

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



**Université Hassiba Benbouali**  
**Chlef**  
**Faculté de technologie**  
**Département de Génie Mécanique**  
**École Doctorale Energies Renouvelables**



# Mémoire

**Pour l'obtention du diplôme de Magister**  
**En Génie Mécanique**  
**Option : Energies Renouvelables**  
**Présenté par : Mr. MAAMMEUR Hocine**

# Thème

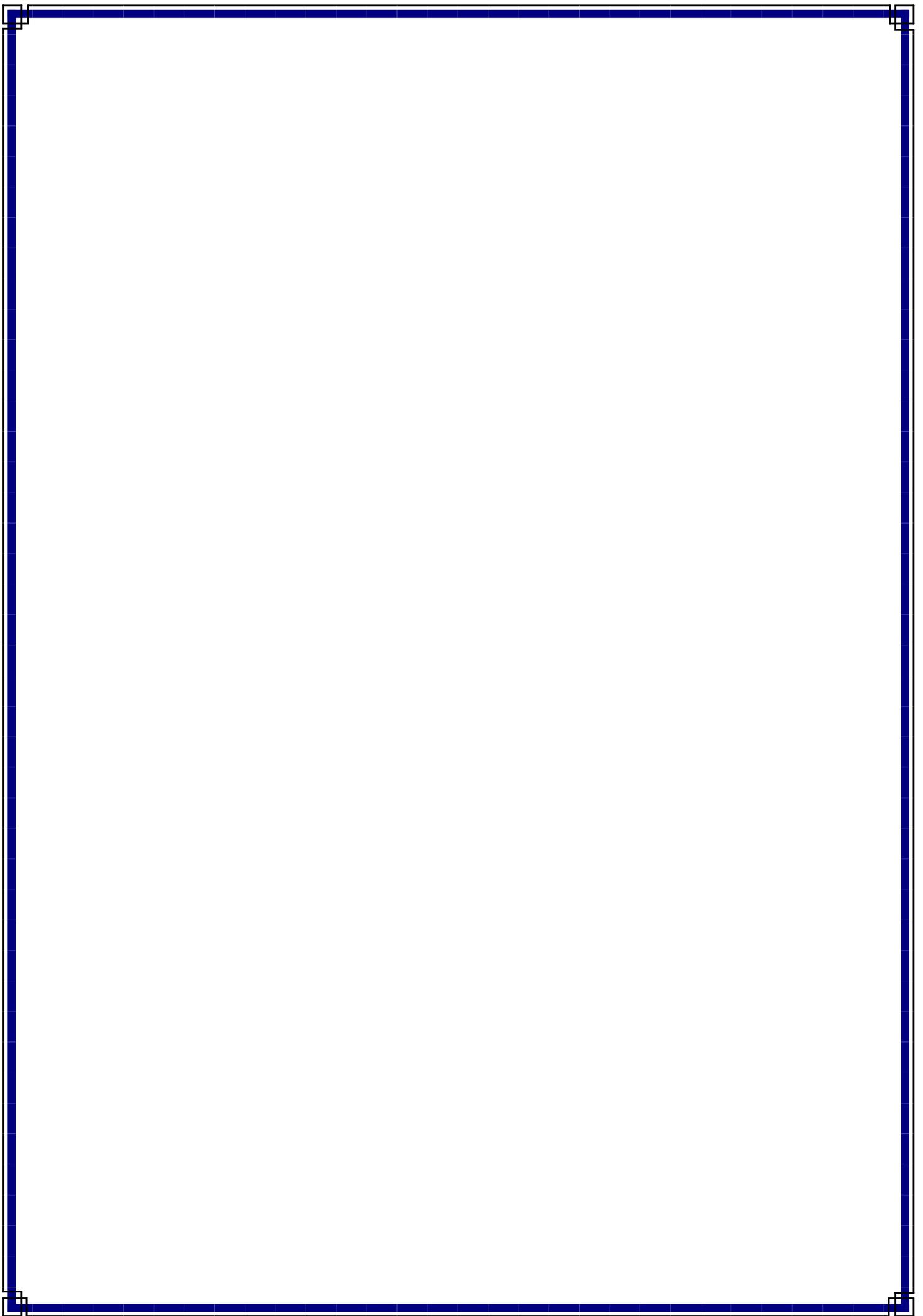
**Simulation et dimensionnement d'une mini-centrale électrique multi-source alimentant des fermes agricoles**

**La soutenance aura lieu le : 11/12/2011**

**Devant le jury :**

<b>Tahar Abbes Miloud</b>	<b>MC\A</b>	<b>U.H.B. Chlef</b>	<b>Président</b>
<b>Belmadani Bachir</b>	<b>Professeur</b>	<b>U.H.B. Chlef</b>	<b>Examineur</b>
<b>Hadj Arab Amar</b>	<b>Directeur de recherche</b>	<b>CDER</b>	<b>Examineur</b>
<b>Hamidat Abderrahmane</b>	<b>Directeur de recherche</b>	<b>CDER</b>	<b>Encadreur</b>
<b>Loukarfi Larbi</b>	<b>Professeur</b>	<b>U.H.B. Chlef</b>	<b>Co-Encadreur</b>

**Promotion 2010-2011**



# Remerciements

*Je remercie d'abord mon Dieu, le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.*

*J'exprime toutes mes reconnaissances à mon encadreur, le Docteur HAMIDAT Abderrahmane, Directeur de recherche au centre de développement des énergies renouvelables pour m'avoir fait bénéficier de ses compétences scientifiques, ses qualités humaines et sa disponibilité.*

*J'exprime mes sincères remerciements à mon Co-encadreur, le Professeur LOUKARFI Larbi à l'université U.H.B.Chlef pour ses efforts qui ont donné une grande chance aux étudiants de l'université U.H.B.Chlef de poursuivre leurs études dans une école doctorale des énergies renouvelables.*

*Je remercie sincèrement le Docteur TAHAR ABBES Miloud, Maître de conférences à l'université de Chlef d'avoir accepté de présider le Jury de cette thèse.*

*Je remercie sincèrement le Docteur HADJ ARAB Amar, Directeur de recherche au centre de développement des énergies renouvelables d'avoir accepté de faire partie du Jury.*

*Je remercie sincèrement le Professeur BELMADANI Bachir à l'université U.H.B.Chlef d'avoir accepté de faire partie du Jury.*

*Je remercie sincèrement tous mes enseignants de l'école doctorale pour leurs efforts sans oublier mes collègues.*

*Mes vifs remerciements vont aussi à Mr. HABBAR Benaouda et sa grande famille qui m'ont accepté dans leur ferme agricole et qui m'ont permis de prendre le maximum de données sans oublier leur chaleureuse hospitalité, sans oublier aussi, le vétérinaire BEDERLAT Maâmer à la direction de l'agriculture de la ville de Chlef.*

*Mes vifs remerciements sont adressés à Mr. HACHEMI Toufique, Directeur de l'office national de la météorologie de la ville de Chlef pour son accueil*

*Je remercie tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce travail.*

*MAAMMEUR Hocine*

# Dédicace

*Je dédie ce modeste travail :*

- *A mon défunt frère.*
- *A mes chers parents.*
- *A mes frères et mes sœurs.*
- *A tous ceux qui me sont chers.*

*MAAMMEUR Hocine*

## Liste des symboles:

<b>TEP</b>	: Tonne Equivalent Pétrole [kWh].
<b>h</b>	: Hauteur angulaire du Soleil [°].
<b>hm</b>	: Hauteur angulaire au midi solaire [°].
<b>H</b>	: Constante de Planck $6,626\ 17 \times 10^{-34}$ J.s.
<b>v</b>	: Fréquence [Hz].
<b>c</b>	: Vitesse de la lumière [m/s].
<b><math>\lambda</math></b>	: Longueur d'onde [ $\mu$ m].
<b>E</b>	: Energie du rayonnement électromagnétique [eV].
<b>L</b>	: Latitude [°].
<b>l</b>	: Longitude [°].
<b>ua</b>	: Unité astronomique vaut environ 149 597 870,7 Km.
<b><math>\delta</math></b>	: Déclinaison [°].
<b>j</b>	: Numéro du jour de l'année
<b>a</b>	: Azimut [°].
<b>a<sub>c</sub></b>	: Azimut au coucher du Soleil [°].
<b>a<sub>l</sub></b>	: Azimut au lever du Soleil [°].
<b>TS</b>	: Heure solaire dans la journée [h].
<b><math>\omega</math></b>	: Angle horaire [°].
<b><math>\omega_l</math></b>	: Angle horaire au lever du Soleil [°].
<b><math>\omega_c</math></b>	: Angle horaire au coucher du Soleil [°].
<b>D</b>	: Durée du jour [h].
<b>TCF</b>	: Heure civile du fuseau horaire [h].
<b>TU</b>	: Temps solaire du méridien de Greenwich [h].
<b>C</b>	: Différence entre TL et TCF [h].
<b>ET</b>	: Terme correctif appelé équation du temps [h].
<b>Hh</b>	: Irradiation sur un plan horizontal [Wh/m <sup>2</sup> ].
<b>AC</b>	: Courant électrique alternatif [A].
<b>DC ou CC</b>	: Courant électrique continu [A].
<b>V</b>	: Tension de la cellule [V].
<b>I</b>	: Courant de la cellule [A].
<b>Rs</b>	: Résistance en série [ $\Omega$ ].
<b>Rp</b>	: Résistance en parallèle [ $\Omega$ ].
<b>k</b>	: Constante de Boltzmann $1,380\ 66 \times 10^{-23}$ J/K.
<b>q</b>	: Charge de l'électron [C]
<b>Tc</b>	: Température de jonction (K)
<b>Isat</b>	: Courant de saturation de la diode [A].
<b>Iph</b>	: Photocourant [A].
<b>A</b>	: Facteur d'idéalité de la photopile
<b>NOCT</b>	: Température nominale de fonctionnement de la cellule solaire [°C].
<b>Ta</b>	: Température ambiante [A].
<b>Ec</b>	: Eclairement [W/m <sup>2</sup> ].
<b>Icc</b>	: Courant de court-circuit [A].
<b>Vco</b>	: Tension de circuit ouvert [V].
<b>P<sub>m</sub></b>	: Puissance maximale [W].
<b>I<sub>m</sub></b>	: Courant maximal [A].
<b>V<sub>m</sub></b>	: Tension maximale [V].
<b>FF</b>	: Facteur de forme
<b><math>\eta</math></b>	: Rendement énergétique

<b>R<sub>Se</sub></b>	: Résistance série équivalente [ $\Omega$ ].
<b>R<sub>Pe</sub></b>	: Résistance parallèle équivalente [ $\Omega$ ].
<b>n</b>	: Nombre de cellules en série
<b>m</b>	: Nombre de cellules en parallèle
<b>N<sub>s</sub></b>	: Nombre de modules en série
<b>N<sub>p</sub></b>	: Nombre de modules en parallèle
<b>S</b>	: Surface de la cellule [ $m^2$ ].

### Lexique :

<b>PV</b>	: Photovoltaïque
<b>P à C</b>	: Pile à combustible
<b>MPPT</b>	: Point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire (Maximum Power Point Tracker).
<b>SAU</b>	: Superficie Agricole Utile
<b>NPC</b>	: Coût actuel net (Net Present cost)
<b>ANPRUE</b>	: Agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie
<b>PMA</b>	: Pointe de consommation annuelle
<b>ADEME</b>	: Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie de France
<b>Wc</b>	: Watt crête
<b>NOCT</b>	: Température nominale de fonctionnement de la cellule solaire (Nominal operating cell temperature).
<b>FAO</b>	: Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
<b>MADR</b>	: Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural
<b>RGA</b>	: Recensement Général de l'Agriculture
<b>ONS</b>	: Office National des Statistiques
<b>Convertir</b>	: Convertisseur électrique
<b>Load</b>	: Charge électrique
<b>Grid</b>	: Réseau électrique
<b>Solar resource</b>	: Ressource solaire
<b>Solar collector panel</b>	: Panneaux solaires thermiques
<b>PV-array</b>	: Panneaux solaires photovoltaïques
<b>Wind power plant</b>	: Centrale d'énergie éolienne
<b>Hot-water tank</b>	: Réservoir de stockage thermique de l'eau chaude
<b>Hot water</b>	: Eau chaude
<b>Cold water</b>	: Eau froide
<b>CHP plant</b>	: Centrale de cogénération
<b>Long-term heat accumulator</b>	: Stockage thermique de longue période
<b>STC</b>	: Standard Test Conditions

## Liste des figures :

- Fig 1** : Consommation énergétique finale par secteur d'activité [2].
- Fig 2** : Consommation du secteur agricole par type d'énergie [2].
- Fig 3** : Consommation algérienne de l'électricité [3].
- Fig 1-1** : Soleil [5].
- Fig 1-2** : Irradiation solaire globale en  $\text{kW/m}^2$  reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu : moyenne annuelle [6].
- Fig 1-3** : Définition de la masse d'air [4].
- Fig 1-4** : Composantes du rayonnement solaire au sol [4].
- Fig 1-5** : Répartition spectrale du rayonnement solaire ; a) Hors atmosphère (AMO). B) À l'incidence  $48^\circ$  (AM1,5) [4].
- Fig 1-6** : Rayonnement global journalier idéal [4].
- Fig 1-7** : Définition des coordonnées terrestres d'un lieu donné [8].
- Fig 1-8** : Mouvements de rotation de la Terre [10].
- Fig 1-9** : Variation de déclinaison en fonction des jours.
- Fig 1-10** : Mouvement apparent du Soleil observé d'un point de latitude L [12].
- Fig 1-11** : Trajectoires apparentes du Soleil en un lieu de l'hémisphère nord [13].
- Fig 1-12** : Définition de la position du Soleil (hauteur et azimut) [4].
- Fig 1-13** : Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich [12].
- Fig 1-14** : Equations du temps ET et de la déclinaison  $\delta$  en fonction du jour de l'année.
- Fig 1-15** : Durée du jour astronomique et la hauteur au midi solaire pour la ville de Chlef
- Fig 1-16** : Irradiation globale journalière de la ville de Chlef [15].
- Fig 2-1** : Production d'électricité dans une ferme agricole [18].
- Fig 2-2** : Coupe transversale d'une cellule PV typique [20].
- Fig 2-3** : Photos de cellules monocristalline et multi-cristalline [21].
- Fig 2-4** : Deux exemples de modules utilisant le Sia (Silicium amorphe) [21].
- Fig 2-5** : Cellule photovoltaïque organique [21].
- Fig 2-6** : Chaîne de fabrication des modules photovoltaïques [39].
- Fig 2-7** : Fonctionnement d'une installation photovoltaïque raccordée au réseau [22].
- Fig 2-8** : Bergerie communale [24].
- Fig 2-9** : L'un des atlas mondiaux des moyennes annuelles de vitesses de vent (en m/s, à 10 m) [25].
- Fig 2-10** : Schéma du fonctionnement d'une éolienne [25].
- Fig 2-11** : Eoliennes à axe vertical [17].
- Fig 2-12** : Eoliennes à axe horizontal [17].
- Fig 2-13** : Principaux composants d'une éolienne [26].
- Fig 2-14** : Evolution de la puissance des éoliennes avec la surface balayée [27].
- Fig 2-15** : Eoliennes dans un milieu rural [28].
- Fig 2I-16** : Production de l'électricité à l'échelle individuelle [29].
- Fig 2-17** : Fonctionnement d'une centrale éolienne [30].
- Fig 2-18** : Différentes étapes d'une installation de type de méthanisation à la ferme [32].
- Fig 2-19** : Fonctionnement d'une centrale biomasse (de type combustion) [33].
- Fig 2-20** : Synoptique de l'installation expérimentale - Système de production hybride éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un stockage de l'énergie [17].
- Fig 2-21** : Maison équipée de systèmes multi-énergies [35].
- Fig 2-22** : Système hybride PV - Diesel série [36].
- Fig 2-23** : Système hybride PV - Diesel commuté [36].
- Fig 2-24** : Système hybride PV - Diesel parallèle [36].

- Fig 2-25** : Schéma de production PV, P à C et une batterie de stockage [37].
- Fig 2-26** : Centrale de cogénération associée à des modules solaires thermiques, photovoltaïques, et une éolienne [38].
- Fig 2-27** : Alimentation d'une ferme agricole dans la ville de Chlef à partir d'une mini-centrale composée de modules photovoltaïques et du réseau électrique
- Fig 3-1** : Schéma équivalent d'une cellule PV [41].
- Fig 3-2** : Puissance maximale sur une caractéristique courant-tension [4].
- Fig 3-3** : Courbes I(V) sous diverses intensités de rayonnement d'une cellule monocristalline [4].
- Fig 3-4** : Courbes I(V) d'une cellule monocristalline à diverses températures [4].
- Fig 3-5** : L'influence de la résistance série  $R_s$  sur la caractéristique I (V) [43].
- Fig 3-6** : L'influence de la résistance shunt  $R_p$  sur la caractéristique I (V) [43].
- Fig 3-7** : Caractéristique courant-tension du module photovoltaïque  $E_c = 1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  [42].
- Fig 3-8** : Branchement en série de n cellules identiques [44].
- Fig 3-9** : Branchement en parallèle de m cellules identiques [44].
- Fig 3-10** : Traitement de la courbe I-V sous éclaircissement [45].
- Fig 3-11** : Calcul des caractéristiques d'une cellule PV réelle.
- Fig 3-12** : Courbes I(V) et P(V) d'une cellule PV réelle.
- Fig 3-13** : Calcul des caractéristiques d'un module PV réel.
- Fig 3-14** : Courbe I(V) d'un module PV réel
- Fig 3-15** : Courbe P(V) d'un module PV réel
- Fig 3-16** : Fonctionnalités générales des systèmes photovoltaïques connectés au réseau [21].
- Fig 3-17** : Schéma bloc d'une chaîne de conversion mono étage non isolée [21].
- Fig 3-18** : Schéma bloc d'une chaîne de conversion à deux étages [21].
- Fig 3-19** : La topologie « Onduleur Central » [21].
- Fig 3-20** : La topologie « Onduleur rangée » [21].
- Fig 3-21** : La topologie « Hacheur rangée » [21].
- Fig 3-22** : La topologie « hacheur modulaire parallèle » [21].
- Fig 3-23** : La topologie « hacheur modulaire série » [21].
- Fig 4-1** : Ferme agricole équipée par des modules solaires photovoltaïques et raccordée au réseau [48].
- Fig 4-2** : Elevage pastoral en Algérie [50].
- Fig 4-3** : Elevage en fermes agricoles en Algérie [52].
- Fig 4-4** : Elevage familial en Algérie [54].
- Fig 4-5** : Eclairage dans un poulailler [62].
- Fig 4-6** : Chauffage dans un poulailler [62].
- Fig 4-7** : Système de ventilation dans un bâtiment agricole d'élevage [62].
- Fig 4-8** : Système brassage d'air dans un bâtiment agricole d'élevage [62].
- Fig 4-9** : Machine à traire mobile [64].
- Fig 4-10** : Cuve de réfrigération du lait [65].
- Fig 4-11** : Schéma d'installation d'un système de pompage de l'eau [66].
- Fig 4-12** : Production de l'électricité dans une ferme agricole [59].
- Fig 4-13** : Vaches allaitantes : aire paillée intégrale [58].
- Fig 4-14** : Vaches allaitantes + génisses : aire paillée intégrale [58].
- Fig 4-15** : Vaches laitières : stabulation logettes + bloc traite et annexes en long pan [58].
- Fig 4-16** : Vaches laitières : stabulation logettes 3 rangs avec couloir de paillage [58].
- Fig 4-17** : Vaches allaitantes + génisses : aire paillée intégrale [58].
- Fig 4-18** : Vaches allaitantes + génisses : aire paillée intégrale [58].

- Fig 4-19** : Bergerie avec couloirs larges [61].
- Fig 4-20** : Optimisation de l'installation photovoltaïque sur le bâtiment agricole [59].
- Fig 4-21** : Bâtiment de stockage de matériel [58].
- Fig 4-22** : Bâtiment de stockage de fourrage [58].
- Fig 5-1** : Schéma d'une ferme agricole à Chlef.
- Fig 5-2** : Photo de la ferme agricole à Chlef.
- Fig 5-3** : Consommation électrique de la ferme agricole.
- Fig 5-4** : Consommation journalière (kWh/jour) de la ferme agricole.
- Fig 5-5** : Pompe immergée électrique semi-axiale pour puits d'eau [68, 69].
- Fig 5-6** : Interface du logiciel HOMER.
- Fig 5-7** : Configuration de l'installation PV-Réseau.
- Fig 5-8** : 1<sup>ère</sup> période de consommation.
- Fig 5-9** : 2<sup>ème</sup> période de consommation.
- Fig 5-10** : 3<sup>ème</sup> période de consommation.
- Fig 5-11** : Demande d'énergie par jour.
- Fig 5-12** : Données du générateur PV.
- Fig 5-13** : Données du convertisseur électrique (Onduleur).
- Fig 5-14** : Données du réseau électrique.
- Fig 5-15** : Schéma de l'installation d'alimentation électrique et la charge à alimenter.
- Fig 5-16** : Irradiation selon l'angle de 30° (Wh/m<sup>2</sup>).
- Fig 5-17** : Températures moyennes mensuelles en °C de l'année 2010
- Fig 5-18** : Ensemble des valeurs de différents équipements de notre installation.
- Fig 5-19** : Résultats optimisés trouvés et faisables.
- Fig 5-20** : Configuration  de 50 kWc.
- Fig 5-21** : Réduction des émissions des gaz à effet de serre
- Fig 5-22** : Rayonnement global dans trois jours différents.
- Fig 5-23** : Rayonnement incident dans trois jours différents.
- Fig 5-24** : Puissance du générateur PV dans trois jours différents.
- Fig 5-25** : Quantité d'électricité prise du réseau dans trois jours différents.
- Fig 5-26** : Quantité d'électricité injectée dans le réseau dans trois jours différents.

## Liste des tableaux :

- Tableau I-1** : Quelques données astronomiques de la ville de Chlef.
- Tableau I-2** : Durée d'insolation moyenne de la ville de Chlef de l'année 2010 [14].
- Tableau I-3** : Température moyenne mensuelle en °C de l'année 2010 de la ville de Chlef [14].
- Tableau I-4** : Mesure du rayonnement global journalier de la ville de Chlef [15].
- Tableau V-1** : Consommation électrique de la ferme agricole durant l'année 2010.
- Tableau V-2** : Equipements électriques des quatre habitats.
- Tableau V-3** : Equipements électriques de la ferme agricole.
- Tableau V-4** : Profile de consommation électrique de la ferme agricole et les quatre habitats.
- Tableau V-5** : Profile de consommation électrique économique de la ferme agricole et les quatre habitats.
- Tableau V-6** : Distribution de la consommation électrique par heure dans la première période.
- Tableau V-7** : Distribution de la consommation électrique par heure dans la deuxième période.
- Tableau V-8** : Distribution de la consommation électrique par heure dans la troisième période.
- Tableau V-9** : Analyse de la consommation électrique.
- Tableau V-10** : Prix matériel et pose inclut [74].
- Tableau V-11** : Variation de production du générateur PV en fonction de l'angle d'inclinaison.
- Tableau V-12** : Bilan énergétique

# SOMMAIRE :

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
----------------------------	---

## Chapitre 1 : L'irradiation solaire

1.1	Introduction .....	6
1.2	Gisement solaire.....	7
1.3	Caractéristique du rayonnement solaire.....	8
1.3.1	Rôle de l'atmosphère .....	9
1.3.2	Masse d'air.....	9
1.3.3	Composantes du rayonnement solaire au sol.....	9
1.3.4	Spectre solaire.....	10
1.3.5	Synthèse de quelques modèles de calcul du rayonnement solaire au sol.....	12
1.3.6	Variations du rayonnement global journalier.....	13
1.4	Paramètres de position sur la terre.....	14
1.5	Mouvement de la terre autour du Soleil.....	15
1.6	Trajectoire apparente du Soleil.....	17
1.7	Paramètres de position du soleil dans le ciel.....	18
1.8	Heures et temps.....	19
1.8.1	Durée du jour.....	19
1.8.2	Relation entre temps légal et temps solaire.....	19
1.9	Applications pour la ville de Chlef.....	21
1.10	Données météorologiques de la ville de Chlef.....	23
1.10.1	Durée d'insolation moyenne.....	23
1.10.2	Température moyenne mensuelle.....	24
1.10.3	Irradiation globale journalière .....	24
1.11	Conclusion.....	25

## Chapitre 2 : Présentation des systèmes multi-sources énergétiques

2.1	Introduction .....	27
2.2	Valorisation des ressources des énergies renouvelables produisant de l'électricité dans les exploitations agricoles .....	28
2.2.1	Énergie solaire photovoltaïque.....	29
2.2.2	Énergie éolienne.....	40
2.2.3	Énergie de biomasse.....	48
2.3	Différents types des mini-centrales multi-sources énergétiques.....	52
2.3.1	Système de production éolien et générateur photovoltaïque couplé au réseau et associé à un stockage de l'énergie.....	52
2.3.2	Système de production éolien, générateur photovoltaïque et source thermique due aux rejets thermiques.....	54
2.3.3	Système de production générateur photovoltaïque et diesel.....	55
2.3.4	Système de production générateur photovoltaïque PV, une pile à combustible (P à C) et une batterie de stockage.....	60
2.3.5	Système de production panneaux solaires thermiques et photovoltaïques, et une éolienne.....	61
2.4	Conclusion.....	62

### Chapitre III : Modélisation d'un système multi-sources PV-Réseau

3.1	Introduction.....	65
3.2	Modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque.....	65
3.3	Caractéristique courant-tension $I=f(V)$ .....	66
3.3.1	Courant de court-circuit.....	66
3.3.2	Tension de circuit ouvert.....	66
3.3.3	Puissance, facteur de forme et rendement d'une cellule photovoltaïque.....	67
3.3.4	Influence de l'éclairement.....	68
3.3.5	Influence de la température.....	68
3.3.6	Influence de la résistance série $R_s$ .....	69
3.3.7	Influence de la résistance parallèle $R_p$ .....	70
3.4	Modèle mathématique d'un module photovoltaïque.....	71
3.4.1	Groupement série des cellules solaires.....	71
3.4.2	Groupement parallèle des cellules solaires.....	72
3.4.3	Groupement mixte des cellules solaires.....	72
3.5	Modèle mathématique d'un générateur photovoltaïque.....	73
3.6	Application d'un programme en logiciel Matlab pour calculer $I=f(I, V)$ et $P=f(V)$ .....	73
3.6.1	Pour une cellule photovoltaïque réelle.....	73
3.6.2	Pour un module photovoltaïque réel.....	77
3.7	Topologie des onduleurs connectés au réseau.....	81
3.7.1	Les fonctions macroscopiques.....	81
3.7.2	Types de conversion.....	82
3.7.3	Les topologies de champs de conversion.....	82
3.8	Conclusion.....	87

### Chapitre IV : Présentation de la ferme agricole

4.1	Introduction.....	89
4.2	Description de la ferme agricole.....	89
4.3	Description de l'élevage des animaux.....	90
4.4	Systèmes d'élevages en Algérie.....	90
4.4.1	Système d'élevage pastoral.....	90
4.4.2	Système d'élevage en fermes (exploitations) agricoles.....	91
4.4.3	Système d'élevage familial.....	92
4.5	Exploitations agricoles, leurs effectifs et leurs activités en Algérie.....	93
4.5.1	Distinction entre les exploitations agricoles.....	94
4.5.2	Occupation de la Superficie Agricole Utile (SAU).....	94
4.5.3	L'irrigation.....	95
4.5.4	Elevage.....	95
4.6	Types de construction des bâtiments d'élevage.....	97
4.7	L'état de l'art de la consommation électrique des fermes agricoles en Algérie..	97
4.7.1	Bâtiments d'élevage.....	97
4.7.2	Bâtiments de stockage.....	101
4.7.3	Pompage de l'eau pour l'irrigation, l'abreuvement du bétail et d'autres besoins.....	102
4.7.4	Chambres froides.....	102
4.8	Production de l'électricité dans les fermes agricoles.....	102
4.9	Bases zootechniques recommandées pour des bâtiments d'élevage équipés d'installations photovoltaïques.....	103

4.9.1	Aire de vie.....	104
4.9.2	Résistance de la charpente.....	104
4.9.3	Ambiance – Ventilation.....	104
4.9.4	Orientation.....	105
4.9.5	Poussière.....	106
4.9.6	Matériaux de bardage.....	106
4.9.7	Luminosité.....	106
4.9.8	Champs électromagnétiques.....	106
4.9.9	Connectique.....	107
4.9.10	Paysage.....	107
4.10	Exemples de coupes de bâtiments d'élevage compatibles avec la production d'électricité photovoltaïque (non exhaustifs et les dimensions sont en mètre)...	107
4.11	Bases techniques recommandées pour des bâtiments de matériels et de stockage du fourrages équipés d'installations photovoltaïques.....	111
4.11.1	Orientation.....	112
4.11.2	Formes des bâtiments.....	112
4.11.3	Choix des matériaux de bardage et paysage.....	112
4.12	Exemples de coupes de bâtiments de stockage compatibles avec la production d'électricité photovoltaïque (les dimensions sont en mètre).....	112
4.13	Conclusion.....	113

## **Chapitre V: Dimensionnement et simulation d'une mini-centrale hybride PV-Réseau**

5.1	Introduction.....	115
5.2	Dimensionnement d'une mini-centrale alimentant une ferme agricole à Chlef .	115
5.2.1	Présentation d'une ferme agricole à Chlef .....	115
5.2.2	Consommation électrique de la ferme agricole.....	116
5.2.3	Elaboration d'un profile de consommation électrique de cette ferme agricole...	119
5.2.4	Elaboration d'un profile de consommation électrique économique.....	125
5.2.5	Analyse de la consommation électrique .....	130
5.3	Techniques de modélisation et logiciels pour l'analyse des systèmes multi-sources d'énergies.....	132
5.3.1	Techniques de modélisation.....	132
5.3.2	Logiciels pour l'analyse des systèmes multi-sources d'énergies.....	133
5.3.3	Synthèse .....	137
5.4	Simulation d'une mini-centrale hybride PV-Réseau.....	138
5.4.1	Etapes d'analyse d'un système multi-source.....	138
5.4.2	Conclusion.....	155

<b>CONCLUSION GÉNÉRALE.....</b>	<b>156</b>
---------------------------------	------------

### **Bibliographie**

### **Résumé**

### **Annexe**

## **INTRODUCTION GÉNÉRALE :**

A la suite de l'augmentation brutale du prix du pétrole survenue en 1973, la production d'énergie électrique pour satisfaire les besoins croissants en énergie électrique des sociétés est devenue un défi de grande importance pour les années à venir. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée essentiellement de la filière nucléaire et de la transformation des ressources naturelles fossiles. La consommation d'énergie provenant de ces ressources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre notamment le dioxyde de carbone et le méthane et au stockage des déchets radioactifs dont le traitement est très coûteux, et pour une part, leur radioactivité reste élevée durant de nombreuses années. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive de ressources naturelles réduit leurs réserves de façon dangereuse pour les générations futures. En vertu du Protocole de Kyoto [1] qui stipule notamment la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la diversification des sources d'énergie renouvelable, elles sont des solutions à promouvoir. Les énergies renouvelables telles que l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydroélectrique et l'énergie de biomasse sont appelées à être de plus en plus utilisées dans le cadre du développement durable et à jouer un rôle important pour protéger notre planète et satisfaire la demande énergétique en produisant une énergie électrique propre, économe et durable à condition de trouver des solutions qui permettent de régler leurs fluctuations naturelles et parfois aléatoires. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée, c'est-à-dire, leur consommation ne limite pas leur utilisation future, non polluantes et ne présentent aucun danger pour la sécurité des gens. Elles se caractérisent aussi par leur souplesse, la simplicité d'utilisation et la multiplicité des domaines d'activités. Pour réaliser ceci, le contexte politique et économique actuel des pays devra aller dans le sens d'une libéralisation du marché de l'électricité afin de diversifier l'offre de production et de distribution de l'énergie électrique en favorisant la concurrence.

Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. La filière étudiée dans cette thèse est l'énergie solaire photovoltaïque. Notre pays et en particulier notre région se connaissent par une activité ancestrale, c'est l'activité agricole, cette activité agricole consiste à travailler la terre et élever les animaux, notamment les vaches, les moutons, les brebis, les volailles, ..., et pour que cette activité soit bien développée, rentable et contribuable à la protection de l'environnement, elle a besoins d'énergie électrique surtout

pour l'irrigation, l'abreuvement du bétail, l'éclairage des bâtiment d'élevage et de stockage et d'autres besoins. Et continuer à rester totalement tributaire du réseau électrique et des produits pétroliers, et surtout en présence d'un bon ensoleillement n'est pas une bonne décision du point de vue économique parce qu'il y a une grande dépense d'argent pour payer les factures d'électricité, et du point de vue climatique parce qu'il y aura un excès de gaz carbonique dans l'atmosphère dû aux émissions des gaz à effet de serre provenant des centrales thermiques qui utilisent l'énergie des ressources fossiles (mazout, gaz naturel charbon).

D'après l'agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie (ANPRUE) du ministère de l'énergie et des mines, la consommation finale énergétique de l'Algérie a atteint 20 millions de TEP durant l'année 2007 où la population a atteint 34,4 Millions d'habitants dont l'agriculture et l'hydraulique ont consommé 1.4 million de TEP (Figure 1) [2].

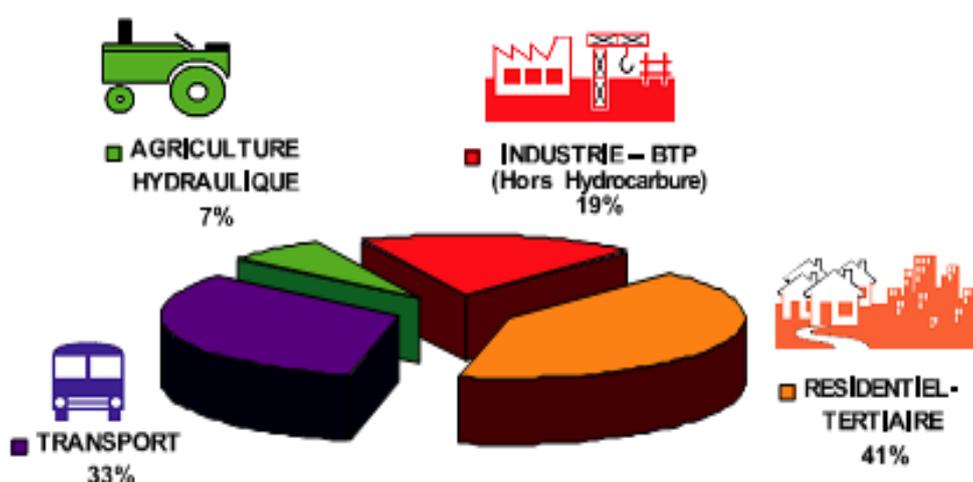
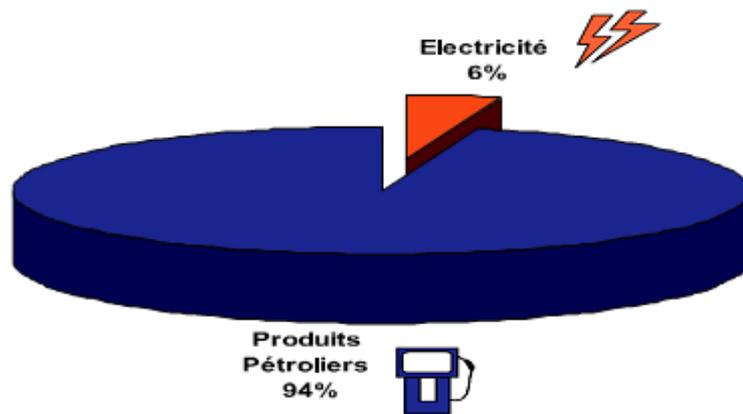


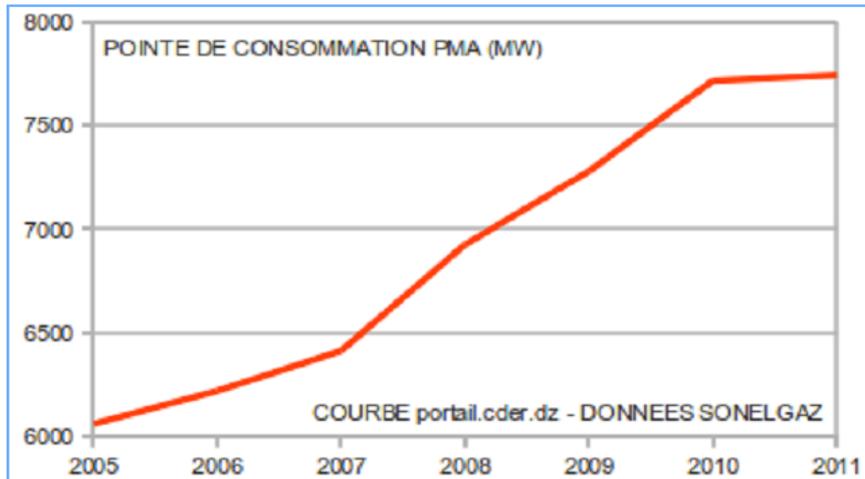
Fig 1 : Consommation énergétique finale par secteur d'activité.

