

République Algérienne Démocratique et Populaire

**Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique**

Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Mécanique

Mémoire de Projet de Fin d'Etudes d'Ingénieur d'état en Génie Mécanique

Thème

**Analyse des Performances Energétiques des Centrales
Cheminées Solaires par une Caractérisation Mécanique
et Photo- Thermique du revêtement du Collecteur**

Etudié par :

Lahcène DJAOUT

Yazid DJIDJELI

Proposé et dirigé par :

S. LARBI, Prof., ENP

A. BOUHDJAR, DR, CDER

Promotion : Juin 2013

ملخص: العمل الذي قدم في هذه المذكرة نسبي كخطوة أولى ، لحساب أداء المدخنة الشمسية في ظروف مناخية معروفة وتغيراته خلال السنة. و اختير موقع ادرار نظرا لامتلاكه طاقة شمسية مثيرة للاهتمام فضلا عن قاعدة البيانات المتاحة عن درجة الحرارة المحيطة والإشعاع السنوي في هذه المنطقة. يتم مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها بالنموذج الأول مانزاناريس. الجزء الثاني من هذا العمل دراسة بشأن قدم غلاف المجمع المصنوع من متعدد الإثيلين بالتركيز على جانبين هما : الميكانيكي والبصري. أيضا ، قد أنجز الاهتراء السريع لدراسة سلوك المجمع على المدى الطويل. وقد أكدت النتائج الضوئية تدهور الخصائص الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية لمتعدد الإثيلين التي سوف تؤثر علي أعمار الأفلام والتي تسبب بذلك تأثيراً سلبياً على أداء المجمع والأداء العام للمدخنة الشمسية.

الكلمات الرئيسية : المدخنة الشمسية ؛ حساب الفعالية الطاقوية؛ دراسة الاقدمية؛ الجوانب الميكانيكية والبصرية

Résumé : Le travail présenté dans ce mémoire est relatif à l'analyse des performances énergétiques d'une centrale à cheminée solaire en fonction des conditions climatiques et environnementales. Le site d'Adrar a été choisi compte tenu de son potentiel énergétique fort intéressant, par rapport aux autres régions du pays, ainsi que la banque de données disponible relative à la température ambiante et au rayonnement annuel dans cette région. L'analyse expérimentale du vieillissement du matériau plastique (film de polyéthylène) constituant le revêtement du collecteur a été abordée.

Les résultats obtenus sont comparés avec ceux obtenus sur le site de Manzanares (Espagne) afin d'estimer les puissances récupérées sur les deux sites. Les tests expérimentaux réalisés ont montré que la dégradation photo-oxydante des propriétés physico-chimiques et mécaniques des films plastiques de polyéthylène vieillis induit la diminution de leur durée de vie ce qui a un impact négatif sur le rendement du collecteur et les performances générales de la centrale.

Mots clés : Cheminée solaire ; Calcul des performances énergétiques; Etude de vieillissement; Aspects mécanique et optique.

Abstract: The work presented in this study is related to performance analysis of a solar chimney power plant versus environmental and climatic conditions. Adrar site is chosen according to its interesting energy potential, compared to other regions, as well as available data on ambient temperature and radiation in this region. Experimental analysis of the aging of the plastic material (polyethylene film) forming the coating of the collector was discussed. Obtained results are compared to those obtained at the site of Manzanares (Spain). It is shown that the photo-oxidative degradation of the physicochemical and mechanical properties of plastic films of polyethylene aging induced a decrease in their life which has a negative impact on the efficiency of the collector and then the general performance of the power plant can be affected.

Keywords: Solar chimney; Performances analysis; Aging study; Optical and mechanical aspects analysis.

REMERCIEMENTS

Avant tout, on remercie ALLAH tout puissant de nous avoir donné la volonté et le courage de mener à bien ce travail.

Un grand merci à notre Directeur de mémoire, Monsieur Salah LARBI, Professeur à l'E.N.P, de nous avoir guidé par ses précieux conseils lors de la réalisation de ce projet. Grâce à sa grande modestie et surtout à sa disponibilité que nous avons pu mener ce travail et le soutenir publiquement dans les délais.

Un grand merci aussi à Monsieur BOUHDJAR, Directeur de Recherche au CDER, notre Co-promoteur.

Nous tenons à remercier tous les membres de jury qui nous ont fait l'honneur d'avoir accepté de juger le travail développé dans ce mémoire : Bouzid Benkoussas, Maître de Conférence- A, Yacine BELKACEMI, Docteur et Mohamed Tarek ATTOUCHI, Maître assistant- A, tous enseignants au département de génie mécanique. Nos sincères remerciements vont à Mme Naïma BELHANECHÉ, Professeur au département de génie de l'environnement pour tous ses conseils en dépit de toutes ses occupations. A Monsieur Yacine BELKACEMI, qui a été toujours à notre écoute, nous le remercions pour tous ses conseils et orientations sur l'aspect mécanique du problème. A Messieurs, Chems Eddine CHITOUR et Toudert AHMED ZAID, Professeurs au département de génie chimique pour leurs orientations pratiques et leurs précieux conseils.

Un grand merci à Mlle BEDAD chef de laboratoire du groupe SAIDAL, Mlle Ilhem chef de laboratoire de l'entreprise CATEL et Mr SAMIAN directeur de laboratoire de recherche à L'INRAA pour leur accueil chaleureux et leur aide.

Enfin, on ne pourrait terminer sans une pensée à l'ensemble de nos enseignants. Qu'ils trouvent ici, l'expression de notre profonde gratitude.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire

A ma chère mère

A mon cher père

Auxquels je dois tout

A mes frères et sœurs

A mon oncle Saïd, à mes beaux frères

A tous les miens

En témoignage de mon profond attachement

*A tous mes amis qui m'ont soutenu
dans les moments difficiles de ma vie*

A tous mes camarades

du département Génie Mécanique

En témoignage de ma vive reconnaissance

Lahcene

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents
qui ont toujours été là pour moi, qui m'ont soutenu
dans les moments difficiles tout le long de mon cursus, et
qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur
et de persévérance « Que DIEU vous protège ».*

*À mes deux sœurs à qui je souhaite
toute la réussite dans leurs études.*

*À mon petit frère Massi, à qui je souhaite de suivre la voie
des études, de la science, et d'intégrer une grande école.*

*À mon ami et mon binôme depuis le tronc commun
DJAOUT Lahcene, à qui, Grâce à son sérieux, à son acharnement
et à sa détermination, ce travail à été mené à bien.*

À ma très chère amie sihem qui ma toujours soutenu.

*À tout mes cousins Cossa, Fateh, Kader, et
à toute ma famille aussi nombreuse quelle soit.*

À tous mes amis Hicham, Cilia, Rahim, Halim, Mohand, Jugo,

*Ahmed, Hamda, et Mohammed Chalala et
à tout mes camarades du département de Mécanique.*

Merci à tous.

YAZID.

Sommaire

Introduction générale	1
-----------------------	---

Chapitre I : Aperçu sur l'Energie Solaire

I.1. Introduction :	6
I.2. historique :	6
I.3. Energie solaire :	8
I.3.1 Solaire photovoltaïque :	8
I.3.2 Solaire thermique :	9
I.4. Aspect géométrique et énergétique :	11
I.4.1 Mouvement de la Terre autour de soleil :	11
I.4.2 Sphère céleste :	12
I.4.3 Durée d'ensoleillement :	13
I.4.4 Les coordonnées géographiques :	13
I.4.5 Coordonnées horaires :	15
I.4.6 Coordonnées horizontales :	15
I.4.7 Position de soleil par rapport à un observateur	16
I.4.8 Rayonnement solaire	17
I.4.8.1 Caractéristique spécifique de l'énergie solaire :	17
I.4.8.2 Types de rayonnement solaire :	18
I.4.8.3 Instruments de mesure du rayonnement solaire :	19
I.5. L'énergie solaire en Algérie :	21
I.5.1 Potentiel solaire en Algérie :	21
I.5.2 Dispositifs Algériens de soutien aux énergies renouvelables selon les lois adoptées et les décrets	23

Chapitre II : Généralités sur les centrales à cheminée Solaire

II.1. La centrale cheminée solaire :	25
II.1.1 Le collecteur :	26
II.1.2 Les turbines :	27
II.1.3 La cheminée	27
II.2. Principe de fonctionnement d'une centrale cheminée solaire :	29
II.3. Les centrales cheminées solaires dans le monde :	30
II.3.1 Le prototype de Manzanares :	30
II.3.2 Le projet Australien :	32
II.3.3 La centrale cheminée de Chine:	34
II.3.4 Centrale cheminée d'Arizona:	37
3.6 Projet Namibie :	38
II.4. Avantages et inconvénients des centrales cheminées solaires :	39
II.4.1 Les avantages :	39

II.4.2 Les inconvénients :	40
II.5. Les différents travaux sur les centrales cheminées solaires :	40
II.6. Centrale cheminée solaire commerciale :	44
II.6.1 Technologie :	44
II.6.2 Etudes techno-économiques :	45

Chapitre III : Modélisation et Détermination des Performances Energétiques des Centrales à Cheminée Solaire

III.1. Introduction :	49
III.2. Paramètres influençant le fonctionnement d'une centrale cheminée solaire :	49
III.3. Fondement des modèles théoriques utilisés dans les centrale cheminée solaire :	51
III.3.1 Hypothèses communes à l'ensemble des modèles :	51
III.3.2 Description du modèle de J. Schlaich et al. :	51
III.3.2.1 Approche pour le calcul du rendement de la centrale cheminée solaire :	52
III.3.2.2 Le collecteur :	52
III.3.2.3 La cheminée :	54
III.3.2.4 La turbine « aéro-génératrice » :	57
III.4 Conclusion :	60

Chapitre IV :Description des dispositifs expérimentaux utilisés

IV.1. Introduction	62
IV.2. Caractérisations Mécaniques	63
IV.2.1. Essai de traction	63
IV.2.1.1 Le déroulement de l'essai de traction	63
IV.2.1.2 Condition d'exécution de l'essai	64
IV.2.1.3 Les éprouvettes :	65
IV.2.1.4 La courbe de traction	66
IV.2.1.5 Calcul des caracteristiques mecanique	67
IV.2.1.6 Les Machines d'essais	68
Description de la machine d'essai utilisée :	70
IV.2.1.7 les éprouvettes pour le film de polymère	72
Formes et dimensions des éprouvettes	72
Préparation des éprouvettes	72
IV.2.1.8. Les échantillons pour les essais de traction	73
IV.2.1.9 Protocole de vieillissement artificiel:	73
IV.2.1.10 But des essais de traction :	74
IV.2.2 Essai de dureté	74
IV.2.2.1 Types d'essais	74
IV.2.2.1.1 Dureté Brinell :	75
IV.2.2.1.2 Dureté Rockwell :	75
IV.2.2.1.3 Dureté Shore :	76
IV.2.2.2 L'appareil de mesure :	76
IV.3 Caractérisations photo- thermiques	78
IV.3.1 Essai optique	78

IV.3.2 Ondes lumineuses :	79
IV.3.3 La spectrophotométrie :	81
IV.3.3.1 La spectrophotométrie UV-Visible :	82
IV.3.3.2 La spectrophotométrie infrarouge :	82
IV.3.3.4 Le phénomène de L'absorption :	83
IV.3.3.5 La loi de Beer –Lambert :	84
IV.3.3.6 Le spectre d'un composé :	85
IV.3.3.8 Les stabilisants	86
IV.3.3.9 Appareils utilisés :	87
IV.3.3.9Echantillons analysés :	87

Chapitre V :Calcul des Performances Energétiques de la CCS

V.1 Introduction	89
V.2 Calcul des performances de la tour solaire d'Adrar :	89
V.2.1 Données du site :	89
V.2.2 Calcul de différents paramètres :	91
V.2.2.1 Le collecteur :	91
V.2.2.2 La cheminée :	92
V.2.2.3 La turbine :	95
V.3 Comparaison entre le prototype de Manzanares leprototyped'Adrar	98
V.3.1 Calcul de l'énergie produite :	98
V.3.2 Conclusion :	100
V.4 Tours solaires plus grande pour la région d'Adrar :	101
V.4.1 Calcul de la puissance fournie:	102
V.4.2 Calcul de l'énergie produite :	102
V.5 Conclusion	105

Chapitre VI : Résultats expérimentaux

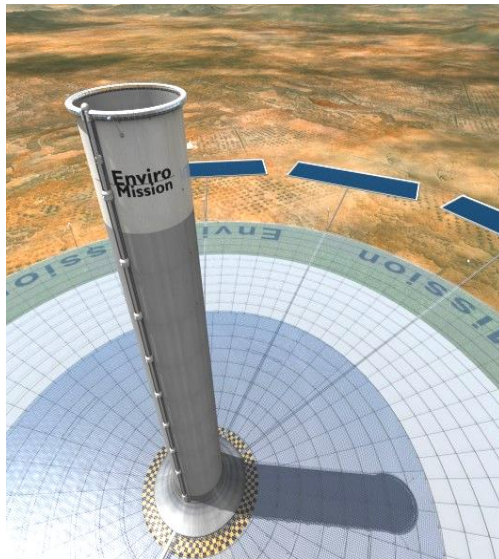
VI.1 Introduction	107
VI.2 Caractéristiques optiques	107
VI.2.1 spectroscopie infrarouge :	107
VI.2.2 spectroscopie ultraviolet :	110
VI.2.3 La transmission des rayonnements :	113
VI.2.4 Conclusion	116
VI.3 Caractéristiques mécaniques	116
VI.3.1Essai de traction	116
VI.3.2 Essai de dureté	128
VI.3.3Conclusion	129
Conclusion générale	132
Références bibliographiques	135
Annexe	140

Nomenclature

G	: Rayonnement solaire incident, [W/m^2]
\dot{Q}	: Gain en puissance thermique de l'air, [J]
P_{wt}	: Puissance théorique de la centrale, [W]
$P_{wt,max}$: Puissance théorique maximale de la centrale, [W]
P_{elec}	: Puissance électrique fournie par la centrale, [W]
\dot{m}	: Débit massique, [kg.s^{-1}]
c_p	: Chaleur spécifique, [$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$]
ρ_{coll}	: Masse volumique de l'air à la sortie de collecteur, [kg.m^{-3}]
ρ_e	: Masse volumique de l'air dans l'environnement extérieur, [kg.m^{-3}]
ρ_c	: Masse volumique de l'air dans la cheminée, [kg.m^{-3}]
T_o	: Température ambiante, [K]
ΔT	: Différence de température entre l'entrée et la sortie du collecteur, [K]
ΔP_s	: Différence de pressions statiques, [Pa]
ΔP_{tot}	: Différence de pressions totales, [Pa]
A_c	: Section de passage, [m^2]
A_{coll}	: Surface du collecteur, [m^2]
H_c	: Hauteur de la cheminée, [m]
V_c	: Vitesse de l'air à l'entrée de la cheminée et à la sortie de collecteur, [m.s^{-1}]
α	: Coefficient d'absorption effective du rayonnement solaire du collecteur
β	: Coefficient de pertes énergétiques englobant les pertes par convection, par rayonnement et par stockage du sol, [$\text{W/m}^2 \text{ K}$]
η	: Rendement global de la centrale
η_{coll}	: Le rendement de collecteur
η_c	: Rendement de la cheminée

η_{wt}	: Rendement de la turbine
Ep	: Epaisseur de l'éprouvette, [mm]
L	: Largeur de l'éprouvette, [mm]
S_0	: Section initiale de l'éprouvette, [mm ²]
F_R	: Force à la rupture, [MPa]
T	: Transmission, [%]
A	: Absorbance, [%]
CCS	: Centrale Cheminée Solaire.

Introduction Générale



Introduction générale

La majeure partie de l'énergie consommée dans le monde est d'origine fossile. L'agence internationale de l'énergie rappelle constamment aux peuples du monde que les besoins énergiques vont au moins doubler d'ici 2030, et la plus grande partie de cette croissance sera couverte par les combustibles d'origine fossile. Les estimations des experts sont du moins alarmantes stipulant qu'à la consommation actuelle, les réserves de pétrole, de gaz naturel et de charbon vont s'épuiser dans le siècle à venir [1].

D'autre part, Les effets du changement climatique sont globaux et leur diminution ne peut être obtenue qu'à la suite d'un effort international et coordonné. Signé en 1997, le protocole de Kyoto a pour but la réduction des émissions de gaz à effet de serre, dans la période 2008 à 2012, à 5,2 % en dessous de ceux de 1990. Les émissions des gaz à effet de serre provenant des USA sont actuellement 20 % plus grande qu'en 1990 tandis que le but recherché par le protocole de Kyoto est une réduction de 7%. A long terme, il serait prudent que les pays industrialisés réduisent leur émission de 60 % en 2050 avec une certaine coordination, pour atténuer l'effet du changement climatique [2].

En effet, le réchauffement climatique (de 2 à 5 °C jusqu'en 2100) et l'épuisement des ressources fossiles sont des réalités qui doivent être prises en compte lors de la production d'électricité du futur. Il est temps de trouver d'autres moyens de produire de l'électricité en développant de nouvelles technologies permettant d'exploiter des énergies propres et renouvelables [1].

L'utilisation d'une source d'énergie renouvelable au détriment d'une autre est tributaire de sa disponibilité, de son potentiel énergétique et de son adaptation. L'énergie éolienne qui utilise le vent pour la génération d'énergie électrique et l'énergie solaire qui se localise dans les régions les plus ensoleillées, sont actuellement les sources d'énergies renouvelables les plus prometteuses.

La source principale des énergies renouvelables facilement accessible est le soleil. En moyenne, le taux de rayonnement solaire intercepté par la surface de la terre est environ 8000 fois plus grand que la consommation d'énergie primaire. Avec la population mondiale actuelle, ce taux monte à une moyenne incroyable de 20 MW par personne (20 millions de W). Plusieurs technologies ont été développées afin d'utiliser cette forme d'énergie pour la production d'énergie électrique [2].

Les centrales cheminées solaires (CCS) sont mieux adaptées pour les régions arides, où des immenses surfaces sont disponibles et où le rayonnement solaire est très important. La construction des cheminées solaires ne nécessite pas une technologie très avancée et représente une solution bien adaptée pour les pays en voie de développement.

Le principe de fonctionnement d'une cheminée solaire est relativement simple : l'air, fluide moteur de la cheminée solaire, est chauffée par effet de serre dans un collecteur, la variation de sa densité sous l'effet de la température, engendre un mouvement d'ascension dans la tour cheminée, entraînant ainsi en rotation une ou plusieurs turbines pour produire de l'électricité.

Le collecteur de la cheminée solaire est la partie qui utilise le principe de captation par effet de serre pour le chauffage de l'air, ce dernier peut être construit par divers matériaux tel le verre ou les films plastiques (polymères) [3]. Le collecteur nécessite une maintenance périodique compte tenu qu'il constitue la partie de la CCS la plus sollicitée et la plus exposée au vieillissement à cause des effets climatiques.

Le vieillissement climatique du collecteur en film de plastiques entraîne la dégradation des propriétés du matériau tant sur le plan mécanique que chimique ou morphologique. Il combine, pour l'essentiel, les effets du rayonnement et de la température. L'humidité, la pluie, le vent (et le vent de sable), la poussière, l'ozone et la pollution chimique sont d'autres agents aussi influents.

Le travail présenté dans ce mémoire est relatif à l'analyse des performances énergétiques d'une centrale à cheminée solaire en fonction des conditions climatiques et environnementales. Le site d'Adrar a été choisi compte tenu de son potentiel énergétique fort intéressant, par rapport aux autres régions du pays, ainsi que la banque de données disponible relative à la température ambiante et au rayonnement annuel dans cette région. L'analyse expérimentale du vieillissement du matériau plastique (film de polyéthylène) constituant le revêtement du collecteur sera abordée sous ses aspects, mécanique (essais de traction et de dureté) et photo-thermique (essais sur spectromètres IR et UV visible).

L'étude est répartie en six chapitres principaux :

Le premier chapitre donne un aperçu sur l'énergie solaire, y est présentée l'énergie solaire sur sa base de potentiel énergétique, de rayonnement solaire au niveau du sol, et des flux: directes, diffus et total, ainsi que les techniques et les instruments de mesure du rayonnement solaire. Une cartographie du potentiel solaire dont dispose l'Algérie est également présentée.

Dans le second chapitre, le principe de fonctionnement d'une centrale cheminée solaire est présenté. Le prototype de Manzanares, les différents projets de cheminées solaires dans le monde, l'aspect techno-économique des tours solaires commerciales ainsi que les principaux travaux réalisés dans ce domaine ont été décrits.

Le troisième chapitre est relatif au modèle mathématique utilisé pour le calcul des performances de la tour solaire. On prendra comme référence de calcul le modèle de Jorg Schlaich et son équipe [3] vu son travail pionnier et la simplicité de ses résultats dans l'étude théorique et expérimentale pour la modélisation des CCS.

Le quatrième chapitre est consacré à la description des dispositifs expérimentaux utilisés pour la détermination des propriétés mécaniques et optiques du matériau constituant le revêtement du collecteur qui est le plastique. Y sont décrits les différents essais réalisés dont l'essai de traction, l'essai de dureté, et l'essai de spectroscopie. Une brève description des échantillons étudiés et la procédure du vieillissement artificielle effectuée sera mentionnée.

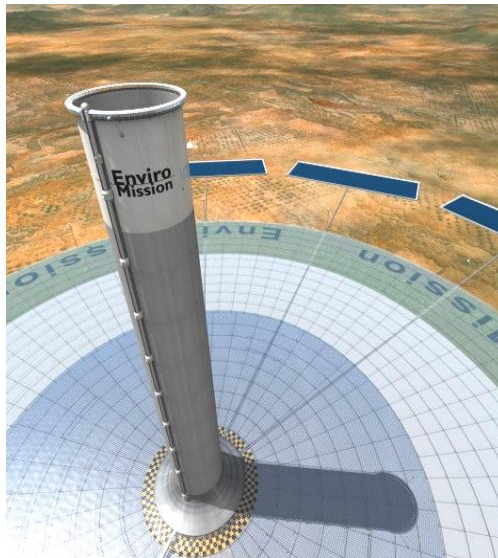
Le cinquième chapitre présente une comparaison entre les performances du prototype de Manzanares réalisé en Espagne et un autre prototype de dimensions identiques qui pourrait être implanté sur un site de la région d'Adrar en Algérie, où différents paramètres sont calculés pour mettre en évidence le potentiel de la région.

Dans le sixième chapitre, seront présentés tous les résultats des essais mécaniques et optiques obtenus ainsi que leurs interprétations. Les méfaits de l'environnement sur le revêtement du collecteur et les conséquences induites sur le fonctionnement de la centrale solaire y sont présentés.

Enfin, on termine par une conclusion générale faisant part d'une synthèse de tout le travail réalisé ainsi que les objectifs atteints, les difficultés rencontrées et les perspectives du futur.

Chapitre I

Aperçu sur l'Energie Solaire



Aperçu sur l'Energie Solaire

I.1. Introduction :

De nos jours, l'importance des énergies renouvelables (Eolien, solaire, géothermie...) se fait sentir de plus en plus, compte tenu du déclin des énergies fossiles et de la nécessité de développer une énergie propre et renouvelable, afin de protéger notre environnement. De part son important potentiel énergétique, l'énergie solaire semble être une bonne alternative aux énergies fossiles et pourra devenir l'une des formes d'énergies la plus prometteuse dans l'avenir.

Le soleil est une sphère gazeuse composée presque totalement d'hydrogène. Son diamètre est de 1 391 000 km (100 fois celui de la Terre) et sa masse est de l'ordre de $2 \cdot 10^{27}$ tonnes. Toute l'énergie du Soleil provient de réactions thermonucléaires qui s'y produisent transformant ainsi, à chaque seconde, 564,106 tonnes d'hydrogène en 560,106 tonnes d'Hélium, la différence de 4 millions de tonnes est dissipée sous forme d'énergie ($E = m c^2$), ce qui représente une énergie totale de $36 \cdot 10^{22}$ kW. La Terre étant à une distance de $150 \cdot 10^6$ km du Soleil, elle reçoit une énergie de $1,8 \cdot 10^{17}$ W [4].

I.2. historique :

Depuis l'invention des jeux olympiques, en 776 , la flamme était toujours allumée par les dieux : c'est avec une parabole solaire que la flamme est allumée . Archimède, environ 250 ans, mit au point des miroirs pour concentrer l'énergie solaire et incendier la flotte romaine assiégeant Syracuse. Héron d'Alexandrie, environ 100 ans, construisit une machine solaire permettant le pompage de l'eau. Saussure [5], physicien suisse, inventa au 18ème siècle des capteurs solaires à des fins scientifiques. Vers la même époque, Lavoisier, chimiste et physicien français, fabriqua un four solaire pour fondre du platine : ce four chauffait déjà à 1755°C.

En 1839 , la conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par E. Becquerel [5],, mais il faudrait attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène de la physique. En 1878, Auguste Mouchot [5] créa une machine à vapeur fonctionnant grâce à un miroir parabolique

qui lui permit d'actionner une presse d'imprimerie. En 1887, Hertz [5] découvrit un phénomène nouveau : une plaque de métal recevant un faisceau lumineux émet des électrons. Ce phénomène appelé "effet photoélectrique" a été étudié par les physiciens en établissant plusieurs lois basées sur l'observation.

En 1900, plus de 1600 chauffe-eau fonctionnaient en Californie du Sud. Au Mexique, de nombreuses maisons "bioclimatiques" utilisant l'énergie solaire a fonctionné depuis le début du siècle. En 1912, le Nord-américain Schumann a construit en Egypte une station de pompage de l'eau. Dans les années quarante l'utilisation des cellules solaires dans le domaine spatial a eu lieu. Les recherches qui suivaient la guerre ont permis d'améliorer leurs performances et leur taille mais il faudrait attendre la crise énergétique des années soixante-dix pour que les gouvernements et les industriels investissent dans la technologie d'énergie solaire et ses applications terrestres. Félix Trombe [5] réalisa à Meudon, avec ses collaborateurs, le premier programme expérimental d'obtention de hautes températures à l'aide de concentration de rayonnement solaire. Ce premier "poste de chauffage solaire" de 2 kW utilise un concentrateur cylindro-parabolique. Un nouvel outil est né pour la chimie et la métallurgie à haute température. Cette étape conduit à la construction du four solaire de 50 kW à Mont-Louis à l'initiative de Félix Trombe et considéré par lui-même comme la maquette d'un four solaire industriel futur. Cet appareil servira de modèle pour la construction et l'utilisation de nombreux fours solaires dans le monde, ce qui a donné lieu aux principes de base de la concentration de l'énergie solaire.

En 1953, un four solaire de 75 kW est installé à Mont-Louis dans les Pyrénées. Son successeur, le four d'Odeillo, bâti en 1970, a permis d'atteindre des températures de 3500 °C. Le four solaire géant de 1000 kW construit à Odeillo et faisant partie du laboratoire du CNRS (centre national de la recherche scientifique), permettait d'atteindre théoriquement une température maximale de 3800°C. Il est venu parachever cette première phase d'investigations sur l'énergie solaire concentrée. Cependant, vu les importants coûts de production, à l'époque, de l'énergie solaire, elle se limitait à l'alimentation des missions interplanétaires. Il est à noter que c'est à partir des années 70 que l'utilisation pour des applications terrestres devint intéressante grâce à la réduction des coûts. A cet époque, l'énergie solaire permettait de couvrir une gamme de puissances et de températures beaucoup plus étendue, à condition de la concentrer, en augmentant l'angle solide apparent du soleil, au moyen de capteurs optiques plus élaborés. De nombreux fours solaires furent ainsi construits dans un souci d'expérimentations fondamentales; la qualité des performances

énergétiques de l'installation était le principal objectif à atteindre et justifiait à elle seule les principaux investissements engagés [5].

La période allant de 1971 à 1979 correspondait à une phase de montée en puissance des utilisations du four solaire de 1000 kW. Le choc pétrolier de 1974 et 1978 a modifié le destin de l'énergie solaire concentrée : c'est à cette époque que furent mises en chantier, dans plusieurs pays industrialisés les premières usines prototypes de conversion thermodynamique du rayonnement solaire concentré en énergie mécanique ou électrique [5].

I.3. Energie solaire :

L'énergie solaire provient de la fusion nucléaire qui se produit au milieu du Soleil. Elle se propage dans le système solaire et dans l'univers sous la forme d'un rayonnement électromagnétique. Sur terre, grâce à divers procédés, elle peut être transformée en une autre forme d'énergie utile pour l'activité humaine, notamment en chaleur ou en électricité, c'est la raison pour laquelle, l'expression « énergie solaire » est souvent employée pour désigner l'électricité ou l'énergie thermique obtenue à partir de cette dernière.

I.3.1 Solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque.

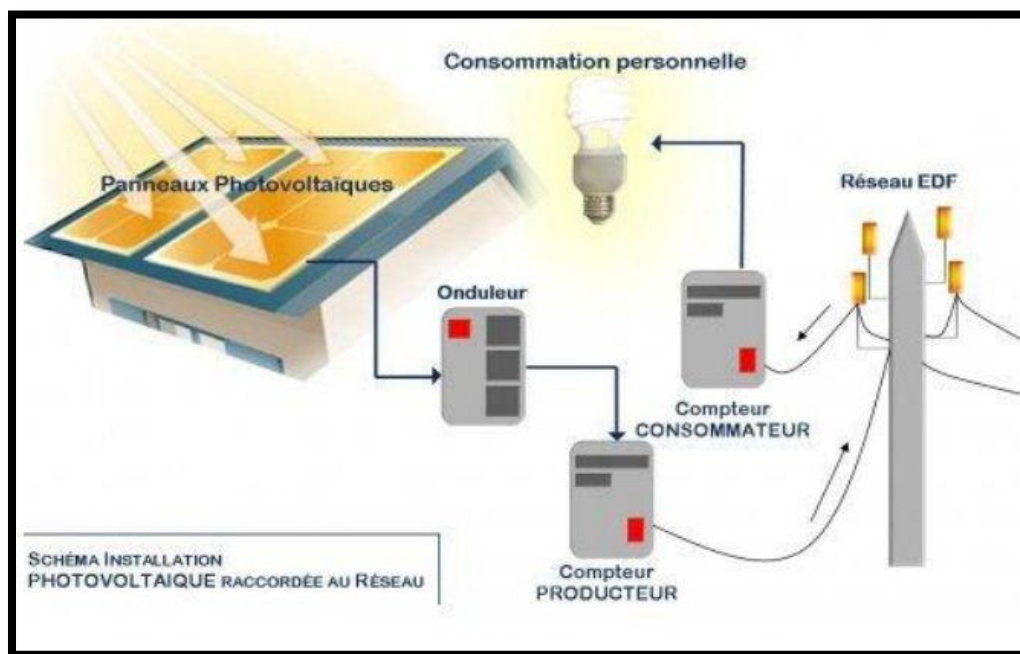


Figure (I.1) : Schéma d'une installation photovoltaïque

La figure I.1 montre le schéma d'une installation photovoltaïque. Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui, exposé à la lumière, génère une tension électrique, ces cellules se présentent sous la forme de deux fines plaques. Le courant qui en ressort est continu. Cet effet photovoltaïque a été découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839. L'énergie produite sera durable et ne devra nécessiter aucun entretien. Elle peut répondre aux besoins en énergie électrique d'une maison.

I.3.2 Solaire thermique :

Le solaire thermique consiste à utiliser le rayonnement solaire en le transformant en énergie thermique [6]. Les systèmes solaires correspondants sont :

❖ Centrales solaires thermodynamiques :

Le principe est de concentrer le rayonnement solaire par des miroirs pour chauffer un fluide à haute température (plusieurs centaines de degrés) afin de générer de la vapeur par échange thermique pour ensuite produire de l'électricité au moyen d'une turbine et/ou pour produire de la chaleur utilisable pour l'industrie comme le dessalement d'eau de mer et la production d'hydrogène.

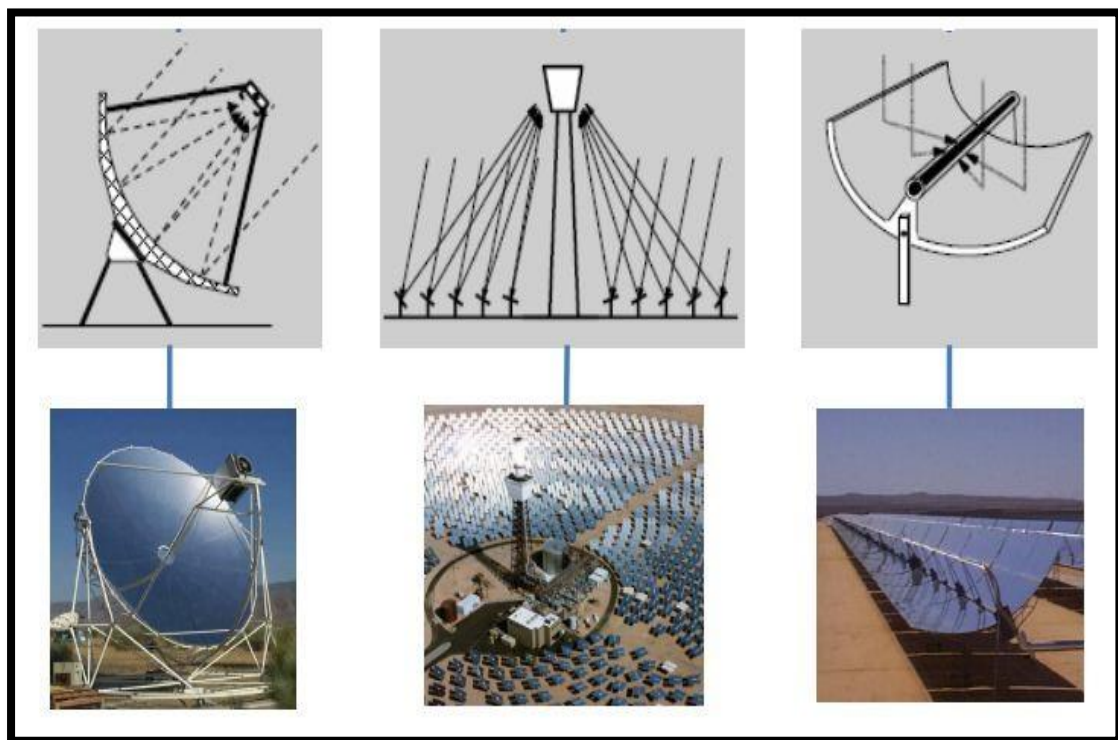


Figure (I.2) : Photos de centrale solaire à concentration.

Cette technologie permet précisément une production électrique 24H/24 grâce aux technologies de stockage de la chaleur (sels en solution, eau, graphite, etc.) mais présente par contre l'inconvénient d'avoir un faible rendement qui pourrait atteindre 20% dans le cas idéal et un coût de construction qui reste très élevé. La figure I.2 montre des photos d'une centrale solaire à concentration.

❖ Capteurs solaires :

Le principe général est de concentrer les rayons solaires en un seul endroit. Ceux-ci sont alors piégés par des capteurs solaires thermiques vitrés qui transmettent l'énergie solaire à des absorbeurs métalliques. Ces mêmes absorbeurs réchauffent alors un réseau de tuyaux où circule un fluide caloporteur. Un échangeur de chaleur va ensuite chauffer à son tour de l'eau stockée dans un cumulus et l'eau ira alimenter le chauffe-eau et les systèmes de chauffages solaires. La figure I. 3 montre le schéma d'un chauffe-eau solaire.

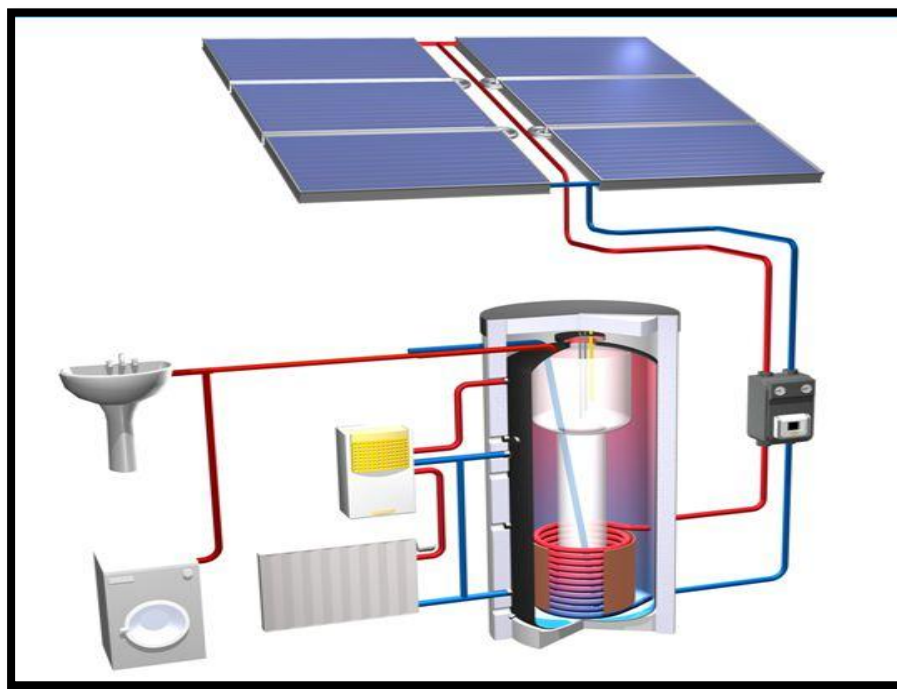


Figure (I.3) : Schéma d'un chauffe-eau solaire.

❖ Cheminée solaire :

Les cheminées solaires sont des centrales électriques qui utilisent la force d'un courant d'air ascendant. L'air est chauffé **directement par effet de serre** dans un collecteur exposé au soleil. La masse volumique de l'air diminue sous l'effet de la température et un écoulement sera ainsi généré sous l'effet de variation de densité. L'air sera ainsi accéléré vers le milieu du collecteur pour passer ensuite dans la cheminée à

travers des turbines qui actionnent les générateurs pour produire de l'électricité. La figure (I.4) montre le schéma de principe d'une cheminée solaire.

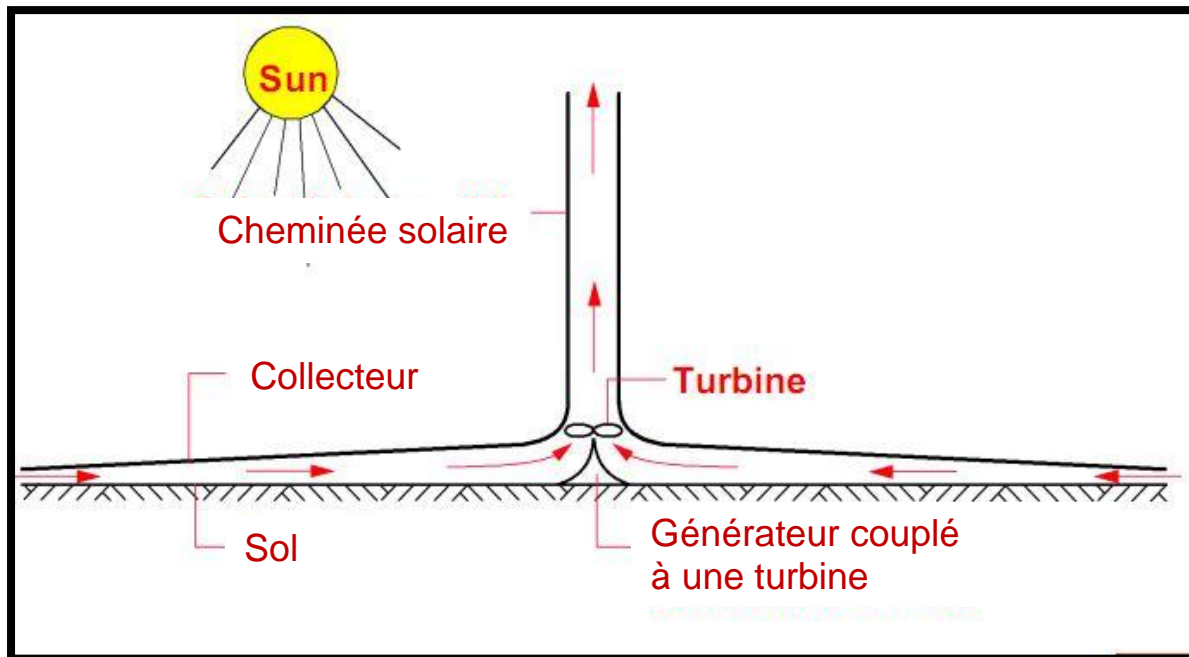


Figure (I.4) : Schéma de principe d'une cheminée solaire.

I.4. Aspect géométrique et énergétique :

I.4.1 Mouvement de la Terre autour de soleil :

La trajectoire de la Terre autour du soleil est une ellipse dont le Soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique. L'excentricité de cette ellipse est faible ce qui fait que la distance Terre/Soleil ne varie que de $\pm 1,7\%$ par rapport à la distance moyenne qui est de 149 675 106 km. La Terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la terre est appelé l'équateur. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique : l'équateur et l'écliptique font entre eux un angle appelé inclinaison et qui vaut $23^{\circ}2'$ [4]. La figure (I.5) montre le mouvement de la Terre autour du soleil au cours de l'année.

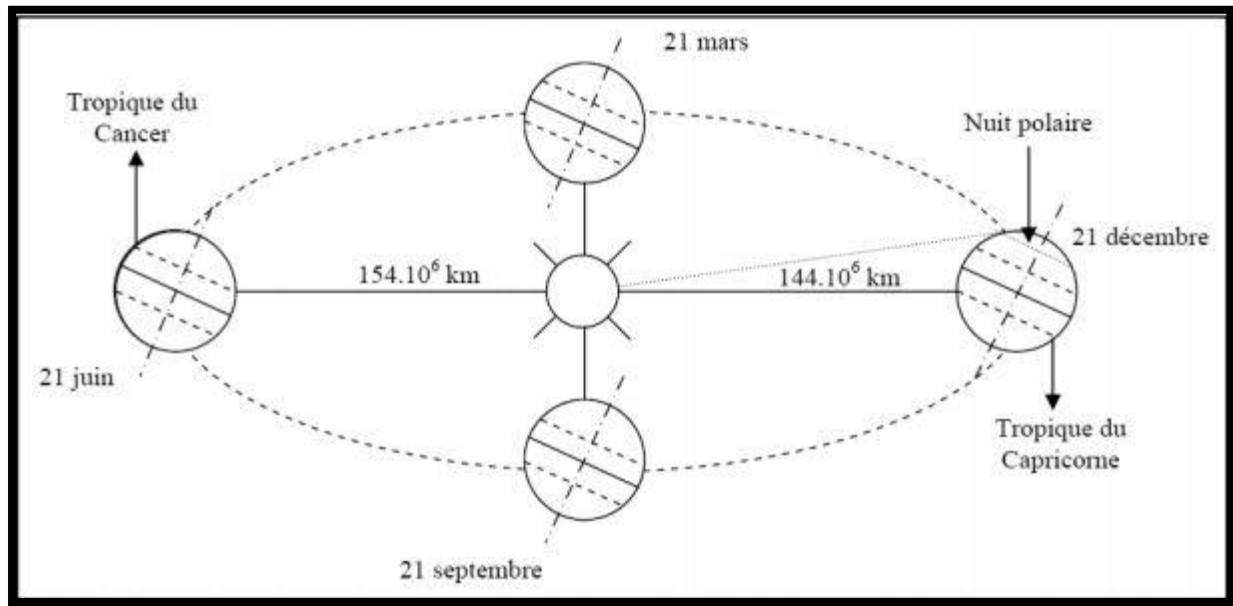


Figure (I.5) : Mouvement de la Terre autour du soleil au cours de l'année.

I.4.2 Sphère céleste :

La sphère céleste est une sphère imaginaire d'un grand diamètre, avec la terre au centre. On considère que tous les objets visibles dans le ciel se trouvent sur la surface de la sphère céleste. On peut résumer les différentes caractéristiques sur la sphère elle-même comme c'est représenté sur la figure (I.6) ci- dessous.

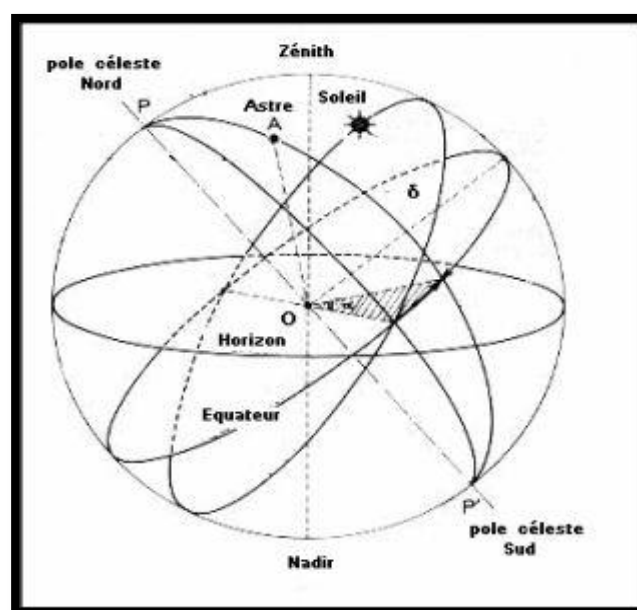


Figure (I.6) : Sphère céleste.

I.4.3 Durée d'ensoleillement :

Selon les conditions atmosphériques, le ciel peut être plus ou moins couvert de nuages au cours d'une journée. Ce qui occulte le soleil, totalement ou partiellement, empêchant ainsi le rayonnement d'atteindre directement le sol. On dit que la nébulosité est plus ou moins importante selon qu'il y ait beaucoup ou peu de nuages. On appelle durée effective d'ensoleillement ou insolation (SS) le temps pendant lequel, au cours d'une journée, le rayonnement solaire direct atteint le sol du lieu considéré. On appelle rayonnement direct le rayonnement qui atteint la surface terrestre sans avoir subi de déviation depuis son émission par le Soleil.

Par ciel clair sans nuages, le sol reçoit le rayonnement solaire direct pendant toute la durée du jour, ou plus précisément pendant la durée maximale d'ensoleillement (SS0). On appelle taux d'ensoleillement (σ) ou taux d'insolation le rapport entre la durée effective et la durée maximale d'ensoleillement, alors :

$$\sigma = \frac{SS}{SS0} \quad (1.1)$$

Où:

σ : est le taux d'ensoleillement.

SS : la durée effective d'ensoleillement.

SS0: la durée maximale d'ensoleillement.

I.4.4 Les coordonnées géographiques :

Les coordonnées géométriques sont les coordonnées angulaires qui permettent de repérer un point d'une zone sur la terre, ces coordonnées sont montrées dans la figure I.7.

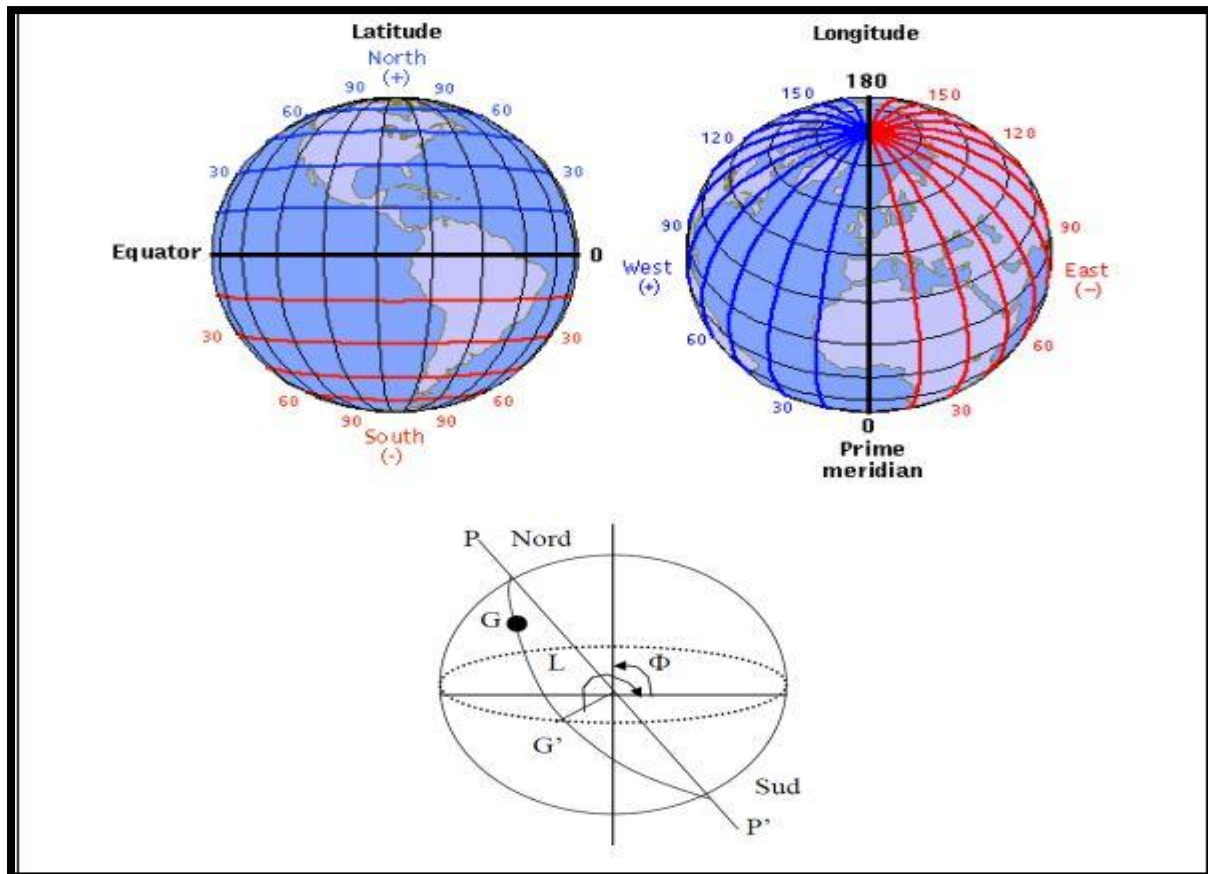


Figure (I.7) : Coordonnées géographiques.

