

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA



FACULTE DE TECHNOLOGIE

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

Filière :

Génie des procédés

Spécialité :

Génie des procédés des matériaux

Par :

Mme. BEN AYACHE Ouissam

M^{lle}. TAROUJIT Kamelia

Thème :

**VIEILLISSEMENT CLIMATIQUE DES FILMS AGRICOLES A BASE DU
POLYETHYLENE BASSE DENSITE**

(PEBD) UTILISE DANS LA REGION DE BEJAIA

Soutenu le 10/09/2020 devant le jury composé de :

Président : M. BELHAMEL.K Professeur/Univ. Béjaïa

Examineurs : Mme. BELKACEMI.H Professeur/Univ. Béjaïa

Promoteur : M. DJIDJELLI .H Professeur/Univ. Béjaïa

Dédicaces

A mon mari KHALED

A ma mère

A mon père

A mes frères et mes sœurs

*A mes amis et à tous ceux
qui me sont cher*

OUSSAM

Dédicaces

A mon cher père

ABDELLAH

A ma chère mère LOUZA

A mes chers frères et sœurs

FANZI ET TAREK

A mes chers amis

OUSSAM, YACINE

KAMELIA

REMERCIEMENTS

Nos remerciements vont à notre Directeur de thèse M. **DJIDJELLI Hocine**, à qui nous présentons l'expression de notre profonde gratitude pour son soutien continu, sa disponibilité et ses précieux conseils.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	2
CHAPITRE I : DESCRIPTION DES DIFFERENTS TYPES DE SERRES AGRICOLES	5
I.1 Introduction.....	6
I.2 Les serres agricoles.....	6
I.2.1 Définition	6
I.2.2 Intérêt de la serre.....	7
I.2.3 Choix de la serre et sa couverture	7
I.2.4 Types de serres.....	8
I.2.4.1 Serres tunnels	8
I.2.4.2 Serres multi-chapelle.....	9
I.2.4.3 Serres de jardin.....	11
I.3 Les équipements d'une serre.....	11

I.3.1 Les actionneurs	12
I.3.1.1 Générateur d'air	12
I.3.1.2 Extracteurs	12
I.3.1.3 Double paroi gonflable.....	13
I.3.2 Les capteurs.....	13
I.3.2.1 L'anémomètre	14
I.3.2.2 Le pluviomètre	14
CHAPITRE II : LES POLYMERES UTILISES DANS LES SERRES AGRICOLES ET LEURS	
VIEILLISSEMENTS	15
II.1 Les polymères utilisés dans les serres agricoles	16
II.1.1 Introduction.....	16
II.1.2 Polymères	16
II.1.2.1 Définition des polymères	16
II.1.2.2 Utilisation des polymères dans les serres agricoles	18
II.2 Le vieillissement climatique des polymères	20
II.2.1 Vieillissement des polymères	20
II.2.2 Définitions et mécanismes du vieillissement	20
II.2.2.1 Définition de la biodégradation	20
II.2.2.2 Mécanisme de stabilisation des polymères contre la dégradation	21
II.2.3 Facteurs influençant le vieillissement des polymères	21
II.2.3.1 Facteurs influençant la photo-oxydation des polymères.....	21
II.2.3.2 Facteurs influençant la biodégradation	22
II.2.3.3 Etapes de la biodégradation	23
II.3 Vieillissement du polyéthylène.....	24
II.3.1 Vieillissement naturel du polyéthylène par thermo-oxydation ou photo-oxydation.....	24
II.3.2 Différents types du vieillissement naturel.....	26
II.3.2.1 Vieillissement photochimique	26
II.3.2.2 Vieillissement thermochimique	28
II.3.2.3 Effet de l'oxygéné et de l'ozone	29
II.3.2.4 Effet de l'humidité et de la pluie	29
II.3.2.5 Effet du vent de sable.....	29
II.4 Fonctionnement d'une serre avec les échanges de chaleur	30
II.4.1 Climat sous la serre.....	31
II.4.2 Aspects spécifiques d'une serre	33
II.4.2.1 La photosynthèse	33
II.4.2.2 La respiration	33
II.4.2.3 L'évapotranspiration.....	34
II.4.3 Source d'énergies dans les serres.....	35

II.4.3.1 Géothermie	35
II.4.3.2 Énergie solaire	35
II.4.4 Différents échanges thermiques dans serre.....	35
II.4.4.1 Les échanges radiatifs ou rayonnement	36
II.4.4.2 Les échanges conductifs	36
II.4.4.3 Les échanges convectifs.....	37
II.4.5 Aération d'une serre	37
II.4.5.1 La ventilation naturelle	37
II.4.5.2 La ventilation forcée	38
II.5 Les chiffres sur les quantités de polymères utilisées dans les serres agricoles dans le monde et en Algérie	38
II.5.1 Les quantités de polymères utilisées dans les serres agricoles dans le monde	39
II.5.2 Les quantités de polymères utilisées dans les serres agricoles en Algérie.....	41
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	44

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Une serre tunnel.....	09
Figure I.2 : Une serre multi-chapelle.....	09
Figure I.3 : Une aération uniforme située sur le faitage.....	10
Figure I.4 : Ouverture par déplacement vertical.....	10
Figure I.5 : Une serre jardin.....	11
Figure I.6 : Un chauffage d'air.....	12
Figure I.7 : Un extracteur.....	13
Figure I.8 : Une double paroi gonflable.....	13
Figure I.9 : Un anémomètre.....	14
Figure I.10 : Un pluviomètre à augets électronique.....	14
Figure II.1 : Mécanisme de la stabilisation des polymères.....	21

Figure II.2 : Les étapes de la biodégradation des polymères.....	24
Figure II.3 : La formation d'O ₂ lors de la photosynthèse végétative.....	33
Figure II.4 : La formation de CO ₂ lors de la respiration végétative.....	34
Figure II.5 : Illustration des mécanismes de transformation propres aux plantes végétales....	35
Figure II.6 : Consommation mondiale des films plastiques (2015).....	40
Figure II.7 : Distribution géographique de films agricoles plastique dans le monde (2015).....	40
Figure II.8 : Tendances de la plasticulture dans le monde.....	41
Figure II.9 : Répartition par wilaya des superficies couverte par la plasticulture pour la campagne agricole 2001-2002.....	43

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1 : Répartition de l'énergie solaire d'après.....	24
Tableau II.2 : Energie de dissociation de quelques liaisons chimiques.....	28
Tableau II.3 : Evolution des superficies cultivées sous abris plastique (Algérie)	41
Tableau II.4 : Répartition des superficies cultivées sous abris plastique par région (Algérie).....	42

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'augmentation de la population mondiale et de la consommation d'énergie a incité les chercheurs et les scientifiques à fournir une quantité suffisante de technologie alimentaire et énergétique en utilisant des sources alternatives. En outre, le changement climatique et les faibles ressources en eau révèlent que la culture protégée en serre est devenue la voie privilégiée pour le développement du secteur agricole [1].

Le système de culture abritée (sous serre) est un mode de production incontournable, qui assure l'approvisionnement des populations en fruits et légumes frais et en végétaux d'ornement toute l'année, dans toutes les régions et sous tous les climats du monde. Il s'agit d'un système intensif, dont les interactions avec l'environnement naturel, social et économique sont très fortes et qui présente vis-à-vis du développement agricole durable des atouts indéniables [2].

Aujourd'hui la plasticulture s'impose comme une technique incontournable dans le monde agricole. Elle a connu une véritable révolution sur les plans économique et social à l'échelle de petite et grande exploitation ainsi que les groupes industriels de production des films plastiques [3]. Cette technique de production constitue une première approche dans la maîtrise du climat (variabilité, tendance climatique, etc.) et répond en partie aux préoccupations actuelles du monde agricole, à savoir l'augmentation des rendements, la disponibilité permanente des produits et la pratique agricole dans les régions où les conditions climatiques sont les moins favorables [4]. L'utilisation des serres dans l'agriculture pourrait contribuer alors à la réduction de l'influence des conditions climatiques (pluie, vent, grêle, froid) sur les plantes, à la réduction de la quantité d'herbicides et insecticides utilisés, à l'allongement de la période de production des plantes et à la disponibilité des produits hors saison (extension de la saison de production au-delà de la saison de croissance conventionnelle).

Grâce aux progrès réalisés dans la fabrication des matériaux (vitres, plastiques, structures métalliques, composant électroniques, capteurs) et grâce aux progrès de la recherche agronomique, les serres agricoles sont devenues des enceintes bioclimatiques pouvant créer un milieu semi artificiel, un microclimat permettant de cultiver des végétaux avec des rendements très supérieurs aux rendements des cultures en plein champs [5].

La première utilisation des films plastiques dans l'agriculture remonte à 1948 quand le professeur E.M. Emmert n'avait pas d'argent pour acheter une serre en verre et a couvert une structure en bois avec un film d'acétate de cellulose, qu'il remplaçait par un film de polyéthylène quelques temps plus tard [6]. L'utilisation du plastique dans l'agriculture a augmenté depuis les années 1950, lorsque les agronomes ont découvert que l'utilisation du film du polyéthylène contrôle et modère la température du sol, empêche son dessèchement et en temps limite la croissance des mauvaises herbes, tout en contribuant à l'augmentation de la production et à moindre coût [7]. Depuis lors, les films plastiques ont permis de convertir complètement les zones désertiques improductives en de modernes développements agricoles, et ont donc encouragé la croissance économique dans des régions traditionnellement pauvres.

Les principaux films agricoles utilisés (liste non exhaustive) sont le film **géo-membrane**, le film pour **ensilage**, le film de **paillage** et le film de **couverture de serre** :

- Le film **géo-membrane** garantit une étanchéité à tout type de liquide. il se trouve dans la conception de décharges publiques, bassins de rétention ou bassins d'orage, dans les barrages et canaux d'irrigation.
- Le film pour **ensilage est** utilisé dans la conservation et le stockage des fourrages (pâturages agricoles) à haute valeur nutritives (maïs, canne à sucre, etc.) pour une ultérieure distribution.
- Le film de **paillage** sont destinés à couvrir le sol d'une culture (protéger la structure du sol, limiter l'évaporation de l'eau, réduire les pertes de lessivage des fertilisants, etc.). il se trouve généralement en maraîchage et sur des sols occultant comme du gravier, de l'ardoise ou des écorces.
- Le film de **couverture de serre** (film de serre et film de semi-forçage) a pour objectif un meilleur contrôle des conditions de culture par la création d'un climat plus favorable autour de la plante (protéger la culture de intempéries, optimiser les conditions de culture, permettre des cultures hors saison, etc.). il est utilisé dans des abris lorsque des opérations de mécanisation classiques sont souhaitées ou lorsqu'une couverture permanente.

De nombreuses études et recherches scientifiques sont publiées sur les films agricoles. Parcourant les différents aspects de ces derniers (matériaux, énergie, gestion, interaction, etc.), lesdites études ont touché, entre autre, au problème particulier de vieillissement des films en polyéthylène basse densité.

Une étude a été réalisée par Anu Kapanen, Evelia Schettini, Giuliano Vox et Merja Itävaara en 2008 sur l'« Performance et impact environnemental des films biodégradables en agriculture : une étude de terrain sur la culture protégée » pour le compte de J Polym Environ (2008). Dans cette étude, les auteurs ont évalué les performances, la dégradabilité dans le sol et l'impact environnemental de l'amidon biodégradable des films de paillage et de serres tunnels au moyen de tests sur le terrain et en laboratoire.

Une récente étude de Souad BEHISSA, Salem Fouad CHABIRA, Nourelhouda BENMILOUD et Mohamed SABAA en 2019 sur « L'effet du lavage sur les films de polyéthylène basse densité stabilisés et non stabilisés naturellement altérés dans une région subsaharienne (Ghardaïa, Algérie) ». L'étude a effectué une comparaison de changement de propriétés entre deux échantillons (non lavé et journalièrement lavé) de films agricoles PEBD en utilisant différentes méthodes de caractérisation.