La consommation d'énergie du secteur agricole a atteint 1,1 million de TEP en 2007, d'après la figure 2, la consommation de l'électricité représente 6 % et la consommation des produits pétroliers représente 94 % [2].



**Fig 2** : Consommation du secteur agricole par type d'énergie [2].

Au fil des années, l'Algérie connaît une demande croissante de l'électricité comme le montre la figure 3.



**Fig 3** : Consommation algérienne de l'électricité [3].

La PMA est la demande maximale de l'ensemble des consommateurs connectés au réseau. Ceci correspond à ce qui est communément appelé « pointe de consommation » en référence au « pic » de la courbe de charge. En effet, la première contrainte climatique qui a

un impact systématique et immédiat sur la demande de l'électricité et sur la gestion du réseau électrique est la température. La consommation d'électricité atteint ses plus hauts niveaux le soir, quand tous les dients sont rassemblés chez eux et allument simultanément, éclairage, chauffages électriques et autres appareils ménagers (télévisions, micro-ordinateurs, lave-linges... etc.).

La consommation algérienne de l'électricité a mardi 01 février 2011 à 19h15mn un nouveau pic historique de 7 764 MW en raison de la vague de froid qui traverse le pays et des températures actuelles exceptionnellement basses. Cette nouvelle pointe surpasse le pic enregistré le 23 janvier dernier qui avait atteint 7 745 MW. L'Opérateur Système – filiale du Groupe Sonelgaz en charge de la sûreté du système électrique – a également relevé une évolution sensible de la puissance maximale appelée (PMA) estimée à 8,39 % comparativement à la PMA de l'hiver 2010 (7 163 MW enregistrée le 10 janvier 2010) [3].

Vu à ces problèmes économique et écologique, il y a donc une nécessité de recourir à l'utilisation des sources d'énergies gratuites et non polluantes et les équipements efficaces qui consomment moins d'électricité. De ce point de vue-là, notre projet s'intéresse à l'alimentation des fermes agricoles dont les activités se basent surtout sur l'élevage des animaux et l'irrigation à partir d'une mini-centrale multi-source qui utilise un générateur photovoltaïque et le réseau électrique. Nous avons choisi la connexion au réseau, parce que l'inconvénient des sources des énergies renouvelables est que leur production est intermittente dans le temps et la quantité de cette production dépend des conditions favorables de ces sources d'énergie renouvelable. Donc, dans les moments où il y aura un surplus de production d'énergie par ces sources d'énergie, il sera injecté dans le réseau qui représente une batterie de stockage sans fin, et dans les moments où il y aura un manque, le réseau le compense. Donc, l'avantage d'utiliser les énergies renouvelables et en particulier l'énergie photovoltaïque dans les fermes agricoles sera de contribuer non seulement à la réduction de la consommation de l'électricité du réseau électrique mais aussi à la réduction de la consommation des produits pétroliers et cela est possible par l'alimentation des pompes d'irrigation par des modules photovoltaïques au lieu de les alimenter par des groupes diesels.

Notre étude va être divisée en cinq parties :

- La première partie concerne l'irradiation solaire.

- La deuxième partie est consacrée à la présentation des systèmes multi-sources énergétiques.
- La troisième partie traite la modélisation d'un système multi-source PV-Réseau.
- La quatrième partie est consacrée à la présentation de la ferme agricole.
- La cinquième partie étudie le dimensionnement et la simulation d'une mini-centrale hybride PV-Réseau.

CHAPITRE :

1

## 1.1 Introduction :

Le Soleil (Figure 1-1) est une étoile de forme pseudo-sphérique. Il est situé à une distance moyenne de 149 598 000 km de la Terre. Composé de matière gazeuse, essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium, il est le siège de réactions de fusion nucléaire permanentes [4].

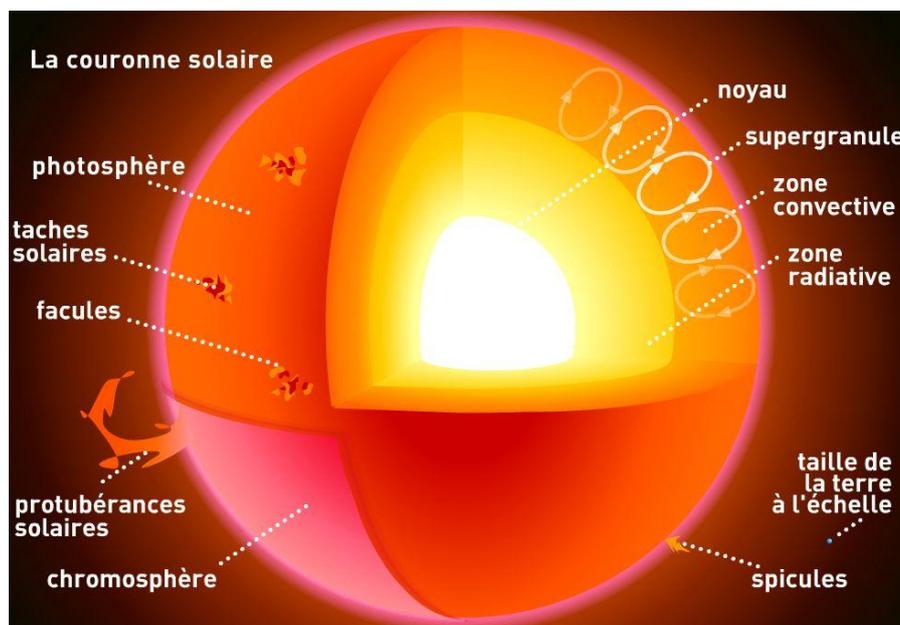


Fig 1-1 : Soleil [5].

**Tailles de la terre et du soleil :** Le diamètre du soleil est 1 392 000 km, et celui de la terre est 12 756 km.

**Noyau :** Région la plus chaude du soleil (environ 15 000 000 °C), elle est le siège des réactions thermonucléaires qui alimentent le Soleil en énergie.

**Zone radiative :** Environ 250 000 km d'épaisseur, de 10 000 000 à 500 000 °C.

**Zone convective :** Couche turbulente, située sous la photosphère, où l'énergie est transportée par convection. Elle serait épaisse d'environ 200 000 km.

**Supergranule :** Cellule convective.

**Photosphère :** Surface du soleil habituellement visible. C'est une couche de 200 km d'épaisseur, à l'aspect granulaire, de 6500 à 4500 °C.

**Taches solaires :** Ce sont des structures temporaires de la photosphère. Elles paraissent sombres car la température y est plus basse d'environ 1 000 degrés.

**Facules :** Plages brillantes entourant les taches et correspondant à des zones de renforcement du champ magnétique dans la chromosphère.

**Chromosphère :** Couche épaisse d'environ 5 000 km, qui enveloppe la photosphère et d'où s'échappent des protubérances solaires.

**Spicules :** Structures chromosphériques en forme d'épis (hauteur : 10 000 km et durée de vie est quelques minutes).

**Protubérances solaires :** Immenses jets de gaz, associés aux éruptions qui s'élèvent dans la chromosphère et la couronne, pilotés par des champs magnétiques.

**La couronne solaire :** Région la plus externe de l'atmosphère solaire qui s'étend jusqu'à plusieurs millions de kilomètres dans le milieu interplanétaire.

## 1.2 Gisement solaire :

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 probable d'un système énergétique solaire et donc faire le dimensionnement le plus exact possible compte tenu des demandes à satisfaire.

La connaissance du gisement solaire d'une région est plus ou moins précise :

- Selon la densité des stations pour lesquelles on a des données.
- Selon le nombre d'années de mesures disponibles.
- Selon le pas de temps des données (mois, jour, heure).
- Selon la nature des données : durée d'ensoleillement, composante directe, diffuse et globale du rayonnement solaire, albédo du sol, etc.....

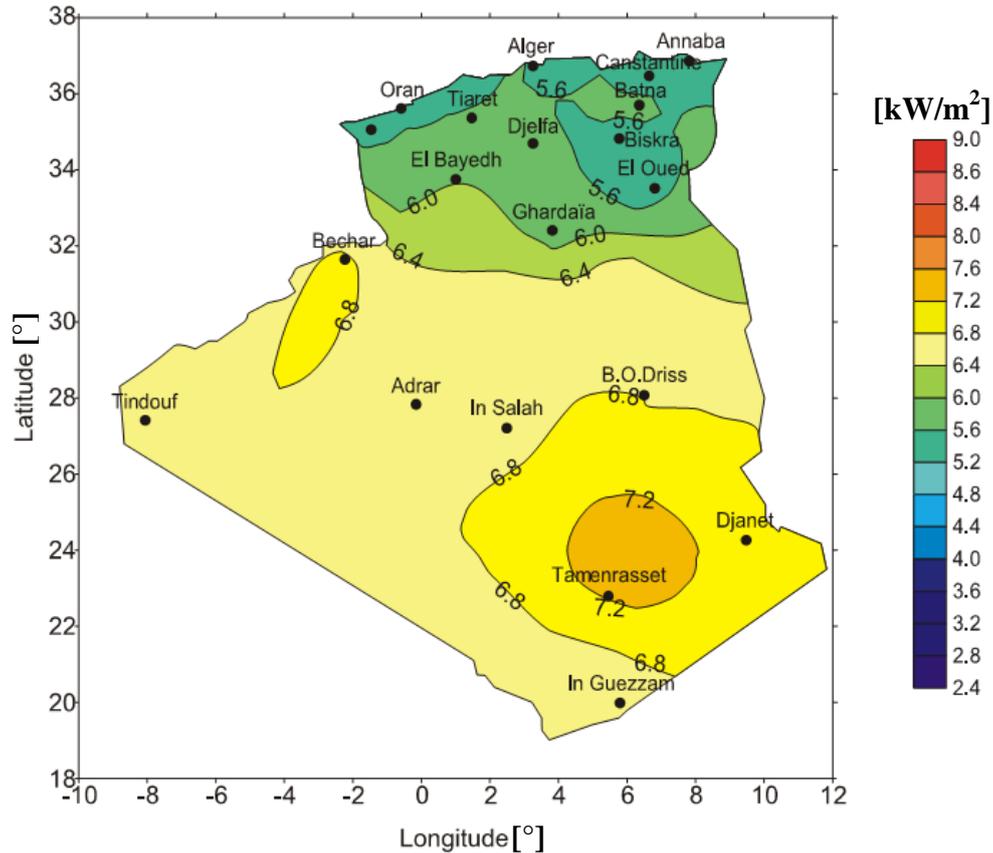
A cet effet, concernant la mesure du rayonnement solaire en Algérie, le réseau de mesures est peu dense relativement à la superficie du territoire. En effet, seules sept stations météorologiques sur la soixantaine que compte le réseau de l'office national de la météorologie assurent la mesure des composantes diffuse et globale du rayonnement solaire reçu sur le plan horizontal. Pour pallier aux insuffisances des réseaux de mesures, des modèles sont proposés, ils sont basés essentiellement sur l'utilisation des données météorologiques en particulier la durée d'insolation.

Les différentes irradiations solaires utilisées par les concepteurs de systèmes solaires, sont :

- L'irradiation directe à incidence normale.
- Les irradiations de base, la composante diffuse et la composante globale mesurées sur plan horizontal.
- L'irradiation solaire globale reçue sur des plans verticaux orientés Est, Ouest et Sud.

- L'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu et orienté vers le Sud.

La distribution de l'énergie reçue en Algérie, en moyenne annuelle, est donnée par la figure 1-2. Elle présente les différents niveaux énergétiques qui donnent ainsi un découpage du pays en régions isoénergétiques [6].



**Fig 1-2 :** Irradiation solaire globale en kW/m<sup>2</sup> reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu : moyenne annuelle [6].

### 1.3 Caractéristique du rayonnement solaire :

L'énergie qui nous vient du soleil représente la quasi-totalité de l'énergie disponible sur terre. Outre l'apport direct sous forme de lumière et de chaleur, elle est à l'origine de la biomasse (photosynthèse), du cycle de l'eau, des vents, des courants océaniques, et sous forme stockée durant des millions d'années, de nos réserves de gaz, de pétroles et de charbon.

Les seules ressources énergétiques non solaires sont la chaleur de la terre (géothermique), les marées et l'énergie nucléaire. L'énergie du Soleil est produite par des réactions de fusion thermonucléaire, les noyaux d'hydrogène (protons) s'assemblent en noyaux d'hélium (2

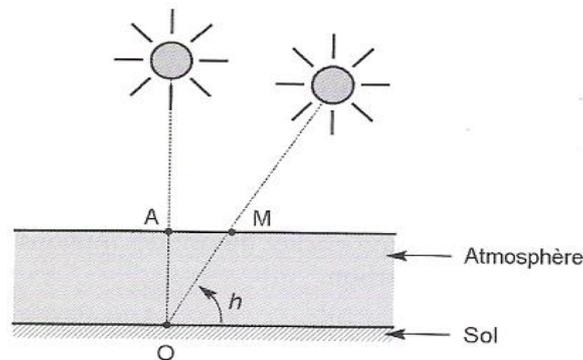
protons + 2 neutrons). Cette énergie est émise dans l'espace par la surface du Soleil, notamment sous forme d'ondes électromagnétiques (lumière) [4].

### 1.3.1 Rôle de l'atmosphère :

Cette énergie lumineuse dite « extraterrestre » c'est-à-dire hors atmosphère a été évaluée avec précision par la NASA et vaut  $1\,367\text{ W/m}^2$ , il s'agit de l'irradiance reçue ou rayonnement solaire instantané à un instant donné au-dessus de l'atmosphère terrestre en incidence normale (c'est-à-dire sur un plan perpendiculaire à la direction du Soleil). Cette énergie qui descend en ligne droite vers notre planète ne peut pas nous parvenir sur la Terre en intégralité car elle va subir des transformations en traversant l'atmosphère par absorption et par diffusion [4].

### 1.3.2 Masse d'air :

Plus le Soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus il va subir de transformations. On appelle masse d'air le rapport entre l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu, cela dépend aussi de la hauteur angulaire du Soleil (Figure 1-3) [4].



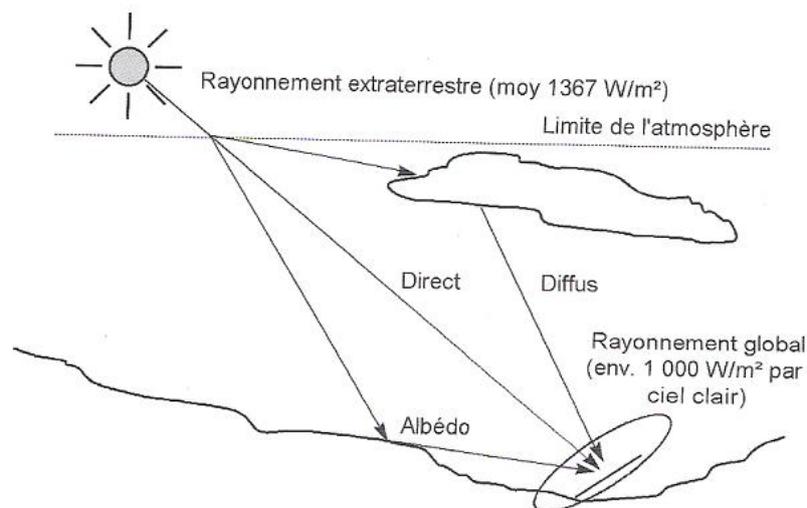
**Fig 1-3 :** Définition de la masse d'air [4].

A l'aide des points **O**, **A** et **M** et l'angle **h** sur la figure 1-3, on décrit la longueur du trajet du soleil à travers l'atmosphère :  $OM = OA / \sin h$ . Donc Masse d'air  $OM/OA = 1/\sin h$ .

### 1.3.3 Composantes du rayonnement solaire au sol :

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, on distingue plusieurs composantes :

- **Le rayonnement direct** : est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux. Il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs [4].
- **Le rayonnement diffus** : est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau et les poussières qui produisent cet éclatement des rayons du soleil. Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques [4].
- **L'albédo** : est la partie réfléchiée par le sol. Il dépend de l'environnement du site [4].
- **Le rayonnement global** : est tout simplement la somme de ces diverses contributions comme le montre la figure 1-4 [4].



**Fig 1-4** : Composantes du rayonnement solaire au sol

### 1.3.4 Spectre solaire :

Le spectre du soleil, c'est sa décomposition en longueurs d'onde ou « couleurs ». La lumière solaire est en effet composée de toutes sortes de rayonnements de couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde. Les photons, grains de lumière qui composent ce rayonnement électromagnétique, sont porteurs d'une énergie qui est liée à leur longueur d'onde par l'équation 1-1 :

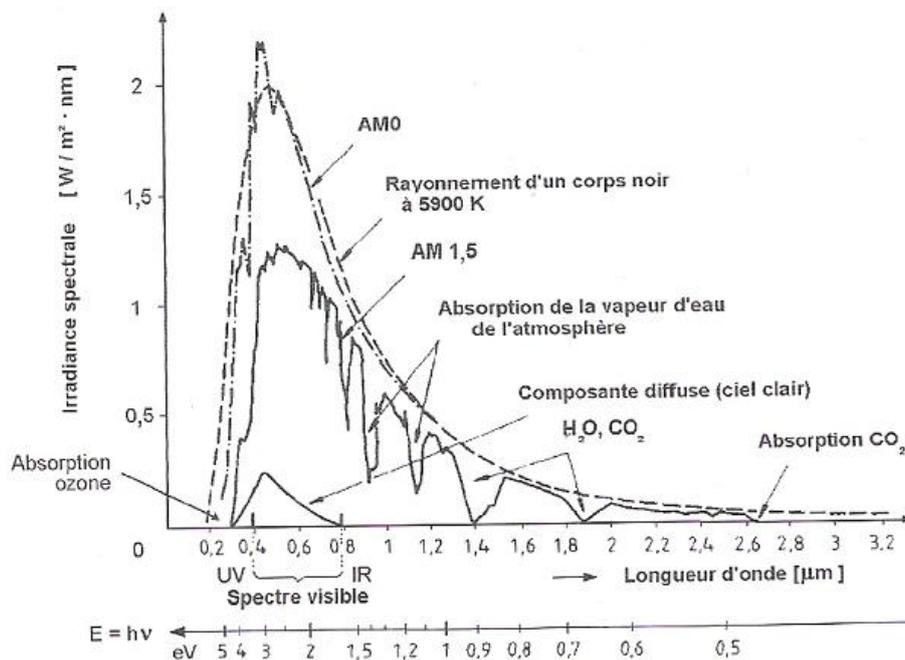
$$E = \frac{H \times c}{\lambda} = \nu \times H \tag{1-1}$$

Où  $H$  est la constante de Planck,  $\nu$  la fréquence,  $c$  la vitesse de la lumière et  $\lambda$  la longueur d'onde.

C'est cette relation, mise à jour par Louis de Broglie en 1924 qui a confirmé la nature à la fois corpusculaire et ondulatoire de la lumière : présence de corpuscules « les photons » et propagation d'ondes avec une fréquence de vibration et une longueur d'onde.

Une courbe standard de la répartition spectrale du rayonnement solaire extraterrestre, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de **AM0**. Sa distribution en énergie est répartie comme suit :

Ultraviolet UV	$0.20 < \lambda < 0.38 \mu\text{m}$	6.4 %
Visible	$0.38 < \lambda < 0.78 \mu\text{m}$	48 %
Infrarouge IR	$0.78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$	45.6 %



**Fig 1-5 :** Répartition spectrale du rayonnement solaire ;  
 a) Hors atmosphère (AM0). b) À l'incidence 48° (AM1,5) [4].

La figure 1-5 montre l'atténuation observée après le passage à travers une épaisseur d'atmosphère correspondant à une masse d'air 1.5, soit l'équivalent d'une hauteur du soleil de 48° au niveau de la mer. L'irradiation spectrale est le flux solaire pour une longueur d'onde donnée (et donc une couleur donnée, en ce qui concerne la lumière visible).

Ce spectre de ciel clair, noté **AM1.5**, sert de référence pour la mesure de cellules photovoltaïques. Les simulateurs servant à mesurer les modules tentent de le reproduire aussi fidèlement que possible. On peut également remarquer le spectre du diffus par beau temps, nettement renforcé vers le bleu du fait de la diffusion de Rayleigh sur l'air.

On voit clairement sur le spectre **AM1.5** les bandes d'absorption correspondant aux gaz de l'atmosphère, notamment le CO<sub>2</sub> et la vapeur d'eau. Est représenté aussi sur la figure 1-5 le spectre d'un corps noir dont la température de couleur serait de 5 900 K, très proche du spectre solaire **AM0**. Le soleil est donc souvent assimilé à ce corps noir, ce qui permet aux physiciens d'élaborer des modèles pour expliquer son comportement et ses émissions de rayonnement [4].

### 1.3.5 Synthèse de quelques modèles de calcul du rayonnement solaire au sol :

- **Modèles d'évaluation des irradiances totales :**

Quand on analyse les données d'insolation disponibles et les préoccupations énergétiques sur la Terre, on se rend compte qu'on a besoin de plus de mesures sur des périodes d'observation plus longues. Ce besoin se ressent avec une plus grande résolution spatiale de toutes les composantes du rayonnement solaire et surtout de leur distribution spectrale. En effet, la plupart des stations existantes n'enregistrent que les irradiances globale et diffuse et/ou la durée d'ensoleillement. Quant à l'irradiance directe normale et aux distributions spectrales, elles sont pratiquement ignorées. Les mesures concernant les propriétés de l'atmosphère terrestre sont, quant à elles, menées avec un appareillage complexe par des laboratoires spécialisés, ce qui réduit le volume des données correspondantes. Enfin, quand elles existent, les stations de mesure sont soit sous équipées, soit mal réparties sur le globe. Pour pallier le manque de données, une méthode alternative s'impose, estimer le rayonnement solaire aux sites où il n'est pas mesuré, c'est ce à quoi se sont livrés des équipes de recherche, que ce soit sur plan horizontal ou sur surface inclinée. Selon le type de données utilisées avec des valeurs moyennes d'irradiance, on distingue [7]:

- 1- Modèles basés sur des données statistiques d'irradiance mesurées.
- 2- Modèles basés sur des données climatologiques.
- 3- Modèles d'irradiance directe.
- 4- Modèles séparant les irradiances directe et diffuse pour estimer l'irradiance globale.
- 5- Modèle de King et Buckius.
- 6- Modèle de Hamlem et al.

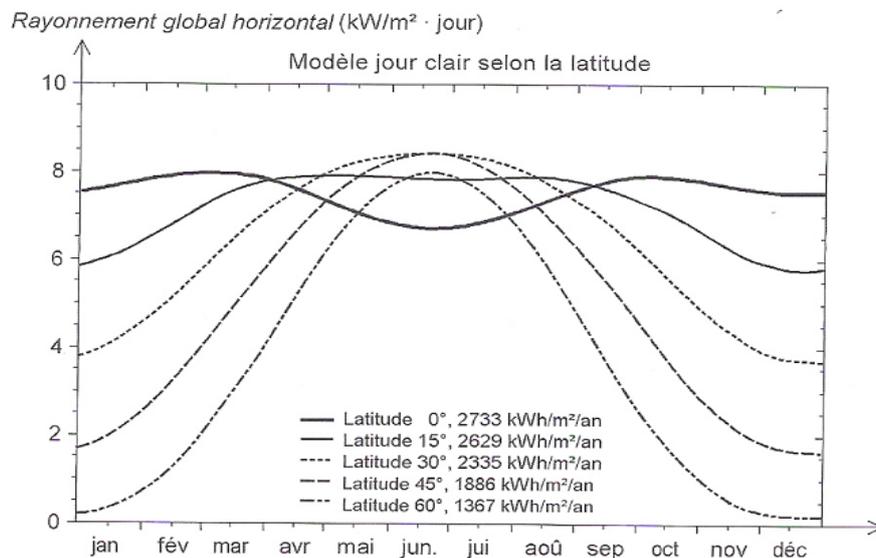
- **Modèles basés sur la transmission du rayonnement spectral par l'atmosphère :**

Les modèles de distributions spectrales du rayonnement solaire supposent pratiquement tous une atmosphère unidimensionnelle, la littérature spécialisée fait peu état des modèles bi ou tridimensionnels. La précision de ces modèles varie selon le nombre et la qualité des paramètres utilisés pour les applications envisagées. En définitive, dans tous ces modèles, les effets dus aux aérosols sont les moins faciles à appréhender et sont examinés par différentes méthodes qui permettent de les estimer par des fonctions de transmission à travers le trouble atmosphérique qui prend plusieurs dénominations en fonction des auteurs [7].

- 1- Modèle spectral de Robinson
- 2- Modèle de Braslau et Dave
- 3- Modèle de Monroe et Shepherd
- 4- Modèle de Mcclatchey et al

### 1.3.6 Variations du rayonnement global journalier :

- **Influence de la latitude :**



**Fig 1-6 :** Rayonnement global journalier idéal [4].

La figure 1-6 montre l'évolution annuelle du rayonnement global journalier « idéal » (modèle d'un jour clair sans nuages) en fonction de la saison et de la latitude du lieu, plus la latitude s'élève, et plus les différences sont marquées [4].

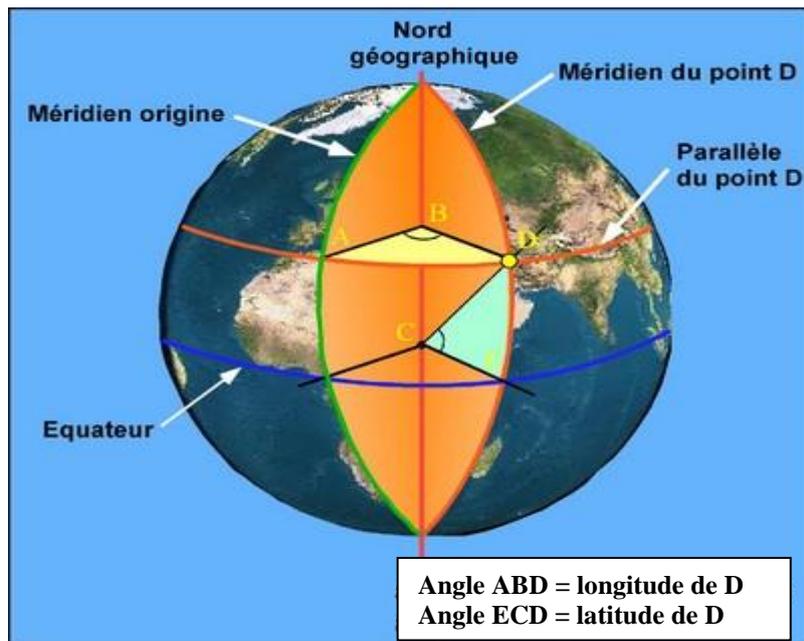
- **Influence de l'exposition :**

Si l'usage est uniquement estival, une faible inclinaison sera préférable (10 ou 30° par rapport à l'horizontale) alors que pour une utilisation annuelle, il vaudra mieux s'en tenir à la règle : latitude du lieu + ou -10° [4].

- **Altitude, albédo et autres facteurs :**

Bien entendu la latitude, la saison et l'exposition sont les principaux facteurs qui déterminent le rayonnement solaire exploitable au sol en un lieu donné. Mais d'autres éléments peuvent intervenir, notamment en montagne, en bordure de mer ou dans des villes où la pollution atmosphérique est élevée [4].

#### 1.4 Paramètres de position sur la terre :



**Fig 1-7 :** Définition des coordonnées terrestres d'un lieu donné [8].

L'équateur est une ligne fictive de séparation entre l'hémisphère nord et l'hémisphère sud, définie par un plan perpendiculaire à l'axe des pôles. Le méridien est le plan du lieu passant par l'axe des pôles.

Tout point de la sphère terrestre peut être repéré par deux coordonnées, appelées coordonnées terrestres, sa latitude «L » qui est la distance angulaire d'un point quelconque du globe par rapport à l'équateur (de 0 à 90° dans l'hémisphère nord et de 0 à -90° dans l'hémisphère sud )

et sa longitude «  $l$  » qui est également un angle donné par rapport au méridien de Greenwich (arc de cercle passant par les deux pôles et la ville de Greenwich en Angleterre) en se déplaçant vers l'est (Figure 1-7) [4].

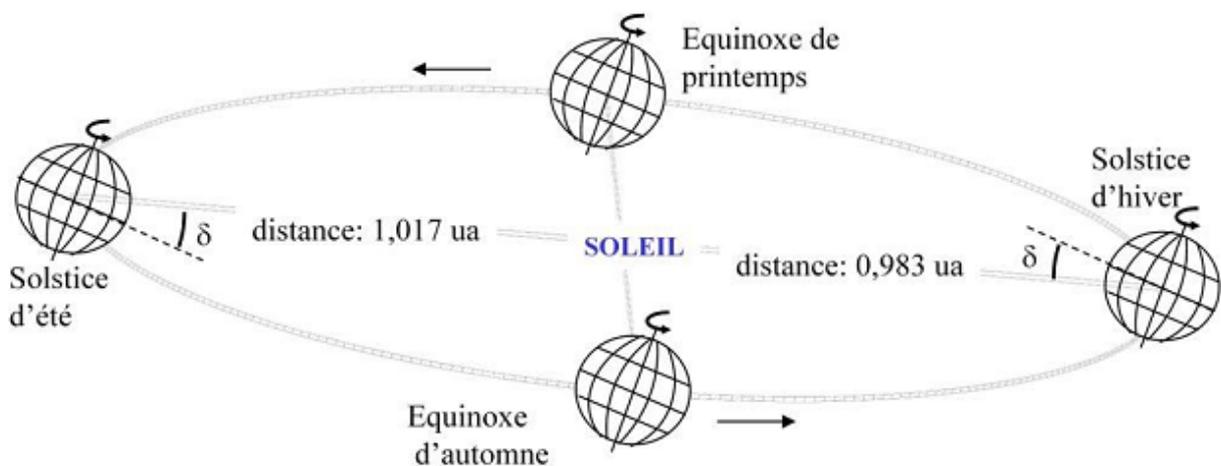
La ferme agricole qu'on a étudiée se trouve dans la ville de Chlef qui a les coordonnées géographiques suivantes [9]:

Latitude  $L = 36.16^\circ \text{ N}$

Longitude  $l = 1.33^\circ \text{ E}$

### 1.5 Mouvement de la terre autour du Soleil :

La terre décrit autour du Soleil (Figure 1-8) une trajectoire légèrement elliptique dont le Soleil occupe un foyer. En fait la distance qui les sépare varie de -1.69 % à +1.69 % au cours de l'année du fait de la légère excentricité de l'orbite terrestre.



**Fig 1-8 :** Mouvements de rotation de la Terre [10].

L'axe de rotation de la Terre sur elle-même est incliné de  $23^\circ 27'$  par rapport au plan de l'écliptique (plan de l'orbite terrestre). On appelle déclinaison  $\delta$  l'angle formé par l'axe Terre-Soleil avec le plan de l'équateur à un moment donné de l'année. La déclinaison vaut donc  $+23^\circ 27'$  au solstice d'été,  $-23^\circ 27'$  au solstice d'hiver, et est nulle aux équinoxes. Cette déclinaison est responsable des saisons, car dans l'hémisphère nord, les rayons nous parviennent avec un angle plus élevé en été, et plus bas sur l'horizon en hiver (c'est le contraire dans l'hémisphère sud). Elle explique aussi que les différences saisonnières soient plus marquées vers les hautes latitudes. On sait également que l'activité solaire n'est pas

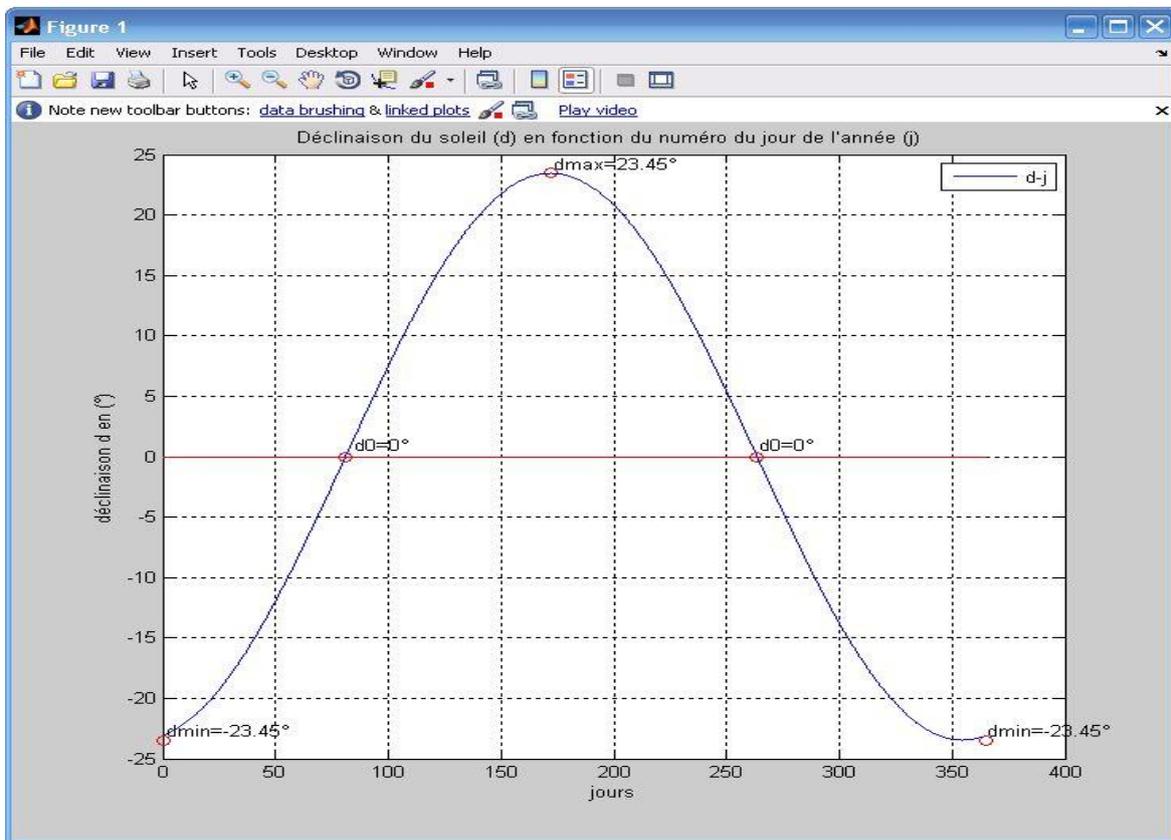
constante et subit des éruptions solaires, mais leurs conséquences ne dépassent pas 4 % de variation d'intensité du rayonnement émis [4].

