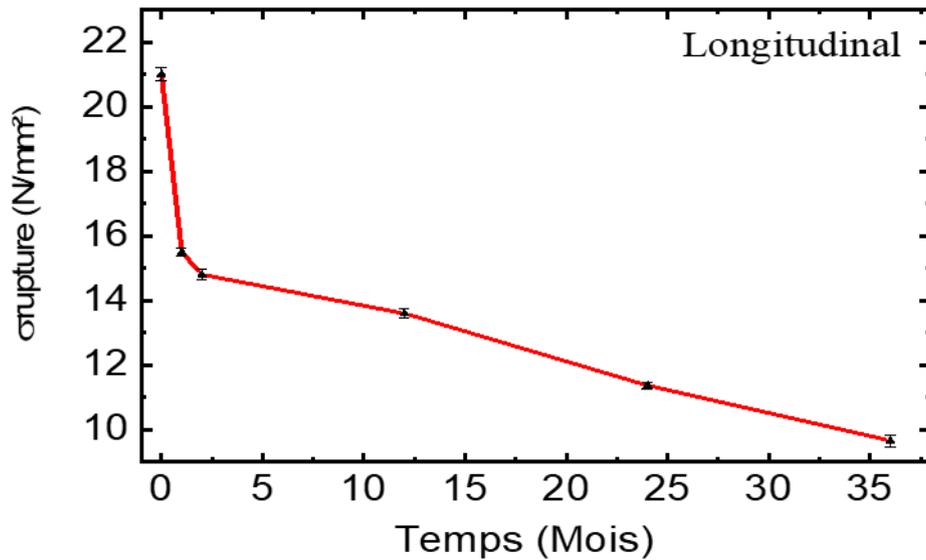


Figure V.16. Contrainte à la rupture du PEBD sens longitudinal, en fonction du temps d'exposition.

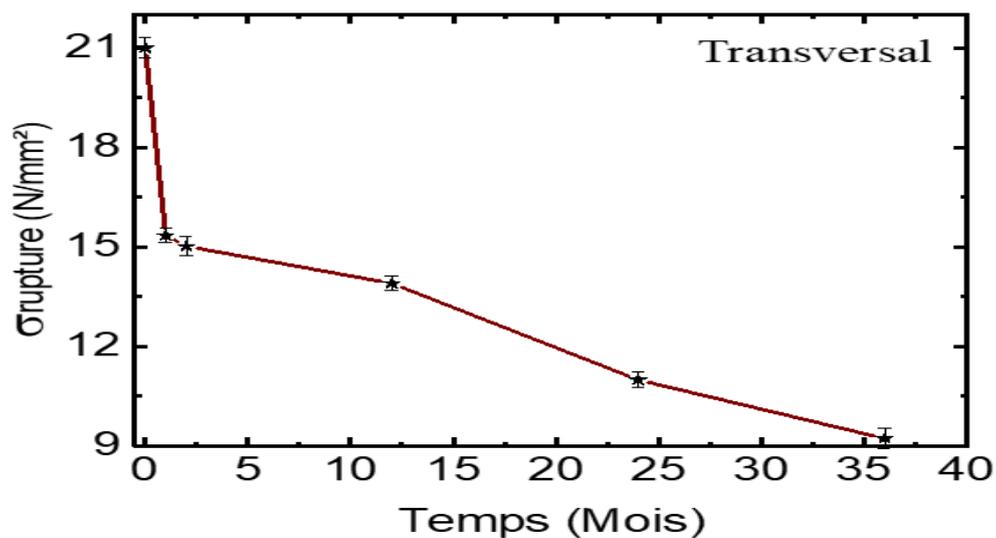


Figure V.17. Contrainte à la rupture de PEBD sens transversal en fonction du temps d'exposition

Les résultats obtenus montrent que la contrainte à la rupture diminue considérablement avec le temps. Cette diminution est fonction des conditions climatiques et est étroitement liée à la durée d'exposition et à la saison, tel qu'il est remarqué pour le cas du 1^{er} et 2^{ème} mois où la variation reste modérée par rapport à de plus longue durée et cela pour les deux directions (Longitudinale et transversale).

Dans une précédente étude [135], les auteurs ont utilisé un PEBD de couleur laiteuse présent sur le marché. Le nouvel échantillon de PEBD monocouche a montré une très faible contrainte à la rupture d'environ 2 MPa alors que la contrainte à la rupture du PEBD devrait être aux environs de 8 MPa minimum [127].

Les auteurs ont constaté que la durée de vie de ce type de PEBD avoisine les 5 mois dans un environnement naturel et un climat du nord d'Algérie. Ce qui concorde avec les résultats du test en étuve sus- mentionnée où l'échantillon en milieu de simulation accéléré a résisté pour une période d'un mois.

En multipliant les couches (Film multicouche), pour l'amélioration des propriétés du film la durée de vie du spécimen a doublé et a atteint les 10 mois (Pour le cas d'un film tri-couche).

Dans notre présent cas, le film vert jaunâtre a atteint une durée de vie de 3 ans et a enregistré une rupture initiale de 21MPa. Ces résultats sont en bon accord avec ceux des références [135] et [138]. Finalement, après une exposition de 3 ans dans un milieu naturel, une réduction des propriétés de plus de 50% a été constatée.

V.4.1.1. Allongement à la rupture (ϵ) :

Les figures Figure V.18 et V.19 donnent la variation de l'allongement à la rupture en fonction du temps pour la direction longitudinale et transversale respectivement.

Il est à noter qu'une grande similarité et une bonne concordance sont observées dans l'évolution des résultats obtenus avec ceux de la contrainte à la rupture. Une

importante diminution de l'allongement à la rupture en corrélation avec le temps d'exposition est observée après une période de 3 ans

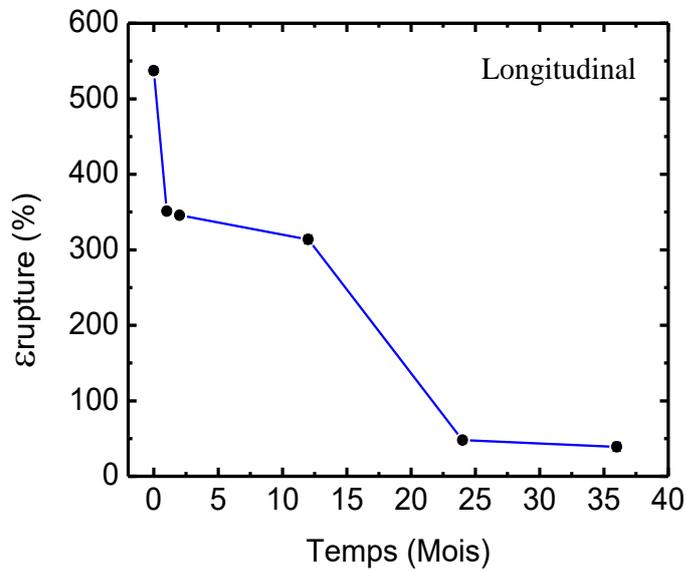


Figure V.18. Allongement à la rupture du PEBD dans le sens longitudinal en fonction du temps.

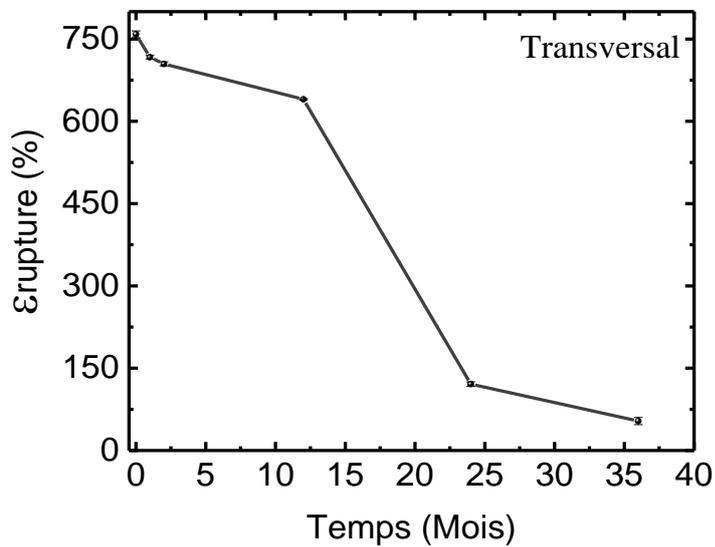


Figure V.19. Allongement à la rupture du PEBD dans le sens transversal, en fonction du temps.

V.4.1.2. Module de Young (E)

Les figures Figure V.20.et V.21.montrent la variation du module d'élasticité du film vieilli naturellement en fonction du temps d'exposition dans les deux directions.

Les résultats obtenus montrent une diminution évolutive du module d'élasticité pour le film vieilli par rapport à l'échantillon neuf.

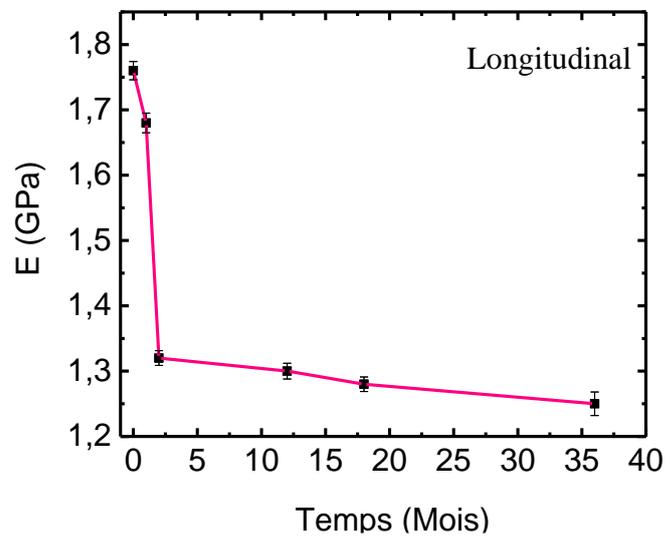


Figure V.20. Module de Young du PEBD sens longitudinal

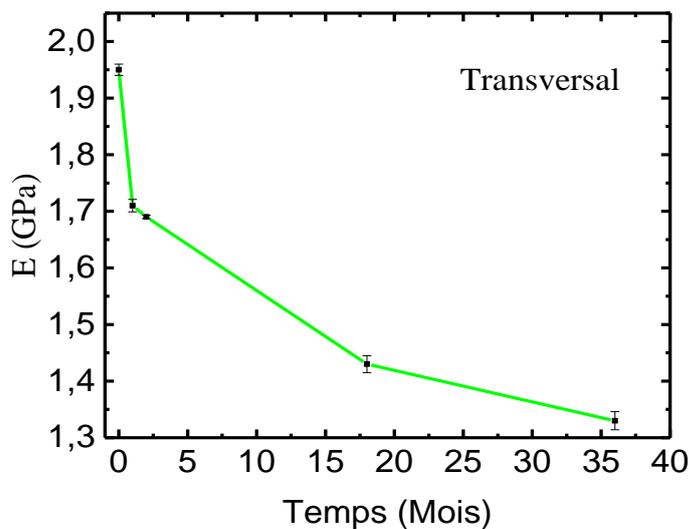


Figure V.21. Module de Young de PEBD sens transversal

V.4.1.3. Essai de dureté

Les résultats obtenus de la dureté shore A, pour les différents échantillons neufs et vieillis sont résumés dans le Tableau V.6.

De ces résultats on conclut que la dureté shore A diminue avec la durée d'exposition et ceci en fonction de l'influence des conditions climatiques (vent, température, pluie, rayonnement solaire, humidité). Ces résultats concordent avec les essais de traction.

Tableau V.6. Résultats des tests de dureté des films.

| Mesures | Neuf | 1mois | 2mois | 24 mois | 30 mois |
|-------------------|---------|-----------|-----------|-----------|---------|
| Moyenne (Shore A) | 56±1.61 | 55.4±1.02 | 51.8±1.65 | 46.4±0.92 | 44±0.70 |

V.4.2. Tests rhéologiques

V.4.2.1. Indice de fluidité

Le Tableau V.7 présente les résultats des essais de détermination de l'indice de fluidité à chaud « MFI » pour le film considéré.

Les valeurs obtenues sont du grade du polyéthylène obtenu par le procédé d'injection-soufflage [140].