CHAPITRE I : DESCRIPTION DES DIFFERENTS TYPES DE SERRES AGRICOLES

I.1 Introduction

Les serres agricoles sont des structures très sophistiquées, qui visent à fournir des conditions climatiques convenables pour la croissance et le développement des plantes et assurer une production tout au long de l'année. La serre tunnel agricole classique est largement répandue dans les bassins méditerranéens malgré les insuffisances qu'elle présente, notamment la surchauffe pendant le jour et le refroidissement nocturne intense, qui parfois se traduit par l'inversion thermique interne. La serre chapelle habillée en verre est relativement plus performante, mais son évolution reste lente en raison de son coût d'investissement et son amortissement. La serre agricole a pour objectif de créer un microclimat favorable aux exigences et à la croissance des plantes à partir des conditions climatologiques environnantes ; de produire en fonction des calendriers culturels des fruits, légumes et fleurs hors saison à bon marché et largement disponibles le long de l'année. Elle est définie par son architecture structurelle et fonctionnelle, par la qualité optique, thermique et mécanique de sa paroi et par les moyens techniques d'accompagnement. La serre est considérée comme un milieu confiné où plusieurs composantes s'échangent entre elles et dont les principaux facteurs intervenant sont : la lumière, la température et l'humidité relative. La culture protégée s'échauffe bien plus qu'à l'air libre grâce à la présence de la paroi faisant barrière aux influences néfastes des vents et des variations climatiques environnantes, ainsi qu'à la réduction de la convection de l'air intérieur. Cet état d'évolution thermique est fonction du degré d'étanchéité de la couverture et de ses caractéristiques physiques, pour être transparente aux rayonnements solaires, absorbante et réfléchissante des rayonnements infrarouges émis par le sol, d'où l'effet de piégeage des radiations solaires autrement appelé « effet de serres » [8].

I.2 Les serres agricoles

I.2.1 Définition

La serre vient du verbe « serrer », on peut donc en déduire, logiquement, qu'il s'agit d'un espace réduit, où on essaiera de faire tenir le plus grand nombre de plantes possibles. Ce n'est sans doute là qu'un aspect très partiel du rôle de la serre moderne. La serre est conçue à l'origine comme simple abri ou une enceinte destinée à la culture ou à la protection des plantes en exploitant le rayonnement solaire, elle est devenue un locale industriel de production de la matière végétale où l'on tente d'adapter l'environnement immédiat de la plante, de façon à améliorer sa productivité et sa qualité, en l'affranchissant du climat extérieur, du sol local et même des saisons [9].

La serre est une structure qui peut être parfaitement close, elle est destinée en général à la production agricole. L'objectif étant de créer un environnement propice à leur développement en tirant parti de l'influence du climat, en créant un microclimat, pour une meilleure gestion des besoins des plantes, pour en accélérer la croissance ou pour les produire indépendamment des saisons [10] [11].

I.2.2 Intérêt de la serre

La serre de culture offre la possibilité de s'affranchir des contraintes climatiques extérieures (pluie, vent, froid). Elle est conçue pour recréer un environnement donné (microclimat). Elle permet le chauffage de l'air et des racines, le contrôle de l'irrigation et de la fertilisation, l'enrichissement en CO₂ et le contrôle de l'humidité. Elle joue un rôle économique en présentant des produits sur le marché en hors saison.

La serre permet ainsi d'obtenir une production végétale dans des conditions meilleures que celles existantes naturellement et ce par une meilleure qualité de produit. Pour aboutir à ces résultats, il faut répondre minutieusement aux exigences de la culture pour les différents facteurs intervenant dans sa croissance et son développement, ceci suppose la connaissance des interactions entre ces divers paramètres [12].

I.2.3 Choix de la serre et sa couverture

Le choix d'une conception de la serre agricole pour un endroit spécifique sur la planète pour satisfaire les conditions économiques des agriculteurs demeure toujours un défi pour le concepteur. Une approche systématique qui intègre des modèles physiques, biologique et économiques est la manière la plus prometteuse pour le choix sur la configuration de la serre. Cependant, une méthodologie basée sur une étude comparative du comportement énergétique d'un ensemble de serres sous les mêmes conditions climatiques est une approche simple, qui peut contribuer aux choix du type de la géométrie de la serre et de sa couverture pour le développement des cultures abritées. Ainsi, le problème du choix de la conception peut être considéré comme un problème multidimensionnel. Une approche d'optimisation peut être réalisée sur une compensation quantitative entre les retombés économiques à savoir : la récolte et les coûts liés à la construction, l'entretien et l'exploitation de la serre.

Les principaux critères (liste non exhaustive) de choix d'une serre et sa couverture [13] sont :

- La transmission du rayonnement utile à la photosynthèse (pour améliorer le potentiel de production).
- La solidité et la durabilité.
- Les économies d'énergie et le coût.
- L'aération, une serre mal aérée peut représenter un vrai danger pour les plantes alors il faut prendre en compte que la serre soit bien aérée.
- La couverture, qu'elle soit en polycarbonate ou en verre, le type de couverture joue un rôle important dans l'entretien ainsi que dans la sécurité.
- La taille est un élément primordial dans le choix de la serre, la taille nécessaire dépend le plus souvent de la place qu'on souhaite accorder à la serre.

I.2.4 Types de serres

Différents types et formes de serres agricoles sont conçues sous différents conditions climatiques dans le monde (aride, semi-aride, tropicale, tempéré, subhumide) pour abriter différents types de cultures (espèce et variété de plante) et répondre aux besoins du producteur (faibles coûts de production, minimisation des intrants).

La classification des serres est complexe et difficile ; elle est souvent faite selon les formes données par les cadres porteurs qui constituent l'assemblage, on distingue deux principaux types appartenant à deux grandes familles de serres : les serres tunnels et les serres chapelle [6].

I.2.4.1 Serres tunnels

Une serre tunnel (figure I.1) est formée de plusieurs grands arceaux métalliques (éléments juxtaposés constitués chacun par une armature en tube d'acier et en profilés assemblés par des boulons). Ces arceaux sont recouverts d'un film souple en plastique transparent (généralement en polyéthylène qui se fixe par divers systèmes de clips qui coincent qui le fixent contre le profil ou entre deux baguettes tout au long de la serre), qui lui donne la forme d'un tunnel, les dimensions de la serre dépendent des besoins du jardinier [14].



Figure I.1 : Une serre tunnel.

- Caractéristiques des serres tunnels

Les serres tunnels offrent un large choix de solutions performantes et adaptées aux différentes cultures. Elles offrent entre autre un large choix d'aération latérale, un grand dégagement en bordures pour optimiser la surface de culture. Parmi leurs caractéristiques on site :

- La hauteur varie généralement entre 2 et 2,50 mètres.
- La largeur se situe entre 3 et 5 mètres.
- Une surface au sol minimale de 6 m².
- La deuxième porte est nécessaire dès que la serre tunnel dépasse les 6 mètres de long.

I.2.4.2 Serres multi-chapelle

Les différentes pièces qui composent la structure de la gamme à serre multi-chapelle (figure I.2) sont conçues pour être parfaitement assemblées grâce à des joints vissés qui simplifient le montage tout en absorbant idéalement les différentes forces qui ont un impact sur la structure.

Elles sont très demandées pour leur robustesse et leur grande capacité d'adaptation aux dimensions et aux caractéristiques du terrain [15].



Figure I.2 : Une serre multi-chapelle [15].

- Caractéristiques des serres multi-chapelle

Les serres multi chapelles offrent un grand volume d'air grâce à leur hauteur optimale et ainsi qu'une largeur importante pour une production intense. Elles sont en outre très isolantes. Leur système d'aération avec ouverture permanente ou fermeture possible permet une ambiance saine et une aération optimale. Parmi leurs caractéristiques principale on site :

1. Matériaux de revêtement :

- Film plastique.
- Matériaux semi-rigides.
- Plaque rigide.

2. Les éléments en aluminium et les profils d'ancrage.

3. Un volume intérieur important.

4. L'inclinaison des arceaux permettent de tirer la meilleure partie des rayons solaires.

- Aération au faîtage (figure I.3).
- Aérations latérales (figure I.4).



Figure I.3 : Une aération uniforme située sur le faîtage [15].



Figure I.4 : Ouverture par déplacement vertical [15].

I.2.4.3 Serres de jardin

La serre de jardin est une construction extérieure destinée à diverses activités de jardin et qui offre de nombreux avantages. C'est un petit modèle, parfait pour faire pousser des plantes, idéale pour protéger ses plantes en hiver, récolter des fruits et légumes toute l'année et réaliser des semis sous abri, une serre peut être construite avec divers matériaux et selon différentes formes, même avec des matériaux de récupération [9] (figure I.5).



Figure I.5 : Une serre jardin [16].

- Caractéristiques d'une serre de jardin

Le matériau le plus fréquemment utilisé pour la couverture des serres de jardin est le polyéthylène. Néanmoins, on trouve souvent d'autres matériaux qui sont :

- Le verre horticole.
- Le verre trempé.
- Le polycarbonate alvéolaire.
- Le polycarbonate transparent.

I.3 Les équipements d'une serre

Le développement des nouvelles technologies dans le secteur agricole a connu une croissance rapide par rapport à d'autres secteurs dans de nombreux pays. L'objectif d'intégration continue des équipements, de différentes technologies, est de gérer et de surveiller le climat sous serre pour un meilleur rendement et de faciliter le travail de l'agriculteur en raison des technologies et des matériaux utilisés.

I.3.1 Les actionneurs

Un actionneur est un élément capable de produire une action physique (déplacement, dégagement de chaleur, émission de lumière, ...) à partir de l'énergie qu'il reçoit. Voici quelques actionneurs industriels utilisés dans le domaine des serres agricoles :

I.3.1.1 Générateur d'air

Les générateurs d'air chaud (figure I.6) sont spécialement indiqués lorsqu'il n'existe pas de demande de chauffage importante de façon continue et comme défense ponctuelle face aux gelées. Avec ce système, il est possible d'obtenir une précocité et productivité majeure dans les saisons froides avec un degré de technicité moyen [17].



Figure I.6 : Un chauffage d'air [17].

I.3.1.2 Extracteurs

Les ventilateurs extracteurs (figure I.7) permettent de forcer l'aération dans la serre lorsque la ventilation naturelle à travers les ouvrants de toit et/ou du périmètre ne permet pas d'atteindre le taux de renouvellement d'air désiré.

Il s'agit d'un besoin essentiel dans la production de cultures et dans les fermes d'élevage. Ils sont indispensables pour un système de refroidissement avec des panneaux évaporateurs et souvent aussi avec des systèmes de brumisation d'eau afin d'obtenir un certain niveau de réfrigération adéquat [17].



Figure I.7 : Un extracteur [17].

I.3.1.3 Double paroi gonflable

Le système de double paroi gonflable (figure I.8) se base dans la création d'une chambre d'air entre deux couches de film plastique. La chambre d'air est gonflée avec de petits ventilateurs qui insufflent l'air dans la chambre à travers des tuyaux en PVC.

Cela permet de créer une chambre qui réduit le coefficient de transmission de chaleur vers l'extérieur pour obtenir une économie considérable d'énergie et un contrôle de la température [17].



Figure I.8 : Une double paroi gonflable [17].

I.3.2 Les capteurs

Un capteur transforme une grandeur physique en une grandeur normée, généralement électrique, qui peut être interprétée par un dispositif de contrôle commande.

Un capteur se distingue de l'instrument de mesure par le fait qu'il ne s'agit que d'une simple interface entre un processus physique et une information manipulable. Par opposition, l'instrument de mesure est un appareil autonome se suffisant à lui-même, disposant d'un affichage ou d'un système de stockage des données. Le capteur lui, en est dépourvu.

Voici quelques capteurs industriels utilisés dans le domaine des serres agricoles :

I.3.2.1 L'anémomètre

Ce capteur (figure I.9) mesure la vitesse de l'air et le débit volumétrique, Il permet de mesurer la force éolienne et la vitesse de circulation de l'air. Il est muni d'un capteur mécanique de type éolien qui tourne en fonction de la puissance du vent. La vitesse de rotation de l'hélice est proportionnelle à la vitesse du vent [18].



Figure I.9 : Un anémomètre [18].

I.3.2.2 Le pluviomètre

Le pluviomètre (figure I.10) est un instrument météorologique servant à mesurer la quantité de précipitation tombée à un endroit donné pendant une période précise. La hauteur du niveau d'eau est habituellement indiquée en millimètres. Elle donne la quantité de précipitations pour un mètre de carré [19].