La variation de la déclinaison de la terre au cours de l'année est représentée par l'équation 1-2 [11]:

$$\delta = 23.45 \times \sin\left(360 \times \frac{284 + j}{365}\right) \quad (1-2)$$

Où  $j$  est le numéro du jour de l'année.

Avec le logiciel MATLAB nous avons représenté sur la figure 1-9 cette variation de déclinaison en fonction des jours.



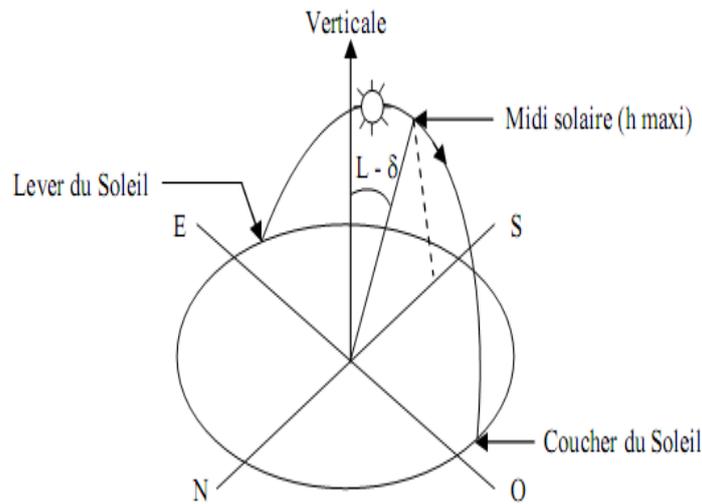
**Fig 1-9 :** Variation de déclinaison en fonction des jours.

- $\delta = 23,45^\circ$  au solstice d'été (S.E) (au 21 juin).
- $\delta = -23,45^\circ$  au solstice d'hiver (S.H) (au 21 décembre).
- $\delta = 0^\circ$  à l'équinoxe de printemps (E.P) (au 21 mars) et à l'équinoxe d'automne (E.A) (au 21 septembre).
- $\delta > 0^\circ$  entre équinoxe de printemps (E.P)- Solstice d'été (S.E) – équinoxe d'automne (E.A)

·  $\delta < 0^\circ$  entre équinoxe d'automne (E.A) – Solstice d'hiver (S.H) – équinoxe de printemps (E.P)

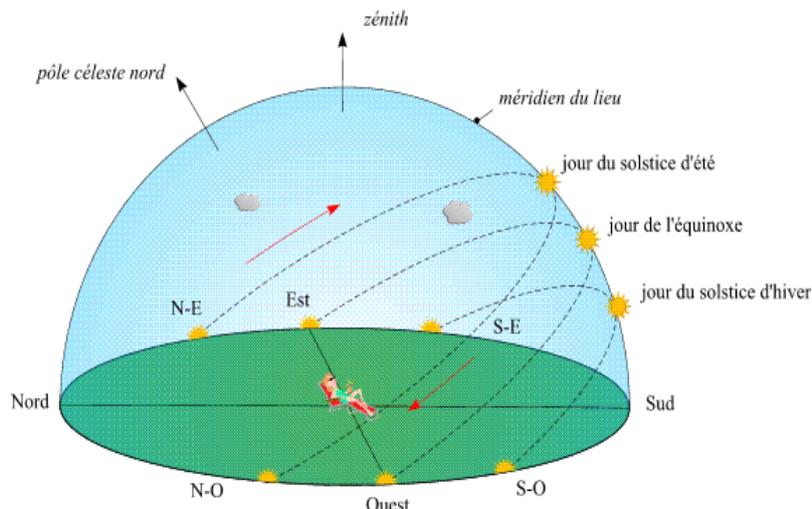
La durée du jour est de 12 heures aux équinoxes, elle est inférieure à 12 heures entre le 21 septembre et le 21 mars, supérieure à 12h entre le 21 mars et le 21 septembre.

**1.6 Trajectoire apparente du Soleil :**



**Fig 1-10 :** Mouvement apparent du Soleil observé d'un point de latitude  $L$  [12].

Pour un observateur situé sur la surface de la Terre (Figure 1-10), le Soleil décrit une trajectoire apparente qui dépend de la latitude et de la longitude du lieu où il se trouve. Au midi solaire, l'angle que fait la direction du Soleil avec la verticale du lieu est égal à  $(L - \delta)$  [12].

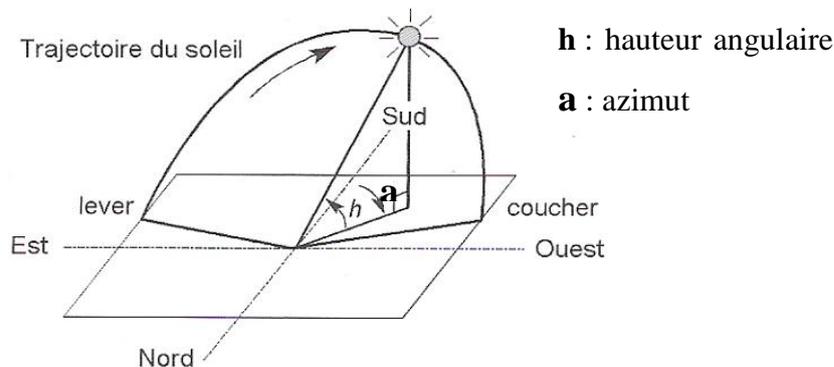


**Fig 1-11 :** Trajectoires apparentes du Soleil en un lieu de l'hémisphère nord [13].

Les positions du lever et du coucher du Soleil comme le montre la figure 1-11 vont varier au cours de l'année en fonction du déplacement vers le nord ou vers le sud de l'écliptique. Le Soleil se lève exactement à l'est et se couche précisément à l'ouest aux équinoxes. Au solstice d'hiver, le Soleil se lève au sud-est et se couche au sud-ouest tandis qu'au solstice d'été, il se lève au nord-est et se couche au nord-ouest.

### 1.7 Paramètres de position du soleil dans le ciel :

La position du Soleil est définie par deux angles : sa hauteur angulaire **h** (l'angle entre la direction du Soleil et le plan horizontal du lieu) et son azimut **a** (l'angle entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le Soleil, compté négativement vers l'est (Figure 1-12) [4].



**Fig 1-12** : Définition de la position du Soleil (hauteur et azimut) [4].

Ces deux angles **h** et **a** sont en fonction de :

- La latitude **L** du lieu.
- La date **j** (numéro du jour de l'année).
- L'heure solaire **TS** dans la journée.

La latitude **L** et la date **j** servent à déterminer la trajectoire du Soleil dans le ciel et l'heure **TS** donne sa position instantanée sur cette trajectoire.

On définit le jour comme le temps mis par la Terre pour effectuer un tour sur elle-même. Un jour a été divisé en 24 heures et on a défini l'heure solaire **TS** en fixant  $TS = 12h$  lorsque la hauteur du Soleil est maximale (le Soleil est à son « zénith ») [12].

On définit également l'angle horaire  $\omega$  par l'équation 1-3 [12]:

$$\omega = 15^\circ \times (TS - 12) \quad (1-3)$$

$\omega$  est compté positivement l'après-midi.

La hauteur  $h$  du Soleil peut alors se déduire de l'équation 1-4 [12]:

$$\sin(h) = \sin(L) \times \sin(\delta) + \cos(L) \times \cos(\delta) \times \cos(\omega) \quad (1-4)$$

Et l'azimut  $a$  par l'équation (1-5) [12]:

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \times \sin(\omega)}{\cos(h)} \quad (1-5)$$

## 1.8 Heures et temps :

### 1.8.1 Durée du jour :

Le module  $\omega_l$  de l'angle horaire au lever du Soleil s'obtient en écrivant  $\sin(h) = 0$  dans l'équation 1-4, ce qui conduit à [12]:

$$\cos(\omega_l) = -\tan(L) \times \tan(\delta) \quad (1-6)$$

D'après l'équation 1-3, l'heure solaire au lever du Soleil a donc pour valeur :

$$(TS)_l = 12 - \frac{\omega_l}{15} \quad (1-7)$$

L'angle horaire  $\omega_c$  au coucher du Soleil est l'opposé de l'angle horaire à son lever, nous avons donc  $\omega_c = -\omega_l$  et la durée du jour vaut :

$$D = 2 \times \frac{\omega_l}{15} \quad (1-8)$$

### 1.8.2 Relation entre temps légal et temps solaire :

Les relations se rapportant au mouvement du Soleil utilisent le temps solaire **TS** qui diffère généralement du temps légal **TL** (heure des montres) du lieu considéré. Cette différence est liée à :

- La différence (fixée par chaque pays) entre l'heure légale **TL** et l'heure civile **TCF** du fuseau horaire dans lequel il se trouve est donnée par l'équation 1-9 [12] :

$$C = TL - TCF \quad (1-9)$$

L'heure civile **TCF** du fuseau horaire est égale au temps universel **TU** (temps solaire du méridien de Greenwich) augmenté de la valeur du décalage horaire que l'on trouvera sur la figure 1-13.

- La variation de la vitesse de la Terre sur sa trajectoire autour du Soleil qui introduit un terme correctif appelé équation du temps **ET** et elle est donnée par l'équation 1-10 [12] :

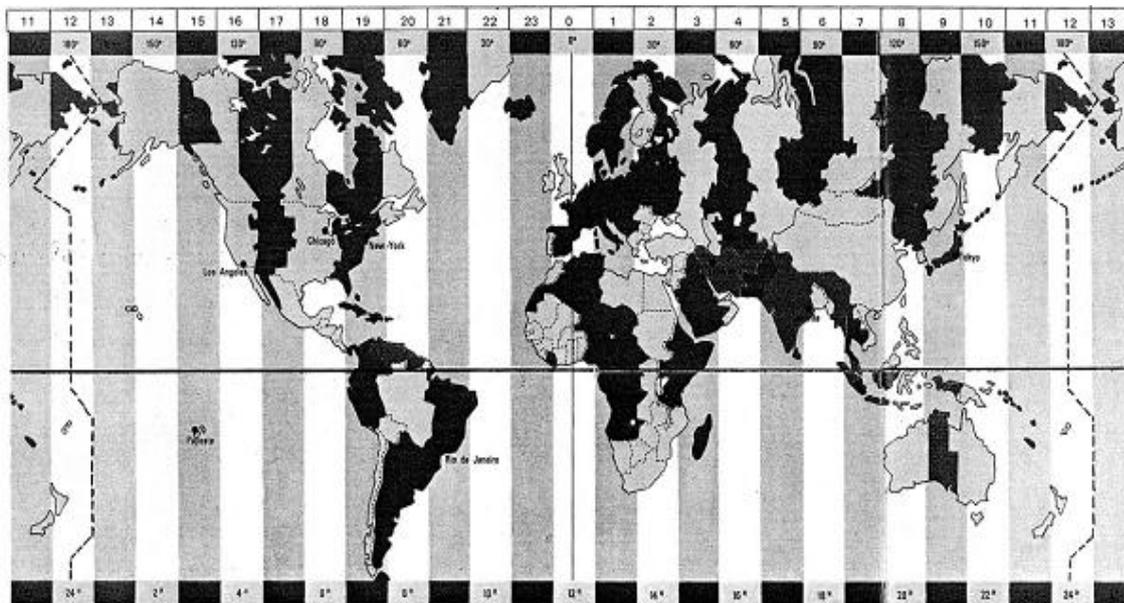
$$ET = -[0.0002 - 0.4797 \times \cos(\omega' \times j) + 3.2265 \times \cos(2 \times \omega' \times j) + 0.0903 \times \cos(3 \times \omega' \times j) + 7.3509 \times \sin(\omega' \times j) + 9.3912 \times \sin(2 \times \omega' \times j) + 0.3361 \times \sin(3 \times \omega' \times j)] \quad (1-10)$$

Où :

**j** : Numéro du jour de l'année

$$\omega' = 0,984$$

**ET** : Equation du temps (terme correctif) en mn.



**Fig 1-13** : Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich [12].

- La différence de longitude ( $l - l_{ref}$ ) entre le lieu considéré et le lieu servant de référence au temps légal (en général le centre du fuseau).

Le temps solaire **TS** se calcule finalement par l'équation 1-11 [12]:

$$TS = TL - C + ET + \frac{(l_{ref} - l)}{15} \quad (1-11)$$

La correction maximale due à l'équation du temps est de l'ordre de 16 mn, on peut ne pas en tenir compte en première approximation [12].

Avec le logiciel MATLAB nous avons représenté sur la figure 1-14 les variations annuelles de la déclinaison  $\delta$  et de l'équation du temps **ET**.

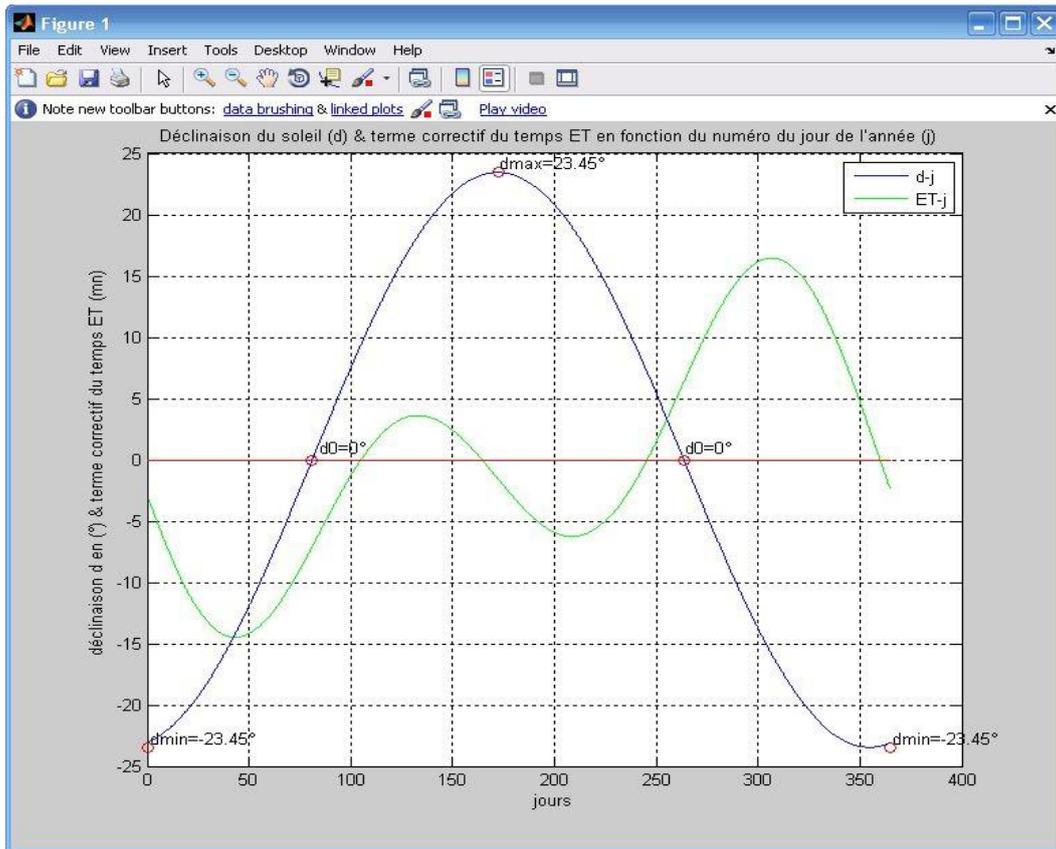


Fig 1-14 : Equations du temps ET et de la déclinaison  $\delta$  en fonction du jour de l'année.

### 1.9 Applications pour la ville de Chlef :

Pour notre étude de la ville de Chlef, nous allons calculer la hauteur au midi solaire, l'angle horaire au lever du soleil, l'angle horaire au coucher du soleil, l'azimut au lever du soleil, l'azimut au coucher du soleil ainsi que la durée du jour en heure pour le 15 de chaque mois, les données sont résumées dans le tableau 1-1 ci-dessous en utilisant les relations suivantes :

#### Calcul de la déclinaison $\delta$ (°) :

$$\delta = 23.45 \times \sin \left( 360 \times \frac{284 + j}{365} \right) \rightarrow j = 15, 46, 74, 105, 135, 166, 196, 227, 258, 288, 319, 349.$$

#### Calcul de la hauteur au midi solaire : $h_m$ [°]

Pour la ville de Chlef, la latitude est  $L = 36.16^\circ$  N, Au midi solaire, on a  $h_m = 90^\circ - (L - \delta)$ .

#### Calcul de l'angle horaire au coucher du Soleil $\omega_c$ [°] :

On a  $h = 0^\circ$  et d'après l'équation 1-4, on trouve :

$$\cos(\omega_c) = -\tan(L) \tan(\delta) \rightarrow \omega_c = \cos^{-1}(-\tan(L) \tan(\delta))$$

#### Calcul de l'angle horaire au lever du Soleil $\omega_l$ [°] :

On a  $\omega_l = -\omega_c$

**Calcul de l'azimut au lever du Soleil  $a_l$  [°]:**

D'après l'équation 1-5 : Au lever du soleil, on a  $h = 0^\circ \rightarrow \sin(a_l) = \cos(\delta) \sin(\omega_l)$   
 $\rightarrow a_l = \sin^{-1}(\cos(\delta) \sin(\omega_l))$

**Calcul de l'azimut au coucher du Soleil  $a_c$  [°]:**

On a  $a_l = -a_c$

**Calcul de la durée du jour  $D$  [h]:**

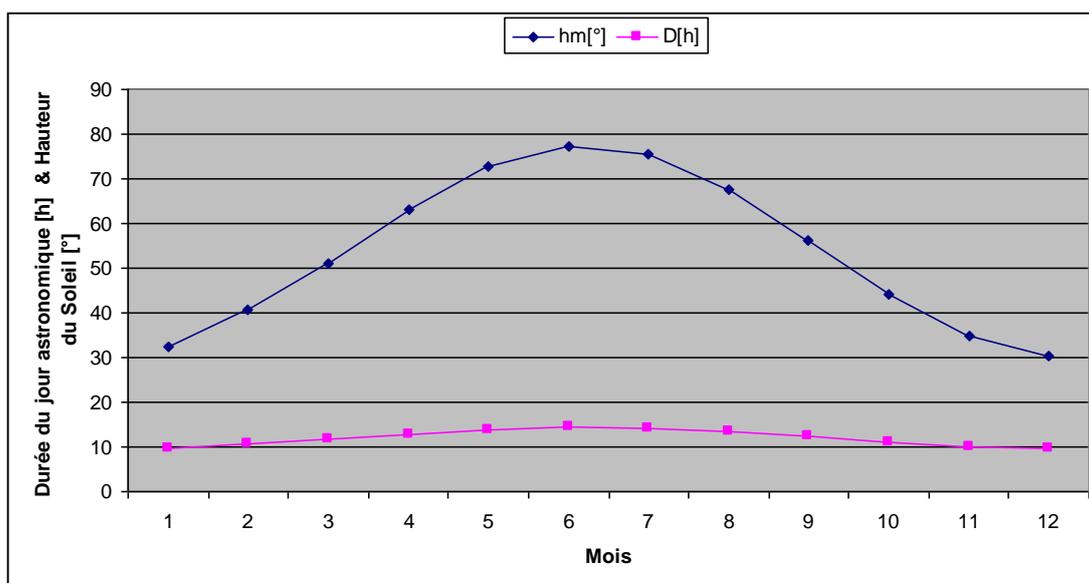
D'après l'équation 1-8, on a :

$$D = 2 \times \frac{\omega_l}{15}$$

**Tableau 1-1 :** Quelques données astronomiques de la ville de Chlef.

Mois	j	$\delta$ [°]	hm [°]	$\omega_c$ [°]	$\omega_l$ [°]	$a_c$ [°]	$a_l$ [°]	D [h]
Janvier	15	-21.27	32.57	73.47	-73.47	63.30	-63.30	9.80
Février	46	-13.29	40.55	80.06	-80.06	73.46	-73.46	10.67
Mars	74	-2.82	51.02	87.94	-87.94	86.50	-86.50	11.73
Avril	105	9.41	63.25	96.96	-96.96	78.31	-78.31	12.93
Mai	135	18.79	72.63	104.40	-104.40	66.49	-66.49	13.92
Juin	166	23.31	77.15	108.35	-108.35	60.65	-60.65	14.45
Juillet	196	21.51	75.35	106.74	-106.74	63.30	-63.30	14.23
Août	227	13.78	67.62	100.32	-100.32	72.84	-72.84	13.38
Septembre	258	2.22	56.06	92.22	-92.22	86.86	-86.86	12.30
Octobre	288	-9.60	44.24	82.90	-82.90	78.08	-78.08	11.05
Novembre	319	-19.15	34.69	75.30	-75.30	66.03	-66.03	10.04
Décembre	349	-23.33	30.51	71.63	-71.63	60.63	-60.63	9.55

D'après la figure 1-15, nous constatons que la durée du jour astronomique et la hauteur du Soleil au midi solaire varient respectivement de 9.8 heures et de  $32.57^\circ$  en janvier pour atteindre respectivement leurs maximums 14.45 heures et  $77.15^\circ$  en juin, ensuite elles diminuent pour atteindre respectivement 9.55 heures et  $30.51^\circ$  en décembre.



**Fig 1-15 :** Durée du jour astronomique et la hauteur du Soleil au midi solaire

**1.10 Données météorologiques de la ville de Chlef :**

**1.10.1 Durée d'insolation moyenne :**

Le tableau 1-2 donne selon la station de météo de la ville de Chlef, la durée d'insolation moyenne par jour pour chaque mois de l'année 2010 de cette ville.

**Tableau 1-2 :** Durée d'insolation moyenne de la ville de Chlef de l'année 2010 [14].

Mois	Durée d'insolation moyenne [h]
Janvier	4,7
Février	5,2
Mars	6,3
Avril	8,1
Mai	9,8
Juin	11,2
Juillet	11,8
Août	10,8
Septembre	9
Octobre	7,5
Novembre	5,1
Décembre	5,1

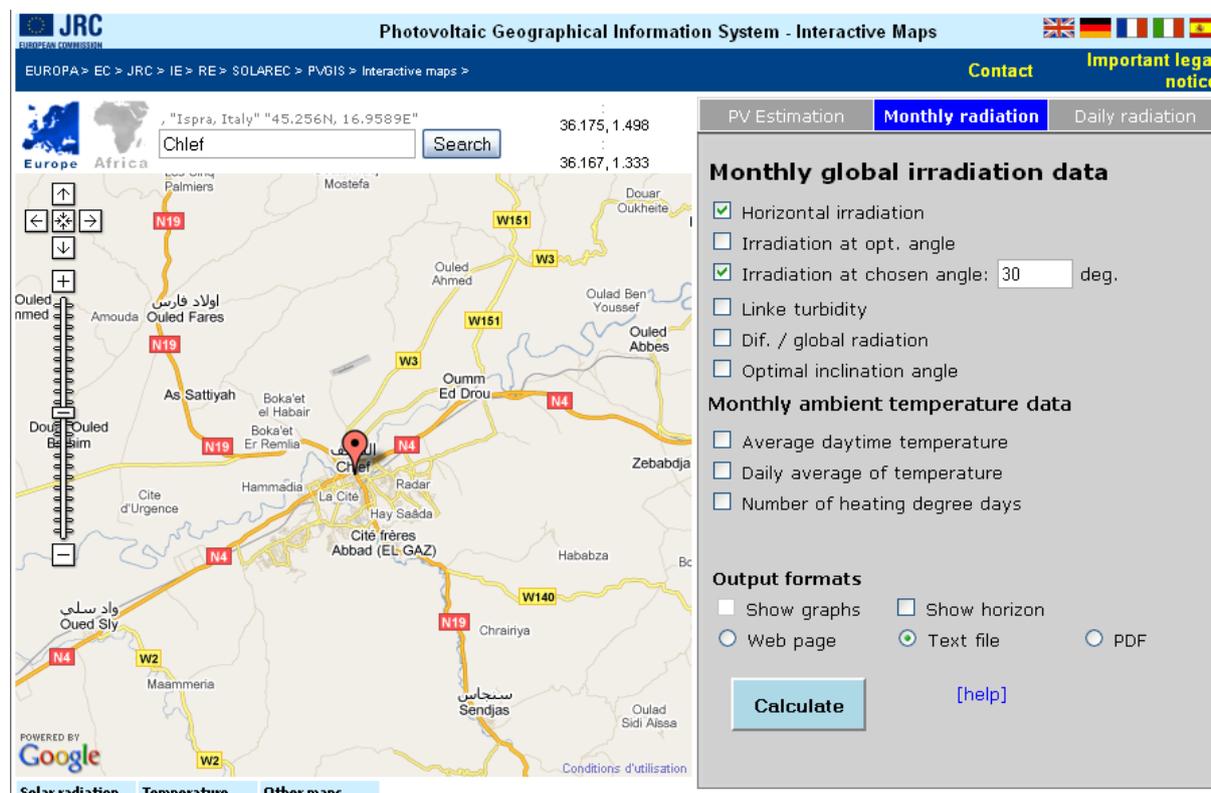
### 1.10.2 Température moyenne mensuelle :

D'après le tableau 1-3, la température moyenne mensuelle de la ville de Chlef varie de 11.8 °C en janvier jusqu'à 31°C en juillet, ensuite elle diminue jusqu'à 12°C en décembre.

**Tableau 1-3 :** Température moyenne mensuelle de l'année 2010 de la ville de Chlef [14].

Mois	Températures moyennes mensuelles [°C] de l'année 2010
Janvier	11,8
Février	13,1
Mars	14,6
Avril	17,6
Mai	20
Juin	25,1
Juillet	31
Août	29,8
Septembre	25,3
Octobre	19,6
Novembre	14,1
Décembre	12

### 1.10.3 Irradiation globale journalière :



**Fig 1-16 :** Irradiation globale journalière de la ville de Chlef [15].

Nous allons utiliser le site " Photovoltaic Geographical Information System" qui se montre sur la figure 1-16 pour calculer de l'irradiation globale journalière de la ville de Chlef sous différents angles d'inclinaison.

Le tableau 1-4 donne les valeurs de l'irradiation globale journalière selon l'inclinaison des générateurs PV, nous constatons que si l'angle d'inclinaison augmente, le rayonnement global journalier augmente en hiver mais il diminue en été.

**Tableau 1-4 :** Mesure du rayonnement global journalier de la ville de Chlef [15].

Mois	Hh	H(20°)	H(25°)	H(30°)	H(35°)	H(40°)
Janvier	2450	3380	3750	3740	3880	4000
Février	3250	4130	4300	4440	4550	4640
Mars	4230	4860	4960	5020	5060	5070
Avril	5460	5780	5780	5750	5690	5590
Mai	6440	6410	6320	6200	6040	5850
Juin	6930	6710	6570	6390	6180	5940
Juillet	6930	6800	6680	6520	6330	6100
Août	6180	6400	6370	6300	6190	6050
Sptembre	4940	5550	5630	5670	5680	5650
Octobre	3860	4780	4940	5070	5180	5250
Novembre	2590	3480	3660	3810	3940	4050
Décembre	2140	3030	3210	3380	3520	3640

**Hh:** Irradiation sur un plan horizontal [ $\text{Wh/m}^2$ ].

**H:** Irradiation selon l'angle d'inclinaison [ $\text{Wh/m}^2$ ].

### 1.11 Conclusion :

D'après la durée d'insolation moyenne mesurée par la station de météo de la ville de Chlef et l'irradiation globale journalière mesurée par le logiciel " Photovoltaic Geographical Information System" [15], la ville de Chlef jouit d'un gisement solaire qui favorise les installations photovoltaïques.

CHAPITRE :

2

## 2.1 Introduction :

La production d'électricité à partir des systèmes multi-sources vise à concevoir des systèmes de production d'énergie performants, économes et peu polluants. Ils font désormais partie intégrante des chaînes de production décentralisée et participent au développement du marché de l'énergie renouvelable. Dans les systèmes multi-sources nous obtenons une baisse de prix pour couvrir au moins l'investissement fait pour les générateurs d'énergies renouvelables et les autres composantes auxiliaires de ces systèmes. Les modules photovoltaïques, Les éoliennes et les générateurs diesels sont souvent utilisés dans ces systèmes. Ceux-ci peuvent aussi inclure d'autres sources d'énergie comme l'énergie hydraulique, géothermique ou l'énergie contenue dans l'hydrogène (pile à combustible).

Les systèmes rencontrés dans la littérature sont largement instrumentés, avec des capteurs qui permettent d'obtenir les conditions météo:

- Vitesse du vent.
- Direction du vent.
- Ensoleillement dans le plan horizontal.
- Températures ambiantes.
- Températures des modules.

Et des capteurs qui nous permettent de mesurer les courants, tensions et puissances de :

- Chaîne de production éolienne.
- Chaîne de production photovoltaïque.
- Batterie.
- Bus continu.
- Réseau.
- Charges: Les charges sont constituées par les éléments de consommation de chaque ménage (lampes, charge de batteries, ordinateurs, télévision et autres) et de ceux qui sont mises en commun (exemple l'éclairage public, la production d'eau et autres). Ces données sont envoyées vers un système de gestion et de pilotage [16].

D'ici 20-30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Naturellement décentralisées, il est intéressant d'exploiter des systèmes multi-sources sur le lieu de consommation, en produisant directement soit la chaleur, soit l'électricité à courant alternatif ou à courant continu ou les deux à la fois selon les besoins. La production d'électricité décentralisée par des systèmes multi-sources offre une plus grande sûreté

d’approvisionnement des consommateurs tout en respectant l’environnement. Cependant le caractère aléatoire de ces sources nous impose d’établir des règles de dimensionnement et d’utilisation de ces systèmes pour les exploiter au mieux, donc un système multi-source autorise une production décentralisée adaptée à la fois aux ressources et aux besoins locaux et offre une importante indépendance énergétique [17].

## 2.2 Valorisation des ressources des énergies renouvelables produisant de l’électricité dans les exploitations agricoles :

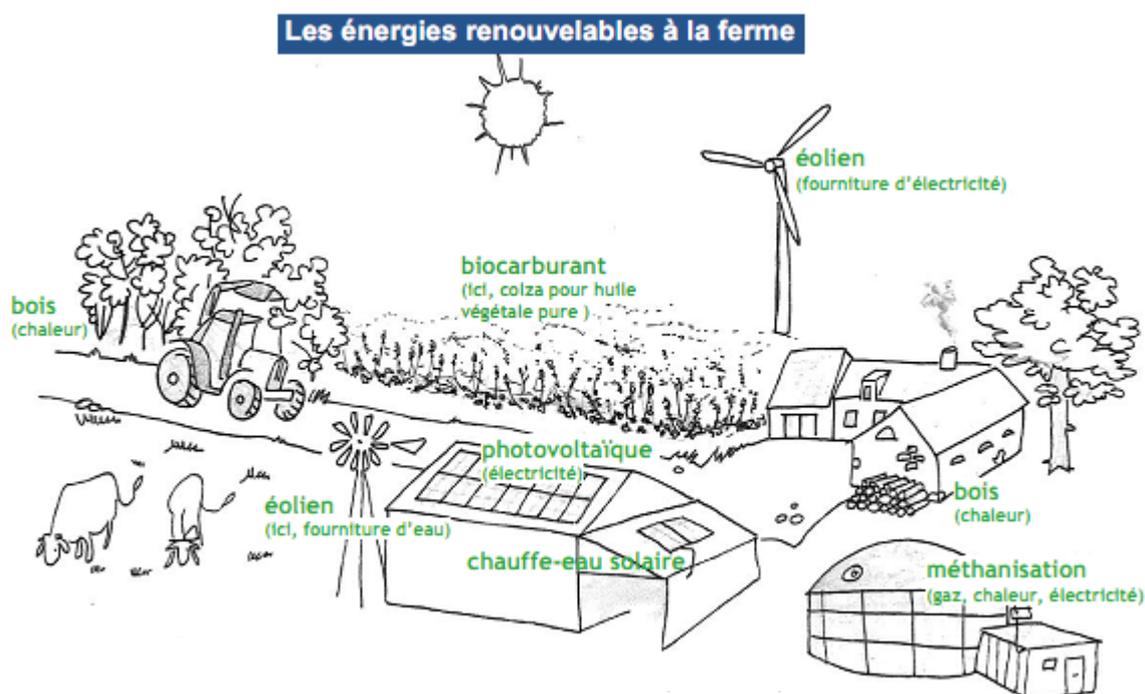


Fig 2-1 : Production d’électricité dans une ferme agricole [18].

D’après la figure 2-1, les propriétaires des fermes agricoles ont un rôle important à jouer dans le développement des énergies renouvelables produisant de l’électricité telles que l’énergie solaire, l’énergie éolienne et l’énergie de biomasse par l’utilisation de la surface des toits des bâtiments agricoles ou des terrains inexploitable pour produire de l’électricité à partir de ces énergies. L’activité agricole et les filières de l’élevage peuvent donc jouer un rôle important dans la production de l’électricité nécessaire pour aider à la préservation de la qualité environnementale du territoire rural, de maîtriser la consommation de l’énergie électrique et à la réduction des émissions des gaz à effet de serre. Cette production d’électricité à partir d’énergie renouvelable fait donc partie des nouvelles missions confiées à ces exploitants agricoles.

La recherche du rendement électrique maximum par un système multi-source installé au sein d'une ferme agricole ne doit pas être au détriment de la fonctionnalité agricole, parce que les fonctions principales de cette ferme agricole sont la culture, de loger des animaux dans des bâtiments agricoles dans le respect des règles du bien-être animal, d'offrir de bonnes conditions de travail aux exploitants, de permettre le stockage du fourrage et/ou du matériel et il doit s'intégrer au mieux dans le paysage agricole. La réussite de cette démarche dépend surtout sur le comportement et le savoir-faire de ces exploitants agricoles, alors il faudrait donc apporter aux exploitants agricoles des recommandations techniques pour surtout réussir à concilier les fonctionnalités de leurs bâtiments à la production d'électricité photovoltaïque en toiture.

Les activités agricoles les plus consommatrices d'énergie sont les serres, les bâtiments d'élevage, les séchoirs, les chambres froides et l'irrigation. Pour réduire la dépendance énergétique de l'électricité, tout en confortant la pérennité des exploitations, deux grands types de mesures peuvent être mises en œuvre :

- La réduction des consommations de l'électricité en optant pour des appareils et des machines dont la consommation d'électricité est faible avec une utilisation optimale.
- La production de l'électricité à partir des énergies renouvelables.

### **2.2.1 Énergie solaire photovoltaïque :**

L'énergie solaire est disponible partout sur Terre. Notre planète reçoit 15 000 fois l'énergie que l'humanité consomme. Le rayonnement solaire représente une ressource renouvelable d'énergie énorme, de loin la plus importante. L'énergie reçue à la surface de la terre varie, par m<sup>2</sup>, de 1100 kWh/an à 2300 kWh/an. La ressource est abondante (5% des déserts suffiraient pour alimenter la planète), mais la source (le Soleil) n'est pas toujours disponible (nuit, nuages), ce qui implique un stockage, maillon faible du système.