Tableau V.7. Résultats de l'indice de fluidité

| | Film neuf |
|--------------------|----------------|
| t (s) | 257 |
| m _e (g) | 0.06693±0.0077 |
| MFI (g/10 min) | 0.1562 |

V4.2.2. Masse volumique

Les résultats obtenus des mesures de la masse volumique sont reportés dans le tableau V.8.

Tableau V.8. Masse volumique moyenne du film

| Echantillons neufs | ρ (g/cm ³) |
|--------------------|-----------------------------|
| Moyenne | 0,913±0,011 |

D'après les résultats obtenus, la masse volumique du film est incluse dans l'intervalle [0.91 -0.92 g/cm³], confirmant ainsi que le film est un polyéthylène basse densité [140].

V.4.2.3. Température de fusion

La détermination de la température de fusion, du film neuf, donne une valeur égale à 123 °C. Ce résultat est inclus dans l'intervalle de température de fusion du polyéthylène basse densité à savoir [100, 125°C].

V.4.3. Tests spectroscopiques

V.4.3.1. Spectroscopie UV-Visible

La figure V.8 représente les résultats de la spectroscopie UV-Visible et montre l'évolution de l'absorbance en fonction de la longueur d'onde des films vieillis naturellement.

Les résultats montrent une bande d'absorption mineur à 308 nm pour le PE neuf. C'est la bande du chromophore présente dans les antioxydants primaires, utilisés pour stabiliser le film et dans le colorant utilisé (Dans notre cas le jaune-verdâtre).

D'autre part, de nouveaux pics dus au vieillissement apparaissent à 319 nm, 321 nm, 322 nm, 323 nm et 327 nm pour le polyéthylène vieilli 1 mois, 2 mois, 12 mois, 24 mois et 36 mois respectivement.

L'intensité et la fréquence de ces pics augmentent avec la durée d'exposition. Ces pics expriment l'augmentation des doubles liaisons correspondantes à la dégradation du matériau.

Plus le nombre de doubles liaisons est élevé plus l'effet bathochrome (augmentation de la longueur d'onde) et l'effet hypsochrome (augmentation de l'intensité d'absorption) sont importants.

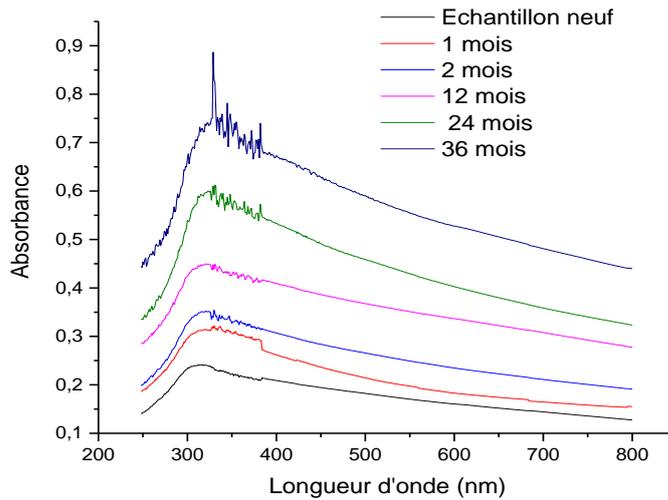


Figure V.22. Résultats de la spectroscopie UV-Visible d'échantillons neufs et vieillissants

V.4.3.2. Spectrométrie IRTF

La figure V.23. représente la transmittance en fonction du nombre d'onde des films vieillissants naturellement comparés avec l'échantillon neuf.

Les résultats obtenus illustrent la présence d'un pic à 1734cm^{-1} correspondant à l'absorption de la double liaison C=O.

Sachant que le PE est un polymère polyoléfinique ; ce résultat est dû à la structure des antioxydants et des pigments du colorant.

De plus, deux pics à 880 et 3600cm^{-1} sont observés. Ceci confirme la présence des liaisons d'absorption N-H et O-H. Ces derniers sont attribués au pigment jaune, présent initialement dans les échantillons.

Il est à noter aussi que l'intensité du pic de la liaison C=O augmente avec le vieillissement du film. Ces résultats concordent avec ceux obtenus par la spectroscopie UV-Visible.

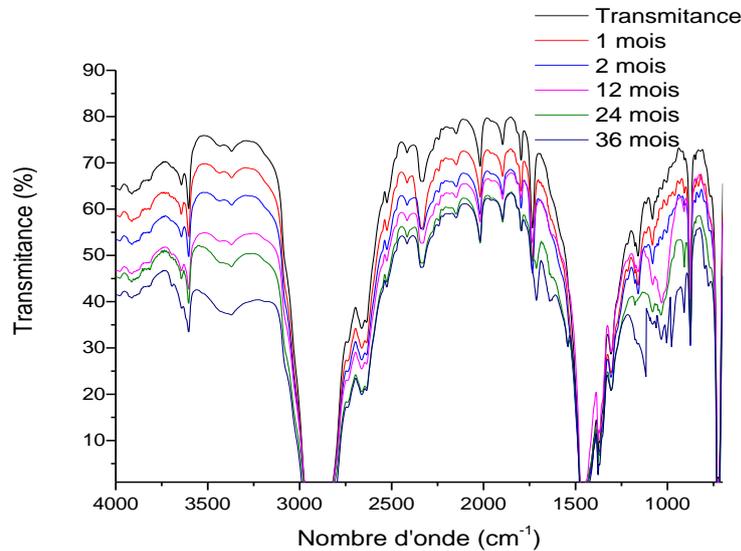


Figure V.23. Résultats IRTF du film neuf et des films vieillis naturellement.

V.4.4. Test photo-thermique

V.4.4.1. Mesure du rayonnement solaire global

Les mesures du rayonnement solaire ont été effectuées un jour d'été avec un ciel dégagé.

Les résultats obtenus de l'irradiation solaire et du rayonnement transmis à travers un échantillon vierge et des échantillons âgés de 12 mois, 24 mois et 36 mois respectivement, sont présentés dans la figure V.24.

La transmittance du rayonnement solaire (τ), étant défini comme $\tau = I/I_0$ où I_0 et I sont respectivement l'irradiation incidente mesurée sans et à travers le film comme obstacle (Voir dispositif Figure III.34 du chapitre III).

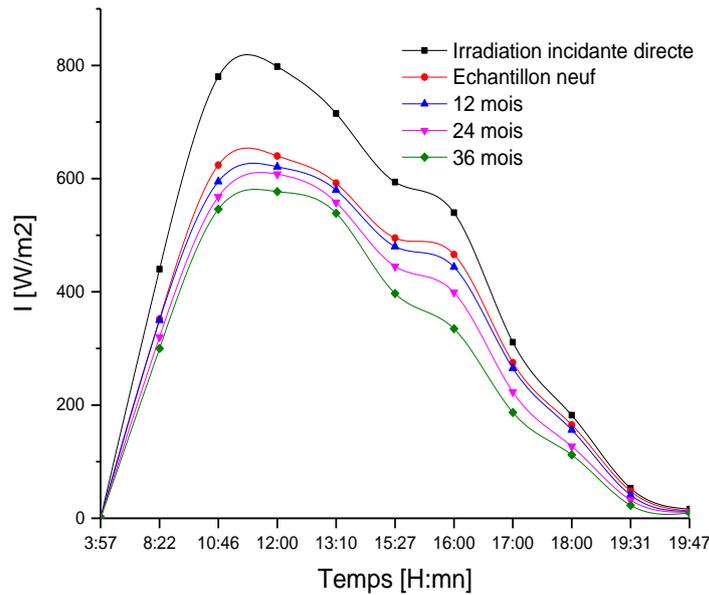


Figure V.24. Les mesures de l'irradiation solaire pour la journée du 18 juillet 2019 : Cas de l'irradiation solaire incidente directe et transmise à travers un échantillon neuf et des échantillons exposés pendant 12 mois, 24 mois et 36 mois.

La transmission moyenne du rayonnement solaire τ , d'un nouvel échantillon est de 80 % ce qui se situe dans la plage de transmission du film plastique [70 % à 95 %][125].

Elle a atteint 78 % après un an d'exposition (12 mois). Elle a diminué à une valeur de 72 % dans la deuxième année, puis a atteint la valeur de 64 % après 3 ans d'exposition. Cela correspond à une réduction progressive de la transmission solaire de 2,5 %, 10 % et 20 % au cours de la première, de la deuxième et de la troisième année, respectivement.

Ces résultats sont cohérents avec les résultats obtenus par spectrométrie FTIR car l'accroissement de la dégradation avec la durée du vieillissement conduit à une réduction de la transmittance. Comme l'énergie incidente convertie en chaleur par le système est proportionnelle à la transmittance, la réduction de celle-ci réduira l'énergie efficace globale produite par le système. Ceci sera étudié plus en détail dans la section de simulation.

Les essais mécaniques (traction et dureté) montrent une perte importante des propriétés après une exposition de 3 ans pour des conditions environnementales sud méditerranéennes (Boumerdes).

Les tests spectroscopiques confirment l'amplification de la dégradation des films en fonction du temps. Les tests des mesures photo-thermiques indiquent que la transmittance du film diminue considérablement en fonction de la durée du vieillissement.

V.5. Résultats issus de la simulation et analyse

V.5.1. Validation du modèle

Afin de valider le modèle développé, les paramètres mesurés de la cheminée solaire de Manzanares sont pris comme référence. Une comparaison entre les résultats de la simulation et les résultats expérimentaux [70] est reportée dans le Tableau V.9.

Tableau V.9. Comparaison entre les valeurs mesurées et les résultats de simulation.

| Paramètres | Mesurées | Calculées |
|-----------------|----------|-----------|
| ΔT [°C] | 19,5 | 18,8 |
| W_{eff} [kW] | 48,4 | 49,32 |
| v_{ch} [m/s] | 15 | 14,5 |

La comparaison entre des données mesurées de la centrale pilote de Manzanares et la simulation montre un bon accord (Erreur relative inférieur à 4%).

V.5.2. Modèle de référence

Les données techniques du Tableau V.10. seront utilisées pour la simulation et l'étude analytique.

Tableau V.10. Paramètres et données de la CCS de référence.

| Paramètres géométriques | Valeurs |
|---|-----------|
| Hauteur du collecteur h [m] | 1.85 |
| Diamètre du collecteur Dcoll [m] | 244 |
| Hauteur de la cheminée Hch [m] | 194.6 |
| Diamètre de la cheminée dch [m] | 10.16 |
| Efficacité de l'aéroturbine η_{turb} [%] | 83 |
| Efficacité du générateur [%] | 90 |
| Transmittance du collecteur solaire τ [%] | 87 |
| Absorbance du collecteur solaire α [%] | 0.76 |
| Coefficient des pertes du collecteur β [W/m ² K] | 15 |
| Conditions ambiantes | |
| Température ambiante [K] | 18+273.15 |
| Accélération gravitationnelle [m/s ²] | 9.81 |
| Irradiation solaire [W/m ²] | 1000 |
| Chaleur spécifique de l'air Cp [J/kg K] | 1004 |

V.5.2.1. Influence du vieillissement sur le rendement thermique de la CCS

Afin d'étudier l'influence du vieillissement sur le rendement du collecteur et le rendement global de la CCS, ces derniers ont été calculés pour les valeurs de transmittance solaire correspondant à un film neuf et aux films vieillis. Les dimensions de la centrale de Manzanares ont été reprises pour ce cas d'étude.

La figure V.25 illustre l'évolution du rendement global et le rendement du collecteur pour les différentes valeurs de la transmittance. Les résultats révèlent que la réduction de transmittance conduit à une réduction du rendement du collecteur. En effet le collecteur reçoit moins d'énergie incidente du fait de la réduction de la transmittance du couvercle, et par conséquent la chaleur transmise à l'air est réduite. L'air à la sortie du collecteur est moins chaud. La diminution de la transmittance du film réduit

l'efficacité thermique du système et par voie de conséquence l'efficacité globale du système.