Figure I.10 : Un pluviomètre à augets électronique [20].

CHAPITRE II : LES POLYMERES UTILISES DANS LES SERRES AGRICOLES ET LEURS VIEILLISSEMENTS

II.1 Les polymères utilisés dans les serres agricoles

II.1.1 Introduction

La plasticulture est un terme nouveau qui fait référence à l'utilisation des plastiques dans le domaine de l'agriculture. Le développement de cette technique, principalement utilisé pour les couvertures de serres agricoles, dans les régions sub-saharienne, est dû à des avantages économiques : faible consommation d'eau, productivité, un faible coût par rapport à la serre agricole en verre. Cependant, les facteurs climatiques apportent une diminution de la durée de vie. Les serres agricoles en matières plastiques ont été initialement développées pour l'Europe et l'Amérique, c'est pour cela que les caractéristiques du matériau ne correspondent pas à un climat saharien. Effectivement, Il est à noter que la durée de vie des couvertures de serres agricole est limitée, en Europe et à l'USA elle est de quatre à cinq saisons, alors que celle-ci est de deux à trois saisons dans un milieu agressif saharien tel que l'on rencontre en Algérie. Ce climat spécifique présente des vents de sables, des températures élevées, des variations de température entre le jour et la nuit et de fortes intensités lumineuses .Il s'ensuit une dégradation du matériau dans le milieu où il se trouve, il en résulte une pollution résiduelle importante. Afin de régler ce problème, trois possibilités s'offrent à nous. La première est de réutiliser les couvertures agricoles en verres, mais le coût étant élevé, cette solution n'est pas à prendre. La seconde est de recycler les matériaux. La dernière est de modifier le matériau afin d'augmenter sa durée de vie. C'est ce qui nous intéresse aujourd'hui [20].

II.1.2 Polymères

II.1.2.1 Définition des polymères

Les polymères sont des matériaux composés de très longues chaînes (macromolécules), elles-mêmes formées de molécules élémentaires (monomères) assemblées entre elles. Ces chaînes sont principalement constituées d'atomes de carbone sur lesquels sont fixés des éléments comme l'hydrogène ou l'oxygène. D'autres éléments, notamment le chlore, l'azote ou le fluor, peuvent encore intervenir dans la composition de la chaîne. Trois grandes familles de polymères peuvent être distinguées [20].

1. Les thermoplastiques

Les polymères composés de chaînes macromoléculaires linéaires ou avec ramifications sont désignés sous le terme thermoplastique. Sous l'effet de la chaleur, les chaînes de ces polymères glissent les unes par rapport aux autres. Le

polymère se ramollit, peut se déformer et être mis en forme. Après refroidissement, la forme donnée est figée. Cette opération peut être répétée : à nouveau chauffé, le polymère redevient malléable et peut être remis en forme. Exclusivement possédée par les polymères thermoplastiques, cette caractéristique permet la recyclabilité de ces matières. Dans cette catégorie se trouvent les polymères suivants :

- Le polycarbonate.
- Le PC (verre organique).
- Les polyamides : PA (Nylon).
- Les styréniques : PS, PSE.
- Les polyoléfines : PE, PP.
- Les vinyliques : PVC.

2. Les thermodurcissables

Les polymères réticulés (contenant des nœuds entre les chaînes macromoléculaires) ou en réseau constituent les thermodurcissables. A l'inverse des thermoplastiques, la mobilité thermique est réduite. Plus la température est élevée, plus les chaînes tridimensionnelles se figent ; les liaisons ou nœuds se renforcent. L'opération est irréversible. Le polymère se rigidifie dès la première transformation jusqu'à se dégrader si la température continue d'augmenter. Dans cette catégorie se trouvent les polymères suivants :

- Les phénoplastes (Bakélite).
- Les polyépoxydes (Araldite).
- Les polyuréthanes (PU).
- Les silicones.

3. Les élastomères

Les élastomères sont caractérisés par leur grande déformabilité (6 à 8 fois leur longueur initiale). Ils sont obtenus à partir de polymères linéaires caractérisés par des liaisons extrêmement faibles. Ces polymères sont donc des liquides très visqueux. Pour être utilisés comme caoutchouc, des liaisons pontales (nœuds de réticulation) doivent être introduites entre les chaînes, conférant ainsi aux matériaux une structure tridimensionnelle qui assure la réversibilité de la déformation mécanique. Les nœuds de réticulation sont introduits par une réaction chimique appelée vulcanisation après la mise en forme du matériau. Dans cette catégorie se trouvent les polymères suivants :

- Le polyisoprène : NR (caoutchouc naturel).
- Le polyisoprène de synthèse (IR).
- Le polychloroprène (Néoprène).
- Les polysiloxanes (silicones).

II.1.2.2 Utilisation des polymères dans les serres agricoles

Les matières plastiques couvrent une gamme très étendue de matériaux polymères synthétiques ou artificiels. Dans le domaine des serres ces matériaux plastiques sont transparents à la lumière visible. Deux types sont utilisés :

- Les matériaux plastiques rigides : On peut citer quatre types principaux de ce type de plastique rigide : Le polyester armé de fibres de verre(PVR), le chlorure de polyvinyle bi orienté (PVC bi orienté), le polycarbonate (PVC), le poly méthacrylate de méthyle(PMMA).
- Les matériaux plastiques souples (films) : Les films les plus utilisés sont à base de polyéthylène ou plus exactement de polyéthylène à basse densité(PEBD) avec de nombreux produits dérivés, (PE thermiques). Le polychlorure de vinyle (PVC) plastifié est peu employé en couverture de serre dans notre pays [5].

- le polyéthylène

Le polyéthylène (PE) est le polymère de synthèse qui a la structure chimique la plus simple. Il appartient à la grande famille des polyoléfines. Dans sa forme la plus simple, la chaîne du polyéthylène, de structure chimique $-(CH_2-CH_2)_n-$, se compose de motifs structuraux formés d'un nombre pair d'atomes de carbone liés, de manière covalente, avec une paire d'atomes d'hydrogène attachés à chaque atome de carbone. Les extrémités de chaînes sont terminées par des groupes méthyles [21].

- Polyéthylène à basse densité PEBD

Ce polymère thermoplastique de grande consommation est obtenu par polymérisation radicalaire de l'éthylène (éthane) en opérant sous haute température à environ 200°C [22].

Le PEBD est produits sous haute pression (82-2760MPa) et sous haute température (132-332°C) avec un initiateur de radical libre (tel que le peroxydes et l'oxygène) et contient quelques longues et courtes branches. Dans le PEBD serait une chaîne complètement ramifiée de groupement $(-CH_2-)$. Cette structure donnant ainsi une densité plus faible et une flexibilité plus grande à celle quand peut obtenir dans le cas de PEHD [23].

- Applications des polyéthylènes à basse densité PEBD

Parmi de nombreuses principales utilisations des polyéthylènes (PEBD) on cite [24] :

- L'emballage industriel.
- L'emballage alimentaire.
- L'emballage des produits hygiéniques.
- L'isolation des câbles d'énergie et de télécommunications.
- La couverture et gainage des câbles téléphoniques.
- La fabrication des articles ménagers comme les bouchons, les couvercles, les poignées des sacs et cabas.
- Les conduites pour le transport de l'eau.
- L'emballage du lait.
- Le revêtement des pipe-lines.

- Avantages et inconvénients des polyéthylènes à basse densité (PEBD)

- En général, les PEBD représentent une bonne résistance chimique et mécanique, ils sont :
- Très résistants à l'action des acides faibles.
- Très résistants à l'action des acides forts non oxydants.
- Très résistants à l'action des bases faibles et fortes.
- Très résistants à l'action des solvants organiques au-dessous de 80°C, mais perméables.
- Solides, résistants aux chocs et à l'abrasion (même à froids).
- Inerte chimiquement et non toxique pour usage alimentaires.
- Adaptables et Sécuritaires.
- Néanmoins, les PEBD présentent les inconvénients suivants :
- Action biologique : ils peuvent être attaqués par des bactéries ou des microorganismes.
- Vieillessement : les PEBD sont sensibles à la lumière et de ce fait, pour des applications de longue durée (≥ 1 an), on les protège par le noir de carbone (câblerie films pour ensilage), ou par des adjuvants anti UV-IR (films pour couverture de serres).
- Pas résistant au feu.
- Pas résistants aux changements de la température.
- Pas résistants à la propagation de fissures.

II.2 Le vieillissement climatique des polymères

II.2.1 Vieillissement des polymères

Le vieillissement d'un matériau est une évolution lente et irréversible des propriétés de celui-ci lors de son utilisation. Parmi ces matériaux les polyoléfines qui subissent dans leurs cycle de vie une dégradation causée par la chaleur et l'oxygène (thermo-oxydation), l'irradiation UV (photo-oxydation) et les contraintes mécaniques. La photo-oxydation de polyoléfines a été étudiée à cause de leur importance comme matériaux d'ingénierie. Cette dégradation est associée à un changement irréversible de la structure chimique du polymère qui influe sur les propriétés physiques (cristallinité), la morphologie, la masse moléculaire et sur les propriétés mécaniques. Pour remédier à ce problème et améliorer la durée de vie des polymères, des stabilisants sont ajoutés dans les matrices polymères. Parmi ces stabilisants on trouve les HALS (Hindered Amine Light Stabilizers), qui sont des photo-stabilisants et sont considérés comme les plus performants pour les polyoléfines [25].

II.2.2 Définitions et mécanismes du vieillissement

II.2.2.1 Définition de la biodégradation

Plusieurs définitions ont été proposées pour définir le mot « biodégradation », et de faire la différence entre la dégradation et la biodégradation, cette dernière est un processus de dégradation qui met en jeu des organismes vivants [26].

Selon le Deutsch Institut Normierung « DIN » ; la biodégradation est un processus dû à une activité biologique qui entraîne des modifications de la structure chimique du matériau, menant à des composés métaboliques naturels.

Selon le Comité Européen de Normalisation « CEN » ; la biodégradation est un type de dégradation causée par une activité biologique, particulièrement les attaques enzymatiques qui entraînent un changement dans la structure chimique du matériau.

Selon l'American Society for Testing and Materials « ASTM » ; la biodégradation est une dégradation qui résulte de l'action des microorganismes naturellement présents dans le milieu de dégradation tels que les bactéries et les champignons [26].

II.2.2.2 Mécanisme de stabilisation des polymères contre la dégradation

Les stabilisants peuvent intervenir contre la dégradation des polymères dans l'initiation, la propagation et la décomposition des hydroperoxydes comme le montre le mécanisme présenté sur le schéma de la figure II.1.

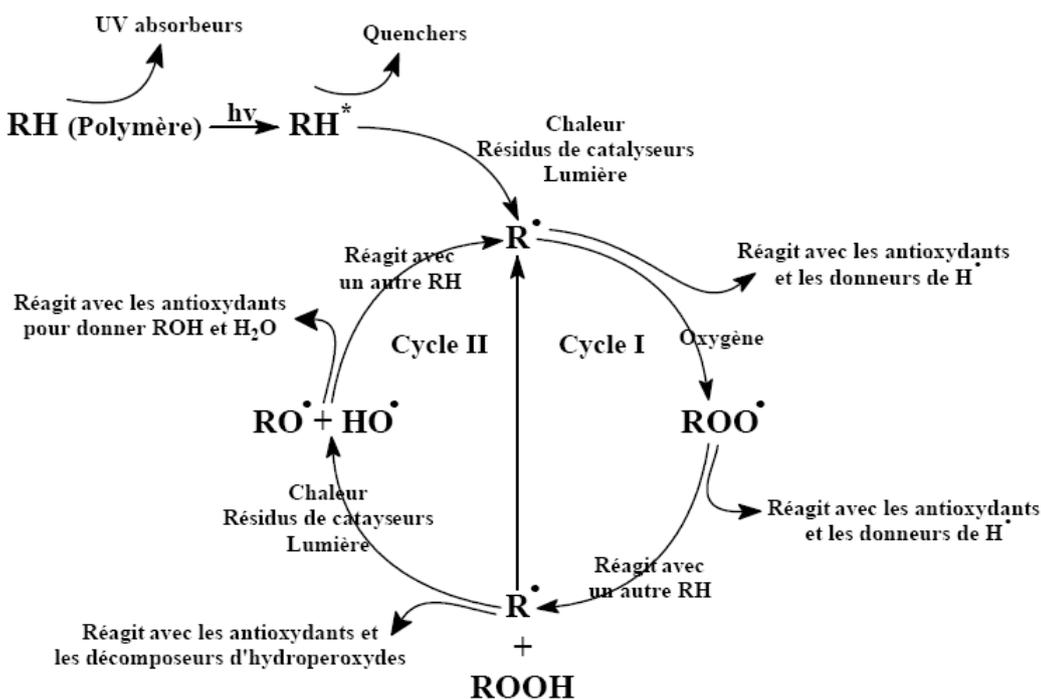


Figure II.1 : Mécanisme de la stabilisation des polymères [27].