L'effet photovoltaïque a été découvert par Antoine BECQUEREL en 1839, 57 ans avant que son petit-fils Henri ne découvre la radioactivité, il est obtenu par absorption des photons dans un matériau possédant au moins une transition possible entre deux niveaux d'énergie (semi-conducteur). Il permet de transformer directement la lumière solaire en énergie électrique. Au zénith, le soleil délivre environ 1kW/m<sup>2</sup> de rayonnement sur un capteur placé perpendiculairement à ses rayons au niveau de la mer. Cette transformation du rayonnement solaire en électricité par le processus photovoltaïque est un des moyens d'exploitation du gisement solaire, elle est réalisée par des cellules photovoltaïques. Il est à noter qu'en dépit de

cette terminologie, aucune énergie n'est stockée dans la cellule, ni sous forme chimique ni sous aucune autre forme. Ce n'est pas une pile, mais un convertisseur instantané, qui ne pourra fournir une énergie sous forme électrique que s'il reçoit une énergie sous forme de rayonnement. Une cellule photovoltaïque est basée sur ce phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule. La figure 2-2 illustre une cellule photovoltaïque typique où sa constitution est détaillée. Une cellule photovoltaïque est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. A travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs. La tension maximale de la cellule s'obtient pour un courant nul, cette tension est nommée tension de circuit ouvert ( $V_{OC}$ ). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit ( $I_{CC}$ ) et dépend fortement du niveau d'éclairement. Le module photovoltaïque qui un ensemble de cellules photovoltaïques, quant à lui, convertit sur place et très simplement entre 3 % et 30 % de cette énergie en courant électrique continu. La production d'électricité par un générateur photovoltaïque est liée à l'intensité, à la durée de l'ensoleillement et à l'orientation du panneau par rapport au soleil [16, 17, 19, 20].

Un système photovoltaïque est constitué des éléments suivants:

- Générateur PV.
- Régulateur.
- Convertisseur (onduleur).

On peut produire de l'électricité à partir d'une installation photovoltaïque qui convertit l'énergie solaire en électricité, via l'utilisation d'un matériau semi-conducteur, comme le silicium. Le courant électrique produit par les modules photovoltaïques est un courant continu et on peut le convertir en courant alternatif via un ou des onduleur(s) avant d'être consommée localement ou injecté sur le réseau.

Cette technologie peut être développée dans les exploitations agricoles pour couvrir tout ou une partie de sa consommation d'électricité. Cependant, son développement potentiel en agriculture ne présente pas de spécificité comparativement aux autres secteurs d'activité (habitat, industrie...). Le seul avantage de l'agriculture comparativement à l'habitat est de disposer de grandes surfaces de toitures.

La valorisation de l'énergie solaire pour produire de l'électricité peut être soit revendue sur le réseau, soit utilisée en site isolé non desservi. La revente d'électricité constitue alors un complément de revenu pour les agriculteurs. L'utilisation en site isolé permet par exemple de pomper l'eau pour l'irrigation et l'abreuvement des animaux en plein champ.

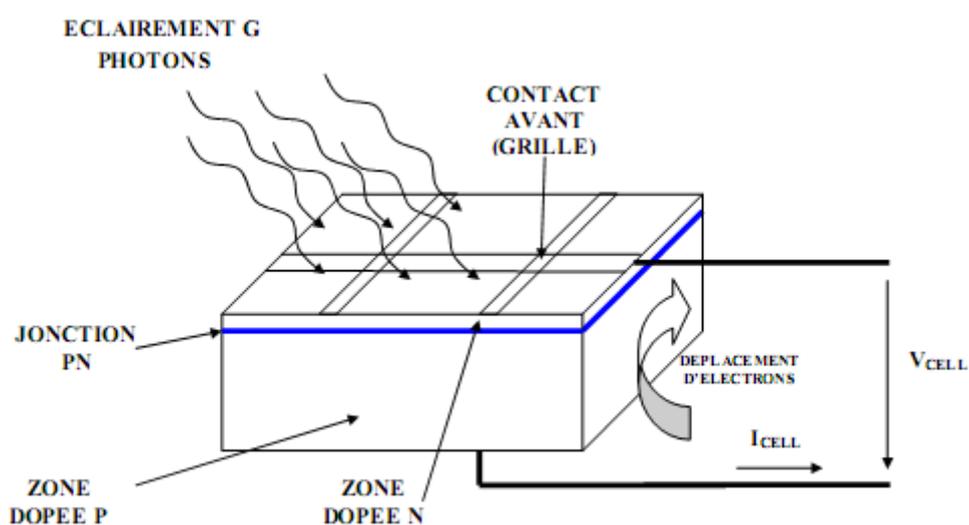


Fig 2-2 : Coupe transversale d'une cellule PV typique [20].

- **Les technologies des cellules photovoltaïques :**

Une cellule photovoltaïque peut être réalisée avec de nombreux semi-conducteurs. En réalité il existe aujourd'hui trois principales filières technologiques, le silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques. Ces technologies coexistent sur le marché dans des proportions équivalentes depuis de nombreuses années malgré des prix et des rendements très différents [21].

- **Le silicium cristallin :**

Le silicium cristallin domine le marché à plus de 80 %. La fin de cette technologie gourmande en matière première est annoncée depuis de nombreuses années mais les progrès technologiques réalisés par cette filière aux cours des 10 dernières années lui ont permis de garder sa place prédominante sur le marché. Cette filière, de part de son très fort développement actuel, semble partie pour garder cette place encore quelques années. Cette filière comporte deux technologies, le silicium monocristallin et le silicium multicristallin. Le silicium monocristallin (Figure 2-3) est difficile à obtenir. En effet, il nécessite un taux de pureté très élevé et donc plusieurs étapes de purification. Ces étapes sont délicates et donc coûteuses. Le rendement du silicium monocristallin est le plus élevé, il est compris entre 12 et 20 % pour les cellules industrielles. Son coût élevé est aujourd'hui un handicap et le silicium monocristallin perd du terrain devant le silicium multi-cristallin.



**Fig 2-3 :** Photos de cellules monocristalline et multi-cristalline [21].

Le silicium multi-cristallin est devenu aujourd'hui la technologie la plus utilisée. A elle seule elle représente près de 50 % du marché. Ces cellules sont obtenues par coulage de cristaux de silicium, ce qui rend sa structure hétérogène (Figure 2-3). Son rendement est légèrement inférieur au silicium monocristallin, il est compris entre 10 et 14 % selon les fabricants. En revanche sa fabrication est beaucoup plus simple, les coûts de production sont donc plus faibles. L'un des points faibles de ces deux technologies est la quantité de matière utilisée, même si actuellement la taille des lingots et des cellules augmentent continuellement. Les lingots de silicium, mono ou multi-cristallin, sont sciés en tranche de 150 à 300 microns, par des scies à fils. Le diamètre du fil de découpe étant de 180 microns d'épaisseur, il entraîne une perte en matière première de près de 50 % [21].

- **Les couches minces :**

Le principal frein au développement du photovoltaïque à très grande échelle reste encore aujourd'hui, malgré la baisse de ces dernières années, le prix trop élevé du kWc. Le kilo watt crête (kWc) est l'unité qui définit la puissance d'un générateur photovoltaïque aux conditions de test standard (STC) ( $1000\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  et  $25^\circ\text{C}$ ). La majorité du prix d'un générateur photovoltaïque provient du silicium et du procédé de purification. Plusieurs types de cellules photovoltaïques visant à diminuer la quantité de matière nécessaire à leur fabrication sont aujourd'hui développés et commencent à être industrialisés. Ces technologies appelées couches minces font appel à des procédés de fabrication (dépôt sur ruban) visant la diminution de l'épaisseur des cellules.



Module rigide Sharp (115Wc, 1,42 m<sup>2</sup>)



Module souple Unisolar (68Wc, 1,12 m<sup>2</sup>)

**Fig 2-4 :** Deux exemples de modules utilisant le Sia (Silicium amorphe) [21].

La technologie à couche mince dont la plus mûre est le silicium amorphe (Sia) représentait en 2008 plus de 7 % du marché mondial. L'avantage de cette technique est l'utilisation de substrats à bas coût. Le silicium est déposé à basse température sur un substrat en verre. De plus il est possible de déposer ces cellules sur des substrats souples (Figure 2-4) et ainsi de fabriquer des cellules souples. Son prix est plus faible que les cellules cristallines, en revanche, le rendement d'une cellule en Sia est inférieur à celui des cellules cristallines, il est d'environ 7 %. L'utilisation de ce type de cellules nécessite l'utilisation d'une isolation galvanique entre les modules et le réseau. Sans cette isolation galvanique les cellules amorphes se dégradent très rapidement. La raison physique de ce phénomène reste encore obscure. Les cellules amorphes captent très bien le rayonnement diffus et sont donc moins sensibles aux variations de rayonnement direct. Ces cellules sont donc une très bonne alternative aux cellules cristallines sur des sites soumis à des ombrages sévères. D'autres matériaux sont également utilisés dans les filières à couches minces comme le

Tellure de Cadmium (CdTe), le diséléniure de cuivre et d'indium (CIS) et de gallium (CIGS). Ces technologies possèdent de bons rendements, pouvant aller jusqu'à 19 %. Malgré les potentialités de ces trois technologies, les problèmes de toxicité sur l'environnement et d'approvisionnement en matières premières qu'elles soulèvent les cloisonneront au laboratoire ou à des applications très spécifiques [21].

#### - Cellules organiques et plastiques :

Les cellules organiques (Figure 2-5) sont aujourd'hui un sujet d'étude très actif et restent actuellement un sujet de laboratoire. Ces cellules comprennent deux voies, la voie des cellules « humides » et la voie des cellules polymères organiques dites aussi cellules « plastiques ». Les progrès de ces technologies sont très rapides, des records de rendement sont très fréquemment battus (actuellement près de 6 %). Le principal frein à ces technologies est actuellement la stabilité de leur performances ainsi que leur durée de vie (actuellement environ 1000 heures).



**Fig 2-5 :** Cellule photovoltaïque organique [21].

Les nanosciences ouvrent cependant de nouvelles voies à leurs améliorations. Leur avenir industriel n'est pas encore établi mais ces technologies ouvriraient la voie à des modules à très bas coût, biodégradables et pouvant être intégrés à toutes formes de surface. Par exemple des encres photovoltaïques sont actuellement étudiées. Ces encres pourraient être intégrées à un très large éventail de matériaux [21].

#### • Chaîne de fabrication des modules photovoltaïques :

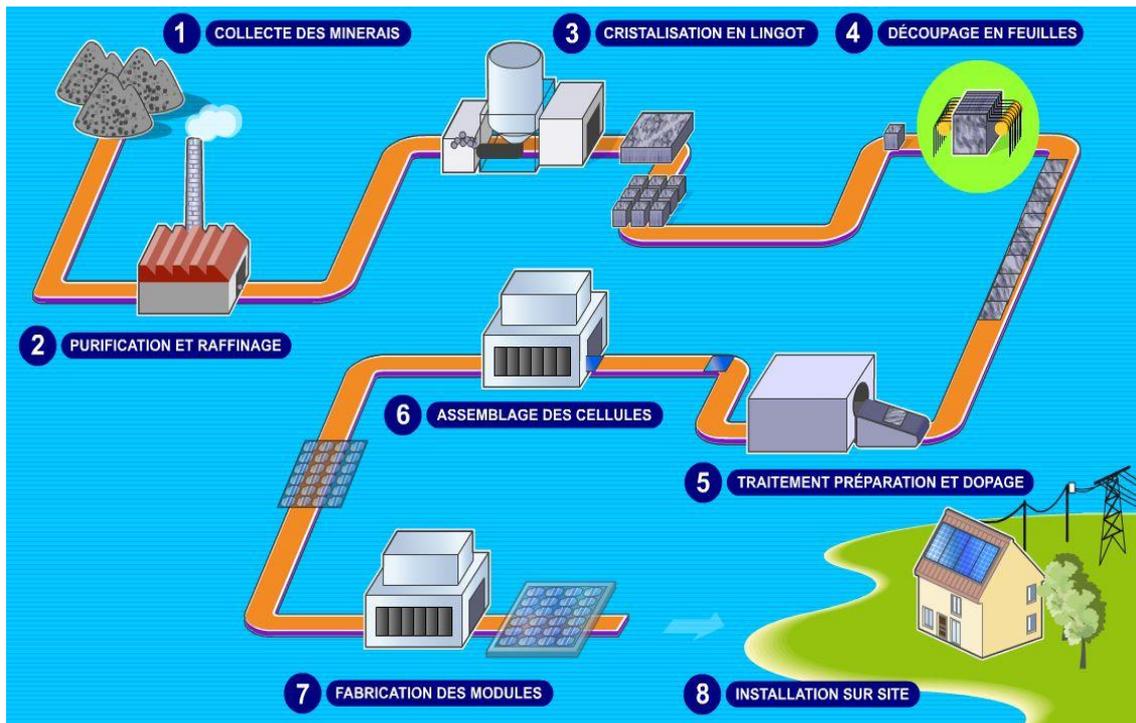


Fig 2-6 : Chaîne de fabrication des modules photovoltaïques [39].

D'après la figure 2-6 nous avons les étapes suivantes :

**1. Collecte des minerais** : La chaîne de fabrication de l'énergie solaire photovoltaïque débute dans l'exploitation minière. C'est là que la matière première, le quartz est extrait. En tant que minerai, ce matériau essentiellement constitué d'oxyde de silicium est utilisé dans beaucoup d'activités industrielles dont notamment production de silicium pour les semi-conducteurs en électronique et le solaire photovoltaïque. Le silicium est le deuxième élément le plus répandu sur terre après l'oxygène.

**2. Purification et raffinage** : Afin d'être utilisé en tant que semi-conducteur, le silicium doit atteindre un niveau de pureté très élevé (moins d'une part par million d'impureté). Partant du minerai brut, une étape de purification est nécessaire, le silicium subit différents traitements chimiques destinés à le débarrasser des impuretés ainsi qu'une opération de raffinage. On obtient au final un silicium ultra pur qui se présente sous forme de grains qui seront transformés dans la suite de la chaîne industrielle.

**3. Cristallisation en lingots** : Les grains sont fondus dans des fours à haute température pour obtenir des lingots de silicium qui seront ensuite découpés en barreaux.

**4. Découpage en plaques** : Les barreaux sont découpés en plaques « wafers » de 150 à 200 microns d'épaisseur à l'aide de scies à fil.

**5. Traitement, préparation et dopage :** L'étape la plus importante de la fabrication, celle qui va transformer la plaque de silicium en cellule photovoltaïque, consiste à modifier la répartition des charges électroniques au cœur du matériau. Cette modification est responsable de l'apparition d'un champ électrostatique qui permettra de récupérer le courant électrique généré par l'effet photovoltaïque. Cet objectif est atteint par différentes étapes de traitement chimiques et thermiques conduisant au dopage du matériau en utilisant des solutions chimiques à base de bore (dopage P) et de phosphore (dopage N). Une diode ou "jonction PN" est ainsi formée.

**6. Assemblage des cellules :** Les cellules, une fois revêtues d'une couche antireflet et équipées de contacts électriques, sont interconnectées entre elles grâce à des bornes de connexion. Cette mise en série va permettre une augmentation de la tension électrique générée.

**7. Fabrication des modules :** Les cellules interconnectées sont encapsulées entre une feuille de verre et une plaque de support pour constituer les modules solaires. Ces derniers sont placés dans des cadres généralement pourvus de moyens de fixation. L'assemblage et l'interconnexion de ces modules constituent un « champ photovoltaïque ».

**8. Installation sur site :** Les modules solaires sont installés et connectés au réseau électrique. Ils convertissent alors le rayonnement solaire en électricité. Dans les applications non connectées au réseau, les besoins en électricité ne correspondant généralement pas aux heures d'ensoleillement, les systèmes sont équipés de batteries permettant de stocker l'électricité et de la restituer au moment voulu. Un onduleur est également ajouté afin de convertir le courant continu produit en courant alternatif, certaines applications, notamment les appareils électroménagers fonctionnent exclusivement avec ce type de courant. Aujourd'hui, 30 à 40 m<sup>2</sup> de modules solaires sont à même de satisfaire les besoins en électricité (hors chauffage) d'un foyer européen de quatre personnes.

- **Fonctionnement d'une installation photovoltaïque raccordée au réseau :**

Pour produire de l'électricité à l'échelle individuelle (Figure 2-7), les systèmes photovoltaïques utilisent l'énergie la mieux répartie dans le monde, la lumière du soleil.

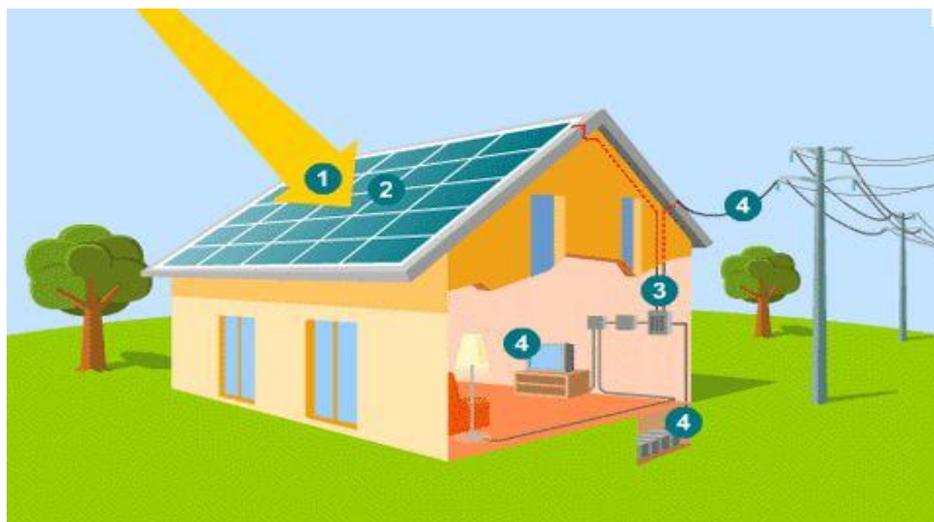


Fig 2-7 : Fonctionnement d'une installation photovoltaïque raccordée au réseau [22].

**1/ Captage des rayons :** Installés sur des toits ou sur le sol à proximité des habitations, les modules photovoltaïques captent la lumière du soleil.

**2/ Production d'électricité :** Sous l'effet de la lumière, le silicium, un matériau semi-conducteur contenu dans chaque cellule, libère des électrons pour créer un courant électrique continu.

**3/ Transformation du courant :** Un onduleur transforme ce courant en courant alternatif.

**4/ Utilisation de l'électricité :** L'électricité est consommée par les appareils électriques. Si l'installation n'est pas raccordée au réseau (site isolé), elle peut être stockée dans des batteries. Sinon, tout ou partie de la production peut être réinjectée dans le réseau. Lorsque la production photovoltaïque est insuffisante, le réseau fournit l'électricité nécessaire.

- **Les points forts du système photovoltaïque :**

Les points forts du photovoltaïque sont [19]:

- De reposer sur des technologies microélectronique et couches minces, en conservant une bonne marge de progrès et d'innovations. Le photovoltaïque envahit progressivement certaines niches, en progressant en volume de plus de 30 % chaque année depuis 1999.
- De pouvoir s'intégrer un peu partout, pour fournir sur place de petites puissances (de 1 à 5000 W), domaines où aucune autre filière ne peut entrer en compétition avec le photovoltaïque.
- D'être un générateur simple et très fiable. Les modules sont garantis pendant 25 ans par la plupart des constructeurs. Ils ont une durée de vie bien supérieure, aucune pièce n'étant en

mouvement. L'entretien concerne essentiellement la batterie. Ainsi la quasi-totalité des bouées et balises maritimes est passée au photovoltaïque. Contrairement à toutes les solutions utilisées auparavant (diesel, piles, éoliennes).

- De pouvoir s'intégrer facilement, sans gênes particulières (bruit, esthétique si certains progrès sont réalisés). Il se substitue notamment à des toits ou façades, comme élément de bâtiment en verre produisant de l'énergie.
- D'avoir un potentiel illimité. 5 % de la surface des déserts suffiraient pour alimenter la planète entière.
- Plus que le prix du kilowattheure, c'est le coût de la substitution à une autre solution qui est important. Le photovoltaïque se substitue à la création d'un réseau électrique et est moins cher en zone rurale que ce réseau. Il se substitue au toit classique, qui vient en diminution du coût.

- **Les points faibles du système photovoltaïque :**

Le développement du photovoltaïque est rapide, mais représente encore peu de choses dans le bilan énergétique mondial. L'ensemble des modules existant produit autant d'énergie qu'une tranche nucléaire. Ce n'est notamment pas une solution significative pour répondre immédiatement aux enjeux nationaux actuels.

Le stockage est le maillon faible. La solution est d'allonger la durée de vie des batteries pour la rendre proche de celle des modules. Le temps de retour énergétique de la batterie est un autre point faible. Le module rembourse en 2 à 4 ans l'énergie dépensée pour sa fabrication, soit en 1/10 de la durée de vie. En revanche, le temps de retour des batteries est de 2 à 4 ans, soit équivalent sinon supérieur à la durée de vie de certaines batteries. Le photovoltaïque est donc tributaire du développement d'équipements en courant continu à très faible consommation. Ce développement sera lent et est aujourd'hui à peine amorcé.

Les problèmes non techniques, l'adaptation aux usagers, les limites de fourniture d'énergie liées notamment à la météorologie, la modification des approches classiques bouleversent tellement les habitudes que seules des crises, pétrolières par exemple, accélèrent les adaptations nécessaires [19].

- **Perspectives lointaines :**

En 2020 [19] :

- ✓ 207 GWc d'installations photovoltaïques fonctionneront.
  - ✓ Le photovoltaïque alimentera un milliard d'habitants, dont 30 % des habitants africains.
  - ✓ 2,3 millions d'emplois seront créés par cette industrie.
  - ✓ L'investissement sera de 75 milliards d'euros par an.
  - ✓ 82 millions d'habitants des pays développés, dont 35 millions en Europe, auront des installations photovoltaïques connectées au réseau.
- **Conditions d'installation d'un système photovoltaïque sur une toiture d'un bâtiment d'élevage ou de stockage :**

Pour qu'une installation d'un système photovoltaïque fonctionne de façon optimale, il est nécessaire de réunir les conditions suivantes, impactant sur la production, il s'agit des facteurs de production [23]:

1. Avoir une toiture orientée le plus possible au sud.
2. Avoir une inclinaison optimale de la toiture.
3. Eviter les ombres portées sur l'installation (arbres, cheminées, silos, pilonnes...). Les ombres peuvent stopper la production de toute une série de modules.
4. Laisser une ventilation sous les modules cristallins pour les rafraîchir (le rendement diminue quand la température est trop élevée).
5. Bénéficier d'un ensoleillement optimal.

La figure 2-8 donne l'exemple d'une bergerie communale à St Martin les Eaux- Maître d'ouvrage : Mairie (2005) équipée d'une installation photovoltaïque, la surface de générateur photovoltaïque est 109 m<sup>2</sup>, sa puissance est 14,7KWc, sa production prévisionnelle est 18 000 KWh/an.

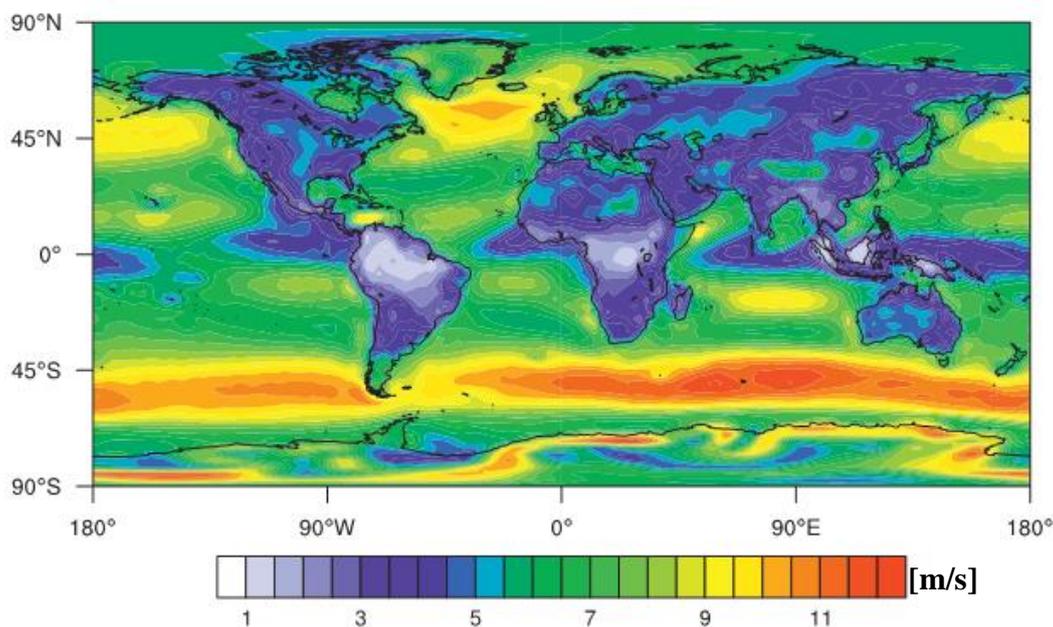


**Fig 2-8 : Bergerie communale [24].**

### 2.2.2 Énergie éolienne :

Le vent est expérimenté par l'homme depuis les temps anciens, bien avant que ce dernier n'ait vraiment compris sa source physique et ses lois fondamentales. Les bateaux à voile, les cerfs-volants, les girouettes, les moulins à grains n'ont pas attendu les équations de Navier-Stokes ou les ordinateurs. Il est donc une source d'énergie propre, renouvelable quasi instantanément, et quasi infini à l'échelle humaine et terrestre. Il doit ces caractéristiques à sa nature même, le vent naît de processus cycliques (rotation terrestre, convection chaud/froid, etc.) appliqués à l'atmosphère puis à l'air dans un contexte topographique défini. L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière. De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [16, 25].

La figure 2-9 montre les répartitions moyennes annuelles de vitesse de vent en m/s à une altitude de 10 m.



**Fig 2-9 :** L'un des atlas mondiaux des moyennes annuelles de vitesses de vent (en m/s, à 10 m) [25].

- **Fonctionnement d'une éolienne :**

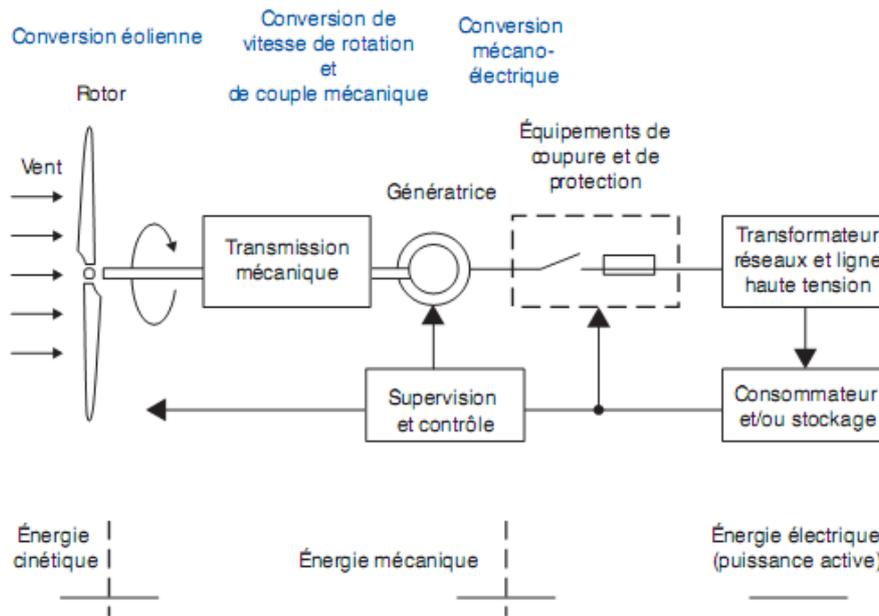


Fig 2-10 : Schéma du fonctionnement d'une éolienne [25].

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Figure 2-10). Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments (nacelle, mât, pales et multiplicateur notamment) doivent être technologiquement avancés et sont par conséquent onéreux. L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire ou fossile sans pour autant prétendre les remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores [16]. On distingue deux grands types d'éoliennes :

- **Les éoliennes à axe vertical** : Ce type d'éolienne (Figure 2-11) a fait l'objet de nombreuses recherches. Il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance. En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mât, souvent très lourd, subit de fortes contraintes

mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal [16].



Type de Savonius



Type de Darrieus

**Fig 2-11** : Eoliennes à axe vertical [17].

- **Les éoliennes à axe horizontal** : Beaucoup plus largement employées (Figure 2-12), même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales, elles présentent un rendement aérodynamique plus élevé, démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol [16].



**Fig 2-12** : Eoliennes à axe horizontal [17].

Outre l'aspect visuel des éoliennes, leur impact sur l'environnement est réduit. Une éolienne ne couvre qu'un pourcentage très réduit de la surface totale du site sur laquelle elle est implantée, permettant alors à la plupart des sites de conserver leurs activités industrielles ou

agricoles. Leurs nuisances sonores sont de plus relativement faibles. En effet, selon l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie de France), le niveau sonore d'une éolienne est de 50dB à 150 mètres et devient imperceptible au delà de 400 mètres. Dans la plupart des cas, le bruit du vent est supérieur à celui engendré par l'éolienne. Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale [16]:

- Éoliennes de petite puissance: inférieure à 40 kW.
- Éoliennes de moyenne puissance: de 40 à quelques centaines de kW.
- Éoliennes de forte puissance: supérieure à 1 MW.

- **Principaux composants d'une éolienne :**

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux :

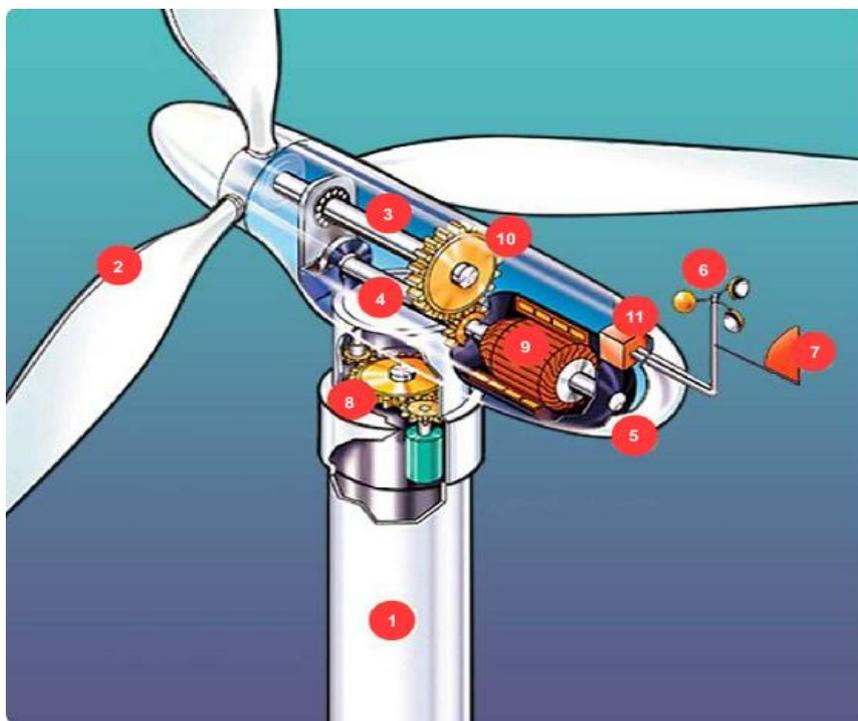
- Le mât, généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en oeuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur (exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW: diamètre de 90 m, mât de 80 m de hauteur).

- La nacelle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique, arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne.

- Le rotor, formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu, car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit. Les rotors à vitesse fixe sont

souvent munis d'un système d'orientation de la pale permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écurie) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Ce système allie ainsi simplicité et faible coût. Les rotors à vitesse variable sont souvent moins coûteux, car le dispositif d'orientation des pales est simplifié voire supprimé. Toutefois, une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge est nécessaire. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites tels la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique) [16].

La figure 2-13 montre les principaux composants d'une éolienne.



**Fig 2-13** : Principaux composants d'une éolienne [26].

**1. Tour** : La tour a une fonction structurelle de soutien. Elle permet de placer l'ensemble de l'éolienne à la hauteur désirée et de supporter la masse du système.

**2. Pales** : Elles constituent ce que l'on appelle le rotor et se mettent en rotation sous l'effet du vent.

**3. Arbre lent** : Cette pièce fait le lien entre les pales (2) et la boîte d'engrenage (10). Il tourne à la même vitesse que les pales.

**4. Arbre rapide :** L'arbre rapide transmet la puissance de la boîte de vitesse (10) à l'alternateur (9). Il tourne à la vitesse spécifique de l'alternateur (9) grâce à la modification obtenue par la boîte d'engrenage (10).

**5. Nacelle :** La nacelle est la boîte qui abrite l'ensemble des composantes en haut de la tour (1).

**6. Anémomètre :** Il mesure la vitesse du vent. Relié à un système de contrôle (10), il permet d'activer les mécanismes de freinage de l'éolienne afin de ralentir voire d'arrêter l'éolienne si les vents sont trop forts.

**7. Girouette :** Indique la direction du vent. L'information est transmise au système d'orientation (8) via un système de contrôle électronique (11).

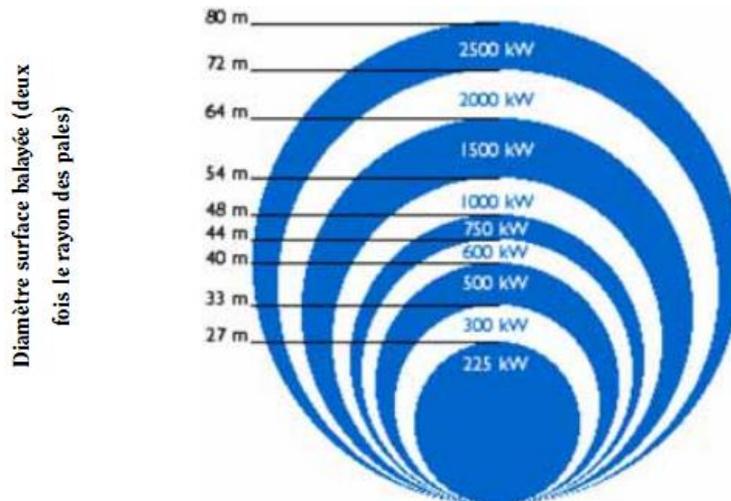
**8. Système d'orientation :** Il permet d'orienter l'éolienne selon la direction du vent car il ne souffle pas toujours dans le même sens.

**9. Alternateur :** L'alternateur est composé de deux parties, un rotor et un stator. Le rotor (électroaimant mobile) est lié à l'arbre rapide et tourne à l'intérieur du stator (bobines de cuivre immobiles). L'interaction magnétique entre le rotor et le stator de l'alternateur crée le courant électrique dans les bobines.

**10. Boîte d'engrenage :** La boîte d'engrenage ou boîte de vitesse est un système de transmission de puissance qui permet de réduire ou d'augmenter la vitesse de rotation d'un mécanisme. Dans le cas de la boîte de vitesse d'un aérogénérateur, on utilise généralement un système d'engrenages. Il s'agit de roues dentées de différents diamètres avec un nombre de dents différents.

- **La puissance des éoliennes :**

Une éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor, la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site. La surface balayée par le rotor dépend directement de l'éolienne et de sa taille. Etant donné que la surface balayée par le rotor s'accroît avec le carré du diamètre du rotor, un doublement de celui-ci entraînera une récolte de  $2^2 = 2 \times 2$  quatre fois plus d'énergie. La figure 2-14 illustre l'évolution de la puissance unitaire des éoliennes en fonction du diamètre balayé (deux fois le rayon).