***La latitude (φ) :**

C'est l'angle formé entre la verticale d'un lieu et le plan de l'équateur. On compte les latitudes positivement au nord et négativement au sud.

***La longitude (L) :**

C'est l'angle que forme le méridien d'un lieu avec le méridien d'origine de Greenwich, la longitude est comptée positivement vers l'ouest et négativement vers l'est.

***L'altitude(z) :**

C'est l'altitude d'un point correspondant à la distance verticale entre ce point et une surface de référence théorique (le niveau de la mer=0), elle est exprimée en mètre.

I.4.5 Coordonnées horaires :

*La déclinaison (δ) :

C'est l'angle formé par la direction du soleil avec le plan équatorial, elle varie au cours de l'année entre -23.45° et $+23.45^\circ$. Elle est nulle aux équinoxes (21 mars et 21 septembre), maximale au solstice d'été (21 juin et 21 décembre) et minimale au solstice d'hiver.

*L'angle horaire :

C'est l'angle formé par le plan méridien passant par le centre du soleil et le plan vertical du lieu (méridien), il définit le vrai temps solaire.

La figure (I.8) montre les coordonnées horaires utilisées.

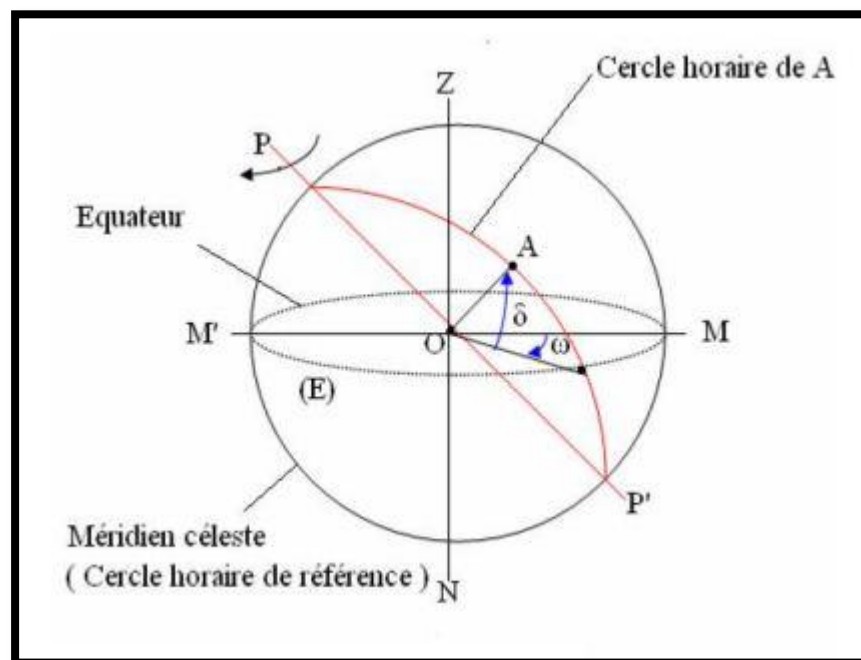


Figure (I.8) : Coordonnées horaires.

I.4.6 Coordonnées horizontales :

Le repérage du soleil se fait par l'intermédiaire de deux angles :

*L'azimut :

Qu'est l'angle horizontal mesuré à partir du méridien, compté positivement vers l'Ouest et négativement vers l'Est, et permettant de repérer la position du soleil. L'azimut vaut 0° lorsqu'il franchit le méridien d'un lieu.

*** La hauteur du soleil :**

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection. La hauteur du soleil est mesurée depuis l'horizon de $(-90^{\circ} \text{ à } +90^{\circ})$. Pour repérer la position du soleil en coordonnées horizontales (avec l'azimut), au lever et au coucher du soleil la hauteur vaut 0° . La figure (I.9) montre le système de coordonnées horizontales.

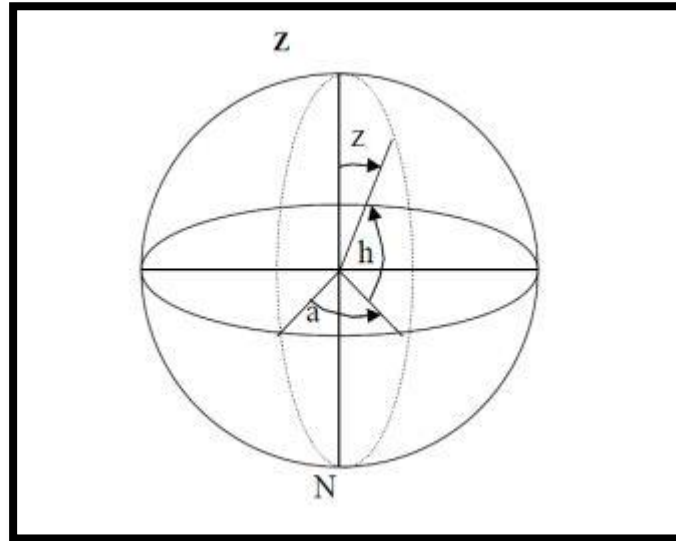


Figure (I.9) : Coordonnées horizontales.

I.4.7 Position de soleil par rapport à un observateur

L'énergie solaire que reçoit une surface est régie par des lois astronomiques et géométriques. Ces dernières faisant intervenir la latitude de lieu, la déclinaison solaire, l'heure du jour et enfin l'orientation de la surface réceptrice [7]. La position du soleil dépend du temps solaire, du numéro du jour et de l'année, elle est exprimée par différents angles:

***Angle de zénith :**

C'est l'angle entre la verticale d'une surface et un rayon du soleil.

***Angle d'azimut :**

C'est l'angle sur le plan horizontal mesuré à partir du sud avec la projection horizontale des rayons directs du soleil. Il est également donné comme angle entre le méridien local et la projection de la ligne de la vue du soleil dans le plan horizontal.

***Angle extérieur d'azimut :**

C'est l'angle mesuré à partir du sud sur le plan horizontal avec la projection horizontale

de la normale sur la surface, il est également donné comme angle entre le méridien local et la projection horizontale de la normale avec la surface.

***Angle d'incidence :**

C'est l'angle entre le rayon solaire direct et la normale extérieure du la surface du plan.

***Angle horaire de coucher du soleil :**

L'angle horaire du soleil est le déplacement angulaire du soleil autour de l'axe polaire. Dans sa course d'Est en Ouest, par rapport au méridien local.

I.4.8 Rayonnement solaire

L'énergie du rayonnement solaire est de type électromagnétique avec des longueurs d'onde s'étalant de l'ultraviolet à l'infrarouge. Avant d'atteindre le sol, le rayonnement solaire est atténué par l'atmosphère terrestre (nuages, aérosols, vapeur d'eau et polluant divers).

I.4.8.1 Caractéristique spécifique de l'énergie solaire :

Certaines particularités de l'énergie solaire doivent être prises en compte pour optimiser son utilisation, les principales caractéristiques sont la dilution et l'intermittence .

***La dilution:**

L'énergie du rayonnement solaire est à un niveau d'énergie relativement réduit, ce qui est désigné par l'appellation : dilution. La dilution nécessite l'utilisation d'une surface importante de captation pour obtenir des puissances élevées ou bien de prévoir une concentration de rayons solaires pour obtenir des températures élevées.

***L'intermittence:**

L'intermittence du rayonnement solaire est l'autre caractéristique spécifique de l'énergie solaire ainsi que sa variation journalière et annuelle. En effet, l'énergie solaire est asservie aux conditions météorologiques. Dans les régions à climat tempéré, le problème de l'intermittence est difficile à résoudre. Une solution, souvent employée, est d'envisager des stockages importants très variables suivant les applications envisagées. A titre d'exemple, il est nécessaire de prévoir un stockage quotidien pour l'utiliser durant la nuit, de même, prévoir le stockage nébuleux qui correspond à des passages nuageux accidentels.

I.4.8.2 Types de rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire peut être réfléchi, diffusé, absorbé ou direct :

- ❖ **Réfléchi** par la surface terrestre, c'est-à-dire renvoyé dans une direction privilégiée. Lorsque le rayonnement réfléchi par la surface l'est dans une seule et même direction, la réflexion est dite spéculaire. La réflexion spéculaire se produit uniquement sur des surfaces lisses, dont les aspérités ont une taille inférieure à la longueur d'onde du rayonnement incident. Le sol réfléchit plutôt le rayonnement de manière anisotrope.
- ❖ **Diffusé**, c'est-à-dire renvoyé dans toutes les directions. Le phénomène de diffusion se produit dans un milieu contenant de fines particules ou des molécules et dépend fortement de la taille des particules considérées. Par exemple, l'influence des molécules est plus intense pour les courtes longueurs d'onde (bleu) que pour les grandes (rouge), en raison de la loi de diffusion de Rayleigh en « λ^{-4} », où λ est la longueur d'onde. C'est la raison pour laquelle la voûte céleste apparaît en général bleue et le Soleil couchant rougeâtre (les rayonnements violet et bleu ayant été diffusés). Les molécules diffusent la lumière dans toutes les directions. Cependant, deux directions sont privilégiées: la diffusion avant et la diffusion arrière. Pour les particules les plus grosses (cas des gouttelettes de nuages), la diffusion se fait majoritairement en avant.
- ❖ **Absorbé** par les composants gazeux de l'atmosphère. Cette absorption est dite sélective, car elle s'opère pour des valeurs de longueur d'onde bien précises. Elle est due essentiellement à la vapeur d'eau, à l'ozone, au dioxyde de carbone et, à un degré moindre, à l'oxygène.
- ❖ **Direct**, c'est celui qui arrive au sol sans avoir subi de diffusion. La composante du rayonnement solaire direct reçu à la surface terrestre est montrée sur la figure (I.10). Ce rayonnement s'éloigne de façon notable des autres rayonnements, atteignant la limite supérieure de l'atmosphère, en particulier du fait de l'absorption par les constituants gazeux de l'atmosphère. Dans certaines bandes de longueurs d'ondes, le rayonnement est atténué ou même annulé. Les principales bandes d'absorption sont dues à l'ozone entre 0,2 et 0,3 μm (dans le domaine ultraviolet), au dioxyde de carbone autour de 2,75 μm et 4,25 μm , mais surtout à la vapeur d'eau dont l'absorption est prépondérante (en particulier autour de 0,9 μm ,

de 1,1 μm , de 1,4 μm , de 1,9 μm , de 2,4 à 2,9 μm et de 3 à 4 μm) et qui module principalement l'allure du spectre solaire reçu au sol.

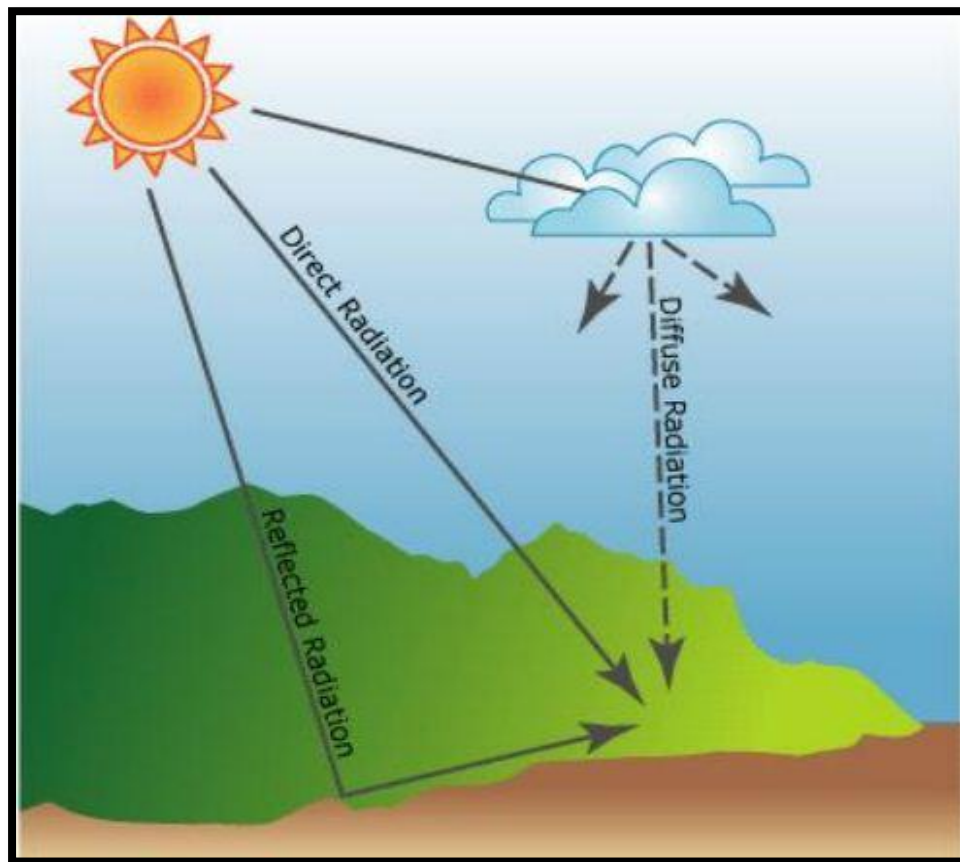


Figure (I.10) : Schéma représentant les composantes du rayonnement solaire.

I.4.8.3 Instruments de mesure du rayonnement solaire :

*Mesure du rayonnement solaire direct au sol :

Le pyrhéliomètre est un instrument destiné à mesurer l'intensité du **rayonnement solaire direct**. L'instrument est en permanence orienté vers le Soleil et ne mesure pas le rayonnement directement issu du soleil, à l'exclusion de celui issu du ciel ou de la terre. Il est généralement constitué par une thermopile peinte en noir, donc très absorbante, montée sur un système de suivi. La différence de température entre cette surface et le corps de l'instrument est proportionnelle à l'éclairement énergétique du rayonnement direct. La figure (I.11) montre la photo d'un pyrhéliomètre [8].

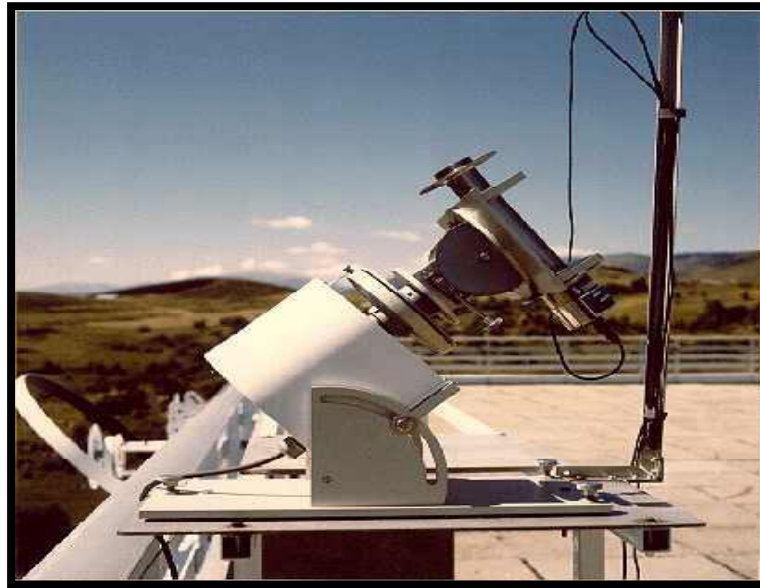


Figure (I.11) : Photo d'un pyrhéliomètre.

***Mesure du rayonnement global et du rayonnement diffus**

Le pyranomètre est un capteur de flux thermique utilisé pour la mesure de la quantité d'énergie solaire en lumière naturelle et est notamment utilisé en météorologie [9]. Il permet la mesure de la puissance du rayonnement solaire total en watts par mètre carré (W/m^2) en provenance d'un angle solide de 2 stéradians. Le domaine spectral couvert s'étend de 0,3 à 3 μm . Le rayonnement reçu est converti en chaleur par la surface noircie.

La différence de température entre cette surface et le corps de l'instrument est proportionnelle à l'éclairement énergétique du **rayonnement global**. Elle est mesurée par une thermopile constituée de plusieurs thermocouples montés en série.

La mesure du **rayonnement solaire diffus** est faite à l'aide du même instrument, auquel on adjoint un écran occultant le rayonnement solaire direct. Selon les cas, cet écran peut être, soit un disque ou une sphère dirigée en permanence vers le Soleil, soit une bande pare-soleil parallèle au plan équatorial et déplacée en fonction de la déclinaison solaire. La figure (I.12) montre la photo d'un pyranomètre.

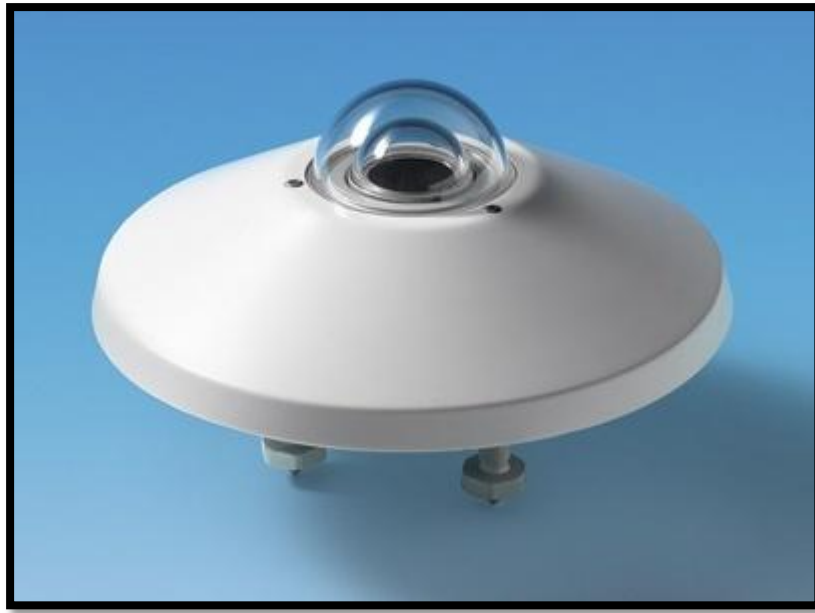


Figure (I.12) : Photo d'un pyranomètre.

I.5. L'énergie solaire en Algérie :

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire.

I.5.1 Potentiel solaire en Algérie :

Selon une étude prospective effectuée par l'Agence spatiale allemande (DLR), notre pays dispose d'une énergie thermo-solaire de plus de 169,44 TWh/an et de plus de 13,90 TWh/an d'énergie photovoltaïque car La durée moyenne d'ensoleillement dans le Sahara algérien est de 3500 heures, Au moment où la consommation actuelle de l'Algérie en énergie, obtenue essentiellement du gaz et du pétrole, est de 25 à 30 TWh /an. Le tableau (I.1) dessous indique le taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie . Le potentiel de l'Algérie dans le domaine des énergies renouvelables notamment de type solaire est énorme et ne demande qu'à être exploité [10]. La figure (I.13) montre la carte du potentiel solaire en Algérie.

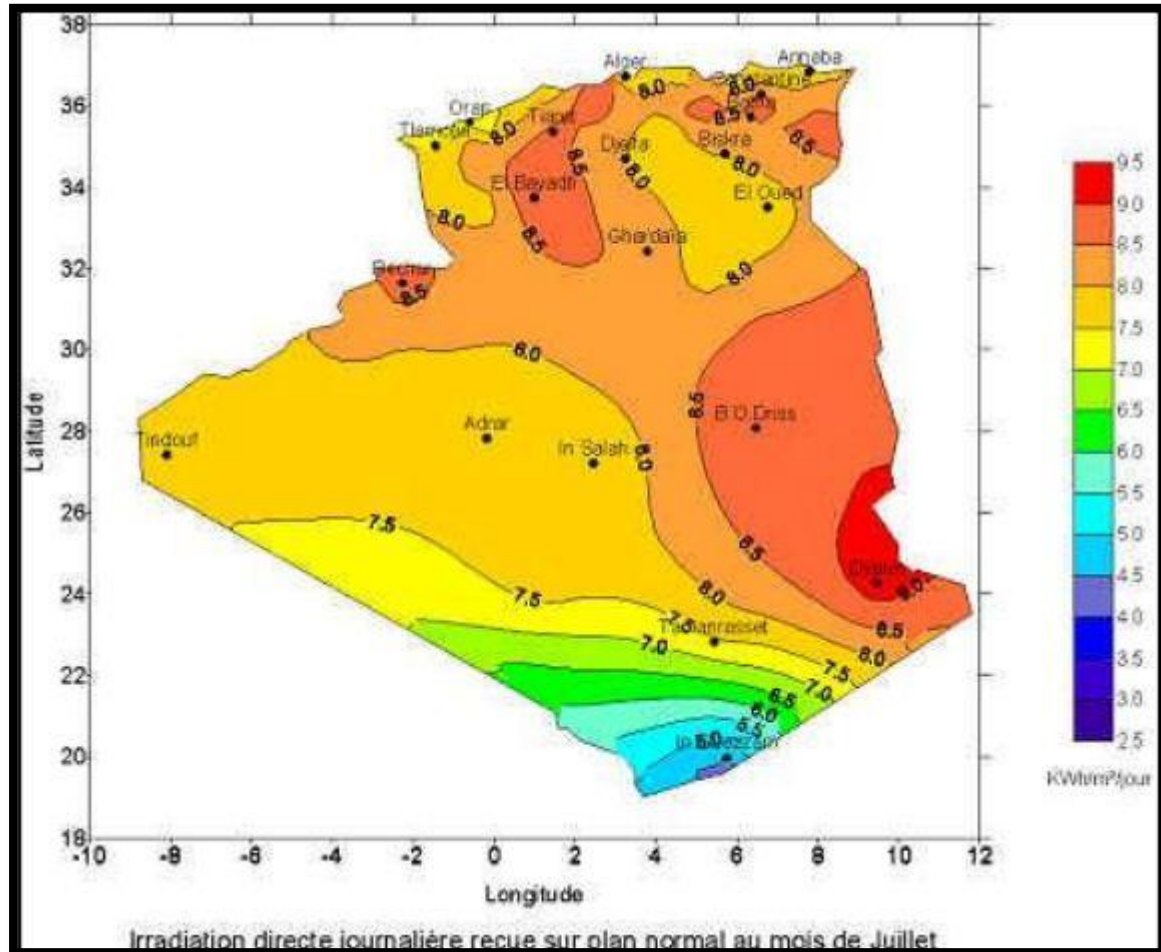


Figure (I.13) : Carte du potentiel solaire en Algérie.

Tableau (I.1) : Répartition de l'énergie moyenne reçue par rapport à la durée d'ensoleillement

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie	4%	10%	86%
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

Si l'on partage l'avis de nombreux experts, qui estiment que l'électricité solaire pourrait devenir l'option énergétique la mieux adéquate en 2020, l'Algérie possède les conditions requises pour développer cette filière. A la lumière des déclarations de l'UE, l'Algérie pourrait bénéficier de l'aide extérieure. Cette stratégie contribuera à économiser le gaz pour les générations futures. Les centrales électriques à turbines à gaz, gourmandes en énergie, continuent à enregistrer une forte consommation en énergie fossile, alors que l'énergie solaire est une source inépuisable et présente l'avantage d'être encore propre. A cet effet, les entreprises, Sonelgaz et Sonatrach, se sont associées pour créer la société « New

Energy Projets » où figurent trois centrales hybrides, solaire-gaz, comme celle de Hassi R'Mel, SPP 1. Ces centrales sont SPP2, SPP3 et SPP4 avec des puissances différentes. Le tableau I.2 montre la localisation de ces centrales et leurs années de mise en service.

Tableau (I.2) : Futures centrales hybrides programmées en Algérie.

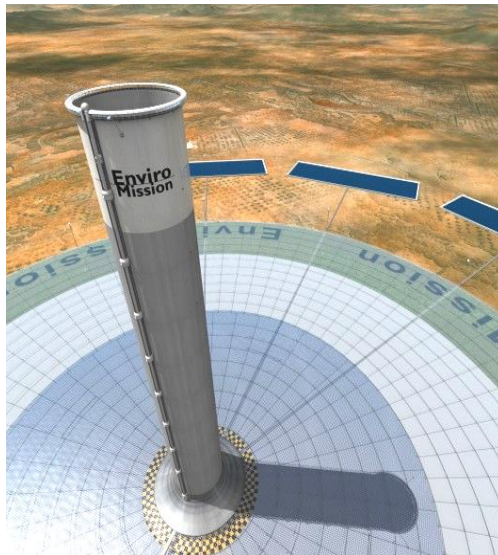
Centrale hybride	Localisation	Année de mise en marche
SPP 2	Meghaier	2014
SPP 3	Naama	2016
SPP 4	Hassi R'mel	2018

I.5.2 Dispositifs Algériens de soutien aux énergies renouvelables selon les lois adoptés et décrets :

Le gouvernement algérien a décrété, durant l'année 2004, un important décret sur la diversification des énergies. Cette loi encourage la production et l'utilisation des énergies renouvelables en Algérie par de nombreuses mesures dans une vision globale du développement durable surtout avec les scénarios énergétiques dans le futur avec l'épuisement du pétrole dans le monde. Durant ce siècle, la diversification est une consigne de conseil mondial de l'énergie. Le Décret exécutif N° 04-92 du 4 safari 1425 correspondant au 25 mars 2004 relatif aux coûts de diversification de la production d'électricité vient après le décret de 2002 qui a permis l'ouverture du secteur au privé. Il est constitué de 18 articles définissant les notions des énergies renouvelables, l'organisme de régulation et le régime spécial [10]. Un des objectifs de cette loi est d'attirer grâce à des mesures incitatives des investissements directs privés, étrangers ou locaux dans la génération électrique, l'article 11 du décret instaure une prime pour l'encouragement d'investissement dans cet article: afin de couvrir les surcoûts découlant de la production d'électricité produite à partir d'énergies renouvelables et au titre des coûts de diversification. Il est attribué aux producteurs d'électricité à partir des énergies renouvelables, une prime pour chaque KWh produit, commercialisé ou consommé. Cette prime est variable selon le choix d'énergie renouvelable où la priorité a été donnée aux créneaux purement solaires et éoliens avec une prime de 300 % du prix par kWh de l'électricité tel qu'élaboré par l'opérateur du marché comme l'indiquent les articles du décret de 12 à 16. Pour l'énergie renouvelable à partir de l'hydraulique, la prime est de 100 kWh d'électricité.

Chapitre II

Généralités sur les centrales à cheminée Solaire



Généralités sur les centrales à cheminée Solaire

II.1. La centrale cheminée solaire :

L'énergie solaire est une ressource inépuisable, non polluante qui constitue une alternative indéniable aux énergies classiques, périssables et polluantes. Cette énergie pourra être économiquement rentable pour assurer, au moins partiellement, les besoins énergétiques actuels et futurs de l'homme. L'exploitation de l'énergie solaire pour la production d'électricité est l'une des voies les plus empruntées ces dernières décennies en raison des problèmes environnementaux et de la durée de vie des combustibles fossiles. Une des technologies qui pourra être développée pour la production d'électricité à basse température, est la centrale à cheminée solaire. L'adoption d'une telle technologie est cruciale particulièrement pour les zones bénéficiant d'un important potentiel d'ensoleillement.

Une centrale cheminée solaire (CCS) est une installation de production d'énergie électrique, par la conversion de l'énergie solaire en énergie mécanique. Une cheminée solaire est constituée d'un collecteur solaire, d'un canal cheminée au centre du collecteur, et d'une ou de plusieurs turbines couplées à des générateurs électriques. La figure II. 1 montre une vue d'une centrale à cheminée solaire.



Figure II.1 : Vue d'une centrale à cheminée solaire.

En 1978, le Professeur Jorg Schlaich de l'université de Stuttgart [3], a eu l'idée de montrer que l'électricité pourrait être produite par un système hybride solaire - éolien composé de trois parties : Un collecteur, des aéro-génératrices, et une cheminée. Son principal avantage est qu'elle peut fonctionner sans intermittence en utilisant le rayonnement soleil direct et diffus le jour et la chaleur de la croûte terrestre la nuit. Même sous un ciel couvert, le rayonnement diffus peut être exploité par les CCS pour la production d'électricité.

II.1.1 Le collecteur :

Le collecteur c'est la partie qui utilise le principe de captation par effet de serre pour le chauffage de l'air. La couverture du collecteur (vitrage ou film plastique) est maintenue en place par une structure en tiges résistantes ; sa hauteur varie de 2 à 6 mètres et recouvre une vaste surface de plusieurs milliers de mètres carrés.

Le fonctionnement d'un collecteur est basé sur une propriété importante du verre d'être un matériau quasiment transparent au rayonnement solaire, et opaque au rayonnement infrarouge. Un flux solaire traversant une vitre sera en contact avec un corps derrière cette vitre (l'absorbeur) et se trouve ainsi piégé, puisque le rayonnement émis par ce corps ne peut traverser la vitre. Les figures II. 2 et II. 3 montrent respectivement les vues, interne et externe, d'un collecteur.

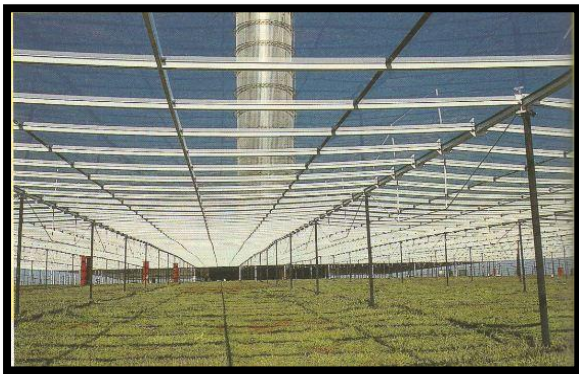


Figure II.2 : Vue interne de collecteur

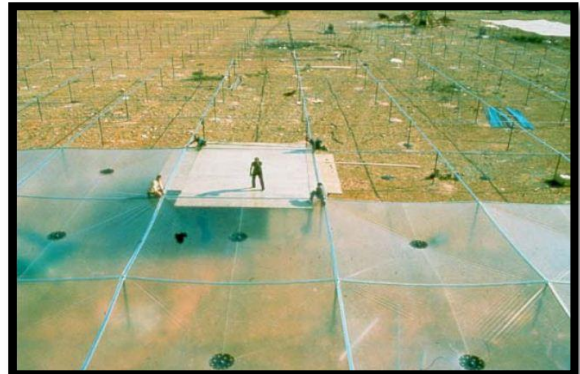


Figure II.3 : Vue externe de collecteur

La hauteur sous la serre doit progressivement augmenter de l'extérieur vers le centre afin de diminuer les pertes par frottement.

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

II.1.2 Les turbines :

Les turbines ou aéro-génératrices servent à extraire une quantité d'énergie disponible dans l'air en écoulement sous forme d'énergie mécanique de rotation. Des générateurs couplés aux turbines permettent la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. Les turbines utilisées dans les centrales cheminées solaires sont des turbines à étage de pression.

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.

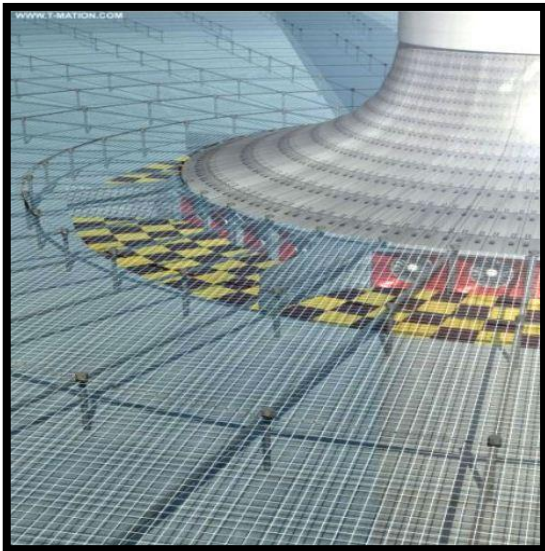


Figure II.4 : Vue des turbines horizontales.

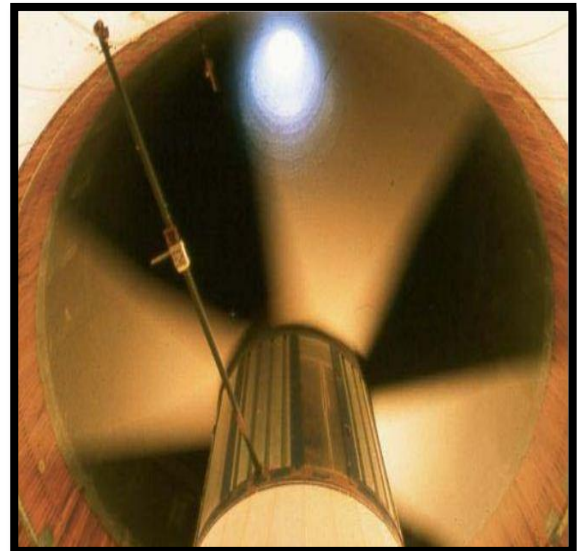


Figure II.5 : Vue d'une turbine verticale.

II.1.3 La cheminée

La cheminée ou canal cheminée est l'élément moteur de la centrale cheminée solaire. C'est un tube de pression avec des pertes par frottements négligeables.

La cheminée a le rôle de convertir l'énergie thermique donnée à l'air dans le collecteur en énergie cinétique (mouvement de l'air dans le système).

La colonne d'air chaud présente dans toute la structure est connectée avec le milieu ambiant par le collecteur à l'entrée et par la cheminée à la sortie. Le poids de cette colonne qui est plus léger que celui normalement occupé par l'air ambiant, provoque une élévation de

cette colonne d'air chaud (Effet de tirage de la cheminée). En effet l'air chaud à l'intérieur de la cheminée est poussé vers le milieu ambiant à la sortie de la cheminée, et comme conséquence, un appel d'air se fait par l'entrée du collecteur.

Plus haute est la cheminée, plus importante est la quantité d'énergie produite par la tour solaire. L'efficacité de la cheminée ne dépend pas tellement de la température de l'air entrant, mais de la différence de température avec l'air extérieur en haut de la cheminée. Cependant, bien que l'efficacité soit proportionnelle à la hauteur de la cheminée, dans la pratique il y a une limitation.

Deux principaux types de cheminées peuvent être conçus : les cheminées autoportées (construites en dur : béton ou acier) et les cheminées 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. La figure II.6 montre une vue de cheminée.

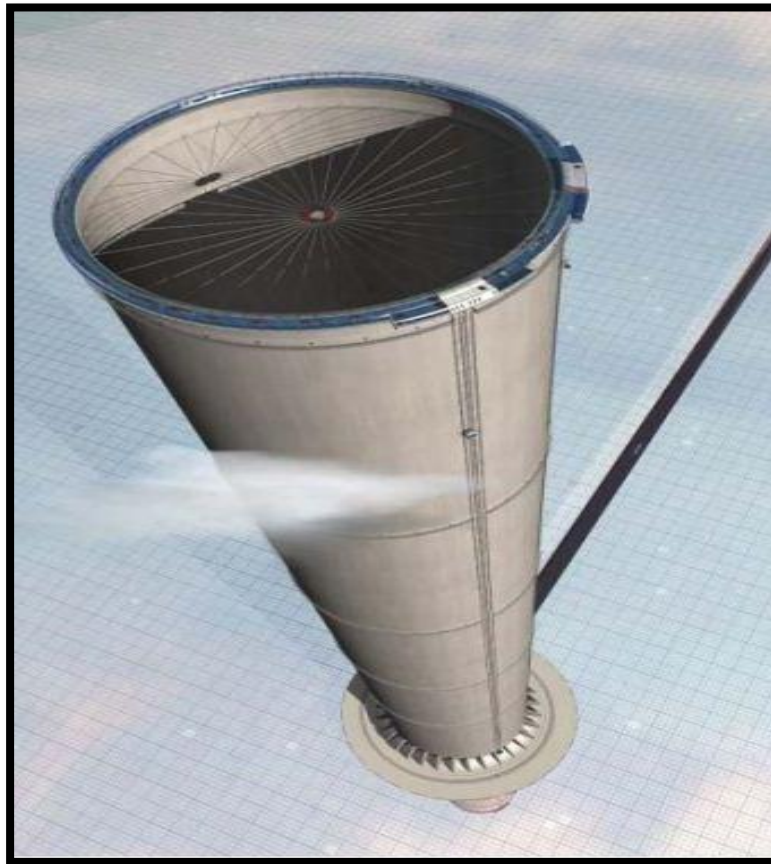


Figure II.6 : Vue d'une cheminée.

II.2. Principe de fonctionnement d'une CCS :

Le principe de fonctionnement d'une CCS est assez simple : l'air à la température ambiante entre dans le collecteur et sera chauffé par effet de serre au fur et à mesure qu'il s'écoule vers le centre du collecteur. L'air atteint une température maximale à la base de la cheminée (sortie collecteur). La différence de température entre l'air à l'intérieur de la cheminée et l'air ambiant à l'extérieur de la cheminée génère une poussée de l'air vers le haut c'est l'effet de tirage thermo- convectif. Cette énergie est utilisée d'une part pour accélérer le fluide dans toute la structure, et d'autre part comme une chute de pression statique à travers les turbines à air. Les turbines couplées à des générateurs électriques transforment l'énergie mécanique de rotation en énergie électrique.

La puissance dépend de la différence de température, de la surface chauffée et de la hauteur de la cheminée. Le concept de base peut être amélioré en plaçant des accumulateurs de chaleur, des bûches à eau à titre d'exemple, pour emmagasiner de la chaleur sous la serre pendant le jour et la restituer pendant la nuit.

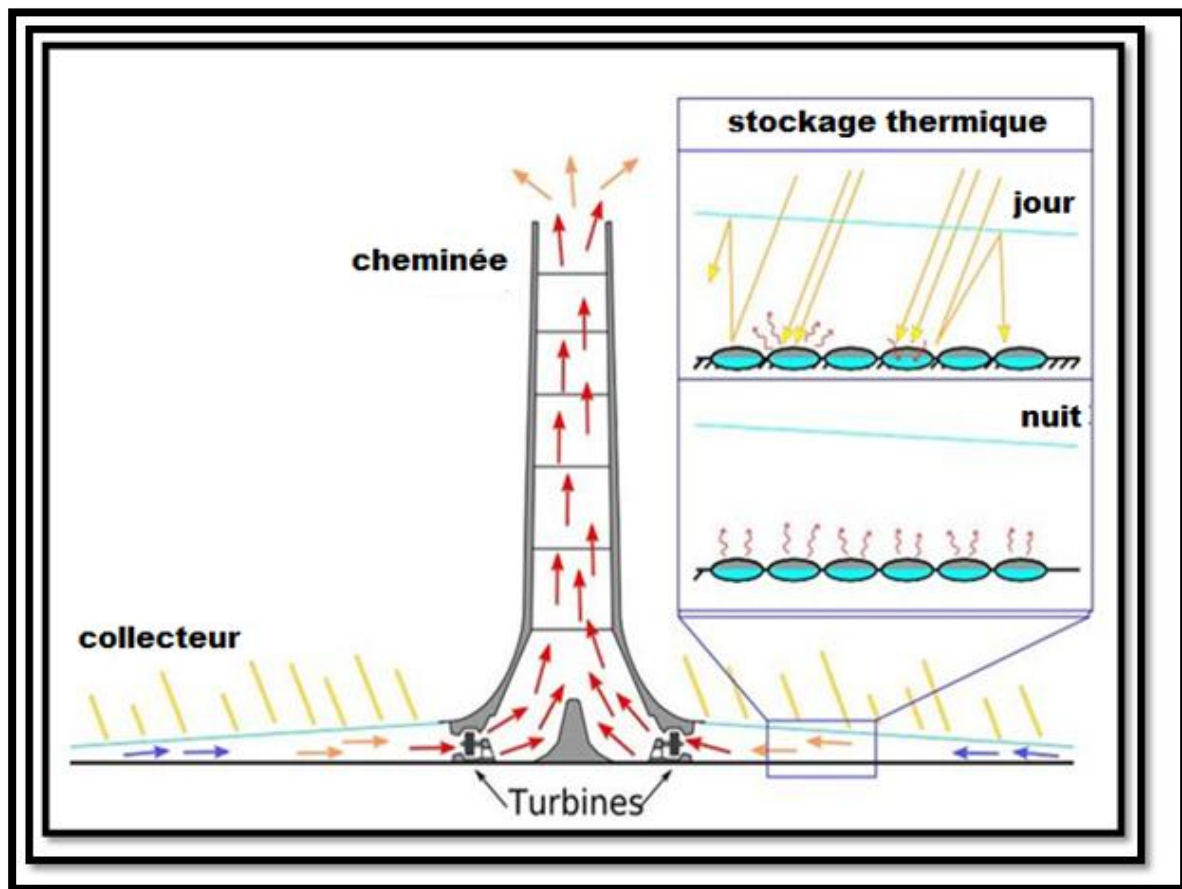


Figure II.7 : le principe de fonctionnement d'une centrale cheminée solaire

II.3. Les centrales cheminées solaires dans le monde :

Au vue de l'impact et de l'importance des énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire, dans le monde, de nombreux pays se sont intéressés à la production d'électricité par utilisation des CCS et ont construits des prototypes. Ces pays sont en particulier : la Chine, l'Espagne et les Etas Unis. Ci-dessous quelques projets de CCS réalisés à travers dans le monde.

II.3.1 Le prototype de Manzanares :

Suites à des recherches théoriques et à une série d'expériences en soufflerie, une première tour solaire a été testée dans les années 1980 par le bureau d'études « Schlaich Bergermann & Partner » de Stuttgart, pouvant atteindre un pic de production électrique de 50kW. Le prototype construit est situé à 150 km de Madrid, à Manzanares, sur un site livré par la « Spanish utility Union Electrica Fenosa » Cette tour prototype fut réalisée avec des fonds du ministère allemand de la recherche et de la technologie « BMFT : German Ministry of Research and Technology » et a fonctionné entre 1982 et 1989 [11,12].

Le but de ce projet était de vérifier expérimentalement les résultats obtenus par les calculs théoriques et d'examiner l'influence de chaque composant sur le rendement et la puissance délivrée par une telle installation sous des conditions technologiques et météorologiques réelles. La figure II.8 montre une photo de ce prototype.



Figure II.8 : Prototype de Manzanares.

La tour a été construite avec des tubes de guidages couverts par des plaques trapézoïdales d'une épaisseur de 1.25mm. Elle repose sur une base circulaire surélevée de 10m par rapport au niveau du sol. Cette base est supportée par 8 poutres très fines pour ne pas gêner la circulation de l'air. Elle est maintenue sur 4 niveaux et dans 3 directions, avec des câbles raccordés au sol.

La turbine utilisée est posée sur une structure métallique à 9 m du niveau du sol. Elle a 4 pales ajustables en fonction de la vitesse de l'air atteinte dans la structure. L'ajustement des pales permet de régler la chute de pression à travers la turbine, afin de pouvoir obtenir une puissance électrique optimale. Le couvert du collecteur est transparent et permet une bonne circulation de l'air ; de plus, il doit aussi avoir une longue durée de vie et un prix raisonnable. Plusieurs types de plastic et de verre ont été sélectionnés afin de déterminer le meilleur matériau destiné à cette fonction. Le verre présente une meilleure résistance aux tempêtes, une longue durée de vie, en plus les pluies occasionnelles assurent son nettoyage, contrairement au plastique qui présente un coût initial relativement bas mais qui se déchire et se dilate après un certain temps. Le tableau II.1 donne les caractéristiques techniques du prototype de Manzanares.

Rayon de la tour	5.08 m
Rayon du collecteur	122.0 m
Hauteur de la couverture	1.85 m
Hauteur de la cheminée en acier	195 m
Nombres de pales de la turbine	4
Profil des pales de la turbine a air	FX W -151- A
Rapport de la vitesse d'extrémité de pale a la vitesse de transport d'air	1 :10
Partie en plastique de la couverture du collecteur	40 000 m ²
Parti en verre de la couverture du collecteur	6 000 m ²
Elévation typique de la température à travers le collecteur	20 K
Puissance nominale	50KW

Tableau II.1 : Caractéristiques techniques du prototype de Manzanares.

Les essais sur le prototype ont montré que l'énergie électrique produite est étroitement liée au rayonnement solaire. Cependant, il reste une quantité de chaleur emmagasinée dans le sol pendant les premières heures de la nuit permettant une génération de l'électricité pendant quelques heures de plus.

Un code de simulation numérique a été développé et validé sur la base des données expérimentales prélevées sur Manzanares. Actuellement, ce logiciel est utilisé pour étudier le comportement thermodynamique de centrales commerciales de plus grandes dimensions, sous

des conditions météorologiques de fonctionnement de la centrale bien déterminées.

❖ Un autre projet de tour solaire, a été prévu pour arriver à échéance avant 2010, si le financement est trouvé, a été développé en Espagne dans la localité de Fuente el Fresno, un village de la Province de Ciudad Real. Les travaux devraient être menés en collaboration avec les entreprises espagnoles Campo 3 et Imasa, et la compagnie allemande Schlaich Bergermann. Cette tour de 750 mètres de hauteur serait dès lors la plus haute en Europe [13].

II.3.2 Le projet Australien :

Un projet de tour solaire « la tour de Buronga », est localisé en Australie, à 630 kms au sud ouest de Sydney, dans une zone aride et désertique située à la frontière des états de Nouvelle Galle du Sud et de Victoria, a été développé par la société « Enviromission » [14] et prévu pour l'année 2010. La cheminée aurait 990 mètres de hauteur et 70 mètres de diamètre. La centrale fournirait 200 mégawatts de puissance électrique. Elle présente l'un des projets les plus ambitieux de la planète pour la production d'énergie alternative : une centrale à énergie renouvelable qui fournit une puissance de 4 fois moins la puissance fournie par un petit réacteur nucléaire (200 MW contre 915MW pour un réacteur à eau pressurisée) tout en étant plus sûre et plus propre. Le coût d'investissement est d'environ 400 millions d'euros.

Ce projet peut paraître trop ambitieux mais ses concepteurs disent qu'il est réalisable. Cette tour solaire, serait donc construite par l'entreprise « EnviroMission » dans le désert de la province australienne du New South Wales, dans le comté de Wentsworth. La figure II.9 montre une photo du prototype de CCS australien.



Figure II.9 : Photo de CCS du projet Australien.

Pour contrer l'effet d'ovalisation de la tour (qui la replierait sur elle-même aussi facilement qu'un cylindre de papier mouillé posé sur une table, vu son incroyable légèreté), la société d'ingénierie SBP, responsable du projet, a eu l'idée de placer dans la tour à intervalles réguliers des structures de maintien ressemblant aux rayons d'une roue de bicyclette. Elles ne diminuent que de 2% la vitesse de l'air [15]. Plus de 90 % de l'électricité produite en Australie, l'est par des centrales au charbon, fortement polluantes en matière d'émission de CO₂.

Pour produire 200 MW et éclairer environ 200 000 foyers, les centrales au charbon génèrent, selon l'Institut australien de l'énergie (AIE), près de 900 000 t de dioxyde de carbone par an, ce qui aggrave le phénomène d'effet de serre. La centrale solaire ne dégage, epar contre, qu'un courant d'air et une fine buée au sommet de sa cheminée.

Si cette expérience se révélait payante en terme de réduction de rejets de CO₂, elle ouvrirait la voie à d'autres réalisations de même type tout d'abord en Australie (un des plus gros émetteurs au monde de CO₂ avec près de 27 tonnes par habitant) mais également dans d'autres pays où les conditions se trouveraient réunies, d'autant plus que le coût de réalisation estimé à 400 millions d'Euros, même s'il paraît très élevé, n'est supérieur à celui d'une centrale au charbon que de 40 millions d'Euros [16].

Les kWh fournis par la CCS reviennent près d'un tiers moins cher que ceux fournis par les panneaux solaires, mais encore cinq fois plus cher que l'électricité au charbon qui représente 95% de la production en Australie [17]. Des touristes pourraient visiter la tour afin de réduire encore significativement le prix du kWh. La culture de tomates au sein du collecteur est aussi envisagée par certains chercheurs [18].