II.2.3 Facteurs influençant le vieillissement des polymères

Plusieurs facteurs influent sur le vieillissement des polymères tels que l'oxygène, la température, l'irradiation UV, les polluants atmosphériques, les contraintes mécaniques et la structure du polymère [25].

II.2.3.1 Facteurs influençant la photo-oxydation des polymères

La photo-oxydation des polymères dépend de plusieurs facteurs tels que la diffusion de l'oxygène à l'intérieur du polymère, la géométrie du matériau (l'épaisseur du film), etc.

La diffusion des polluants et la présence des additifs dans la matrice polymère, la présence des radiations solaires et les photo-absorbants (chromophores) [25].

- La radiation solaire : Le processus de la photo-oxydation est initié par l'absorption des radiations UV (290-400 nm) par le polymère et en présence des chromophores.
- Photo-absorbeurs (chromophores) : L'absorption des radiations UV par le polymère est impossible en absence des chromophores (impuretés et les résidus catalytiques).
- La diffusion de l'oxygène : La dégradation des polymères dépend de la quantité de l'oxygène qui diffuse à l'intérieur de la matrice polymère.

II.2.3.2 Facteurs influençant la biodégradation

Dans la biodégradation le polymère doit être assimilable par les microorganismes, pour cette raison elle est applicable seulement à une gamme de matériaux. La résistance du polymère à la biodégradation est due à trois facteurs. Le premier est son caractère hydrophobe qui rend ce polymère résistant à l'hydrolyse, le deuxième est l'incorporation des stabilisants dans la matrice polymère qui augmentent la durée de sa vie et le troisième, son poids moléculaire élevé. Alors, comment le rendre biodégradable ? Deux prétraitements sont utilisés, la chaleur [28] et les rayons ultraviolet pour le dégrader et détruire les longues chaînes moléculaires du polyéthylène, autrement dit réduire sa masse moléculaire et générer les groupements hydroxyle (OH), carbonyle (C=O) et les acides carboxyliques (COOH) au sein de ce polymère. Lorsque ces chaînes sont dégradées, les produits formés sont soumis à l'attaque des microorganismes. La biodégradation peut avoir lieu en présence d'oxygène (conditions aérobies) et en son absence (conditions anaérobies) en milieu solide ou liquide. Mais quelques facteurs sont indispensables :

- **Les microorganismes** : la base de tout processus de biodégradation est l'existence des microorganismes capables de synthétiser des enzymes actives sur la matrice polymère afin d'initier le processus de la fragmentation.
- **L'environnement** : quelques facteurs dans l'environnement sont indispensables au processus de la biodégradation : la température, les sels minéraux, pH du milieu, l'oxygène et l'humidité. Ce dernier est l'élément clé de la biodégradation.
 - **Température** : les températures élevées favorisent les réactions d'oxydation. Toutefois, le matériau oxydé absorbe de l'eau qui favorise l'hydrolyse des chaînes [26].
 - **La teneur relative en eau** : la teneur relative en eau limite la croissance des microorganismes, c'est la teneur en eau qui va faciliter le déplacement des

microorganismes du milieu extérieur au polymère à dégrader autrement dit la diminution du taux d'humidité réduit la biodégradation .

- **pH du milieu** : pour garantir la survie d'un microorganisme il faut maintenir le pH du milieu proche de neutralité.
- **Substrat** : la biodégradation dépend de la structure du matériau (cristallinité, type de ramification, distribution de la masse moléculaire, morphologie et degré d'hydrophobie.
- **Influence du taux de cristallinité** : en règle générale la biodégradation s'effectue d'abord dans la phase amorphe donc l'organisation structurale du polymère a une influence sur sa capacité à être dégradée. La vitesse de l'oxydation varie en sens inverse avec le taux de cristallinité.
- **Degré d'hydrophobie** : la biodégradation est rapide si le matériau est hydrophile.
- **Surface de contact spécifique micro-organismes/substrat** : la biodégradation sera rapide si la surface de contacts entre le polymère et les microorganismes est importante.

II.2.3.3 Etapes de la biodégradation

La biodégradation a lieu en deux étapes [29].

- La première étape correspond à la rupture des chaînes et la fragmentation du polymère.
- La deuxième étape correspond à la minéralisation et il aura la formation de CO₂, CH₄ et H₂O. Le schéma général de ces deux étapes est représenté ci-dessous.

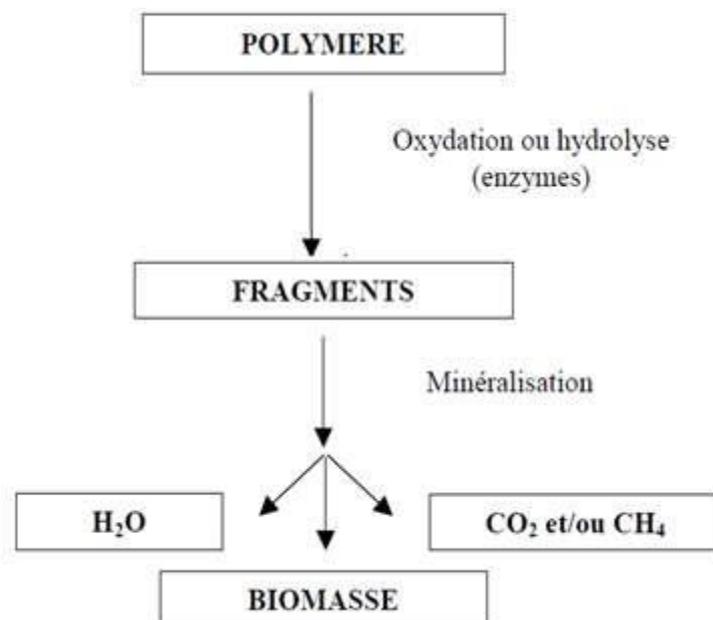


Figure II.2 : Les étapes de la biodégradation des polymères [29].

II.3 Vieillissement du polyéthylène

II.3.1 Vieillissement naturel du polyéthylène par thermo-oxydation ou photo-oxydation

Le vieillissement du polyéthylène, par thermo-oxydation ou photo-oxydation continue à faire l’objet de nombreux travaux [30] [31].

Le mécanisme général admis, est celui de l’auto oxydation de BOLLAND et GEE [32] qui s’effectue en trois étapes à savoir, l’initiation, la propagation et enfin la terminaison. Soit la macro radicale du polyéthylène (PE) :



1- Initiation

Formation d’un site radicalaire :

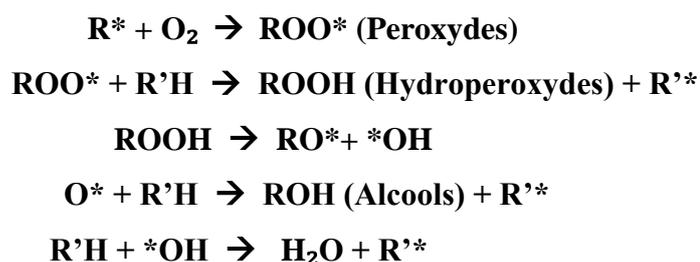


L’initiation est une réaction lente qui consiste en un arrachement d’un atome d’hydrogène de la chaîne du polymère qui conduit à la formation d’un radical libre alkyle. Elle est favorisée

par la présence des impuretés. Ces derniers étant des restes de catalyseur, des traces de métal provenant de l'usure des machines ou encore des défauts de structure.

La formation de ce site n'est pas encore bien expliquée, elle peut être due aux hydroperoxydes, aux groupes carbonyles ou aux impuretés présentes dans le polymère. La stabilité des radicaux influe sur le mode de dégradation des polymères.

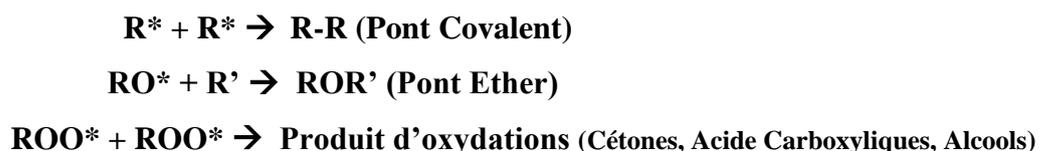
2-Propagation



La propagation est un ensemble de réactions qui fait intervenir d'une part le radical alkyle, lequel en se combinant à l'oxygène, forme le radical peroxyde (réaction rapide).

D'autre part, l'attaque des hydrogènes, portés par les atomes de carbone des chaînes normales et ceux situés, en α des insaturations, par le radical peroxyde en générant des hydroxydes [33].

3-Terminaison



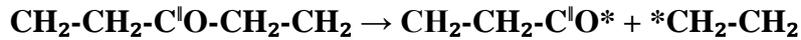
La terminaison, c'est la phase de recombinaison des radicaux libre entre eux conduisant à des espèces non réactives. L'insuffisance de la quantité d'oxygène par rapport au nombre de radicaux présents, favorise les réactions de réticulation.

L'énergie requise à la scission d'une liaison O-O est de 40Kcal/mole. Les radiations dont les longueurs d'ondes sont supérieures à 290nm, sont donc suffisantes pour amener cette rupture. Ainsi, par l'action conjuguée de la température et de l'absorption de rayonnement UV, des cétones peuvent être obtenus :



La présence de groupements C=O engendre des scissions de chaînes selon les réactions :

NORRISH I



NORRISH II



Enfin le vieillissement peut être naturel ou artificiel ; dans le premier cas l'étude du phénomène permet d'évaluer l'action combinée de tous les agents et leurs synergies, tandis que le second mode permet de séparer chaque acteur et de modéliser les actions individuelles de ces derniers.

II.3.2 Différents types du vieillissement naturel

II.3.2.1 Vieillissement photochimique

La répartition de l'énergie solaire dans les trois bandes du spectre du rayonnement thermique peut être représentée comme suit.

Rayonnement	E solaire (%)	E % cops noir à 5762°4
Ultraviolet $\lambda < 0.38 (\mu\text{m})$	70%	9.9%
Visible $0.38 < \lambda < 0.78 (\mu\text{m})$	47.3%	46.4%
Infrarouge $0.78 < \lambda < 15 (\mu\text{m})$	45.1%	43.6 %

Tableau II.1 : Répartition de l'énergie solaire d'après [34].

Ce tableau montre aussi la faible différence de distribution spectrale par bande d'un corps noir à 5762°K et du soleil qui est généralement inférieure à 3% ceci permet de dire que le rayonnement d'un corps noir est une approximation valable du rayonnement solaire dans les applications thermiques à basse température.

Bien que le rayonnement UV (longueur d'onde 290 nm-380nm) représente environ 3.5 à 6% du spectre global, il est l'acteur principal du vieillissement photochimique du film en polyéthylène.

Le vieillissement photochimique est le facteur principal de la dégradation climatique résultant de l'exposition direct du film en polyéthylène au rayonnement solaire et aux intempéries, actuellement il fait l'objet d'un grand nombre de travaux [34].

Processus de photo-dégradation

Le processus s'amorce par l'absorption d'un photon solaire par le polymère. La molécule absorbant passera à un niveau d'énergie supérieur (état électronique excité M^*) durant un temps très court. L'énergie potentielle de l'état excité peut atteindre 398KJ/mole.



Avec :

$hv = h.C / \lambda$: énergie d'un photon.

C : la vitesse de la lumière.

λ : la longueur d'onde

h : la constante de Planck.