**Fig 2-14 :** Evolution de la puissance des éoliennes avec la surface balayée [27].

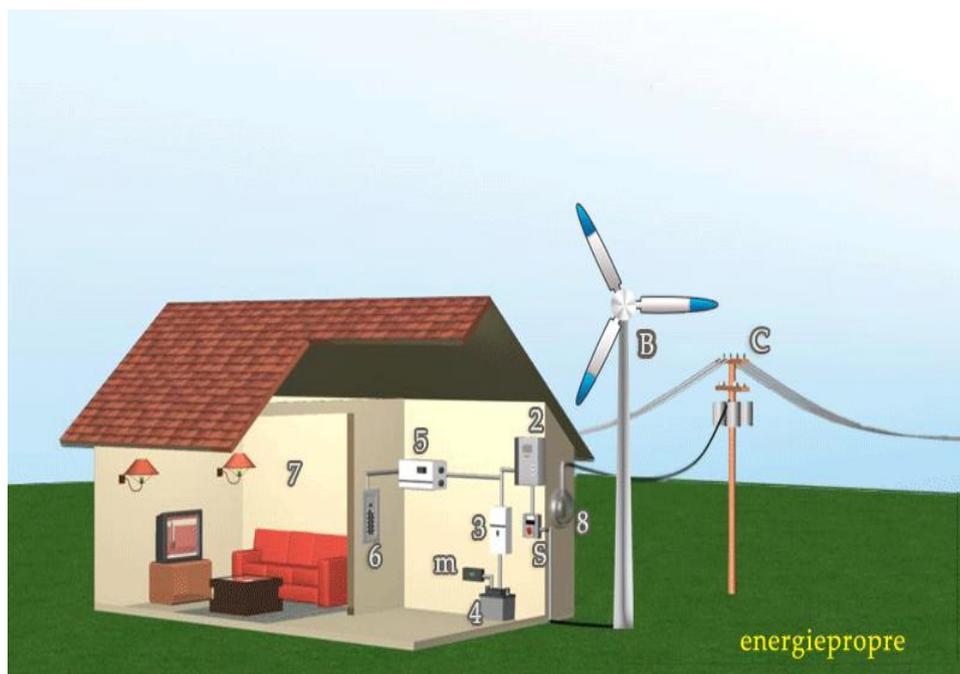
Pour des éoliennes à axe horizontal, lorsque le diamètre de l'hélice varie de 1 à 66 m, la puissance varie de 300 W à 2,5 MW. Dans la plupart des cas, les pales sont fabriquées en matériaux composites (fibre de verre / résine polyester, fibre de carbone / résine époxy). La logique économique de l'éolien de grande puissance favorise le développement d'éoliennes de puissance unitaire de plus en plus importante. Au fur et à mesure de cette évolution, les constructeurs abandonnent la commercialisation des éoliennes de faible ou moyenne puissance. Pour les éoliennes à axe vertical commercialisées, la puissance varie de 60 W à 20 kW pour des dimensions maximales de l'ordre de 4,3 m de diamètre et 50 m de hauteur [27]. La figure 2-15 donne l'exemple de l'installation des éoliennes dans un milieu rural.



**Fig 2-15 :** Eoliennes dans un milieu rural [28].

- **Systèmes éoliens raccordés au réseau :**

La figure 2-16 montre la production de l'électricité à l'échelle individuelle, en période de vent, l'éolienne charge la batterie et alimente la charge électrique via l'onduleur. Le surplus d'énergie électrique est injecté dans le réseau électrique via un compteur d'énergie. En période de faible vent, le réseau électrique prend le relais en fournissant l'énergie nécessaire à la charge électrique. En cas de panne du réseau, la batterie chargée sert d'alimentation de secours.



**Fig 2-16** : Production de l'électricité à l'échelle individuelle [29].

**B.** Éolienne **C.** Réseau électrique **m.** Moniteur de batterie **S.** Sectionneur **2.** Régulateur  
**3.** Disjoncteur CC **4.** Batterie **5.** Onduleur **6.** Coffret de branchement **7.** Charge électrique  
**8.** Compteur

La figure 2-17 montre le fonctionnement d'une centrale éolienne.

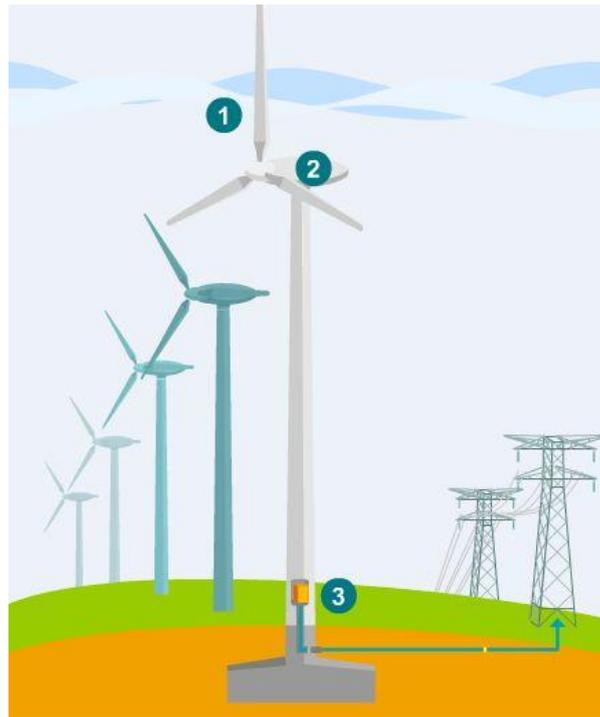


Fig 2-17 : Fonctionnement d'une centrale éolienne [30].

- 1) **La rotation des pales** : Sous l'effet du vent, l'hélice se met en marche.
- 2) **La production de l'électricité** : L'hélice entraîne un axe dans la nacelle relié à un alternateur. L'alternateur produit de l'électricité.
- 3) **L'adaptation de la tension** : Un transformateur situé à l'intérieur du mât élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur.

### 2.2.3 Énergie de biomasse :

Depuis le premier choc pétrolier, en 1973, ce concept s'applique aux produits organiques végétaux et animaux utilisés à des fins énergétiques ou agronomiques. Il s'agit de l'ensemble de la matière organique d'origine végétale, animale ainsi que ses produits de transformation (les déchets organiques). Cette énergie n'offre pas seulement une perspective extraordinaire du point de vue écologique, car elle participe au traitement et à l'élimination des déchets organiques contribuant ainsi à l'assainissement de notre environnement, mais génère aussi de nouveaux secteurs d'activités pour l'agriculture [31].

- **Sources de la biomasse :**

La production de biomasse peut être divisée en huit catégories [31] :

- Biomasse produite par le surplus des terres agricoles, non utilisées pour l'alimentation humaine ou animale : cultures énergétiques.
- Biomasse produite par le déboisement (entretien de forêt) ou le nettoyage de terres agricoles.
- Résidus agricoles issus des cultures des céréales, vignes, vergers, oliviers, fruits et légumes, résidus de l'agroalimentaire, ...
- Résidus forestiers issus de la sylviculture et de la transformation du bois.
- Résidus agricoles issus de l'élevage (fumier, lisier, litières, fientes, ...).
- Déchets organiques des ménages (fractions fermentescibles des ordures ménagères (FFOM), papiers, cartons, déchets verts, ...).
- Biomasse directement utilisée à des fins non alimentaires (bois pour le papier).
- Déchets organiques des déchets industriels banals (papiers, cartons, bois, déchets putrescibles, ...).

Pour résumer, les sources de biomasse se subdivisent en trois catégories : forestière, agroalimentaire et urbaine.

Certains distinguent la biomasse sèche de la biomasse humide :

- Biomasse sèche comprenant les divers déchets ligneux et sont appelés « bois-énergie ».
- Biomasse humide comprenant les déchets organiques d'origine agricole, agroalimentaire et urbaine et pouvant être transformés en engrais ou amendements organiques (matières fertilisantes qui enrichissent le sol en matières organiques).

- **Les filières de valorisation énergétique de la biomasse :**

L'énergie de la biomasse peut être récupérée selon les quatre principales voies suivantes [19] :

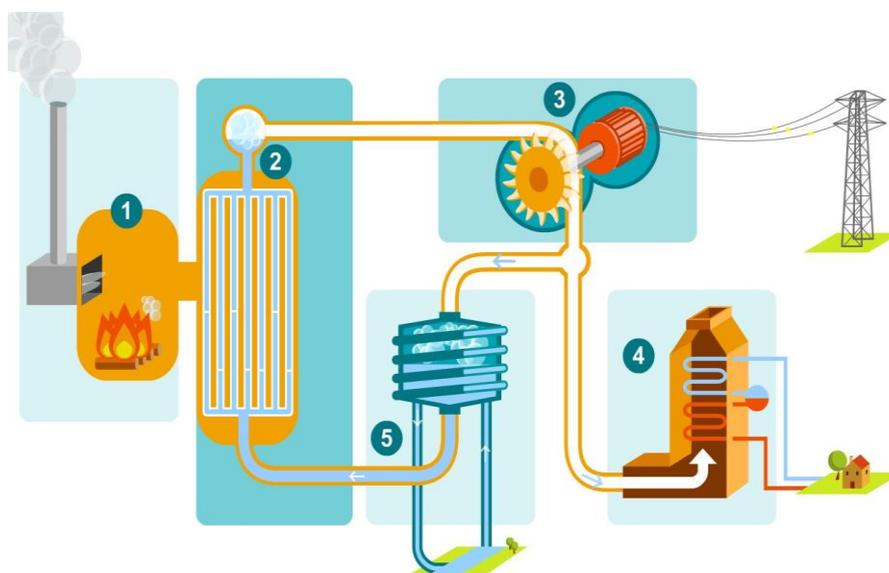
**1-** La plus courante (Figure 2-18), la combustion (ou l'incinération) produit essentiellement de la chaleur à un niveau de température qui est limité vers 650 °C, la cogénération d'électricité et de chaleur, au moyen d'un cycle à vapeur, ne permet d'obtenir que 25 % d'électricité et 75 % de chaleur, laquelle est un complément économiquement difficile à valoriser.

**2-** La deuxième voie possible est la méthanisation (Figure 2-19), réalisée par la fermentation anaérobie, c'est-à-dire la décomposition par action bactérienne en absence d'air de substances très humides comme les algues, les déjections animales ou les déchets ménagers. Il est ainsi possible d'obtenir un mélange gazeux de méthane (50 à 60 %) et de gaz carbonique (35 à 40

%) rendant son utilisation difficile et, en général, limitée à une combustion in situ pour la production de chaleur et d'électricité.

**3-** Une troisième voie, la fermentation alcoolique, est adaptée à la valorisation des produits saccharifères, comme la betterave ou la canne à sucre, ou amylacés, comme les céréales. Après hydrolyse et préparation d'une solution sucrée, soumise à la fermentation, on obtient une solution, titrant moins de 15° d'alcool, dont l'éthanol peut être extrait par distillation. Le rendement global de l'opération est largement pénalisé par la consommation d'énergie, associée partiellement à la culture des plantes, et surtout à l'opération de distillation. Sur le plan du bilan énergétique, cette filière est relativement comparable à la voie, conduisant à la préparation du « diester », qui utilise l'huile des plantes oléagineuses pour produire l'Ester Méthylique d'Huile Végétale (EMHV). Dans les deux cas, seule une fraction, de l'ordre de 50 % de la plante, est utilisée pour la production de carburant.

**4-** La transformation thermo-chimique qui conduit à la gazéification des substances organiques et végétales convient particulièrement bien à la valorisation des produits ligno-cellulosiques comme le bois, les graminées ou les pailles, mais peut aussi être appliquée aux plantes comme les céréales ou les oléagineux, en utilisant la plante entière. C'est cette filière qui présente le plus fort potentiel énergétique pour la production de carburants mais elle n'est actuellement qu'au stade de la recherche et du développement.



**Fig 2-18 :** Fonctionnement d'une centrale biomasse (de type combustion) [32].

### Étape 1 : La combustion

La biomasse brûle dans une chambre de combustion en dégageant de la chaleur.

### Étape 2 : La production de vapeur

La chaleur transforme l'eau de la chaudière en vapeur.

**Étape 3 : La production d'électricité**

La vapeur fait tourner une turbine qui entraîne un alternateur. L'alternateur produit de l'électricité portée dans des lignes.

**Étape 4 : La production de chauffage**

A la sortie de la turbine, une partie de la vapeur est utilisée pour le chauffage grâce à un congénérateur.

**Étape 5 : Le recyclage**

Le reste de la vapeur est transformé en eau grâce à un condenseur.

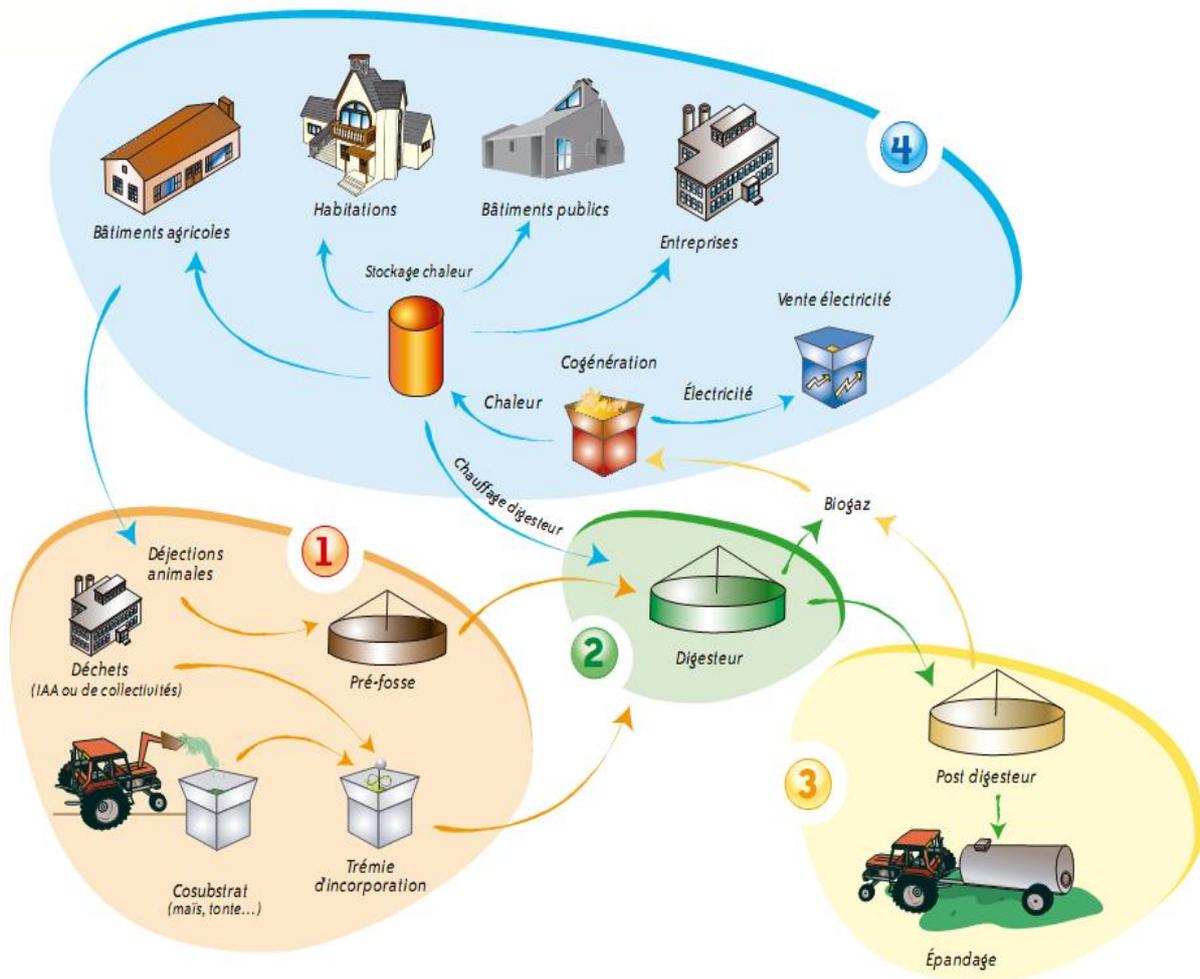


Fig 2-19 : Différentes étapes d'une installation de type de méthanisation à la ferme [33].

**Étape 1 :** Gestion des substrats (déjections animales et co-substrats).

**Étape 2 :** Digestion.

**Étape 3 :** Gestion du digestat épandage.

**Étape 4 :** Production et valorisation de l'énergie.

- **Avantages et inconvénients :**

Les sources d'énergie issues de la biomasse sont disponibles localement, renouvelables et d'origines très diverses, donnant ainsi la possibilité d'être utilisées pour les carburants, la production d'électricité et des produits qui seraient, à défaut de biomasse, fabriqués à partir de carburants fossiles. La biomasse est dans de nombreux cas la seule source d'énergie disponible partout et abordable pour les pauvres.

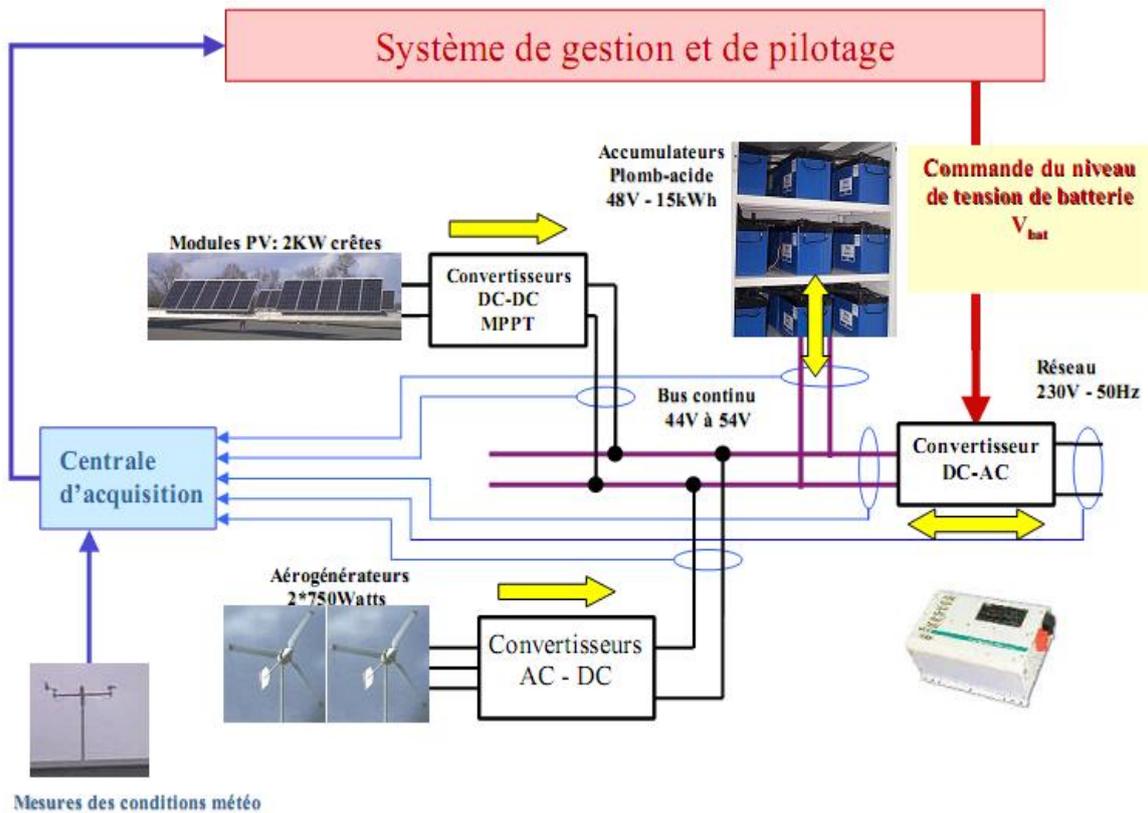
Cependant, l'utilisation généralisée de la biomasse comme source énergétique provoque souvent de sévères effets secondaires indésirables sur la santé des consommateurs et sur l'environnement. En ce qui concerne la santé, la fumée provenant de feux à l'air libre et de foyers traditionnels tue 1,5 million de gens par an, principalement à cause des maladies respiratoires causées par une forte concentration de particules fines et par le niveau élevé de monoxyde de carbone. Par ailleurs, malgré son caractère renouvelable, la biomasse n'est souvent pas utilisée de façon durable, ce qui mène à la déforestation, la dégradation des terres et la désertification. D'autre part, même si l'utilisation de la biomasse comme source énergétique repose parfois sur une base commerciale, elle implique plus souvent, dans les milieux ruraux, une charge de travail supplémentaire pour femmes et enfants qui, à cause de la surexploitation des ressources, doivent passer de plus en plus de temps à chercher du bois combustible [34].

## **2.3 Différents types des mini-centrales multi-sources énergétiques :**

### **2.3.1 Système de production éolien et générateur photovoltaïque couplé au réseau et associé à un stockage de l'énergie :**

C'est une architecture qui est à la fois couplée au réseau et associée à un dispositif de stockage de l'énergie. Son dimensionnement a été effectué à l'échelle de l'habitat individuel, la figure 2-20 montre un synoptique de l'installation. Les chaînes de production se composent de :

- 20 m<sup>2</sup> de modules photovoltaïques (2 kWc, 20 modules ASE 100-GT-FT) connectés au bus continu à travers deux convertisseurs à pilotage MPPT (MSTE MPT 1000K).
- Deux éoliennes de 750 W chacune (Aerocraft, 750AC), l'une en 48V, l'autre en 120V, elles sont reliées au bus continu à travers un redresseur à diodes pour la première et un redresseur à diodes suivi d'un hacheur série pour la seconde.



**Fig 2-20 :** Système de production hybride éolien et PV couplé au réseau et associé à un stockage de l'énergie [17].

Le dispositif de stockage de l'énergie est directement relié au bus continu, on dispose d'environ 15 kWh de capacité de stockage dans des batteries électrochimiques (24 éléments de 2 V en séries, accumulateurs au plomb STECO, Saphir 3600).

Le bus continu est relié au réseau alternatif via un onduleur réversible (4,5 kVA Trace Engineering, SW4548E) capable de continuer à alimenter une charge prioritaire en cas de disparition du réseau et donc d'assurer un fonctionnement autonome.

Ainsi, tous les transferts énergétiques (flèches jaunes sur la figure 2-20) ainsi que les modes de fonctionnement couplé ou non au réseau sont envisageables.

Le système est largement instrumenté, des capteurs nous permettent d'obtenir les conditions météo :

- Vitesse du vent.
- Direction du vent.
- Ensoleillement dans le plan horizontal.
- Température ambiante.
- Température des modules.

Des capteurs nous permettent de mesurer les courants, tensions et puissances des :

- Chaînes de production éolienne.
- Chaîne de production photovoltaïque.
- Batterie.
- Bus continu.
- Réseau.

Ces données sont envoyées vers un système de gestion et de pilotage qui permet de commander le niveau de tension de la batterie. Avec une telle structure, nous pouvons contrôler les transferts d'énergie en intervenant sur le niveau de la tension batterie. En effet la batterie étant chargée à une tension  $V_{bat1}$ , si nous imposons une consigne de tension  $V_{bat2}$  telle que  $V_{bat2} < V_{bat1}$  (respectivement  $V_{bat2} > V_{bat1}$ ) alors nous imposons un transfert d'énergie du système vers le réseau (respectivement du réseau vers le système).

Des systèmes de sécurité (contacteurs) permettent de court-circuiter les éoliennes et les modules photovoltaïques si le niveau de tension batterie devient trop important. Toutes les données des capteurs sont stockées pour permettre l'affichage et l'analyse des grandeurs caractéristiques du dispositif [17].

### **2.3.2 Système de production éolien, générateur photovoltaïque et source thermique due aux rejets thermiques :**

Face aux changements climatiques, il est aujourd'hui plus que nécessaire de réduire les consommations d'énergie dans le bâtiment, tant au niveau du neuf que de l'existant, et de substituer aux énergies fossiles des énergies renouvelables. Pour cela, il faut moderniser les méthodes de conception et de rénovation des habitats en intégrant une démarche de qualité environnementale. L'objectif à l'horizon 2050 est le bâtiment à énergie positive, c'est-à-dire un bâtiment pouvant produire plus d'énergie qu'il n'en consomme. Les bâtiments ont donc des besoins énergétiques qui se répartissent sur trois postes :

- Chaleur : chauffage, production de l'eau chaude sanitaire.
- Froid : rafraîchissement ou refroidissement des locaux, conservation des aliments.
- Electricité : utilisations captives de l'électricité (éclairage, électroménager, audiovisuel et divers auxiliaires tels que brûleurs, pompes, ventilateurs, ...).

L'intégration énergétique consiste à utiliser une combinaison de ces sources (solaire photovoltaïque et thermique, de l'éolien et des rejets thermiques industriels ou résultant d'une autre application énergétique déjà valorisée dans le bâtiment, l'énergie contenue dans le sol adjacent (géothermie de surface), dans l'air ou dans l'eau des nappes phréatiques et

des rivières proches) pour couvrir le maximum de besoins énergétiques du bâtiment avec la meilleure efficacité.

L'objectif est de diminuer les consommations d'énergie primaire et de réduire les impacts environnementaux associés, afin de tendre vers des bâtiments "zéro énergie".

L'utilisation de cette énergie doit donc se faire de manière plus rationnelle pour ne pas conduire à une approche archaïque du dimensionnement consistant à opter pour la surcapacité. Le travail présenté sur la figure 2-21 est la description de la méthodologie envisagée pour mener à bien aux buts fixés [35].

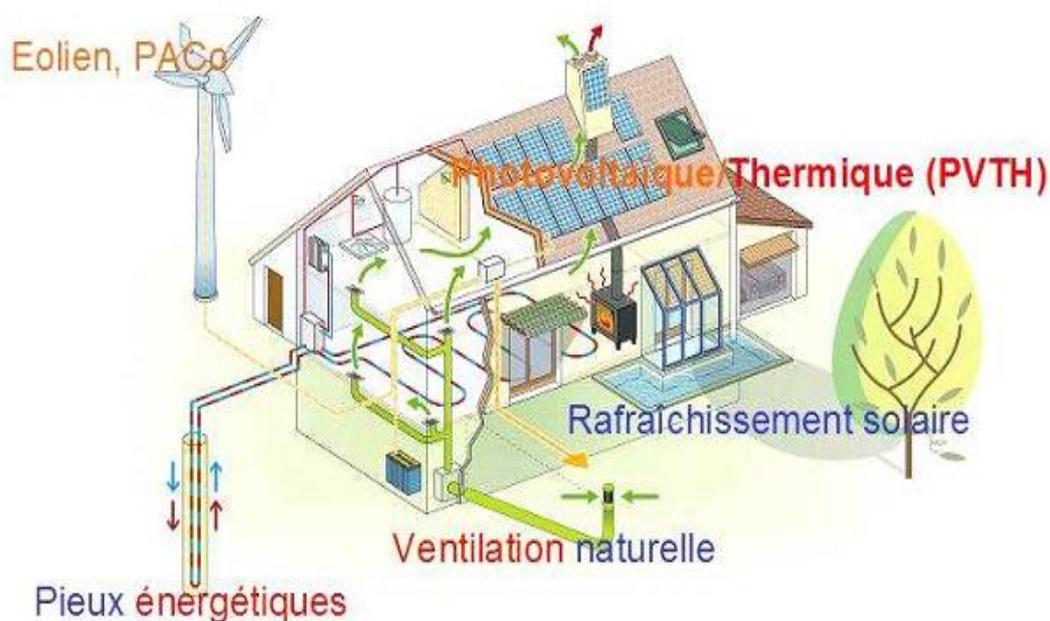


Fig 2-21 : Maison équipée de systèmes multi-énergies [35].

### 2.3.3 Système de production générateur photovoltaïque et diesel :

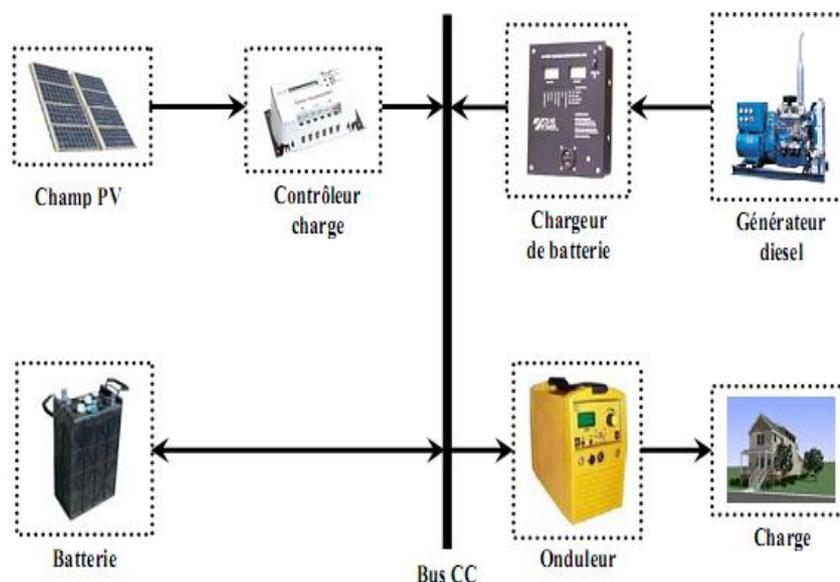
Le champ photovoltaïque génère du courant continu, mais la consommation domestique exige le plus souvent du courant alternatif, c'est pourquoi il est souvent nécessaire d'adjoindre au système un onduleur. De cette façon, le générateur photovoltaïque travaille en parallèle ou en alternance avec le générateur diesel. On distingue les configurations suivantes:

- Système hybride PV - Diesel série.
- Système hybride PV - Diesel commuté.
- Système hybride PV - Diesel parallèle.

On présentera ci-après, les avantages et les inconvénients de chaque configuration [36].

- **Configuration série :**

Dans cette configuration, l'énergie produite par le générateur diesel est d'abord redressée et puis convertie de nouveau en alternatif pour être fournie à la charge, ce qui implique des pertes de conversion significatives. Lorsque l'énergie produite par le champ photovoltaïque et l'énergie stockée sont suffisantes pour répondre à la demande de la charge, le diesel est débrayé. La puissance en courant continu fournie par le champ et la batterie est convertie en courant alternatif par un onduleur. De plus, il faut noter que dans la plupart des systèmes de ce type, le rendement du système est diminué à cause du transit d'une grande partie de l'énergie par la batterie, augmentant ainsi le nombre des cycles charge – décharge (Figure 2-22).



**Fig 2-22 :** Système hybride PV - Diesel série [36].

Le régime de fonctionnement du générateur dépend d'une part de la demande d'énergie et d'autre part, de l'état de charge de la batterie et de la production du champ PV. La batterie se charge quand de l'énergie est produite en excès par le champ. Au contraire, quand l'énergie produite n'est pas suffisante, alors la batterie se décharge. Le contrôleur solaire prévient la surcharge de la batterie et sa décharge trop profonde. On peut également faire appel à un convertisseur CC/CC (MPPT) qui permettra au champ PV de faire fonctionner le champ à son point maximum de puissance. Le système hybride peut travailler de manière automatique si on ajoute un système de mise en marche et arrêt du générateur diesel.

**Les avantages sont :**

- La puissance du groupe électrogène diesel peut être optimale lorsqu'il approvisionne la charge et qu'en plus il charge la batterie jusqu'à un niveau de charge de la batterie de 70 – 80 %.
- Le système électrique est simplifié à cause de l'absence de changement de la source d'électricité en courant alternatif.
- La mise en marche du générateur diesel ne provoque pas d'interruption de l'alimentation de la charge.
- Grâce à l'onduleur, on peut obtenir différentes formes du courant selon les besoins (sinusoïdal, carré,...).

**Les inconvénients sont :**

- L'onduleur ne peut pas travailler en parallèle avec le générateur diesel, c'est pourquoi il doit être dimensionné pour satisfaire la puissance de pointe de la charge.

**• Configuration commutée :**

Cette configuration est très fréquemment utilisée malgré ses limitations opérationnelles. La charge peut être alimentée soit par le générateur diesel, soit par l'onduleur alimenté par le photovoltaïque ou la batterie mais le fonctionnement en parallèle n'est pas encore possible. La batterie peut être chargée de nouveau par le champ PV et le diesel. L'avantage principal de cette configuration par rapport à la configuration série consiste dans l'élimination de la conversion de l'énergie fournie par le générateur d'où l'élimination des pertes supplémentaires de conversion.

En principe, la puissance produite par le générateur est supérieure à la demande de la charge et l'excès est utilisé pour la charge de la batterie. Comme dans le cas précédent, le diesel est arrêté, lorsque la demande est faible et peut être satisfaite par le champ photovoltaïque et la batterie. La complexité du système implique l'utilisation d'un contrôle automatique à la place de la commande manuelle (Figure 2-23).

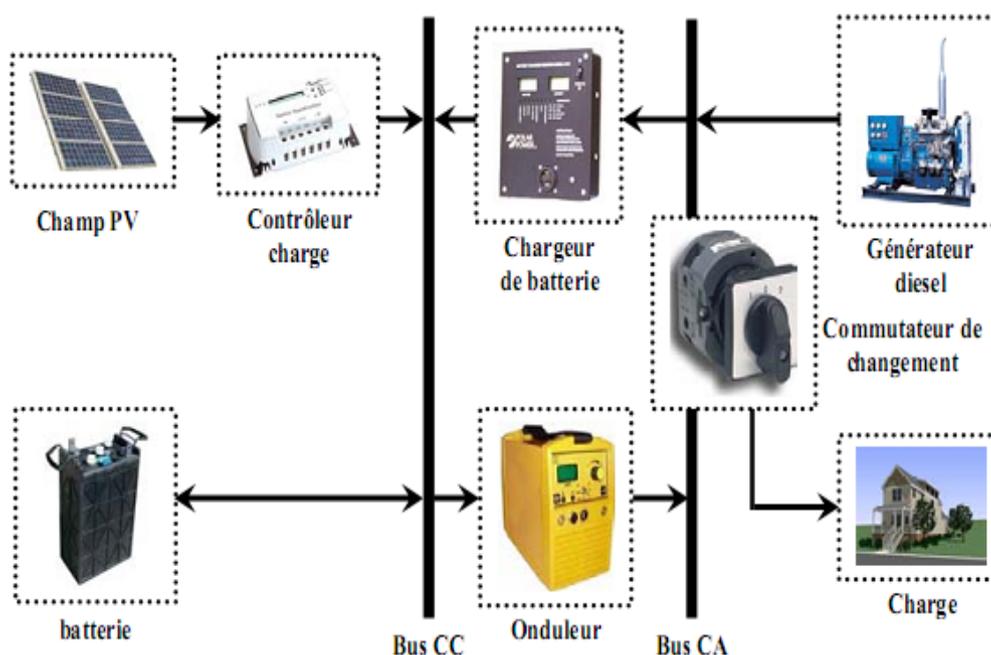


Fig 2-23 : Système hybride PV - Diesel commuté [36].

**Les avantages sont :**

- Différentes formes du courant sont possibles, selon les besoins (sinusoïdal, signal carré,.).
- Le générateur peut fournir l'énergie produite directement à la charge, ce qui augmente le rendement du système et diminue la consommation de carburant.

**Les inconvénients sont :**

- Il y a une coupure instantanée, lors de la commutation des sources alternatives.
- Le générateur et l'onduleur sont dimensionnés pour la puissance pointe de la charge, ce qui réduit leurs rendements en fonctionnement à faible charge.

• **Configuration parallèle :**

Dans la configuration parallèle, toutes les sources peuvent alimenter la charge séparément à faible et moyenne demande mais également suppléer les pointes en combinant les sources.

L'onduleur bi-directionnel peut fonctionner, soit comme un redresseur lorsqu'il y a un excès d'énergie produite par le diesel pour charger la batterie, soit comme un onduleur, pour transférer l'énergie fournie par le champ photovoltaïque ou par la batterie vers la charge.

Grâce à l'onduleur bi-directionnel, le système parallèle peut alimenter une charge supérieure à la puissance nominale du générateur (Figure 2-24).