Spécifications du projet :

- Une cheminée de 990 m de haut, en béton haute résistance précontraint, pesant plus d'une mégatonne ;
- Un collecteur de 7 km de diamètre, soit 38,5 km de verre et de plastique ;
- Température de l'air chauffé dans la cheminée : 70°C ;
- Vitesse de l'air dans la cheminée : 15 m/s ;
- 32 turbines ;
- Energie produite: 200 mégawatts, 7 fois moins qu'un réacteur nucléaire moderne, mais assez pour alimenter en électricité environ 200 000 logements.

C'est ainsi que, si le projet de Buronga rencontre le succès escompté, quatre autres tours du même type verraient le jour en Australie, mais Il semblerait que l'entreprise « EnvironMission » est toujours à la recherche d'investisseurs. Aux dernières nouvelles, « EnviroMission » se lance dans le développement d'une première version plus petite et moins coûteuse (50 MW) avec une cheminée en béton précontraint haute résistance. On s'inquiète tout de même de la lenteur du projet vues les sommes mises en jeu et les investissements déjà réunis [14]. La figure II.10 montre les dimensions du prototype de CCS.

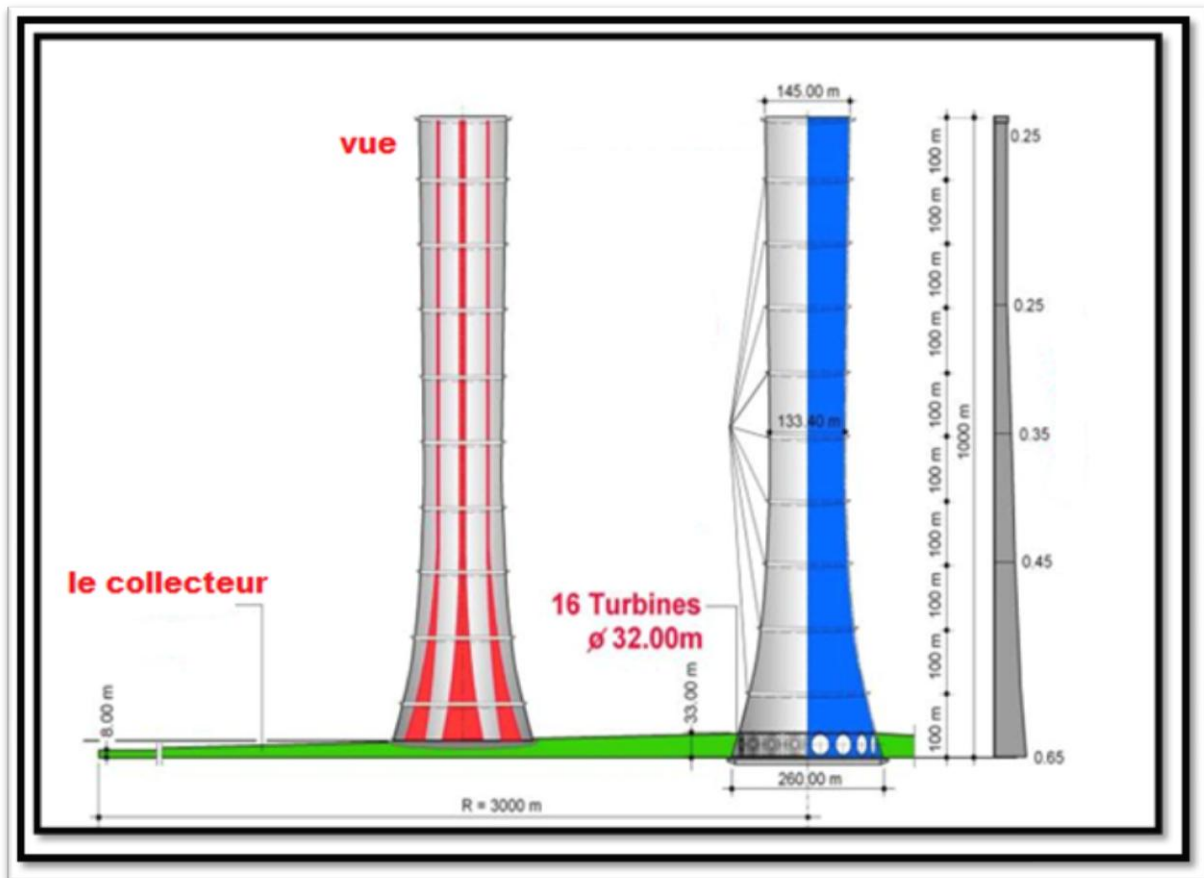


Figure II.10 : Dimensions de la centrale d'Australie.

II.3.3 La centrale cheminée de Chine:

Cette centrale est une sorte de château d'eau sous la forme d'une cheminée ou d'une tour qui accroche le regard dans le désert isolé, et, sous la cheminée il y a une maison de verre tenant au-dessus du sol.

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 qui combine l'énergie solaire et l'énergie éolienne dans la

production d'électricité [19].

Mise en service le 10 décembre 2010, l'unité de production de 200 kilowatts 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.

La Chine fait des efforts dans le contrôle des émissions de gaz à effet de serre afin de respecter son engagement de réduire les émissions de dioxyde de carbone par unité de son produit intérieur brut (PIB) par 40 à 50 pour cent d'ici 2020.

Sur la base de la proposition du douzième "Programme quinquennal" du pays, qui a été publié par le Comité Central du Parti Communiste Chinois à la fin Octobre 2010, la Chine devrait faire la réduction de l'intensité de la consommation d'énergie et des émissions de dioxyde de carbone des "objectifs contraignants" au cours de la période 2011 - 2015.

Soutenu par le Ministère de la Science et de la Technologie du gouvernement régional autonome de Mongolie intérieure, le projet a été co-conçu et développé par l'Université de la science et la technologie de Mongolie intérieure (IMUST) et l'Université Polytechnique de Madrid, en Espagne.

« Il nous a fallu trois ans pour résoudre les goulots d'étranglement techniques » a déclaré le professeur Wei Yili avec le IMUST, qui est un membre de l'équipe sur le projet ».

La centrale est composée de trois parties : les capteurs solaires, une cheminée et un générateur à turbine. Sous le couvercle en verre en utilisant l'effet de serre, le sable chauffe et absorbe la chaleur du soleil, le flux d'air chaud transmis à la cheminée assure la production d'électricité en faisant tourner la turbine à l'intérieur de la tour.

Le sable est chauffé par le soleil pendant la journée et de l'énergie y est stockée, la chaleur est libérée pendant la nuit et continue à faire fonctionner la turbine, selon Wei : « Le tour de force de cette installation est qu'une porte à air a été ajoutée afin d'intégrer l'énergie éolienne dans le réseau électrique, ce qui permet au système de fonctionner en hiver même quand il y a un minimum de soleil. De cette façon, le système peut fonctionner 24h autour de l'horloge, 365 jours d'une année », a-t-il dit.

Financé par une entreprise locale en Mongolie intérieure avec 1,38 milliards de yuans Chinois (208 millions de dollars US ou 160 millions d'euros), la construction a démarré en mai 2009. Il y aura trois phases jusqu'à couvrir une superficie totale de 277 hectares et une capacité de production totale qui atteindra 27,5 MW, après la phase finale qui sera achevée cette année 2013.

La puissance générée par l'usine sera ensuite transféré au réseau électrique de Mongolie

intérieure et de la province du Hebei qui fournit l'électricité à Beijing, ainsi que à Hebei et à la Mongolie-Intérieure.

Wei a également fait remarquer que la substance la plus importante dans cette technologie était le sable, qui absorbe la chaleur et qui accumule l'énergie. Par conséquent, le vaste désert de l'ouest de la Mongolie intérieure devient le site idéal pour une telle centrale à cheminée solaire.

« D'autres cheminées solaires de ce genre seront construites, en prenant avantage de 2,6 millions de kilomètres carrés de "ressources" du désert de la Chine » a souligné Wei.

Ce projet n'occupe que du désert, que des terres incultes. L'exploitation et l'entretien est également très simples et l'usine solaire ne produira aucune pollution. Cette tour solaire affiche d'excellentes performances en matière de protection de l'environnement. Comme le collecteur de la serre couvre de vastes zones de désert, il peut effectivement supprimer les tempêtes de poussière, ce qui est important pour l'amélioration du climat. "Non seulement cette tour solaire permet des économies d'énergie, mais également le fait qu'il y aura moins de tempêtes de sable, car la serre recouvre le sable mobile, fait que les centrales d'énergie à cheminée solaire sont d'une grande importance dans l'amélioration du climat", a-t-il noté.

En 2013, une fois la construction achevée, la tour solaire à courant d'air ascendant chinoise (solar updraft tower ou SCPP solar chimney power plant) sera similaire en puissance à celle du projet Espagnol pour Ciudad Real, Fuente el Fresno (40 MW) de la société Ingenieria-Campo3, mais une dizaine de fois moins puissante que les projets de la société Enviromission à Buronga en Australie (200 MW) ou en Arizona aux USA (2 x 200 MW). [20] La figure II.11 montre une photo du prototype de CCS chinois.



Figure II.11 : Photo de la CCS de Chine.

II.3.4 Centrale cheminée 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.

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 avec très peu d'entretien.

La tour solaire d'Enviro- Mission est constituée de 3 éléments : Le canopée, la tour et les turbines.

La canopée est une énorme serre en verre où le soleil vient réchauffer l'air emprisonné sous la verrière.

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, qui est 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.

Les turbines disposées à la base de la tour, utilisent la pression de l'air ascendant pour générer, grâce à leurs hélices, de l'électricité comme le font les centrales hydroélectriques traditionnelles. L'avantage de cette technologie est qu'elle fonctionne sur le principe du différentiel de température entre l'air chaud et l'air froid. Par ailleurs, pendant la journée, l'air sous la serre est tellement réchauffé (80 à 90°C) que la centrale continue de travailler 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 : Burdj-Khalifa de Dubaï.

Actuellement en cours d'ingénierie et d'acquisition des terrains, EnviroMission estime que le projet coûtera environ 750 millions de dollars. Cette centrale solaire générera 200 MW et son rendement sera de 60%, soit bien plus efficace que beaucoup d'autres énergies renouvelables. L'édifice sera rentable après 11 ans d'exploitation.

Par ailleurs, le « Southern California Public Power Authority » a déjà accepté d'acheter de l'électricité produite par la tour d'EnviroMission pendant les 30 prochaines années.

Si tout se passe bien, la tour solaire de l'Arizona devrait commencer à produire de l'énergie électrique en 2015. La figure II.12 montre une photo du prototype de CCS américain.



Figure II.12 : Photo de CCS d'Arizona.

3.6 Projet Namibie :

Le plus grand projet de centrale solaire aérothermique au monde est actuellement à l'étude dans plusieurs universités allemandes. Une cheminée solaire de 1.500 m de haut, d'une capacité de 400 MW, associée à des plantations assurant une séquestration de CO₂ importante, devrait voir le jour en Namibie et proposer l'énergie renouvelable la moins chère du marché mondial.

Plusieurs équipes de chercheurs allemands, mettent au point, à la demande de l'énergéticien namibien « NamPower », une centrale solaire aérothermique de 1500 m de haut. "The Greentower" est une immense serre circulaire en verre de 25km² qui chauffe l'air au sol afin de créer un courant chaud dans une cheminée centrale dotée de turbines. La nuit, la chaleur résiduelle émise par le sol suffira à maintenir la production. L'installation devrait avoir une capacité de 400 MW et offrirait l'énergie durable la moins

chère du marché : 1,5 centime d'euros/kWh entre 30° nord et sud et 2,0 centimes d'euros/kWh en moyenne aux latitudes européennes. En plus de la production d'énergie, la serre accueillera également des plantations particulièrement voraces en CO₂, qui séquestreront 5 fois plus de CO₂ que n'en produit une centrale à charbon de capacité équivalente. Le but recherché est de proposer la première source d'énergie véritablement neutre en carbone.

Par ailleurs, 30.000 emplois devraient être créés autour de la centrale. Cependant, il reste à trouver les investisseurs, pour couvrir un coût global d'environ 600 millions d'euros. Les promoteurs du projet assurent un retour sur l'investissement de 50%, taux très alléchant sur un marché de l'énergie en crise [21].

II.4. Avantages et inconvénients des centrales cheminées solaires :

II.4.1 Les avantages :

- La centrale CCS, fonctionne avec les deux composants du rayonnement solaire, direct et diffus, ainsi que l'inertie thermique de l'énergie solaire emmagasinée dans le sol du capteur, ce qui augmente nettement la durée d'exploitation du système, son efficacité et sa stabilité de fonctionnement par rapport aux autres types de centrales ;
- Les cheminées solaires sont particulièrement fiables et ne sont pas sujet de pannes, contrairement à plusieurs autres centrales. Les turbines et les générateurs sont les seuls composants en mouvement dans toute la structure. Ils garantissent un fonctionnement fiable avec un minimum d'entretien ;
- Les CCS n'ont pas besoin d'eau pour leur fonctionnement ;
- Les principaux matériaux d'une cheminée solaire sont disponible dans la plupart des régions, en quantité suffisante et à des prix modéré ;
- La CCS utilise une technologie maîtrisée, qui peut être facilement construite dans des pays pauvres ou en voie de développement en utilisant des ressources disponibles permettant ainsi de créer des postes d'emplois et de réduire son coût de construction.

II.4.2 Les inconvénients :

- Coût de construction relativement élevé qui fait fuir les investisseurs ;
- Les cheminées solaires nécessitent une surface d'installation importante pour produire une puissance acceptable ;
- Les cheminées solaires ne peuvent pas être construites dans des régions affectées par les tremblements de terre, sinon le coût de construction de la centrale peut atteindre des coûts exorbitants ;
- Il faut aussi éviter les zones avec des tempêtes de sable fréquentes, car cela réduira non seulement les performances du collecteur mais augmente aussi le coût d'entretien de la centrale comme c'est le cas pour le sud Algérien.

II.5. Les différents travaux sur les centrales cheminées solaires :

Dans le but de démontrer que la cheminée solaire est une technologie alternative fiable et bien adaptée dans les régions à climat chaud, pour la production d'énergie électrique, Pasumarthi et Shérif [22] ont élaboré une étude en deux parties :

Dans la première partie, ils ont développé un modèle mathématique capable de prédire les performances d'une cheminée solaire. Le modèle établi est capable d'estimer la température et la puissance fournie par une cheminée solaire, ainsi que de déterminer l'influence des différentes conditions ambiantes et les dimensions de la structure sur la puissance produite.

Dans la deuxième partie, Pasumarthi et Sherif [23] ont présenté les résultats théoriques du modèle mathématique développé dans la première partie, ainsi que les résultats expérimentaux prélevés sur un prototype de petite échelle construit à Gainesville, Floride, USA. Ils ont aussi établi une comparaison entre les deux modes. Ils ont démontré que la puissance développée par une cheminée solaire est directement proportionnelle à l'élévation de la température dans le collecteur et le débit massique de l'air à l'intérieur de la cheminée. L'élévation de la température à l'intérieur de la cheminée peut être améliorée en augmentant le rayon du collecteur ou en augmentant son rendement. Quand à l'amélioration du débit massique, elle est généralement obtenue par l'augmentation de la hauteur de la cheminée. Cependant, la construction d'une cheminée très haute coûte très cher d'un point de vue financier, en plus des problèmes liés à sa construction. Le modèle mathématique développé était capable de prédire les performances du prototype construit à Manzanares avec une erreur de 20% sur la vitesse et de 5 à 9% sur l'énergie électrique développée.

Padki et Sherif [24] ont développé un modèle analytique simple pour la prédiction des performances d'une cheminée solaire. Ce modèle permet facilement de voir l'influence des dimensions de la structure et des conditions environnementales sur les performances d'une cheminée solaire. Les résultats donnés par ce modèle sont en accord avec ceux donnés par le modèle différentiel développé dans la première partie de Pasumarthi et Shérif [22], avec des prédictions sur les performances dans une marge d'erreur de 4-6%.

Dans l'étude menée par Bernardes et Weinrebe [6] dans l'objectif d'évaluer théoriquement les performances d'une cheminée solaire. Un modèle mathématique a été développé pour estimer la température et la puissance générée ainsi que l'influence des différentes conditions de construction sur la production d'énergie d'une cheminée solaire. Le modèle développé a été ensuite validé par les données expérimentales prélevées sur le prototype de Manzanares, où il donné des divergences de plus de 1.7% sur la puissance produite. Ils ont conclu que la puissance générée augmente avec l'augmentation de la hauteur de la tour et la surface de captation du collecteur. Un facteur de chute de pression à travers la turbine a été fixé à 0.97, pour avoir une production optimale de puissance électrique.

Schlaich et al. [25] ont présenté dans une première étape une théorie simple qui permet de comprendre le fonctionnement d'une cheminée solaire. Ils ont présenté, par la suite, les différentes étapes de construction du prototype de Manzanares et les résultats obtenus, où ils ont analysé la vitesse de l'air dans le système et la puissance générée en fonction du rayonnement solaire au cours de la journée. Les auteurs ont aussi analysé les problèmes techniques de la construction de la tour, ainsi qu'une étude économique pour des centrales cheminée solaire commerciales. Ils ont conclu que le rendement de la cheminée solaire augmente avec l'augmentation de la hauteur de la tour et que la centrale doit être de larges dimensions pour être compétitive avec les technologies de production d'énergie électrique actuelles. Les auteurs ont également proposé des solutions aux contraintes qui peuvent opposer la construction d'une centrale cheminée solaire, tout en précisant les avantages d'une telle technologie.

Dai, Huang et Wang [26] ont analysé les performances d'une cheminée solaire susceptible d'être implémentée dans les 3 régions les plus ensoleillées au nord-est de la chine. Dans cette analyse, les auteurs ont adopté un modèle simple qui tient compte de la captation solaire, du gain utile de fonctionnement et de la puissance électrique à la sortie de la turbine. Ils ont conclu que l'implémentation d'une cheminée solaire de 200 m de hauteur et de 10m de diamètre, avec un collecteur de 500m de diamètre sera capable de produire une énergie

électrique moyenne sur un mois de 110 à 190 kW pendant toute l'année. L'énergie produite dépend entre autres paramètres, du rayonnement solaire et de la température ambiante. Les performances du système sont fortement influencées par la hauteur de la cheminée, le rendement du collecteur et l'efficacité de la turbine. Pour les mêmes conditions de fonctionnement, ils concluent qu'une plus haute cheminée et un collecteur de rayon plus grand permettront de générer plus d'énergie électrique.

Plus le rayonnement solaire est important, plus le rendement des composantes de la cheminée solaire est meilleur et plus l'énergie produite est grande, par ailleurs la température ambiante affecte peu la puissance électrique produite.

Dans le but de mieux comprendre le fonctionnement d'une cheminée solaire et l'interaction entre ses différents paramètres, Pastohr & al. [27] ont modélisé une cheminée solaire à l'aide d'un logiciel CFD. Leur modèle comporte le couplage des 3 composantes : collecteur, cheminée, et turbine. Les auteurs ont présenté les résultats concernant l'écoulement dans le collecteur, à savoir le profil de température, la vitesse, la pression, et le coefficient d'échange thermique au niveau du sol. Ils ont aussi établi un modèle mathématique simple à une dimension d'espace permettant de décrire le mouvement d'air dans le système. Ils affirment que l'interaction entre les différents paramètres ne peut être déterminé que numériquement. Ils concluent que ce modèle simple développé donne de bons résultats comparé avec les résultats obtenus par les simulations numériques et les deux modèles peuvent être utilisés pour une étude paramétrique. Cependant le modèle numérique utilisé doit être raffiné en utilisant les résultats prélevés sur des projets de plus grandes dimensions, afin de se rapprocher le plus possible de la réalité.

Le principal but de l'étude faite par Ming & al. [28] est d'étudier le champ de pression à l'intérieur de la structure et son influence sur les performances de la cheminée solaire. Ils ont analysé la relation entre la pression relative statique et la force de poussée, et ont établi une prédiction de la puissance générée et l'efficacité du système. Les auteurs ont établi également des expressions détaillées de la pression relative statique, la force motrice, la puissance générée et l'efficacité du système, en fonction de la hauteur, du diamètre de la cheminée, du rayon du collecteur et du rayonnement solaire et d'autres paramètres de fonctionnement. Ils ont montré que les résultats présentés par Pastohr & al. [27] concernant le champ de pression statique le long du collecteur contredit la théorie d'écoulement de base et le principe de fonctionnement de la cheminée solaire. En effet, le profil de pression statique dans le collecteur présenté par Pastohr & al. [27] donne des pressions relatives statique positives

alors qu'en réalité la pression statique relative décroît de l'entrée du collecteur à la pression atmosphérique jusqu'à la base de la cheminée, pour prendre les valeurs les plus basses, mais croît dans la direction d'écoulement dans la cheminée. Ils ont montré aussi que la force motrice dépend de la hauteur de la cheminée, du rayonnement solaire et des autres dimensions du système.

L'analyse portant sur la hauteur maximale de la cheminée ainsi que sur une hauteur optimale pour une puissance maximale développée par une cheminée solaire a été réalisée par Xiping & al. [29]. Dans leur étude, les auteurs ont établi une étude énergétique de la cheminée en considérant les pertes de chaleur au niveau du mur de la cheminée vers le milieu ambiant. Ils ont développé à travers cette analyse un modèle théorique exprimant la puissance générée par la cheminée solaire, en fonction des différents paramètres du milieu ambiant et des dimensions de la structure. Le modèle théorique ainsi développé est validé avec les résultats prélevés sur le prototype de Manzanares. Les auteurs ont conclu que :

- L'influence de la pression ambiante sur la hauteur maximale de la tour est négligeable ;
- Les résultats donnés par le modèle montrent qu'un maximum de puissance de 102.2 kW est obtenu pour une hauteur optimale de la cheminée de 615m, hauteur inférieure au maximum de la hauteur de cheminée avec une production de 92.3 kW ;
- L'analyse effectuée pour différents coefficients de chute de température atmosphérique montre que la hauteur maximale de la cheminée augmente avec l'augmentation de ce coefficient ;
- L'analyse faite pour les centrales de très grandes dimensions montre que le maximum de hauteur de la cheminée et l'optimum de hauteur pour une puissance maximale augmentent avec l'augmentation du rayon du collecteur.

Dans le but d'étudier le champ de température dans une cheminée solaire et afin de déterminer son comportement à différents temps de la journée, une cheminée solaire à échelle réduite a été construite à HUST, en CHINE [17]. Le collecteur de 10m de diamètre, est construit sur une plate forme en béton et toute sa structure est en acier. La cheminée est construite en PVC. Elle mesure 8m de haut et 0.3 m de diamètre. Les résultats expérimentaux montrent que l'élévation de température dans cette structure atteint 24.1°C, entre l'entrée et la sortie du collecteur. Les auteurs ont remarqué que les températures atteintes dans la structure sont plus importantes lorsque le rayonnement solaire atteint son maximum au milieu de la journée.

II.6. Centrale cheminée solaire commerciale :

Plusieurs autres expériences [25] faites sur soufflerie ont montré que les calculs thermodynamiques effectués pour le collecteur, la cheminée et la turbine restent valables pour des centrales de plus grandes dimensions.

Ainsi, le logiciel de simulation numérique développé sur la base des données collectées sur le prototype de Manzanares est utilisé pour le design de centrales beaucoup plus larges, avec des puissances générées de l'ordre du MW.

Le tableau II.2 présente les dimensions des différents constituants, pour des cheminées solaires de différentes puissances.

Capacité	[MW]	5	30	100	200
Hauteur de la cheminée	[m]	550	750	1000	1500
Diamètre de la cheminée	[m]	45	70	110	120
Diamètre du collecteur	[m]	1250	2900	4300	7000
Electricité produite(*)	[GWh/a]	14	99	320	680
(*) Site avec radiation solaire annuelle globale de 2300 kWh/m²					

Tableau II.2. Dimensions typiques et production électrique des centrales cheminée solaires.

II.6.1 Technologie :

Le design structurel de centrale cheminée solaire de grandes dimensions a montré que le design d'un collecteur en verre similaire à celui utilisé pour le prototype de Manzanares peut être utilisé sans modifications majeures. Ce design a prouvé sa robustesse et son prix raisonnable. De plus, l'expérience du site de Manzanares a fourni des données pour le calcul du prix de la construction du collecteur.

La construction d'une tour de 1000m de hauteur est un défi à relever, compte tenu qu'il n'existe aucune expérience similaire et leurs concepteurs affirment que sa construction est possible.

Il existe plusieurs méthodes pour la construction de la tour : une tour libre en béton armé ou tubes de guidages couverts par des plaques métalliques. Ces techniques de construction sont bien connues dans le domaine des tours de refroidissement et ils n'exigent aucun développement technologique.

Différentes procédures pour la construction des tours de différentes dimensions ont été élaborées en collaboration avec plusieurs entreprises spécialisées dans la construction des

tours de refroidissement et de gratte-ciels. Le prix de construction de la tour ainsi que la méthode utilisée dépend étroitement du site de construction. On opte souvent pour une tour en béton, pour les sites arides qui sont les mieux placés pour la construction de telle centrale.

L'utilisation d'une seule turbine à axe vertical disposé à la base de la cheminée paraît comme étant la solution la plus simple. Mais afin de pouvoir utiliser des turbines de tailles disponibles sur le marché et dans le but d'assurer la redondance du système, les concepteurs ont opté pour plusieurs turbines avec un axe horizontal, disposées en périphérie à la base de la cheminée. Le design de la partie d'entrée de la cheminée et de la partie turbine se fait à l'aide des logiciels CFD.

II.6.2 Etudes techno-économiques :

Le coût d'investissement dans une centrale cheminée solaire a été calculé pour des centrales de différentes puissances [25]. Cette étude a été fondée sur les données du Tableau II.3 ci- dessous.

Le calcul du LEC (Levelized Electricity Costs), est basé sur un taux d'intérêt de 6% sur une durée d'amortissement de 30 ans (Tableau 3).

Puissance de la centrale	[MW]	5	30	100	200
Cout de la tour	Million. €	19	49	156	170
Cout du collecteur ^A	Million. €	10	48	107	261
Cout de la turbine	Million. €	8	32	75	133
Ingénierie, tests et autres	Million. €	5	16	40	42
Total	Million. €	42	145	378	606
Annuité de l'investissement	Million. €	2.7	10.2	27.1	43.7
Cout de fonctionnement et de maintenance annuel	Million. €	0.2	0.6	1.7	2.8
Cout d'électricité (LEC) ^B	€/KWh	0.21	0.11	0.09	0.07
^A Cout du travail non compétant estimée à 5 €/h					
^B Pour un taux d'intérêt de 6% et une dépréciation de 30 ans.					

Tableau II.3: Coût d'investissement et LEC.

L'influence de la variation des paramètres financiers (le taux d'intérêt et la durée d'amortissement) sur le LEC est présentée sur la figure II.12. Pour des centrales d'une puissance allant de 5MW à 200 MW, la limite supérieure de chaque bande a été calculée pour une durée d'amortissement de 20 ans, et la limite inférieure pour une période d'amortissement de 40 ans.

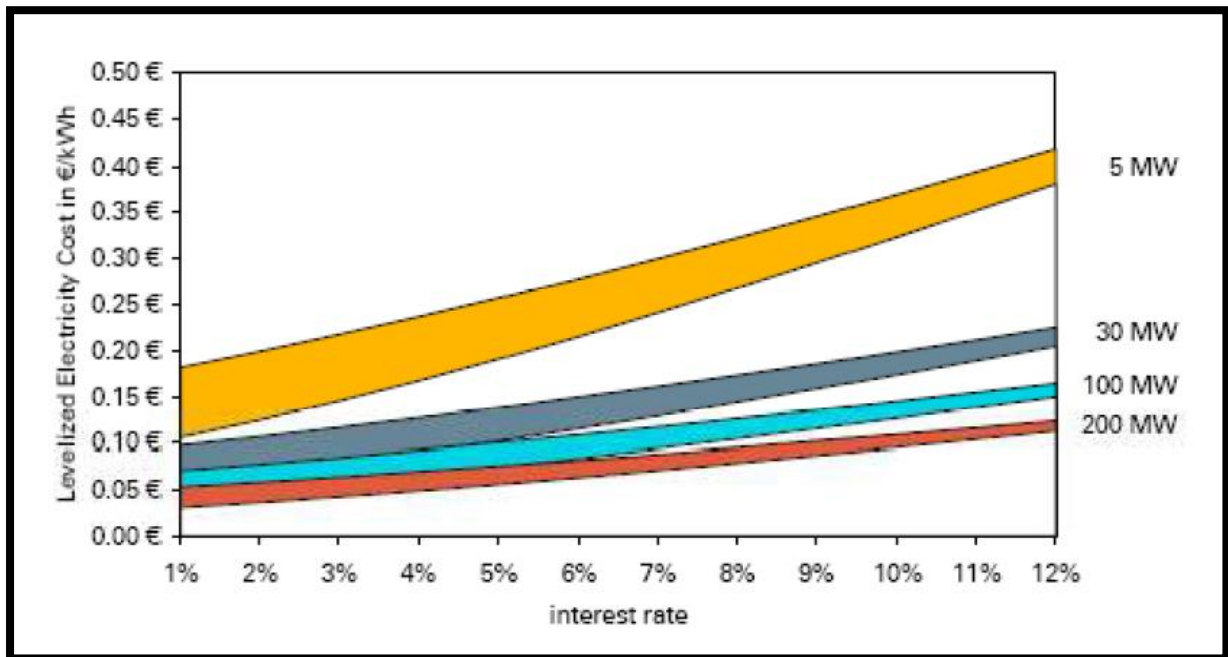


Figure II.12 : LEC pour différents taux d'intérêts pour des centrales de différentes puissances [25].

Comme on pouvait s'y attendre, le coût de production du KWh électrique d'une centrale cheminée solaire est dominé par le taux d'intérêt. Le temps d'amortissement a aussi une influence significative. Si on considère par exemple un taux d'intérêt de 12% sur un temps d'amortissement de 20 ans, le LEC revient à 0.12 €/kWh pour une cheminée de 200MW, contre un LEC de 0.06 €/KWh pour un taux d'intérêt de 6% sur un temps d'amortissement de 40 ans.

La figure II.13 représente une comparaison globale entre une centrale à charbon et une centrale à cheminée solaire. Sur cet exemple, le LEC est plus élevé pour une centrale cheminée solaire pendant les premières années de fonctionnement. L'écart entre le coût de l'énergie obtenu par les deux centrales s'atténue avec l'augmentation du prix du carburant fossile. Après 20 ans d'exploitation, le coût de l'énergie est identique pour les deux centrales, et les deux centrales seront entièrement amorties. Le coût d'électricité produite par une

centrale cheminée solaire sera par la suite très faible car il n'est dû qu'aux dépenses de maintenance et de fonctionnement, contrairement au coût de l'électricité des centrales à charbon qui reste relativement élevé, car il est régi par le coût de carburant fossile utilisé.

Dans cet exemple, au bout de 30 ans de fonctionnement, la centrale à charbon atteint sa durée de vie maximale et une nouvelle centrale doit être construite, alors que la centrale cheminée solaire reste dans sa configuration d'origine et elle ne nécessite aucun changement. Ceci reflète la différence entre la durée de vie technique entre les deux installations.

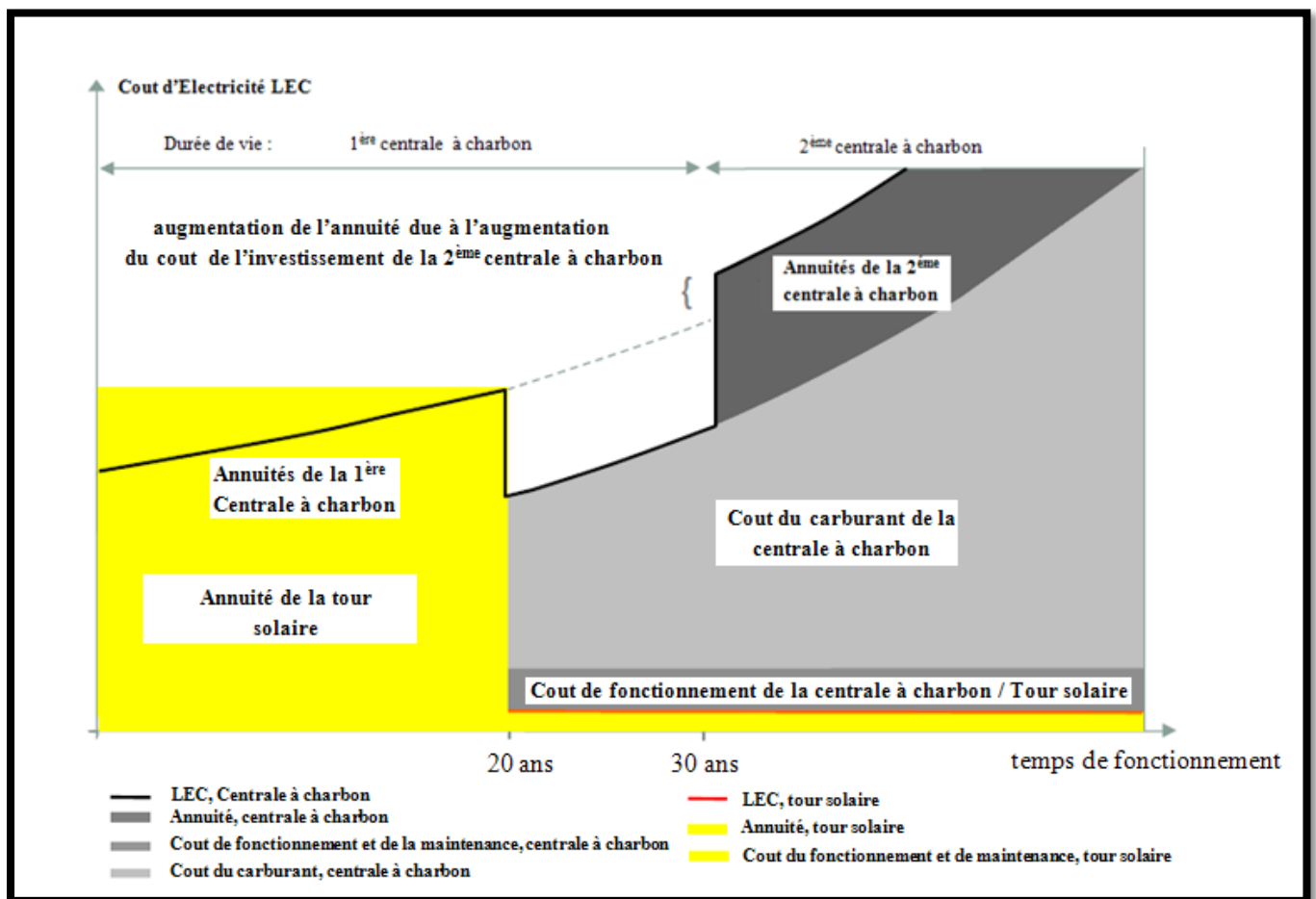
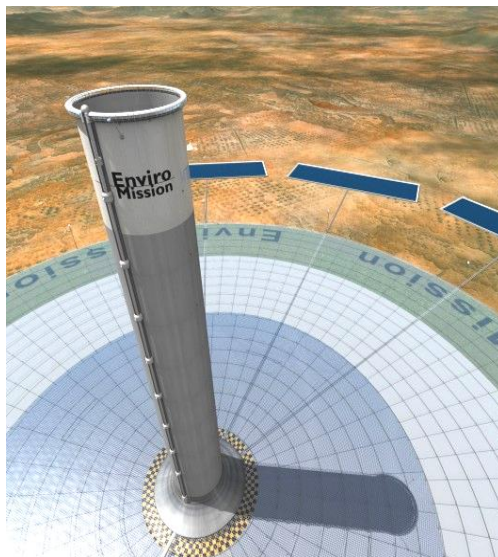


Figure II.13 : Comparaison entre le coût d'électricité d'une centrale cheminée solaire et d'une centrale au charbon [25].

Chapitre III

Modélisation et Détermination des Performances Énergétiques des CCS



Modélisation et Détermination des Performances Energétiques des Centrales à Cheminée Solaire

3.1. Introduction :

Plusieurs facteurs, tels que les conditions environnantes du site d'implantation de la centrale cheminée solaire « CCS », les dimensions, les matériaux utilisés dans la construction des composants de la tour et du collecteur solaire, la nature du sol sous le collecteur solaire, pourraient influencer les performances d'une installation cheminée solaire. Le choix de la turbine ainsi que le système de contrôle de l'installation sont aussi des éléments importants dans la production d'électricité.

La plupart des études effectuées [30] se focalisent sur la détermination du rendement de ces centrales en fonction des paramètres caractéristiques ainsi que sur l'analyse de l'interdépendance des différentes parties constituant les CCS en définissant les paramètres influents sur la puissance générée.

Plusieurs modèles théoriques ont été proposés dans la littérature [30] afin de prédire les performances des centrales cheminées solaires. On se propose dans ce chapitre d'étudier l'un de ces modèles mathématiques. On prendra comme référence de calcul, le modèle de **Jorg Schlaich et son équipe [3]** compte tenu de son travail pionnier dans le domaine et de la validation de ses résultats théoriques avec les données expérimentales.

3.2. Paramètres influençant le fonctionnement d'une CCS :

Il existe plusieurs paramètres qui peuvent agir sur les performances des centrales cheminées solaires. La Figure (III.1) schématise ces différents paramètres. Citons ci-dessous les détails de quelques facteurs :

- Le site choisi pour l'implantation de la cheminée solaire permet de fixer un très grand nombre de paramètres environnementaux ainsi que la nature du sol sous le couvert du collecteur. L'intensité du rayonnement solaire qui est la source d'énergie pour le fonctionnement de la cheminée solaire représente un paramètre décisif pour le choix du site de construction. Les cheminées solaires sont destinées pour les zones arides (désert) où la température ambiante est très élevée et où d'immenses surfaces libres sont disponibles ;

- Les dimensions de la cheminée et principalement sa hauteur, jouent un rôle très important sur la puissance générée par une centrale à cheminée solaire ;
- Le choix des matériaux de construction s'impose, dans la mesure du possible, par sa disponibilité dans la région de construction de la centrale cheminée solaire. Les pertes de chaleur à travers les parois d'un mur cheminée mince engendrent une diminution des performances de la centrale, le choix d'un mur épais conduit à des coûts de construction exorbitants. Un critère d'optimisation doit être établi pour trouver un compromis entre l'aspect technologique et économique ;
- Le collecteur solaire peut être construit avec un nombre allant de 1 à 4 couverts, selon la nécessité. Un nombre de couvert plus important réduit les pertes de chaleur vers le milieu ambiant mais augmente aussi le coût de construction. Vu les dimensions du collecteur dans le cas des cheminées solaires, on conseille souvent d'utiliser un collecteur avec un seul couvert. Pour les cheminées solaires commerciales, les températures atteintes à la base de la cheminée sont élevées. Dans le but de diminuer les pertes thermiques vers le milieu ambiant, on double le couvert du collecteur autour de la base de la cheminée. Les matériaux de construction du collecteur et surtout pour le couvert, jouent un rôle très important. On conseille d'utiliser un couvert en verre pour ses propriétés optiques et sa durée de vie ;
- les turbines utilisées pour la conversion d'énergie sont des turbines à étage de pression. L'inclinaison des pales de ces turbines est commandée par un système automatique.

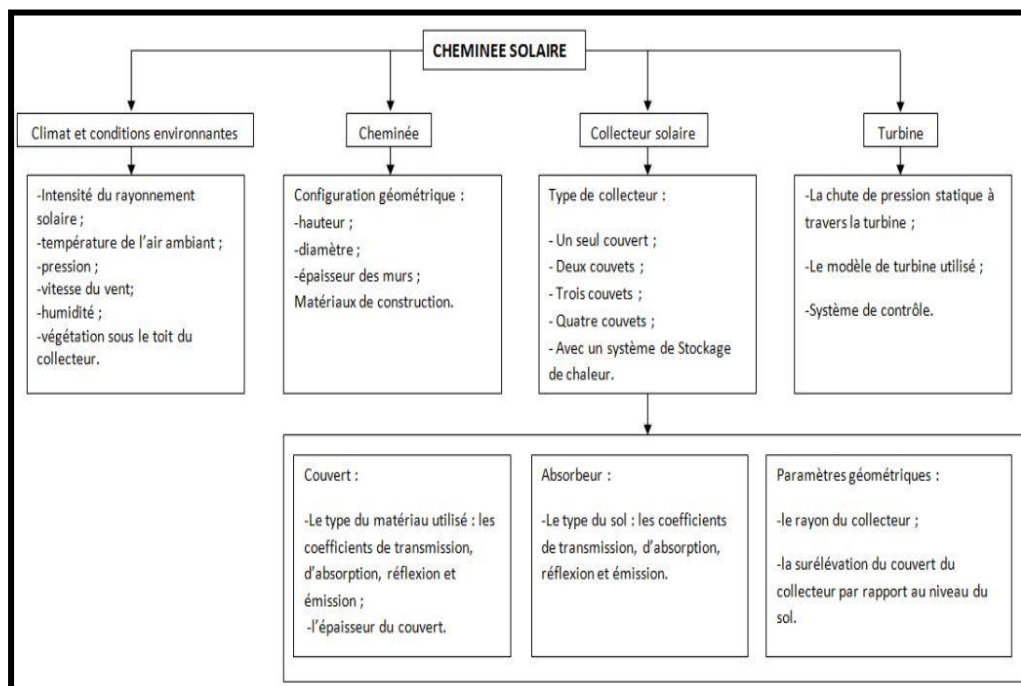


Figure III.1 : Paramètres influençant le fonctionnement d'une CCS.

3.3. Fondement des modèles théoriques utilisés dans les CCS :

Les différents modèles proposés dans la littérature [30] sont fondés sur des hypothèses de base dont certaines sont communes à l'ensemble des modèles et d'autres sont spécifiques à chaque modèle.

3.3.1 Hypothèses communes à l'ensemble des modèles :

Les hypothèses adoptées sont :

- Le régime est stationnaire ;
- Les éléments du collecteur sont considérés à une température moyenne ;
- La couverture du collecteur est opaque aux radiations infrarouges ;
- Les propriétés physiques des composants du système (collecteur, cheminée et aéro-turbine) sont indépendantes de la température ;
- L'effet de la poussière, des impuretés et de l'ombre sur l'absorbeur sont négligeables.
- Le collecteur est considéré comme étant la superposition de deux surfaces planes (i.e. : L'écoulement dans le collecteur est considéré comme un écoulement entre deux plans parallèles) ;
- 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 ;
- Les transferts thermiques conductifs dans le sens de l'écoulement sont négligeables ;
- Le ciel est considéré comme corps noir ;
- 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.

3.3.2 Description du modèle de J. Schlaich et al.:

L'un des modèles pionniers dans la modélisation des centrales à cheminée solaire est celui développé par Jorg Schlaich et son équipe [3], pour l'étude de la centrale à cheminée solaire dont le prototype est celui de Manzanares. Bien que le modèle étudie un cas idéal, il reproduit les bilans énergétiques au niveau des différents composants de la centrale et permet de déduire l'influence des principales variables caractéristiques de la centrale sur son rendement global et analyse les limites de ses performances.

3.3.2.1 Approche pour le calcul du rendement de la CCS :

Le rendement total η est défini comme étant le produit des trois rendements individuels suivants [3,18]:

$$\eta = \eta_{coll} * \eta_c * \eta_{wt} \quad (3.1)$$

η_{coll} , est le rendement du collecteur, en d'autres mots c'est l'efficacité avec laquelle les radiations solaires sont converties en chaleur. η_c , indique le rendement de la cheminée, il d'écrit l'efficacité de la transformation de la chaleur délivré par le collecteur en énergie dans l'écoulement. η_{wt} , représente le rendement de l'aérogénérateur, la turbine.

3.3.2.2 Le collecteur :

Le collecteur de la cheminée solaire convertie la radiation solaire incidente, G , sur la surface du collecteur, A_{coll} , en énergie thermique, \dot{Q} .

3.3.2.2.1 Puissance thermique :

La chaleur dégagée par unité de temps, à la sortie du collecteur est exprimée par la relation suivante :

$$\dot{Q} = \dot{m} * c_p * \Delta T \quad (3.2)$$

Où :

\dot{Q} : Gain en puissance thermique de l'air.

\dot{m} : Débit massique de l'air.

c_p : Chaleur spécifique de l'air.

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

Avec:
$$\dot{m} = \rho_{coll} * V_c * A_c \quad (3.3)$$

ρ_{coll} : Masse volumique de l'air à la sortie de collecteur.

A_c : Section de passage.

V_c : Vitesse de l'air à l'entrée de la cheminée et à la sortie de collecteur.

3.3.2.2 Rendement énergétique du collecteur :

Le rendement énergétique du collecteur peut s'exprimer comme étant le rapport entre le gain en puissance calorifique \dot{Q} , et les radiations solaires G (W/m²) multiplié par la surface du collecteur, A_{coll} :

$$\eta_{coll} = \frac{\dot{Q}}{G * A_{coll}} \quad (3.4)$$

Avec :

G : Rayonnement solaire incident mesuré en (W/m²)

A_{coll} : Surface du collecteur.

En combinant les équations (3.2), (3.3), (3.4), on aura :

$$\eta_{coll} = \frac{\rho_{coll} * A_c * V_c * C_p * \Delta T}{A_{coll} * G} \quad (3.5)$$

3.3.2.3 Flux de chaleur transmis par le collecteur à l'air :

En appliquant un bilan thermique sur le collecteur on aura :

$$\dot{Q} = \alpha * A_{coll} * G - \beta * \Delta T * A_{coll} \quad (3.6)$$

Tel que :

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 de sol (Pertes corrigée en W/m² K).

En combinant les équations (3.4) et (3.6) on aura :

$$\eta_{coll} = \alpha - \frac{\beta * \Delta T}{G} \quad (3.7)$$

3.3.2.4 Vitesse d'écoulement d'air :

Des équations (3.5) et (3.7) on déduit la vitesse d'écoulement d'air à la sortie du collecteur :

$$V_c = \frac{\alpha * A_{coll} * G - \beta * \Delta T * A_{coll}}{\rho_{coll} * A_c * C_p * \Delta T} \quad (3.8)$$

3.3.2.3 La cheminée :

La cheminée est l'élément moteur de la centrale cheminée solaire. C'est un tube de pression avec des pertes par frottements, considérées négligeables. La cheminée a pour rôle de convertir l'énergie thermique fournie à l'air dans le collecteur en énergie cinétique (mouvement de l'air dans le système). La colonne d'air chaud présente dans toute la structure est liée au milieu ambiant par le collecteur à l'entrée et par la cheminée à la sortie.

Le poids de cette colonne qui est plus léger que celui normalement occupé par l'air ambiant, provoque une élévation de cette colonne d'air chaud (Effet de tirage de la cheminée). En effet l'air chaud à l'intérieur de la cheminée est poussé vers le milieu ambiant à la sortie de la cheminée, et comme conséquence, un appel d'air se fait par l'entrée du collecteur. La figure III.2 montre une représentation schématique d'une CCS.

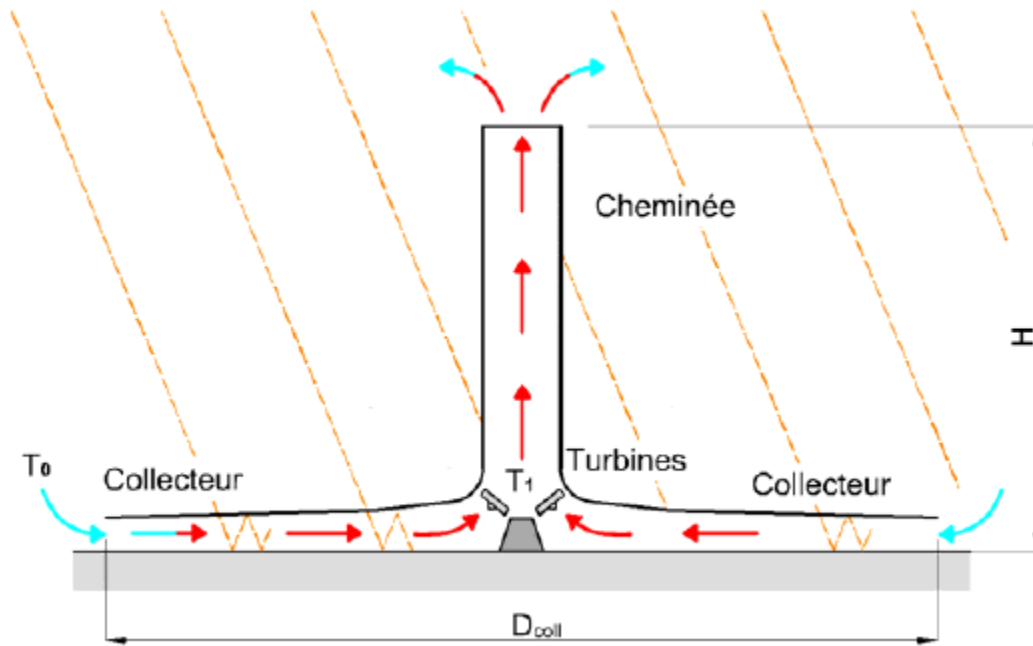


Figure III.2 : Représentation schématique d'une CCS.