P : polymère.

P^* : état électronique excité de la molécule du polymère.

Les rayonnements ultra-violet appartenant au domaine ($290 \text{ nm} < \lambda < 380 \text{ nm}$) transportent une énergie d'environ $E_{\lambda}=398 \text{ KJ/mole}$ correspond à l'énergie potentielle indiquée précédemment.

La dégradation photochimique peut s'amorcer si le polymère possède des liaisons possédant une énergie de dissociation inférieure à 398 KJ/mole et des molécules capables d'absorber des photons solaires.

Les énergies de dissociation de quelques liaisons chimiques sont données dans le tableau II.2 suivant [35] et [36].

Type de liaison	Energie de liaison en KJ/mole
C-H	349
HCO-OH	349
CH ₃ -CH ₃	351
CH ₂ -H	360
CH ₃ CO-OCH ₃	368
CH ₃ -OH	372

Tableau II.2 : Energie de dissociation de quelques liaisons chimiques.

Le polyéthylène est un polymère modérément stable, il possède une grande photosensibilité (très sensible aux radiations UV), qui est due essentiellement à l'existence des impuretés ou irrégularités structurales.

II.3.2.2 Vieillessement thermochimique

La température est l'un des principaux facteurs de la dégradation lente du polyéthylène dans les conditions normales d'utilisation découlant des variations de température entre le jour et la nuit. Les différences de température entre l'intérieur de la serre peuvent dépasser 30°C [37] et [38] du fait que la température de la charpente métallique peut atteindre 75°C en été à Ouargla, etc.

La dégradation thermochimique de la couverture à base de polyéthylène dans les conditions normales d'utilisation est très difficile à traiter en pratique car il s'agit de processus extrêmement lent, nécessitant pour leur étude, le recours à des essais de vieillissement accéléré. Aussi, la dégradation thermochimique du polyéthylène peut se produire selon :

- 1- A température très élevée : (pyrolyse) ce type de dégradation se produit en général dans le domaine de la combustion et ne se rencontre qu'accidentellement.
- 2- A l'état liquide, lors du processus industriel d'élaboration du matériau : nécessite d'un compromis entre la température assurant une fluidité élevée tout en empêchant une dégradation thermique rapide.

II.3.2.3 Effet de l'oxygène et de l'ozone

L'action de l'oxygène est très remarquable sur le vieillissement du polyéthylène du fait qu'il attaque les doubles liaisons et participe à la photo-dégradation et à la thermo- oxydation du matériau.

L'ozone agit de manière identique avec un pouvoir oxydant plus important [34].

II.3.2.4 Effet de l'humidité et de la pluie

Bien que le polyéthylène réagisse très peu avec les molécules polaires de l'eau de la pluie ou de l'humidité, il peut avoir des conséquences lourdes sur le polyéthylène :

- Effet physique : hydrophile, gonflement, extraction d'adjuvants, etc.
- Effet chimique : hydrolyse qui se manifeste par des coupures statistiques de chaînes : diminution de la masse moléculaire qui peut être utilisée pour caractériser l'avancement de la réaction d'hydrolyse.

Effet photochimique : production de radicaux hydroxydes.

II.3.2.5 Effet du vent de sable

Bien que le vent de sable joue un rôle important sur le vieillissement naturel des matériaux polymères, en général, et sur la dégradation de la couverture des serres en polyéthylène, en particulier, cet effet néfaste reste quasiment ignoré dans la littérature spécialisée.

L'effet du vent sur le polyéthylène se manifeste par l'augmentation des contraintes mécaniques et participe à l'abrasion par les grains de sables et les autres objets transportés par le vent. Cet effet modifie les propriétés physiques du matériau. et contribue à la réaction de la thermo-oxydation par l'augmentation de la température locale lors des chocs.

Les effets du vieillissement naturel par le vent de sable entraînent une dégradation prématurée des caractéristiques mécanique et optique du matériau. Lorsque la destruction du matériau se produit, une grande quantité de déchets restera généralement sans traitement entraînant la pollution de l'environnement.

La durée de vie de la couverture dépend essentiellement des conditions climatiques locales Les vent de sable concernent la grande majorité des zones désertiques de notre planète mais la dégradation des matériaux par le vent de sable est rarement étudiée [39].

Ce phénomène touche toutes les régions de notre pays notamment le sud de la Algérie, ou l'agriculture protégée a tendance à se développer.

Les principaux effets du vent de sable sont la création des micros fissures sur la surface du film, les inclusions de sable (silice) et la perte des propriétés optiques et mécaniques [40] et [41]. Il a été prouvé que la résistance à l'érosion du matériau est la caractéristique qui sera déterminante pour sa durée de vie [35] et [41].

D'autres recherches, basées sur la simulation des vents de sable, sont venues plus tard pour confirmer et compléter les résultats précédents [39].

Très peu de recherches ont été menées dans des conditions réelles d'utilisation. Nous mentionnons, à titre d'exemple, les études effectuées par Sebaa et al. [42] et Chabira et al dans la région de Laghouat dans le sud de l'Algérie et celles qui sont effectuées par Hilal et al dans la région de Riyadh en Arabie Saoudite.

Pour résoudre le problème des déchets résiduels, deux solutions indépendantes mais complémentaires sont envisageables :

- Par l'organisation de la collecte des déchets et le recyclage, il s'agit d'une alternative raisonnable et techniquement possible, mais son efficacité est mise en doute pour les zones sud de la Méditerranée.
- En réduisant la quantité de déchets à travers l'augmentation de la durée de vie du matériel.

Pour augmenter la durée de vie des films de LDPE plusieurs solutions peuvent être envisagées. Par exemple, l'introduction de composés antioxydation ou d'absorption de lumière Ultraviolets, appelés HALS.

Une méthode originale a été proposée par A. Sanchez al-Solis et al. [42]. A travers l'ajout des particules de sable dans le PEBD (33% en poids / poids) et après une exposition sous un rayonnement UV de 0 à 300 h, il a été observé une augmentation des propriétés mécaniques au cours de 80-100 h d'irradiation suivi d'une faible décroissance, tandis que la résistance aux UV a été améliorée.

II.4 Fonctionnement d'une serre avec les échanges de chaleur

Récemment la recherche spécialisée fait état d'un grand nombre de travaux de modélisation destinés à appréhender les phénomènes énergétiques qui régissent le climat intérieur des serres agricoles. L'évolution de ces modèles a été rapide, poussés à la fois par le développement des nouveaux moyens informatiques et par une conjoncture de la maîtrise des

phénomènes énergétiques de la serre dans chaque région du monde, devenait fondamentale pour un développement optimum des cultures abritées [43] : par exemple, la part des radiations solaires transmises à l'intérieur de la serre influence la photosynthèse, la transpiration, la vitesse de croissance et la qualité du produit des cultures.

L'objectif de cette section est de donner un bref aperçu sur les changes de chaleur intervenant dans le microclimat abrité dans une serre.

II.4.1 Climat sous la serre

Le climat spontané à l'intérieur de la serre dépend essentiellement du climat extérieur, des caractéristiques physiques de l'air intérieur, de la forme de la serre, du volume de l'abri, de son orientation et des qualités physico-chimiques des matériaux de la couverture utilisée. Les principaux facteurs du milieu interne d'une serre, qui sont modifiés par rapport à l'extérieur sont : la lumière, la température, l'humidité et les concentrations des gaz (CO₂, O₂, etc.).

- Lumière

La lumière joue un grand rôle dans la croissance de la plante car elle intervient dans beaucoup de phénomènes physiologiques et conditionne surtout la photosynthèse. En effet, l'énergie lumineuse fixe dans la plante le gaz carbonique et l'eau de l'air pour produire le sucre et l'amidon. Par conséquent, la croissance et le niveau de production des plantes dépendent fortement de la quantité du soleil que la culture reçoit tout au long de sa croissance. Toutefois, on peut prolonger ou raccourcir l'éclairage en utilisant respectivement les lumières artificielles ou les stores [44].

- Température

La température sous serre est le paramètre le plus important pour la production des cultures sous serre. Il se décompose en trois types :

- Température issue du sol.
- Température de la plante.
- Température ambiante à la culture.

Elle a une grande influence sur la croissance végétative. En effet, elle intervient dans beaucoup de phénomènes biologiques tels que la photosynthèse et la respiration. La vitesse de réaction augmente facilement avec la température ambiante [44] : il est alors nécessaire

d'intervenir en augmentant la vitesse de renouvellement de l'air par aération statique ou par ventilation dynamique.

- Humidité

Le confinement et l'étanchéité de la serre favorisent l'augmentation de l'humidité absolue tandis que l'élévation de la température de l'air tend à accroître le déficit de la saturation. L'hygrométrie souhaitée par un agriculteur se situe entre 40% et 60%. Quand l'humidité est en dessous de 40% la plante transpire plus [44]. Ce n'est pas destructif pour la plante, mais cela vide les réserves d'eau un peu rapidement. En outre, quand l'air est trop humide, la plante est exposée aux attaques de champignons, moisissures, ralentissement de la transpiration freinant la croissance de la culture. Trop d'humidité est souvent due au mauvais système d'extraction ou à l'absence de bonne ventilation au sein de la serre.

- Teneur en CO₂

Le CO₂ est essentiel aux plantes vertes pour la photosynthèse. Une grande quantité de ce type chimique se trouve dans l'atmosphère. Il se fixe dans les feuilles par les stomates et les cellules chlorophylliennes après dissociation. Les stomates des plantes cultivées sous serre, sont indispensables à différentes concentrations de CO₂.

- Effet de serre

L'énergie solaire qui pénètre dans la serre est absorbée par les plantes, le sol et les différentes structures. Les parois ne laissant pas, en partie, sortir les rayonnements infrarouges longs, il en résulte que l'énergie solaire est piégée par la serre, c'est "l'effet de serre". Cet effet est favorable au maintien ou à l'élévation des températures de l'air et du sol lorsque les températures extérieures sont trop basses. Mais, en été, lorsque les températures extérieures sont élevées, cet effet devient défavorable [45].

- Orientation de la serre

Le choix de l'orientation d'une serre se fait en tenant compte de l'éclairement naturel solaire, de type de serre, de la direction du vent dominant et des caractéristiques particulières du terrain, il est difficile d'éviter l'existence d'une hétérogénéité climatique à l'intérieur de la serre (la répartition de la lumière dans la serre est hétérogène).

II.4.2 Aspects spécifiques d'une serre

II.4.2.1 La photosynthèse

La photosynthèse est très importante pour la production végétative, elle consiste à réduire le dioxyde de carbone de l'atmosphère par l'eau absorbée par les racines à l'aide de l'énergie solaire captée par les feuilles avec libération d'oxygène afin de produire des glucides : c'est donc un processus de conversion d'énergie radiative en énergie chimique, transportable et réutilisable.

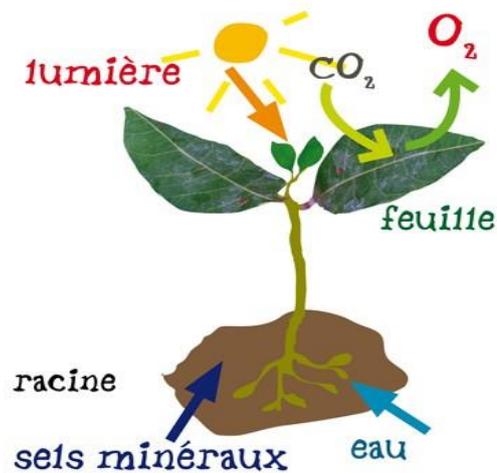


Figure II.3 : La formation d' O_2 lors de la photosynthèse végétative

II.4.2.2 La respiration

Les plantes respirent (plus largement, assurent les échanges gazeux avec l'air ambiant) grâce à des orifices situés à la face inférieure des feuilles (voire également à la face supérieure), **appelés stomates**. Ces stomates ont la faculté de s'ouvrir plus ou moins, afin de réguler la vitesse des échanges gazeux, sous l'influence de la lumière (plus de lumière : ouverture plus large des stomates) et de la sécheresse (stress hydrique : fermeture des stomates). Cependant, les stomates ne sont jamais totalement fermés et les échanges gazeux sont toujours existants.