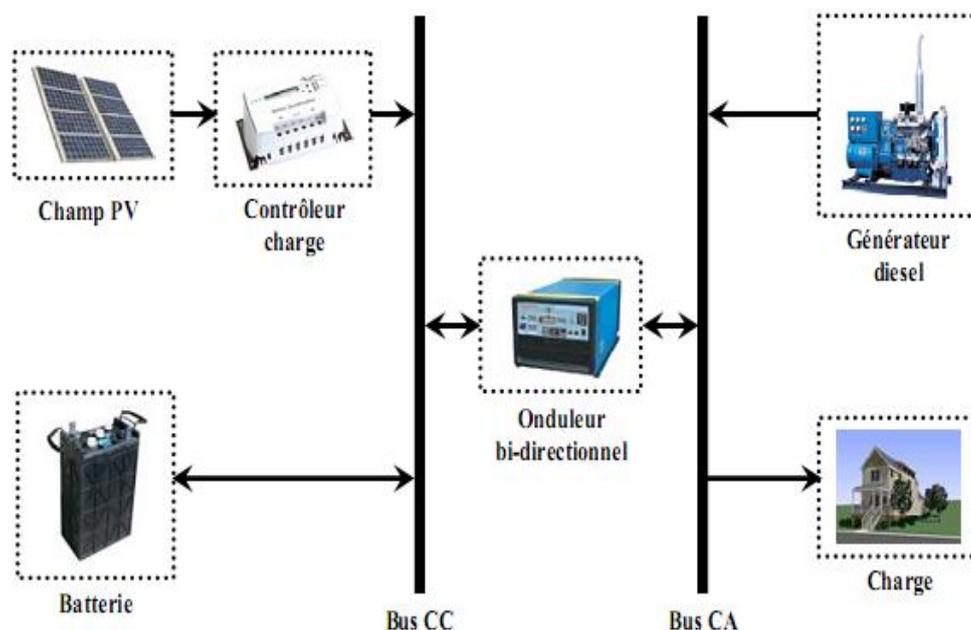


Fig 2-24 : Système hybride PV - Diesel parallèle [36].

Ce système possède deux améliorations par rapport aux configurations série et commutée.

L'association du générateur diesel et de l'onduleur permet l'alimentation d'une charge supérieure à la charge alimentée par chaque élément seul. En principe, la capacité du système est deux fois plus grande dans cette configuration. La possibilité de synchroniser l'onduleur avec le générateur diesel permet une meilleure flexibilité du système et de plus, la puissance nominale du générateur diesel peut être diminuée, ce qui augmente la partie de l'énergie directement utilisée d'où on obtient une augmentation du rendement du système.

En utilisant un seul convertisseur comme onduleur et redresseur, on diminue le nombre des éléments dans le système. De plus, les coûts du câblage et l'installation du système peuvent être diminués par l'intégration de toutes les composantes dans une seule unité, ce qui est avantageux, mais peut empêcher l'augmentation de la taille du système par l'ajout de nouveaux composants si la demande en électricité augmente.

#### Les avantages sont :

- L'alimentation de la charge peut être faite d'une manière optimale.
- Le rendement du générateur diesel peut être augmenté.
- Le besoin d'une maintenance du diesel est réduit.

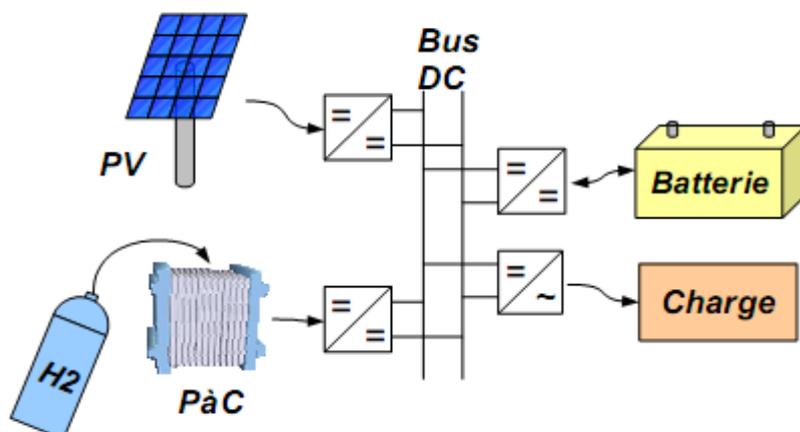
- Les puissances nominales des différents éléments peuvent être diminuées par rapport aux puissances nominales dans les autres configurations, en alimentant toujours la même charge.

#### Les inconvénients sont :

- Le contrôle automatique est indispensable pour le fonctionnement du système.
- L'onduleur doit fournir un courant sinusoïdal pour que la synchronisation avec le générateur diesel soit possible.
- Le fonctionnement du système n'est pas évident pour une personne non formé.

#### 2.3.4 Système de production générateur photovoltaïque PV, une pile à combustible (P à C) et une batterie de stockage :

Le système est composé d'un générateur photovoltaïque, d'une batterie et également d'une pile à combustible (P à C) à membrane échangeuse de protons (PEM pour proton exchange membrane en anglais) alimentée par un réservoir d'hydrogène comme le montre la figure 2-25.

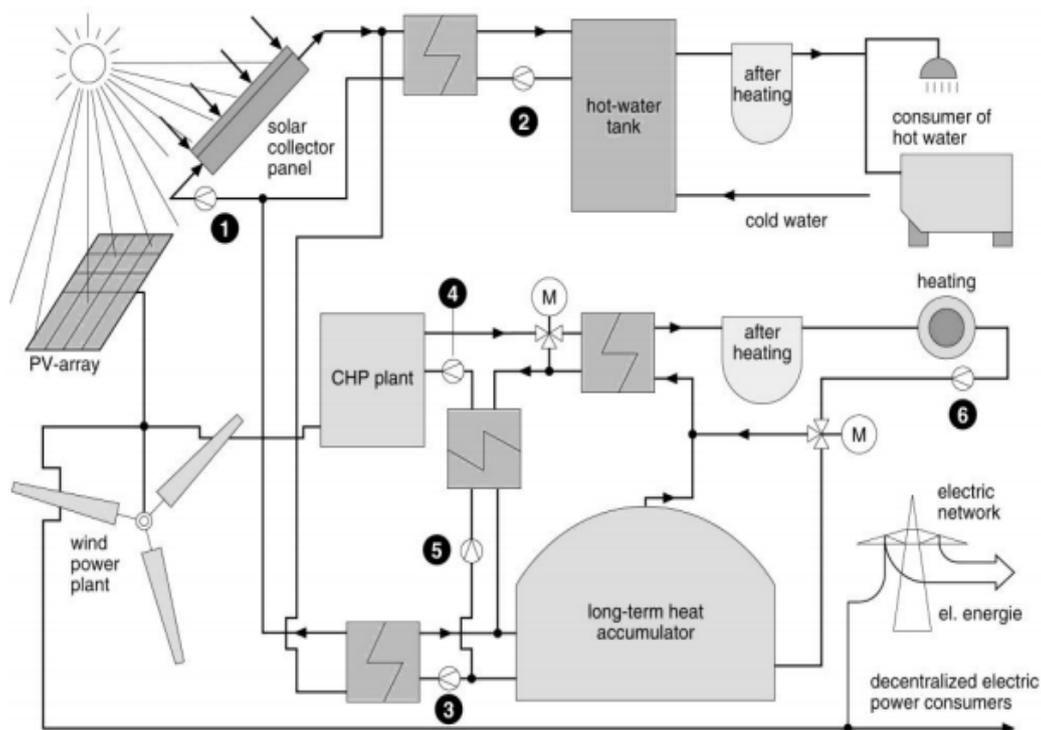


**Fig 2-25** : Schéma de production PV, P à C et une batterie de stockage [37].

Ce système autonome doit permettre d'alimenter une petite communauté d'une quinzaine de personnes dans une région dont les conditions météorologiques sont similaires à celles de la région belfortaine (France). D'après des estimations standards basées sur une consommation moyenne d'une habitation de pays industrialisé, cette communauté consommerait en moyenne près de 4 kWh ce qui représente environ 35 MWh par an [37].

### 2.3.5 Système de production modules solaires thermiques et photovoltaïques, et une éolienne :

La figure 2-26 décrit un système qui intègre l'exploitation de l'énergie éolienne, solaire thermique et avec une centrale de cogénération pour la production de chaleur et d'électricité. Ce système est un complexe résidentiel de 40 logements (demande d'énergie thermique annuelle de 325 MWh, demande d'énergie électrique annuelle de 157 MWh) et il est composé d'une unité de cogénération de 55 kW, d'un système de capteurs solaires thermiques de 200 m<sup>2</sup>, et photovoltaïques de 210 kWc et une éolienne avec une puissance maximale de 200 kW. Un stockage thermique de longue période est également fourni et est utilisé pour stocker la production d'énergie des capteurs solaires et de la cogénération. Deux chaudières d'appoint assurent le chauffage et l'eau chaude sanitaire.



**Fig 2-26 :** Centrale de cogénération associée à des modules solaires thermiques, photovoltaïques, et une éolienne [38].

En ce qui concerne le fonctionnement, la charge électrique est couverte en priorité par des sources renouvelables (éolienne et photovoltaïque) et, uniquement si elles sont incapables de répondre à la demande d'énergie, par la cogénération fonctionnant au gaz naturel. La centrale de cogénération fonctionne comme une fonction de la charge

électrique. Pour assurer la fourniture de chaleur, une chaudière d'appoint et un stockage saisonnier de chaleur sont installés. Les capteurs solaires fonctionnent selon la demande liée au profil de puisage, avec un réservoir de stockage de 1500 litres. En l'absence d'une demande en eau chaude, la puissance thermique des capteurs solaires recharge le stockage saisonnier. De même, la puissance thermique de la cogénération, en l'absence de besoins thermiques momentanés, recharge aussi le stockage saisonnier [38].

#### **2.4 Conclusion :**

Comme il y a de nombreuses configurations de systèmes multi-sources d'énergie qui peuvent être adoptées, l'étude de l'optimisation entre la demande d'énergie, l'offre d'énergie, les convertisseurs d'énergie et le stockage, doit être prioritaire lors de la conception et l'exploitation d'un système multi-source.

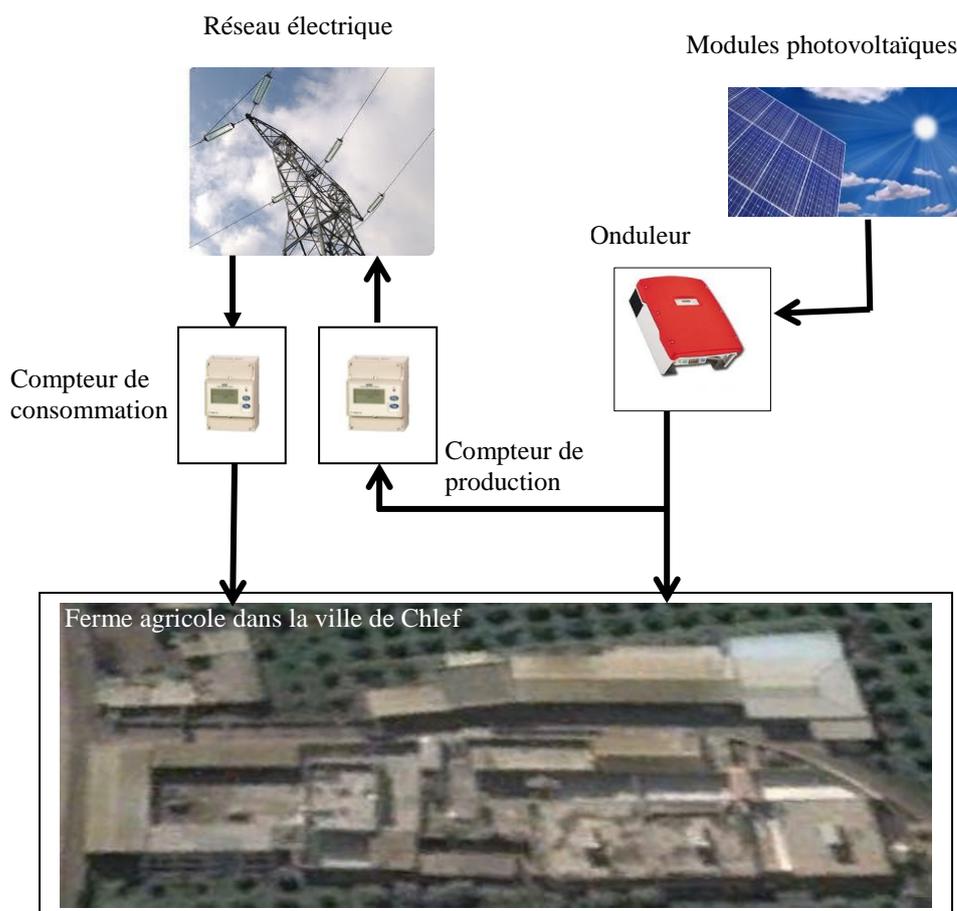
Les différentes mini-centrales multi-sources énergétiques que nous pourrions installer dans nos fermes agricoles dépendent de la disponibilité des différentes sources d'énergie renouvelable de façon perpétuelle au niveau de ces fermes agricoles telles que l'énergie solaire, l'énergie éolienne et l'énergie de biomasse, et elles dépendent aussi sur la surface qui pourrait être occupée par les installations fonctionnant avec ces sources d'énergie.

L'énergie solaire est la source d'énergie la plus prometteuse et la plus puissante parmi les énergies renouvelables. L'énergie solaire photovoltaïque contribue énormément dans le développement durable des régions connectées ou éloignées du réseau de distribution électrique. La mini-centrale utilisant la source d'énergie photovoltaïque et le réseau électrique offre une solution très intéressante pour l'alimentation en énergie électrique nécessaire au développement des fermes agricoles qui sont connectées au réseau électrique.

Dans ce cadre, le présent travail décrit une étude sur l'utilisation d'une mini-centrale multi-source utilisant la source d'énergie photovoltaïque et le réseau électrique pour approvisionner en électricité une ferme agricole connectée au réseau (Figure 2-27) et dont l'activité est basée surtout sur l'élevage des vaches, l'irrigation et l'utilisation des chambres froides pendant la saison de l'été. Ce choix est basé sur les arguments suivants :

**1-** Notre mini-centrale permet de réduire l'impact négatif du gaz carbonique sur l'environnement en diminuant la consommation de l'énergie fossile des centrales thermiques qui alimentent le réseau électrique par l'injection du surplus de la production électrique des modules photovoltaïques dans ce réseau.

- 2- L'électricité photovoltaïque est obtenue par transformation directe de la lumière du soleil en électricité, au moyen de cellules photovoltaïques (pas de machines en mouvement).
- 3- Pour les systèmes d'énergie autonomes le coût du stockage représente la plus grande contrainte du coût global du système. Le principal avantage des systèmes couplés au réseau, c'est qu'ils peuvent vendre l'énergie produite et non consommée sur place au fournisseur du réseau.
- 4- Il n'y a pas de problèmes d'intégration des modules photovoltaïques dans la ferme agricole contre une éolienne ou une installation d'un système de biomasse qui demandent une grande surface, les modules photovoltaïques seront installés sur les toits des bâtiments d'élevage et de stockage (grande surface).
- 5- Les coupures d'électricité ou les travaux de maintenance du réseau électrique qui se passent plus souvent pendant le jour ne perturbent pas les activités de la ferme agricole.
- 6- Le coût de l'installation d'un système photovoltaïque est moins cher par rapport à celui d'un système éolien ou celle d'un système de biomasse.



**Fig 2-27 :** Alimentation d'une ferme agricole dans la ville de Chlef à partir d'une mini-centrale composée de modules photovoltaïques et du réseau électrique.

CHAPITRE :

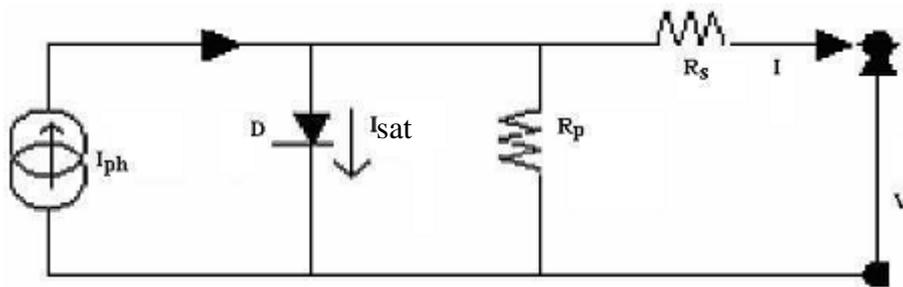
3

**3.1 Introduction :**

La modélisation nécessite un ensemble d'équations caractérisant tous les éléments du système étudié. A ce niveau, la condition qui s'impose c'est de connaître les critères d'entrées (données de base), c'est-à-dire, les données météorologiques relatives au site étudié, les données relatives aux utilisations, et les données relatives aux équipements.

**3.2 Modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque :**

La modélisation d'une cellule photovoltaïque peut être effectuée selon différents niveaux de complexité. Il s'agit d'obtenir un circuit électrique équivalent de la cellule photovoltaïque. Il existe plusieurs modèles parmi lesquels on a choisis celui d'une complexité moyenne, comme le montre la figure 3-1 [41].



**Fig 3-1:** Schéma équivalent d'une cellule PV [41].

Ce modèle a une source de courant  $I_{ph}$ , qui dépend de la radiation solaire et de la température, une diode en parallèle dont l'intensité de saturation inverse dépend de la température et une résistance en série  $R_s$ , laquelle représente l'effet de la résistance interne et des contacts de la cellule. On peut introduire davantage de complexité dans le modèle en introduisant en outre une résistance en parallèle  $R_p$  avec la diode, qui représenterait l'effet du courant qui traverse le cristal.

Les équations 3-1 et 3-2 décrivent les courbes caractéristiques I-V d'une cellule PV sont les suivantes [41] :

$$I = I_{ph} - I_{sat} \times \left( \exp\left( q \times \frac{(V + R_s \times I)}{A \times k \times T_c} \right) - 1 \right) - \frac{(V + R_s \times I)}{R_p} \tag{3-1}$$

$$T_c - T_a = \frac{NOCT - 20}{800} \times E_c \tag{3-2}$$

Avec :

V : Tension de la cellule [volt].

I : Courant de la cellule [A].

Rs : Résistance en série [ $\Omega$ ].

Rp : Résistance en parallèle (shunt) avec la diode [ $\Omega$ ].

k :  $1,38 \times 10^{-23}$  constante de Boltzmann

q :  $1,602 \times 10^{-19}$  charge de l'électron [C].

Tc : Température de jonction [K].

Isat : Courant de saturation de la diode [A].

Iph : Photocourant [A].

A : Facteur d'idéalité de la photopile, compris entre 1 et 5 dans la pratique [40].

NOCT: Température nominale de fonctionnement de la cellule solaire (Nominal operating cell temperature) [ $^{\circ}\text{C}$ ].

Ta : Température ambiante [K].

Ec : Eclairement [ $\text{W}/\text{m}^2$ ].

### 3.3 Caractéristique courant-tension :

#### 3.3.1 Courant de court-circuit :

C'est le courant  $I_{cc}$  pour lequel la tension aux bornes de la cellule PV ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal ( $R_s$  nulle,  $R_p$  infinie), ce courant  $I_{cc}$  se confond avec le photocourant  $I_{ph}$ .

Pour  $V=0$  on aura l'équation 3-3 :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \times \left( \exp\left( q \times \frac{R_s \times I_{cc}}{A \times k \times T_c} \right) - 1 \right) - \frac{R_s \times I_{cc}}{R_p} \quad (3-3)$$

#### 3.3.2 Tension de circuit ouvert :

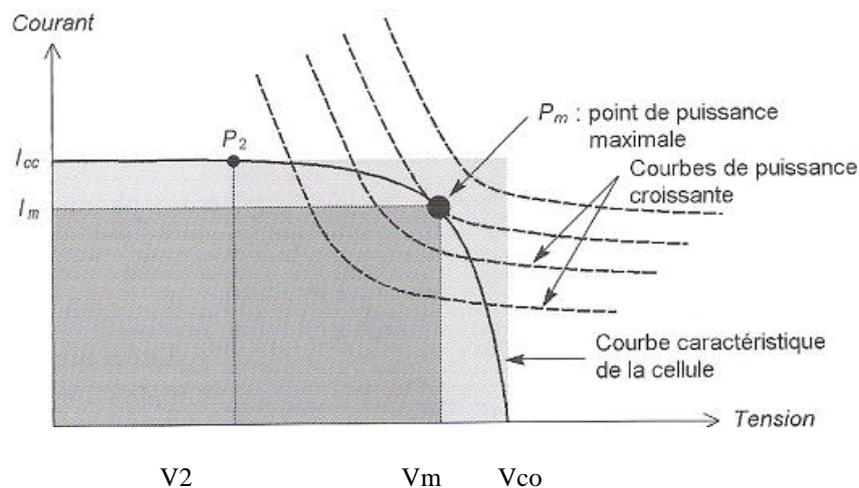
C'est la tension  $V_{co}$  pour laquelle le courant débité par la cellule PV ou le générateur PV est nul (la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur PV).

Pour  $I=0$  on aura l'équation 3-4 :

$$0 = I_{ph} - I_{sat} \times \left( \exp\left( q \times \frac{V_{co}}{A \times k \times T_c} \right) - 1 \right) - \frac{V_{co}}{R_p} \quad (3-4)$$

### 3.3.3 Puissance, facteur de forme et rendement d'une cellule photovoltaïque :

La partie intéressante de la caractéristique courant-tension, pour l'utilisateur, celle qui génère de l'énergie. Donc ce ne sera ni au point de tension de circuit ouvert, ni au point de court-circuit, qui ne génèrent aucune puissance qui est le produit du courant par la tension. On a tracé sur la figure 3-2 la caractéristique sous lumière d'une photopile ainsi que des courbes théoriques de puissance constante (en pointillés) [4].



**Fig 3-2:** Puissance maximale sur une caractéristique courant-tension [4].

Au point  $P_m$ , situé au « coude » de la caractéristique, la puissance de la photopile est maximale pour l'éclairement considéré. Ce point dit de puissance maximale, est associé à une tension dite de tension maximale  $V_m$  et de courant maximal  $I_m$ . Remarquons cependant que la photopile peut être sollicitée également à plus faible puissance, par exemple à une tension inférieure à  $V_m$  (point  $P_2$  sur la figure 3-2).

On voit bien que plus la courbe est « carrée », plus la puissance maximale est élevée. On mesure cette propriété par le facteur de forme (ou fill factor) défini par l'équation 3-5 [4]:

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} \times I_{cc}} \quad (3-5)$$

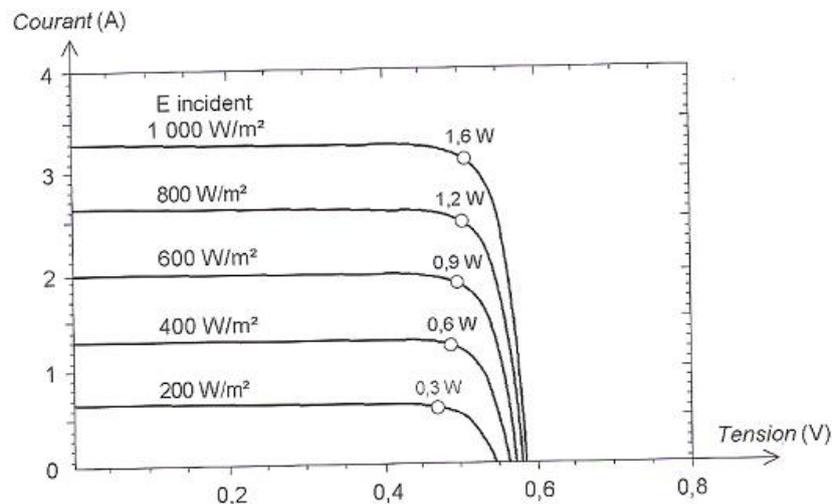
Le rendement énergétique est défini quant à lui comme le rapport entre cette puissance maximale produite et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule photovoltaïque. Si  $S$  est la surface de la cellule, et  $E_c$  l'éclairement en  $W/m^2$ , le rendement énergétique est donné par l'équation 3-6 [4] :

$$\eta = \frac{P_m}{E_c \times S} \quad (3-6)$$

Ce rendement est souvent mesuré dans les conditions de référence, c'est-à-dire sous l'ensoleillement de  $1\,000\text{ W/m}^2$ , à la température de  $25\text{ °C}$  et sous un spectre AM1,5. Ces conditions normalisées sont dites « STC » pour Standard Test Conditions.

### 3.3.4 Influence de l'éclairement :

La figure 3-3 présente les caractéristiques d'une cellule monocristalline typique de  $10 \times 10\text{ cm}$ , on a tracé la variation du courant par rapport à la tension pour plusieurs intensités de rayonnement solaire. Dans la partie gauche des caractéristiques, le courant est directement proportionnel au rayonnement à ces niveaux d'éclairement. La tension par contre n'est pas très dégradée lorsque la lumière baisse, dans une cellule monocristalline, la résistance parasite shunt reste assez élevée et la cellule peut fournir une tension correcte même à petits éclairages. Pour une cellule polycristalline qui présente une plus faible résistance shunt, la tension peut parfois baisser de manière importante dès que la lumière est en dessous de  $30$  à  $50\text{ W/m}^2$  (3 à 5 % de l'ensoleillement maximal) [4].



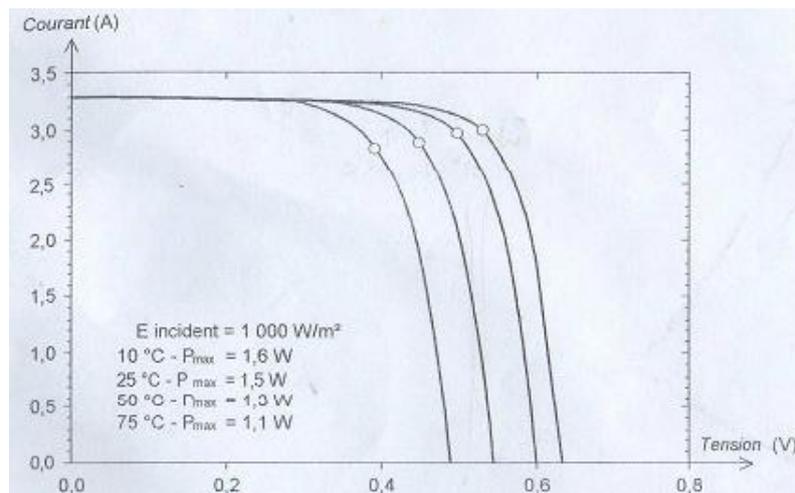
**Fig 3-3 :** Courbes I(V) sous diverses intensités de rayonnement d'une cellule monocristalline [4].

### 3.3.5 Influence de la température :

L'influence de la température est très significative, et demandera des choix importants dans la conception des modules et des systèmes.

Malheureusement, la tension d'une cellule cristalline baisse assez fortement avec la température. Cet effet est représenté sur la figure 3-4 où l'on voit différentes courbes d'une cellule cristalline entre 10 et 75 °C sous un ensoleillement de 1 000 W/m<sup>2</sup>.

La tension perd 2 à 2,5 mV/°C (soit - 0,41 %/°C) ce qui donne un déficit de à 100 mV entre 10 et 50 °C par exemple. Pour d'autres technologies, les variations de la tension en fonction de la température baissent lorsque le gap augmente, pour le silicium amorphe, l'effet est réduit de 30 % (environ 0,29 %/°C) [4].



**Fig 3-4 :** Courbes I(V) d'une cellule monocristalline à diverses températures [4].

Sous l'effet d'une hausse de la température, le courant gagne quant à lui un petit peu d'intensité. Ceci peut être expliqué par une meilleure absorption de la lumière, le gap baissant lorsque la température augmente. Mais l'accroissement du courant peut être négligé au point de puissance maximale et le comportement global de la cellule cristalline en température est une perte de 0,4 à 0,5 % par degré [4].

### 3.3.6 Influence de la résistance série R<sub>s</sub> :

La résistance série est la résistance interne de la cellule, elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles. La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone de la photodiode, elle se comporte comme un générateur de tension, et lorsqu'elle est élevée, elle diminue la valeur du courant de court circuit (Figure 3-5) [43].

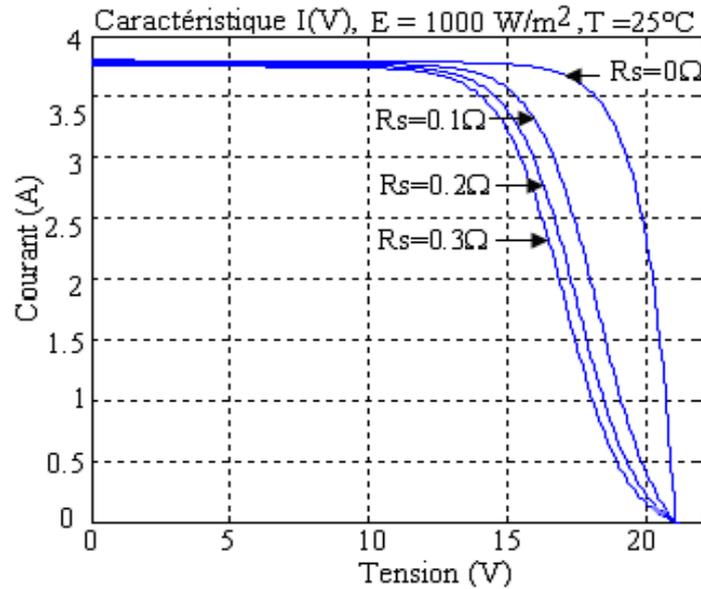
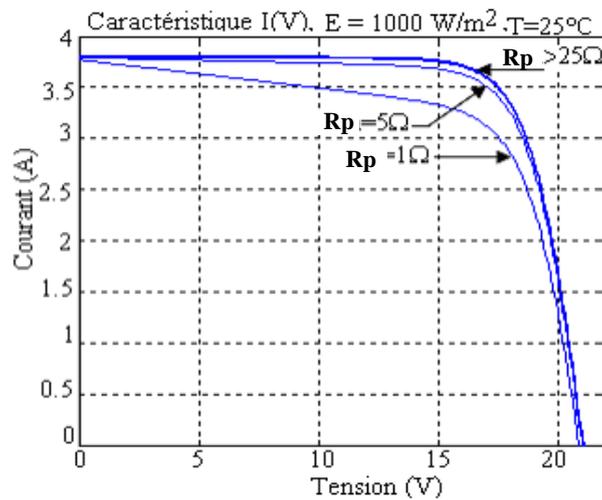


Fig 3-5 : L'influence de la résistance série  $R_s$  sur la caractéristique I (V) [43].

3.3.7 Influence de la résistance parallèle  $R_p$  :

La résistance parallèle (ou shunt) est une résistance qui prend en compte les fuites inévitables du courant qui intervient entre les bornes opposées d'une photopile. En générale, la résistance shunt est très élevée, son effet se fait sentir surtout dans la partie génération du courant (Figure 3-6) [43]:

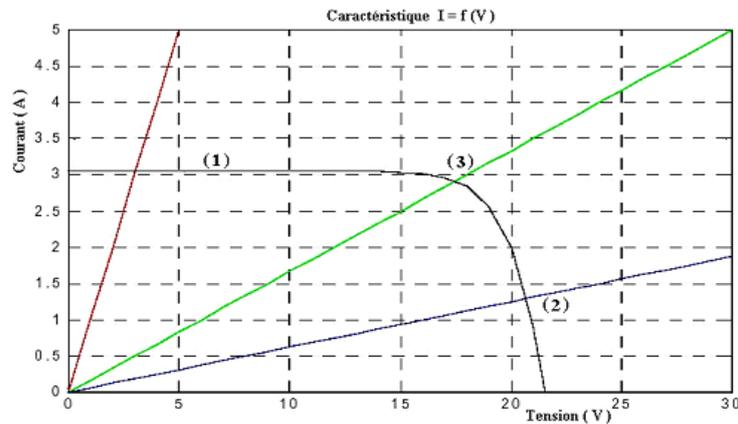


$R_p$

Fig 3-6 : L'influence de la résistance shunt  $R_p$  sur la caractéristique I (V) [43].

### 3.4 Modèle mathématique d'un module photovoltaïque :

La figure 3-7 montre la courbe de la caractéristique courant - tension du module PV, pour un éclairement et une température donnés. Le point de fonctionnement du module PV résulte de l'intersection de la caractéristique I-V du module et de la caractéristique I-V de la charge [42].

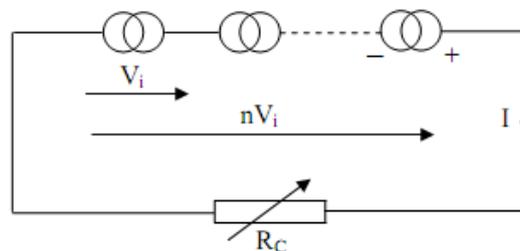


**Fig 3-7:** Caractéristique courant-tension du module photovoltaïque

$$E_c = 1000 \text{ W/m}^2, T = 25 \text{ °C [42].}$$

- La zone (1) se distingue par le courant qui reste constant, quelle que soit la tension. Dans cette zone, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- La zone (2) se distingue par une variation du courant correspondant à une tension presque constante, et c'est dans cette région, que le générateur est assimilable à un générateur de tension.
- La zone (3) correspond au coude de la caractéristique. C'est la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, et elle représente la région préférée pour le fonctionnement.

#### 3.4.1 Groupement série des cellules solaires :



**Fig 3-8 :** Branchement en série de n cellules identiques [44].

D'après la figure 3-8, pour n cellules identiques, la tension V' et le courant I' fournis à la charge R<sub>c</sub> sont [44]:

$$I' = I \text{ et } V' = \sum_{i=1}^n V_i = n \times V_i$$

Le modèle utilisé pour simuler les performances du module PV (n : groupement de cellules en série) est déduit du modèle de la caractéristique d'une cellule solaire par l'équation suivante [44, 46]:

$$I' = I_{ph} - I_{sat} \times \left( \exp \left( q \times \frac{(V' + R_{se} \times I')}{n \times A \times k \times T_c} \right) - 1 \right) - \frac{(V' + R_{se} \times I')}{R_{pe}} \quad (3-7)$$

$$R_{Se} = n.R_S \quad \text{et} \quad R_{Pe} = n.R_P$$

$R_{Se}$  : Résistance série équivalente et  $R_{Pe}$  : Résistance parallèle équivalente

### 3.4.2 Groupement parallèle des cellules solaires :

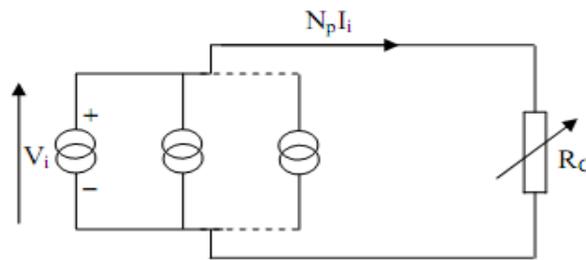


Fig 3-9 : Branchement en parallèle de m cellules identiques [44].