3.3.2.3.1 Vitesse d'écoulement d'air dans la cheminée :

L'application de l'équation de conservation de la quantité de mouvement sur une section de la tour cheminée donne :

$$\rho_c V_c \frac{d(V_c)}{dz} = -\frac{dp}{dz} - (\rho_c - \rho_e) * g \quad (3.9)$$

De l'équation (3.9) et après transformation on peut déduire l'expression de la vitesse de l'écoulement dans la cheminée :

$$V_c = \sqrt{\frac{2}{\rho_c} \left(- \int_0^{H_c} dp - \int_0^{H_c} (\rho_c - \rho_e) * g * dz \right)} \quad (3.10)$$

Avec:

g : Accélération due à la gravité.

H_c : Hauteur de la cheminée.

ρ_e : Masse volumique de l'air dans l'environnement extérieur.

ρ_c : Masse volumique de l'air dans la cheminée.

En éliminant la turbine et en considérant les pertes par frottement négligeables dans la cheminée vue le rapport optimal entre la surface et le volume de cette dernière, on obtient la vitesse maximale de l'écoulement du fluide :

$$V_{c, \max} = \sqrt{- \frac{2}{\rho_c} \left(\int_0^{H_c} (\rho_c - \rho_e) * g * dz \right)} \quad (3.11)$$

Ainsi, on peut déduire une expression pratique pour la vitesse maximale en appliquant l'hypothèse de Boussinesq :

$$V_{c, \max} = \sqrt{2 * g * H_c * \frac{\Delta T}{T_0}} \quad (3.12)$$

Avec :

T_0 : Température ambiante.

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

3.3.2.3.2. Rendement de la cheminée :

Le rendement de la tour cheminée est consécutif de l'effet de tirage cité précédemment dû à l'élévation de la colonne d'air chaud dans la cheminée, une différence de pression Δp_{tot} est ainsi créée entre la base de la cheminée (l'écoulement sortant du collecteur) et l'environnement extérieur exprimée par :

$$\Delta p_{tot} = g * \int_0^{H_c} (\rho_e - \rho_c) * dh \quad (3.13)$$

❖ Δp_{tot} augmente avec l'augmentation de la hauteur de la cheminée.

La différence de pression Δp_{tot} peut être divisée en deux composantes, statique et dynamique, en négligeant les pertes par frottement et on aura :

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_s + \Delta p_d \quad (3.14)$$

La différence de pression statique diminue dans la turbine, alors que la composante dynamique décrit l'énergie cinétique de l'écoulement d'air dans la cheminée.

Si on annule la différence de pression statique $\Delta p_s = 0$ la différence de pression totale sera alors la pression induisant l'accélération du mouvement d'air dans la cheminée étant donné que : $\Delta p_{tot} = \Delta p_d$

L'énergie contenue dans le fluide est :

$$P_{tot} = \Delta p_{tot} * V_{c,max} * A_c \quad (3.15)$$

Ce qui permet de déduire le rendement de la cheminée donné par :

$$\eta_c = \frac{P_{tot}}{\dot{Q}} \quad (3.16)$$

Si la turbine est éliminée, l'écoulement atteint une vitesse maximale $V_{c,max}$ et toute la différence de pression est utilisée pour accélérer l'air dans la cheminée, donc transformée en énergie cinétique :

$$P_{tot} = \frac{1}{2} \dot{m} V_{c,max}^2 \quad (3.17)$$

En combinant l'équation (3.16) avec (3.2) et (3.12) et (3.17) on aura déduit ainsi le rendement de la cheminée :

$$\eta_c = \frac{g * H_c}{cp * T_0} \quad (3.18)$$

❖ Le rendement de la cheminée dépend uniquement de la hauteur de celle-ci, il n'est pas influencé par l'augmentation de la vitesse de l'écoulement et de la température dans le collecteur.

3.3.2.3.3 Puissance et perte de pression totale :

La puissance totale peut être établie par combinaison des équations (3.2), (3.3), (3.16) et (3.18) :

$$P_{\text{tot}} = \eta_c * \dot{Q} = \frac{g^* H_c}{c_p * T_0} * \rho_{\text{coll}} * c_p * V_c * \Delta T * A_c \quad (3.19)$$

En associant les deux équations (3.15), (3.19) on aura :

$$\Delta p_{\text{tot}} = \rho_{\text{coll}} * g * H_c * \frac{\Delta T}{T_0} \quad (3.20)$$

Cette équation montre l'analogie avec le tube de pression de la centrale hydroélectrique dont le gradient de pression est : " $\Delta p = \rho_{H_2O} * g * H$ ". Ce qui justifie ainsi l'appellation de la centrale à cheminée solaire par : *Centrale hydroélectrique du désert*.

3.3.2.4 La turbine « aéro-génératrice » :

La turbine installée à la base de la cheminée a pour rôle de convertir l'énergie du mouvement du flux d'air ascendant en énergie de rotation.

3.3.2.4.1 Chute de pression :

La chute de pression statique à travers la turbine peut être exprimée, en première approximation, avec l'équation de Bernoulli :

$$\Delta P_s = \Delta P_{\text{tot}} - \frac{1}{2} \rho_c * V_c^2 \quad (3.21)$$

3.3.2.4.2 Puissance théorique :

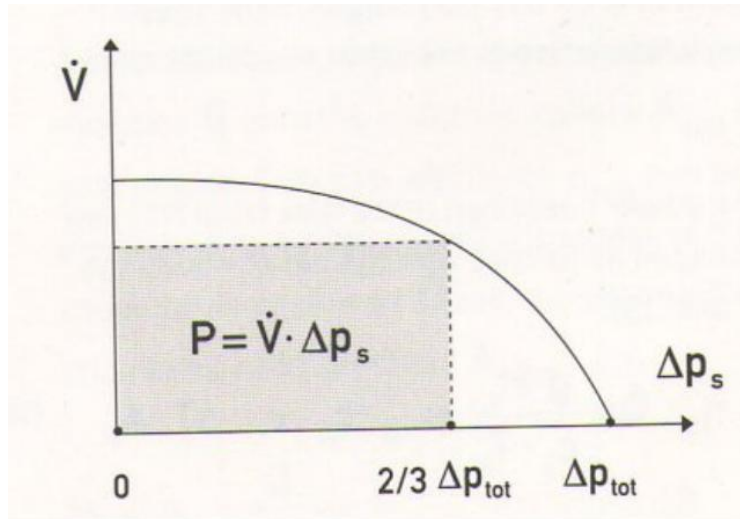
La puissance théorique de la turbine est donnée par la relation :

$$P_{wt} = V_c * A_c * \Delta P_s \quad (3.22)$$

Par analogie avec la puissance électrique, $= I * E$, le débit volumétrique $Q_v = V_c * A_c$, correspond à l'intensité du courant, I , alors que le gradient ΔP_s représente la tension électrique, E . Les termes, ΔP_s et V_c sont couplés par l'équation (3.22). Ainsi :

$$Q_v = \sqrt{\frac{\rho_k}{2} * (\Delta P_{\text{tot}} - \Delta P_s)} \quad (3.23)$$

La figure montre l'évolution du débit, Q_v , avec ΔP_s .

Figure III.3 : Evolution du débit, Q_v , avec ΔP_s .

3.3.2.4.3 Puissance maximale :

La puissance $P = \dot{V} * \Delta P_s$ est égale à l'aire du rectangle représenté dans la Figure III.1. Elle s'annule pour, $\Delta P_s = 0$ (court-circuit en analogie avec la puissance électrique). Pour : $\Delta P_s = \Delta P_{tot}$, pas de charge installée. P_{wt} prend alors un maximum entre ces deux extrêmes :

$$P_{wt} = \Delta P_s * \sqrt{\left(\frac{\rho_k}{2} * (\Delta P_{tot} - \Delta P_s)\right)} \quad (3.23)$$

La dérivation de l'équation (3.23) permet de calculer le point optimum :

$$\Delta P_s = \frac{2}{3} * \Delta P_{tot} \quad (3.24)$$

La puissance maximale est atteinte quand **2/3** de la différence de pression totale est utilisée par la turbine. Ce qui correspond à la condition de **ppm** « point de puissance maximum » pour une centrale hydroélectrique. Néanmoins, le terme, ΔP_s , n'est pas indépendant de, V_c , dans la cheminée solaire, mais couplé comme l'indique l'équation (3.21).

En remplaçant, ΔP_s , par l'optimum trouvé dans l'équation (3.24), on déduit l'expression de la vitesse du fluide pour un point de puissance maximum :

$$V_{c, ppm} = \sqrt{\frac{2}{3} * \frac{\Delta P_{tot}}{\rho_c}} \quad (3.25)$$

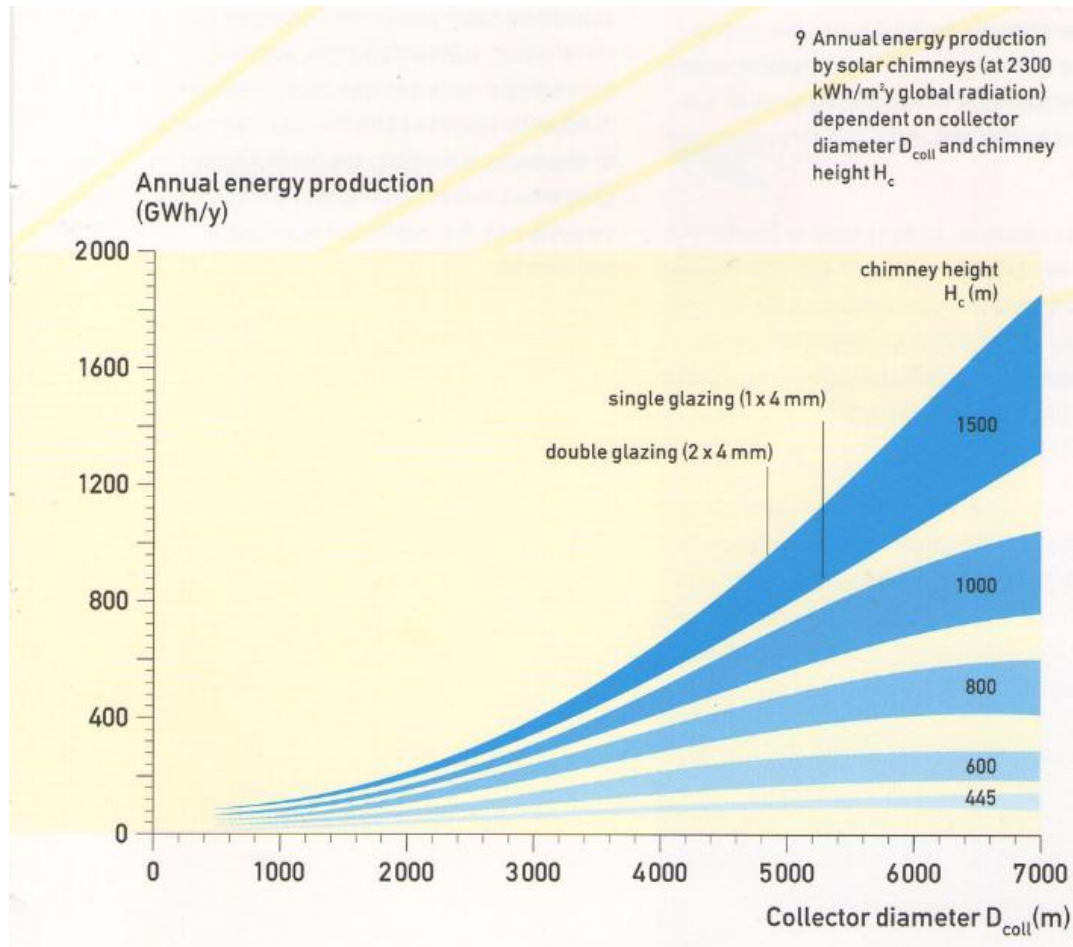


Figure III.4 : Energie électrique produite dans la CCS en fonction du diamètre du collecteur et de la hauteur de la cheminée.

La puissance mécanique prise par la turbine est:

$$\begin{aligned}
 P_{wt, max} &= \frac{2}{3} * \eta_{coll} * \eta_c * A_{coll} * G \\
 &= \frac{2}{3} * \eta_{coll} * \frac{g}{c_p * T_0} * H_c * A_{coll} * G
 \end{aligned} \tag{3.26}$$

- ❖ Ainsi, la puissance électrique produite par la centrale cheminée solaire est proportionnelle au terme : $H_c \cdot A_{coll}$. Le volume est inclu dans la hauteur de la cheminée et la surface du collecteur. La même puissance pourrait être obtenue avec différentes combinaison de la hauteur de la cheminée et du diamètre du collecteur. Il n'y aura pas de dimension optimale comme le montre ci- bien la figure III.4 ci- dessus.

Les dimensions optimales peuvent être déterminées uniquement par l'introduction de chaque composant de la centrale (collecteur, cheminée, composants mécaniques) dans un site particulier.

3.3.2.4.4 Puissance fournie au réseau :

C'est la puissance nette fournie. Elle peut être exprimée comme le produit de la puissance maximale récupérée à l'arbre de la turbine $P_{wt, max}$ multipliée par le rendement η_{wt} qui, englobe le rendement des pales de la transmission et du générateur.

$$P_{\text{électrique}} = \eta_{wt} * P_{wt, max} \quad (3.27)$$

3.3.2.4.5 Conclusion :

Le rendement global de la centrale est défini comme la puissance récupérée à l'arbre de la turbine sur l'énergie solaire reçue par le collecteur i.e. :

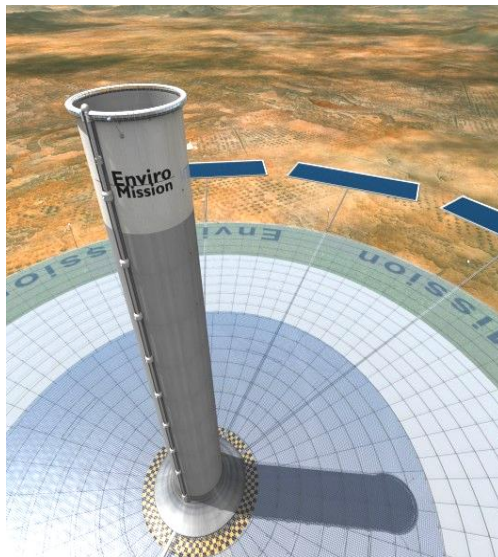
$$\eta = \frac{\text{Puissance à l'arbre de la turbine}}{\text{Energie solaire reçue}} \quad (3.28)$$

Nous pouvons noter que :

- ❖ Le rendement est proportionnel à la hauteur de la tour et à la surface du collecteur, par contre il est inversement proportionnel à la température à l'entrée du collecteur.
- ❖ Les conditions d'entrée du collecteur sont fonctions des conditions climatiques, donc non maîtrisables, ainsi, l'optimisation du rendement thermique idéal de l'installation s'effectue uniquement en agissant sur la hauteur de la tour et la surface du collecteur.

Chapitre IV

DESCRIPTION DES DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX UTILISES



Description des dispositifs expérimentaux utilisés

IV.1. Introduction

Dans le cadre de ce chapitre nous nous sommes intéressés à la détermination des caractéristiques mécaniques et photo-thermiques du matériau constituant le revêtement du collecteur. Le matériau objet de l'étude est le plastique utilisé dans les serres agricoles.

D'un point de vue historique, les plastiques de synthèse sont apparus en 1865 avec le Celluloïd. Leur structure fut précisée vers 1930 et leur véritable développement commença vers 1960. Leur production, depuis 1980, dépasse en volume celle des métaux. Aujourd'hui, les plastiques sont présents dans tous les domaines de l'activité humaine, depuis l'emballage jusqu'à la fusée interplanétaire; aussi pouvons-nous désormais nous considérer comme entrés dans l'«*âge des plastiques*» [31].

Cette primauté des plastiques sur les autres matériaux est due, en dehors de leur faible prix, au fait qu'il n'y a pas une seule forme de plastique mais une multitude, avec pour chacune des propriétés particulières : ils sont rigides ou souples, transparents ou opaques; tous sont isolants électriques, insensibles à l'humidité, légers comparés aux métaux et au verre, inaltérables par les micro-organismes; enfin, ils peuvent être colorés dans la masse. De plus, les procédés de fabrication, qui permettent d'obtenir aisément et sans usinage les formes les plus complexes, sont variés.

Le polyéthylène basse densité (PEBD) est obtenu par polymérisation radicalaire à température et pression élevées, d'où une structure irrégulière, ramifiée. Il est souple, même à très basse température ($-50\text{ }^{\circ}\text{C}$), et présente un toucher doux. Applications des PEBD: sacs mous et non bruyants, films agricoles (serres, abris), bouteilles à lait, isolants de câbles électriques, jouets.

Les polymères se détériorent souvent rapidement dans les applications extérieures. La plus importante cause de dégradation est la radiation solaire, la durée de vie des plastiques varie selon le climat. Plus la température est élevée plus les réactions chimiques sont accélérées, ce qui rend les plastiques vulnérables dans les climats chauds, c'est ce qui arrive au collecteur de la cheminée solaire qui se compose de plastique et qui est exposé à des températures élevées. Ainsi, cette dégradation influe négativement sur le rendement de collecteur ce qui diminue les performances de la centrale cheminée solaire [32].

Plusieurs essais permettent d'étudier cette dégradation, nous nous sommes intéressés à l'essai de traction, de dureté, et de spectroscopie (ultra violet et infrarouge).

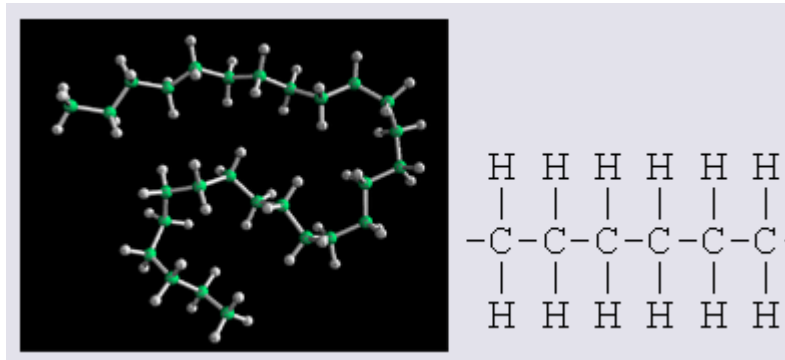


Figure IV.1 : schéma d'une chaîne de polyéthylène

IV.2. Caractérisations Mécaniques

IV.2.1. Essai de traction

L'essai de traction est, depuis bien des années, le procédé expérimental le plus largement utilisé dans l'étude du comportement mécanique. Il permet de mesurer le degré de résistance à la rupture d'un matériau quelconque.

Cet essai ou expérience consiste à placer une petite barre du matériau (L'éprouvette) à étudier entre les mâchoires d'une machine de traction qui tire sur la barre jusqu'à sa rupture. On enregistre l'allongement et la force appliquée, que l'on convertit ensuite en déformation et contrainte, l'essai doit être exécuté à la température ambiante.

L'essai de traction nous permet de déterminer :

- La résistance à la rupture.
- La limite élastique, Module de Young, Coefficient de Poisson.
- L'allongement à la rupture.

L'essai de traction est considéré comme le plus important des essais, puisqu'il permet de donner des valeurs exactes qui sont utilisables comme base de calcul.

IV.2.1.1 Le déroulement de l'essai de traction

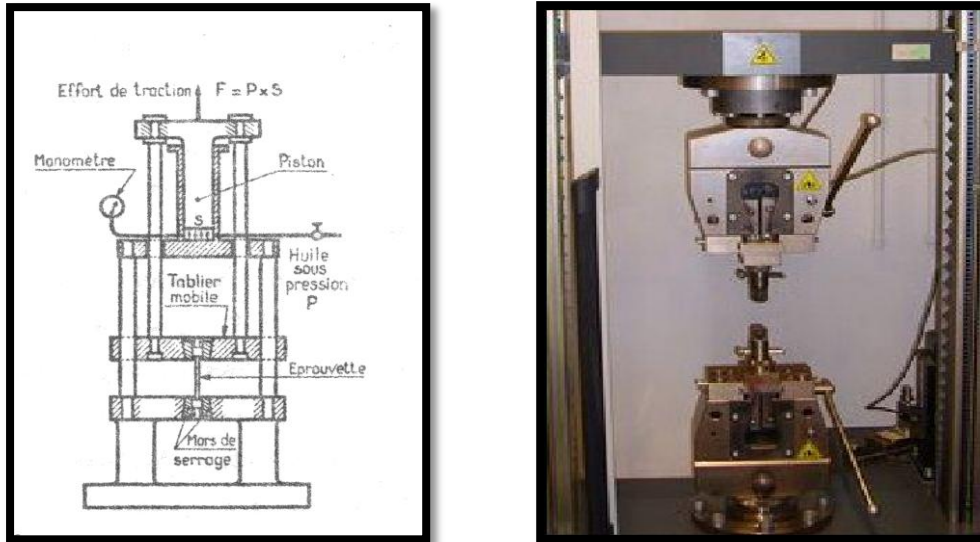


Figure IV.2 : Schéma et photo d'une machine à traction.

L'essai est pratiqué sur machine de traction. Une fois l'éprouvette en place, on applique une légère pré-charge afin d'être sûr que l'on n'a pas de jeu. Puis, on effectue un déplacement de la travée qui a pour effet d'étirer l'éprouvette, et on mesure l'effort généré par ce déplacement ; le mouvement peut se faire par un système de vis sans fin ou un piston hydraulique, l'effort se mesure par la déformation élastique de la travée ou, plus communément, par un capteur de force inséré dans la ligne de charge. L'essai s'arrête à la rupture de l'éprouvette. La figure IV.2 montre le schéma et une photo d'une machine à traction.

L'éprouvette au repos présente une longueur initiale L_0 et une largeur initiale l_0 . Lorsque les efforts sont appliqués axialement, une déformation est constatée suivant la longueur L , tandis que sa largeur, l , diminue.

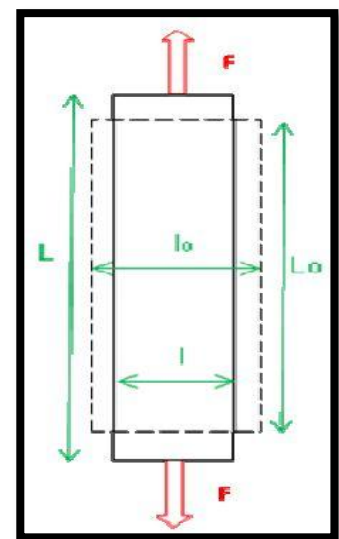


Figure IV.3 :
Allongement en traction

IV.2.1.2 Condition d'exécution de l'essai

IV.2.1.2.1 Mise en place de l'éprouvette

Les têtes de l'éprouvette doivent être serrées dans les mâchoires de la machine d'essai, de telle manière que la charge soit appliquée suivant l'axe de l'éprouvette et que la sollicitation soit répartie uniformément sur toute la largeur des extrémités.

IV.2.1.2.2 Vitesse de la machine

Pour tous les métaux, le comportement au cours d'un essai de traction dépend de la vitesse d'application de la charge [33].

Par traction rapide nous obtenons des résistances apparentes plus élevées et des allongements plus faibles que par traction en quasi statique [33].

IV.2.1.2.3 Charge

La charge doit être mesurée sans interpolation entre les divisions de la graduation avec une précision compatible avec la norme de produit [33].

IV.2.1.2.4 Appareils d'attache

La machine et les appareils d'attache comportent des dispositifs permettant à l'éprouvette de s'orienter librement dans la direction de la traction sans qu'il puisse se produire d'effort de flexion [33].

IV.2.1.3 Les éprouvettes :

On peut effectuer les essais sur un barreau cylindrique ou de section rectangulaire (éprouvette plate). L'éprouvette cylindrique permet d'avoir un système symétrique et un système d'accrochage simple (par vissage), l'éprouvette plate permet de voir ce qui se passe sur une face : apparition de lignes de glissement, forme des cristallites (métallographie), etc.

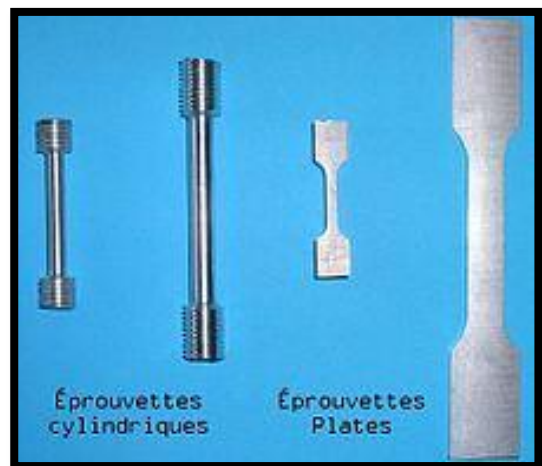


Figure IV.4 : exemples d'éprouvettes

Les extrémités de l'éprouvette sont élargies, avec un congé, afin d'être sûr que la déformation plastique et la rupture auront lieu dans la partie centrale de l'éprouvette : les phénomènes de contact au niveau de la liaison à la machine sont complexes et ne représentent pas ce que l'on veut tester, on limite donc l'impact de l'essai sur ces zones. Les dimensions de l'éprouvette sont normalisées, ce qui n'interdit pas d'utiliser d'autres formes d'éprouvette si l'essai n'a pas besoin de répondre aux normes (par exemple dans le cadre de la recherche et du développement).

Les éprouvettes sont fréquemment prélevées dans une pièce réelle ou un brut (lingot, tôle, profilé, ...). Dans ce cas, l'endroit où l'éprouvette est prélevée, et la direction de prélèvement ont une importance : la matière est souvent hétérogène et anisotrope. Cela pose le problème de la représentativité de l'essai (échantillonnage).

IV.2.1.4 La courbe de traction

Dans un premier temps, la déformation est élastique. La courbe de traction est donc une droite, la pente de cette droite donne le module de Young E .

À partir d'un certain allongement, la courbe s'infléchit : c'est le début de la déformation plastique. La transition peut être franche (rupture de pente), ce qui permet de déterminer facilement la limite d'élasticité R_e . On a dans ce cas là en général un plateau avec une contrainte inférieure à la contrainte maximale dans le domaine élastique. On définit alors une limite d'élasticité haute, R_{eH} , qui est le maximum de la partie élastique, et une limite d'élasticité basse R_{eL} correspondant au plateau.

Lorsque la rupture n'est pas franche « c'est notamment le cas des matériaux très ductiles », on définit la limite d'élasticité conventionnelle comme étant la contrainte donnant 0,2 % de

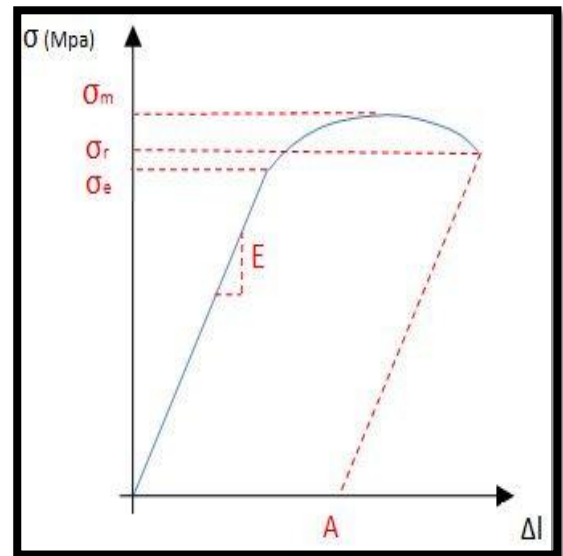


Figure IV.5.A : La courbe de traction

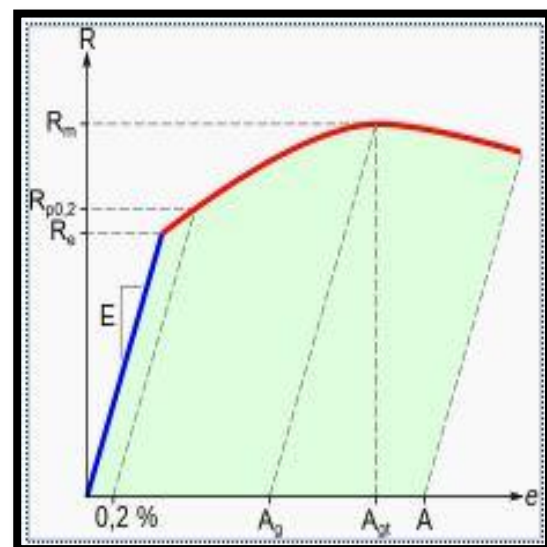


Figure IV.5.B : La courbe de traction

déformation résiduelle, $R_e 0,2$; on peut aussi la définir pour d'autres valeurs de déformation résiduelle (par exemple $R_p 0,1$ pour 0,1 % de déformation).

La courbe de traction présente ensuite un maximum qui détermine la résistance à la traction conventionnelle R_m . L'allongement plastique à ce point est appelé allongement sous charge maximale et est noté A_g ; c'est la déformation résiduelle maximale que l'on peut imposer. On définit également l'allongement total sous charge maximale, A_{gt} , qui inclut la déformation élastique. Le paramètre A_g renseigne sur la déformation maximale que l'on peut atteindre pour de la mise en forme, et A_{gt} permet de régler l'appareil de mise en forme (puisque c'est une déformation totale que l'on impose)

❖ Comportement nominal

Les essais de traction permettent d'expliquer une partie des comportements mécaniques des matériaux. On distingue souvent deux groupes : ceux qui sont dits fragiles et ceux qui sont dits ductiles. On appelle fragile un matériau qui atteint la rupture avant même d'entrer dans le domaine plastique. On appelle ductile un matériau qui présente un domaine élastique et un domaine plastique.

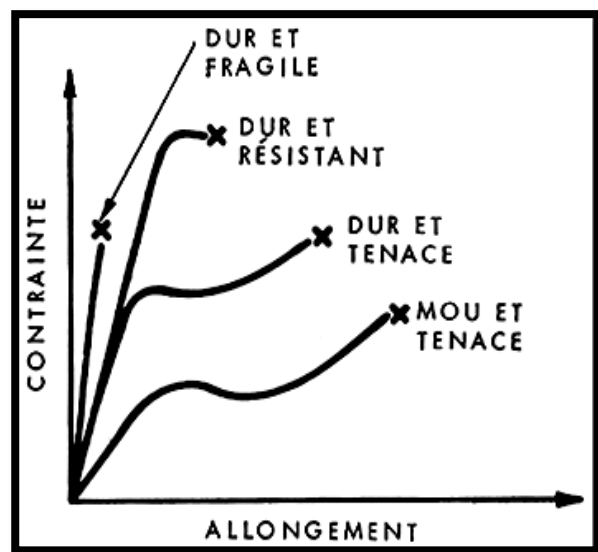


Figure IV.5.C : La courbe de traction

IV.2.1.5 Calcul des caractéristiques mécaniques

IV.2.1.5.1 Limite élastique R_e :

C'est l'effort de la limite élastique F_e divisé par la section initial S_0 de l'éprouvette

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}$$

IV.2.1.5.2 Résistance à la rupture

C'est le quotient de l'effort de rupture F_r divisé par la section initiale S_0 de l'éprouvette.

$$R_r = \frac{F_r}{S_0}$$

IV.2.1.5.3 Allongement à la rupture $A\%$

L'allongement maximum de rupture L_r est égal à la différence des longueurs de l'éprouvette après rupture L_u et avant l'essai L_0 .

$$L_r = L_u - L_0$$

D'où :

$$A\% = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100$$

IV.2.1.5.4 Module d'élasticité ou module de Young

L'allongement relatif élastique, c'est le quotient de l'allongement de la limite élastique **a** par la longueur initial de l'éprouvette

$$\varepsilon = \frac{a}{L_0}$$

Le module d'Young est la contrainte mécanique qui engendrerait un allongement de 100 % de la longueur initiale d'un matériau, si on pouvait l'appliquer réellement : dans les faits, le matériau se déforme de façon permanente, ou se rompt, bien avant que cette valeur soit atteinte.

Le module de Young E est donné par la relation suivante :

$$E = \frac{R_e}{\varepsilon}$$

D'ou

$$E = \frac{F_e \cdot L_0}{S_0 \cdot a}$$

IV.2.1.5.5 La striction

La striction est la réduction localisée des dimensions transversales de l'éprouvette se produisant au cours de l'essai sous l'influence de la charge.

Le coefficient de striction **Z** est le rapport de la variation ultime de section transversale produite par l'essai **S₀-S_u** à la section initiale **S₀**.

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0}$$

L'allongement de striction **Z_u** est le rapport de variation ultime de section transversal produite par l'essai **S₀-S_u** à la section après rupture **S_u**.

$$Z_u = \frac{S_0 - S_u}{S_u}$$

S_0 est la section initiale de l'éprouvette avant déformation.

S_u est la section de l'éprouvette après la rupture.

IV.2.1.6 Les Machines d'essais

Une machine d'essai est composée d'un bâti, d'un dispositif de mise en marche et un dispositif de mesure des efforts et des allongements.

La commande des efforts peut être mécanique, ou hydraulique elle peut être fait manuellement ou par un moteur.

Lorsqu'on utilise une commande hydraulique, la mise en marche croit régulièrement avec le temps, tandis qu'avec une commande mécanique c'est l'allongement qui augmente régulièrement, ce qui entraîne au début un accroissement très rapide de la charge.

Lorsque nous voulons obtenir une vitesse d'allongement absolument constante, il y a lieu de choisir une machine à commande et mise en charge mécanique, pour obtenir un allongement régulier.

IV.2.1.6.1 Machines hydrauliques

L'effort peut être exercé par un vérin hydraulique ou par un moteur électrique agissant sur une vis attaquant une traverse mobile.

Les machines les plus anciennes étaient généralement hydrauliques l'admission de l'huile dans le vérin se faisait à travers un robinet à pointeau. L'opérateur a aussi la possibilité de régler manuellement le débit et de contrôler approximativement la vitesse de déplacement de la traverse.

Dans ces machines, la pression d'huile est mesurée à l'aide d'un dynamomètre à pendule. Le déplacement de ce pendule est transmis par une crémaillère à l'aiguille du cadran de mesure des charges, et par ailleurs cette crémaillère est prolongée par une tige qui porte un stylet enregistreur.

Le déplacement de la traverse commande simplement la rotation de l'enregistreur à l'aide d'un fil tendu par un contre poids.

Ces machines ont le mérite de la simplicité et de la robustesse et elles rendent encore de très grands services dans de nombreux laboratoires. Leur inconvénient principal est le manque de stabilité et de contrôle de la vitesse de déplacement de la traverse, or dans de nombreux essais, il est important d'évaluer correctement l'influence de ce paramètre sur les propriétés mécaniques.

IV.2.1.6.2 Machines à vis

On utilise maintenant de plus en plus des machines à vis mues par moteur électrique. Un système de boîte à vitesse permet de choisir la vitesse de déplacement de la traverse dans une gamme élevée et de charger instantanément.

La mesure de la charge se fait à l'aide de cellules placées généralement à la partie supérieure du bâti. Il s'agit d'anneaux ou de cylindres dynamométriques équipés de jauges de contraintes ou de capteur de déplacement à induction, le signal est envoyé à un enregistreur potentiométrique, la charge commande le déplacement du stylet

Le déplacement du papier est lié à celui de la traverse. Les systèmes d'amplification procurent une grande souplesse d'enregistrement, On peut aisément choisir les échelles les mieux appropriées, décaler l'origine pour réaliser la fenêtre la meilleure pour la mesure visée.

Il est généralement possible de commander le déplacement du papier de l'enregistrement par un potentiomètre commandé par un extensomètre placé sur l'éprouvette, il est alors possible de piloter la vitesse de déformation de l'éprouvette, en court-circuitant la déformation parasite de la traverse.

❖ *Description de la machine d'essai utilisée :*

La machine utilisée est celle de laboratoire de l'entreprise CATEL de OUED SAMMAR, elle est composée d'un bâti de charge, afficheur de position et afficheur de la traverse, d'un dispositif électronique de pilotage, un dispositif électronique pour la mesure de force, dont la commande peut être faite manuellement ou par un moteur électrique.

Le bâti de charge de la machine d'essais forme avec le boîtier de l'électronique de mesure et de contrôle l'élément de base des différents essais de matériaux.

Le bâti de charge se compose d'un profilé en aluminium, d'une traverse et d'un système de chariot mobile. La traverse se déplace selon un guidage sans jeu. C'est une transmission de vis à bille qui assure le déplacement. L'entraînement mécanique est placé dans le socle.

Le col de cygne et la traverse disposent d'un système de fixation central (M28x1, 5). Ce système sert au raccordement des différents boulons et capteurs de force.

Pour les amarrages courts, le col de cygne est tourné vers le bas; Pour les amarrages plus encombrants, l'utilisateur pourra facilement retourner le col de cygne vers le haut.

Quatre pieds de réglage directement intégrés au socle permettent de compenser les irrégularités du sol.



Figure IV.6 : la machine de traction utilisée

Les caractéristiques de la machine :

Constructeur	Zwick GmbH & Co
Type / N° de référence	BTC-FR2-5TN-D09
Capacité en traction	2.5 kN
Hauteur totale	1285 mm
Largeur totale	400 mm
Profondeur totale	490 mm
Vitesse de la traverse	0.001 a 800 mm / min
Poids	66 kg
Hauteur de l'espace de travail	1170mm

IV.2.1.7 les éprouvettes pour le film de polymère

L'ISO 527 représente la norme qui prescrit des conditions pour la détermination des propriétés en traction des films ou feuilles de moins de 1 mm d'épaisseur, basée sur les principes généraux établis dans l'ISO 527-1.

❖ *Formes et dimensions des éprouvettes*

La norme recommandée pour la détermination des propriétés en traction par cette méthode est une bande de 10 mm à 25 mm de largeur et d'au moins 150 mm de longueur, avec deux repères parallèles, à 50 mm l'un de l'autre, dans la partie centrale de l'éprouvette.

Le matériau de certains types de films a un très grand allongement à la rupture qui peut dépasser la capacité d'étirage du dynamomètre. Dans ce cas, la réduction de la distance initiale entre mâchoires à 50 mm est autorisée.

❖ *Préparation des éprouvettes*

Les éprouvettes de ce type doivent être découpées ou estampées de sorte que les bords soient lisses et sans entailles, un examen avec une loupe de faible grossissement est recommandé pour vérifier l'absence d'entailles. Des lames de rasoir, des coupe-papier, des scalpels ou tout autre dispositif capable de découper les éprouvettes à la largeur convenable et de fournir des bords droits, propres, parallèles, sans imperfections visibles doivent être utilisés. Les filets de découpe doivent être régulièrement affûtés et une contrepartie adaptée doit être utilisée pour assurer une coupe nette des bords.

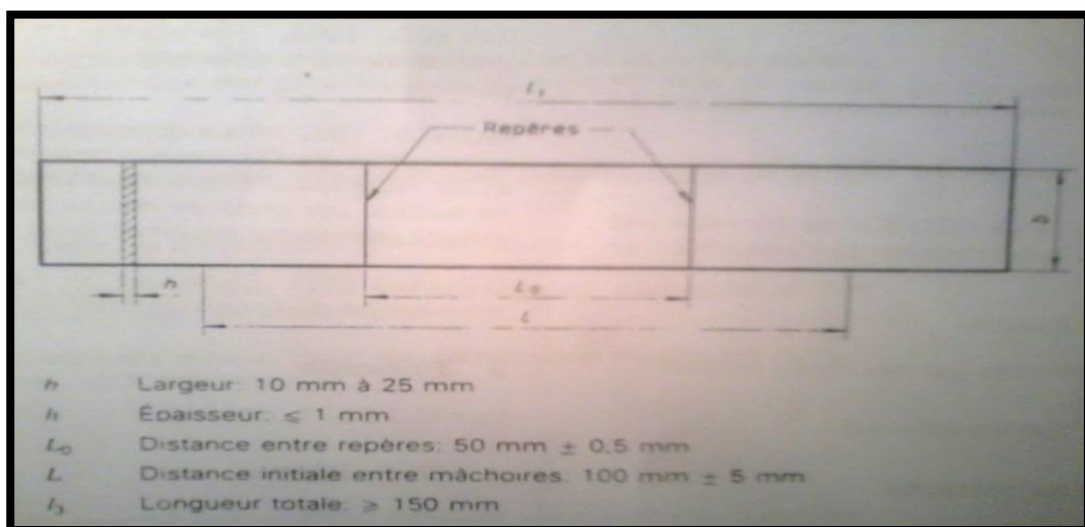


Figure IV.7 : les dimensions de l'éprouvette de forme de bande

IV.2.1.8. Les échantillons pour les essais de traction

Pour l'essai de traction on dispose de trois échantillons fournis par l'INRAA « l'institut nationale de recherche Agronomique d'Algérie » :

- * Un échantillon polyéthylène neuf.
- * Un échantillon polyéthylène déjà exposé au rayonnement solaire pendant une durée de 3ans.
- * Un échantillon polyéthylène ordinaire (sans stabilisants anti UV) exposé pendant une durée d'une année au rayonnement solaire.

IV.2.1.9 Protocole de vieillissement artificiel:

Pour étudier le comportement d'un produit sur une longue durée de vie (des années ou des dizaines d'années), il n'est pas pratique de faire un essai complet, alors il peut être opté pour un essai accéléré. Ceci est réalisé dans un laboratoire en exposant le produit à une température et un rayonnement UV donnés. De même, dans le laboratoire, les conditions peuvent être contrôlées ce qui permet d'identifier les différentes sources de dégradation présentes dans l'environnement.

Pour notre cas on va essayer de simuler les conditions climatiques du Sahara pendant un certains temps en procédant à un vieillissement accéléré du plastique, en chauffant à l'aide d'un séchoir l'échantillon neuf jusqu'à 50°C et le refroidir à 5°C plusieurs reprises dans la journée ce qui permet d'obtenir 2 autre échantillons à étudier :

- * Un échantillon soumis à une dégradation artificielle (1 jour).
- * Un échantillon ordinaire soumis à une dégradation artificielle (3 jours).

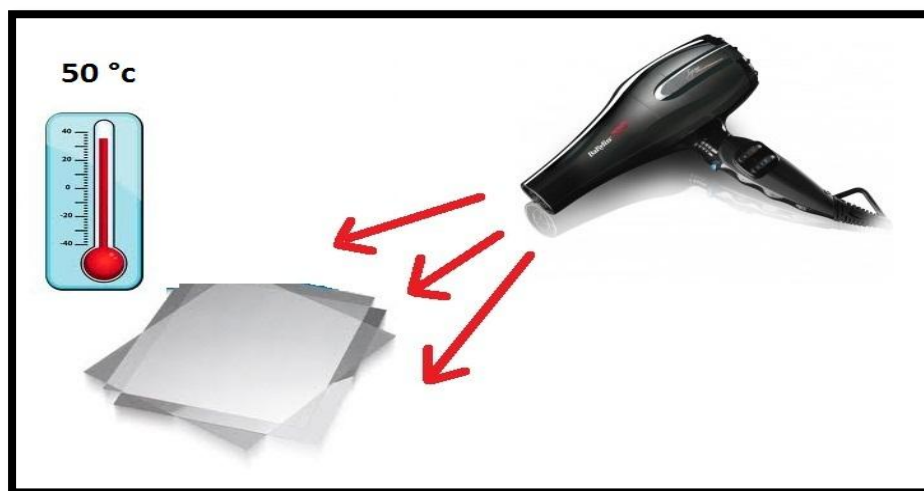


Figure IV.8 : schéma de l'opération de chauffage de film de polymère

Note :

- le comportement en traction des polymères varie suivant que l'éprouvette est coupée parallèlement aux lignes des fibres (coupe A) ou perpendiculairement à celles-ci (coupe B), c'est pour cela qu'on a ajouté 1 autre échantillon coupés différemment pour voir la déférence.
- Les échantillons de la première séries sont de type coupe A.

IV.2.1.9 But des essais de traction :

Pour les essais de traction d'une part on doit comparer entre les 2 échantillons de polymère (le neuf et celui exposer pendant 3 ans pour voir son comportement durant l'exposition au rayonnement solaire. D'autre part en faisant subir aux échantillons un vieillissement accéléré en les chauffants et en les refroidissants a plusieurs reprise, on veut voire le comportement du polyéthylène dans ces conditions.

IV.2.2 Essai de dureté

L'essai de dureté sert à caractériser la résistance à la déformation plastique d'un matériau non fragile à l'aide d'un essai simple et rapide. La dureté est définie comme la résistance opposée par l'éprouvette à la pénétration d'un corps plus dur.

Comme la géométrie de l'écoulement plastique lors d'un essai de dureté est complexe, l'essai de dureté n'est pas considéré comme une analyse du comportement mécanique d'un matériau au même titre que l'essai de traction. L'essai de dureté ne fournit qu'une seule valeur. En revanche, l'essai est très simple à réaliser, n'utilise pas de machine coûteuse et n'exige pas l'usinage d'une éprouvette, puisqu'une surface plane de quelques mm^2 suffit. En résumé, c'est un essai bon marché et souvent employé pour des essais comparatifs de séries d'éprouvettes et pour examiner les effets des divers traitements thermiques, thermomécaniques ou thermochimiques.

IV.2.2.1 Types d'essais

Il existe une grande variété d'essais de dureté possibles, ils sont très utilisés en contrôle qualité pour comparer ou estimer la résistance ou la rigidité des matériaux.

IV.2.2.2 Dureté Brinell :

Elle a été proposée en 1900 par l'ingénieur suédois Johan August Brinell (1849-1925), travaillant sur la transformation de l'acier selon la température. La norme Brinell a été éditée dès 1924.

La méthode consiste à appliquer sur la surface du matériau dont on veut mesurer la dureté d'une bille en matériau dur d'un certain diamètre D avec force m donnée mesurée en kilogramme-force pendant une durée t . Après retrait, on mesure la taille de l'empreinte laissée, une calotte sphérique de diamètre d [34].

La dureté Brinell ou nombre de Brinell est notée HB.

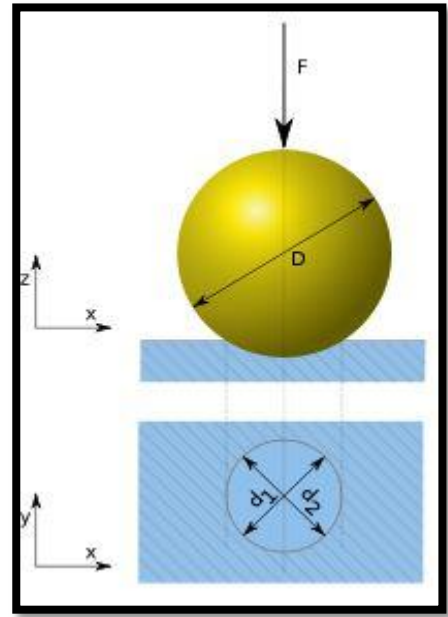


Figure IV.9 : principe de dureté Brinell

IV.2.2.2 Dureté Rockwell :

Les essais de dureté Rockwell sont des essais de pénétration. Il existe en fait plusieurs types de pénétrateurs qui sont constitués d'un cône en diamant ou d'une bille en acier trempé polie. Pour obtenir une valeur de dureté Rockwell, on mesure une pénétration rémanente du pénétrateur sur lequel on applique une faible charge [35].

L'essai se déroule en trois phases :

- application sur le pénétrateur d'une charge initiale $F_0 = 98 \text{ N}$ (soit 10 kgf). Le pénétrateur s'enfonce d'une profondeur initiale I . Cette profondeur étant l'origine qui sera utilisée pour mesurer la dureté Rockwell
- application d'une force supplémentaire F_1 . Le pénétrateur s'enfonce d'une profondeur de P .
- relâchement de la force F_1 et lecture de l'indicateur d'enfoncement.

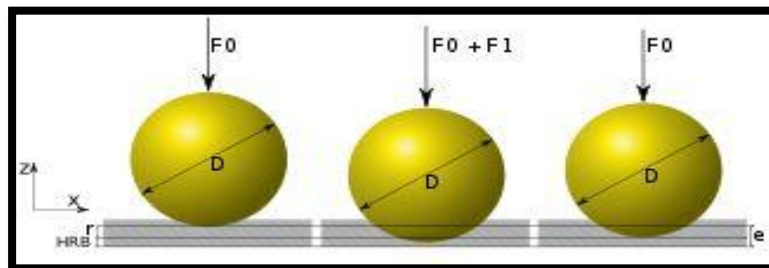


Figure IV.10 : principe de dureté Rockwell

IV.2.2.3 Dureté Shore :

L'échelle de dureté Shore mesure la dureté des élastomères, de certaines matières **plastiques**, des cuirs et des bois.

Cette échelle a été développée dans un but de réaliser des mesures hors laboratoire avec un duromètre Shore portable (par exemple pour mesurer la dureté des pneus de véhicules).

La mesure est basée sur la déformation d'un ressort en fonction d'un déplacement connu. La qualité du ressort détermine donc la qualité de l'appareil [32].

Il existe en fait douze échelles de mesure Shore. Les plus courantes sont les échelles A et D, reconnues notamment par les normes ISO 868 et 7619, ASTM D 2240 et DIN 53505 :

- Shore A (pour les matériaux mous).
- Shore D (pour les matériaux durs).

La géométrie du pénétrateur différencie ces deux échelles.