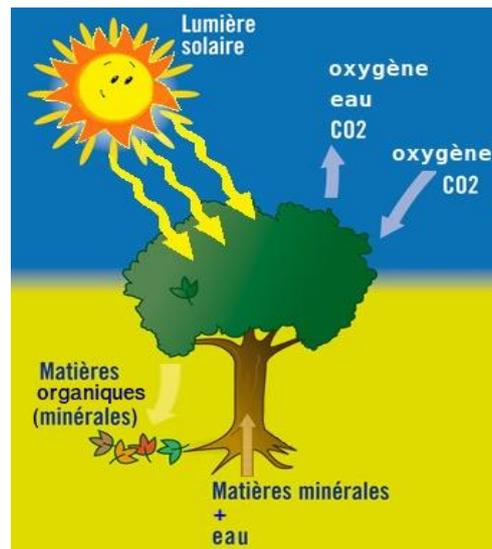


Figure II.4 : La formation de CO₂ lors de la respiration végétative

La respiration et la photosynthèse sont deux phénomènes qui ont lieu simultanément, et faisant intervenir les mêmes gaz, mais dans des "sens" opposés :

- la **respiration** correspond à une **absorption d'oxygène (O₂)** par la plante et à un **rejet de dioxyde de carbone (CO₂)**,
- la **photosynthèse** engendre une **absorption de dioxyde de carbone** par la plante et un **dégagement d'oxygène** dans l'atmosphère (ainsi que la synthèse de sucre).

II.4.2.3 L'évapotranspiration

L'évapotranspiration (ET) est la quantité d'eau transférée vers l'atmosphère, par l'évaporation au niveau du sol et par la transpiration des plantes. Elle se définit par les transferts vers l'atmosphère de l'eau du sol, de l'eau interceptée par la canopée et des étendues d'eau. La transpiration se définit par les transferts d'eau dans la plante et les pertes de vapeur d'eau au niveau des stomates de ses feuilles.

La figure II.5 résume l'ensemble des mécanismes internes (propres aux plantes végétales) intervenants dans la modification du microclimat à l'intérieure de l'enceinte serre.

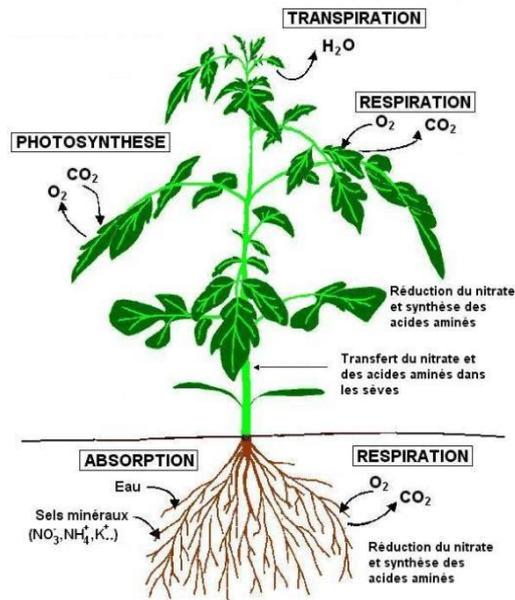


Figure II.5 : Illustration des mécanismes de transformation propres aux plantes végétales

II.4.3 Source d'énergies dans les serres

II.4.3.1 Géothermie

La géothermie regroupe l'ensemble des technologies qui permettent d'exploiter la chaleur de la Terre. Elle offre un réservoir énergétique immense et un panel de solutions qui répondent, de façon durable, à des besoins variés : elle est utilisée dans plusieurs pays dans le domaine de l'agriculture pour le chauffage des serres agricoles en vue d'amélioration des cultures sous serre.

II.4.3.2 Énergie solaire

La serre elle-même est un capteur solaire à la fois biologique (photosynthèse) et thermique. Le capteur thermique est même souvent trop efficace puisqu'il faut fréquemment aérer la serre et donc rejeter la chaleur à l'extérieur par ventilation. Un système de stockage de cette chaleur doit être prévu au vu non seulement des rapports d'ensoleillement jour/nuit mais aussi des rapports hiver/été ce qui représente un obstacle majeur [46].

II.4.4 Différents échanges thermiques dans serre

La serre est un système qui réagit continuellement aux variations des conditions de l'environnement qui lui sont imposées de l'extérieur. La connaissance de ces conditions et de propriétés du système, tant géométrique que physique, devrait permettre à chaque instant de déterminer la réponse du microclimat de la serre.

Ainsi nous considérerons, dans que l'agro système serre peut être décrit à partir des transferts d'énergie et de masse. Ces transferts peuvent s'effectuer sous trois formes différentes à savoir :

- **le rayonnement** : les échanges correspondent à un transfert d'énergie par des oscillations rapides de champs électromagnétiques qui ne nécessitent pas de milieu matériel pour se déplacer.
- **la conduction** : les échanges ont lieu au sein des milieux sans mouvement, ce qui correspond à la propagation de proche en proche des énergies moléculaires Internes.
- **la convection** : les échanges s'effectuent grâce au transport de l'énergie thermique par un fluide en mouvement.

II.4.4.1 Les échanges radiatifs ou rayonnement

La propriété de transparence de la couverture des serres vis-à-vis de certains rayonnements, permet de pénétrer une grande partie du rayonnement solaire et plus précisément celui qui est compris entre 0.4 et 0.7 μm (rayonnement visible) et qui contribue au processus de la photosynthèse [45]. Sur un plan quantitatif, la portion du rayonnement extérieur transmit dans la serre a été estimée d'environ 60%, le reste étant absorbé ou réfléchi par les parois et les différentes structures. La grande partie du rayonnement pénétrant est interceptée ou absorbée par la culture surtout lorsque la culture est bien développée. La partie qui contribue à la photosynthèse peut être négligée car elle ne représente que 1 à 2% du rayonnement global incident au sommet de la culture, mais la part du rayonnement réfléchi vers l'extérieur n'est pas négligeable dans certains cas, notamment le cas de cultures hors sol [46].

Les échanges radiatifs de grandes longueurs d'ondes se font entre les éléments de la serre (sol, plante et parois) et l'extérieur. La paroi est l'élément le plus important dans ces échanges car ses propriétés de transmission dans l'infrarouge qui varient suivant la nature du matériau de couverture caractérisent la quantité du rayonnement (infra rouge) intercepté sous serre [46]. Donc, les matériaux utilisés pour la couverture doivent être le plus transparent possible dans le domaine du visible afin de ne pas pénaliser la photosynthèse et être opaques dans le domaine des infrarouges thermiques qui n'ont que peu d'action sur la physiologie des plantes.

II.4.4.2 Les échanges conductifs

Dans les échanges conductifs, le transfert de chaleur résulte d'un transfert d'énergie cinétique d'une molécule à une autre molécule adjacente. Ce mode de transfert est le seul à exister dans un solide opaque. Pour les solides transparents (cas des serres), une partie de l'énergie peut

être transmise par rayonnement. Dans une serre, les principaux échanges par conduction ont lieu dans le sol, entre les surfaces et les couches plus profondes. Des échanges par conduction ont aussi lieu à travers les parois de la serre. Ces derniers sont la plupart du temps considérés comme stationnaires, c'est-à-dire qu'on ne prend en compte ni l'inertie des matériaux ni les phénomènes stockage-restitution de la chaleur car ces parois sont généralement de faibles épaisseurs et l'équilibre thermique est rapidement atteint.

II.4.4.3 Les échanges convectifs

L'échange de chaleur par convection à l'intérieur de la serre se produit grâce à la ventilation et l'infiltration (les ventilateurs et les fuites d'air). Ce mode d'échange de chaleur comprend non seulement le mouvement de l'air, mais aussi le mouvement de la vapeur d'eau. Dans ces deux cas, il n'y a pas de changement de phase et la convection est dite sans changement de phase. Quand l'eau dans la serre s'évapore, il absorbe de l'énergie et dans le cas contraire, cette vapeur d'eau libère de l'énergie et se condense. Dans ces derniers cas, la convection est dite avec changement de phase.

La température et le taux d'humidité à l'intérieur d'une serre dépendent de son aération. Il s'agit d'un processus complexe qui participe à l'essentiel des échanges de chaleur avec l'extérieur, sa maîtrise permet donc de contrôler certains paramètres essentiels au bon fonctionnement de la serre tels que la température, l'humidité, ou les concentrations de gaz comme le CO₂ par exemple.

D'une bonne ventilation dépendra la santé des plantes (respiration, photosynthèse, transpiration) et leur bon état sanitaire.

Deux systèmes de ventilation peuvent être utilisés : La ventilation naturelle et la ventilation forcée.

II.4.5 Aération d'une serre

II.4.5.1 La ventilation naturelle

La ventilation naturelle est le système le plus économique pour réguler le microclimat interne de la serre. Il s'agit des ouvrants disposés sur la structure. Les ouvertures doivent représenter environ 20% de la surface au sol et avoir un angle d'ouverture assez important pour permettre à l'air de bien circuler. Par le toit, une installation de l'ouvrant côté est préconisée, les ouvertures au plafond permettent à l'air de se mélanger correctement dans la serre. Il ne faut pas négliger les ouvertures sur les côtés au niveau des plantes qui augmenteront

l'efficacité de l'ouvrant du toit et qui moduleront la ventilation. La circulation de l'air sera alors optimale, créant un circuit interne autorégulé : l'air frais est aspiré par les ouvertures latérales, se réchauffe, se brasse à l'intérieur et ressort par le toit.

II.4.5.2 La ventilation forcée

La ventilation forcée nécessitera une installation électrique spécifique dans la serre : boîtiers électriques avec protections des circuits, démarreurs, lignes, canaux électriques. Par la suite on peut installer le ventilateur : Il s'agit habituellement de ventilateurs de type hélicoïdal avec des persiennes, fonctionnant en mode extracteur d'air.

Par son action ces types de ventilateurs fournissent le renouvellement du volume d'air logé dans la serre et permettent l'extraction du CO₂ et le rééquilibrage du climat général.

Ils peuvent être réglés selon le débit désiré, la plupart des modèles proposent trois à quatre niveaux de ventilation. Ces ventilateurs doivent de préférence être installés à l'opposé des vents dominants.

Ce type d'installation est adéquat pour suppléer le fonctionnement de l'aération naturelle dans les serres. Il est aussi utile pour aérer les locaux qui hébergent certains types de végétaux aux besoins spécifiques, garantissant l'aération à des moments déterminés pendant lesquels les conditions environnementales ne conviennent pas aux cultures (fort enneigement empêchant l'ouverture, vent violent).

II.5 Les chiffres sur les quantités de polymères utilisées dans les serres agricoles dans le monde et en Algérie

Depuis son apparition dans l'agriculture, les films plastiques ont révolutionné ce secteur avec d'énormes avantages en termes de qualité et de quantité de cultures. À la fin des dernières décennies, les films agricoles ont non seulement suscité beaucoup d'intérêt et d'attention, mais également un grand marché de plus en plus étendu dans tous les pays d'Europe, d'Amérique, d'Asie et même d'Afrique, avec une tendance positive constante qui ne connaît pas de crise.

La plasticulture est un terme qui indique le monde des films plastiques appliqués en agriculture, allant de couvertures de serres aux paillis, des tunnels bas aux films de solarisation, de films totalement imperméables (FTI) aux films photo-sélectifs. Elle comprend la matière première (plusieurs types de polymères), différents types de films, applications, performances agronomiques, et les problèmes de recyclage [47].

Dans cette section, nous donnons une idée sur les quantités de polymère (en particulier le polyéthylène et la plastique) utilisés comme films agricoles à travers le monde et en Algérie.

II.5.1 Les quantités de polymères utilisées dans les serres agricoles dans le monde

Avec l'avènement du polyéthylène, le terme de plasticulture fait référence à l'utilisation des matériaux plastiques dans l'agriculture (principalement les paillis, les tunnels bas, les couvertures de serres, les films de solarisation, les films de fumigation et les emballages). La plasticulture s'est répandue dans le monde en peu de temps, des États-Unis à l'Europe et à l'Extrême-Orient. La consommation des films plastiques a augmenté de façon exponentielle d'année en année, atteignant le niveau actuel dont la part mondiale est de 3,9 millions de tonnes, principalement en Asie (environ 70%) et en Europe (16%) [47].