Si on connecte m cellules identiques en parallèle (Figure 3-9), la tension sera toujours la même, le courant et la puissance seront multipliés par le nombre de cellules m [44]:

$$V' = V \quad \text{et} \quad I' = \sum_{i=1}^m I_i = m \times I_i$$

La caractéristique de m cellules groupées en parallèle est donnée par l'équation 3-8 [44]:

$$I' = m \times I_{ph} - m \times I_{sat} \times \left( \exp \left( q \times \frac{(V' + R_{se} \times I')}{A \times k \times T_c} \right) - 1 \right) - \frac{(V' + R_{se} \times I')}{R_{pe}} \quad (3-8)$$

$$R_{Se} = R_S/m \quad \text{et} \quad R_{Pe} = R_P/m$$

$R_{Se}$  : Résistance série équivalente et  $R_{Pe}$  : Résistance parallèle équivalente

### 3.4.3 Groupement mixte des cellules solaires :

Le groupement mixte (série-parallèle) permet d'augmenter le courant et la tension du système. Si on combine m branches parallèles et n cellules en série dans chaque branche on aura [44]:

$$V' = n \times V \quad \text{et} \quad I' = m \times I$$

L'équation caractéristique du système est donnée par l'équation 3-9 [44]:

$$I' = m \times I_{ph} - m \times I_{sat} \times \left( \exp \left( q \times \frac{(m \times V' + n \times R_s \times I')}{n \times m \times A \times k \times T_c} \right) - 1 \right) - \frac{(m \times V' + n \times R_s \times I')}{n \times m \times R_p} \quad (3-9)$$

### 3.5 Modèle mathématique d'un générateur photovoltaïque :

La modélisation d'un générateur photovoltaïque composé de  $N_s$  modules en série et  $N_p$  modules en parallèle avec un groupement des cellule en série est donnée par l'équation 3-10 [44]:

$$I' = N_p \times I_{ph} - N_p \times I_{sat} \times \left( \exp \left( q \times \frac{(V' + R_{se} \times I')}{n \times A \times k \times T_c \times N_s} \right) - 1 \right) - N_p \times \frac{(V' + R_{se} \times I')}{R_{pe}} \quad (3-10)$$

Avec  $R_{s_e}$  et  $R_{p_e}$  résistance série et parallèle défini par :

$$R_{s_e} = n \times \frac{N_s}{N_p} \times R_s \quad R_{p_e} = n \times \frac{N_s}{N_p} \times R_p$$

### 3.6 Application d'un programme dans le logiciel Matlab pour calculer $I=f(I,V)$ et $P=f(V)$ :

#### 3.6.1 Pour une cellule photovoltaïque réelle :

La figure 3-10 présente un exemple de traitement de la courbe I-V sous éclairciment. Une cellule de référence a été utilisée pour ajuster la puissance à la sortie du simulateur solaire.

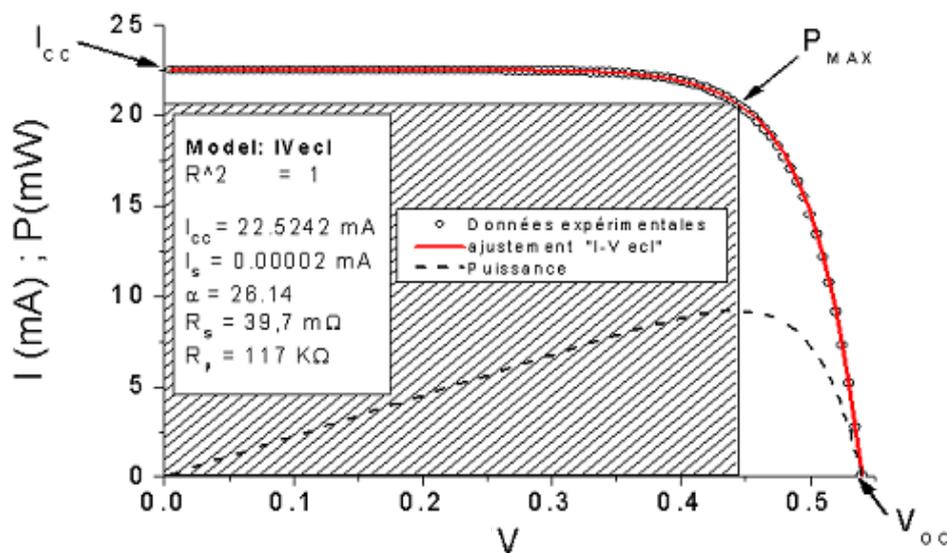


Fig 3-10 : Traitement de la courbe I-V sous éclairciment [45].

Elle a été réalisée et calibrée au Fraunhofer Institut Solare Energie systeme pour une puissance de 100 mW/cm<sup>2</sup>. Pour une telle puissance, la tension à la sortie de la cellule de référence est de 31,56 mV ± 2,0%. Les réglages nécessaires (puissance de la lampe xénon et distance entre la lentille de Fresnel et l'échantillon) ont été faits pour reproduire cette valeur. Après calibration, l'installation a été utilisée pour tracer les caractéristiques I-V sous éclairage de cellules photovoltaïques. Néanmoins, les courbes obtenues étaient souvent bruitées en raison des vibrations engendrées par les sept ventilateurs utilisés pour le refroidissement. De plus, le pas minimal de mesure est de 20 mV. Pour les cellules avec  $I_{cc}$  ou  $V_{co}$  faible, une telle variation de la tension est insuffisante pour avoir une bonne précision de mesure. Pour améliorer la précision ils moyennent cinq courbes I-V sous éclairage mesurées successivement pour chaque cellule. De plus, nous ajustons la caractéristique I-V sous éclairage par l'expression simplifiée (avec une seule exponentielle et  $R_s \gg R_p$ ) [45].

Le programme que nous avons établi dans ce travail permet de :

- a) Calculer la température de jonction en utilisant l'équation 3-2.
- b) Calculer le courant de saturation et le photocourant en utilisant les équations 3-3 et 3-4.

$$I_{sat} = \frac{I_{cc} \times \left(1 + \frac{R_s}{R_p}\right) - \frac{V_{co}}{R_p}}{\exp\left(\frac{q \times V_{co}}{A \times k \times T_c}\right) - \exp\left(\frac{q \times R_s \times I_{cc}}{A \times k \times T_c}\right)} \quad (3-11)$$

$$I_{ph} = I_{sat} \times \left( \exp\left(q \times \frac{V_{co}}{A \times k \times T_c}\right) - 1 \right) + \frac{V_{co}}{R_p} \quad (3-12)$$

- c) Calculer et tracer le courant électrique et la puissance en fonction de la tension.

Le programme que nous avons établi permet de résoudre directement l'équation 3-1, mais sous forme de deux équations :

$$X = I_{sat} \times \left( \exp\left(q \times \frac{(V + R_s \times I)}{A \times k \times T_c}\right) - 1 \right) \quad (3-13)$$

$$Y = I_{ph} - \frac{V}{R_p} - \left( \frac{R_s}{R_p} + 1 \right) \times I \quad (3-14)$$

- d) Trouver la puissance maximale, ensuite la tension optimale et le courant optimal sans faire de calcul.

e) Calculer le facteur de forme et le rendement énergétique.

f) Et il a besoins aux données suivantes :

I<sub>cc</sub> : Courant de court-circuit [A].

V<sub>co</sub> : Tension de circuit ouvert [volt].

R<sub>s</sub> : résistance en série [ $\Omega$ ].

R<sub>p</sub> : résistance en parallèle (shunt) avec la diode [ $\Omega$ ].

k :  $1,38 \times 10^{-23}$  J/K constante de Boltzmann

q :  $1,602 \times 10^{-19}$  charge de l'électron [C].

T<sub>c</sub> : Température de jonction [K].

A : Facteur d'idéalité de la photopile, compris entre 1 et 5 dans la pratique.

NOCT: Température nominale de fonctionnement de la cellule solaire (Nominal operating cell temperature) [ $^{\circ}\text{C}$ ].

T<sub>a</sub> : Température ambiante [K].

E<sub>c</sub> : Eclairement [ $\text{W}/\text{m}^2$ ].

S : Surface de la cellule [ $\text{m}^2$ ].

Dans l'annexe A, nous avons établi l'organigramme qui permet le calcul de I (V) d'une cellule PV réelle et d'un module réel.

En utilisant les données de la figure 3-10, nous avons obtenu les résultats qui apparaissent sur les figures 3-11 et 3-12 :

Eclairement  $E_c = 1000 \text{ W}/\text{m}^2$

Courant de court-circuit  $I_{cc} = 0.0225242 \text{ A}$

Tension de circuit ouvert  $V_{co} = 0.55\text{V}$

Résistance série  $R_s = 0.0397 \Omega$

Résistance parallèle  $R_p = 117000 \Omega$

La température nominale de fonctionnement de la cellule solaire (Nominal operating Cell Temperature).  $\text{NOCT} = 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Surface de cellule  $S = 0.0001 \text{ m}^2$

Facteur d'idéalité  $A = 1.6$

Constante de Boltzmann  $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J}/\text{K}$

Charge de l'électron  $q = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$

Température ambiante  $T = 298 \text{ K}$

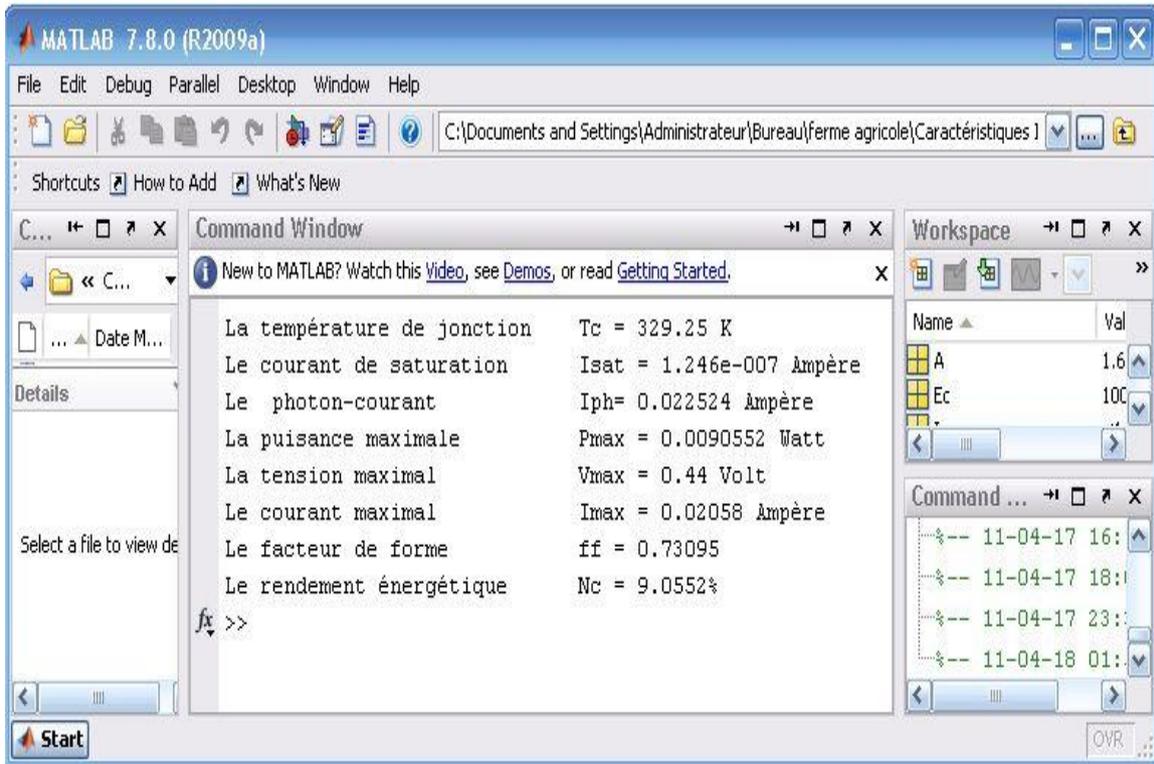


Fig 3-11 : Calcul des caractéristiques d'une cellule PV réelle.

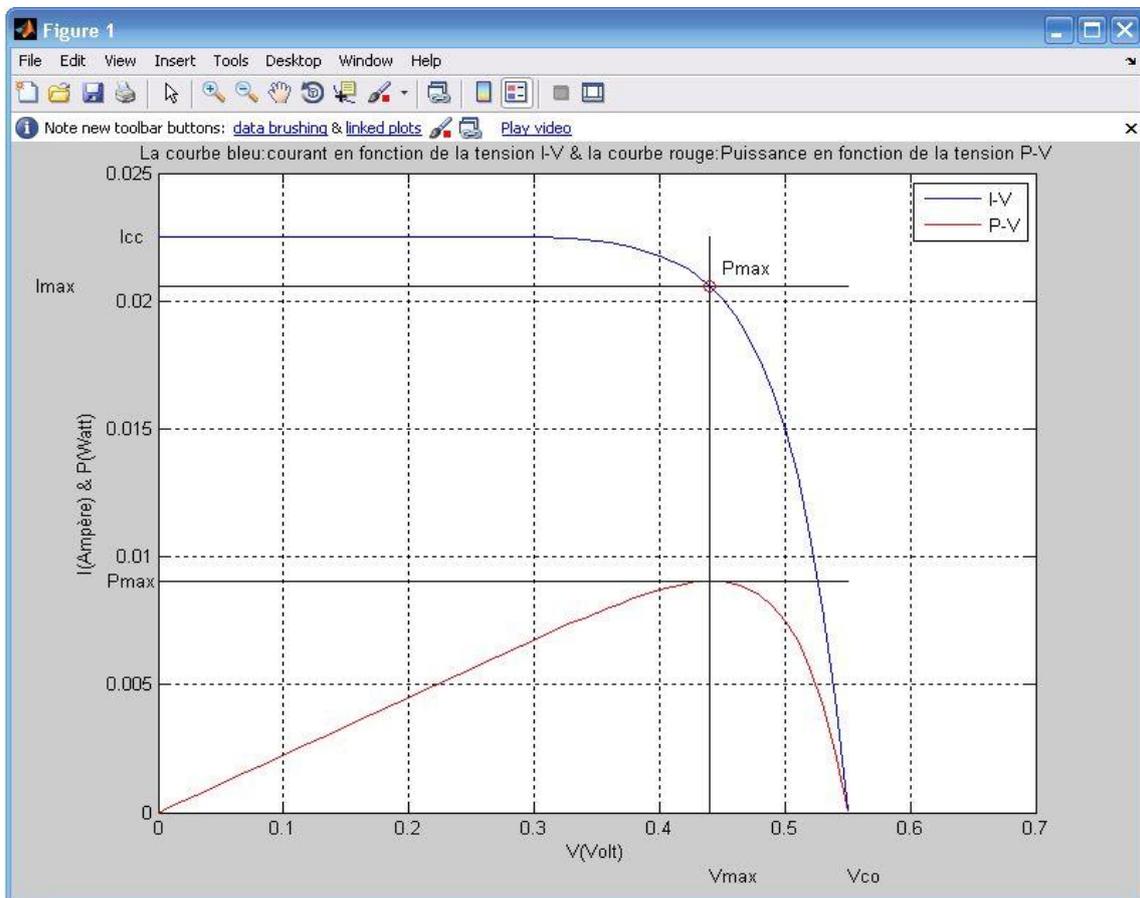


Fig 3-12 : Courbes I(V) et P(V) d'une cellule PV réelle.

D'après les résultats obtenus par notre programme et ceux de la figure 3-10, ils sont identiques concernant surtout la tension maximale et le courant maximal, la seule donnée ajoutée à ce programme, c'est le facteur d'idéalité  $A=1.6$  alors que les autres valeurs de ce facteur ne donnent pas des résultats divergents à ceux de la figure 3-10.

### 3.6.2 Pour un module photovoltaïque réel :

#### Cas : Groupement série des cellules :

Le programme que nous avons établi dans ce travail est celui de la cellule réelle, seulement, il introduit une nouvelle donnée qui est le nombre de cellules groupées en série et il permet de :

- a) Calculer la température de jonction en utilisant l'équation 3-2.
- b) Calculer le courant de saturation et le photocourant en utilisant l'équation 3-7 et les données suivantes :

$$I=0 \iff V=V_{co}, \text{ et } V=0 \iff I=I_{cc}.$$

$$I_{sat} = \frac{I_{cc} \times \left(1 + \frac{R_s}{R_p}\right) - \frac{V_{co}}{R_p}}{\exp\left(\frac{q \times V_{co}}{n \times A \times k \times T_c}\right) - \exp\left(\frac{q \times R_s \times I_{cc}}{n \times A \times k \times T_c}\right)} \quad (3-15)$$

$$I_{ph} = I_{sat} \times \left( \exp\left(q \times \frac{V_{co}}{n \times A \times k \times T_c}\right) - 1 \right) + \frac{V_{co}}{R_p} \quad (3-16)$$

- c) Calculer et tracer le courant électrique et la puissance en fonction de la tension en utilisant l'équation 3-7.

Le programme établi permet de résoudre directement l'équation 3-7, mais sous forme de deux équations :

$$X = I_{sat} \times \left( \exp\left(q \times \frac{(V + R_s \times I)}{n \times A \times k \times T_c}\right) - 1 \right) \quad (3-17)$$

$$Y = I_{ph} - \frac{V}{R_p} - \left( \frac{R_s}{R_p} + 1 \right) \times I \quad (3-18)$$

- d) Trouver la puissance maximale, ensuite la tension optimale et le courant optimal sans faire de calcul.
- e) Calculer le facteur de forme et le rendement énergétique.
- f) Et il a besoins aux données suivantes :

$I_{cc}$  : Courant de court-circuit [A].

$V_{co}$  : Tension de circuit ouvert [volt].

$R_s$  : résistance en série [ $\Omega$ ].

$R_p$  : résistance en parallèle (shunt) avec la diode [ $\Omega$ ].

$k$  :  $1,38 \times 10^{-23}$  J/K constante de Boltzmann

$q$  :  $1,602 \times 10^{-19}$  charge de l'électron [C].

$T_c$  : Température de jonction [K].

$I_{sat}$  : Courant de saturation de la diode [A].

$A$  : Facteur d'idéalité de la photopile, compris entre 1 et 5 dans la pratique.

NOCT: Température nominale de fonctionnement de la cellule solaire (Nominal operating cell temperature) [ $^{\circ}\text{C}$ ].

$T_a$  : Température ambiante [K].

$E_c$  : Eclairement [ $\text{W}/\text{m}^2$ ].

$S$  : Surface du module [ $\text{m}^2$ ].

$n$ : Nombre de cellules groupées en série.

En utilisant les données suivantes d'un module photovoltaïque [44], nous avons obtenu les résultats qui apparaissent sur les figures 3-13, 3-14 et 3-15 :

Température de la cellule aux conditions standard,	$T_{ref} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Eclairement aux conditions standard,	$E_{ref} = 1000 \text{ W}/\text{m}^2$
Tension de circuit ouvert,	$U_{co} = 22.4 \text{ V}$
Courant de court circuit,	$I_{cc} = 2.14 \text{ A}$
Rendement	10 %
Tension optimale	$V_{opt} = 17.45 \text{ V}$
Courant optimum	$I_{opt} = 2.2 \text{ A}$
Résistance série	$R_s = 0.45 \text{ } \Omega$
Résistance d'adaptation	$R_m = 9.3 \text{ } \Omega$
Facteur de forme	$FF = 0.79$
Puissance maximale	$P_m = 31.5 \text{ W}$
Tension au point de la puissance maximale	$V_m = 17.1 \text{ V}$
Courant au point de la puissance maximale	$I_m = 1.48 \text{ A}$
Coefficient de variation du courant en fonction de la température	$\alpha = 0.06 \text{ \% / }^{\circ}\text{C}$ .
Coefficient de variation de la tension en fonction de la température	$\beta = 0.4 \text{ \% / }^{\circ}\text{C}$ .
Bande de gap (silicium)	$E_g = 1.12 \text{ eV}$
Nombre de cellules en série	$n = 36$

Surface d'une cellule

$$S = 78.5 \text{ cm}^2$$

Résistance parallèle (ou shunt) d'une cellule

$$R_p = 800 \ \Omega$$

Facteur d'idéalité

$$A = 1.95$$

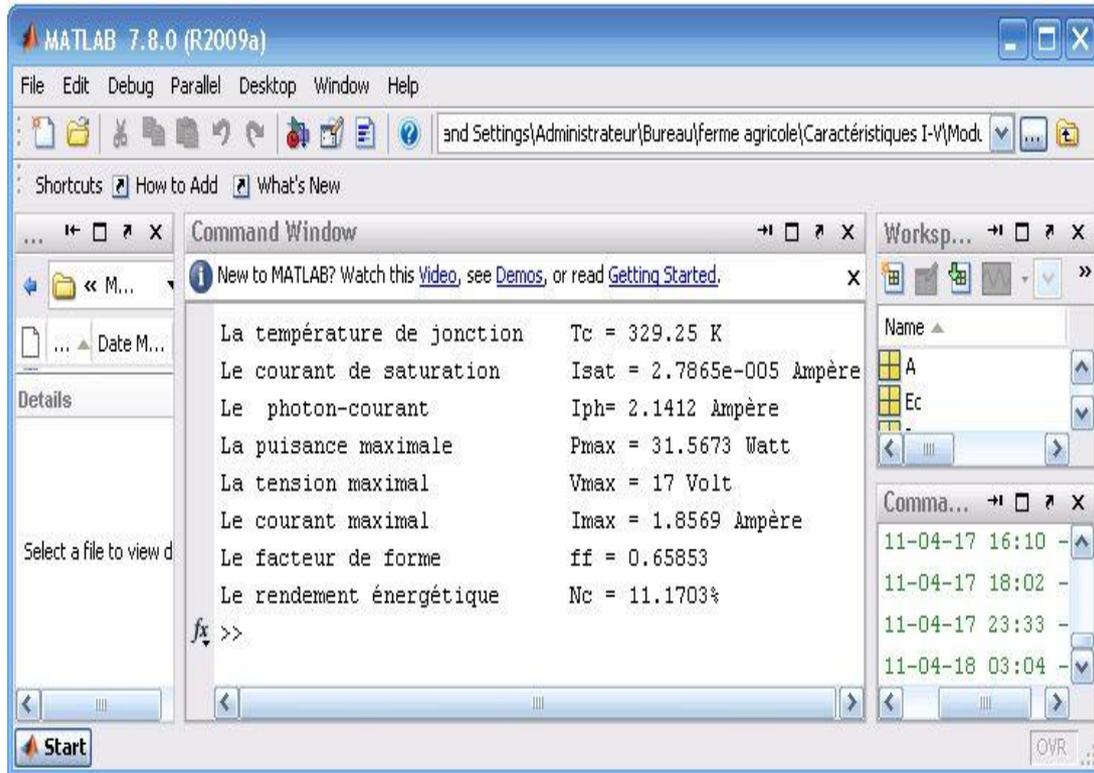


Fig 3-13 : Calcul des caractéristiques d'un module PV réel.

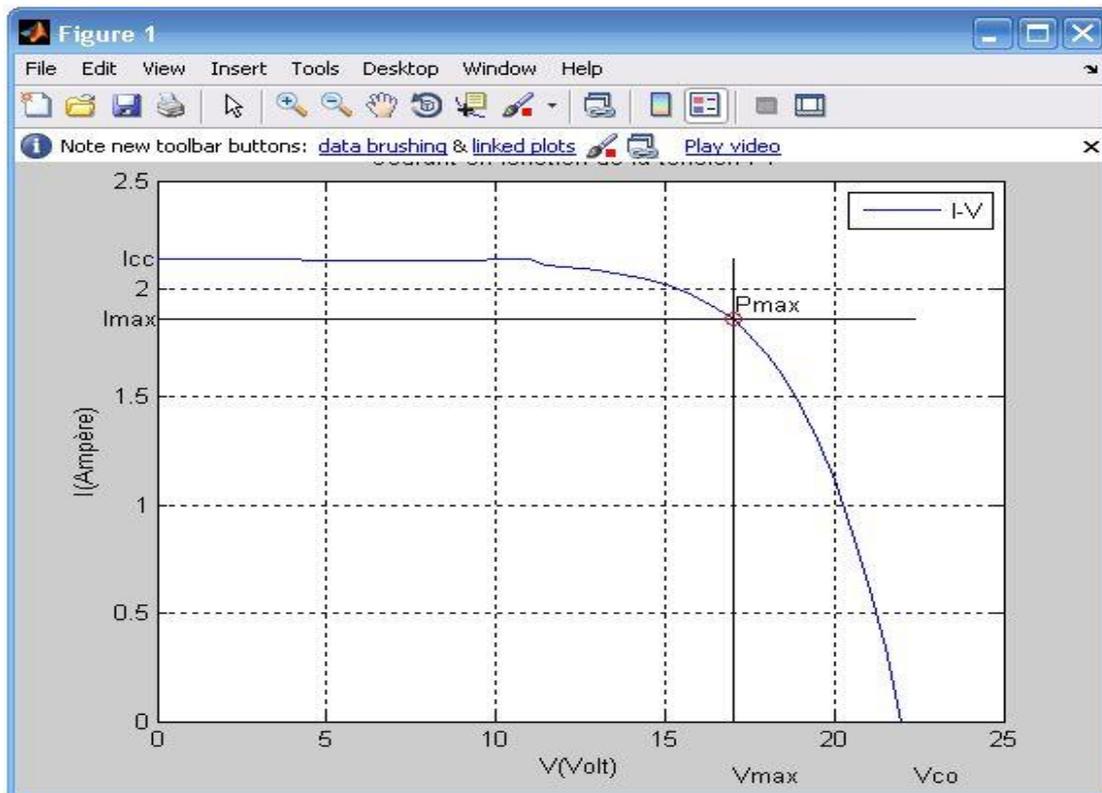
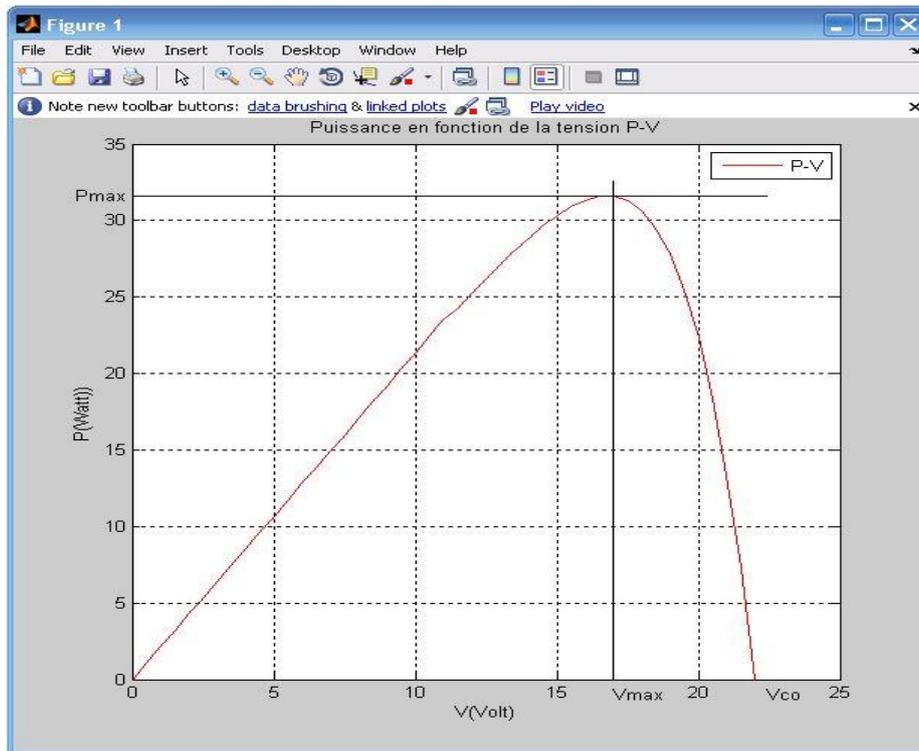


Fig 3-14 : Courbe I(V) d'un module PV réel



**Fig 3-15** : Courbe P(V) d'un module PV réel.

D'après les résultats obtenus par notre programme et ceux de la référence [44], on constate que les puissances maximales et les tensions maximales sont les même alors qu'il y a une différence de 0.3769 ampère dans le courant maximal, mais si on analyse les données suivantes [44]:

Puissance maximale	$P_m = 31.5 \text{ W}$
Tension au point de la puissance maximale	$V_m = 17.1 \text{ V}$
Courant au point de la puissance maximale	$I_m = 1.48 \text{ A}$

On trouve :  $P_m/V_m = 1.842 \text{ ampère} = I_m$  et ce résultat correspond à celui trouvé par notre programme.

Nous voyons que cette résolution numérique de l'équation  $I=f(I,V)$  de la cellule PV réelle ou du module PV réel a des avantages très importants :

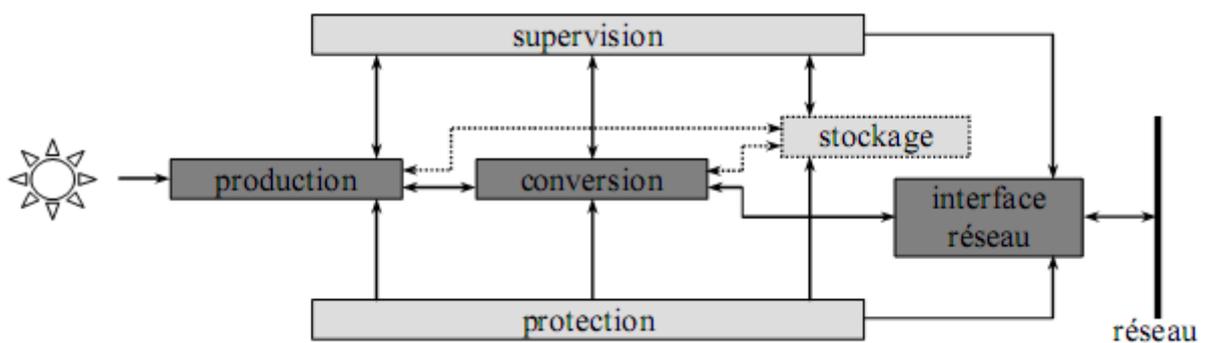
- 1- Il n'y a pas des termes négligés.
- 2- Elle utilise des formules simples.
- 3- Elle peut calculer le courant de saturation et le photocourant sans recourir à des coefficients spécifiques.
- 4- Elle peut calculer et tracer les fonctions  $I=f(I,V)$  et  $P=f(V)$  pour une cellule PV réelle, un module PV réel et même pour un générateur PV réel.

### 3.7 Topologie des onduleurs connectés au réseau :

L'énergie photovoltaïque PV est utilisée dans deux domaines d'applications, le PV en site isolé et le PV connecté au réseau. Ces deux applications ont des fonctions et mettent en œuvre des chaînes de conversion très différentes. Dans la suite, on va présenter plus particulièrement les fonctions et les topologies de champs PV connectés au réseau. On appelle « champ PV » un ensemble de modules [21].

#### 3.7.1 Les fonctions macroscopiques :

Ayant comme but final la production d'énergie, une installation photovoltaïque nécessite la mise en place d'une chaîne de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique basée sur l'effet photovoltaïque. Quelle que soit son architecture, cette chaîne de conversion peut se décomposer en plusieurs sous-systèmes délimités selon leurs fonctionnalités. Un premier aperçu d'un schéma conceptuel des systèmes photovoltaïques connectés au réseau identifiant les principaux sous-systèmes fonctionnels et leurs fonctions générales est donné sur la figure 3-16 .



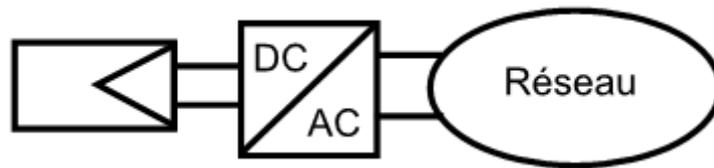
**Fig 3-16 :** Fonctionnalités générales des systèmes photovoltaïques connectés au réseau [21].

On peut identifier des fonctions de bases ( production, conversion, interface réseau) représentées par des cases grises foncées et des fonctions auxiliaires (protection, supervision et stockage) des cases portent la couleur gris clair. Les fonctions de base sont associées au système proprement dit de production d'énergie (elles apparaissent dans toutes les configurations de systèmes photovoltaïques), tandis que les fonctions auxiliaires aident au bon fonctionnement du système de base [21].

### 3.7.2 Types de conversion :

- **Conversion Mono étage :**

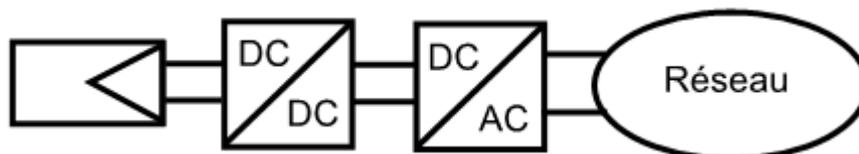
La conversion se fait en une seule étape (Figure 3-17), il n'y a pas d'étape d'amplification de la tension. Il faut donc que la tension du champ PV soit suffisante pour que l'onduleur puisse reconstituer la tension du réseau. Dans cette configuration le convertisseur doit assurer toutes les fonctions demandées par une application PV raccordées au réseau (MPPT, anti-îlotage...) [21].



**Fig 3-17 :** Schéma bloc d'une chaîne de conversion mono étage non isolée [21].

- **Conversion Deux étages :**

La conversion peut également être réalisée en deux étapes (Figure 3-18), une première conversion DC/DC puis une conversion DC/AC. Dans cette configuration, le convertisseur DC/DC a généralement le rôle d'augmenter la tension pour que l'onduleur puisse fabriquer un courant sinusoïdal à la tension du réseau. Les convertisseurs sont reliés par un bus DC. Les fonctions demandées par les applications PV peuvent ici être réparties entre les deux convertisseurs [21].



**Fig 3-18 :** Schéma bloc d'une chaîne de conversion à deux étages [21].

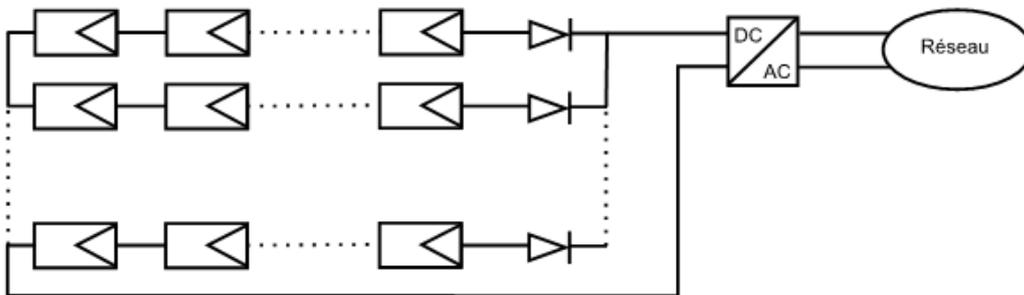
### 3.7.3 Les topologies de champs de conversion :

On va présenter dans la suite les architectures de champs PV permettant la connexion

au réseau de distribution, en s'intéressant principalement à la fonction de base « conversion ». Une grande diversité de topologies de champs PV existe, on présentera uniquement les plus utilisées et les plus intéressantes [21].

• **L'onduleur central :**

La topologie la plus ancienne et la plus classique est composée d'un seul onduleur réalisant l'interface entre le réseau et le champ photovoltaïque, où des chaînes de modules (ou "string") sont connectées en parallèle (Figure 3-19). Ce montage est généralement utilisé pour des installations de grandes puissances (20-400 kW) dans lesquelles des protections anti-retour de courant sont implantées par rangée.



**Fig 3-19 :** La topologie « Onduleur Central » [21].

L'avantage de la topologie « onduleur central » est sa simplicité de mise en œuvre : un seul onduleur connecté au champ photovoltaïque est nécessaire. De plus, l'onduleur central demande un faible coût d'investissement tout en permettant une maintenance simple. La simplicité du montage permet également un meilleur rendement de la conversion de la tension. En effet, la mise en série de plusieurs modules permet d'obtenir un rapport de transformation faible, ce qui augmente le rendement du convertisseur.