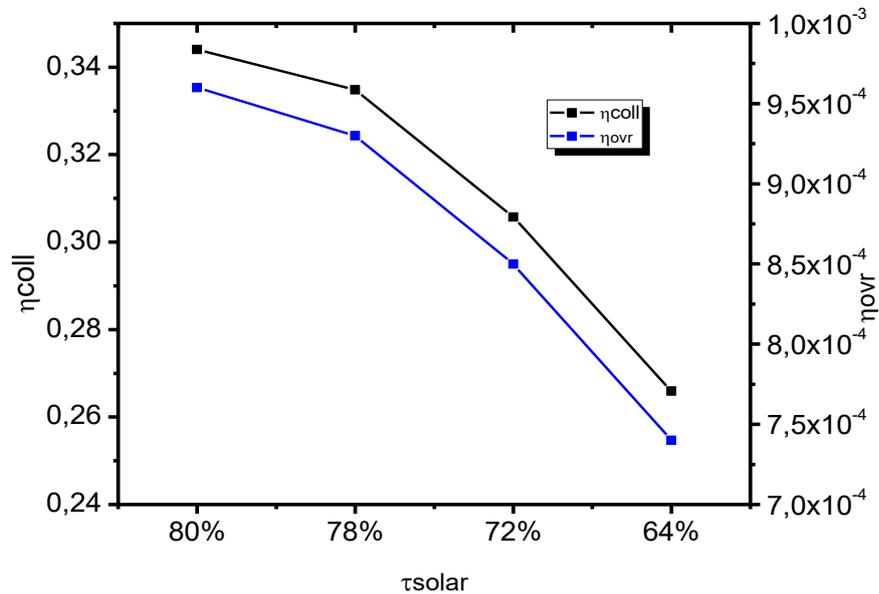


Figure V.25. Evolution de l'efficacité globale et du collecteur de la CCS pour les cas : Nouvel échantillon ($\tau = 80$), 1 an ($\tau = 78$), 2 ans ($\tau = 72$) et trois ans ($\tau = 64$).

Les calculs de simulation d'une CCS utilisant un polyéthylène basse densité comme couverture du collecteur montrent une diminution de l'efficacité thermique du collecteur et de l'efficacité globale du système au cours des 3 ans (Figure V.25). En effet, cette dernière a régressé de $\eta_{ovr} = 0,096\%$ pour un nouvel échantillon à $0,074\%$ pour un échantillon de trois ans d'exposition (36 mois).

La réduction de l'efficacité du capteur impacte l'énergie transmise à l'air à l'intérieur de la canopée. L'efficacité du capteur diminue de 11 % après 2 ans d'exposition et de 23 % après 3 ans d'exposition, comme le montre la figure V.25.

V.5.2.2. Influence du vieillissement sur le gain en température

Le programme de calcul pour différentes valeurs de la transmittance, et en gardant les paramètres géométriques de la centrale de Manzanares, a permis l'étude de l'effet du vieillissement sur le gain de température.

Une baisse du gain thermique en fonction de l'âge du film exposé a été enregistrée (Figure V.26.). Le vieillissement influence le gain en température de l'air à l'intérieur du capteur. La baisse de température (ΔT) diminue d'environ 2 %, 8 % et 16 % après un, deux et trois ans d'exposition respectivement (Figure V.26.).

V.5.2.3. Influence du vieillissement sur la puissance produite

La Figure V.26. montre l'évolution de la puissance produite en fonction de l'évolution de la transmittance. Une diminution progressive de la puissance effective produite est observée sur les trois ans.

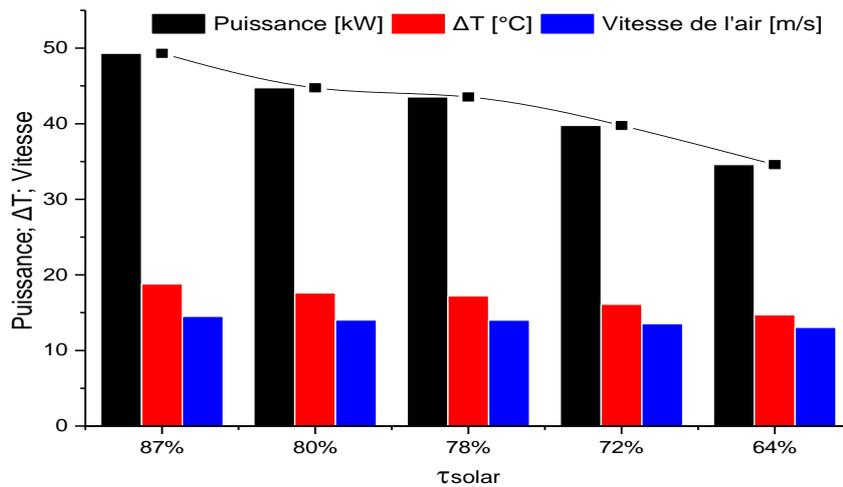


Figure V.26. Puissance effective, gain thermique et vitesse d'air pour les cas : Verre ($\tau = 87$) et couverture en PEBD : Echantillon neuf ($\tau = 80$), un an ($\tau = 78$), deux ans ($\tau = 72$) et trois ans ($\tau = 64$) d'exposition respectivement.

Ces résultats concordent avec l'étude de l'influence du vieillissement sur le rendement. En effet, la réduction du rendement du collecteur comme vu précédemment, engendre une déperdition de l'énergie transmise au système, et par conséquent réduit la puissance effective produite.

La Figure V.26. montre que la perte de production atteint 23% à la 3ème année. Ceci correspond à un manque de production de 10 kW pour une irradiation incidente de $I_0 = 1000 \text{ W/m}^2$.

Afin de maintenir l'objectif de production d'énergie initiale (50 kW) lors de l'utilisation du PEBD, il est nécessaire d'estimer, lors de la phase de conception, soit une hauteur supplémentaire de la cheminée, soit une surface supplémentaire du collecteur pour compenser la perte de production d'énergie causée par le vieillissement. Pour le démontrer, le code mathématique a été exécuté en faisant varier la hauteur de la cheminée et la surface du collecteur.

V.5.2.4. Influence de la variation de la hauteur de la cheminée

Afin d'étudier l'influence de la hauteur de la cheminée sur les performances de la CCS, la puissance développée et la vitesse de l'air ont été calculées pour différentes valeurs de Hch.

La Figure V.27. donne l'évolution de la puissance effective et la vitesse de l'air en fonction de la hauteur de la cheminée. La puissance développée est proportionnellement dépendante de la hauteur de la cheminée Hch.

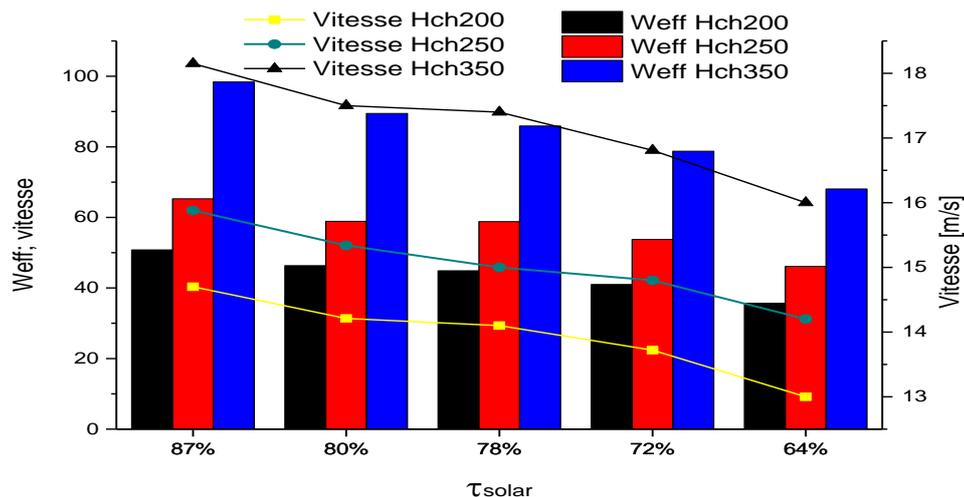


Figure V.27. Evolution de la puissance développée et de la vitesse d'air en fonction de H_{ch}

L'augmentation de la hauteur de la cheminée accroît considérablement la puissance effective produite par le système. La hauteur de la cheminée est un paramètre principal et prédominant dans le dimensionnement des CCS.

En effet, la vitesse du courant d'air ascendant augmente avec l'augmentation de la hauteur de la cheminée H_{ch} (Figure V.27.). Cela entraîne une augmentation du débit d'air à l'intérieur du système et par conséquent de la puissance produite.

V.5.2.5. Influence de la variation du diamètre du collecteur

La Figure V.34. montre l'influence de la variation du diamètre du collecteur sur les performances de la centrale à cheminée solaire.

La puissance effective produite est proportionnelle à la variation du diamètre du collecteur (La surface de captage). En effet, une augmentation de la puissance produite et du gain de température est enregistrée (Figure V.34.). Plus le collecteur est large, plus importante sera la puissance développée.

En augmentant le diamètre du collecteur, c'est-à-dire la surface recevant le rayonnement incident, la surface de captage du rayonnement solaire du système devient plus importante. Cette surface additionnelle permet la transmission d'une énergie supplémentaire à l'air sous la couverture, améliorant ainsi le gain thermique. La différence de température (ΔT) et la puissance produite étant proportionnelles à la surface du capteur.

La Figure V.34. montre aussi, que l'augmentation du rayon du collecteur affecte le gain de chaleur dans ce dernier, d'où une augmentation plus importante de la température à l'entrée de la cheminée (Sortie du collecteur).

V.5.3. Influence de paramètres prépondérants conjugués à l'effet de vieillissement

Dans ce qui suit, l'influence de paramètres prépondérant tel que l'irradiation solaire et la section de la cheminée sont analysée

Pour cela les dimensions de la CCS de référence sont reportées dans le Tableau V.11.

Tableau V.11. Paramètres et données de la CCS de référence [12].

| Paramètres géométriques | Valeurs |
|---|-----------|
| Hauteur du collecteur h [m] | 2 |
| Diamètre du collecteur Dcoll [m] | 200 |
| Hauteur de la cheminée Hch [m] | 100 |
| Diamètre de la cheminée dch [m] | 8 |
| Température ambiante K | 20+273.15 |
| Irradiation solaire [W/m ²] | 1200 |

V.5.3.1. Influence de la variation de l'irradiation solaire I

Les figures V.28, V.29 et V.30 montrent l'effet de la variation de l'irradiation solaire sur le gain thermique, le rendement du collecteur et la puissance de la CCS, pour les cas du verre, d'un film neuf et d'un film de trois 3 ans d'âge, respectivement.

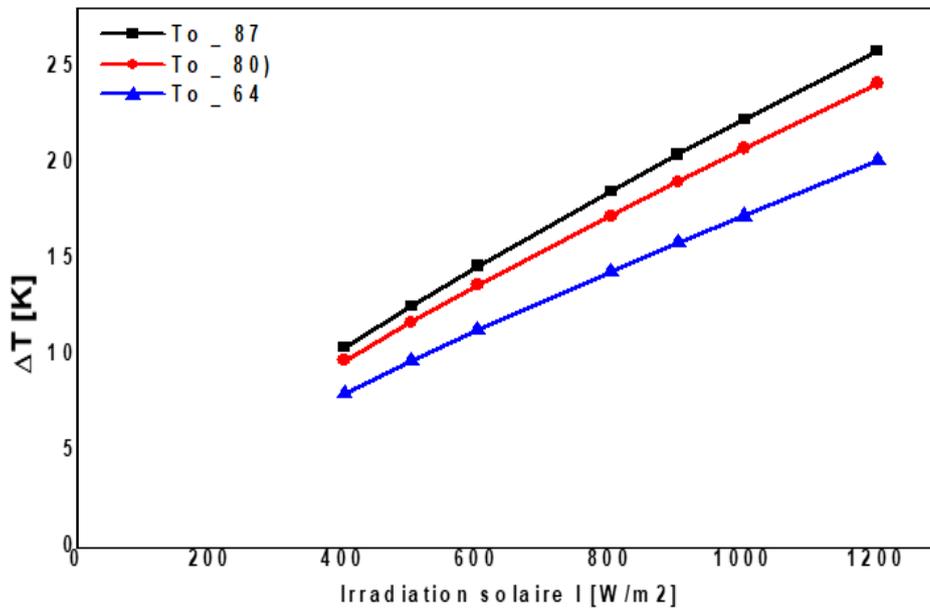


Figure V.28. Evolution du gain thermique, en fonction de l'irradiation solaire.