Les dimensions des éprouvettes à analyser doivent être telles qu'elles permettent d'effectuer des mesurages à au moins 12 mm de chaque bord. La surface de l'éprouvette doit être plane sur une surface suffisante pour permettre au pied presseur de prendre appui sur l'éprouvette.

Dans notre travail, on va mesurer la dureté de 4 échantillons :

- * échantillon neuf.
- * échantillon soumis à une dégradation artificielle (1 jour).
- * échantillon soumis à une dégradation artificielle (3 jours).
- * échantillon soumis à une dégradation naturelle (3 ans).

IV.2.2.4 L'appareil de mesure :

Les appareils de dureté servent à déterminer la dureté selon Shore des élastomères et des matières plastiques.

Les appareils d'essai de dureté sont des appareils d'essai manuels et correspondent aux conditions prévues par les normes DIN 53505, ISO/R 868 et ASTM D 2240. Sur les appareils d'essai de dureté Shore A, l'élément de pénétration a la forme d'un cône tronqué, et sur les appareils d'essai de dureté Shore D il a la forme d'un cône dont la pointe est légèrement arrondie. Ils se distinguent en outre par les caractéristiques de leur ressort.

L'appareil utilisé dans nos essais est celle de laboratoire de l'entreprise CATEL.



Figure IV.11 : le duromètre Shore type D

L'élément de pénétration, qui dépasse, au repos, de 2,50 mm par rapport à la surface d'appui de l'appareil d'essai, est relié à l'arrière à un ressort de mesure par l'intermédiaire d'une tige montée sur le roulement à billes. Lorsqu'on place l'appareil d'essai sur l'éprouvette, l'élément de pénétration est repoussé jusqu'au point où la force de résistance de l'éprouvette est égale à la force du ressort qui lui est opposée. La course parcourue en arrière par élément de pénétration est alors proportionnelle à la dureté Shore et est transmise, par l'intermédiaire d'un compteur muni d'une aiguille, à une échelle circulaire comprenant cent divisions et qui indique directement la dureté Shore.

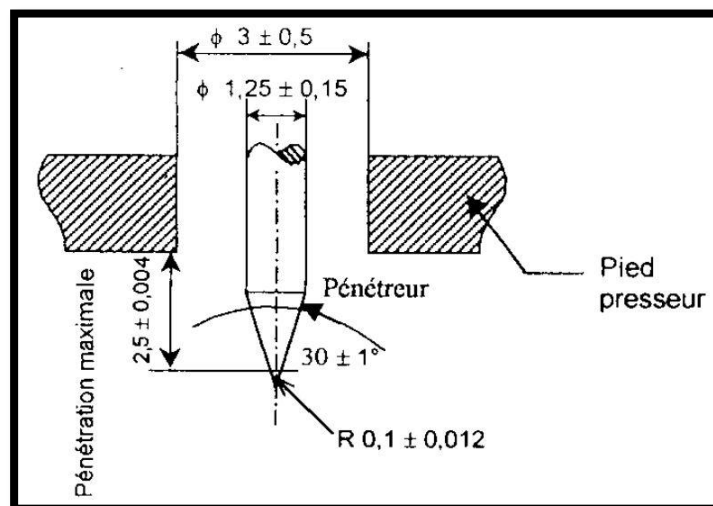


Figure IV.12 : pénétrateur pour le duromètre Shore D

Lors de l'essai, on pousse sans à-coups l'appareil d'essai de dureté contre l'éprouvette en appliquant la force de pression recommandée jusqu'à ce que la surface d'appui de l'appareil repose bien à plat.

Il faut alors lire la dureté trois secondes après que la surface d'appui soit entrée en contact avec l'éprouvette. Pour les matériaux présentant nettement des propriétés de fluage, la dureté peut également être lue après une durée de pression plus longue.

IV.3 Caractérisations photo- thermiques

IV.3.1 Essai optique

Un faisceau lumineux est un déplacement de petits corps porteurs d'énergie, ou photon, comme la décrit Einstein en 1905, pour expliquer l'effet photoélectrique.

Depuis l'équivalence onde-corpuscule mise en évidence par Louis de Broglie en 1924, la lumière est décrite également comme une onde électromagnétique, comme les rayons X ou les ondes radiofréquences. Tout est une question de longueur d'onde, ou de fréquences, pour ces oscillations qui traversent l'espace et parfois la matière. Chaque photon porte une quantité d'énergie directement liée à sa la longueur d'onde.

La longueur d'onde d'un faisceau lumineux caractérise sa couleur, telle que la perçoit notre œil. Bien sur, tous les rayonnements ne sont pas perceptibles par l'œil, mais ils ont aussi leur longueur d'onde, qui dépend de leur fréquence : fréquence radio, micro-ondes...

La réponse d'un polymère soumis à une radiation lumineuse, constitue ses propriétés optiques.

IV.3.2 Ondes lumineuses :

Les radiations lumineuses sont des ondes électromagnétiques. En simplifiant, celles-ci sont dues à la propagation d'un champ électrique \vec{E} sinusoïdal et d'un champ magnétique \vec{H} sinusoïdal, orthogonaux entre eux, et perpendiculaires à leur direction de déplacement dans l'espace. Ces ondes sont dites transversales puisque les champs sont orthogonaux à la direction de propagation [36].

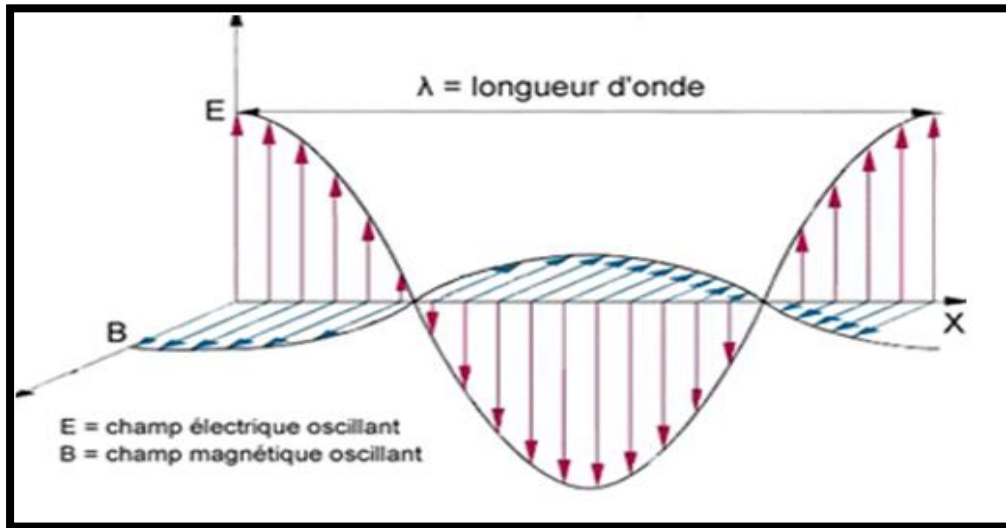


Figure IV.13 : 1 Onde électromagnétique

En un point donné de l'espace soumis à une onde électromagnétique, les champs \vec{E} et \vec{H} varient sinusoïdalement dans le temps suivant l'expression classique :

$$\vec{E} = \vec{E} \sin \omega t \text{ Avec } \omega = 2\pi\nu .$$

Les grandeurs ν et ω sont respectivement la fréquence et la pulsation.

Par la suite, seul le champ électrique sera pris en considération, car les forces s'exerçant sur les électrons par le champ \vec{E} sont beaucoup plus importantes que celles provenant de \vec{H} .

Ces ondes se propagent à la vitesse de la lumière c dans le vide, et v dans un milieu comme les polymères par exemple. On a toujours $c > v$ et c vaut 3.10^8 ms^{-1} .

Une onde lumineuse (caractère ondulatoire) transporte de l'énergie par l'intermédiaire de particules, les photons (caractère particulaire) dont l'énergie \vec{E} est reliée à la fréquence ν et à la longueur d'onde λ par les relations :

$$E = h \nu = h c / \lambda$$

La constante de Planck nommée h vaut $8,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ ou $6,63 \cdot 10^{-34} / 1,6 \cdot 10^{-19}$ soit $4,14 \cdot 10^{-15} \text{ e.V.s.}$ (électron. Volt. Seconde). On retiendra que dans le vide pour $\lambda=1 \text{ m}$, la fréquence $\nu = 3.10^8 \text{ Hz}$ et l'énergie des photons $E=1,24 \cdot 10^{-6} \text{ e.v.}$

La figure IV.14 rassemble les divers types d'ondes électromagnétiques. L'ensemble de différentes longueurs d'ondes λ forment un spectre. Par exemple, le spectre solaire s'étend d'environ de 3.10^{-7} à 3.10^{-6} m ($0,3 \mu\text{m}$ à $3 \mu\text{m}$). Le spectre visible est très étroit ; il se situe entre 4.10^{-7} à 7.10^{-7} m ($0,4$ à $0,7 \mu\text{m}$).

Les radiations infra rouge ($\lambda > 0.7 \mu\text{m}$) ont une énergie qui correspond à l'énergie de vibration des liaisons atomiques covalentes, c'est donc dans ce domaine que le rayonnement infrarouge est absorbé par résonance avec ces vibrations. Cette énergie est insuffisante pour casser une liaison covalente ; par contre les UV sont plus énergétiques et peuvent rompre ce type de liaison (énergie des électrons de valence) [36].

Le rayonnement du soleil parvenant à la surface de la terre se compose de : l'infrarouge qui procure de la chaleur, le visible nécessaire à la croissance des plantes et des animaux (dont nous faisons partie), et l'ultraviolet brunit la peau et tue les bactéries. Le spectre du soleil s'étend de 200 nm à $3 \mu\text{m}$ ($= 3000 \text{ nm}$) [37].

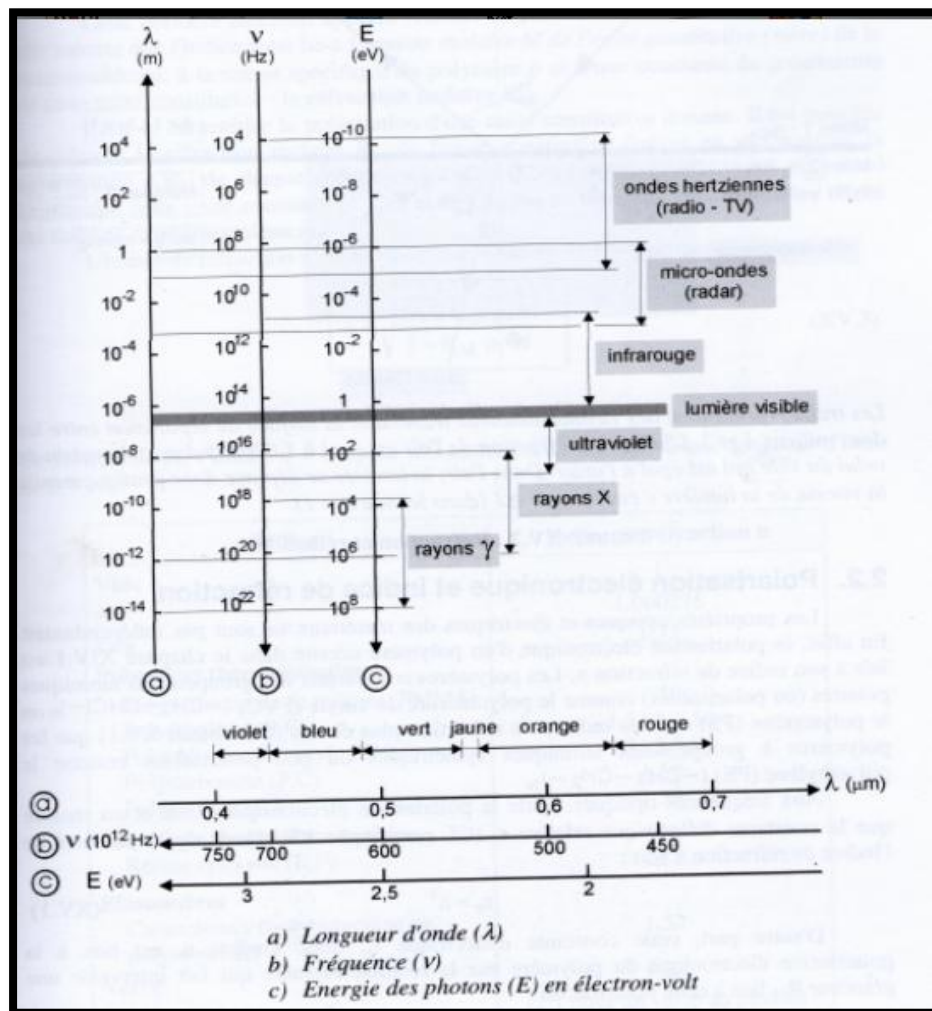


Figure IV.14 : les divers types d'ondes électromagnétiques

IV.3.3 La spectrophotométrie :

La spectrophotométrie est une méthode analytique « quantitative et qualitative » qui consiste à mesurer l'absorbance ou la densité optique des substances chimiques organiques et inorganiques à l'état gazeux, liquide ou solide, ce qui explique sa grande diffusion. Plus l'échantillon est concentré, plus il absorbe la lumière dans les limites de proportionnalité énoncées par la loi de Beer-Lambert.

L'absorption de la lumière par les groupements d'atomes se produit dans des régions plus ou moins étendues du domaine spectral ultraviolet-visible-infrarouge. Souvent ces "zones" d'absorption sont caractéristiques d'un groupement d'atomes particulier, ce qui permet de reconnaître ce groupement particulier (analyse qualitative) [38].

La densité optique des échantillons est déterminée par un spectrophotomètre préalablement étalonné sur la longueur d'onde d'absorption de la substance à étudier.

Les applications courantes de la spectrophotométrie d'absorption se classent en deux grands groupes : les caractérisations des structures moléculaires et les analyses quantitatives de substances connues, pures et en mélange.

Le premier type particulièrement développé dans le domaine de l'infrarouge parce que les spectres sont riches en bandes de position et d'intensité variées, caractéristiques à la fois de la substance en elle-même et des fonctions chimiques qui la composent.

La spectrophotométrie ultraviolet –visible, produisant des spectres beaucoup moins riches en bandes et moins caractéristiques, est surtout utilisée pour les analyses quantitatives de substances ou de mélanges de substances connues [39].



Figure IV.15 : spectrophotomètre Elmer modèle "Lambda 950"

IV.3.3.1 La spectrophotométrie UV-Visible :

Le domaine du spectre ultraviolet utilisable en analyse s'étend environ de 200 à 400 nm (proche UV) alors que le domaine du spectre visible s'étend environ de 400 à 800 nm.

L'importance dans la spectroscopie UV est que plusieurs matériaux absorbent les radiations dans la région de l'UV autant que dans la région du visible, ce qui permet au spectrophotomètre de mesurer les concentrations locales des espèces contenues dans l'échantillon. La majorité des polymères sont transparents dans l'UV ce qui permet d'observer les espèces minimes comme les impuretés et les additifs [32].

L'analyse spectrophotométrique est fondée sur l'étude du changement d'absorption de la lumière par un milieu en fonction de la variation de la concentration d'un constituant. On détermine la concentration d'une substance en mesurant l'absorption relative de la lumière par rapport à celle d'une substance de concentration connue. Un schéma descriptif d'un spectrophotomètre UV est représenté dans la figure IV.16:

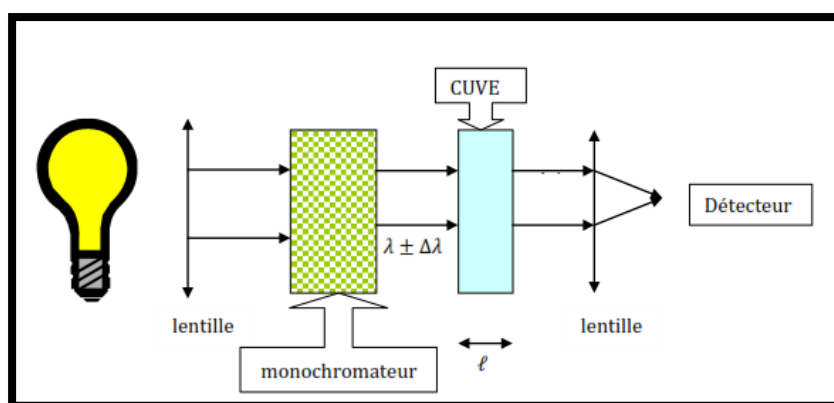


Figure IV.16 : Schéma simplifié d'un spectrophotomètre

IV.3.3.2 La spectrophotométrie infrarouge :

La spectrophotométrie infrarouge est une technique d'analyse utile pour la détermination, l'identification ou la confirmation de structure de produits connus ou non. Un spectre infrarouge permet en effet de mettre facilement en évidence la présence de certains groupements fonctionnels, et peut servir de "carte d'identité spectroscopique" pour une molécule ou un matériau.

La spectrophotométrie d'absorption dans le domaine infrarouge "moyen" est une technique utilisée depuis longtemps dans les laboratoires d'analyse et de contrôle. Elle s'applique à des groupements d'atome (molécules, ions, polymères ...) qui absorbent le rayonnement électromagnétique dans ce domaine [38].

Les radiations infrarouges se situent dans la partie du spectre électromagnétique comprise entre la région visible et celle des micro-ondes. La région limitée entre 4000 et 400 cm^{-1} est la plus utile du point de vue pratique. Il s'agit de l'infrarouge moyen correspondant à des énergies de transition entre niveaux vibrationnels.

L'analyse infrarouge permet l'identification des composés organiques, l'analyse fonctionnelle (groupements fonctionnels) et l'analyse quantitative (loi de Beer Lambert). Elle permet aussi l'identification des groupements chimiques trouvés dans un polymère ou ceux induits par la dégradation, en plus de détecter les changements structuraux, la transformation chimique et la dégradation des polymères ainsi que l'étude des propriétés de surface [32].

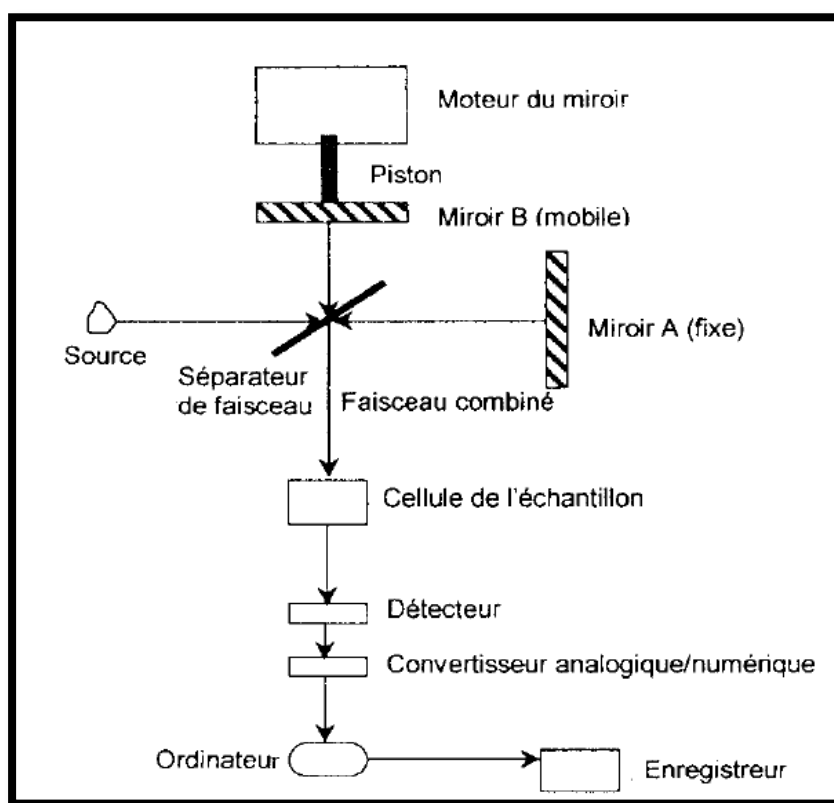


Figure IV.17 : Schéma d'un spectrophotomètre IRTF

IV.3.3.4 Le phénomène de L'absorption :

La spectrophotométrie d'absorption a pour objet la mesure de l'atténuation d'un faisceau lumineux monochromatique à la traversée d'une lame de substance absorbante [39]. On définit alors les deux grandeurs spectrophotométrique :

- * **La transmittance T** : est la fraction du flux lumineux transmis.

$$T = \frac{I}{I_0}$$

$$\begin{cases} I_0 : \text{Radiation incidente} \\ I : \text{Radiation transmise} \end{cases}$$

- Si $T = 0$ signifie que le milieu est opaque, si $T = 1$ (ou 100%) signifie qu'il est complètement transparent ($I = I_0$), on a bien sur toujours $0 < T < 1$

- * **L'absorbance A** (ou densité optique) :

$$A = \log \frac{1}{T} = \log \frac{I_0}{I}$$

La transmittance décroît lorsqu'un composé absorbe davantage. Afin d'avoir une grandeur croissante avec le caractère absorbant, on utilise l'inverse de la transmittance, ou plus exactement le logarithme décimal de l'inverse de la transmittance, que l'on nomme absorbance ou densité optique. L'utilisation du logarithme est due à l'application de l'absorbance dans la formule de Beer-Lambert.

IV.3.3.5 La loi de Beer –Lambert :

L'absorption du rayonnement par les molécules permet de mesurer le nombre (ou plutôt la concentration) de ces molécules présentes dans le trajet du rayonnement. A une longueur d'onde où la molécule absorbe, il existe une loi simple entre quantité de rayonnement transmis par le milieu et la concentration des molécules qui absorbent [40].

C'est la loi de Beer-Lambert qui relie l'absorption A, à une longueur d'onde λ , et concentration C des molécules qui absorbent :

$$A = \log \frac{I_0}{I} = \epsilon \cdot l \cdot C$$

A : L'absorbance.

ϵ : Coefficient d'absorbance molaire (extinction molaire), [L.mole⁻¹.cm⁻¹].

l : Longueur de la cuve [cm].

C : La concentration de la substance [mole.L⁻¹].

Il est alors possible de construire une droite d'étalonnage en utilisant plusieurs concentrations connues de la molécule à doser et en mesurant les absorbances correspondantes à la longueur d'onde λ . Cette droite d'étalonnage permet le calcul de ε . En plaçant dans la cellule un échantillon dont on veut connaître la concentration $C_{éch}$, l'absorbance mesurée $A_{éch}$ permet le calcul direct de $C_{éch}$. On préfère utiliser la droite d'étalonnage pour déterminer $C_{éch}$ comme le montre la figure IV.18.

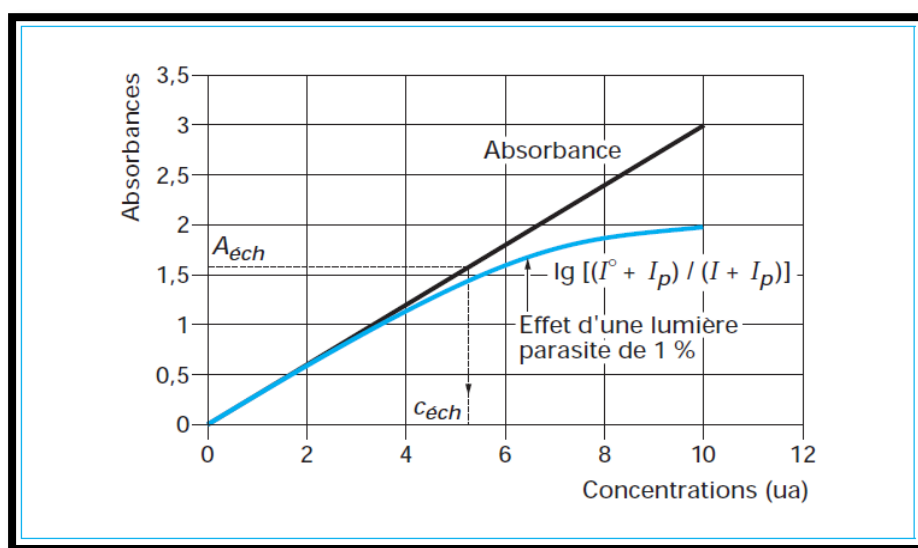


Figure IV.18 : Courbe d'étalonnage et détermination des concentrations inconnues

On a représenté, sur la même figure, l'effet d'une lumière parasite, c'est-à-dire d'une lumière d'une autre longueur d'onde λ_p que celle pour laquelle on a tracé la loi de Beer-Lambert, et qui arrive au détecteur, superposée à la lumière de longueur d'onde de travail λ . L'effet d'une lumière parasite de 1 % de I_0 est représenté par la courbe bleue sur Figure IV.17. On note que la lumière parasite diminue la sensibilité de l'analyse en diminuant la pente et en limitant l'absorbance [40].

IV.3.3.6 Le spectre d'un composé :

Le spectre d'un composé est la courbe représentant l'absorbance de ce composé en fonction de la longueur d'onde :

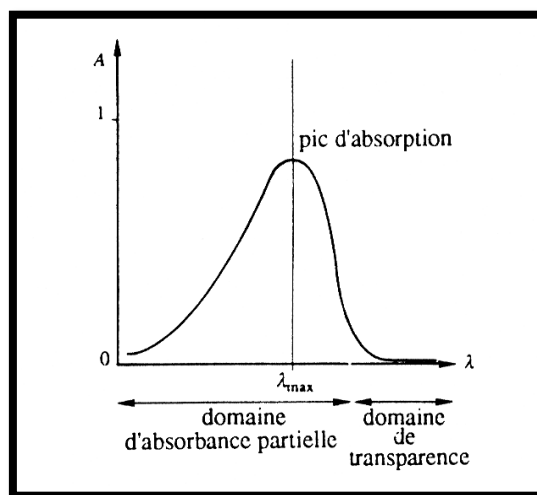


Figure IV.19 : Exemple d'un spectre d'absorption

D'une manière générale, en réalisant le spectre d'un composé inconnu dans différentes gammes spectrales : UV-visible, infrarouge... on peut tirer un nombre de renseignements considérables sur sa structure, la présence de groupes fonctionnels... La spectroscopie est une technique essentielle de l'analyse chimique.

IV.3.3.8 Appareils utilisés

Quand un polymère est exposé au rayonnement solaire, il se détériore physiquement et chimiquement s'il n'est pas protégé au préalable par des agents stabilisants. Cette détérioration se manifeste par une perte de résistance, une érosion de surface, un gauchissement, un fendillement, une diminution de transparence et par d'autres phénomènes [32]. Un stabilisant est donc un additif ajouté au polymère dans le but d'empêcher les réactions chimiques de dégradation ce qui mène parallèlement à une amélioration de la durée de vie du polymère durant son application extérieure.

Il existe plusieurs stabilisants comme les stabilisants thermiques (antioxydant, décomposeur de peroxyde) et les stabilisants lumière (absorbeur UV, stabilisants écran). [32]

Les absorbeurs UV sont des pigments qui absorbent rigoureusement les rayons UV et donnent une très bonne protection au polymère. Le noir de carbone est très efficace, il est utilisé pour stabiliser plusieurs polymères destinés à des applications extérieures.

IV.3.3.8 Appareils utilisés :

Pour l'analyse spectroscopique on a utilisé 2 spectrophotomètres UV-Visible et Infrarouge du groupe SAIDIL d'EL Mohammedia. Le premier effectue un balayage de longueurs d'ondes entre 200 et 400 nm alors le second c'est-à-dire l'infrarouge va de 450 jusqu'à 4000 nm. Les deux spectrophotomètres sont présentés dans les figures suivantes :



Figure IV.20 : Spectrophotomètre UV-Visible.

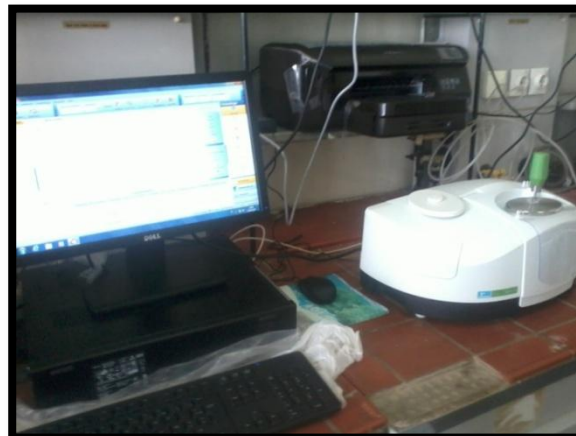


Figure IV.21 : Spectrophotomètre Infrarouge.

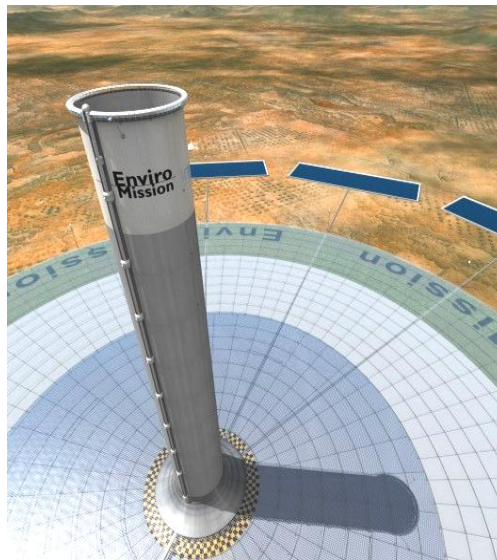
IV.3.3.9 Echantillons analysés :

On a effectué une analyse spectroscopique sur trois échantillons fournis par l'INRAA « l'institut nationale de recherche Agronomique d'Algérie » :

- Un échantillon neuf possédant des stabilisants anti-UV.
- Le même échantillon exposé au rayonnement solaire pour une durée de trois ans
- Un échantillon sans stabilisants exposé au rayonnement solaire pour une durée d'un an (échantillon ordinaire).

Chapitre V

Calcul des Performances Énergétiques de la CCS



Calcul des Performances Energétiques de la CCS

V.1 Introduction

Le présent chapitre est relatif au calcul des performances énergétiques d'une centrale cheminée solaire par utilisation du modèle de Schlaich [3] développé au chapitre III. La banque de données relative aux conditions météorologique est celle de la région d'Adrar.

La wilaya d'Adrar est située dans le sud de l'Algérie. Elle est limitée au Nord par les wilayas d'El Bayedh et de Ghardaïa, à l'Ouest par les wilayas de Béchar et de Tindouf, à l'Est par la wilaya de Tamanrasset, et au Sud par la Mauritanie et le Mali.

Adrar se prononce localement « Adghagh », qui signifie « pierre, rocaïlle, mont » en berbère. C'est une ville du Sahara algérien située à 1540 km au sud-ouest d'Alger.

La wilaya, composée de 11 Daïras, 28 communes et 299 Ksars (villages), recouvre une zone d'environ 427 000 km² et regroupe 422 331 habitants. Deux climats caractérisent la région d'Adrar : climat saharien et présaharien.

Adrar est aussi une terre à vocation agricole justifié par son système d'irrigation traditionnelle « Fougara ». Elle est réputée pour la culture du blé, de l'orge, du tabac, des dattes, des fraises et surtout de la tomate réservée à l'exportation.

La wilaya d'Adrar constitue une zone adéquate pour l'installation d'une tour solaire pour exploiter le potentiel solaire de cette région désertique où l'irradiation solaire annuelle est très importante. Ce qui permettra aux populations locales de bénéficier d'électricité propre sans recourir aux énergies fossiles polluantes et menacées d'épuisement.

Afin de mieux apprécier le potentiel de la région d'Adrar, un calcul des performances d'une tour solaire qui serait implantée dans la région sera réalisé. Les caractéristiques techniques du prototype sont identiques au prototype de Manzanares déjà réalisé en Espagne, dans le souci d'établir une analyse comparative des performances pour les deux sites étudiés.

V.2 Calcul des performances de la tour solaire d'Adrar :

V.2.1 Données du site :

La figure V.1 montre les variations moyenne mensuelle de la température et du l'irradiation solaire au cours de l'année pour la ville d'Adrar.

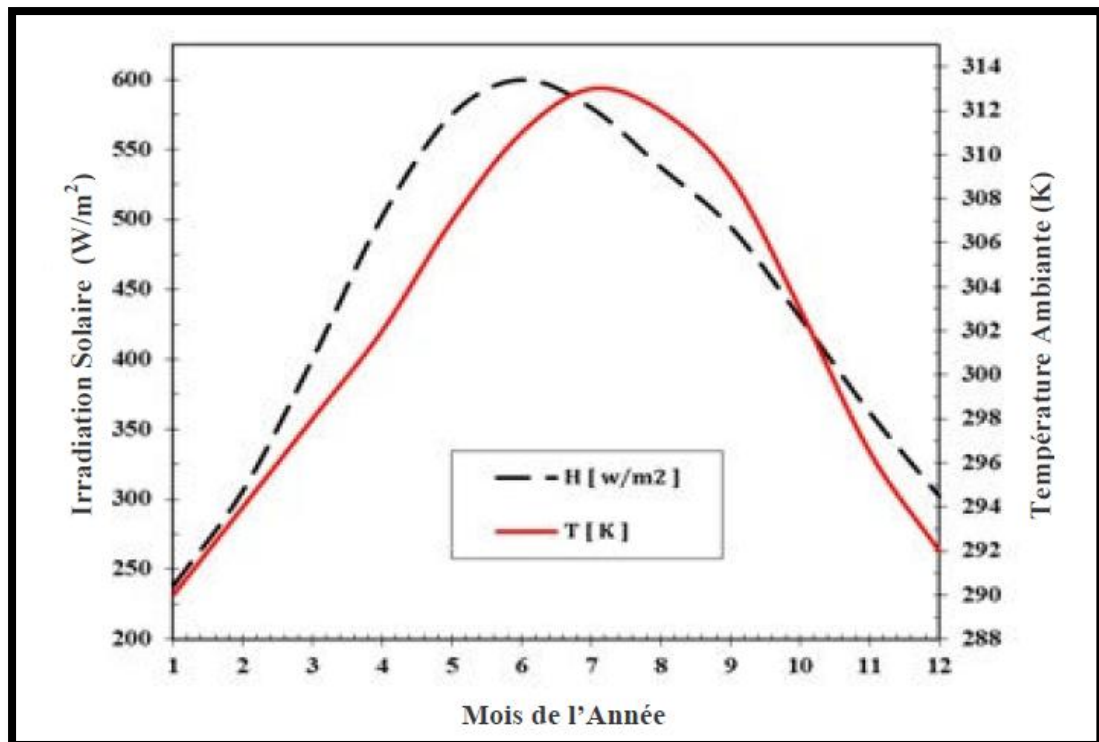


Figure V.1 : Variation moyenne mensuelle de la température et de l'irradiation solaire au cours de l'année 2007 de la ville d'Adrar.

Les moyennes mensuelles de la température et de l'irradiation sont faibles durant la saison d'hiver, elles tournent autour de 20°C pour la température et entre 250 à 350 W/m^2 pour l'irradiation. Ces valeurs augmentent rapidement pour atteindre un maximum au mois de juin et de juillet où la température est de 40°C où on notera une irradiation de 600 W/m^2 . On note que la température et l'irradiation solaire diminuent pour le restant des mois de l'année.

Le tableau V.1 résume les moyennes mensuelles des températures et de l'irradiation solaire.

Les Mois	T_0 (K)	G (W/m^2)	Les Mois	T_0 (K)	G (W/m^2)
Janvier	290	240	Juillet	313,3	580
Février	294	305	Aout	312	535
Mars	297,8	395	Septembre	309	493
Avril	302	500	Octobre	303	425
Mai	307	575	Novembre	296,7	365
Juin	311	600	Décembre	292	300

Tableau V.1 : Valeurs des moyennes mensuelles de la température et de l'irradiation solaire de la ville d'Adrar.

V.2.2 Calcul de différents paramètres :

Les performances énergétiques de la centrale à cheminée solaire utilisant les données climatiques de la région d'Adrar ont été déterminées sur la base des données techniques du prototype de Manzanares. Le modèle mathématique est celui de J. Schlaich et al [3]. Le tableau V.2 ci- dessous montre les données techniques de la centrale à cheminée solaire de Manzanares.

Paramètres	H_c (m)	D_{coll} (m)	D_c (m)	A_c (m ²)	ΔT (K)	η_c	η_{wt}	c_p (J/Kg.K)	g (m/s ²)
Valeurs	195	240	10	45000	17	0,62	0,8	1006	9,81

Tableau V.2 : Données techniques du prototype d'Adrar.

V.2.2.1 Le collecteur :

Le calcul des performances du collecteur suivant les variations de la température et du rayonnement solaire annuel a été fait.

Tableau V.3 : Résultats relatifs au calcul des performances du collecteur.

Les Mois	$\dot{Q}(W)$	\dot{m} (kg/s)	V_{coll} (m/s)	Les Mois	$\dot{Q}(W)$	\dot{m} (kg/s)	V_{coll} (m/s)
Janvier	6480000	378,903	4,239	Juillet	15660000	915,682	10,993
Février	8235000	481,523	5,451	Aout	14445000	844,638	10,099
Mars	10665000	623,611	7,139	Septembre	13311000	778,330	9,220
Avril	13500000	789,381	9,152	Octobre	11475000	670,974	7,803
Mai	15525000	907,789	10,687	Novembre	9855000	576,248	6,576
Juin	16200000	947,258	11,291	Décembre	8100000	473,629	5,330

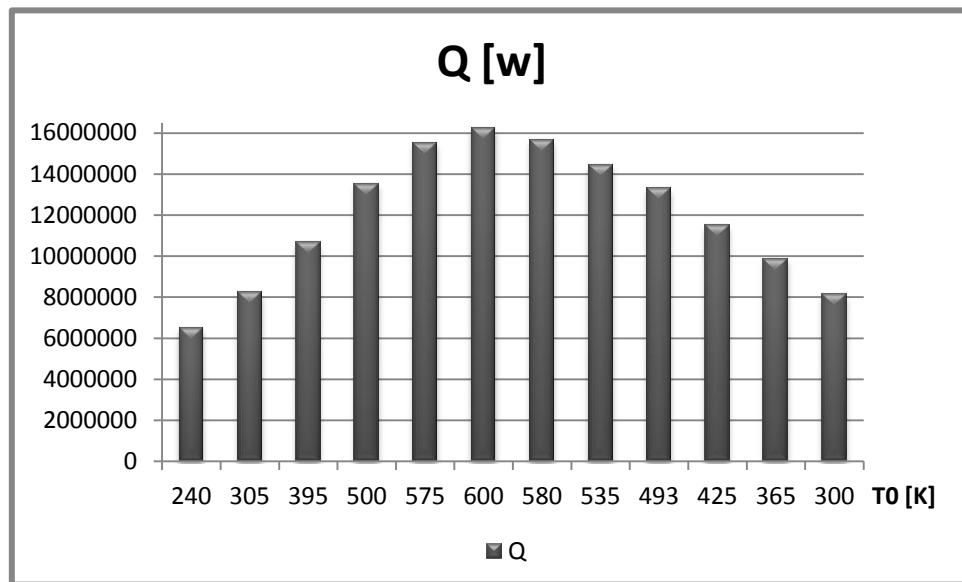


Figure V.2 : Variation du gain de chaleur dans le collecteur en fonction de la température ambiante T_0 .

V.2.2.2 La cheminée :

Les performances de la cheminée en fonction des données mensuelles sur la température et le rayonnement solaire sont données dans le tableau V.4.

Tableau V.4 : Résultats relatifs au calcul des performances de la cheminée.

Les Mois	$\Delta P_{\text{tot}}(\text{Pa})$	$\Delta P_s(\text{Pa})$	$V_{c,\text{max}} (\text{m/s})$	$P_{\text{tot}}(\text{w})$	η_c
Janvier	127,625	85,083	14,976	42489,600	0,00655704
Février	124,416	82,944	14,874	53262,545	0,00646783
Mars	121,448	80,965	14,778	68099,168	0,00638529
Avril	118,254	78,836	14,675	85002,650	0,00629649
Mai	114,565	76,377	14,555	96160,978	0,00619394
Juin	111,700	74,466	14,461	99051,319	0,00611428
Juillet	110,085	73,390	14,408	95046,691	0,00606939
Aout	110,995	73,996	14,438	88037,680	0,00609468
Septembre	113,123	75,415	14,508	81913,945	0,00615385
Octobre	117,506	78,337	14,651	72013,796	0,00627571
Novembre	122,299	81,533	14,806	63160,378	0,00640897
Décembre	126,010	84,007	14,925	52748,220	0,00651213

V.2.2.2.1 Vitesse d'écoulement d'air dans la cheminée :

La figure V.3 montre l'évolution de la vitesse maximale d'écoulement d'air dans la cheminée en fonction de la température ambiante, T_0 . On note clairement que la vitesse de l'air dans la cheminée est inversement proportionnelle à la température ambiante T_0 . Pour les températures variant entre **17 et 24°C**, la vitesse de l'air varie entre **14,8 et 15 m/s**. Pour le mois de juillet où la température ambiante est élevée (plus de 40°C), la vitesse maximale d'écoulement est de l'ordre 14,4 m/s.

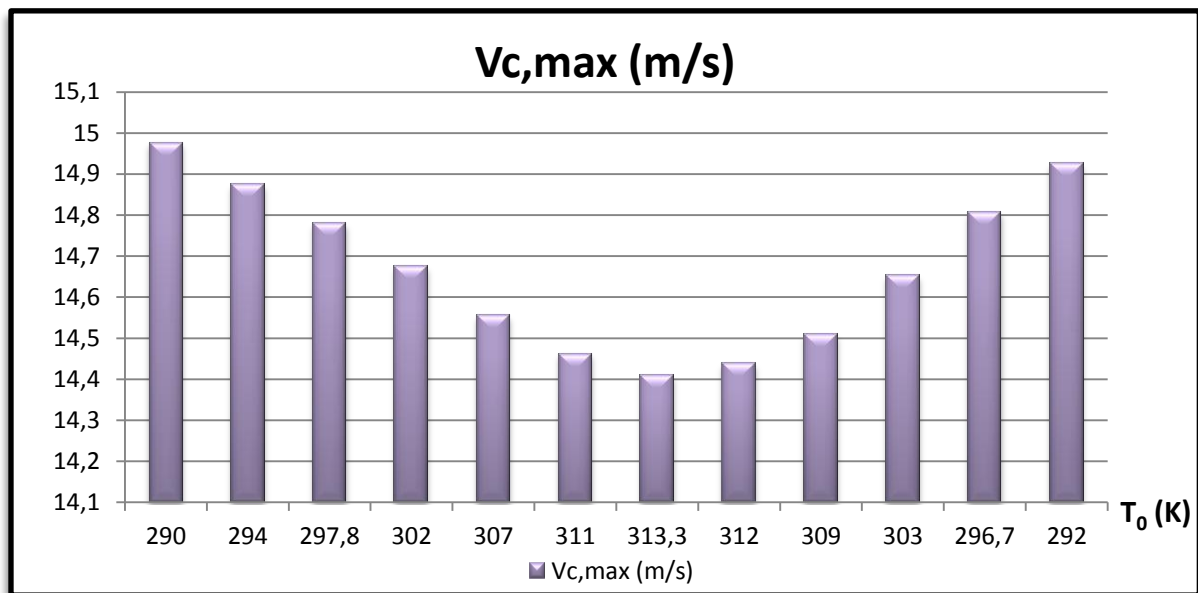


Figure V.3 : Variation de la vitesse maximale de l'air dans la cheminée en fonction de la température ambiante T_0 .

V.2.2.2.2 Puissance totale :

La figure V.4 donne l'évolution de la puissance totale fournie (de l'air) en fonction de la température ambiante, T_0 . On note que cette évolution est proportionnelle à l'irradiation solaire. Elle est de l'ordre de **100 kW** au mois de juin quand le rayonnement solaire est maximal, atteignant les **600W/m²**. Par ailleurs, le minimum de puissance est relatif au mois de janvier où on note **40 kW** pour un rayonnement de **240W/m²**.

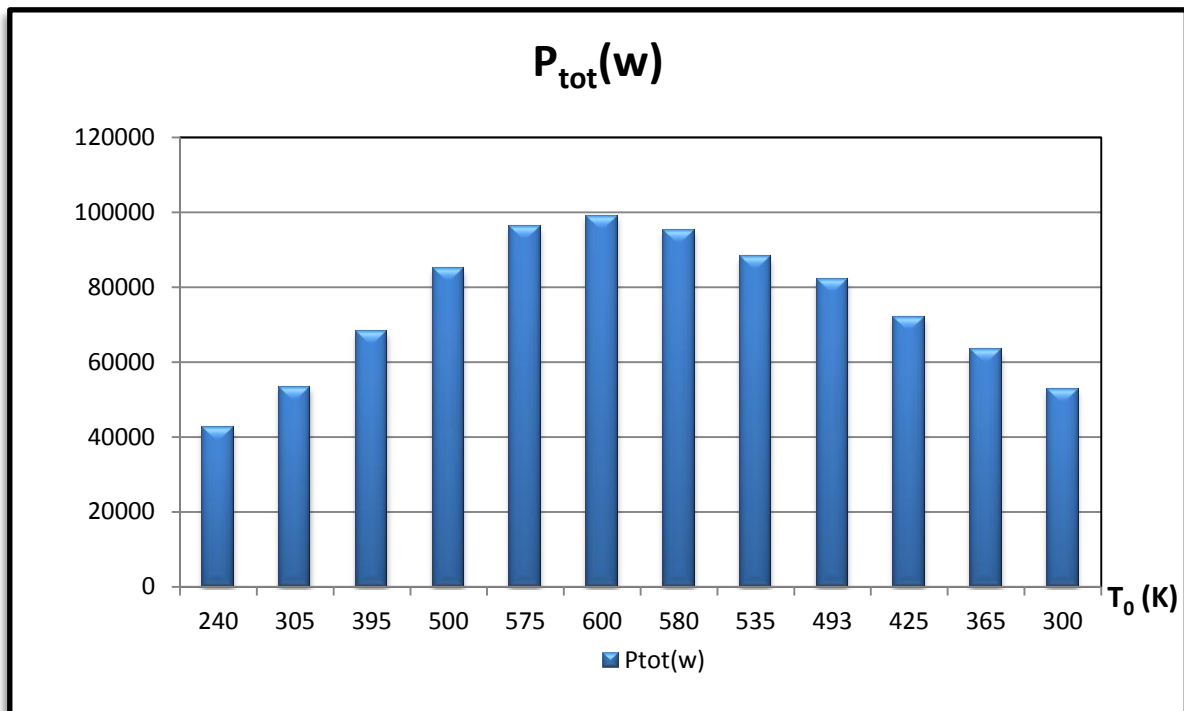


Figure V.4 : Evolution de la puissance totale en fonction de la température T_0 .

V.2.2.2.3 Rendement de la cheminée :

La figure V.5 donnant l'évolution du rendement de la cheminée en fonction de la température T_0 montre que le rendement de la cheminée est inversement proportionnel à la température extérieure T_0 . Il diminue au fur et à mesure que la température augmente durant l'année, il est de l'ordre de 0.66 % pour le mois de janvier et atteint 0,6% au mois de juillet où la température est relativement élevée (40°C).

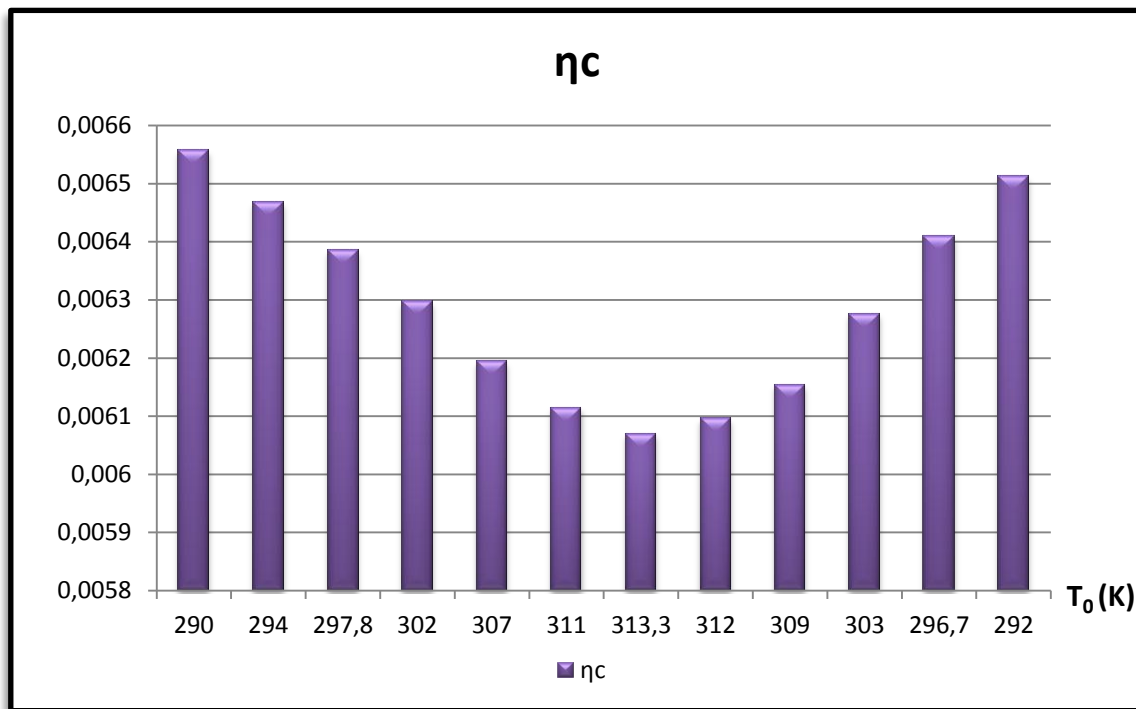


Figure V.5 : Rendement de la cheminée en fonction de la température T₀

V.2.2.3 La turbine :

La puissance récupérée au niveau de la turbine, son rendement global et la puissance électrique récupérée sont montrés dans le tableau V.5 ci- dessous

Tableau V.5 : Résultats relatifs au calcul des performances de la turbine.