La plus grande expansion de serres au monde se situe en Extrême-Orient (Chine, Japon et Corée) avec une part de 8%; dans la région méditerranéenne le pourcentage atteint 15% de la part mondiale. La tendance est constamment positive. Récemment, l'utilisation de films plastiques agricoles au Moyen-Orient et en Afrique a augmenté de 15 à 20% par an. Aujourd'hui, la plus grande consommation de film plastique est en Chine, avec une croissance annuelle de 30% et un volume total de 1 000 000 t / an. Une récente estimation mondiale confirme que les terres agricoles sont couvertes de cette manière : 18.000.000 ha par paillage, 920.000 ha par tunnels bas et 1.300.000 ha par serres.

Les matières plastiques offrent une large gamme d'applications, du paillage aux tunnels bas, des films de solarisation aux revêtements des serres, des films barrières aux films d'ensilage, des systèmes d'irrigation aux films «fonctionnels», des emballages aux pots de fleurs. La figure II.6 montre la consommation de films plastiques agricoles dans le monde, prévu pour 2015, tandis que la figure II.7 présente schématiquement la répartition mondiale de consommation films plastiques agricoles prévue pour la même année [47].

Le matériau de base, pour la plupart des produits, est le polyéthylène (PE) à basse densité (PEBD) ainsi que la version linéaire (PBDL). La formule chimique adoptée pour les produits mentionnés ci-dessus comprend différents éléments (additifs et stabilisants), et est sur des propriétés optiques, mécaniques et thermiques appropriées pour les différents types de films, selon l'utilisation spécifique.

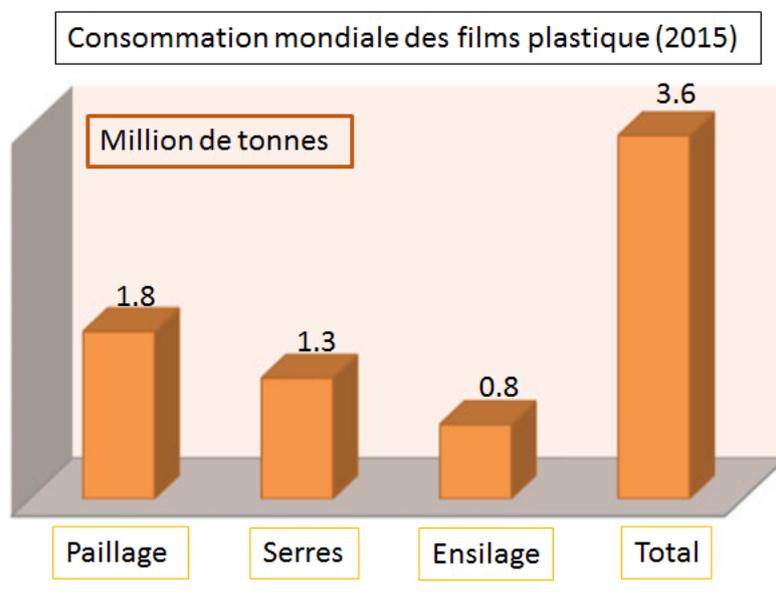


Figure II.6 : Consommation mondiale des films plastiques (2015)

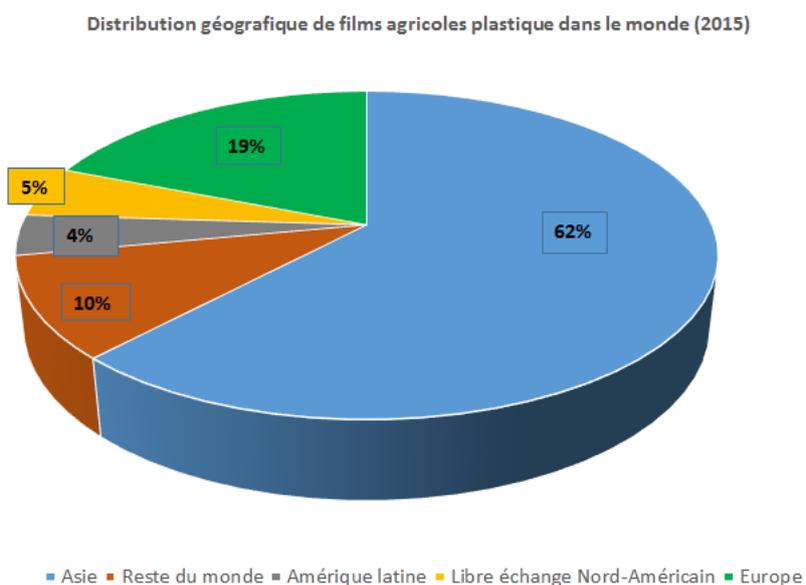


Figure II.7 : Distribution géographique de films agricoles plastique dans le monde (2015) [7].

Globalement, la plasticulture enregistre les valeurs les plus élevées en Asie et les tendances augmentent d’année en année. En 2018, une valeur de 4300 KT a été enregistrée et d’ici 2030 on estime que la valeur de 7050 KT sera atteinte ; soit une croissance de 64%. Dans le même temps, au niveau de l’Europe, même si la plasticulture n’a pas une telle utilité par rapport à la

région asiatique, en 2018 la valeur était de 650 KT et l'augmentation jusqu'en 2030 sera de 105 KT ; soit une augmentation de 51% (figure II.8) [7].

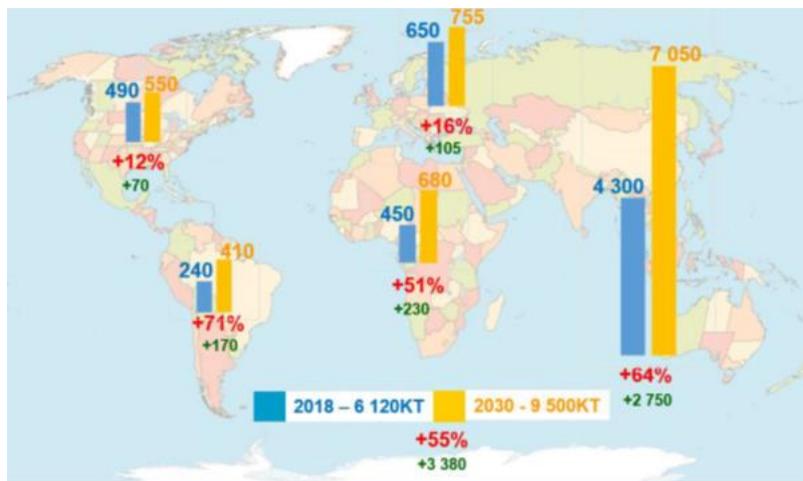


Figure II.8 : Tendances de la plasticulture dans le monde [7].

II.5.2 Les quantités de polymères utilisées dans les serres agricoles en Algérie

La culture sous abris plastique a été introduite en Algérie au cours de la campagne 1969/1970 (projet F.A.O : Food and Agriculture Organization) sur des superficies restreintes en vue de satisfaire les besoins de consommation locale et faire face à la concurrence étrangère. Devant cette expérimentation et les résultats intéressants obtenus, la croissance des superficies des cultures sous abris a été soutenue malgré un début difficile (coût élevé de la technique) [48]. Jusqu'à l'année 1980, les cultures protégées étaient pratiquées uniquement sur la zone littorale, son extension a touchée actuellement toutes les zones climatiques du pays.

Comme le montre le tableau II.3, après une nette régression des superficies cultivées durant la période 1994 à 1997, une nouvelle relance de la plasticulture a été enregistrée à partir 1997.

Compagne	Superficie (ha)
1994-1995	3600
1995-1996	3500
1996-1997	3300
1997-1998	3900
1998-1999	4271

Tableau II.3 : Evolution des superficies cultivées sous abris plastique (Algérie).

Le tableau II.4 représente la répartition géographique de la culture sous serre en Algérie (régions Centre, Sud, Est et Ouest).

Région	Superficie (ha)	Taux (%)
Centre	1651.37	38.66
Ouest	584.90	13.60
Est	487.42	11.42
Sud	1547.64	36.23
Total	4271.33	100

Tableau II.4 : Répartition des superficies cultivées sous abris plastique par région (Algérie).

Le tableau II.4 fait ressortir que les superficies des serres se localise dans les régions du Centre et du Sud avec un taux de 75% du potentiel national, soit près de 3200 ha.

Notons que le taux le plus important de la région Centre se concentre au niveau du Nord : la wilaya de Tipaza occupe la première place dans la région Centre 779 ha devant les wilayas de Boumerdes et d'Alger avec respectivement 395.5 ha et 188.32 ha.

Dans la région Ouest, deux importantes wilayas, en l'occurrence Mostaganem et Tlemcen se distinguent de 285.59 ha soit 88.5% de cette région.

Dans la région Est, une principale zone de culture protégée apparait du lot, il s'agit de la wilaya de Jijel avec 409 ha qui représente un taux de 84%.

Enfin, au niveau de la région Sud, c'est essentiellement la wilaya de Biskra avec 1345.72 ha soit un taux de 87%, suivie de la wilaya de Ouargla avec 77.90 ha soit un taux de 5.03%.

Des statistiques de la campagne agricole (2001-2002) ont affiché un chiffre de 6863 ha de superficie totale couverte de serre.

La répartition par wilaya est illustrée dans la figure II.9 dont les chiffres sur l'axe horizontal représentent les numéros d'identification des différentes wilayas selon le découpage administratif de 2005 en vigueur [20].

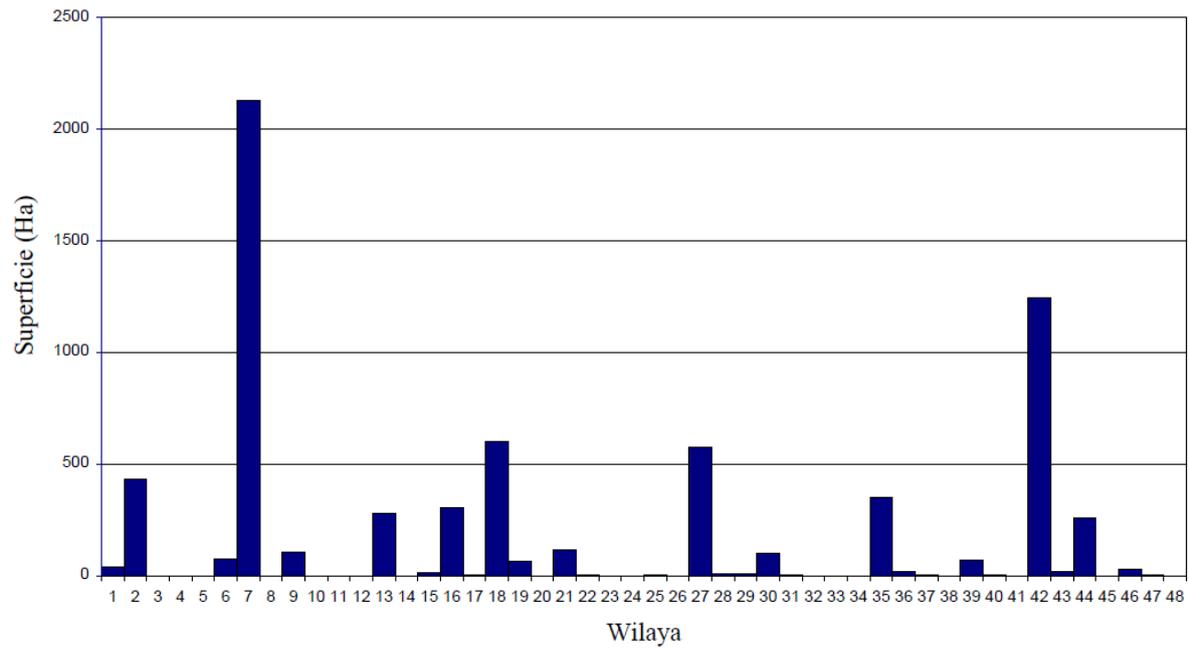


Figure II.9 : répartition par wilaya des superficies couverte par la plasticulture pour la campagne agricole 2001-2002 [20].