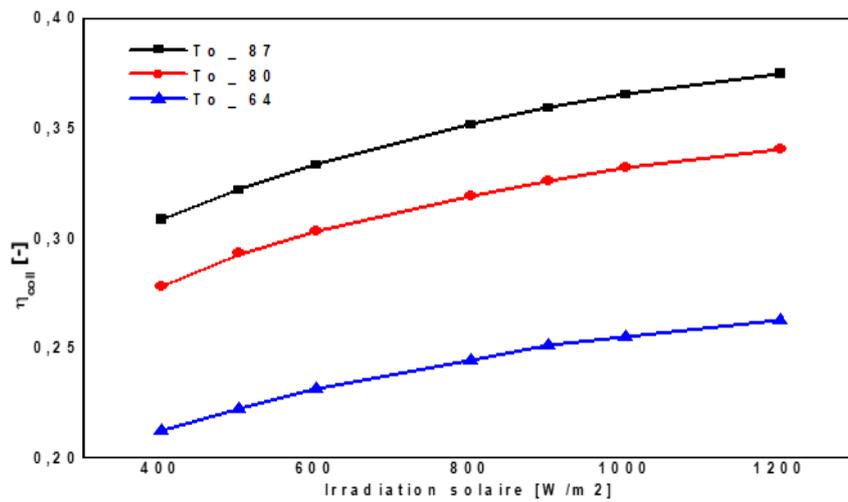


Figure V.29. Evolution du rendement du collecteur en fonction de l'irradiation solaire.

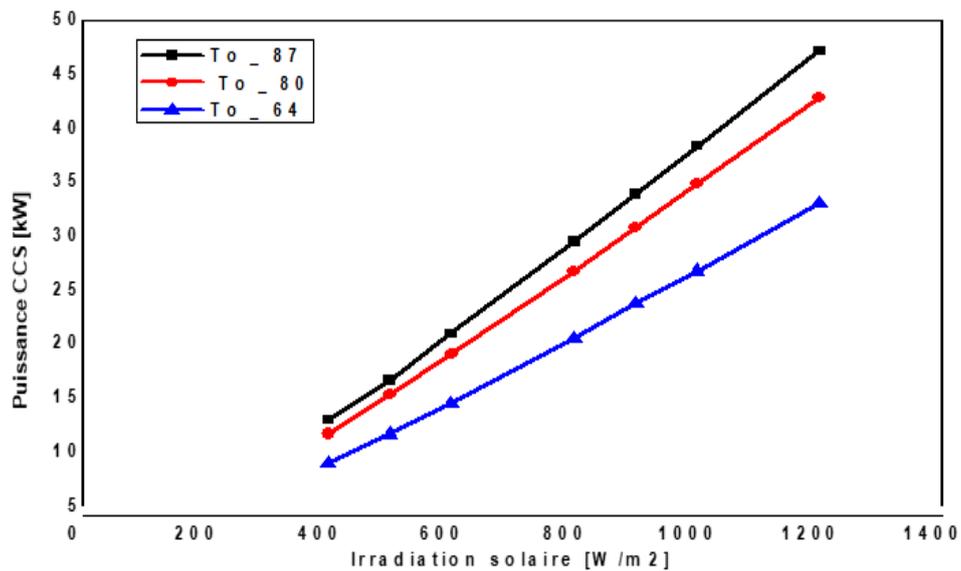


Figure V.30. Evolution de la puissance développée de la CCS en fonction de l'irradiation solaire.

L'augmentation de l'irradiation solaire, augmente le gain thermique de l'air dans le collecteur (Figure V.28) et par conséquent son rendement (Figure V.29). En effet plus l'énergie incidente est importante, plus la quantité convertie en puissance est importante (Figure V.30).

Ces paramètres sont directement proportionnels à l'irradiation solaire.

Le rendement n'est pas uniquement fonction des dimensions et du type de matériau utilisé dans la CCS, il dépend aussi de la puissance incidente. Cependant le

vieillessement du PEBD engendre des pertes en gain thermique qui se traduit par une réduction de la puissance produite par le système. En effet le vieillissement du collecteur réduit la capacité de conversion du rayonnement solaire en chaleur dans le système. De plus, l'ensoleillement est un accélérateur du vieillissement des films plastiques.

V.5.3.2. Influence de la variation de la section de la cheminée

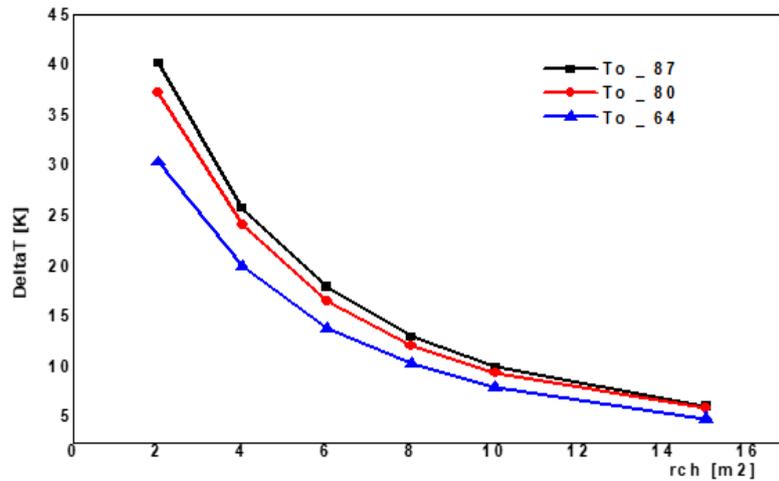


Figure V.31. Evolution du gain thermique en fonction de la section de la cheminée.

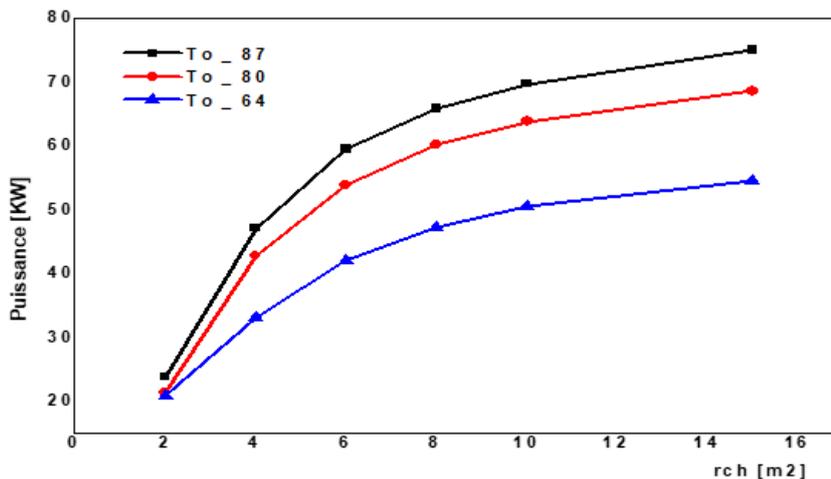


Figure V.32. Evolution de la puissance de la CCS en fonction de la section de la cheminée.

La variation du rayon de la cheminée montre que l'augmentation de la section de celle-ci, cause une diminution du gain thermique (Figure V.31). En effet, l'augmentation de la section de la cheminée engendre l'augmentation du débit d'écoulement. Ayant maintenu les paramètres du collecteur fixes, donc la même quantité de chaleur transmise à une masse plus importante du fluide caloporteur, conduit à une réduction de la température de sortie de l'air du collecteur.

En effet, les dimensions du collecteur thermique sont maintenues constantes, la quantité de chaleur transmise au fluide reste fixe alors que le débit augmente. Par ailleurs, l'augmentation du débit causé par l'augmentation de la section de la cheminée, conduit à une élévation de la puissance développée. Cette augmentation, s'amointri avec l'augmentation de la section (Augmentation de débit).

L'augmentation de la section de la cheminée à un double effet, à impacts opposés : D'une part elle conduit à l'augmentation du débit d'où une augmentation de la puissance et d'autre part elle conduit à la réduction du rendement du collecteur, d'où la réduction du gain thermique.

Il est constatable que le vieillissement contribue aussi à la réduction du gain thermique (Figure V.31) et par conséquent accentue la perte en puissance (Figure V.32) L'augmentation de la section de la cheminée conjuguée à l'effet de vieillissement réduit considérablement le rendement du collecteur et par conséquence du système global.

Finalemnt, l'augmentation de la section de la cheminée doit être corrélé avec l'augmentation du rayon du collecteur, afin de trouver un point optimum de fonctionnement.

V.5.3.3. Analyse du cas d'une CCS commerciale :

Pour des buts d'analyse, et afin de pouvoir visualiser l'impact d'un paramètre bien précis, les dimensions de la CCS de référence ont été maintenu constantes, pendant la variation du paramètre étudié. Cela ne peut être pour le cas de design d'une centrale commerciale. En effet, afin que le système puisse supporter la masse d'air engendrée par l'augmentation de la hauteur de la cheminée, il doit être accompagnée par l'élévation des autres dimensions tels que la section de la cheminée et le diamètre du collecteur.

Pour simuler le cas d'une centrale à cheminée solaire commerciale, les dimensions d'une CCS à échelle industrielle sont utilisées (Tableau V.12) [62].

Tableau V.12. Paramètres et données d'une CCS commerciale de 100 Mégawatt.

| Paramètres géométriques | Valeurs |
|---|---------|
| Hauteur du collecteur h [m] | 2 |
| Diamètre du collecteur Dcoll [m] | 9500 |
| Hauteur de la cheminée Hch [m] | 900 |
| Diamètre de la cheminée dch [m] | 200 |
| Température ambiante [K] | 18 |
| Irradiation solaire [W/m ²] | 1000 |

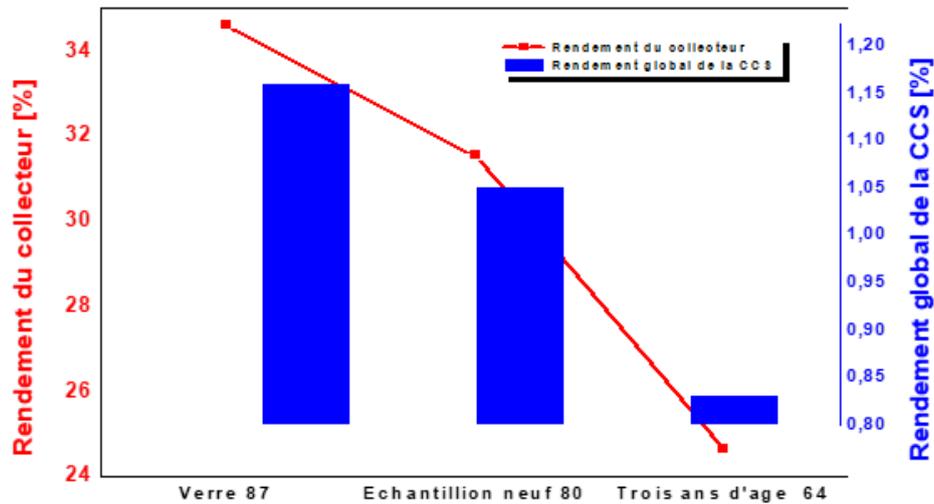


Figure V.33. Evolution du rendement global et du rendement du collecteur en fonction du vieillissement du matériau pour le cas d'une CCS commerciale.

La figure V.33 montre une diminution du rendement du collecteur, pour le cas d'une CCS commerciale, comparativement à l'usage du PEBD par rapport au verre (Réduction de l'ordre de 9%), et comparativement à un échantillon neuf par rapport à un échantillon vieilli de 3 ans d'âge (Réduction de l'ordre de 21%).

En conclusion, le rendement thermique globale de la CCS initialement faible est impacté par le choix et le vieillissement du matériau utilisé.

V.6. Discussions

Les modèles de description classique utilisés dans l'analyse des performances énergétiques des CCS (Modèles de Schlaich, de Gannon, de Dai, de Ming, de Zhoo et de Chitsomboon) [4] considèrent les paramètres photo-thermiques (absorptivité et transmittivité) constants. Les résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de cette étude ont montré que ces paramètres diminuent avec le vieillissement du matériau utilisé dans le collecteur. Les valeurs expérimentales ont été introduites dans le modèle afin de simuler le comportement réel d'une CCS utilisant le polyéthylène basse densité comme couverture du collecteur, en adéquation avec l'âge du matériau.

En considérant les caractéristiques techniques d'une centrale CCS de puissance nominale de 44,74 kW (similaire à celle de la centrale de Manzanares, avec une toiture en PEBD) et afin d'assurer la même production de puissance nominale sur un cycle d'exploitation de 3 ans ($\tau = 64 \%$) deux solutions sont possibles : Soit l'augmentation de la hauteur initiale de la cheminée de 45 m équivalant à une augmentation de 23 %, comparativement à la valeur initiale ; Ou bien l'augmentation du diamètre du capteur de 28 m, d'où une surface initiale du capteur de 276 m², soit une augmentation de 22% par rapport à la surface de référence.