Les Mois	P _{wt,max} (w)	P _{elec} (w)	η _{glob}
Janvier	28326,400	22661,120	0,0031473792
Février	35508,363	28406,690	0,0031045584
Mars	45399,445	36319,556	0,0030649392
Avril	56668,433	45334,746	0,0030223152
Mai	64107,319	51285,855	0,0029730912
Juin	66034,213	52827,370	0,0029348544
Juillet	63364,461	50691,568	0,0029133072
Aout	58691,787	46953,429	0,0029254464
Septembre	54609,297	43687,437	0,0029538480
Octobre	48009,197	38407,358	0,0030123408
Novembre	42106,919	33685,535	0,0030763056
Décembre	35165,480	28132,384	0,0031258224

V.2.2.3.1 Rendement global :

Le rendement global est le produit des trois rendements : celui du collecteur, de la cheminée et de La turbine. Les calculs ont été faits en considérant les rendements, du collecteur et de la turbine, comme invariants ($\eta_{coll}=0,6$ et $\eta_{wt}=0,8$). L'évolution du rendement global en fonction de la température ambiante est montrée dans la figure V.5. Ce rendement varie entre **0,315%** et **0,29%** pour des températures allant de **17°C** à **40°C**.

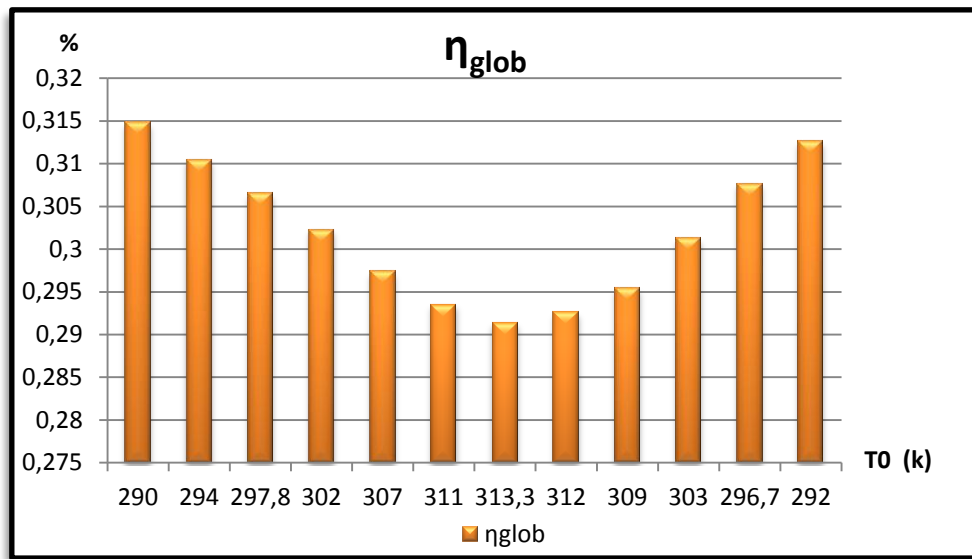


Figure V.6 : Evolution du rendement global en fonction de la température ambiante.

V.2.2.3.2 Puissance électrique produite:

La figure V.7 montre la variation de la puissance électrique produite en fonction du rayonnement solaire.

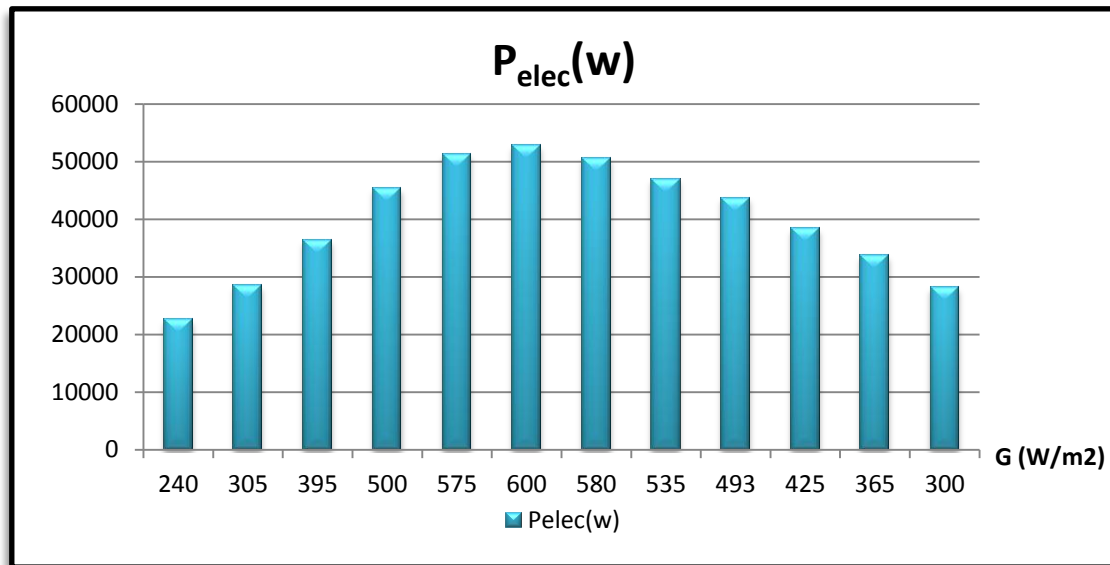


Figure V.7 : Variation de la puissance électrique produite en fonction du rayonnement solaire.

Pour un rayonnement allant de 250 à 400 W/m², la puissance électrique produite varie entre 20 et 40 kW. Elle dépasse 50 kW (\approx 53 kW) pour une irradiation solaire de 600W/m².

La figure V.8 montre que la puissance électrique produite par la tour solaire relative au site d'Adrar varie selon les saisons de l'année. Elle est minimale en hiver et augmente pour atteindre son maximum en été (aux mois de juin et juillet). La puissance décroît ensuite pour le restant des mois de l'année.

Il est à souligner que la puissance maximale produite par la tour solaire relative au site d'Adrar est de 53kW en considérant les données du prototype de Manzanares. Ainsi on peut conclure que la puissance électrique produite à la région d'Adrar est supérieure à la puissance maximale du prototype de Manzanares en Espagne.

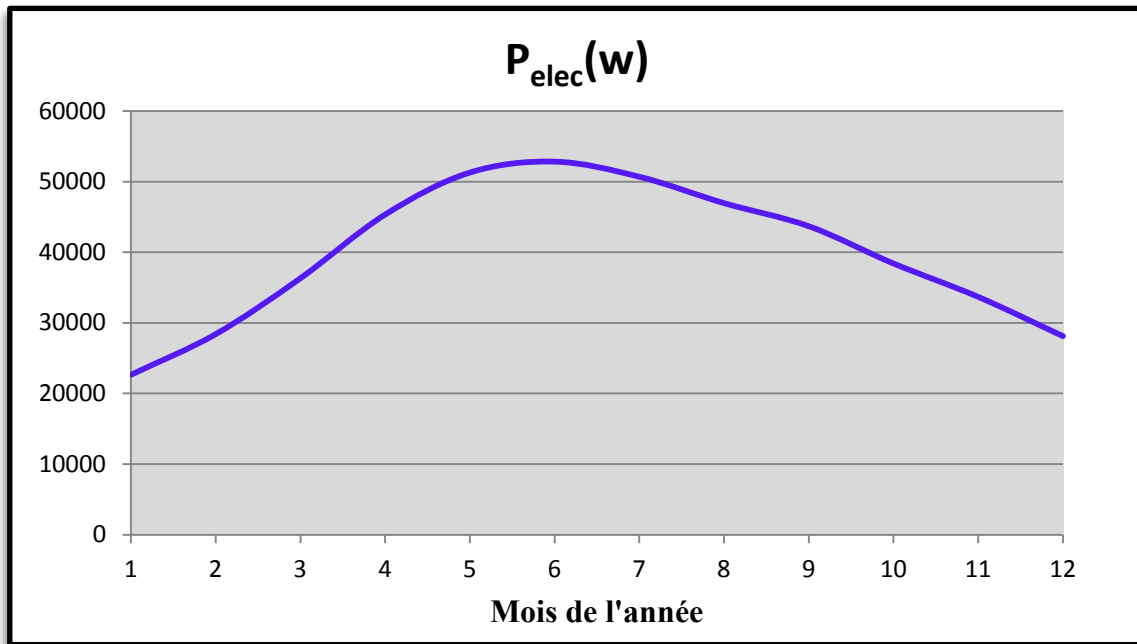


Figure V.8 : Puissance électrique moyenne produite durant l'année au site d'Adrar.

V.3 Comparaison entre le prototype de Manzanares en Espagne et le prototype d'Adrar en Algérie :

V.3.1 Calcul de l'énergie produite :

La figure V.9 donne la moyenne horaire de fonctionnement journalier et mensuel du prototype de Manzanares pour les mois des années 1986, 1987, 1988. On s'intéresse particulièrement à l'année 1987 compte tenu de l'importance de l'énergie produite.

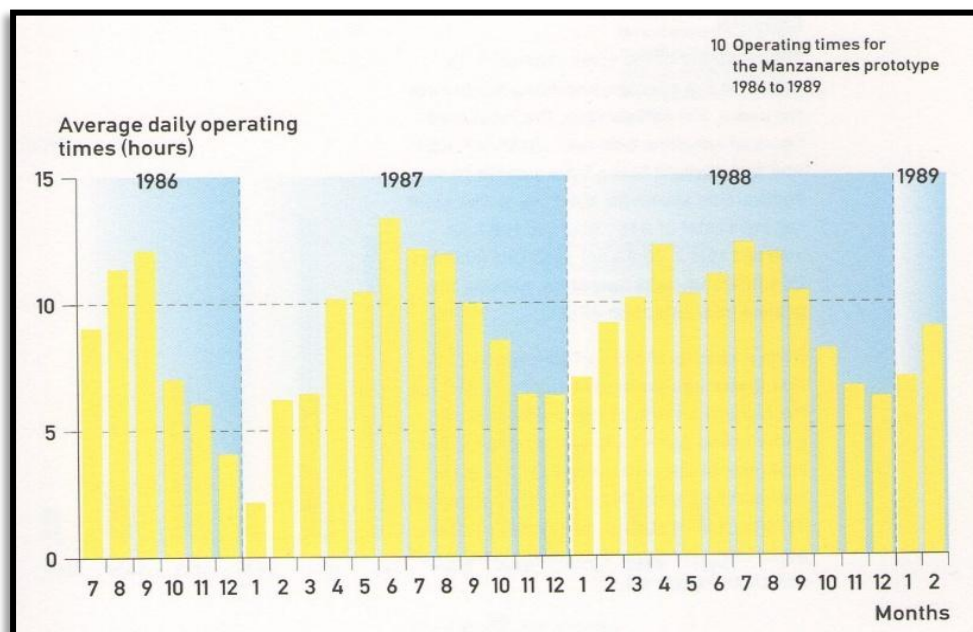


Figure V.9 : Moyenne horaire de fonctionnement journalier et mensuel du prototype de Manzanares [3].

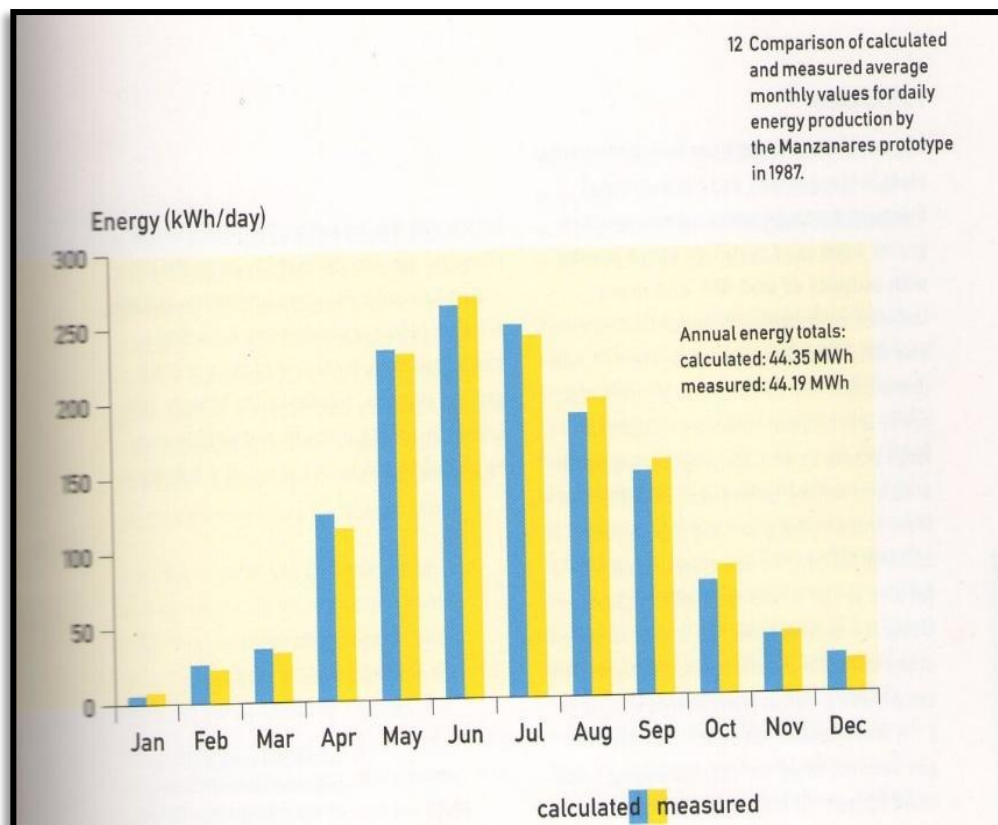


Figure V.10 : Energie moyenne produite par jour du prototype de Manzanares pour l'année 1987 [3].

La figure V.10 montre une comparaison entre les énergies moyennes produites (calculée et mesurée) par jour et par mois du prototype de Manzanares pendant l'année 1987.

Le tableau V.6 donne les moyennes des heures de fonctionnement par jour de l'année 1987 :

Tableau V.6 : Heures de fonctionnement moyennes journalières de l'année 1987 du prototype de Manzanares

Les Mois	Jan	Fév.	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Octob	Nov	Déc
Heures (h)	2,5	6,3	6,5	10,3	10,5	13,5	12,5	12	10	8,5	6,5	6,5

En considérant les mêmes heures de fonctionnement moyennes par jour du prototype de Manzanares, l'énergie moyenne produite par jour de notre prototype d'Adrar est ainsi calculée pour le cas du site d'Adrar. La figure V.11 montre l'allure de l'énergie moyenne produite où

l'on note que le maximum d'énergie correspond aux mois de juin et juillet et que ce maximum est au moins le double de celui de Manzanares.

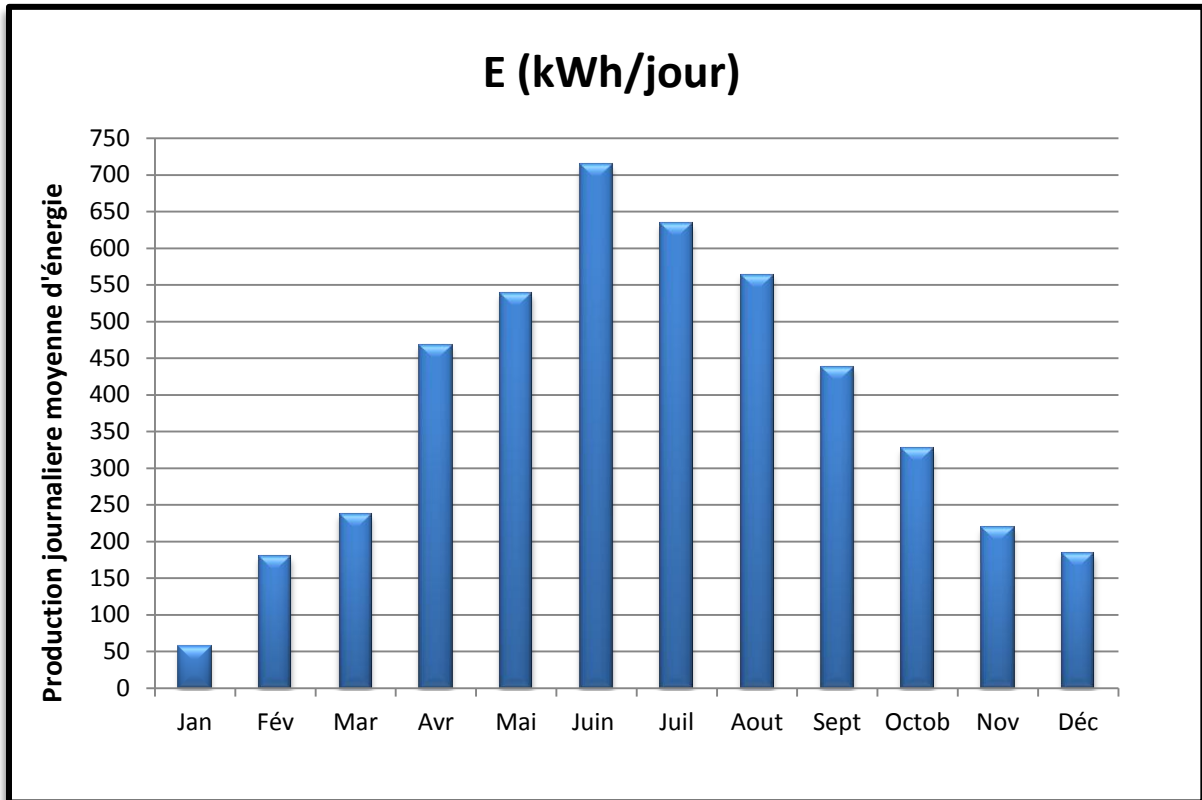


Figure V.11 : Energie moyenne produite par jour du prototype d'Adrar.

V.3.2 Conclusion :

L'énergie minimale produite pour les deux prototypes est relative au mois de janvier. Elle est inférieure à **10 kWh/jour** pour le prototype de Manzanares alors qu'elle représente plus de **50 kWh/jour** pour le prototype d'Adrar.

Pour le mois de juin où la production est maximale, elle dépasse les **700 kWh/jour** pour le site d'Adrar alors qu'elle n'est que de **270 kWh/jour** pour celui de Manzanares.

On peut produire une énergie électrique largement supérieure à celle produite à Manzanares en Espagne en appliquant le même modèle à la région d'Adrar. Région qui est caractérisée par son climat désertique où la température dépasse les **40 °C** la journée avec un rayonnement d'environ **600W/m²**. La puissance produite est de **53 kW** et l'énergie est supérieure à **700 kWh** par jour ce qui correspond à une moyenne de **128 MWh** par année.

V.4 Tours solaires plus grande pour la région d'Adrar :

Pour être économiquement rentable les tours solaires doivent fournir une puissance bien supérieur à **50 kW**, c'est ainsi qu'on opte pour des tours de dimensions plus grandes afin de fournir plus de puissance. La figure V.12 illustre quelques exemples de tours solaires de différentes puissances.

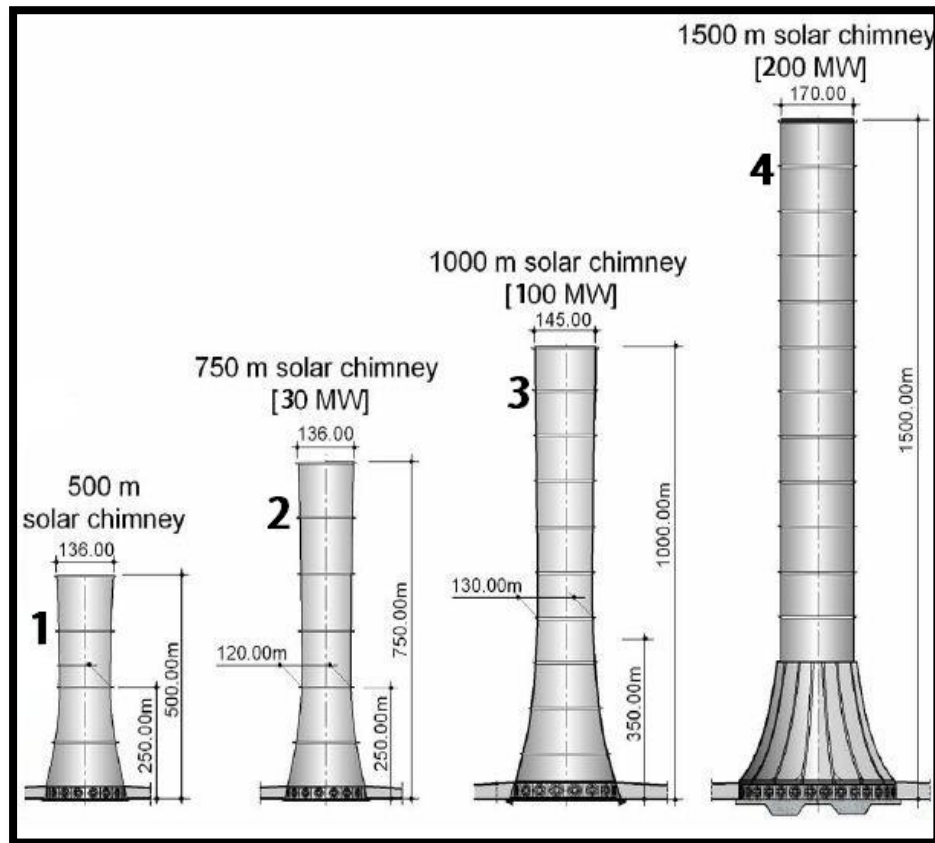


Figure V.12 : Hauteurs de tours solaires et puissances correspondantes fournies.

Tableau V.7 : Données relatives aux différentes tours solaires de la figure V. 11.

Tours	1	2	3	4
$A_{coll} (m^2)$	967700	3801000	10180000	12550000
$\eta_{coll} (\%)$	56.24	54.72	52.62	50.45
$\eta_c (\%)$	1.45	2.33	3.10	5.2
$\eta_{wt} (\%)$	77	78.30	80.10	81.36

V.4.1 Calcul de la puissance fournie:

En considérant les données du tableau V.7 ci- dessous, pour une irradiation maximale de 600 W/m^2 dans la région d'Adrar, les puissances fournies pour différentes dimensions de tours solaires sont ainsi calculées.

La figure V.13 montre les puissances maximales fournies au site d'Adrar pour différentes dimensions de tours solaires. On peut atteindre des puissances assez importantes dans cette région de l'Algérie en augmentant la hauteur de la cheminée et la surface du collecteur, de 2.4 MW pour une hauteur de 500 m jusqu'à 107 MW pour 1500 m de hauteur de cheminée.

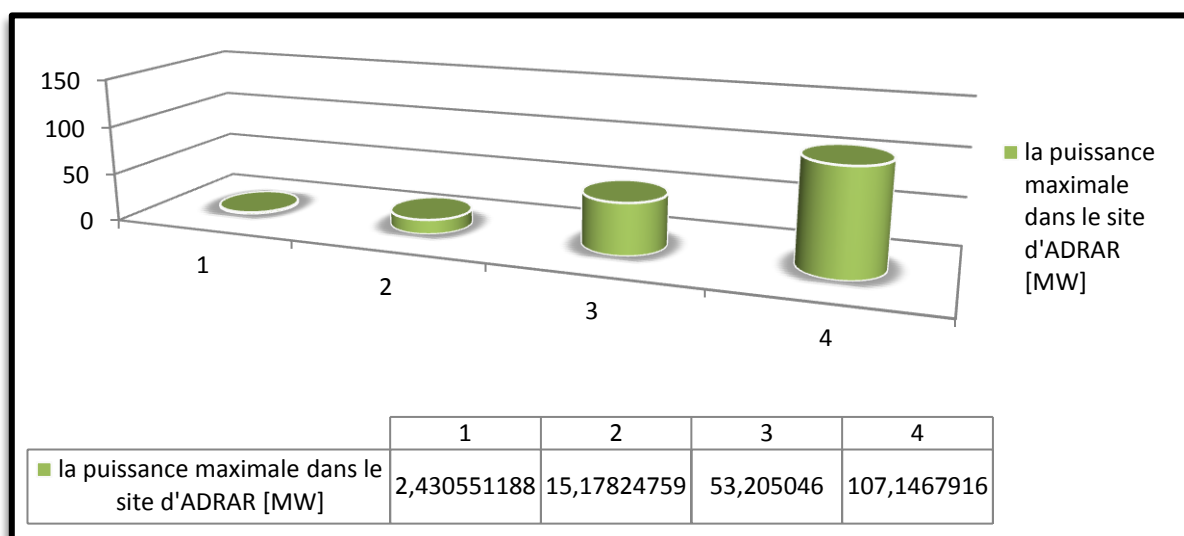


Figure V.13 : Puissances maximales fournies au site d'Adrar pour les différentes dimensions des tours solaires 1, 2, 3 et 4

V.4.2 Calcul de l'énergie produite :

La figure V.14 montre l'énergie journalière produite au mois de juillet au site d'ADRAR pour les tours solaires 1, 2, 3 et 4. La production maximale journalière d'énergie électrique est de 1.39 GWh pour une hauteur de cheminée de 1500 m.

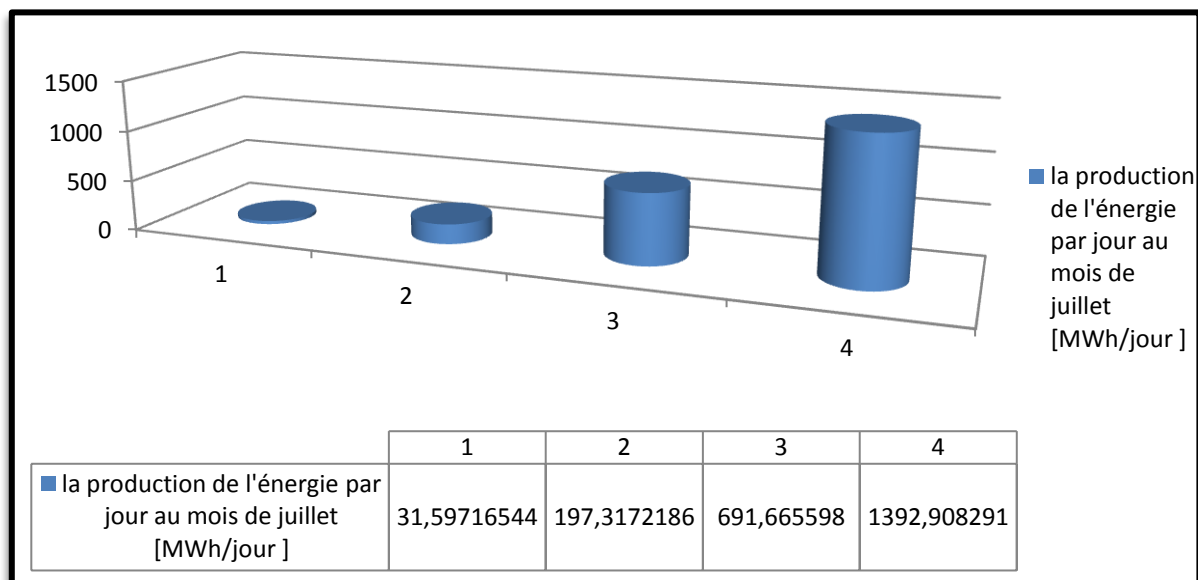


Figure V.14 : Energie journalière produite au mois de juillet au site d'ADRAR pour différentes dimensions de tours solaires.

La figure V.15 ci- dessous représente la « Carte du potentiel solaire en Algérie » et indique le rayonnement solaire moyen de la région d'Adrar pendant une année.

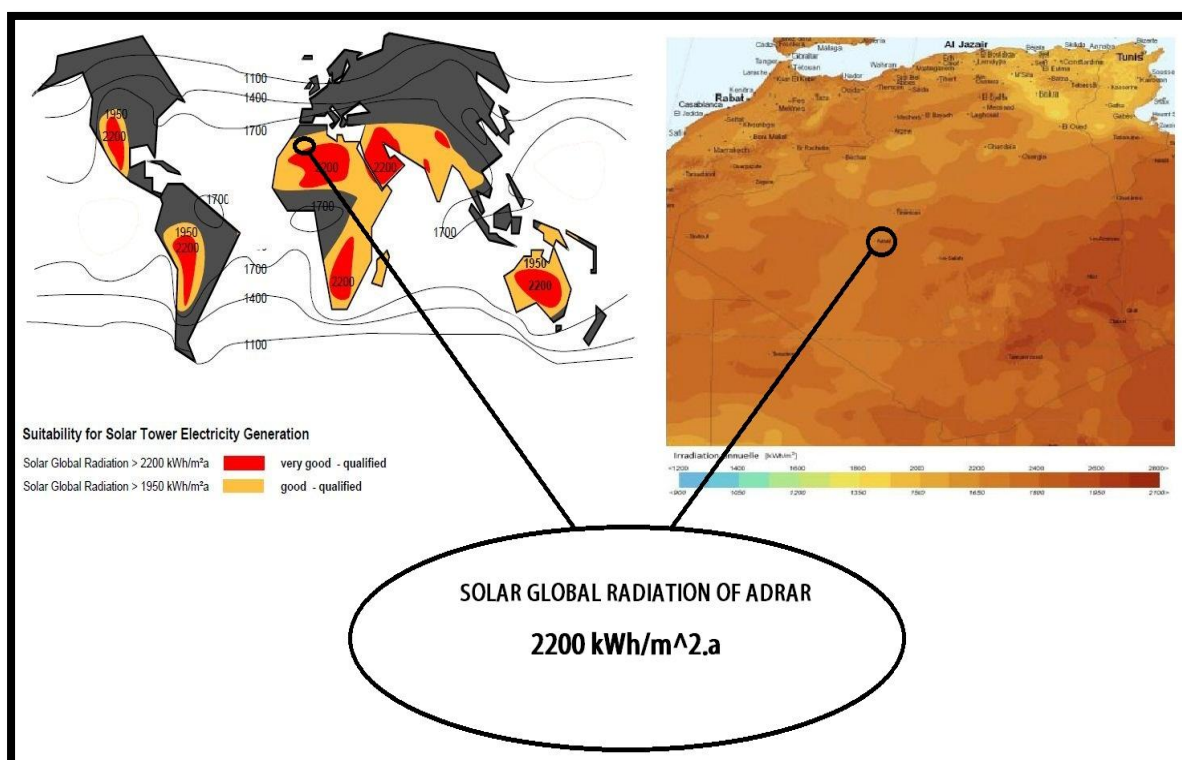


Figure V.15 : Irradiation solaire annuelle de la région d'Adrar de 1987.

On note que l'irradiation solaire relative à cette région est de **7.5 à 8 kWh par jour**. La production d'énergie par jour pour les différentes dimensions de tours solaires est déterminée en prenant une moyenne de **7.8 kWh** par jour.

La figure V.16 montre la production annelle d'énergie électrique dans la région d'Adrar pour les tours solaires 1, 2, 3 et 4. Pour une cheminée de 750 m, l'énergie électrique produite est de 55 GWh par an alors que cette production est de 400 GWh par an pour une cheminée de 1500 m.

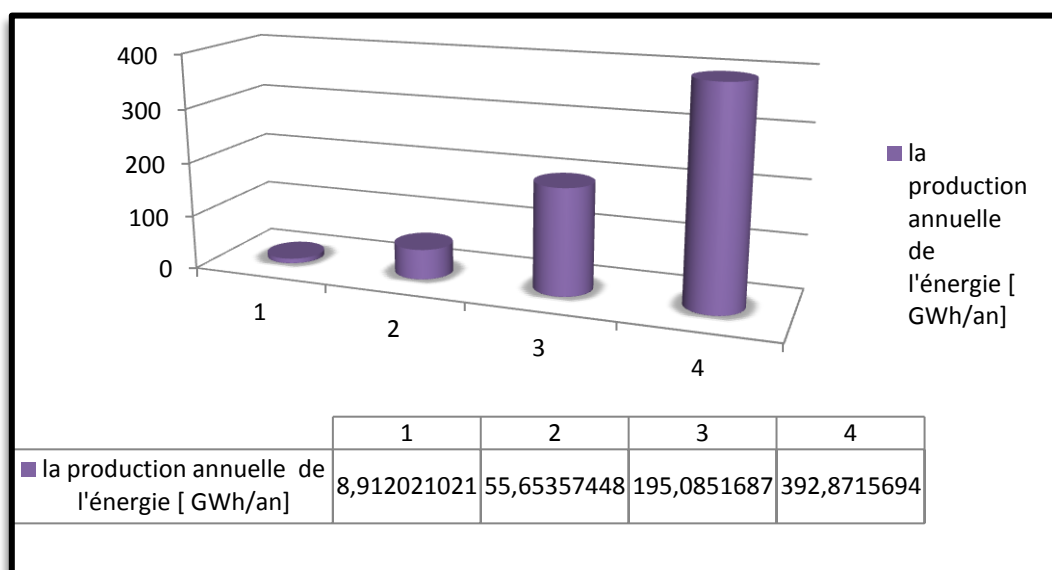


Figure V.16 : Production annelle d'énergie électrique dans la région d'Adrar.

La figure V.17 montre la variation de l'énergie annuelle produite en fonction du diamètre, D_{coll} , du collecteur et de la hauteur, H_c , de la cheminée pour le site d'Adrar. Pour un diamètre de collecteur fixé, l'énergie annuelle produite augmente avec la hauteur de la tour cheminée. Même s'il n'existe pas d'optimum physique évident, le choix des dimensions de la CCS se fait selon des critères économiques.

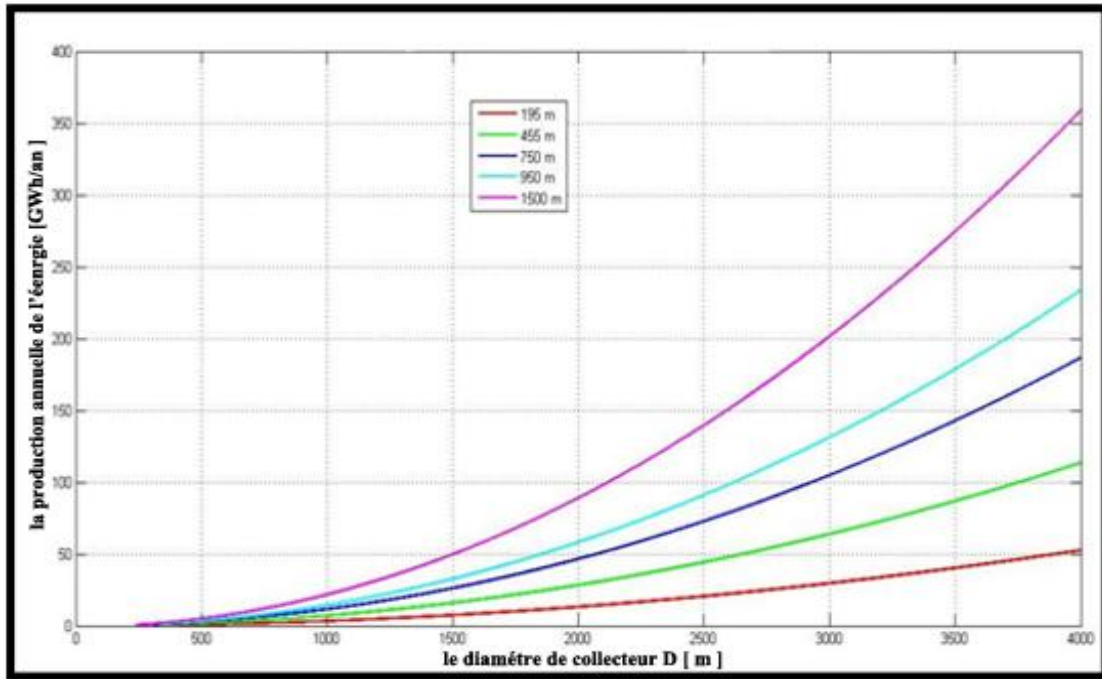


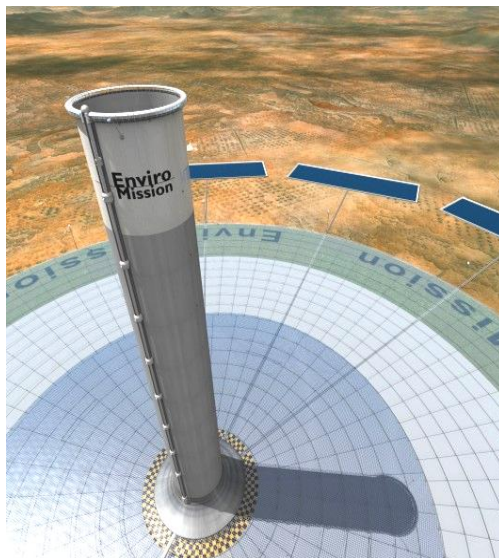
Figure V.17 : Variation de l'énergie annuelle produite en fonction du diamètre du collecteur et de la hauteur de cheminée.

V.5 Conclusion

Adrar est une ville du sud de l'Algérie qui dispose d'un potentiel solaire important. L'Algérie devra donc penser sérieusement à diversifier les formes d'énergie à utiliser afin d'alléger sa dépendance énergétique des combustibles fossiles menacés d'épuisement. Ce qui lui permettra de satisfaire ses besoins énergétiques tout en préservant l'environnement et les ressources énergétiques non renouvelables pour les générations futures. Lors de cette analyse on s'est intéressé à l'aspect calcul de performances énergétiques en fonction de la taille de la CCS et des conditions météorologique de la région. Deux autres aspects aussi importants que le premier sont à prendre en ligne de compte : l'analyse des coûts avec le retour d'investissement et la problématique relative au génie civil pour la construction de la CCS.

Chapitre VI

Résultats Expérimentaux



VI.1 Introduction

Les films de polyéthylène, basse densité, sont exposés en plein air à la lumière solaire, qui contient la fraction UV située dans la marge, 280 – 400 nm. La quantité d'énergie reçue est suffisante pour rompre les chaînes polymériques entraînant par conséquent la dégradation des macromolécules avec la chute des propriétés mécaniques et l'évolution de la morphologie [41].

La dégradation naturelle du polyéthylène, basse densité, dépend de l'absorption d'énergie par les macromolécules du polymère. Chaque structure polymérique est caractérisée par sa sensibilité à des longueurs d'ondes spécifiques au cours du vieillissement.

On se propose dans ce chapitre, de caractériser trois échantillons de films de polyéthylène: un échantillon neuf (vierge), un échantillon exposé au rayonnement solaire pendant 3 ans et un troisième échantillon (ordinaire) qui lui, contrairement aux deux précédents ne contient pas de stabilisant anti UV est qui est exposé au soleil pendant 1 an.

VI.2 Caractéristiques optiques

VI.2.1 Spectroscopie infrarouge :

On procède à l'interprétation des spectres en suivant la procédure définie dans la littérature [42]. Le tableau (donné en *Annexe I*) permet de retrouver les différents groupements fonctionnels présents dans les échantillons étudiés en fonction de leurs bandes d'absorption.

Les bandes de groupements fonctionnels caractéristiques au polyéthylène sont décrites dans le tableau VI. 1 ci- dessous.

Tableau VI.1 : Bandes des groupements fonctionnels caractéristiques du polyéthylène [32]

Nombre d'onde (cm ⁻¹)	Mode vibration et attribution
2916	Elongation de -CH- (méthyles, méthylènes)
2848	Elongation de -CH- (méthyles, méthylènes)
1471	Déformation de - CH ₂ – (méthylène)
719	Déformation de (-CH ₂ -) n _{>3} (méthylène)

La figure VI.1 décrit le spectre infrarouge de l'échantillon de polyéthylène stabilisé non exposé (neuf).

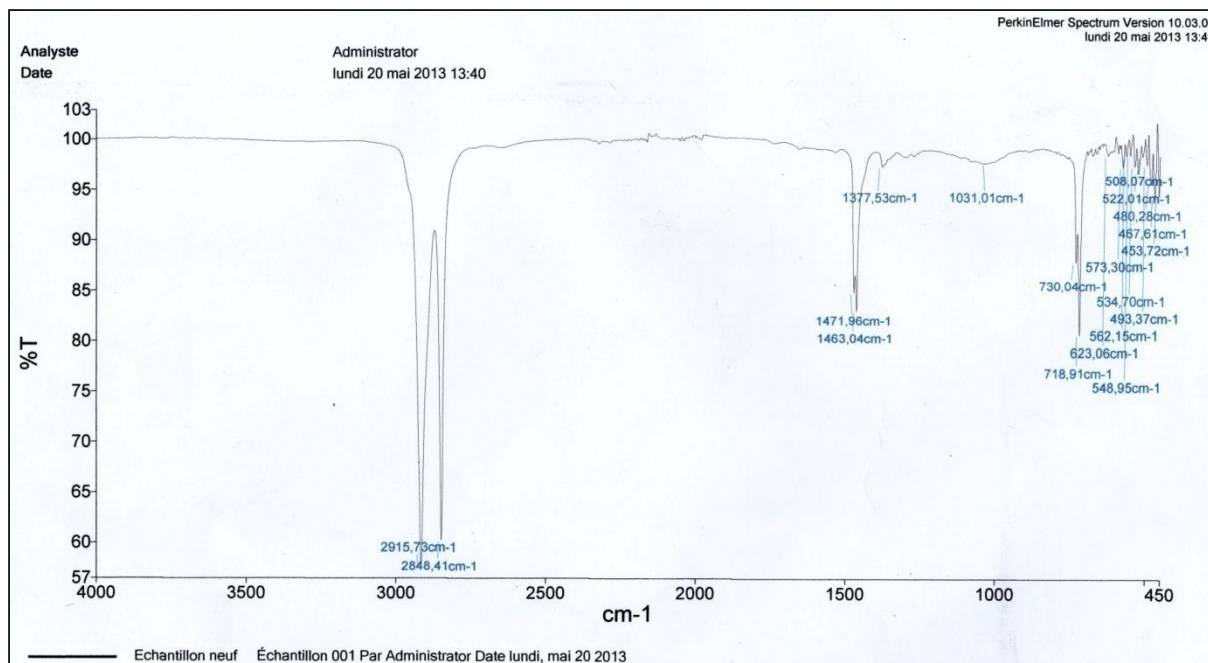


Figure VI.1 : Spectre IR de l'échantillon neuf.

On remarque l'apparition de plusieurs bandes d'absorption. Le tableau VI.2 résume les plus importantes.

Tableau VI.2 : Bandes d'absorptions de l'échantillon neuf et leurs groupement fonctionnels correspondants.

Bandes d'absorption	Groupe fonctionnel correspondant
2915.73 cm⁻¹	Elongation de -CH- (méthyles, méthylènes)
2848.41 cm⁻¹	Elongation de -CH- (méthyles, méthylènes)
1471.96 cm⁻¹	Déformation de - CH ₂ – (méthylène)
1463.04 cm⁻¹	Déformation de - CH ₂ – (méthylène)
1377.53 cm⁻¹	Déformation angulaire de -CH ₃
1031.01 cm⁻¹	Elongation C-C-O des esters
730.04 cm⁻¹	Balancement des (-CH ₂ -) n _{>4} (méthylène)
718.91 cm⁻¹	Déformation de (-CH ₂ -) n _{>3} (méthylène)

On voit que toutes les bandes caractéristiques des groupements fonctionnels propres au polyéthylène citées dans le tableau VI.1 sont présents dans le spectre de l'échantillon neuf, il s'agit bien donc d'échantillon de polyéthylène (PE).

La figure VI.2 montre le spectre de l'échantillon stabilisé anti-UV exposé au rayonnement solaire pendant 3 ans.

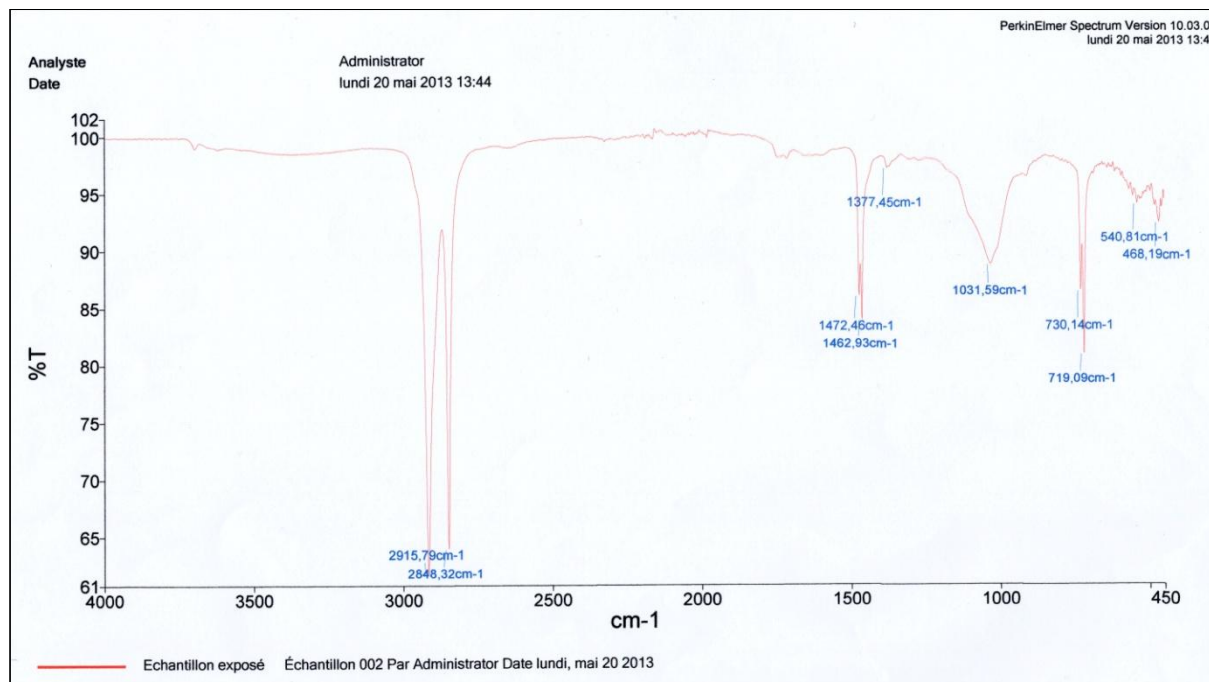


Figure VI.2 : Spectre IR de l'échantillon stabilisé anti-UV exposé.

On remarque, qu'en plus des pics d'absorption retrouvés dans l'échantillon neuf (tableau VI.2), on note l'apparition d'une faible bande d'absorption autour de 1744 cm^{-1} . Cette bande est caractéristique des fonctions carbonyles (*double liaison* $\text{C}=\text{O}$) de l'ester [annexe 2]. La bande d'oxydation confirme que l'échantillon a subi des réactions de dégradation suite à son exposition au rayonnement solaire pendant 3 ans.

On peut noter également une légère absorption autour de la valeur 3750 cm^{-1} qui n'apparaît pas dans l'échantillon neuf, qui peut être due à l'apparition des groupes (O-H) du phénol ou de l'alcool due aux réactions d'oxydation.

D'autre part, on remarque que la transmittance diminue pour la bande caractéristique aux esters (C-O) 1031 cm^{-1} (tableau VI.2). Elle est de 88 %, par rapport à l'échantillon neuf qui est de 98% ce qui implique la formation de groupe (*liaison* C-O) de l'ester suite aux réactions de coupures de chaînes qui confirme la dégradation de l'échantillon après son exposition au climat extérieur pendant 3ans.

La figure VI.3 présente le spectre de l'échantillon ordinaire qui ne contient pas de stabilisant anti-UV exposé pendant 1 an.