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Le présent travail de mémoire de Master 2 est à caractère expérimental. Il s'agit de l'étude du Vieillissement Climatique Des Films Agricoles A Base Du Polyéthylène Basse Densité Utilisés Dans La Région De Bejaia.

Ce mémoire est initialement divisé en trois (03) chapitres. Néanmoins, et suite aux conditions sanitaires, notre travail s'est réduit à deux (02) chapitres. Dans le premier chapitre, nous avons présenté la notion de la serre agricole ainsi que son intérêt incontournable dans l'agriculture moderne. Ensuite, nous avons décrit les principaux critères intervenants dans le choix d'une serre agricole et les différents types des serres utilisées. Enfin, la dernière partie du chapitre a été consacrée aux équipements importants avec lesquels les serres sont dotées afin d'améliorer leur microclimat.

Dans le deuxième chapitre, nous avons rappelé les polymères utilisés dans les serres agricoles et leurs vieillissements. Nous avons, tout d'abord, parlé des mécanismes de vieillissement des polymères comme la biodégradation ainsi que des facteurs influençant ce vieillissement comme la photo-oxydation. Ensuite, nous avons exposé le vieillissement naturel du polyéthylène et l'importance de la thermo-oxydation, de la photo-oxydation et les autres différents types du vieillissement naturel (effet de l'oxygéné et de l'ozone, effet de l'humidité et de la pluie, effet du vent de sable, etc.) dans ce même processus.

Dans ce même chapitre 2, nous avons présenté le fonctionnement d'une serre avec les échanges de chaleur. En effet, nous avons présenté le climat sous la serre et les aspects spécifiques influençant son microclimat comme la photosynthèse, la respiration et l'évapotranspiration. Puis, nous avons exposé les différentes sources extérieures intervenants dans la détermination de ce même microclimat ainsi que le processus d'aération permettant de le modérer. Enfin, et afin de mettre en évidence l'importance des polymères dans l'agriculture, nous avons donné une idée sur leur quantités utilisées dans les serres agricoles dans le monde et en Algérie.

Le travail que nous avons réalisé a ouvert d'autres horizons et perspectives, à savoir :

- Collecte et mise à jour de données statistiques sur les quantités et les types de couvertures en serre utilisées dans la région de Béjaia.
- Proposition de méthodes théoriques de caractérisation des matériaux utilisés.

- Description de méthodes expérimentales utilisées et discussion des résultats dégagés.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] R. Hassanien, E. Hassanien, Ming Li et Wei dong Lin, Advanced applications of Solar energy in agricultural greenhouses, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54 989-1001 (2016).
- [2] E. Brajeul, A. Grisey, Y. Trottin-Caudal, S. Le Quillec et d'autres, Validité des systèmes de cultures protégées dans un contexte d'agriculture durable : Eco-serre, *Innovations agronomiques* 17 49-65 (2011).
- [3] A. DOBBI, Contribution à l'étude expérimentale de vieillissement naturel dans les serres tunels à couvertures de polyéthylène, Thèse de Doctorat, USTHB, Algérie, 2014.
- [4] B. ABDERRAHMANI, Caractérisation sur site du polyéthylène tri-couches AFS3 utilisé comme couverture de serre agricole, Thèse de Magister, Oran, Algérie, 2005.
- [5] A. KHERBOUCHE, Analyse de comportement thermique des parois transparentes à faible inertie thermique application aux serres agricoles, Mémoire de Master, Tlemcen, Algérie, septembre 2019.
- [6] E. Espi, A. Salmeron, A. Fontecha, Y. Garcia and others, Plastic Films for Agricultural Applications, *Journal of Plastic Film and Sheeting* 22 85 (2006).
- [7] V.C. Tudor, D. Ion Smedescu, G. Fintineru et others, Plasticulture: diffusion of plastic materials in the agricultural sector, *Material plastice* 55 N°2 2019.
- [8] S. Bendimerad, N. Bibi-Triki, A. Abène, B. Draoui et M. Benremdane, Modélisation, caractérisation et analyse du comportement dynamique des transferts de chaleur à travers la paroi en polyéthylène et en verre des serres agricoles, Thèse de Doctorat en Energies renouvelables, Institut Euro-méditerranéen de l'environnement et des énergies renouvelables, I3ER Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, France, 2010.
- [9] Y. STALNI, simulation numérique de la convection naturelle dans une serre agricole semi cylindrique fermée, chauffée par le bas, Mémoire de Magister, Option Energies renouvelables, Université Mentouri Constantine, 2012.
- [10] K. Mesmoudi, Etude expérimentale et numérique de la température et de l'humidité de l'air d'un abri serre installé dans les hauts plateaux d'Algérie, Région des Aurès, Thèse de Doctorat en Physique énergétique, Option Energétique, Université de Batna, 2010.
- [11] C. A. Hermez, Gestion des paramètres bioclimatiques dans les serres agricoles, Mémoire d'Ingénieur en Instrumentation électronique, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene USTHB, 2012.
- [12] Y. Bouteraa, Automatisation d'une serre agricole, Thèse de Magister en Sciences Agronomiques, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie. El Harrach, 2012.

- [13] M. Kechir, H. Mahfoudi, Acquisition et transmission sur bus CAN d'une serre agricole, mémoire de Master, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene USTHB, 2012.
- [14] Rapport de la Société Nationale d'Horticulture de France et l'Association des Journalistes de Jardin d'Horticulture, « Serre tunnel », 2014. Disponible sur : <http://www.gerbeaud.com/jardin/amenagement/serre-tunnel,1128.html>.
- [15] Catalogue de la société ULMA-Agricola, « Serres- multi chapelle », 2008. Disponible sur : <https://www.winterempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos-y-documentos/1381/Serres-multichapelle-ULMA-Agricola.pdf>.
- [16] Rapport de la société de Marketing Euro-serre, « Les serres », 2016. Disponible sur : <http://www.serre-jardin.com/img/cata-euro-serre-2016.pdf>.
- [17] Rapport de la société ULMA-Agricola, « L'équipement des serres », 2016. Disponible sur <http://www.ulmaagricola.com/fr/serres/equipements>.
- [18] T. R. Belhadj, Conception d'un anémomètre à fil chaud à large bande passante, Thèse de Doctorat, Ecole de Technologie Supérieure, Université du QUEBEC, 2016.
- [19] M. Leroy, La mesure au sol de la température et des précipitations, La Météorologie, vol. 8, no. 39, p.52, 2002.
- [20] D. Abdelkader, Etude vieillissement naturel et artificiel des films multicouches utilisés comme couverture de serre. These de Doctorat, Oran, Algérie, Octobre 2008.
- [21] M. Carreg, Aide-mémoire - Matières plastiques-. 2ème Edition, Dunod, France, 2007.
- [22] L. Amazouz, Etude comparative des propriétés de deux polymères (PEHB et PEBD) et de leur mélange, Diplôme de licence professionnel en Génie Chimie, Université de Bouira, Algérie, 2018.
- [23] J. Bost, Matière plastique, Chimie Applications, Tome 1, 2ème Edition, France 1985.
- [24] N. Benatia, A. Hamou et N. Hassini, 16^{ème} Congrès Mondial de la Plasticulture, Alger-Algérie, 13-17 décembre 2003.
- [25] S. Boutaren, Effet de l'oxydation sur la biodégradation de films de polyéthylène basse densité (PEBD), Diplôme de magister en génie des procédés, Bejaia, Algérie, Décembre 2009.
- [26] A. Longieras, Mise au point d'un milieu solide inerte pour l'étude de la biodégradation des polymères dans le compost, Thèse de Doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, France, 2005.
- [27] M. Boutamdja, Synthèse et caractérisation d'un absorbeur UV : le 2-hydroxy-4-vinyl benzophénone, Mémoire de Magister, Université de Batna, Algérie, 2006.
- [28] M. Kotny, J. Lemaire, A.M. Delort, Biodegradation of polyethylene films with prooxidant additives, Chemosphere Review 64 247-254 (2002).
- [29] S. Grima, Biodégradation de matériaux polymères à usage agricole : étude et mise au point d'une nouvelle méthode de test, analyse des produits de dégradation et impact environnemental, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France, 2002.
- [30] B.Youssef, M. Benzohra, A. Hamou, A. Dehbi, and J.M. Saiter, Agein characterization to determine the life duration of different PEbd based device used for greenhouserroof, Greensys, , Naples-Italy,4-6 October 2007.
- [31] S.F. Chabira, M. Sebaa, R. Huchon, B. De Jeso, Polymer Degradation and Stability, Journal-Elsevier, 911887-1895 (2006).
- [32] J.M. Haudin, C. G' Sell, Introduction à la Mécanique des Polymères, INPL, France, 1996.

- [33] A.A. Sfeir, G. Guarracino, Ingénierie des systèmes solaires applications à l'habitat, Techniques et Documentations, Paris, 1981.
- [34] K. Guenachi, A. Hamou, N. Hassini, J.M. Saiter, S. Marais, E. Beucher, Polyethylene greenhouse cover aged under simulated Sub-Saharan climatic conditions, *Polymer degradability and stability* 75 247-254 (2002).
- [35] B. Youssef, A. Dehbi, A. Hamou, J.M. Saiter, Natural ageing of tri-layer polyethylene film: evolution of properties and lifetime in North Africa region, *Materials and Design* 29 2017-22 (2008).
- [36] N. Benatia, A. Hamou et N. Hassini, recyclage et revalorisation de matières plastiques utilisées dans l'agriculture, 16^{ème} Congrès Mondial de la Plasticulture, 13-17 décembre 2003, Alger-Algérie.
- [37] J. Sampers, Importance of weathering factors other than UV radiation and temperature in outdoor exposure, *Polymer degradability and stability* 76 455-65 (2002).
- [38] J.M. Pean, N.S. Allen, M. Edge, C. M. Liauw and B. Valange, Studies of synergism between carbon black and stabilisers in LDPE photodegradation, *Polymer degradability and stability* 72 259-270 (2001).
- [39] M. Lehocky, L. Lapcik, R. Dlabaja, L. Rachunek, J. Stoch, Influence of artificially accelerated ageing on the adhesive joint of plasma treated polymer materials, *Czechoslovak Journal of Physics* 54 C533-8 (2004).
- [40] A. Adam, S.A. Kouider, B. Yousef, A. Hamou, J.M. Saiter, Studies of polyethylene multi-layer films used as greenhouse covers under saharian climatic conditions, *Polymer Test Journal* 24 834-8 (2005).
- [41] M. Sebaa, C. Serens, J. Pouyet, Natural and artificial weathering of low density polyethylene (LDPE): Calorimetric analysis. *Journal of Applied Polymer Science-Wiley*, 47 1897 (1993).
- [42] A. Sanchez-solis, A. Padilla, M.R Estrada, On the influence of sands on low density polyethylene photo-degradation, *Polymer Degradation and Stability* 52 305-309 (1996).
- [43] K. Mesmoudi, A. Soudani, L. Serir, Modèle de bilan énergétique d'une serre agricole sans couvert végétal, *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 11 N°1 51 – 64 (2008).
- [44] A. Kherbouche, Analyse de comportement thermique des parois transparente a faible 'inertie thermique application aux serre agricole, Diplôme de MASTER Physique énergétique et énergie renouvelables, Faculté de TECHNOLOGIE, Université Aboubakr Belkaïd Tlemcen, 2019.
- [45] M. Dlim, S. Mohellebi, K. Sadi, Simulation numérique de l'ambiance interne d'une serre de culture sous un climat chaud et sec, Diplôme de MASTER ACADEMIQUE Génie mécanique, Département de génie mécanique, Faculté du génie de la construction, Université Mouloud Mammeri Tizi-ouzou, 2018.
- [46] T. Boulard, Caractérisation et modélisation du climat des serres : Application à la climatisation estivale. Thèse de Doctorat, Ecole National Supérieure Agronomique de Montpellier, 1996.
- [47] M. Malinconico, *Soil Dégradable Bioplastics for a Sustainable Modern Agriculture*, Green Chemistry and Sustainable Technology, Springer, 2017.
- [48] D. Sidrouhou, Contribution à l'étude Technico-Economique de la plasticulture dans la région d'Ouargla, Diplôme d'ingénieur d'état en agronomie saharienne, Ouargla, Algérie, 2006.