Les différents calculs ont révélé une diminution de l'efficacité thermique du collecteur et de l'efficacité globale du système au fil des années (Figure. V.11). En effet, la diminution de la transmittance du film résultant de son vieillissement réduit l'efficacité thermique du système et influence le rendement global du système.

L'efficacité globale du système a diminué de $\eta_{ovr} = 0,096\%$ pour le cas d'un nouvel échantillon à 0,074% pour un échantillon de trois ans d'âge (36 mois).

La réduction de l'efficacité du capteur impacte l'énergie transmise à l'air sous l'encontre. L'efficacité du capteur diminue de 11 % après 2 ans d'exposition et de 23 % après 3 ans d'exposition (Figure V.25). Cela impacte le gain thermique : ΔT diminue de 2 %, 8 % et 16 % après un, deux et trois ans d'exposition respectivement (Figure. V.26.).

Une diminution progressive de la puissance effective produite est observée à travers les années (Figure V.26). La perte de puissance produite atteint 23% lors de la 3ème année correspondant à un manque de production de 10 kW (Figure V.26).

Afin de compenser les pertes énergétiques et maintenir la production d'énergie initiale, il est nécessaire d'estimer, en phase de conception, soit une hauteur supplémentaire de la cheminée soit une surface supplémentaire du collecteur pour compenser la perte de production d'énergie due au vieillissement.

Pour le démontrer, le programme a été exécuté en faisant varier la hauteur de la cheminée.

La figure V.27 montre que la variation de la puissance et la variation de la vitesse de l'air est proportionnelle à la hauteur de la cheminée. En effet, la vitesse du courant ascendant est proportionnelle à la hauteur de cheminée H_{ch} (Figure V.27). Cela entraîne une augmentation du débit d'air à l'intérieur du collecteur et par conséquent de la puissance produite.

L'augmentation de la surface du capteur démontre une augmentation de la puissance effective produite en raison d'une augmentation du gain de température (Figure V.28).

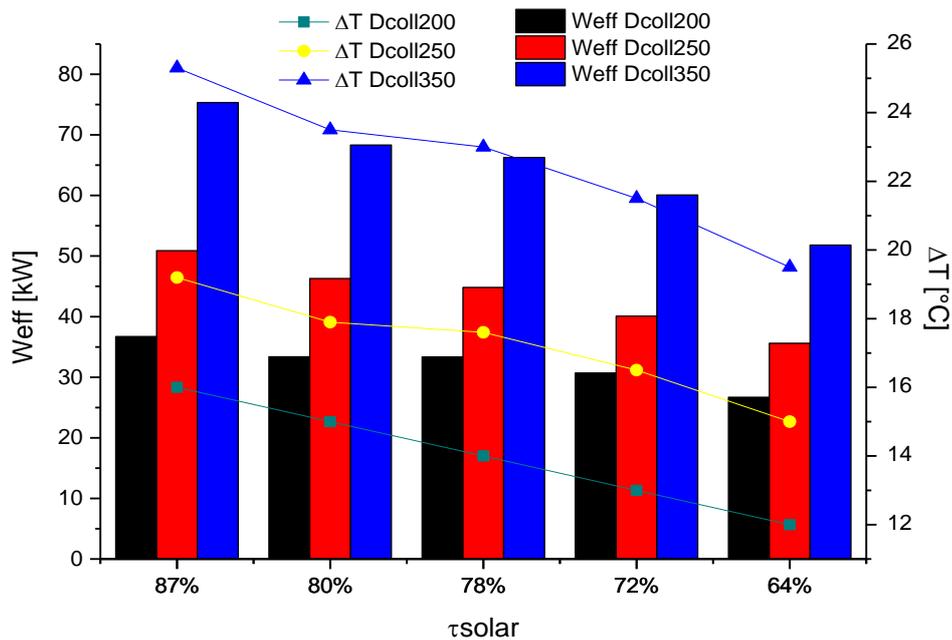


Figure V.34. Evolution de la puissance développée et du gain thermique pour différentes valeurs de D_{coll}

En effet, en augmentant le diamètre du collecteur (La surface recevant le rayonnement incident) une énergie supplémentaire est transmise à l'air, améliorant ainsi le gain thermique. Le gain en température ΔT et la puissance produite sont tous deux proportionnels à la surface du collecteur (Figure V.34).

Afin d'assurer la continuité de la production nominale de 44,74 kW, pour une durée de vie de 3 ans, en utilisant le PEBD comme couverture, deux solutions sont possibles :

- Augmenter la hauteur initiale de la cheminée de 45 m, d'où une augmentation de la hauteur de la cheminée de 23 %, comparativement au modèle initial ;

- Augmenter le diamètre du capteur solaire de 28 m, résultant en une augmentation de la surface du modèle de référence de 22%.

Il est aussi à retenir :

- La puissance développée par la CCS est fortement dépendante de l'irradiation solaire I , et de la hauteur de la cheminée et d'une manière moindre de la section de la cheminée.
- Le rendement thermique globale de la CCS est impacté par le choix et le vieillissement du matériau utilisé.
- L'augmentation d'un paramètre prépondérant dans la CCS doit prendre en considération les autres paramètres pour maximiser le rendement de chaque sous-système.

V.7. Etude technico-économique

En termes de coûts, la construction et l'installation d'une centrale à cheminée solaire nécessite un investissement initial important. La construction d'une cheminée solaire demande une quantité importante de matériaux, notamment du béton, de l'acier et du verre, ce qui peut augmenter le coût global d'investissement. Cependant, en termes de coût d'investissement total, de coût d'exploitation et de respect de l'environnement, la centrale solaire à cheminée reste économiquement rentable [12].

Les études économiques menées sur les CCS, montrent que le coût du collecteur représente jusqu'à 60% du coût d'investissement initiale. Pour le cas d'un collecteur en verre le coût du supportage représente 56% et celui du verre 40% du coût global du collecteur. De ce fait, l'utilisation d'un matériau aussi bon marché que le PEBD présente indéniablement une opportunité d'optimisation économique importante [87].

Le but de la présente étude est de comparer d'un point de vue économique, une CCS à collecteur en verre et une CCS à collecteur en PEBD.

Les hypothèses de l'étude économique sont :

Le modèle économique de Attig-Bahar et al. [137] a été adopté pour l'analyser de l'usage d'une couverture en PEBD :

$$Ct_{tot} = 2 a \pi H_{ch} R_{ch} + b \pi (R_{col}^2 - R_{ch}^2) + c \quad (5.1)$$

Avec :

a : Représente le coût de 1 m² de la structure de la cheminée en béton armé.

Dans la région nord algérien (Boumerdes), le prix du béton installé $C_{béton}$, (fourniture et pose) varie entre 40 000 et 60 000 DZD / m³, selon la difficulté de l'opération. Le premier coût est adopté pour une hauteur de cheminée inférieure à 400 m et le second pour la partie supérieure à 400 m.

Afin de calculer le m² de béton, il faut estimer le volume du béton de la cheminée.

$$V_{béton\ cheminée} = \pi (R_{chext}^2 - R_{chint}^2) H_{ch} \quad (5.2)$$

$$S_{cheminée} = 2 \pi R_{chext} H_{ch} \quad (5.2)$$

$$R_{chext} = R_{chint} + e_{cheminée} \quad (5.2)$$

$V_{béton\ cheminée}$: Volume du béton.

R_{chint} , R_{chext} : Le rayon de le cheminée intérieur et extérieur respectivement.

$e_{cheminée}$ est l'épaisseur de la cheminée.

$$a = V_{béton\ cheminée} \frac{C_{béton}}{S_{cheminée}} \quad (5.3)$$

b : Représente le coût d'installation d'un mètre carré (1 m²) du toit du collecteur estimé pour les cas suivants :

- Verre trempé : 1006 DZD/m² [138]
- PEBD : 51.13 DZD/m²

Les coûts de l'ossature et cadres, des supports et de l'installation [87] :

- L'ossature et les cadres (4%)
- Les supports (56%)

- La pose (10%)

c : Représente les coûts liés à la turbine et les divers coûts d'installation. Ils sont généralement estimés entre 10 à 20 % du coût total [137]. La valeur de 10% est considérée dans la présente étude.

Les coûts d'exploitations et de maintenance (*OpM*) sont faibles. Ils varient entre de 4 à 5%, pour le collecteur et les aéro-turbines [86]. Dans la présente étude, il a été opté pour la valeur de 4%. Pour la cheminée, les coûts d'exploitations et de maintenance sont d'environ 0.55% du coûts d'installation.

La toiture en PEBD est remplacée tous les 3 ans. Le manque de production, durant la période des travaux est estimé à 2 mois (Les mois de Novembre et de décembre)

Les coûts de la nouvelle toiture sont considérés ainsi que la désinstallation et l'installation de cette dernière. Les coûts de démontage et montage du film sont à la hauteur de 20% et 10% du coût d'installation, pour la désinstallation et l'installation respectivement. Ces frets sont actualisés pour l'année correspondante.

Concernant les hypothèses économiques :

- Le taux d'actualisation est : $\tau_{act} = 5\%$
- Facteur d'inflation est : $\tau_{inf} = 3.5\%$

Afin de déterminer la production annuelle de la CCS, le potentiel solaire de la région de Boumerdes a été simulé avec le logiciel (Meteonorme V.8) (Figure V.35).

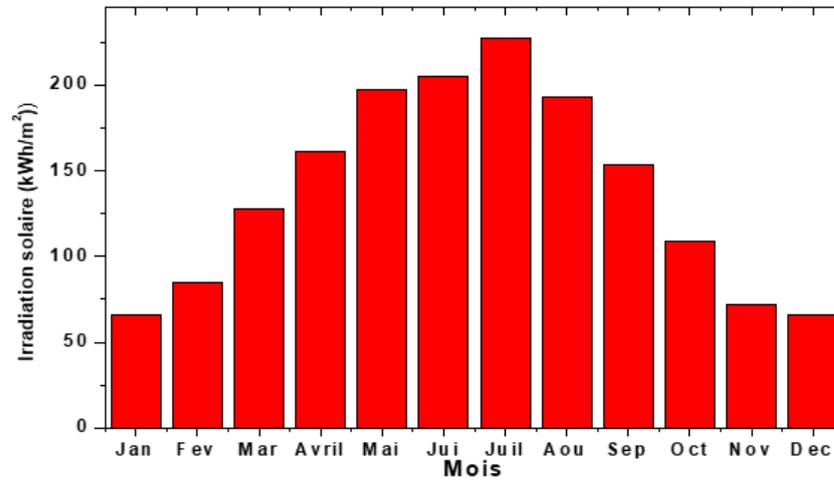


Figure V.35. Représentation du potentiel solaire sur la région de Boumerdes.

La production de la CCS pour le cas d’une couverture en PEBD est calculée sur la base d’un cycle de 3 ans :

- ✓ Cas d’une toiture en PEBD, 1^{ère} année : $\tau = 78 \%$
- ✓ Cas d’une toiture en PEBD, 2^{ème} année : $\tau = 72 \%$
- ✓ Cas d’une toiture en PEBD, 3^{ème} année : $\tau = 64 \%$

Pour le cas de la toiture en verre ($\tau = 87\%$), la production est considérée constante.

La durée de vie de l’installation est supposée de 24 ans d’exploitation.

L’analyse de la performance économique des deux systèmes requière le choix d’un indicateur de performance. Etant donné que ce dernier varie en fonction du contexte et des objectifs, dans ce cas précis, un facteur de performance basé sur le coût actualisé de l’énergie (Levelized Cost of Energy LCOE) est choisi [86] :

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{i=1}^N Dep_i / (1 + \tau_{act})^i}{\sum_{i=1}^N E_{el,an} / (1 + \tau_{act})^i} \text{ [DZD/kWh]}$$

Dep : sont les dépenses ajustées pour considérer l’effet d’inflation selon la formule :

$$Dep_i = (OpM)_i * (1 + \tau_{inf})^i$$

$E_{el,an}$: Energie électrique produite kWh.

I_0 : Représente l’investissement initial, pour l’année 0.

i : est l'année correspondante.

Tauact : Taux d'actualisation

N : Durée d'amortissement de la CCS.

Finalement pour l'analyse économique, une CCS commerciale est considéré (Tableau V.13).