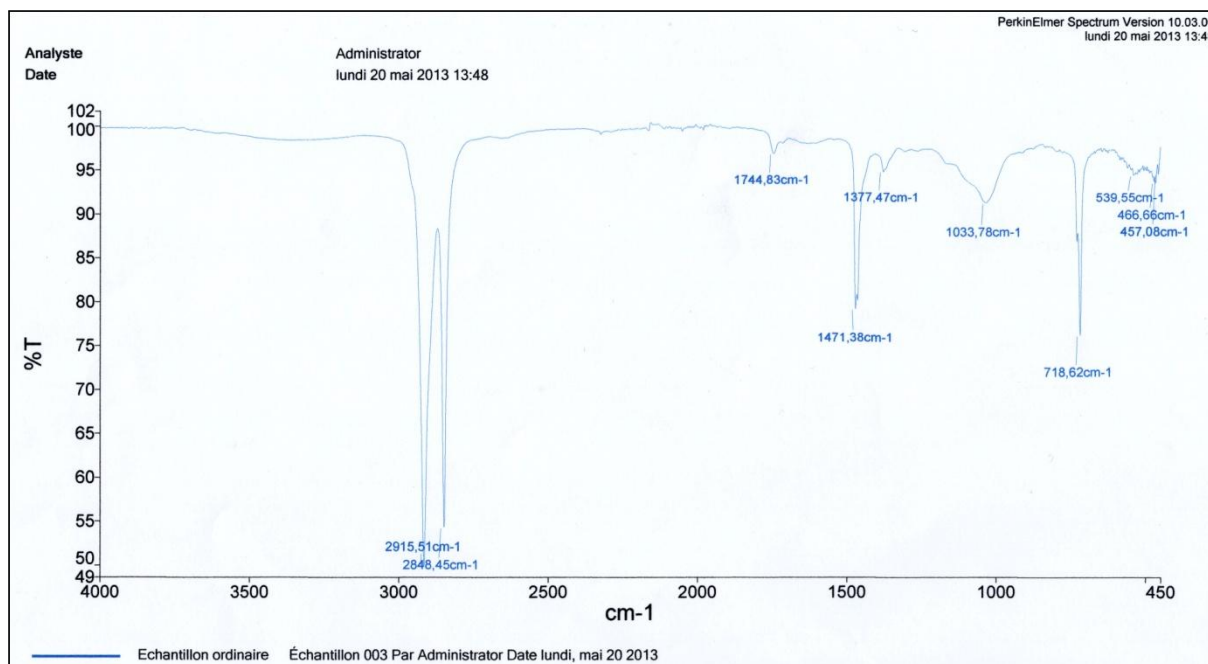


Figure VI.3 : le spectre IR de l'échantillon ordinaire.

On remarque la présence des mêmes pics d'absorption déjà rencontrés dans l'échantillon neuf (tableau VI.2), montrant qu'il s'agit bien d'un film polyéthylène.

On note également l'apparition d'une bande d'absorption à 1744 cm^{-1} , où il s'agit aussi de groupements d'oxydations ($\text{C}=\text{O}$) « ester » qui apparaissent suite aux réactions d'oxydations dues à la dégradation de l'échantillon suite à son exposition au rayonnement solaire.

On retrouve aussi la bande d'absorption caractéristique aux esters ($\text{C}-\text{O}$) à une fréquence égale 1033 cm^{-1} avec une transmittance de 92%, inférieure à celle de l'échantillon neuf qui est de 98 %. Ce phénomène peut être expliqué par les réactions de coupures de chaînes qu'a subi l'échantillon ordinaire après son exposition aux rayonnements solaires et au climat extérieur.

Les groupements carbonyles ($\text{C}=\text{O}$) sont excités par la lumière dans le domaine de 1744 cm^{-1} . Cette excitation provoque une absorbance d'énergie qui cause la rupture des chaînes moléculaires [41].

VI.2.2 Spectroscopie ultraviolette :

L'absorption des radiations lumineuses par la matière dans la plage spectrale s'étendant du proche ultraviolet au très proche infrarouge, soit entre 180 et 1100 nm, a été étudiée d'un

point de vue fondamental [40]. Cette partie du spectre est désignée par l'«UV/Visible», car elle englobe les radiations perceptibles par l'œil humain.

La spectrométrie d'absorption UV-visible n'est pourtant pas utilisée comme méthode de routine d'identification des polymères. En effet, contrairement aux spectres infrarouges, les spectres UV-visible des polymères ne présentent généralement pas de bandes d'absorption suffisamment caractéristiques pour permettre l'identification des échantillons. Les principales applications de la spectrométrie UV-visible dans le domaine des polymères concernent plus spécialement l'analyse d'adjuvants, de colorants et de pigments. L'analyse du vieillissement des polymères est abordée sur un aspect qualitatif [40].

D'une manière générale la spectroscopie UV-Visible apporte peu d'informations structurales, mais elle a en revanche, beaucoup d'applications en analyse quantitative. Les calculs de concentration qui découlent de la loi de Beer et Lambert ont donné naissance à la méthode connue sous le terme général de « colorimétrie ».

L'analyse structurale faite à partir de spectres électroniques est assez problématique, dans la mesure où elle a un faible apport d'informations. Soixante ans avant l'arrivée des techniques d'identification que nous connaissons maintenant (spectroscopie IR), la spectrométrie UV/Visible a été utilisée dans ce but. L'étude des spectres d'un grand nombre de molécules a permis d'établir des corrélations entre structures et positions des maxima d'absorption. Les plus connues sont les règles empiriques, dues à Woodward, à Fieser et à Scott, qui concernent les composés carbonylés insaturés, les diènes ou les stéroïdes [42].

Nous utilisons la spectroscopie UV dans le cadre de notre étude pour mettre en évidence les échantillons qui contiennent des stabilisants anti-UV, vu que ces derniers absorbent les rayonnements dans la région de l'ultraviolet.

La figure VI.4 montre le spectre de l'échantillon neuf dans la région de l'ultraviolet et le visible. On note la présence d'une bande d'absorption à environ 230 et une autre à 290 nm. Selon la littérature [annexe 3], ces bandes d'absorption sont caractéristiques du stabilisant et de l'anti-UV présent dans l'échantillon du polyéthylène neuf.

La figure VI.5, décrit le spectre ultraviolet de l'échantillon stabilisé exposé 3 ans au rayonnement contenant un anti UV. On voit l'apparition d'une large bande d'absorption entre 200 et 240 nm, ce qui n'est pas le cas pour l'échantillon neuf.

Cette bande est due à la formation de groupes carbonyle C=O (esters) [annexe 3], ce qui confirme le fait que des réactions de dégradation avec coupure des chaînes ont eu lieu pendant l'exposition. Ceci confirme les résultats obtenus lors de la caractérisation en spectroscopie infrarouge.

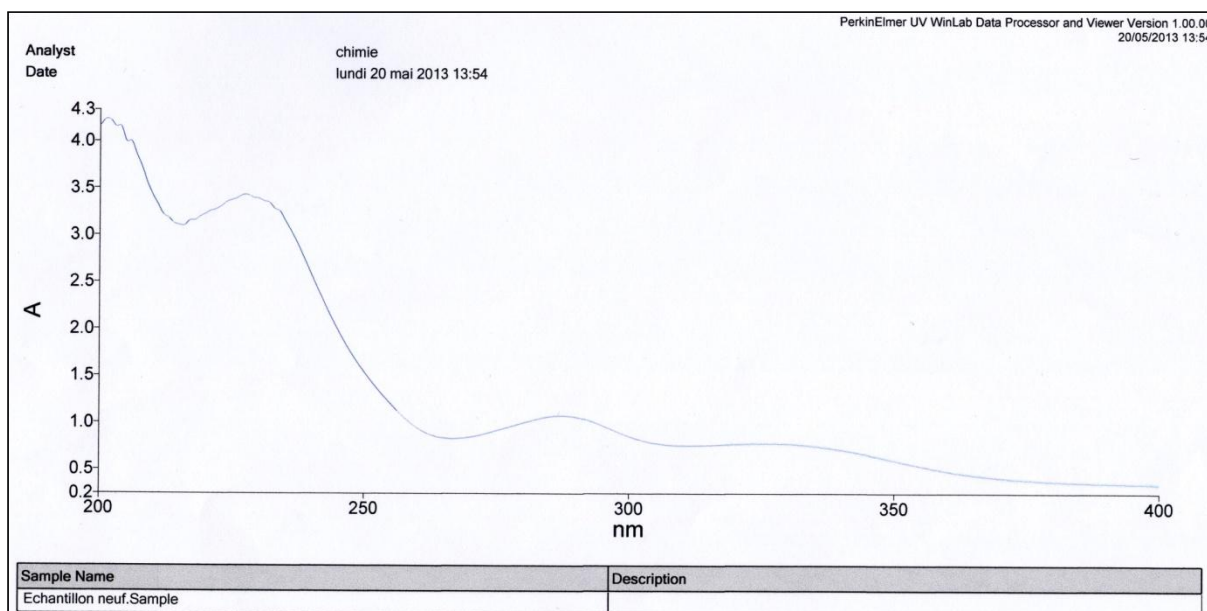


Figure VI.4 : Spectre UV de l'échantillon neuf

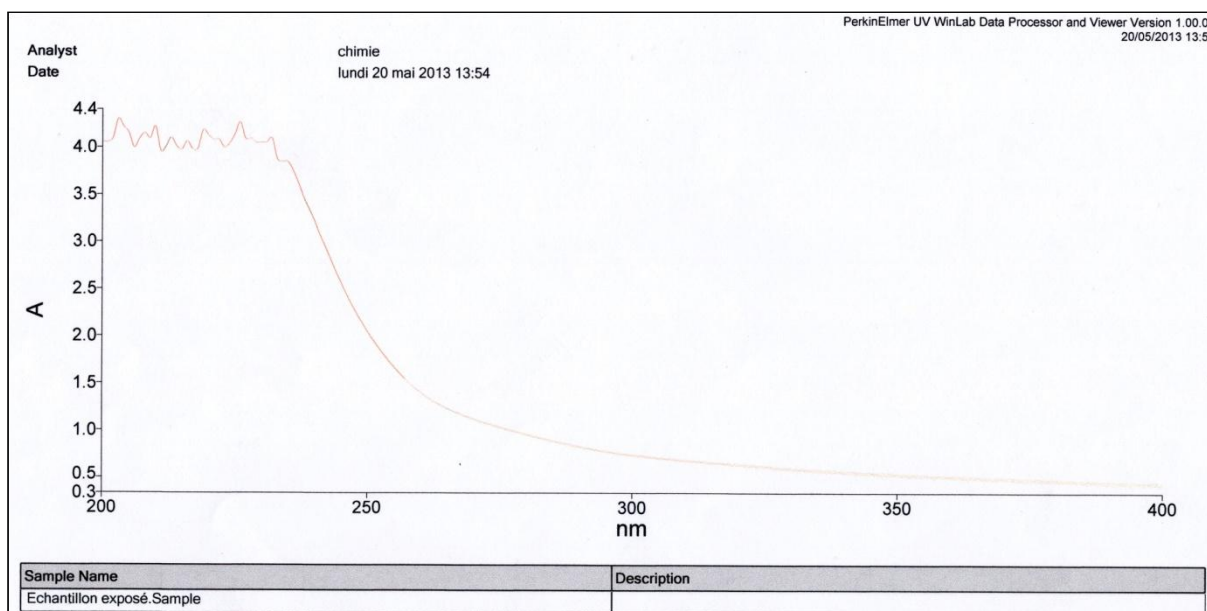


Figure VI.5 : le spectre UV de l'échantillon stabilisé anti-UV exposé

La figure VI.6 montre le spectre ultraviolet pour l'échantillon ordinaire qui ne contient pas de stabilisant et d'anti UV.

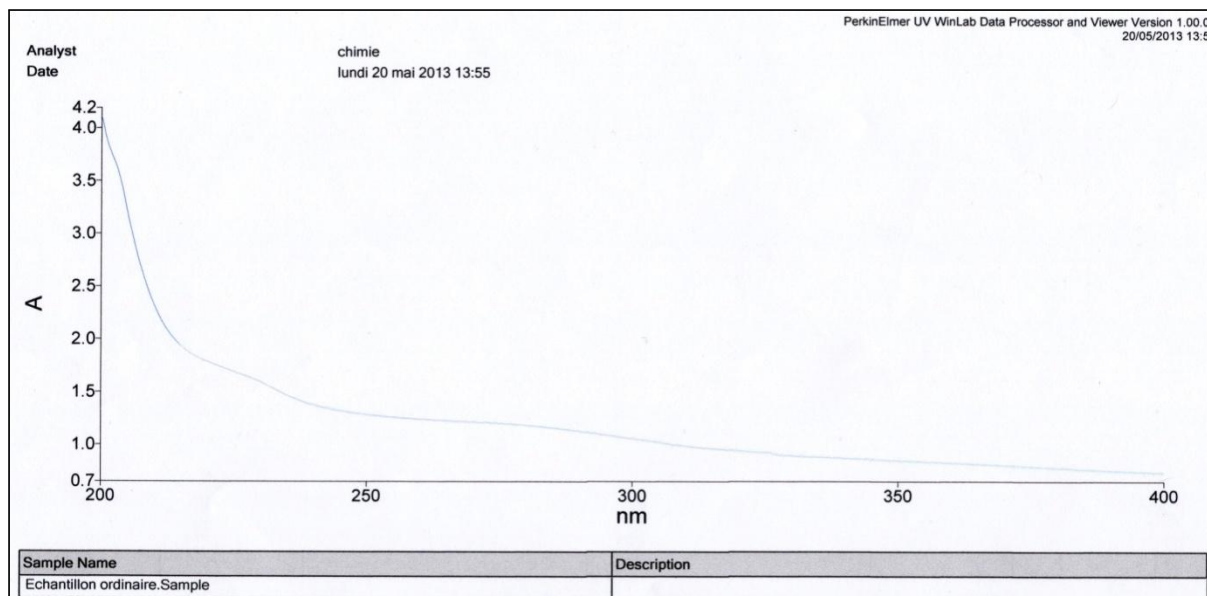


Figure VI.6 : Spectre UV de l'échantillon ordinaire

On note l'absence des bandes d'absorptions mentionnées dans l'échantillon neuf stabilisé, ce qui confirme que l'échantillon ordinaire ne comporte pas de stabilisant et d'anti-UV, en le rendant plus vulnérable au rayonnement par la diminution de sa durée de vie pendant l'exposition.

VI.2.3 La transmission des rayonnements :

Le rendement de la centrale cheminée solaire est fonction du rendement de son collecteur. Ce dernier caractérise la conversion des radiations solaires en énergie thermique, pour chauffer l'air sous le collecteur. Afin d'avoir des températures élevées à l'intérieur du collecteur, il faut que ce dernier ait un maximum de transmittivité pour que les rayonnements solaires soient convertis en chaleur.

Une étude a été faite pour déterminer l'effet du vieillissement sur la transparence des films de polyéthylènes [43] servant d'abri-serres pour la culture des piments. Nous nous sommes inspirés de cette étude pour voir l'effet du vieillissement sur la transparence d'un collecteur en films de polyéthylène.

L'expérience a été conduite sur deux abri-serres couverts de polyéthylène simple paroi, d'une année d'utilisation (S1) et de deux années d'utilisation (S2) à la station expérimentale de l'Ecole Supérieure d'Horticulture de Chott-Mariem, Sousse-Tunisie.

Le rayonnement global a été mesuré durant plusieurs jours par des pyranomètres placés à l'extérieur et à l'intérieur des deux abri-serres (S1 et S2) et des valeurs moyennes ont été déterminées. Le rapport du rayonnement global moyen à l'intérieur de l'abri-serre à celui de l'extérieur définit le facteur de transmission lumineuse. La différence entre le rayonnement global moyen à l'extérieur et celui à l'intérieur de l'abri-serre exprimée par rapport au rayonnement global moyen à l'extérieur détermine le facteur d'absorption et de réflexion.

La figure VI.7 montre la variation du rayonnement global le long d'une journée pour les 2 abri-serres S1 et S2.

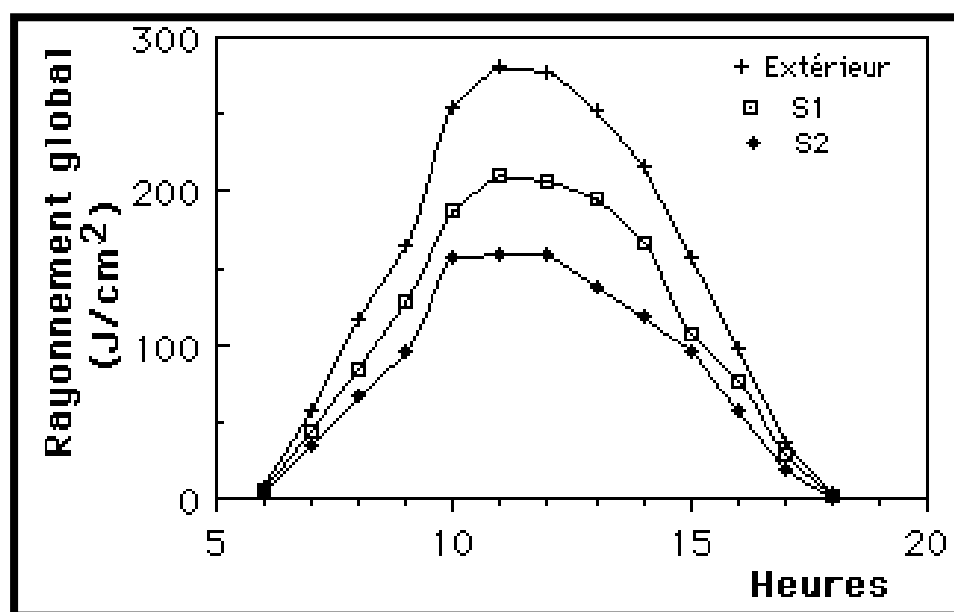


Figure VI.7: Variation du rayonnement global mesuré le long d'une journée claire du mois de mars des deux abri-serres S1 et S2.

On remarque que le rayonnement intercepté par l'abri-serre S1 (utilisé pendant 1 an) est plus élevé par rapport à celui intercepté par S2 (2 ans d'utilisation), soit une différence maximale de 50 J/cm² durant une journée correspondant à 25 % d'abaissement d'éclairement maximale de S2 par rapport à S1.

Le tableau VI.3 fournit les coefficients de transmission pour les deux abri-serres S1 et S2. On voit que le coefficient de transmission moyen de l'abri-serre S1 est de 0,73 ; il est supérieur à celui de l'abri-serre S2 qui est de 0,58. Ce qui implique que l'abri-serre S1 utilisé pendant 1 an transmet mieux la lumière que S2 que celui qui est utilisé pendant 2 ans.

Le tableau VI.4 donne les facteurs d'absorptions et de réflexions des deux abri-serres S1 et S2.

Tableau VI.3. Coefficients de transmission lumineuse de deux couvertures d'abri-serres de première (S1) et de deuxième année d'utilisation (S2)

Nébulosité	Moyennes des radiations globales · (J/cm ² /jour)			Coefficients de transmission lumineux	
	S ₁	S ₂	Extérieur	KS ₁	KS ₂
Jour clair	1424 ^x	1113	1950	0,73	0,57
Jour peu nuageux	961 ^y	744	1318	0,73	0,58
Jour nuageux	637 ^z	516	879	0,72	0,58
Moyenne	1007	801	1382	0,72	0,58

x: la moyenne de 30 jours, y: la moyenne de 17 jours et z: la moyenne de 12 jours.

Tableau VI.4. Facteurs d'absorption et de réflexion du rayonnement global des deux couvertures d'abri-serres de première (S1) et de deuxième année d'utilisation (S2).

Moyenne des radiations globales absorbées et réfléchies par le polyéthylène		Facteur d'absorption et de réflexion du polyéthylène	
abri-serre S ₁	abri-serre S ₂	abri-serre S ₁	abri-serre S ₂
526 ^x	837	0,27	0,43
357 ^y	574	0,27	0,41
241 ^z	363	0,28	0,41
Moyennes			
375	581	0,27	0,42

x: la moyenne de 30 jours, y: la moyenne de 17 jours et z: la moyenne de 12 jours.

Les valeurs des facteurs, d'absorption et de réflexion, confirment que l'abri-serre S2 réfléchit plus la lumière (0,42) que l'abri-serre S1 (0,27). Ainsi, l'utilisation de la couverture en polyéthylène durant deux années augmente l'opacité du film, en moyenne de 15% par rapport à celui utilisé pendant 1 an seulement.

Les résultats de cette étude [43] permettent de conclure que le vieillissement des films de polyéthylène, suite à leur exposition au rayonnement solaire et à l'environnement extérieur,

diminue leur transmission lumineuse et augmente leur absorption et réflexion donc leur opacité aux rayonnements solaires. Ce phénomène s'explique par les réactions d'oxydations et de coupure de chaînes que subi le film, déjà observées lors de la caractérisation optique. Cette diminution de transmittivité influe négativement sur le rendement du collecteur en film de plastique d'une centrale cheminée solaire vu qu'il dépend du coefficient de transmission du film.

VI.2.4 Conclusion :

Pour conclure on peut noter que : l'exposition naturelle de films polyéthylène, non stabilisé ou comportant un stabilisant anti-UV, met en évidence le lien entre leur structure chimique et morphologique et l'évolution de leurs propriétés mécaniques.

Le rôle principal est joué par la fraction ultraviolette contenue dans le spectre solaire. Des petites quantités des défauts moléculaires et d'impuretés (chromophores) qui absorbent la fraction ultraviolette réduisent grandement la stabilité des polymères.

La dégradation des films de polyéthylène est traduite par l'apparition des groupements carbonyle (C=O) (des esters) due aux réactions de coupure des chaînes après l'exposition au rayonnement solaire.

Les films de PEBD stabilisés sont caractérisés par une meilleure tenue au vieillissement climatique que celui de PEBD non stabilisé, car le rôle principal des stabilisants est de protéger le polyéthylène des effets UV véhiculés par le spectre solaire, c'est-à-dire empêcher les réactions d'oxydation d'avoir lieu.

Les films de polyéthylène exposés au climat extérieur et au rayonnement solaire deviennent plus opaques à la lumière en vieillissant, ce qui peut influencer négativement sur les performances de la centrale cheminée solaire et sur le rendement de son collecteur.

VI.3 Caractéristiques mécaniques

VI.3.1 Essai de traction

L'essai de traction a été effectué sur des échantillons de PEBD neufs, sur des échantillons soumis à une dégradation naturelle et enfin sur des échantillons soumis à une dégradation artificielle.

La figure VI.8 représente les courbes de contraintes-allongements obtenus pour l'échantillon neuf. Le tableau VI.5 résume les résultats des différents essais effectués.

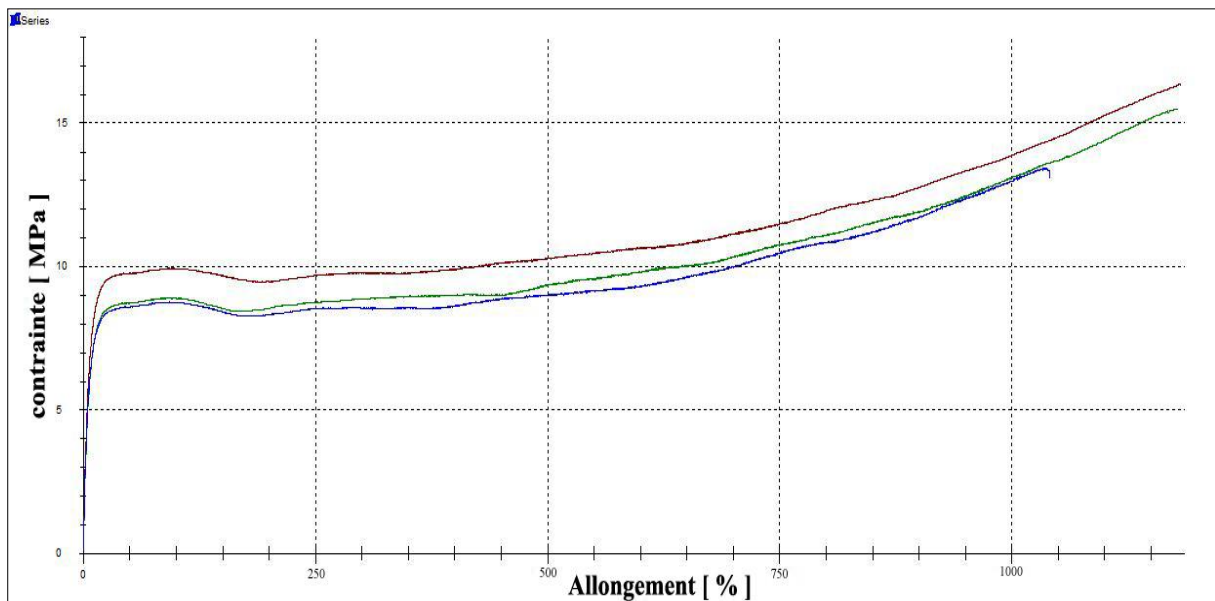


Figure VI.8 : Courbes contraintes-allongements pour l'échantillon neuf.

Tableau VI.5 : Résultats des essais de traction pour l'échantillon neuf.

Nr	Ep [mm]	L [mm]	L0 [mm]	S0 [mm ²]	FR [MPa]	Along-rupture [%]
1	0.17	10	50	1.7	16.26	1182
2	0.17	10	50	1.7	15.45	1178
3	0.17	10	50	1.7	13.07	1041
\bar{x}	0.17	10	50	1.7	14.93	1134

Avec :

Ep : épaisseur de l'éprouvette ;

L : largeur de l'éprouvette ;

L0 : longueur initiale entre mâchoires ;

S0 : section initiale de l'éprouvette ;

FR : contrainte à la rupture.

Le tableau VI.5 donne les dimensions des éprouvettes utilisées ainsi que les contraintes et les allongements à la rupture obtenus pour chaque essai. Parmi les essais effectués, on a

éliminé les essais erronés. Une moyenne, \bar{x} , est calculée à partir de 3 essais pour faciliter la comparaison.

La figure VI.8 montre que les courbes des trois essais de traction ont la même allure et ne contiennent pas des irrégularités, ceci est dû à l'homogénéité de l'échantillon traité.

La figure VI.9 donne les courbes relatives aux contraintes-allongements obtenues pour l'échantillon exposé au rayonnement solaire pendant 3 ans.

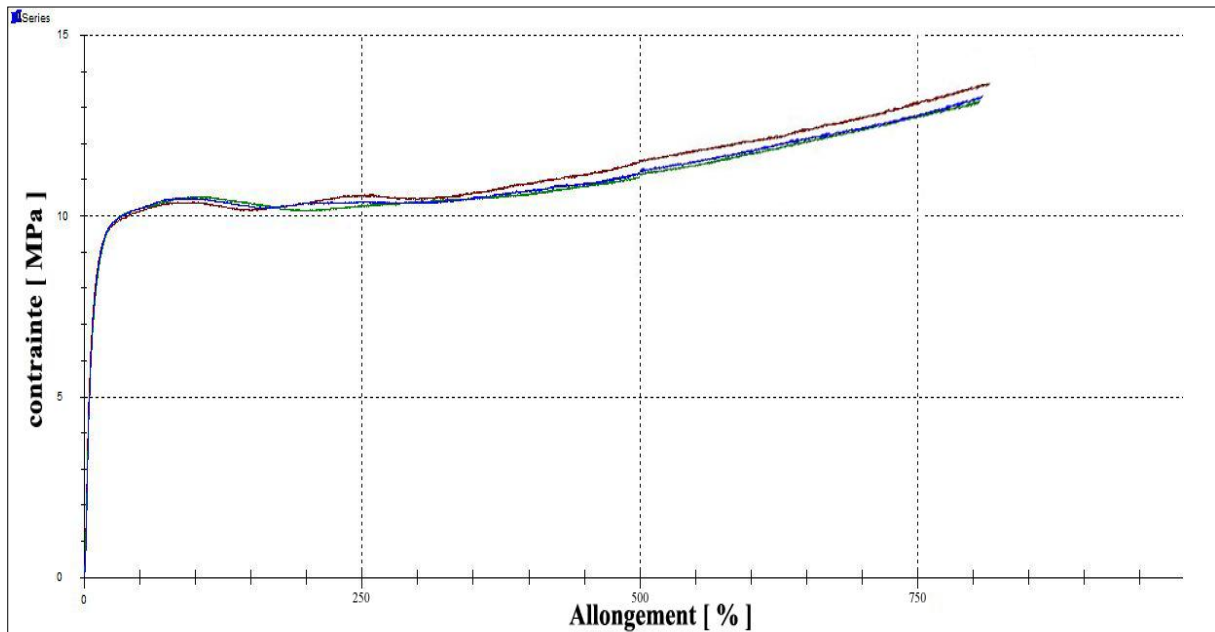


Figure VI.9 : courbes contraintes-allongements pour l'échantillon soumis à une dégradation naturelle pendant 3 ans.

Le tableau VI.6 ci- dessous résume les résultats des 3 essais de traction correspondants.

Tableau VI.6 : Résultats des essais de traction pour l'échantillon soumis à une dégradation naturelle pendant 3 ans.

Nr	Ep [mm]	L [mm]	LO [mm]	S0 [mm ²]	FR [MPa]	Along-rupture [%]
1	0.16	10	50	1.6	13.35	821
2	0.16	10	50	1.6	13.56	849
3	0.16	10	50	1.6	13.71	818
\bar{x}	0.16	10	50	1.6	13.54	829

La figure VI.10 montre l'allure des courbes relatives aux contraintes-allongements obtenues pour l'échantillon ordinaire exposé au rayonnement solaire pendant une année. On note que les courbes contrainte-allongements des 3 essais de tractions ont la même allure mais

contiennent des irrégularités vu que l'échantillon ordinaire contient une structure non homogène

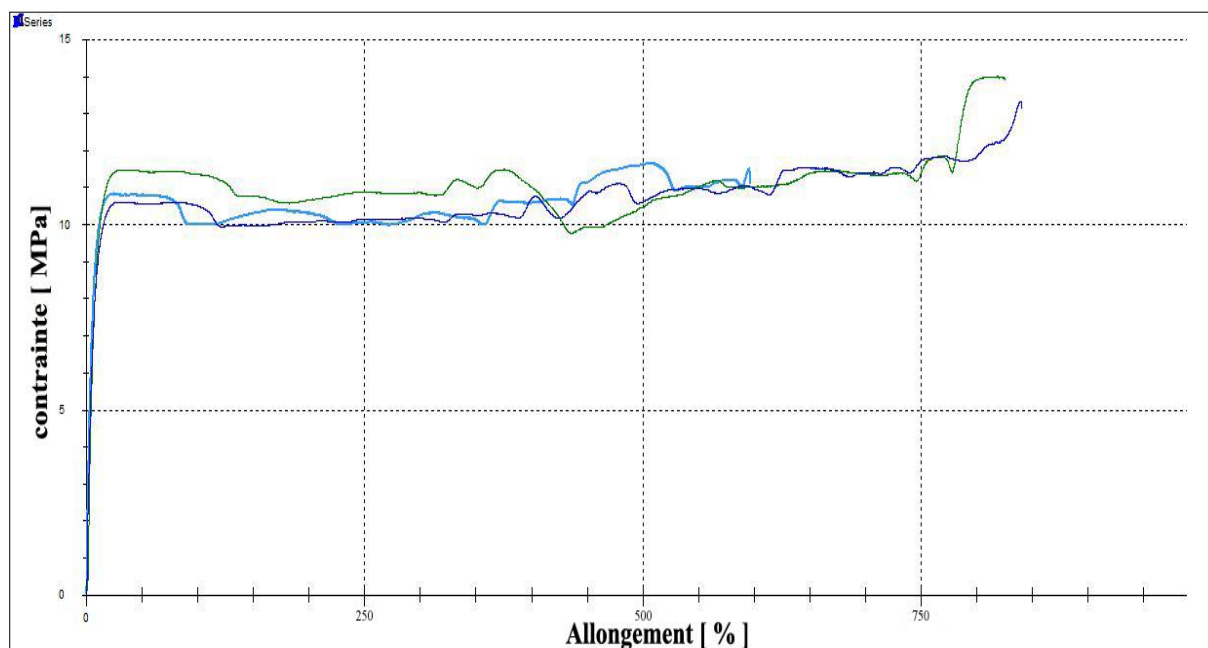


Figure VI.10 Courbes contraintes-allongements pour l'échantillon ordinaire.

Le tableau VI.7 résume les résultats des 3 essais de traction correspondants.

Tableau VI.7 : Résultats des essais de traction pour l'échantillon soumis à une dégradation naturelle pendant 1 an.

Nr	Ep [mm]	L [mm]	LO [mm]	SO [mm ²]	FR [MPa]	Along-rupture [%]
1	0.26	10	50	2.6	11.12	597
2	0.26	10	50	2.6	13.91	826
3	0.26	10	50	2.6	13.11	840
\bar{x}	0.26	10	50	2.6	12.71	754

Les figures VI.11 et VI.12 donnent la comparaison des contraintes et des allongements moyens à la rupture des trois échantillons précédents : le neuf, celui soumis à une dégradation naturelle pendant 3 ans et l'échantillon ordinaire.

La figure VI.11 montre que l'allongement moyen à la rupture de l'échantillon neuf est supérieur à celui qui est soumis à une dégradation naturelle pendant 3 ans : l'allongement du premier est de 1134 % à la rupture alors que le second n'est que de 829 % (tableaux VI.5 et VI.6). La contrainte à la rupture moyenne suit l'évolution de l'allongement à la rupture et diminue avec la diminution de ce dernier, pour l'échantillon exposé au rayonnement solaire

pendant 3 ans, elle est de 13,54 MPa alors qu'elle est de 14,93 MPa pour l'échantillon neuf. Cela peut être expliqué par la détérioration des propriétés mécaniques du film du polyéthylène due à des réactions de réticulations et de ruptures de chaînes [32] suite à l'exposition au rayonnement solaire, aux températures élevées et aux intempéries du climat extérieure : vent, pluieetc., ce qui rend le plastique plus vulnérable et limite son allongement.

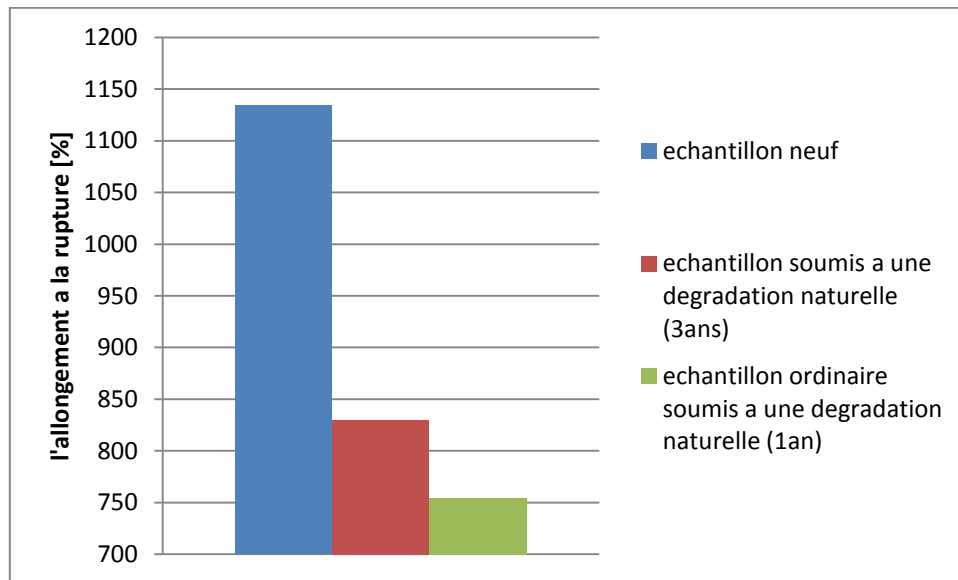


Figure VI.11 : Allongements à la rupture moyens des 3 échantillons.

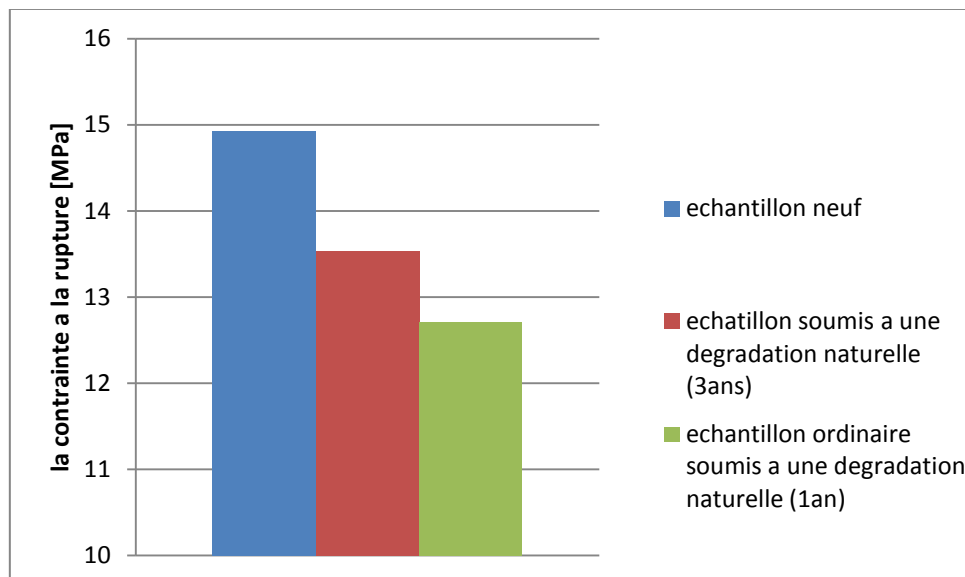


Figure VI.12: Contraintes à la rupture moyennes des 3 échantillons.

La figure VI.12 donne les valeurs de la déformation et de la contrainte à la rupture moyenne de l'échantillon ordinaire, respectivement égales à 12.71MPa et 754 %. On remarque que les 2 caractéristiques de cet échantillon sont inférieures à celles de l'échantillon qui est soumis à une dégradation naturelle (13,54 MPa, 829 %) malgré que ce dernier soit exposé au rayonnement pour une durée supérieure au premier échantillon (1 an, 3 ans). La chute rapide des propriétés mécaniques de l'échantillon ordinaire est due au fait qu'il ne contient pas de stabilisants anti-UV ce qui favorise les réactions de scissions des chaînes entraînant ainsi la dégradation accélérée de l'échantillon.

Sur la figure VI.13, sont représentées les courbes de contraintes-allongements de l'échantillon soumis à une dégradation artificielle d'un jour. On note que les courbes correspondant aux 3 essais ont la même allure, sont proches les une des autres et ne contiennent pas d'irrégularités.

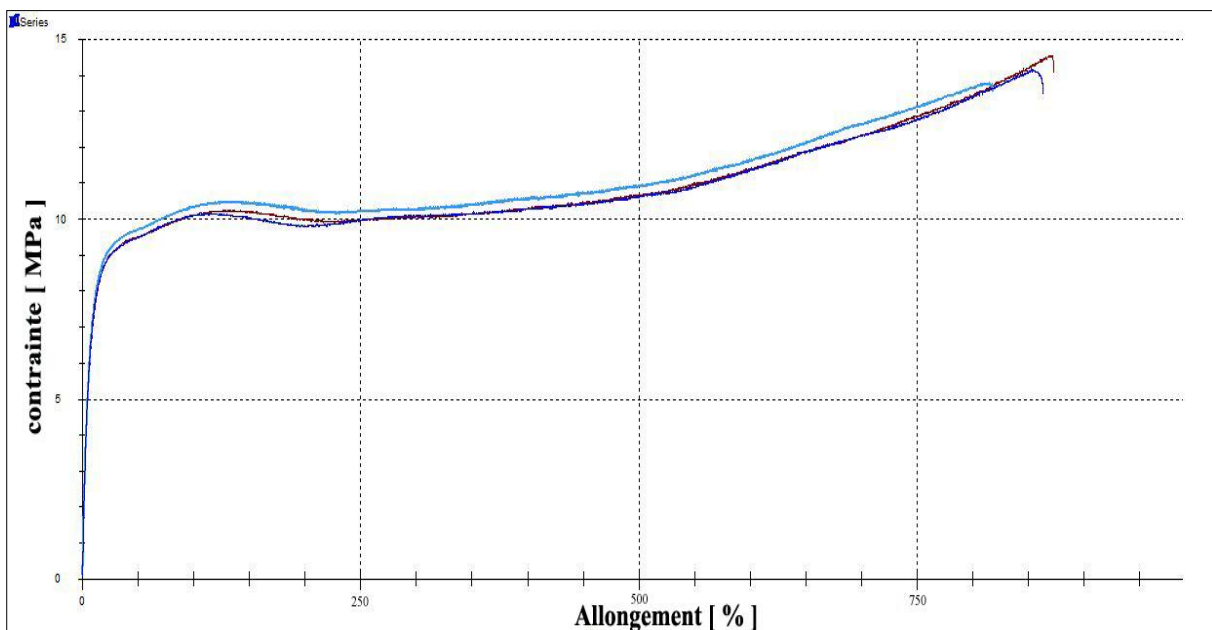


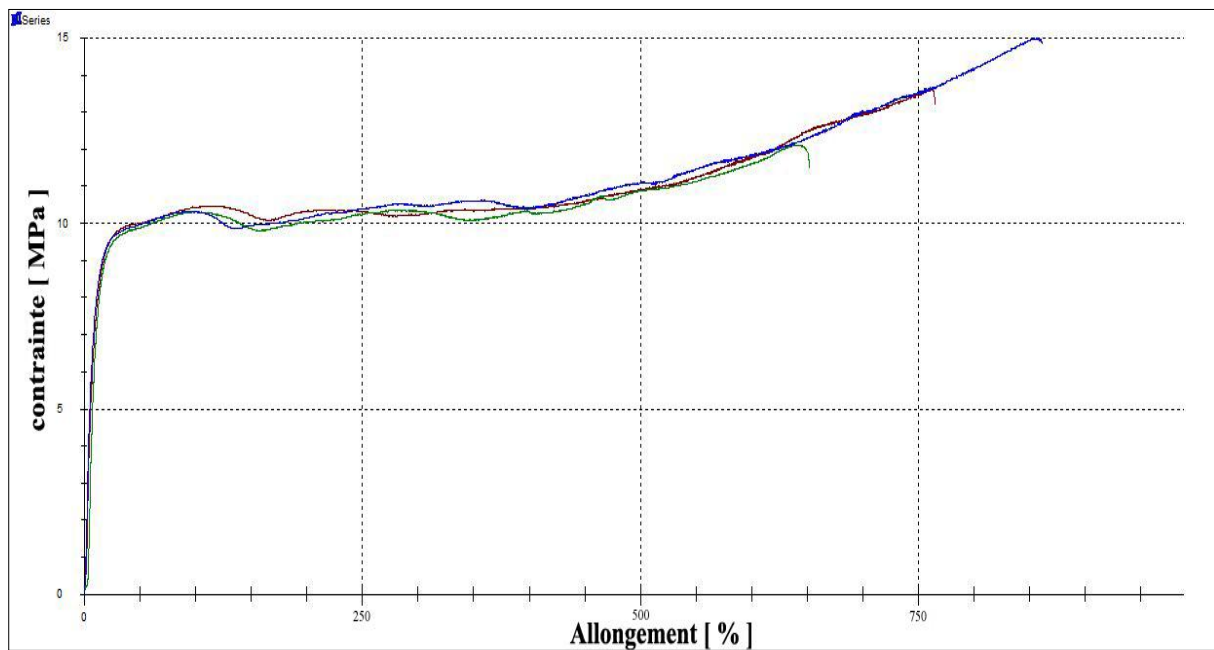
Figure VI.13 : Courbes contraintes-allongements pour l'échantillon soumis une dégradation artificielle pendant 1 jour.

Les résultats des 3 essais de traction sur l'échantillon dégradé pendant 1 jour sont résumés dans le tableau VI.8 ci- dessous.

Tableau VI.8 : Résultats des essais de traction pour l'échantillon soumis une dégradation artificielle d'un jour.

Nr	Ep [mm]	L [mm]	LO [mm]	SO [mm ²]	FR [MPa]	Along-rupture [%]
1	0.16	10	50	1.6	14.05	872
2	0.16	10	50	1.6	13.56	818
3	0.16	10	50	1.6	13.47	863
\bar{x}	0.16	10	50	1.6	13.69	851

La figure VI.14 montre l'allure des courbes des charges en fonction des déformations pour l'échantillon soumis à une dégradation artificielle pendant 3 jours.

**Figure VI. 14.** Courbes contraintes-allongements pour l'échantillon soumis une dégradation artificielle pendant 3 jours

Le tableau VI.9 ci- dessous, donne le résumé des résultats obtenus.

Tableau VI. 9. Résultats des essais de traction pour l'échantillon soumis une dégradation artificielle pendant 3 jours

Nr	Ep [mm]	L [mm]	LO [mm]	SO [mm ²]	FR [MPa]	Along-rupture [%]
1	0.16	10	50	1.6	13.17	765
2	0.158	10	50	1.58	11.45	652
3	0.158	10	50	1.58	14.81	861
\bar{x}	0.1586	10	50	1.586	13.14	759

Les figures VI.15 et VI.16 montrent la comparaison des contraintes et des allongements à la rupture moyens des 4 échantillons : le neuf, celui dégradé artificiellement pendant 1 jour et 3 jours et en dernier l'échantillon exposé et dégradé naturellement par le rayonnement solaire pendant 3 ans. Sur la figure VI.15, on remarque que la contrainte à la rupture moyenne des échantillons de plastique dégradés artificiellement est plus faible par rapport à celle de l'échantillon neuf qui est de 14.93 MPa (tableau VI.5). On observe aussi que la contrainte à la rupture décroît avec la durée de dégradation artificielle : elle est de 13.69 MPa pour l'échantillon soumis à 1 jour de dégradation alors qu'elle n'est que de 13.14 MPa pour l'échantillon soumis à 3 jours de dégradation (Tableaux VI.8 et VI.9). Ce résultat est conforme à celui de la littérature [32].

On note également que la contrainte à la rupture de l'échantillon ayant subi une dégradation artificielle pendant 3 jours (13.14 MPa) est inférieure à celle de l'échantillon exposé au rayonnement solaire pendant 3 ans (13.54 Mpa, selon le tableau VI. 6).

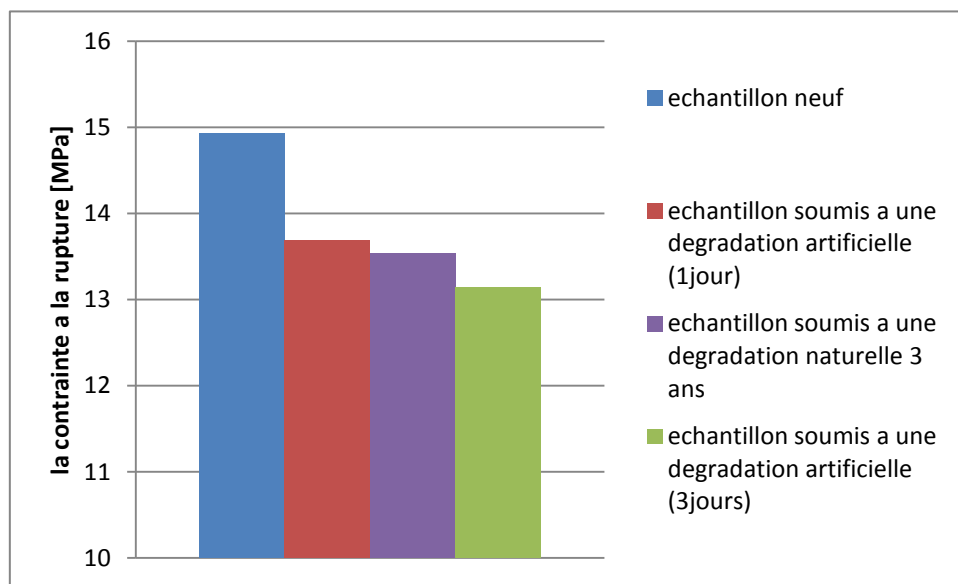


Figure VI. 15. Contraintes à la rupture moyennes des 4 échantillons.

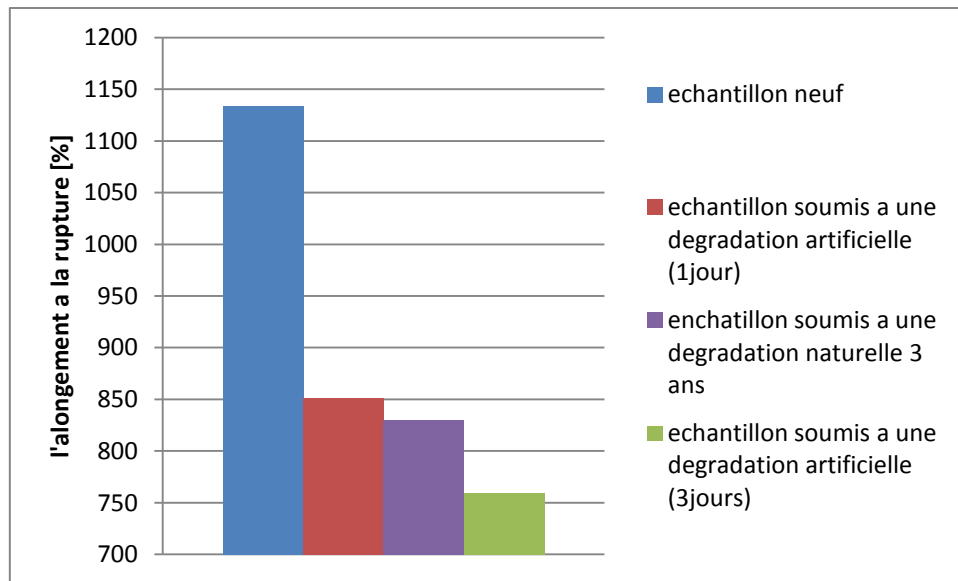


Figure VI.16 : Allongements à la rupture moyens des 4 échantillons.

La figure VI.16 donne une comparaison des allongements moyens entre les différents échantillons étudiés. Nous remarquons que l'échantillon neuf détient le plus haut allongement avec 1134% (tableau VI.5), suivi de l'échantillon soumis à une dégradation d'un jour avec 851% (tableau VI.9) d'allongement, vient en troisième position l'échantillon exposé au soleil pendant 3ans avec 829% (tableau VI.6). L'allongement à la rupture le plus faible correspond à l'échantillon dégradé pendant 3 jours avec 759% (tableau VI.9).

On note que les déformations à la rupture des différents échantillons sont proportionnelles à celles des contraintes à la rupture et présentent les mêmes tendances.

La chute des propriétés mécaniques de l'échantillon du polyéthylène qui a subi une dégradation artificielle accéléré et qui se traduit par la diminution de la déformation à la rupture et de la contrainte à la rupture qu'on observe entre l'échantillon dégradé pendant 1 jour et celui dégradé pendant 3 jours est due aux réactions de coupures de chaînes liée à la thermo-oxydation qui ont eu lieu [32].

Les résultats obtenus montrent que la dégradation artificielle accélérée qu'a subie l'échantillon du polyéthylène pendant 3 jours dépasse celle de la dégradation naturelle qu'a subie l'échantillon exposé au rayonnement solaire pendant 3 ans. Ce qui implique qu'on peut trouver une corrélation entre la dégradation artificielle accélérée dans un laboratoire qui donnerait la même perte de propriétés mécaniques que la dégradation naturelle au rayonnement solaire.

On peut donc estimer à partir des 3 échantillons analysés (le neuf, le dégradé d'un 1 jour et le dégradé de 3 jours) une durée de dégradation artificielle qui donnerait une chute d'allongement à la rupture égale à celle de l'échantillon exposé au rayonnement solaire pendant 3 ans.

La figure VI.17 montre l'évolution de la perte de l'allongement à la rupture en fonction du temps de dégradation artificielle du l'échantillon du polyéthylène. En faisant une approche exponentielle de la courbe en 3 points ($y = 1061,9e^{-0,123x}$), on peut déterminer une approche pour le calcul du temps du vieillissement artificielle qui donnerait la même dégradation (allongement à la rupture) que l'échantillon exposé pendant 3 ans (829 %) et qui est supposé égale 2 jours dans pour notre cas.

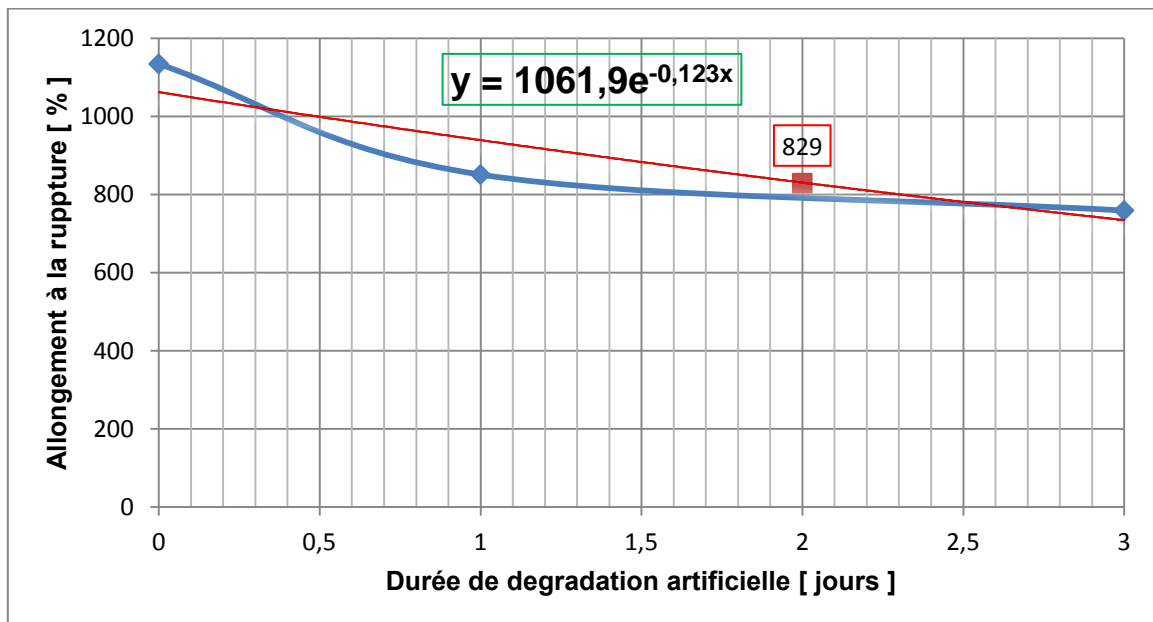


Figure VI.17. Déformation à la rupture en fonction de temps de dégradation artificielle.

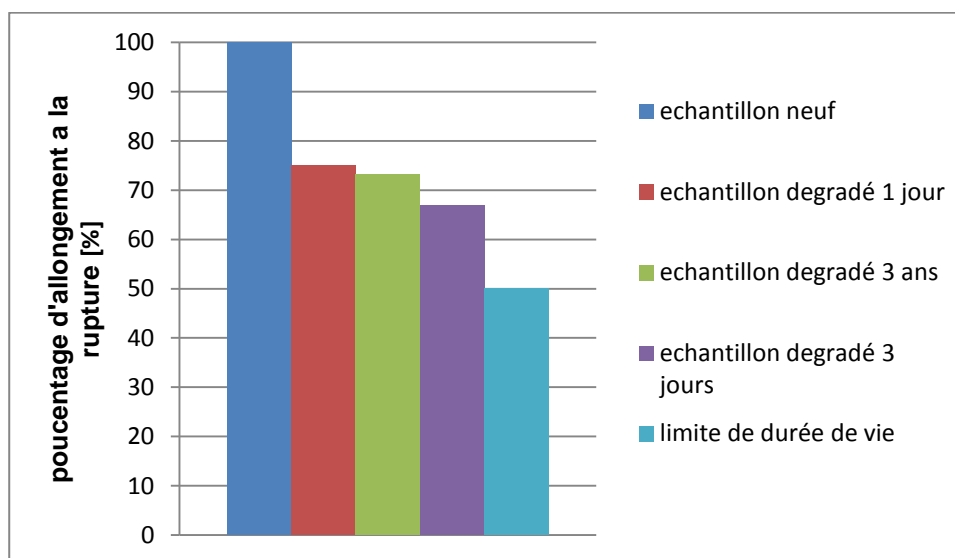
Tous les auteurs [41,32] sont d'accord pour affirmer que la déformation à la rupture est la grandeur mécanique qui représente au mieux l'état de dégradation du matériau, ce qui a amené à introduire la notion de durée de vie comme étant le temps d'exposition nécessaire pour que celle-ci atteigne 50% de sa valeur initiale.

Le tableau VI.10 indique le pourcentage de la durée de vie des différents échantillons étudiés.

Tableau VI.10. Durée de vie des différents échantillons étudiés.

	Allongement a la rupture [%]	Pourcentage d'allongement a la rupture [%]	Pourcentage de durée de vie restante [%]
Echantillon neuf	1134	100	100
Échantillon dégradé 1 jour	851	75.04	50.09
Echantillon dégradé 3 jours	759	66.93	33.86
Echantillon dégradé 3 ans	829	73.10	46.21

Comme on l'avait mentionné précédemment, la durée de vie d'un film de polymère est le temps nécessaire pour atteindre 50 % de l'allongement à la rupture initial. L'échantillon neuf (initial) a un allongement de 1134 %, sa durée de vie sera atteinte pour un allongement égale à 567 %. En se référant au tableau VI.10, on remarque que tous les échantillons traités n'ont pas atteint les 50 % de l'allongement à la rupture initial, le plus proche et est l'échantillon dégradé pendant 3 jours qui a atteint 66.93%. Le tableau montre aussi le pourcentage de durée de vie restante pour chaque échantillon.

**Figure VI.18.** Déformation à la rupture en fonction de temps de dégradation artificielle.

La figure VI.18 indique la position de chaque échantillon par rapport à sa limite de durée de vie.

Des études [41] ont montré que la résistance au déchirement est plus grande dans le sens transversal que dans le sens longitudinal du fait que la propagation des microfissures a lieu plus aisément dans le sens de l'orientation (sens longitudinal). Le PEBD est très sensible à l'orientation c'est-à-dire que les propriétés mécaniques sont améliorées si les macromolécules

ont été orientées dans le sens de l'effort. C'est la raison pour laquelle on a effectué des essais de traction sur l'échantillon qui lui présente une structure non homogène suivant une coupe A parallèle aux lames de fibres (longitudinales) et suivant une coupe B perpendiculaire aux lames de fibres (transversale). Le tableau VI.11 ci-dessous montre les allongements à la rupture obtenus dans les 2 sens.

La lecture de ce tableau montre que l'allongement à la rupture moyen de l'échantillon ordinaire suivant la coupe B (transversale) est égal à 847% alors que celui relatif à la coupe A (longitudinale) est de 534 %, ce qui donne un rapport d'allongement transversal / longitudinal de 1.58 alors qu'il devrait être au voisinage de 1 dans le cas homogène, ceci est le degré d'anisotropie de l'échantillon du plastique ordinaire (structure anisotrope). Ainsi, la chute des propriétés mécaniques à la rupture est plus accentuée dans le sens longitudinal (sens de fabrication) que dans le sens transversal. L'échantillon neuf présente par contre, une structure assez homogène. Le degré d'anisotropie n'est pas trop significatif.

Tableau VI.11. Résultats des essais de traction dans les 2 sens pour l'échantillon ordinaire.

Coupe A	Nr	Ep [mm]	L [mm]	LO [mm]	S0 [mm ²]	FR [MPa]	Along-rupture [%]
	1	0.214	10	50	2.14	11.12	597
	2	0.214	10	50	2.14	8.67	547
	3	0.214	10	50	2.14	9.29	840
	\bar{x}	0.214	10	50	2.14	9.69	534
Coupe B	Nr	Ep [mm]	L [mm]	LO [mm]	S0 [mm ²]	FR [MPa]	Along-rupture [%]
	1	0.214	10	50	2.14	14.61	873
	2	0.214	10	50	2.14	15.13	855
	3	0.214	10	50	2.14	13.52	813
	\bar{x}	0.214	10	50	2.14	14.42	847

D'un point de vue moléculaire, le degré d'orientation des micros fibrilles et leur organisation rendent difficile la propagation d'une fissure perpendiculairement à l'axe de la fibre. La scission des liaisons fortes C-C est le principal mécanisme de la rupture des fibres sollicitées en tension suivant les axes [44].

Il est bien connu que le module de Young est lié aux énergies de cohésion des matériaux et qu'il est d'autant plus important que les interactions soient fortes. Dans un test de traction, les chaînes bougent les unes par rapport aux autres, ce qui provoque la destruction des liens intermoléculaires forts, ainsi, les chaînes rigides auront des modules d'élasticité plus grands.

Les valeurs du module d'Young que nous avons obtenu lors des essais de traction montrent une évolution variable entre les différents échantillons alors qu'ils devraient augmenter avec leur vieillissement. Ceci peut être dû à la qualité des films étudiés, au protocole de vieillissement suivi, aux effets de l'environnement et à la machine de traction utilisée qui rend difficile l'obtention de résultats conforme à la littérature.

VI.3.2 Essai de dureté

Afin d'avoir des résultats plus précis en termes de dureté et rigidité, on a fait des essais de « dureté Shore » spéciaux pour les films de plastique.

Le tableau VI.12 et la figure VI.19 présentent les résultats des essais de dureté effectués ainsi qu'une comparaison entre les différents échantillons étudiés.

Tableau VI.12. Résultats des essais de dureté Shore des différents échantillons.

	neuf	Degr.Artifi.1jour	Degr.Artifi.3jours	Degr.natur.3ans
1	54	53.6	53.2	56.2
2	52.4	55.2	54.6	55.3
3	53.6	52.4	53.8	55.6
4	52.2	53	54.2	56.1
5	53	53.4	53.5	54
\bar{x}	53.04	53.52	53.86	55.44

On remarque que la dureté augmente avec le temps de dégradation artificielle : elle est égale à 53.52 degré pour l'échantillon dégradé pendant 1 jour, de 53.86 degré pour l'échantillon dégradé pendant 3 jours, et elle n'est que de 53.04 pour l'échantillon neuf. On note également que les résultats relatifs aux essais de dureté sont inversement proportionnels aux résultats obtenus précédemment sur l'allongement à la rupture pour les 3 échantillons, ce qui est conforme aux résultats issus de la littérature [32].

L'échantillon soumis à une dégradation naturelle pendant 3 ans représente le plus degré de dureté par rapport aux autres échantillons avec 55.44 degré. En termes de dureté, la dégradation artificielle n'est pas aussi nette par rapport à l'allongement à la rupture.

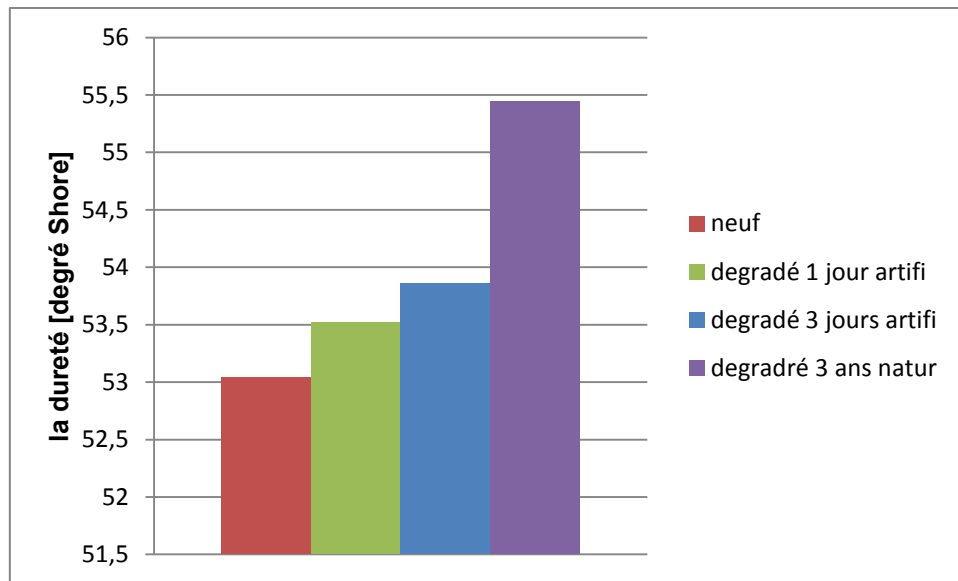


Figure VI. 19. Dureté Shore pour différents échantillons

Ces résultats confirment que les échantillons ont subi des réactions de réticulations lors de la dégradation photo ou thermo-oxydante (vieillessement artificielle et naturelle) [32].

VI.3.3 Conclusion

Le matériau constituant les collecteurs des centrales à cheminée solaire peut être constitué en verre. En raison, de son prix de revient économiquement cher et à la difficulté liée à son transport et à son emplacement, on opte pour un collecteur en films de plastiques utilisés pour le serres agricoles.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, on s'est intéressé à la caractérisation du collecteur en film de plastique en polyéthylène sous son aspect mécanique, dans le souci de voir l'influence du vieillissement sur le comportement mécanique du plastique.

Les résultats obtenus sur les essais de traction montrent que les propriétés mécaniques du film de plastique se détériorent avec le temps de vieillissement, ce qui se traduit par la diminution de l'allongement et de la contrainte à la rupture due aux réactions de réticulations et de ruptures de chaînes qui se produisent au niveau moléculaire.

La dureté du film de plastique devient plus élevée avec le temps de vieillissement, le matériau plastique devient plus dur et fragile.

A travers les essais expérimentaux effectués, nous avons essayé de simuler une dégradation artificielle accéléré qui donnerait les mêmes résultats qu'un film de plastique

exposé au rayonnement solaire dans un environnement saharien où la température atteint 50° C le jour et 5° la nuit. On a pu ainsi dépasser la dégradation de l'échantillon exposé pendant 3 ans en 3 jours de vieillissement artificielle.

L'intérêt principal de ce vieillissement accéléré est d'observer l'évolution des propriétés mécaniques des films en polyéthylène au cours d'un temps réduit pour estimer une date limite d'utilisation optimale, et d'avoir une idée sur la durée de vie des films de plastique constituant le collecteur, qui est considéré comme étant le temps pour lequel l'allongement à la rupture devient égal à 50 % de l'initiale.

Cette durée de vie est déterminée à partir du temps de la dégradation totale en vieillissement accéléré et convertie après avec des corrélations qui lient les 2 modes (vieillissement accéléré-naturel) pour obtenir à la fin la durée de vie réel de l'échantillon, ces corrélations sont obtenus expérimentalement.

La prédiction de la durée de vie des films de plastique servira à éviter les dégâts comme le déchirement de collecteur pouvant influencer considérablement sur les performances énergétiques des centrales à cheminée solaire.

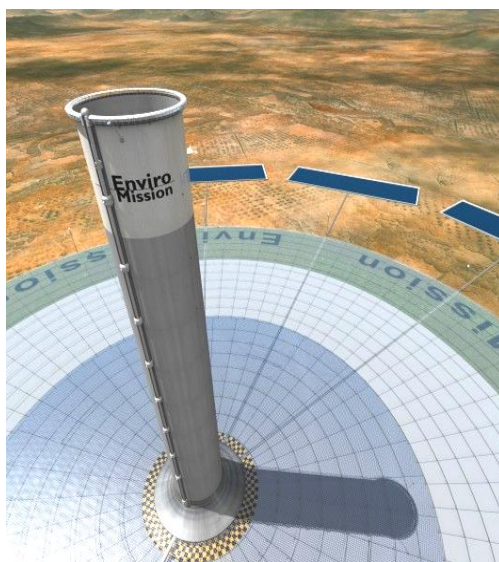
En termes de gestion, la connaissance de la durée de vie peut nous aider à établir des programmes de maintenance préventive ou bien des révisions pour le collecteur, toutes ces considérations rentreront dans le contexte prévention et de la minimisation de dégâts .

Les résultats obtenus montrent aussi que la qualité et l'homogénéité des films de plastique jouent un rôle dans la dégradation des propriétés mécaniques. Pour un échantillon non homogène, l'allongement et la résistance à la rupture varient avec l'orientation des lignes des fibres, ces dernières sont dues à la procédure de fabrication et à la composition du film.

La différence de la résistance au déchirement avec l'orientation des fibres du plastique (sens longitudinale et transversale) nous donne une idée sur la manière dont devrait se faire le montage des films dans le collecteur, en fonction de la direction du vent dans la région et des dimensions des panneaux.

Si la direction du vent est connue, l'emplacement des films dans la position où les lignes des fibres soient perpendiculaires au vent donne une durée de vie plus grande par rapport à l'autre sens.

Conclusion Générale



Conclusion générale

L'énergie solaire est d'un intérêt primordial pour un grand nombre de pays, y compris l'Algérie, qui dispose d'un potentiel solaire très important par rapport à plusieurs régions du globe. Avec les problèmes environnementaux liés à l'utilisation irrationnelle des combustibles fossiles, l'énergie solaire pourra constituer une alternative forte intéressante dans l'avenir et son exploitation pourra devenir un facteur important dans la diversification des formes énergétiques que recèle l'humanité.

Dans le cadre de ce projet, on s'est intéressé à la détermination des performances énergétiques des centrales de production d'énergie électrique à base de cheminée solaire. La région d'Adrar a été choisie comme site d'étude compte tenu de l'importance de son gisement solaire par rapport aux autres régions du pays et compte tenu de la banque de données annuelle disponible sur la température ambiante et l'irradiation solaire. L'analyse des performances énergétiques a été établie sur la base de l'utilisation du modèle de Schlaich et al. [3]

Le rendement énergétique de la centrale dépend de celui de la cheminée, de l'aérogénérateur et du collecteur. Nous nous sommes intéressés particulièrement au rendement du collecteur compte tenu de son importance sur la captation du rayonnement solaire et la transformation de l'énergie solaire en énergie cinétique de mouvement d'air dans le système collecteur- cheminée. L'importance des propriétés photo- thermiques du capteur est décisive dans le choix du vitrage ou du matériau plastique pour le captage du rayonnement.

Dans le cadre de cette étude on s'est intéressé à un matériau plastique de type film de polyéthylène utilisé dans les serres agricoles. Il est bien évident que l'influence du rayonnement solaire, du sable et du vent sur ce matériau plastique n'est pas sans conséquence sur son vieillissement, engendrant ainsi une altération de ses propriétés, mécaniques (traction, dureté) et photo- thermiques (transmittivité). Dans ce contexte, des essais mécaniques ont été faits sur le matériau, ces essais sont relatifs à des essais de traction et de dureté. La détermination des propriétés photo- thermiques a été réalisée sur des spectrophotomètres, à Infrarouge et à Ultra violet visible.

Les résultats obtenus ont montré que la capacité de production d'électricité dans la cheminée dépend de l'irradiation solaire captée, de la température ambiante, de la hauteur de la tour et de la surface du collecteur. Les rendements, du collecteur et de la turbine, jouent un rôle très important dans les performances du système et qu'il n'y a pas de dimensions optimales physiques pour la hauteur de la cheminée et le diamètre du collecteur ; les dimensions optimales sont déterminées sur la base de considérations économiques.

Le calcul des performances d'une tour solaire similaire au prototype de Manzanares (Espagne) implanté sur le site d'Adrar en Algérie a montré que la puissance maximale

atteinte par la centrale avoisine 55 kW ce qui correspondant, en considérant les mêmes heures de fonctionnement que le prototype de Manzanares, à une production maximale d'énergie supérieure à 700 kWh par jour ce qui est largement supérieur à celle du prototype d'Espagne qui est de 270 kWh par jour. L'énergie annuelle moyenne produite est de l'ordre de 128 MWh, cette énergie est suffisante pour satisfaire les besoins des populations isolées de la région.

L'analyse des spectres infrarouges a montré que le film de plastique exposé au rayonnement solaire et à l'environnement extérieur subi des dégradations photo-oxydantes au niveau moléculaire qui se traduit par des réactions d'oxydations, ses coupures de chaînes moléculaires et l'apparition de groupement carbonyles. Les spectres UV ont montré que les films contenant un stabilisant anti-UV absorbent le rayonnement ultraviolet solaire et empêche leurs dégradation ce qui leur procure une meilleur durée de vie.

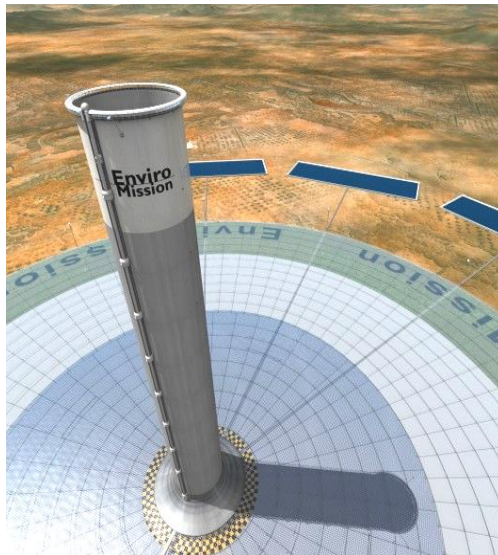
La dégradation des films plastiques de polyéthylène suite à leur vieillissement sous l'effet du rayonnement solaire et de l'environnement (vent, sable..), induit la détérioration des propriétés mécaniques de ce matériau. Les essais mécaniques de traction ont montré que les propriétés mécaniques du film de plastique se détériorent avec le temps de vieillissement, ce qui s'est traduit par la diminution de l'allongement et de la contrainte à la rupture due aux réactions de réticulations et de ruptures de chaînes moléculaires. La dureté devient plus élevé avec le temps ce a pour conséquence le durcissement du collecteur engendrant ainsi sa fragilité.

Le vieillissement accéléré au laboratoire permet de suivre l'évolution des propriétés mécaniques du film constituant le collecteur pendant un temps réduit, en permettant de prédire la durée de vie de ces derniers afin d'établir un programme de maintenance approprié.

Le rendement du collecteur dépend de sa transparence aux rayonnements solaire, une étude faite sur les films de polyéthylène a démontré qu'ils deviennent plus opaques aux rayonnements en vieillissant ce qui vas influencer négativement sur les performances de la centrale cheminée solaire.

Comme perspectives, et afin de compléter ce travail, nous recommandons de faire des essais de vieillissement accéléré des films de plastiques pendant un temps plus large pour pouvoir mieux suivre l'évolution de leurs propriétés mécanique et d'établir un modèle qui tient compte de l'influence de la dégradation sur le rendement du collecteur et des performances de la centrale. Une comparaison entre collecteurs, en film de plastique et en verre, en termes de performances et de rentabilité est aussi une démarche à envisager.

Références Bibliographiques



Références bibliographiques

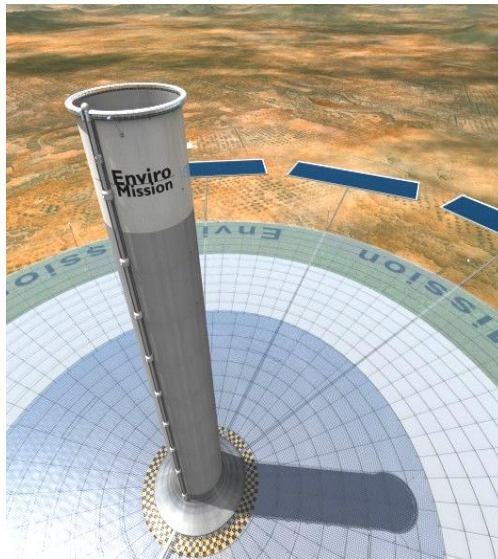
- [1] **Marín, P. G. G., Fontecha, G. G., Geisen, O.** Tours solaire, Energie renouvelable. Rapport interne, ENSTA Paris Tech, 2011.
- [2] **Freris, L., Infield, D.** Les énergies renouvelables pour la production d'électricité, Edition Dunod, Paris, 2009.
- [3] **Schlaich, J.**, the solar chimney, Axel Menges Edition, Stuttgart, Germany, 1995.
- [4] **Bernard, R., Menguy, G., Schwartz, M.** Le rayonnement solaire, conversion thermique et application. Technique et Documentation, Paris, 1979.
- [5] **Ben Gheza, M. L.** Impact de l'espace entre les deux vitrages sur le rendement d'un capteur solaire, Mémoire de magister, Université de KASDI MERBAH Ourgala, 2009.
- [6] **Bernardes, M.A dos S., VoB, A., Weinrebe, G.** Thermal and Technical Analyses of Solar Chimneys. Solar Energy Vol.75, pp.511-524, 2003.
- [7] **Chassériaux, J.M.**, Conversion thermique du rayonnement solaire, bordas Paris, 1984.
- [8] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Pyrhéliomètre>.
- [9] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Pyranomètre>.
- [10] **Chems Eddine Chitour**, Les énergies renouvelables et la maîtrise de l'énergie en Algérie. Ecole Nationale Polytechnique, Acte du séminaire, éditions Sonelgaz, 25 Juin 2008.
- [11] **Haaf, W., Friedrich, K., Mayr, G., and Schlaich, J.** Solar Chimneys, Part I: Principle and Construction of the Pilot Plant in Manzanares. Solar Energy, Vol. 2, pp. 3-20, 1983.
- [12] **Haaf, W.** Solar towers, Part II: Preliminary Test Results from the Manzanares Pilot Plant. Solar Energy, Vol. 2, pp. 141-161, 1984.
- [13] fr.wikipedia.org/wiki/Tour_solaire.
- [14] Enviromission. Website address: <http://www.enviromission.com.au> .
- [15] **Schlaich J.& Schiel W.** Solar Chimneys. Encyclopedia of Physical Science and Technology, Pages 99-109, 2004.
- [16] www.climaterra.fr, 15/03/2014.

- [17] **Zhou, X., Yang, J., Xiao, B., Hou, G.** Experimental study of temperature field in a solar chimney power setup. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 27, pp. 2044-2050, 2007.
- [18] **Schlaich, J., Bergermann, R., Schiel, W., Weinrebe, G.,** 2003. Design of commercial solar tower systems – utilization of solar induced convective flows for power generation, In: *Proceedings of the International Solar Energy Conference, Kohala Coast, United States*, pp. 573–581.
- [19] **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.
- [20] http://www.gov.cn/english/2010-12/28/content_1773883.htm .
- [21] *Le Journal de l'Innovation (France)* publié Le 10-06-2008.
- [22] **Pasumarthi, N., Sherif, S.A.** Experimental and theoretical performance of demonstration solar chimney model— Part I: mathematical model development. *International Journal of Energy Research*, 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. *International Journal of Energy Research*, Vol.22, pp.443–61, 1998.
- [24] **Padki, M. M., Sherif, S. A.** On a Simple Analytical Model for Solar Chimneys. *Int. J. Energy Res.*, Vol.23, pp.345-349, 1999.
- [25] **Schlaich, J., Bergermann, R., Schiel, W., Weinrebe, G.** Design of commercial solar Updraft tower systems – utilization of solar induced convective flows for power generation, In: *Proceedings of the International Solar Energy Conference, Kohala Coast, United States*, pp. 573–581, 2003.
- [26] **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.
- [27] **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.
- [28] **Ming, T. Z., Liu, W., Xu, G.L.** Analytical and numerical simulation of the solar chimney power plant systems. *Int J Energy Res.*, Vol. 30, pp. 861–873, 2006.
- [29] **Zhou, X., Yang, J., Xiao, B., Hou, G., Xing, F.** Analysis of chimney height for solar chimney power plant. *Applied Thermal Engineering Res.*, Vol. 29, pp. 178- 185, 2009.

- [30] **Boualleg, S. M.** Analyse des Performances Energétiques de centrales Cheminées Solaires par utilisation de différents Modèles Mathématiques. Mémoire de Magister. Ecole Nationale Polytechnique, 2012.
- [31] **Nicaud, P.** Les Matière Plastiques. Projet Troisième Rob'Ok, Hachette Multimédia, 2007.
- [32] **Irinislimane, R.** Valorisation du polyéthylène Basse Densité régénéré par couplage avec l'élastomère Ethylène-Propylène-Diène-Méthylène ». Mémoire de Magister. Ecole Nationale Polytechnique, 2004.
- [33] **Francois, D.** Essais mécaniques des matériaux, Technique de l'ingénieur M120, M123, M126 et M127, Février 1996.
- [34] http://fr.wikipedia.org/wiki/Dureté_Brinell.
- [35] http://fr.wikipedia.org/wiki/Dureté_Rockwell.
- [36] **Combette, P., Ernoult, I.** Physique des polymères, tome II, Hermann, 2006.
- [37] **Labouret, A.** Pascal Cumunel, Jean-Paul Braun, Benjamin Faraggi. Cellules solaires les bases de l'énergie photovoltaïque, Dunod, Paris, 2010.
- [38] **Legrand, M.,** Méthode spectrométriques d'analyse et de caractérisation, techniques spectrométriques, Génie des procédés, Rapport interne, Ecole des Mines de Saint-Etienne, 2009.
- [39] **Legrand, M.** Spectrophotométrie d'absorptions dans l'ultraviolet, le visible et l'infrarouge, Technique de l'ingénieur, mai 2013.
- [40] **Di Benedetto, D., Breuil, P.** Spectrophotométrie d'absorption dans l'ultraviolet et le visible, Technique de l'ingénieur, 10/03/2007.
- [41] **Lounas A., Hadjadj M., Dakmouch M., Saidi M. et Sabaa M.** Vieillissement Naturel des Films en Polyéthylène Utilisés Comme Couverture de Serres Agricoles dans la Région de Ouargla, annales de sciences et technologie , Vol.4, N°2, Ouargla, Novembre 2012.
- [42] **Pavia, D. L., Lampman, G. M., Kriz, G. S.,** Introduction to spectroscopy, Thomson Learning, 2001.
- [43] **Denden, M., Bouslama, M., Morjène, H., Mathlouthi, M., Bouaouina, T., Chéour, F.** Comparaison des effets des couvertures en polyéthylène des abri-serres de première et de deuxième année d'utilisation sur la croissance et le développement du piment fort, Tropicultura, Ecole Supérieure d'Horticulture de Chott-Mariem, Sousse, Tunisie. 2002.
- [44] **Combette, P., Ernoult, I.** Physique des polymères, tome I, Hermann, 2005.

- [45] **Bacq, R.** Le guide de l'énergie solaire et les pompes a chaleur, édition marabout, Paris, 1982.
- [46] **Chergui, T.** Modélisation des Ecoulements dans les Cheminées Solaires, Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Juin 2007.
- [47] **Bathias, C., Pineau, A.** Fatigue des matériaux et des structures 3, Lavoisier, Paris, 2009.
- [48] **Morill, S.,** Identification spectrométrique des composés organiques, Edition de Boeck and Larcier, Paris, 1998.

Annexes



A SIMPLIFIED CORRELATION CHART				
Type of Vibration			Frequency (cm^{-1})	intensity
C-H	Alkanes	(stretch)	3000-2850	s
	-CH ₃	(bend)	1450 and 1375	m
	-CH ₂ -	(bend)	1465	m
	Alkanes	(stretch)	3100-3000	m
		(out-of-plane bend)	1000-650	s
	Aromatics	(stretch)	3150-3050	s
		(out-of-plane bend)	900-690	s
	Alkyne	(stretch)	Ca. 3300	s
	Aldehyde		2900-2800	w
			2800-2700	w
C-C	Alkane		Not interpretatively useful	
C=C	Alkene		1680-1600	m-w
	Aromatic		1600 and 1475	m-w
C≡C	Alkyne		2250-2100	m-w
C=O	Aldehyde		1740-1720	s
	Ketone		1725-1705	s
	Carboxylic acid		1725-1700	s
	Ester		1750-1730	s
	Amide		1680-1630	s
	Anhydride		1810 and 1760	s
	Acid chloride		1800	s
C-O	Alcohols, ethers, ester, carboxylic acids, anhydrides		1300-1000	s
O-H	Alcohols, phenols			
	Free		3650-3600	m
	H-bonded		3400-3200	m
	Carboxylic acids		3400-2400	m
N-H	Primary and secondary amines and amides			
	(stretch)		3500-3100	m
	(bend)		1640-1550	m-s
C-N	Amines		1350-1000	m-s
C=N	Imines and oximes		1690-1640	w-s
C=N	Nitrites		2260-2240	m
X-C-Y	Allenes, ketenes, isocyanates, isothiocyanates		2270-1940	m-s
N=O	Nitro (R-NO ₂)		1550 and 1350	s
S-H	Mercaptans		2550	w
S-O	Sulfoxides		1050	s
	Sulfones, sulfonyl		1375-1300 and	s
	chlorides, sulfates, sulfonamide		1350-1140	
	s			
C-X	Fluoride		1400-1000	s
	Chloride		785-540	s
	Bromide, iodide		<667	s
	(bend)		1640-1550	m-s

Annexe 1 : Nombre d'onde des absorptions caractéristiques des groupes fonctionnels [42]

2.9 HOW TO APPROACH THE ANALYSIS OF SPECTRUM (OR WHAT YOU CAN TELL AT A GLANCE)

When analyzing the spectrum of an unknown, concentrate your first efforts on determining the presence (or absence) of a few major functional groups. The C=O, O-H, N-H, C-O, C=C, C≡C, C≡N, and NO₂ peaks are the most conspicuous and give immediate structural information near 3000 cm⁻¹. Almost all compounds have these absorptions. Don't worry about subtleties of exact environment with the functional group is found. Following is a major checklist of the important gross features.

1. Is a carbonyl group present? The CO group gives rise to a strong absorption in the region 1820-1660 cm⁻¹. The peak is often the strongest in the spectrum and medium width. You can't miss it.

2. If C=O is present, check the following types (if it is absent, go to 3)

ACIDS

is O-H also present?

AMIDES

- broad absorption near 3400-2400 cm⁻¹ (usually overlaps C-H)

is NH also present?

- Medium absorption near 3400 cm⁻¹, sometimes a double peak with equivalent halves

ESTERS

is C-O also present?

- strong-intensity absorption near 1300-1000 cm⁻¹

ANHYDRIDES

is aldehyde C-H present?

- two C=O absorptions near 1810 and 1760 cm⁻¹

KETONES

the preceding five choices have been eliminated.

3. If CO is absent:

ALCOHOLS, PHENOLS

check for O-H

- broad absorption near 3400-3300 cm⁻¹
- confirm this by finding C-O near 1300-1000 cm⁻¹

AMINES

check N-H

- medium absorption(s) near 3400 cm⁻¹

ETHERS

check for C-O near 1300-1000 cm⁻¹ (and absence of O-H near 3400 cm⁻¹)

<p>4. Double bonds and/or aromatic rings</p>	<ul style="list-style-type: none"> • C=C is a weak absorption near 1650 cm^{-1} • Medium to strong absorption is the region $1600\text{--}1450\text{ cm}^{-1}$, these often imply an aromatic ring • Confirm the double bond or aromatic ring by consulting the C-H region ; aromatic and vinyl C-H occurs to the left of 3000 cm^{-1} (aliphatic C-H occurs to the right of this value)
<p>5. Triple bonds</p>	<ul style="list-style-type: none"> • C≡N is a medium, sharp absorption near 2250 cm^{-1} • C≡C is a weak, sharp absorption near 2150 cm^{-1} • Check also for acetylenic C-H near 3300 cm^{-1}
<p>6. Nitro groups</p>	<ul style="list-style-type: none"> • two strong absorptions at $1600\text{--}1530\text{ cm}^{-1}$ and $1390\text{--}1300\text{ cm}^{-1}$
<p>7. Hydrocarbons</p>	<ul style="list-style-type: none"> • none of the preceding is found • major absorptions are in C-H region 3000 cm^{-1} • very simple spectrum : the only other absorptions appear near 1460 and 1375 cm^{-1}
<p>The beginning student should resist the idea of trying to assign or interpret every peak in the spectrum . you simply will not be able to do it. Concentrate first on learning these major peaks and recognizing their presence or absence . this is best done by carefully studying the illustrative spectra in the section that follow.</p>	

Annexe 2 : l'algorithme pour l'interprétation infrarouge [42]

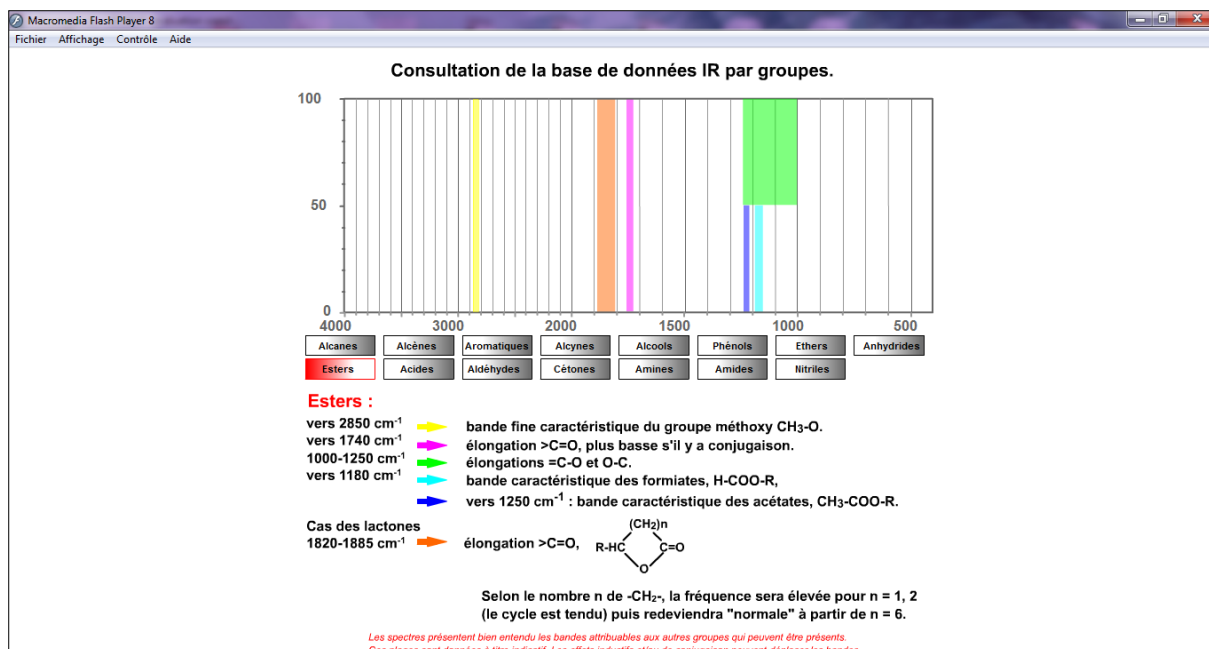
7.17 WHAT TO LOOK FOR IN AN ULTRAVIOLET SPECTRUM: A PRACTICAL GUIDE

It is often difficult to extract a great deal of information from a UV spectrum used by itself. It should be clear by now that a UV spectrum is most useful when at least a general idea of the structure is already known; in this way, the various empirical rules can be applied. Nevertheless, several generalizations can serve to guide our use of UV data. These generalizations are a good deal more meaningful when combined with infrared and NMR data—which can, for instance, definitely identify carbonyl groups, double bonds, aromatic systems, nitro groups, nitriles, enones, and other important chromophores. In the absence of infrared or NMR data, the following observations should be taken only as guidelines.

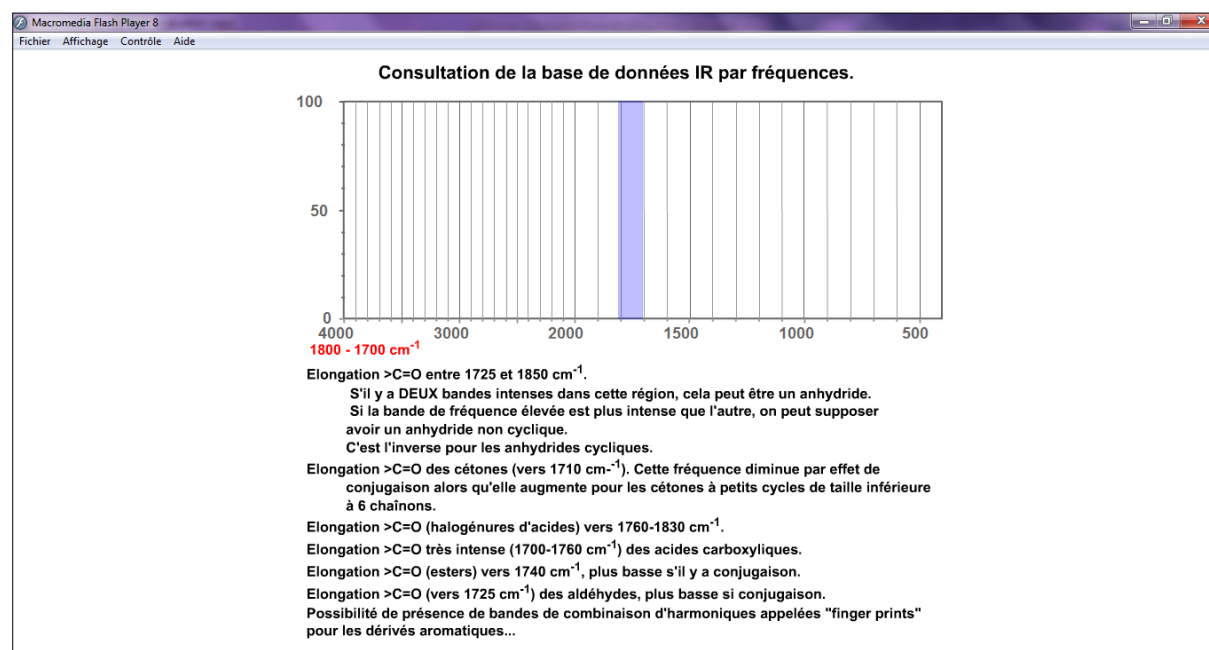
1. A single band of low to medium intensity ($\epsilon = 100$ to $10,000$) at wavelengths less than 220 nm usually indicates an $n \rightarrow \sigma$ transition. Amines, alcohols, ethers, and thiols are possibilities, provided the nonbonded electrons are not included in a conjugated system. An exception to this generalization is that the $n \rightarrow \pi^*$ transition of cyano groups ($-\text{C}\equiv\text{N}:$) appears in this region. However, this is a weak transition $\epsilon < 100$, and the cyano group is easily identified in the infrared. Do not neglect to look for $\text{N}-\text{H}$, $\text{O}-\text{H}$, $\text{C}=\text{O}$, and $\text{S}-\text{H}$ bands in the infrared spectrum.
2. A single band of low intensity ($\epsilon = 10$ to 100) in the region 250 to 360 nm , with no major absorption at shorter wavelengths (200 to 250 nm), usually indicates an $n \rightarrow \pi^*$ transition. Since the absorption does not occur at long wavelength, a simple, or unconjugated, chromophore is indicated, generally one that contains an O , N , or S atom. Examples of this may include $\text{C}=\text{O}$, $\text{C}=\text{N}$, $\text{N}=\text{N}$, $-\text{NO}_2$, $-\text{COOR}$, $-\text{COOH}$, or CONH_2 . Once again, infrared and NMR spectra should help a great deal.
3. Two bands of medium intensity ($\epsilon = 1,000$ to $10,000$), both with λ above 200 nm , generally indicate the presence of an aromatic system. If an aromatic system is present, there may be a good deal of fine structure in the longer-wavelength band (in nonpolar solvents only). Substitution on the aromatic rings increases the molar absorptivity above $10,000$, particularly if the substituent increases the length of the conjugated system.
In polynuclear aromatic substances, a third band appears near 200 nm , a band that in simpler aromatics occurs below 200 nm , where it cannot be observed. Most polynuclear aromatics (and heterocyclic compounds) have very characteristic intensity and band-shape (fine-structure) patterns, and they may often be identified via comparison to spectra that are available in the literature. The textbooks by Jaffe and Orchin and by Scott, which are listed in the references at the end of this chapter, are good sources of spectra.

4. Bands of high intensity ($\epsilon = 10,000$ to $20,000$) that appear above 210 nm generally represent either α, β unsaturated ketone (check the infrared spectrum), a diene, or a polyene. The greater the length of the conjugated system, the longer the observed wavelength. For dienes, the λ may be calculated using the Woodward-Fieser Rules (Section 7.10).
5. Simple ketones, acids, esters, amides, and other compounds containing both π systems and unshared electron pairs show two absorptions: an $n \rightarrow \pi^*$ transition at longer wavelengths (>300 nm, low intensity) and a $\pi \rightarrow \pi^*$ transition at shorter wavelengths (<250 nm, high intensity). With conjugation (enones), the λ of the $\pi \rightarrow \pi^*$ band moves to longer wavelengths and can be predicted by Woodward's Rules (Section 7.12). The ϵ value usually rises above $10,000$ with conjugation, and, as it is very intense, it may obscure or bury the weaker $n \rightarrow \pi^*$ transition.
For α, β -unsaturated esters and acids, Nielsen's Rules (Section 7.13) may be used to predict the position of λ_{max} with increasing conjugation and substitution,
6. Compounds that are highly colored (have absorption in the visible region) are likely to contain a long-chain conjugated system or a polycyclic aromatic chromophore. Benzenoid compounds may be colored if they have enough conjugating substituents. For nonaromatic systems, usually a minimum of four to five conjugated chromophores are required to produce absorption in the visible region. However, some simple nitro, azo, nitroso, α, β -diketo, polybromo, and polyiodo compounds may also exhibit color, as may many compounds with quinoid structures.

Annexe 3 : l'algorithme pour l'interprétation ultraviolet [42]



Annexe 4 : interface de logiciel de l'interprétation infrarouge



Annexe 5 : interface de logiciel de l'interprétation infrarouge

TABLE A.4 Thermophysical Properties of Gases at Atmospheric Pressure^a

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^7$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
Air, $M = 28.97$ kg/kmol							
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720
950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	66.7	168	0.726
1100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728
1200	0.2902	1.175	473.0	162.9	76.3	224	0.728
1300	0.2679	1.189	496.0	185.1	82	257	0.719
1400	0.2488	1.207	530	213	91	303	0.703
1500	0.2322	1.230	557	240	100	350	0.685
1600	0.2177	1.248	584	268	106	390	0.688
1700	0.2049	1.267	611	298	113	435	0.685
1800	0.1935	1.286	637	329	120	482	0.683
1900	0.1833	1.307	663	362	128	534	0.677
2000	0.1741	1.337	689	396	137	589	0.672
2100	0.1658	1.372	715	431	147	646	0.667
2200	0.1582	1.417	740	468	160	714	0.655
2300	0.1513	1.478	766	506	175	783	0.647
2400	0.1448	1.558	792	547	196	869	0.630
2500	0.1389	1.665	818	589	222	960	0.613
3000	0.1135	2.726	955	841	486	1570	0.536
Ammonia (NH₃), $M = 17.03$ kg/kmol							
300	0.6894	2.158	101.5	14.7	24.7	16.6	0.887
320	0.6448	2.170	109	16.9	27.2	19.4	0.870
340	0.6059	2.192	116.5	19.2	29.3	22.1	0.872
360	0.5716	2.221	124	21.7	31.6	24.9	0.872
380	0.5410	2.254	131	24.2	34.0	27.9	0.869

Annexe 6 : Tableau des propriétés de l'air