Tableau V.13. Paramètres et données d'une CCS commerciale.

| Paramètres géométriques | Valeurs |
|--|-------------------------------|
| Hauteur du collecteur h [m] | 2 |
| Diamètre du collecteur D_{coll} [m] | 4300 |
| Hauteur de la cheminée H_{ch} [m] | 800 |
| Diamètre intérieur de la cheminée D_{ch} [m] | 110 |
| Epaisseur de la cheminée $e_{p_{ch}}$ [m] | < 400 m : 0.85; > 400m : 0.25 |
| α | 0.76 |
| β | 15 |
| η_t | 83 |
| $\eta_{gén}$ | 90 |

❖ Résultats et interprétations :

Le tableau V.14 résume les résultats de l'étude économique sur un cycle d'exploitation de 24 ans.

Tableau V.14. Résultats de l'étude économique sur une période d'exploitation de 24 ans.

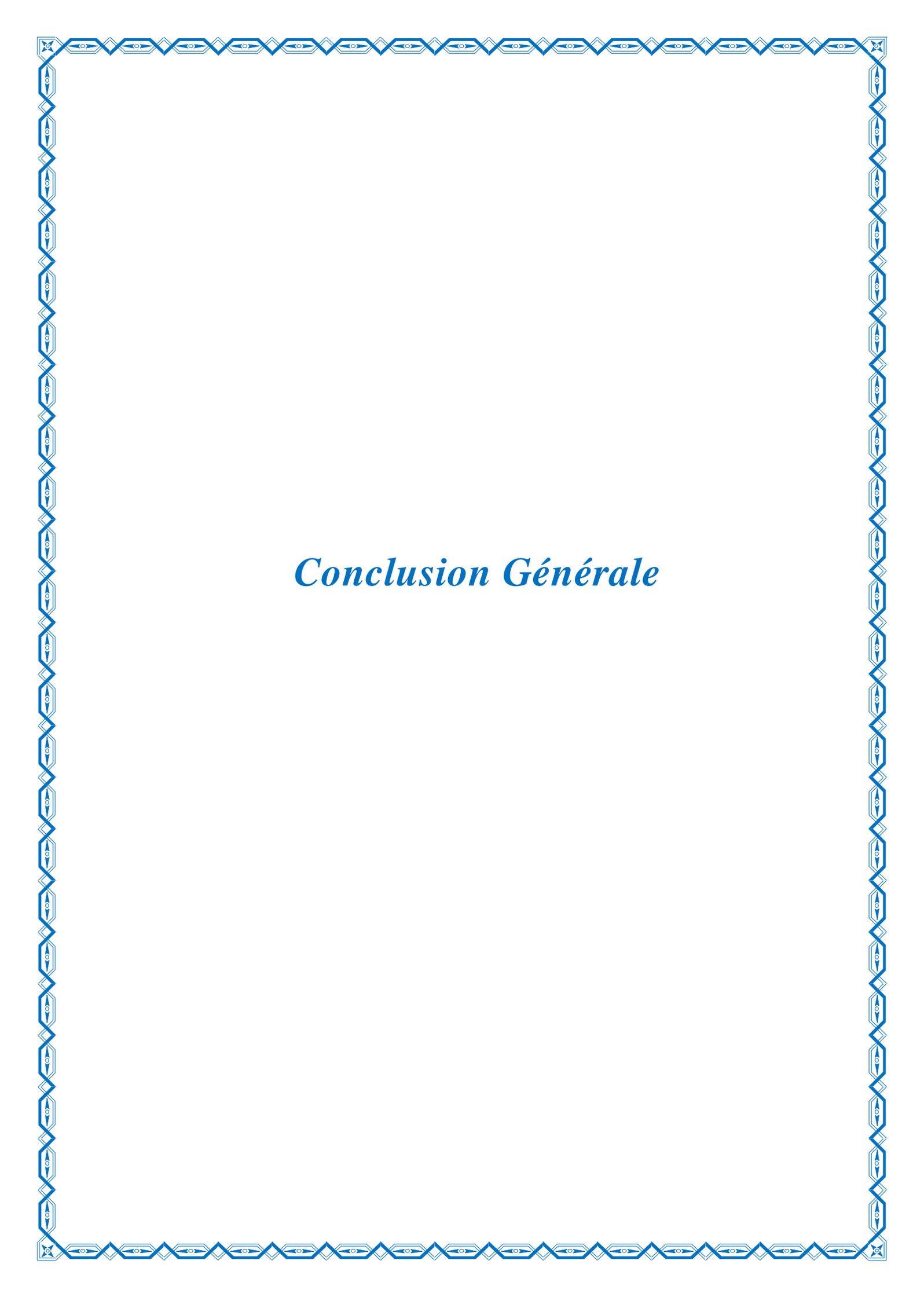
| | Verre | PEBD à égale surface du collecteur | PEBD / Surface du collecteur augmentée de +5% | PEBD / Surface du collecteur augmentée de +10% | PEBD / Surface du collecteur augmentée de +15% | PEBD / Surface du collecteur augmentée de +20% |
|---|----------------|------------------------------------|---|--|--|--|
| Capacité de production d'électricité sur 24 ans [KWh] | 5 951 920 633 | 4 483 729 890 | 4 943 622 535 | 5 425 948 968 | 5 930 709 188 | 6 457 903 196 |
| Investissement initial I_0 [DZD] | 15 292 532 759 | 7 801 091 717 | 7 840 096 720 | 7 881 004 407 | 7 923 814 776 | 7 968 527 829 |
| Dépenses globales [DZD] | 14 380 680 808 | 4 208 125 539 | 4 390 597 018 | 4 581 969 544 | 4 782 243 119 | 4 991 417 740 |
| LCOE DZD/kWh | 6.70 | 3.86 | 3.54 | 3.27 | 3.04 | 2.83 |

L'analyse des résultats montre que, à égale surface du collecteur, le coût de revient de la CCS en PEBD est inférieur à celle en verre de 1.7 fois. En effet les

coûts d'investissement initiale et les dépenses d'exploitations sont moins importants pour le cas d'une CCS en plastique.

Afin de compenser le manque à produire, une augmentation de la surface est du collecteur en PEBD est nécessaire. A égale production Verre/PEBED – Correspondant à une augmentation de la surface du collecteur en plastique de 15% – le coût de revient de la CCS en PEBD est réduit de moitié par rapport au verre.

L'augmentation de la surface du collecteur en PEBD se traduit par une hausse des coûts initiaux d'investissement, mais également des coûts d'exploitation et de maintenance. Toutefois, cela permet également d'augmenter la production électrique, ce qui entraîne une baisse du coût de revient. En exploitant l'économie d'échelle, cette diminution des coûts rend le système économiquement plus attractif et en faveur de la CCS en PEBD.



Conclusion Générale

Conclusion Générale

Les récentes et dernières études sur les Centrales à Cheminée Solaire portent essentiellement sur l'amélioration du rendement de ces systèmes par l'utilisation de nouveaux matériaux ou la modification de la géométrie des sous-systèmes tel que le collecteur.

En effet, le collecteur occupant un espace considérable de plusieurs hectares, présente une opportunité indéniable d'optimisation du système. L'utilisation de matériaux peu coûteux aura pour conséquence la réduction de l'investissement initial, rendant ainsi la CCS plus attrayante économiquement. Néanmoins, la modélisation de ce type de système doit considérer la dégradation des propriétés thermo- physiques des divers éléments de la centrale, due principalement au vieillissement, car cela conduit inéluctablement à une baisse du rendement de ce type de centrale.

Le travail présenté dans cette thèse explore l'utilisation du PEBD comme une alternative au verre pour le couvercle du capteur solaire de la CCS. Cette solution présente des avantages significatifs tels que la réduction des coûts et l'amélioration de certaines propriétés mécaniques telles que la résistance aux chocs. Toutefois, le PEBD est plus sensible aux conditions météorologiques et à l'exposition au soleil, ce qui peut affecter ses propriétés dans le temps.

Ainsi, l'étude a permis la caractérisation physicomécanique, thermique, rhéologique et photo-thermique des films de polyéthylène utilisés dans les serres agricoles pour évaluer leur applicabilité en tant que couverture de collecteurs solaires pour les systèmes de centrale à cheminée solaire. Enfin, une analyse technico-économique a été réalisée pour comparer entre les deux matériaux.

Le PEBD est largement utilisé dans les serres agricoles, fabriqué localement, abondant et bon marché. Les investigations par la caractérisation et les tests physiques, mécaniques, rhéologiques et photo-thermiques, ont permis l'analyse et la comparaison entre le film à l'état neuf et le film à différents âges.

La modélisation et la simulation du système a permis l'estimation du manque de puissance à produire et a permis de mettre en évidence l'atténuation du rendement du système avec le temps dans le cas de l'utilisation du PEBD.

La présente étude a permis de conclure que :

- ✓ La caractérisation, par la détermination du point de fusion et de la masse volumique, confirme que le film est du type polyéthylène basse densité. Une fiche technique du film à l'état neuf a été établie ;
- ✓ Les tests mécaniques (traction et dureté) montrent une perte significative des propriétés du film durant une exposition de trois années. Dépassant cette période, le film devient friable. En effet, après 3ans et 3 mois le film commence à se désagréger. Ces résultats ont été confirmés par les tests spectroscopiques. Ces derniers montrent une dégradation progressive en fonction du temps ;
- ✓ Les mesures pyranométriques révèlent une réduction de la transmittance du film en fonction du vieillissement. Celui-ci décroît proportionnellement avec la durée d'exposition. Une baisse notable de la transmittance et notée après 3 ans de vieillissement ;
- ✓ Les résultats expérimentaux et la simulation ont montré que l'exploitation de la CCS accuse une perte de production causée par le vieillissement du PEBD à travers son cycle d'exploitation. D'où

l'importance de considérer la dégradation des propriétés des CCS le long de la durée de vie de ces sous-systèmes.

- ✓ Pour compenser le manque de puissance à produire causée par le vieillissement du matériau, un sur- dimensionnement de la structure initiale est nécessaire. Deux solutions sont envisageables : soit l'augmentation de la surface du collecteur, soit l'augmentation de la hauteur de la cheminée.
- ✓ Vu le coût et les difficultés techniques liées à la construction d'une cheminée en béton de plusieurs centaines de mètre, l'augmentation de la surface de la serre est la solution la plus idoine ;
- ✓ Pour le cas d'une CCS de 45 kW, une augmentation de 22% de la surface initiale du collecteur, permet de compenser la perte en production de la CCS, durant la période de vie du film ;
- ✓ Cette étude a permis la modélisation des CCS, en incluant l'effet du vieillissement, ce qui permet une meilleure conception du système ;
- ✓ Pour compenser la production équivalente de la CCS en verre, l'augmentation de la surface initiale du collecteur en PEBD dépend de manière inversement proportionnelle de la taille de la CCS de référence. En d'autres termes, plus le diamètre du collecteur est grand, le taux d'augmentation de la surface du collecteur en PEBD est réduit puisque le volume du fluide chauffé est important ;
- ✓ En prenant en compte les coûts supplémentaires liés au remplacement du film plastique tous les trois ans, ainsi que la perte de production due au vieillissement du matériau et aux travaux de renouvellement de la couverture, la CCS en PEBD reste plus économique sur une

durée de vie de 24 ans par rapport à la CCS en verre. En effet, l'augmentation de la surface du collecteur permet d'augmenter la production électrique, ce qui couvre largement les coûts engagés et profite de l'économie d'échelle ;

- ✓ Le présent travail ouvre la voie pour de nouvelles études permettant l'intégration de nouveaux matériaux, pour améliorer l'attractivité des CCS sur les plans techniques et économiques.



Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] Gianpaolo V., Renewable energies, future perspectives renewable, Energy Environmental Sustainability, Vol. 1, pp.17- 24, 2016.
- [2] Himri Y., Rehman S., Moustafaipour A., Melit A., Overview of the role of energy resources in Algeria's energy transition, Energies, Vol. 15, pp. 2-26, 2022.
- [3] Dos Santos Bernardes M. A., Solar chimney power plants developments and advancements. Solar Energy Book, Intech Open, 2010.
- [4] Boualleg S. M. Analyse des performances énergétiques des centrales à cheminée solaire par utilisation de différents modèles mathématiques. Mémoire de Magister, ENP, Alger, 2012.
- [5] S. M. Boualleg, S. Larbi, A. Bouhdjar, N. Rebai. Comparaison de Différents Modèles Analytiques de Centrales à Cheminée Solaire, pour une Meilleure Analyse et Prédiction de Leurs Performances. International Conference on Advanced Mechanics and Renewable Energies, ICAMRE Boumerdes 2018.
- [6] Manfred H., Fuchs M., Stark T., Zeumer M., Construction et énergie : Architecture et développement durable, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes PPUR, Lausanne Swiss, 2011.
- [7] Marty N., Escudero A., Consommateurs et Consommation, Presse universitaire de Perpignan, France, 2015.
- [8] Sørensen B., Renewable Energy, Routledge, New YorkUSA, 2018.
- [9] Foster R., Ghassemi M., Cota A., Solar Energy, Renewable Energy and the Environment, Taylor and Francis Group Edition, New York USA, 2009.
- [10] Moosmann L., Siemons A., The COP27 Climate Change Conference, ENVI, EU Luxembourg, 2022.
- [11] Yassaa N., Diaf S., Bessah R., Algerian Renewable Energy Resource Atlas, CDER MESRS, Algeria, 2019.
- [12] Schlaich J., The Solar Chimney, Axel Menges Edition, Stuttgart Germany, 1995.
- [13] Dai Y.J., Huang H.B., Wang, R.Z., Case study of Solar Chimney Power Plants in Northwestern Regions of China, Renewable Energy, Vol. 28, pp.1295-1304, 2003.
- [14] Haaf W., Friedrich, K., Mayr, G., Schlaich, J., Solar chimneys, part I: principle and construction of the pilot plant in Manzanares, Int. J. Solar Energy, Vol. 2, pp.3–20, 1983.
- [15] Haaf W., Solar chimneys, part II: preliminary test results from the Manzanares pilot plant, Int. J. Solar Energy, Vol.2, pp.141–161, 1984.

- [16] <https://www.enviromission.com.au/site/pdf/ebd00fbd-675e-4cf8-ad18-3e9cd204b3ef/>.
Site consulté le 15/09/2022.
- [17] <https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co2701/convection-mill-physics-apparatus-1919-1928-laboratory-equipment-physics-equipment>.
Site consulté le 15/09/2022.
- [18] Schlaich J., Schiel W., Solar Chimneys. Encyclopedia of Physical Science and Technology, pp.99-109, 2004.
- [19] Schlaich, J., Bergermann, R., Schiel, W., Weinrebe, G., Design of commercial solar updraft tower systems – Utilization of solar induced convective flows for power generation, Proceedings of the International Solar Energy Conference, Kohala Coast, United States, pp. 573–581, 2003.
- [20] Krisst R.J.K., Energy transfer system, Alternative Sources of Energy, Vol. 63, pp.8–11, 1983.
- [21] Kulunk H., A prototype solar convection chimney operated under izmit condition. In : Veziroglu TN, editor. Proc, 7th MICAS, 1985, p. 162.
- [22] Sherif S.A., Pasumarthi N., Experimental and Theoretical Performance of a Demonstration Solar Chimney Model –Part I: Mathematical Model Development, Int. J. Energy Res., Vol. 22, pp. 277- 288, 1998.
- [23] Pasumarthi, N., Sherif S.A., Experimental and Theoretical Performance of a Demonstration Solar Chimney Model –Part II: Experimental and theoretical results and economic analysis, Int. J. Energy Res., Vol. 22, pp.443-461, 1998.
- [24] Akbarzadeh A., Johnson P., Singh R., Examining potential benefits of combining a chimney with a salinity gradient solar pond for production of power in salt affected areas, Solar Energy, Vol. 83, pp. 1345–1359, 2009.
- [25] Zhou X., Yang J., Xiao B., Guoxiang H., Experimental study of the temperature field in a solar chimney power setup, Applied Thermal Engineering, Vol. 27, pp. 2044-2050, 2007.
- [26] Zhou X., Yang J., Xiao B., Guoxiang H., Simulation of a pilot solar chimney thermal power generating equipment, Renewable Energy, Vol. 32, pp. 1637–1644, 2007.
- [27] Ketlogetswe C., Fiszdon J.K., Seabe O.O., Solar chimney power generation project - the case for Botswana, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 12, pp. 2005- 2012, 2008.
- [28] Ferreira A. G., Maia C. B., Marcio F. B. C., Ramon M. V., Technical feasibility assessment of a solar chimney for food drying, Solar Energy, Vol. 82, pp. 198–205, 2008.
- [29] Maia C. B., Ferreira A. G., Ramón M. V., Márcio F.B.C., Theoretical evaluation of the influence of geometric parameters and materials on the behavior of the airflow in a solar chimney, Computers & Fluids, Vol. 38, pp. 625–636, 2009.

- [30] Maia C.B, Ferreira A.G., Valle R.M., Cortez M.F.B., Analysis of the air flow in a prototype of a solar chimney dryer, *Heat Transfer Eng.*, Vol. 30, pp. 393-399, 2009.
- [31] Maia C.B., Castro Silva J.O., Cabezas-Gómez L., Hanriot S.M., Ferreira A.G., Energy and exergy analysis of the airflow inside a solar chimney, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 27, pp. 350–361, 2013.
- [32] Koyun A., Şenol R., Bacas G., Thermal Design of Solar Chimney System, *Journal of HVAC Engineering*, Vol. 98, pp. 45-50, 2007.
- [33] Bugutekin A., An Experimental investigation of the Effect of periphery height and ground temperature changes on the solar chimney System, *Isi BilimVe Tek Derg-J Therm Sci Technol*, Vol. 32, pp. 51–58, 2012.
- [34] Wei YL., Wu ZK., Shed absorbability and tower structure characteristics of the solar heated wind updraft tower power, 3rd international conference on solar updraft tower technology, Huazhong university of science and technology, Wuhan, China; 2012.
- [35] Kasaeian, A.B., Heidari, E., Vatan, S.N., Experimental investigation of climatic effects on the efficiency of a solar chimney pilot power plant, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, pp. 5202–5206, 2011.
- [36] Amirkhani S., Nasirivatan Sh., Kasaeian A.B., Hajinezhad A., ANN and ANFIS models to predict the performance of solar chimney power plants, *Renewable Energy*, Vol. 83, pp. 597-607, 2015.
- [37] Najmi M., Nazari A., Mansouri H., Ghazzanfar Z., Feasibility study on optimization of a typical solar chimney power plant, *Heat Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 475–485, 2012.
- [38] Gholamalizadeh E., Mansouri. S.H.A., comprehensive approach to design and improve a solar chimney power plant: A special case – Kerman project, *Applied Energy*, Vol. 102, pp. 975–982, 2013.
- [39] Kasaeian A., Ghalamchia M., Experimental study of geometrical and climate effects on the performance of a small solar chimney, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 43, pp. 425–431, 2015.
- [40] Kasaeian A., Ghalamchi M., Ghalamchi M., Simulation and optimization of geometric parameters of a solar chimney in Tehran, *Energy Conversion and Management*, Vol. 83, pp.28–34, 2014.
- [41] Shahreza AR, Imani H. Experimental and numerical investigation on an innovative solar chimney, *Energy Convers Manag*, Vol. 95, pp. 446–52, 2015.
- [42] Kalash S., Naimeh W., Ajib S., Experimental investigation of the solar collector temperature field of a sloped solar updraft power plant prototype, *Solar Energy*, Vol. 98, pp. 70–77, 2013.

- [43] Kalash S., Naimeh W., Ajib S., Experimental Investigation of a Pilot Sloped Solar Updraft Power Plant Prototype Performance Throughout a Year, *Energy Procedia*, Vol. 50, pp. 627 – 633, 2014.
- [44] Awwad Al-Dabbas M., The first pilot demonstration: solar updraft tower power plant in Jordan, *International Journal of Sustainable Energy*, Vol. 31, pp. 399-410, 2012.
- [45] Jemli M.R., Experimental investigation of solar tower with chimney effect installed in CRTEn, Tunisia, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 42, pp. 8650-8660, 2016.
- [46] Ayadi A., Bouabidi A., Driss Z., Salah A. M., Experimental and numerical analysis of the collector roof height effect on the solar chimney performance, *Renewable Energy*, Vol. 115, pp. 649-662, 2018.
- [47] Dogan E., Hollick J., Kuscü H., Thermal performance of a transpired solar collector updraft tower, *Energy Conversion and Management*, Vol. 142, pp. 286–295, 2017.
- [48] Pretorius J.P., Optimization and control of a large-scale solar chimney power plant. Ph.D. Thesis, University of Stellenbosch. South Africa, 2007.
- [49] Pretorius J.P., Kröger D.G., Solar chimney power plant performance. *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 128, pp. 302–311, 2006.
- [50] Pretorius J.P., Kröger D.G., Critical evaluation of solar chimney power plant performance, *Solar Energy*, Vol. 80, pp. 535–544, 2006.
- [51] Pretorius J.P., Kröger D.G., Buys J.D., Von Backström, T.W., Solar tower power plant performance characteristics, *Proceedings of the ISES EuroSun, International Sonnenforum, Freiburg Germany*, 2004.
- [52] Gannon A.J., von Backstrom T.W., Solar chimney cycle analysis with system loss and solar collector performance, *Journal of Solar Energy Engineering transactions of the ASME*, Vol. 122, pp. 133–137, 2000.
- [53] T. Ming, Liu W., Xu G., Analytical and numerical investigation of the solar chimney power plant systems, *Int. J. Energy Res*, Vol. 30, pp. 861–873, 2006.
- [54] Ming T., Liu W., Pan Y., Xu G., Numerical analysis of flow and heat transfer characteristics in solar chimney power plants with energy storage layer, *Energy Conversion and Management*, Vol. 49, pp. 2872–2879, 2008.
- [55] Ming T., Liu W., Xu G., Xiong Y., Guan X., Pan Y., Numerical simulation of the solar chimney power plant systems coupled with turbine, *Renewable Energy*, Vol. 33, pp. 897–905, 2008.
- [56] Tingzhen M., *Solar Chimney Power Plant Generating Technology*, Zhejiang University Press CO, ISBN: 978-0-12-805370-6, 2016.

- [57] von Backstrom T.W., Gannon A.J., Solar chimney turbine characteristics, *Solar Energy*, Vol. 76, pp. 235–241, 2004.
- [58] Zhou X., Yang J., Xiao B., Hou G., Xing F., Analysis of chimney height for solar chimney power plant, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, pp. 178–185, 2009.
- [59] Petela R., Thermodynamic study of a simplified model of the solar chimney power plant, *Solar Energy*, Vol. 83, pp. 94–107, 2009.
- [60] Koonsrisuk A., Lorente S., Bejan, A., Constructal solar chimney configuration, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 327–333, 2010.
- [61] Koonsrisuk A., Comparison of conventional solar chimney power plants and sloped solar chimney power plants using second law analysis, *Solar Energy*, Vol. 98, 78–84, 2013.
- [62] Mullett L.B., The solar chimney overall efficiency, design and performance, *Int. J. Ambient Energy*, Vol. 8, pp.35–40, 1987.
- [63] Michaud L.M., Thermodynamic Cycle of the Atmospheric Upward Heat Convection Process, *Meteorol Atmos Phys*, Vol. 46, pp. 72, 29, 2000.
- [64] Ninic N., Available energy of the air in solar chimneys and the possibility of its ground-level concentration, *Solar Energy*, Vol. 80, pp. 804–811, 2006.
- [65] Yan D., Wenqing S., Tingzhen M., Wu Y., Renaud K. de Richter., Numerical analysis on an industrial-scaled solar updraft power plant system with ambient crosswind, *Renewable Energy*, Vol. 68, pp. 662-676, 2014.
- [66] Bernardes M.A.D.S., Valle R.M., Cortez M.F.B., Numerical analysis of natural laminar convection in a radial solar heater, *Int. J. Therm. Sci.*, Vol. 38, pp.42–50, 1999.
- [67] Bernardes M.A.D.S., Weinrebe, A. Voß G., Thermal and technical analyses of solar chimneys, *Solar Energy*, Vol. 75, pp. 511–524, 2003.
- [68] Bernardes M.A.D.S., Von Backstrom T. W., Detlev G. K., Analysis of some available heat transfer coefficients applicable to solar chimney power plant collectors, *Solar Energy*, Vol. 83, pp. 264–275, 2009.
- [69] Pastohr H., Kornadt, O., Gürlebeck K., Numerical and analytical calculations of the temperature and flow field in the upwind power plant. *Int. J. Energy Res.*, Vol. 28, pp. 495–510, 2004.
- [70] Chergui T., Larbi S., Bouhdjar A., Thermo-hydrodynamic aspect analysis of flows in solar chimney power plants-A case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, pp.1410–1418, 2010.
- [71] Larbi S., Bouhdjar A., Chergui T., Performance analysis of a solar chimney power plant in the southwestern region of Algeria, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, pp. 470–477, 2010.

- [72] Ming T., Richter R.K., Meng F., Pan Y., Liu W., Chimney shape numerical study for solar chimney power generating systems, *International Journal of Energy Research*, Vol. 37, pp. 310-322, 2013.
- [73] Denantes F., Bilgen E., Counter-rotating turbines for solar chimney power plants, *Renewable Energy*, Vol. 31, pp. 873–891, 2006.
- [74] Fluri T.P., Von Backstrom T.W., Comparison of modelling approaches and layouts for solar chimney turbines, *Solar Energy*, Vol. 82, pp. 239–246, 2008.
- [75] Fluri T.P., Von Backstrom T.W., Performance analysis of the power conversion unit of a solar chimney power plant, *Solar Energy*, Vol. 82, pp. 999–1008, 2008.
- [76] Gannon A.J., Von Backstrom T.W., Compressible flow through solar power plant chimneys, *Journal of Solar Energy Engineering – Transactions of the ASME*, Vol. 122, pp. 138–145, 2000.
- [77] Gannon, A.J., von Backstrom, T.W., Solar chimney turbine performance. *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 125, pp. 101–106, 2003.
- [78] Koonsrisuk A., Chitsomboon T., Dynamic similarity in solar chimney modeling *Solar Energy*, Vol. 81, pp. 1439–1446, 2000.
- [79] Koonsrisuk A., Chitsomboon T., A single dimensionless variable for solar chimney power plant modeling *Solar Energy*, Vol. 83, pp. 2136–2143, 2009.
- [80] Onyango F., Ochieng R., Frederick N.O., Reccab M.O., The potential of solar chimney for application in rural areas of developing countries, *Fuel*, Vol. 85, pp. 2561–2566, 2006.
- [81] Harte R., Gideon P.A.G., Van Z., Structural stability of concrete wind turbines and solar chimney towers exposed to dynamic wind action, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 95, pp. 1079–1096, 2007.
- [82] Van Reken, T.M., Nenes A., Cloud formation in the plumes of solar chimney power generation facilities: A modeling study, *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 131, 011009, 2009.
- [83] Zhou X., Yang J., Reccab M.O., Xiangmei L., Xiao B., Numerical investigation of a plume from a power generating solar chimney in an atmospheric cross flow, *Atmospheric Research*, Vol. 91, pp. 26–35, 2009.
- [84] Xinping Z., Marco A.D.S.B., Reccab M.O., Influence of atmospheric cross flow on solar updraft tower inflow, *Energy*, Vol. 42, pp. 393-400, 2012.
- [85] Bernardes M.A. dos Santos., Theodor W. von Backstrom, Evaluation of operational control strategies applicable to solar chimney power plants. *Solar Energy*, Vol. 84, pp. 277–288, 2010.
- [86] Nizetic S., Ninic N., Klarin B., Analysis and feasibility of implementing solar chimney power plants in the Mediterranean region. *Energy*, Vol. 33, pp. 1680–1690, 2008.

- [87] Fluri T.P., Pretorius, J.P., Dyk, C.V., von Backström T.W., Kroger D.G., Zijl, G.P.A.G.V., Cost analysis of solar chimney power plants, *Solar Energy*, Vol. 83, 246–256, 2009.
- [88] Zhou, X., Yang, J., Wang, F., Xiao, B., Economic analysis of power generation from floating solar chimney power plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, pp. 736–749, 2009.
- [89] Cao F., Huashan L., Zhao L., Guo L., Economic analysis of solar chimney power plants in Northwest China, *Journal of renewable and sustainable energy*, Vol. 5, 021406, 2013.
- [90] Babkir A., Techno-economic optimization for the design of solar chimney power plants, *Energy Conversion and Management*, Vol. 138, pp. 461–473, 2017.
- [91] Zuo L., Zihan L., Dai P., Ning Q., Ding L., Zheng Y., Yunting G., Economic performance evaluation of the wind supercharging solar chimney power plant combining desalination and waste heat after parameter optimization, *Energy*, Vol. 227, 120496, 2021.
- [92] Kashiwa. B.A., Kashiwa C.B., The solar cyclone: A solar chimney for harvesting atmospheric water, *Energy*, Vol. 33, pp. 331–339, 2008.
- [93] Zhou, X., Yang J., A novel solar thermal power plant with floating chimney stiffened onto a mountainside and potential of the power generation in China's deserts, *Heat Transfer Engineering*, Vol. 30, pp. 400–407, 2009.
- [94] Zhou X., Yang J., Wang J., Xiao B., Novel concept for producing energy integrating a solar collector with a man-made mountain hollow, *Energy Conversion and Management*, Vol. 50, pp. 847–854, 2009.
- [95] Bilgen E., Rheault J., Solar chimney power plants for high latitudes, *Solar Energy*, Vol. 79, pp. 449–458, 2005.
- [96] Hamdan M.O., Analysis of a solar chimney power plant in the Arabian Gulf region, *Renewable Energy*, Vol. 36, pp. 2593–2598, 2011.
- [97] Chen K., Wang J., Dai Y., Liu Y., Thermodynamic analysis of a low-temperature waste heat recovery system based on the concept of solar chimney, *Energy Conversion and Management*, Vol. 80, pp. 78–86, 2014.
- [98] Guo P., Wang Y., Li J., Wang Y., Thermodynamic analysis of a solar chimney power plant system with soil heat storage. *Appl ThermEng*, Vol. 100, pp. 1076–84, 2016.
- [99] Molana S.A.B., Rahmani K., Wen D., A review on solar chimney systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 67, pp. 954–987, 2017.
- [100] Penghua G., Tiantian L., Ben X., Xinhai X., Li J., Questions and current understanding about solar chimney power plant: A review, *Energy Conversion and Management*, Vol. 182, pp. 21–33, 2019.

- [101] Al-Kayiem H.H., Aurybi M.A., Gilani S.I.U., Ismaeel A.A., Mohammad S.T., Performance evaluation of hybrid solar chimney for uninterrupted power generation, *Energy*, Vol. 166, pp. 490–505, 2019.
- [102] Nasraoui H., Driss Z., Hedi K., Novel collector design for enhancing the performance of solar chimney power plant. *Renewable Energy*, Vol. 145, pp. 1658-1671, 2020.
- [103] Siamak J., Nemati A., Mohammad k. F., Yari M., Thermal and economic assessment of a solar chimney cooled semitransparent photovoltaic (STPV) power plant in different climates, *Solar Energy*, Vol. 185, pp. 480–493, 2019.
- [104] Seyyed H.F., Sadegh M.V., Evaluation of solar chimney power plant performance: the effect of artificial roughness of collector, *Solar Energy*, Vol. 188, pp. 175–184, 2019.
- [105] Sedighi A., Deldoost Z., Mahjoob Karambasti B., Effect of thermal energy storage layer porosity on performance of solar chimney power plant considering turbine pressure drop, *Energy*, Vol. 194, pp. 116–859, 2020.
- [106] Erdem C., Cuce P.M., Sen H.A thorough performance assessment of solar chimney power plants: Case study for Manzanares; *Cleaner Engineering and Technology*, Vol. 1, 100026, 2020.
- [107] Rahimi Larki M., Abardeh R.H., Rahimzadeh H., Sarlak H., Performance analysis of a laboratory-scale tilted solar chimney system exposed to ambient crosswind; *Renewable Energy* Vol. 164, pp. 1156-1170, 2021.
- [108] Wei C., Analysis of heat transfer and flow in the solar chimney with the sieveplate thermal storage beds packed with phase change capsules, *Renewable Energy*, Vol. 157, pp. 491-501, 2020.
- [109] Saman R., Javad A. E., Elham H., Assessment of solar chimney combined with phase change materials, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, Vol. 124, pp. 341-350, 2021.
- [110] Papadakis G., Briassoulis D., Scarascia Mugnozza G., Vox G., Feuilloley P., Stoffers J.A., Radiometric and thermal properties of, and testing methods for, greenhouse covering materials, *J. Agric. Eng. Res.*, Vol.77, pp. 7–38, 2000.
- [111] Dehbi A., Mourad A.H.I., Durability of mono-layer versus tri-layers LDPE films used as greenhouse cover: comparative study, *Arab. J. Chem.*, Vol. 9, pp. 282–289, 2016.
- [112] Dilara P.A., Briassoulis D., Standard testing methods for mechanical properties and degradation of Low Density Polyethylene (LDPE) films used as greenhouse covering materials: a critical evaluation, *Polym. Test.*, Vol. 17, pp. 549–585, 1998.
- [113] Satoto R., Subowo W.S., Yusiasih R., Takane Y., Watanabe Y., Hatakeyama T., Weathering of high-density polyethylene in different latitudes, *Polym. Degradation Stab*, Vol. 56, pp.275–279, 1997.

- [114] Tidjani A., Arnaud R., Photo-oxidation of linear low density polyethylene: a comparison of photo-products formation under natural and accelerated exposure, *Polymer degradation and stability*, Vol. 39, pp. 285–292, 1993.
- [115] Nicaud P., *Les Matière Plastiques. Projet Troisième Rob'Ok*, Hachette Multimédia, 2007.
- [116] Irini slimane R., Belhaneche-Bensemra N., Benlefki A., Valorization of regenerated LDPE by blending with EPDM in the presence of peroxide, *J. Polym. Environ.*, Vol. 15, pp. 119–124, 2007.
- [117] Adelhafidi B., Chabira I.M., Sebaa S.F., Impact of solar radiation effects on the physicochemical properties of Polyethylene (PE) plastic film, *Soc. Behav. Sci.*, Vol. 195, pp. 2210–2217, 2015.
- [118] Hamid S.H., *Handbook of polymer degradation*, CRC, 2000.
- [119] Shackelford J.F., William A., *Polymer Materials Science And Engineering Handbook*. CRC Press, Year: 2000.
- [120] Sperling L.H., *Introduction to Physical Polymer Science* Wiley-Interscience, Year: 2005.
- [121] Ferry J.D., « *Viscoplastic Properties of Polymers* », 2nd edition, New York, 1970.
- [122] Bird R.B., *Dynamics of Polymeric Liquides: Fluid Mechanics and Kinetic Theory*, John Wiley and Sons, New York, 1987.
- [123] Raurvendaal C., *Polymer extrusion*, Hanser publishers, Munich, 1994.
- [124] Belofksy H., *Plastics product design and process engineering*, Hanser publishers, Munich, 1995.
- [125] Füsesserry S., *Polyéthylènes basse densité*, Techniques de l'ingénieur, publication A3310, 1996.
- [126] Shyichuk A.V., Comparison of UV-degradation depth profiles in polyethylene, polypropylene and an ethylene-propylene copolymer, *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 88, pp. 415-419, 2005.
- [127] White J.R., Shyichuk A.V., Effect of stabilizer on scission and crosslinking rate changes during photo-oxidation of polypropylene, *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 92, pp. 2095-2101, 2007.
- [128] Al-Malaika S., *Antioxidants: an overview*, Springer, 1998.
- [129] Zweifel H., Maier R.D., Schiller M., *Plastics additives handbook*, Hanser Verlag, 2001.
- [130] Normes ISO21-TOM1, *Plastiques : Technologie-échantillonnage et propriétés*, 1984.

- [131] Normes ISO21-TOM2, « Plastiques : Matières et produits », 1984.
- [132] <https://www.zwickroell.com/fr/accessoires/logiciel-dessai/>. Site consulté le 15/09/2022
- [133] Ikhlef K., Larbi S., Üçgül I, Experimental study of different thermal storage system effects on the performance of a small prototype solar chimney power plant, *Renewable Energy*, Vol. 200, pp. 516–526, 2022.
- [134] Pfund A. H., Aging of Glass Surfaces, *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 36, Number 2, pp. 95–99, 1946.
- [135] Gunnar A. N., Claes G., Solar energy materials for thermal applications: A primer, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 180, 213–226, 2018.
- [136] Theodore Bergman L., Adrienne Lavine S., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Eighth edition., John Wiley & Sons, Inc ISBN: 978-1-119-32042-5, John Wiley & Sons Inc., 2017.
- [137] Attig-Bahar F., Guellouz M.S., Sahraoui M., Kaddeche S., Economic analysis of a 1 MW solar chimney power plant in Tozeur, Tunisia, Vol. 178, 456-465, 2021.
- [138] A. Rahmani ; Base de données des bordereaux des prix, TEC, Alger 013-2018.