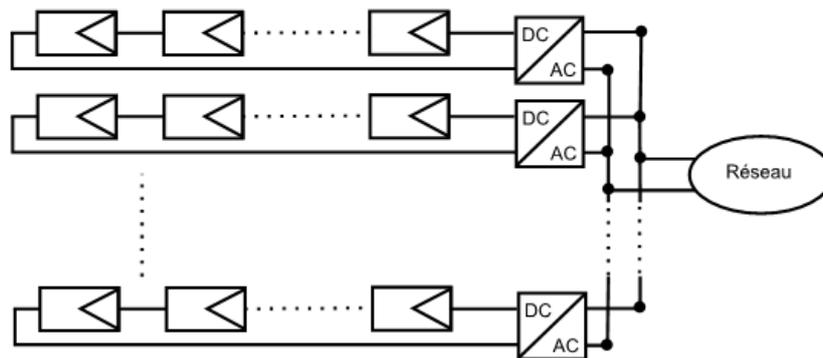
Par contre, ce montage présente plusieurs défauts :

- Pertes de conversion solaire (un seul MPPT pour un ensemble de modules).
- Pertes et risques électriques dans le câblage DC.
- Aucune évolutivité.
- Aucune continuité de service en cas de panne de l'onduleur.

Malgré les nombreux défauts de cette configuration, cette solution reste très employée dans les centrales PV au sol de forte puissance [21].

- L'onduleur « rangée »

L'une des topologies les plus employée actuellement est celle de l'onduleur rangée (Figure 3-20), qui consiste à implanter un onduleur au bout de chaque chaîne. Les onduleurs sont ensuite connectés en parallèle au réseau électrique, ce qui nécessite une coordination entre les onduleurs (du type maître - esclaves) pour proscrire le fonctionnement en îlotage et éviter les échanges de puissance entre les onduleurs.



**Fig 3-20** : La topologie « Onduleur rangée » [21].

La topologie « onduleur rangée » permet d'améliorer le contrôle de la puissance disponible par string grâce au MPPT de chaque onduleur. De plus, la continuité de service est accrue car la panne d'un convertisseur n'entraîne pas l'arrêt total de l'installation. Enfin, cette architecture est évolutive puisque chaque string constitue un sous ensemble indépendant. Dans le cas d'augmentation de puissance de l'installation, seul la connexion AC est à remplacer.

Une comparaison de la structure onduleur "rangée" et onduleur "central", menée par des chercheurs italiens, a permis de montrer que ces deux assemblages sont semblables, en ce qui concerne les pertes dans l'électronique de puissance et dans les câbles. D'après l'étude menée, dans les deux cas l'énergie perdue compte pour environ 10 % de l'énergie totale produite, la structure centralisée étant légèrement moins dissipative. En revanche, dans le cas d'ombrage du système PV, l'architecture centralisée produit 12 % de moins d'énergie que la structure rangée. En conclusion, l'étude montre que l'onduleur rangée a un rendement global (qui prend en compte les pertes ainsi que le nombre de jours ensoleillés et ombragés) plus performant de 1,5 %. Ces conclusions sont néanmoins à pondérer par la grande difficulté à caractériser un ombrage. Ce gain dépend fortement de l'ombrage considéré.

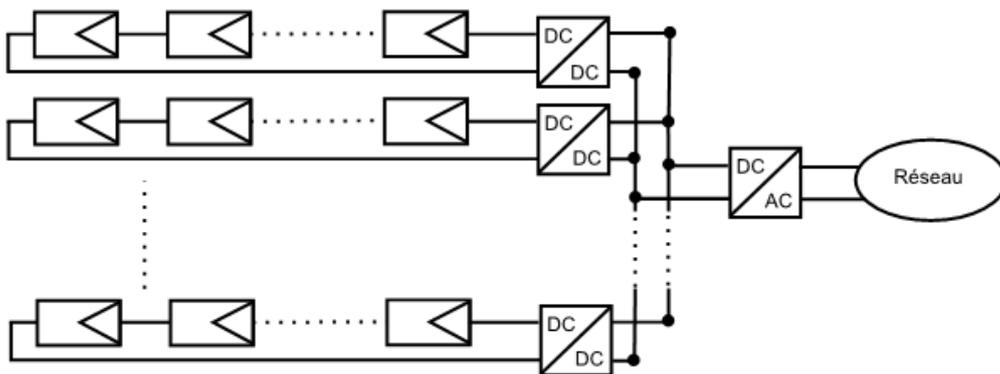
Cependant, il subsiste des pertes par couplage série des modules au sein d'un même string.

Le rendement des onduleurs reste variable en fonction de la puissance fournie par la chaîne photovoltaïque (mauvais rendement de l'onduleur à faible puissance des modules).

Une évolution dénommée « Team concept » de l'onduleur rangée consiste à introduire des sectionneurs en aval des onduleurs. Les onduleurs ayant de faibles rendements à faible puissance d'entrée, cette structure propose de modifier le nombre d'onduleurs utilisés pour effectuer la conversion en fonction de la puissance fournie par le champ PV. Ainsi, les onduleurs fonctionnent proche de leur puissance nominale et donc proche de la zone de rendement optimal. Cette évolution permettrait de gagner au moins 4 % d'énergie par an par rapport à la structure classique [21].

- **Le hacheur « rangée » :**

L'utilisation de plusieurs étages de conversion peut améliorer le rendement de conversion et la fiabilité du système, en dissociant les fonctionnalités de l'onduleur. Souvent présenté comme une solution intermédiaire entre l'onduleur "central" et de l'onduleur "rangée", le hacheur "rangée", aussi appelé convertisseur multi-string, utilise un hacheur en bout de chaque string du système PV (Figure 3-21).



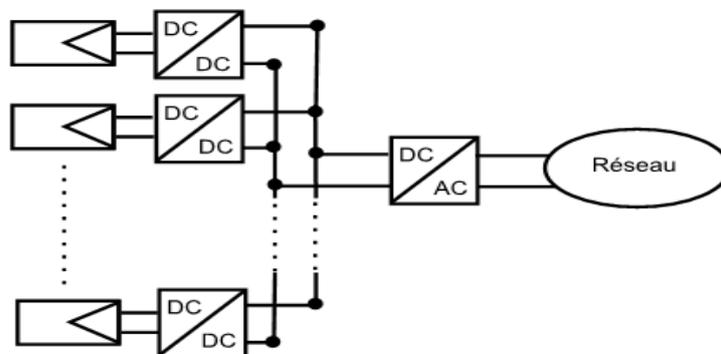
**Fig 3-21** : La topologie « Hacheur rangée » [21].

Le bus continu a l'avantage d'intégrer facilement un élément de stockage. De plus, l'utilisation d'un seul onduleur comme interface avec le réseau permet de réduire le nombre d'interactions entre le réseau et l'installation PV. La participation de l'installation aux services systèmes est donc facilitée. Le MPPT se fait pour chaque string, ce qui limite l'influence des modules entre eux .

Le montage reste évolutif, mais la continuité de service n'est pas assurée en cas de panne de l'onduleur. Par rapport à l'onduleur "rangée", les coûts seront probablement réduits car chaque hacheur n'a pas besoin d'intégrer les fonctionnalités de mesure et de surveillance de la tension et du courant réseau, le contrôle commande de la partie alternative et la détection de courant continu résiduel sur le réseau [21].

- **Le hacheur modulaire parallèle :**

Une évolution de la topologie hacheur « rangée » est la topologie hacheur modulaire parallèle présentée sur la figure 3-22. Le hacheur n'est plus connecté à une chaîne de modules PV mais directement à la sortie du module PV. Cette évolution garde tous les avantages du hacheur « rangée », tout en augmentant le niveau de discrétisation du MPPT. Ainsi ce n'est plus une chaîne de modules PV qui fonctionne à son MPPT mais chaque module PV. Un gain de productivité est donc à attendre par rapport au hacheur « rangée ». De plus, cette discrétisation plus importante permet une surveillance (monitoring) plus fine et une détection des défauts plus rapide.

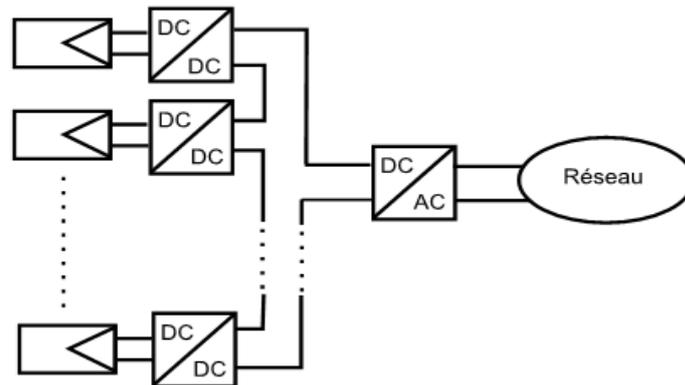


**Fig 3-22 :** La topologie « hacheur modulaire parallèle » [21].

Le principal point dur de cette structure est le grand rapport d'élévation entre la tension de sortie du module PV et la tension nécessaire à l'injection sur le réseau de distribution. En effet, pour un hacheur non isolé plus le rapport d'élévation est élevé plus les pertes sont importantes. Lorsque ce rapport est trop important (>8 en général), il est nécessaire d'avoir recours à des structures isolées ou à des cascades de convertisseurs [21].

- **Le hacheur modulaire série :**

Une des solutions pour diminuer le rapport d'élévation des hacheurs nécessaires à la topologie hacheur modulaire parallèle est de mettre la sortie des hacheurs en série. Ainsi le rapport d'élévation est d'autant diminué que le nombre de hacheurs en série est augmenté. Cette topologie dénommée hacheur modulaire série est présentée sur la figure 3-23.



**Fig 3-23 :** La topologie « hacheur modulaire série » [21].

Cette topologie garde tous les avantages de la topologie précédente tout en diminuant le rapport d'élévation des hacheurs et permet ainsi d'augmenter le rendement. En revanche, la mise en série des hacheurs implique une dépendance des points de fonctionnement des uns par rapport aux autres et complexifie les lois de commandes et le dimensionnement de la structure [21].

### 3.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons décrit la nécessité d'étudier les caractéristiques du modèle mathématique d'une cellule PV, d'un module PV et d'un générateur PV. Nous avons présenté l'influence des différents paramètres climatiques et autres sur la caractéristique  $I(V)$  et les différentes zones de fonctionnement. Nous avons présenté aussi dans ce chapitre une résolution numérique pour l'équation  $I=f(I,V)$  et nous l'avons appliquée dans deux exemples, pour une cellule PV réelle et un module PV réel et nous avons terminé ce chapitre par la modélisation des onduleurs connectés au réseau.

CHAPITRE :

4

#### 4.1 Introduction :

Une ferme agricole est, au sens propre, une exploitation agricole exploitée sous le régime du fermage. Son gérant et/ou sa gérante est le/la fermier/ère, locataire, il ou elle paie un loyer, le fermage, au propriétaire, qui lui afferme les terres et les bâtiments d'habitation et d'exploitation. Le terme s'est en fait généralisé pour désigner toute exploitation agricole, quel que soit le statut de l'exploitant, propriétaire ou locataire. Il désigne aussi, plus spécifiquement, les bâtiments d'exploitation abritant les machines agricoles, les cheptels animaliers, les produits agricoles et l'habitat [47].

#### 4.2 Description de la ferme agricole :

Selon les régions, la ferme (Figure 4-1) peut avoir une activité diversifiée (polyculture-élevage) ou au contraire plus ou moins spécialisée dans un domaine particulier (céréaliculture, viticulture, arboriculture fruitière, maraîchage ou horticulture, etc.).

Lorsque la ferme transforme et commercialise elle-même ses produits, tels que fromages, produits laitiers, volailles, œufs, fruits et légumes, confiture, laine..., on parle de « produits fermiers ». La commercialisation se fait en règle générale selon un circuit court (vente directe à la ferme, marché, commerce local).

En plus des bâtiments d'habitation, une ferme agricole est composée, outre les appentis, de bâtiments spécialisés qui en sont les dépendances [47]:

- Pour les animaux : Écurie, Étable, Bergerie, Poulailier...
- Pour les plantations : Serres ou tunnels.
- Pour les produits de la terre et les semences : Séchoir, Fenil, Grange, Grenier, Silo, Cave.
- Pour le matériel : Remise, Hangar, Forge-Ferronnerie, Baraque.
- Pour la transformation des produits de base :
  - Les céréales : Moulin (ancien), Fournil.
  - Les produits laitiers : Laiterie, Fromagerie.
  - Les oléagineux : Moulin à huile.



**Fig 4-1 :** Ferme agricole équipée par des modules solaires photovoltaïques et raccordée au réseau [48].

### 4.3 Description de l'élevage des animaux :

L'élevage est l'ensemble des opérations qui assurent la multiplication à l'usage des humains d'animaux souvent domestiques, parfois sauvages.

Les opérations consistent à [49] :

- Gérer la production des animaux adultes pour les multiplier.
- Leur fournir gîte, nourriture, soins, en vue de leur utilisation et/ou de leur production.

Les produits de l'élevage sont :

- Les animaux eux-mêmes (jeunes pour l'accroissement des troupeaux, animaux de repeuplement de territoire de chasse ou de pêche, animaux de compagnie).
- Les produits animaux pour l'alimentation humaine (ou animale) : viande, lait, œufs.
- Des produits non alimentaires : poils, laine, cuir, plumes, etc.
- Des sous produits : fumier, lisier, farines animales.

### 4.4 Systèmes d'élevages en Algérie :

#### 4.4.1 Système d'élevage pastoral :

Le pastoralisme est une pratique séculaire tirant ses racines d'une histoire multimillénaire. Les peintures, les gravures et autres arts rupestres sont là pour en témoigner. C'est un élevage basé essentiellement sur l'utilisation du pâturage extensif des parcours pour la production

comme c'est le cas dans toutes les zones arides et semi-arides. Dans ce type d'élevage (Figure 4-2), les animaux doivent faire face à des conditions particulièrement difficiles, telles que les longues distances de parcours, le déséquilibre alimentaire, l'insuffisance et la mauvaise qualité de l'eau, conditions qui imposent à la fois la flexibilité et la mobilité. Il est aussi très dépendant de variations climatiques, il représente une forme irremplaçable, économe en énergie fossile, pour le développement et la gestion du milieu naturel. Ce mode d'élevage exige non seulement des qualités de la part de l'animal (rusticité), mais aussi de nombreuses compétences de la part du pasteur (adaptation à un mode de vie particulier). Toutefois, la littérature scientifique s'accorde à dire que l'élevage mobile est le mieux adapté aux conditions écologiques des zones arides et semi-arides, il demeure le plus compétitif économiquement car il permet une production maximale au moindre coût (utilisation moindre des facteurs de production), mais il implique un investissement humain considérable, se basant sur le savoir-faire des éleveurs [51].



**Fig 4-2 :** Elevage pastoral en Algérie [50].

#### **4.4.2 Système d'élevage en fermes (exploitations) agricoles :**

Les éleveurs d'animaux de ferme ou agriculteurs (Figure 4-3) gèrent les aspects de l'élevage et de l'alimentation des animaux, ainsi que les soins qu'il faut leur prodiguer, en se fondant sur des pratiques durables. Il leur incombe également de s'occuper de la production de viande et des récoltes en plus d'en faire la promotion. Parmi leurs travaux indispensables, il y a [53] :

- Gérer des systèmes de manutention et de traitement des déchets, en plus de s'assurer de la présence d'une bonne ventilation ainsi que de conditions sanitaires appropriées dans les étables et ailleurs.
- Réparer et maintenir en bon état les bâtiments agricoles ou autres installations.
- Élaborer et mettre en œuvre des programmes de gestion agricole durable sur le plan environnemental, de gestion aussi de l'état de santé du troupeau ainsi que de contrôle des maladies et d'assurance de la qualité.
- Trouver des débouchés et évaluer les possibilités commerciales pour le bétail, en collaboration avec des producteurs alimentaires et des entreprises de marketing.
- Mettre en application des techniques stratégiques de pacage de manière à assurer le renouvellement écologique des champs et des terres consacrés aux pâturages.
- Choisir les aliments pour le bétail, en faire l'acquisition, les traiter puis les stocker.
- Prendre les dispositions voulues pour assurer le transport du bétail dans des conditions humaines.
- S'occuper des bêtes au quotidien en leur donnant la nourriture, l'eau et les soins voulus.
- Adopter des pratiques génétiques reconnues afin d'améliorer constamment le troupeau.



**Fig 4-3 :** Elevage en fermes agricoles en Algérie [52].

#### **4.4.3 Système d'élevage familial :**

L'élevage familial (Figure 4-4) occupe une place très importante dans les zones rurales. Offrant prestige et possibilité d'épargne, il assure à la famille les besoins quotidiens en lait et

dérivés et aussi en viande pour l'autoconsommation, les besoins occasionnels pour les activités sociales (mariages, fêtes religieuses), ainsi que ceux de la campagne agricole. L'importance de cet élevage dépend du nombre de familles par ménage, en relation étroite avec le nombre de femmes par ménage. L'élevage a en effet toujours été mené par celles-ci, responsables de l'entretien quotidien des animaux, elles s'occupent par exemple de la traite des vaches et de son alimentation. Par contre, les hommes s'occupent de la commercialisation des animaux comme les veaux ou les taurillons [55].



**Fig 4-4 : Elevage familial en Algérie [54].**

#### **4.5 Exploitations agricoles, leurs effectifs et leurs activités en Algérie :**

Le premier recensement agricole en Algérie remonte à 1973. Notre agriculture a connu depuis cette date des bouleversements importants nécessitant, d'une part, une nouvelle photographie de ses structures et des caractéristiques principales de ses exploitations et, d'autre part, une base de sondage actualisée destinée à mener une nouvelle série d'enquêtes sur le secteur agricole à partir d'échantillons représentatifs. Conscient des enjeux que représente l'existence de données statistiques actualisées et fiables, et attentif aux recommandations formulées dans ce domaine par l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO), le Gouvernement a décidé alors de procéder à un nouveau recensement de l'agriculture algérienne. Le Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural (MADR) a ainsi conçu et réalisé le Recensement Général de l'Agriculture (RGA) 2001, avec l'assistance technique de l'Office National des Statistiques (ONS) et de la FAO. Ce recensement a touché l'ensemble des exploitations agricoles et a nécessité une organisation rigoureuse et un travail de contrôle permanent [56].

**4.5.1 Distinction entre les exploitations agricoles :**

Le secteur de l'agriculture compte 1 023 799 exploitations agricoles dont 55 935 orientées vers des activités conduites en hors sol et 967 864 réparties sur les 8 458 680 ha de Superficie Agricole Utile (SAU).

Ces exploitations se distinguent par un ensemble de critères parmi lesquels :

- La taille (ou la dimension).
- La nature juridique.
- Le statut juridique des terres.

**• La taille des exploitations :**

La taille de chaque exploitation agricole dépend de la Superficie Agricole Utile (SAU) occupée par cette exploitation et qui varie de 0.1 ha jusqu'à 200 ha. Dans cette catégorie, on trouve la prédominance de la petite exploitation avec une superficie comprise entre 0,1 et moins de 10 ha. Elle occupe 25,4 % de la SAU totale et qui représente 70 % du total des exploitations.

**• Nature juridique des exploitations :**

L'exploitation individuelle prédomine avec 83,1 % du total des exploitations et se répartit sur 79,7 % de la SAU totale

**• Statuts juridiques des terres :**

Il y a quatre statuts juridiques caractérisent les terres des exploitations : Melk, domaine privé de l'Etat, domaine public et Wakf.

Parmi les exploitations, on trouve :

- 39,55 % des exploitations sont dans l'indivision et couvrent 46 % de la SAU totale.
- 50,14 % des exploitations sont érigées sur des terres sans titre et couvrent 41 % de la SAU totale.

**4.5.2 Occupation de la Superficie Agricole Utile (SAU) :**

- 57,4 % des exploitations pratiquent la céréaliculture.
- 39,61 % de la SAU sont occupés par la jachère.
- 48,3 % des exploitations pratiquent l'arboriculture.

#### 4.5.3 L'irrigation :

Les superficies irriguées couvrent 620 687 ha soit 7,34 % de la SAU totale et sont localisées dans 287 456 exploitations soit 28 % du total des exploitations.

- **Répartition de la superficie irriguée par groupe de cultures :**

L'utilisation de la SAU irriguée par les principales cultures s'établit comme suit :

- Arboriculture : 41,2 %
- Cultures maraîchères et industrielles : 33 %
- Grandes cultures : 25,8 %

- **L'irrigation selon la taille des exploitations :**

Prédominance de l'irrigation dans les petites exploitations avec une superficie comprise entre 0,1 et moins de 10 ha. Celles-ci représentent 82,3 % de l'ensemble des exploitations pratiquant l'irrigation.

- **L'irrigation selon le statut juridique des terres :**

La superficie totale irriguée représente 7,3 % de la SAU totale. 28 % des exploitations pratiquent l'irrigation.

#### 4.5.4 Elevage :

Le cheptel national est composé principalement d'ovins, de bovins, de camelins, de caprins et de volailles.

- **Les effectifs :**

Les effectifs des ruminants recensés s'élèvent à :

- 18 738 166 de têtes ovines.
- 1 464 663 de têtes bovines.
- 3 186 878 de têtes caprines.
- 333 933 de têtes camelines.

Concernant le cheptel avicole, il a été recensé :

- Plus de 23 millions de sujets pour la filière ponte (poules pondeuses et poulettes démarrées).
- Plus de 39 millions de sujets pour la filière chair (reproducteurs et poussins chair).
- 866 000 dindes.

- **Les types d'élevages :**

- 30,8 % des exploitations pratiquent un élevage mixte (bovin et ovin).
  - Les exploitations mixtes à prédominance ovine sont prépondérantes. Au nombre de 117 436, elles représentent 96,2 % de l'ensemble des exploitations pratiquant l'élevage mixte.
  - Celles à prédominance bovine, ne représentent que 0,8 % (975 exploitations) du total des exploitations mixtes.
- 48,6 % des exploitations sont spécialisées dans l'élevage ovin.
- 20,6 % des exploitations sont spécialisées dans l'élevage bovin.

- **Les bâtiments d'élevage et annexes :**

- Les bâtiments d'élevage (bergerie, étable, écurie et poulailler) : au nombre de 311 429, ils occupent une superficie de 30 962 202 m<sup>2</sup> et sont répartis sur 291 256 exploitations.
- Parmi ces bâtiments d'élevage il y a 46 % de bergeries et 42 % d'étables.
- Les bâtiments annexes (de stockage, d'entreposage ou de remisage) au nombre de 111 598, couvrent 10 409 058 m<sup>2</sup> et sont répartis sur 103 312 exploitations.

**4.6 Types de construction des bâtiments d'élevage :** Bâtiments fermés, semi-ouverts ou ouverts.

Ils sont en liaison avec le climat de la région, pouvant varier de la douceur tempérée des régions côtières à la rigueur des régions montagneuses, en passant par les contrastes de régions plutôt continentales ou par le climat chaud méditerranéen. Il convient de noter que le choix (parfois obligé) d'un bâtiment fermé pose aussitôt le problème de son isolation thermique plus ou moins poussée, et de sa ventilation afin d'éviter les risques de condensation et d'atmosphère délétère liés à l'abondant dégagement de vapeur d'eau produit par les animaux, tout autant que pour obtenir une température ambiante convenable (en réalité, plus pour l'éleveur que pour les bovins, par exemple, qui supportent assez bien une température fraîche dans une ambiance non humide et bien ventilée) [57].

**4.7 L'état de l'art de la consommation électrique des fermes agricoles en Algérie :**

**4.7.1 Bâtiments d'élevage :**

La consommation électrique en bâtiments d'élevage varie entre les types d'élevage (bovin, ovin, volailles,...), par exemple l'élevage des volailles est le plus consommateur d'énergie pour le chauffage et la ventilation mécanisée. La réussite d'un élevage dépend beaucoup des capacités de l'éleveur à maintenir à son meilleur niveau le confort physiologique de ses animaux. L'ensemble des bâtiments d'élevage nécessite donc de nombreuses fonctionnalités utilisant l'énergie électrique qui sont [62]:

1. L'éclairage.
3. La ventilation.
2. Le chauffage.
4. Le brassage d'air.
5. La traite (en élevage laitier).

- **Eclairage :**

L'éclairage (Figure 4-5) est important pour la surveillance et pour la santé et le confort des animaux. Ainsi, il faut veiller à favoriser les apports de lumière naturelle (translucides latéraux) par des sur faces éclairantes représentant 5 à 10 % de la sur face au sol du bâtiment

et à installer un éclairage artificiel performant, 1 à 2 W/m<sup>2</sup> en fluorescent. Il a une influence déterminante sur l'équilibre des animaux :

- Plus de lumière génère plus de croissance. Un éclairage trop faible, de mauvaise qualité, entraîne une productivité médiocre (moins d'œufs, moins de lait, moins de croissance, etc.).
- Un éclairage mal adapté (mauvaise répartition des points lumineux, tubes fluorescents, etc.) peut avoir de graves répercussions sur le comportement des animaux (gallinacés, etc).
- Les coupures brutales augmentent le stress des animaux et compromettent la qualité de l'élevage.



**Fig 4-5 :** Eclairage dans un poulailler [62].

- **Chauffage :**



**Fig 4-6 :** Chauffage dans un poulailler [62].

Durant les premières semaines de leur vie, les animaux craignent le froid, ce qui nécessite l'utilisation d'un chauffage de type radiant (électrique ou le plus souvent à gaz avec allumage électrique). Là encore, toute panne peut entraîner de sérieuses conséquences (Figure 4-6).

- **Ventilation :**

C'est un équipement indispensable. Une panne peut avoir des conséquences désastreuses pour l'ensemble de l'élevage. Il est impératif d'avoir une installation fiable et de pouvoir intervenir très rapidement en cas de nécessité. La recherche d'une bonne ventilation, sans courant d'air, doit être un objectif essentiel. Une ambiance saine est obtenue, été comme hiver, s'il y a un renouvellement d'air efficace, sans courants d'air sur les animaux. Le volume d'air du bâtiment doit être renouvelé au moins une fois toutes les 10 minutes. La surface d'entrée d'air doit être 2 fois plus importante que la surface de sortie d'air. Pour lutter contre les courants d'air, il faut privilégier l'utilisation de systèmes « brise-vent » pour réduire la vitesse de l'air. Différents procédés existent : bardage ajouré, pose de filets, tôles perforées éventuellement . . . . En cas de problème manifeste, il faudrait prévoir une ventilation dynamique (Figure 4-7).



**Fig 4-7 :** Système de ventilation dans un bâtiment agricole d'élevage [62].

- **Brassage d'air :**

Certains élevages de poules pondeuses, de lapins, etc., sont équipés de fosses nécessitant l'utilisation de brasseurs d'air pour le séchage des déjections (Figure 4-8).



**Fig 4-8 :** Système de brassage d'air dans un bâtiment agricole d'élevage [62].

- **Traite (en élevage laitier) :**

En élevage laitier, le bloc traite est composé de la salle de traite où le lait produit par les animaux est collecté via une machine à traire. Les principaux équipements du bloc traite sont [63]:

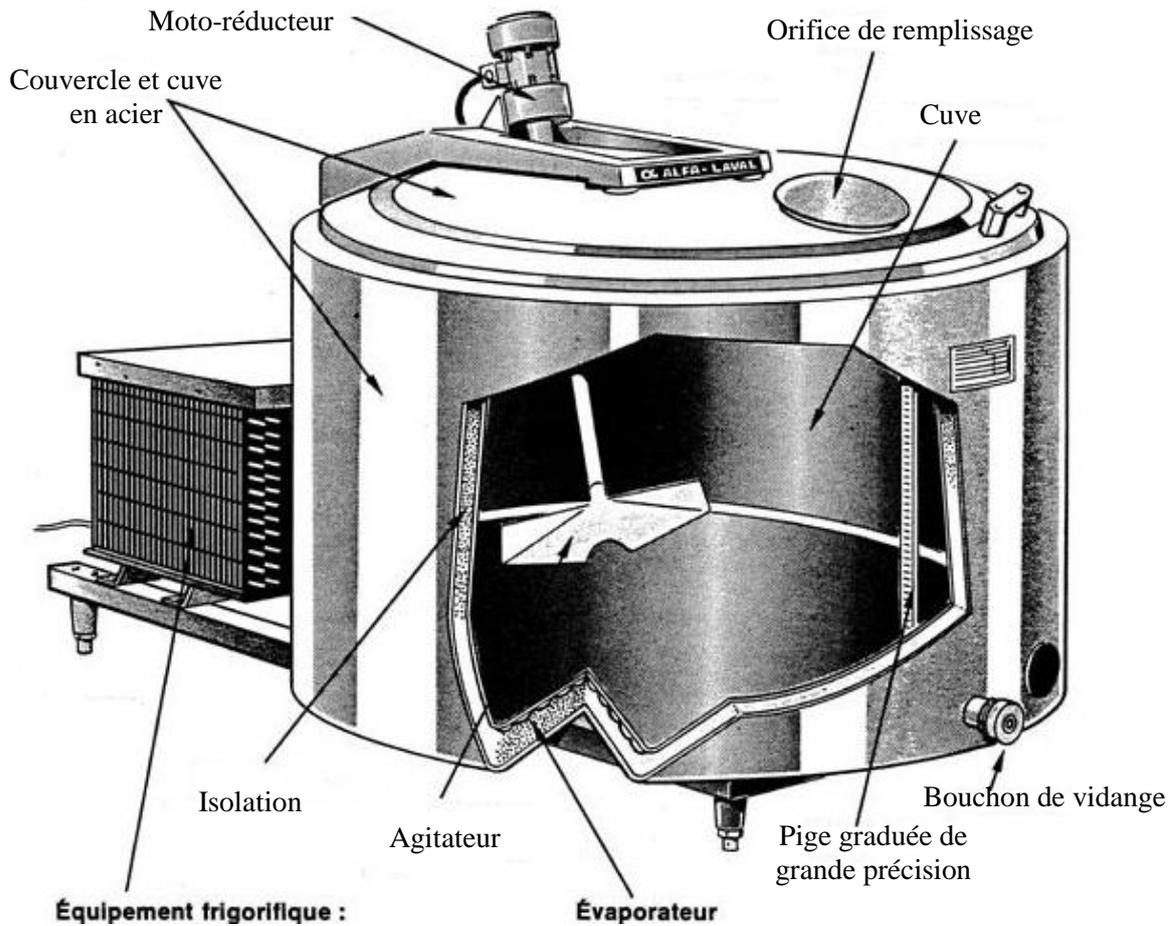
1. La machine à traire est un appareil (fixe ou mobile) permettant d'effectuer la traite mécanique des animaux en élevage laitier (vache, chèvre, brebis...), la figure 4-9 présente une machine à traire mobile. L'élément principal d'une machine à traire est le gobelet trayeur qui est appliqué sur le trayon et imite la succion exercée par le veau. Les pulsations du gobelet trayeur, suite régulière de phases d'aspiration et de massage, sont obtenues au moyen d'un pulsateur.



**Fig 4-9 :** Machine à traire mobile [64].

2. Le tank ou la cuve à lait (Figure 4-10) permet de refroidir le lait de 35 °C à 4 °C et de stocker ce dernier jusqu'à la collecte assurée par la laiterie (1 à 3 jours de stockage), le refroidissement de ce tank est assuré par un groupe de réfrigération. Un tank de réfrigération se compose essentiellement de deux parties :

- a. Une machine frigorifique permettant la réfrigération de la cuve du lait.
- b. Une cuve isolée à double paroi servant d'échangeur de température entre le lait et le fluide réfrigérant. Elle est complétée par :
- Un agitateur assurant l'homogénéisation de la température du lait et une bonne répartition de la matière grasse.
  - Un thermostat réglant la température.
  - D'accessoires divers : couvercle, jauge à lait, robinet de vidange, thermomètre, etc.



**Fig 4-10 :** Cuve de réfrigération du lait [65].

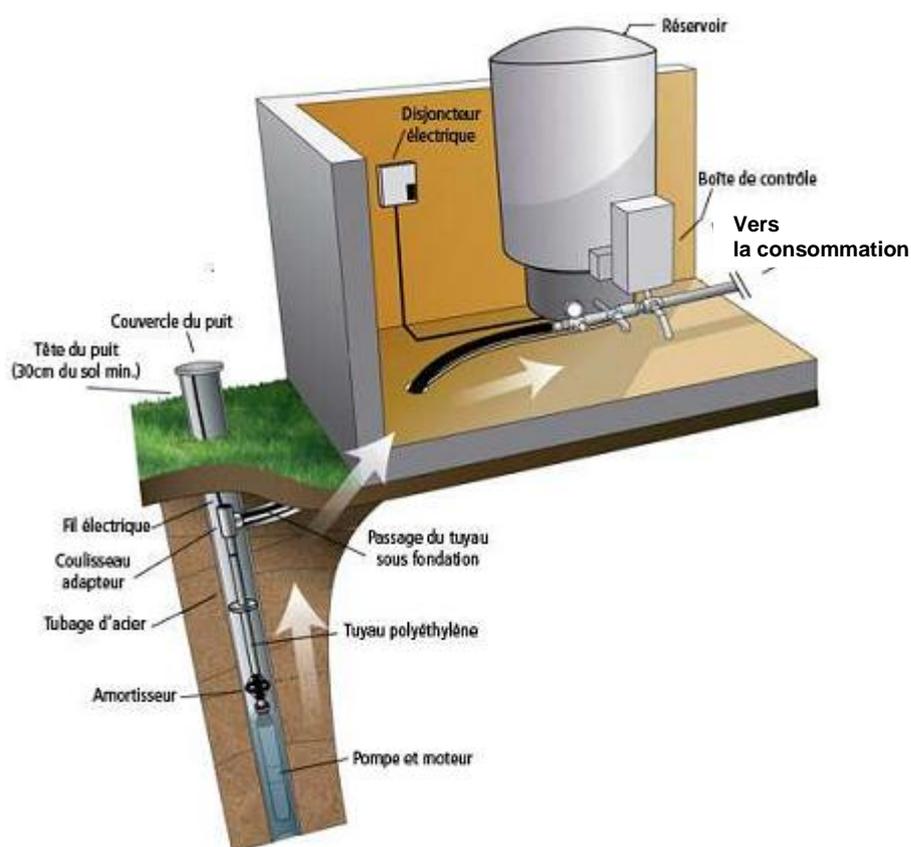
3. Le chauffe-eau électrique permet d'assurer la production d'eau chaude sanitaire nécessaire au lavage.
4. Les équipements destinés au nettoyage telle qu'une pompe d'eau.

#### 4.7.2 Bâtiments de stockage :

Certains des produits agricoles à la ferme nécessitent de la ventilation, du séchage ou du froid. Pour ces équipements, il s'agit également de mettre au point des modes de stockage ou des équipements moins consommateurs d'énergie.

#### 4.7.3 Pompage de l'eau pour l'irrigation, l'abreuvement du bétail et d'autres besoins:

Le pompage de l'eau participe de façon importante au développement des fermes agricoles (l'irrigation, l'abreuvement du bétail) et à la consommation domestique, il nécessite des technologies adaptées aux conditions locales (Figure 4-11).



**Fig 4-11** : Schéma d'installation d'un système de pompage de l'eau [66].

#### 4.7.4 Chambres froides :

Les chambres froides sont destinées pour refroidir les produits agricoles telle que la pomme de terre durant la période d'été et ces dernières années, nous constatons que beaucoup de ces chambres ont été installé dans notre région.

#### 4.8 Production de l'électricité dans les fermes agricoles :

L'utilisation de la surface des toits des bâtiments agricoles ou de terrains inexploitable pour produire de l'électricité à partir des énergies renouvelables est devenue une priorité surtout devant la raréfaction des sources énergétiques fossiles et la forte augmentation de son coût et la nécessaire lutte contre le réchauffement climatique, les exploitants agricoles ont donc un rôle important à jouer dans le développement des énergies renouvelables produisant de l'électricité telles que l'énergie solaire, l'énergie éolienne et l'énergie de biomasse.

L'activité agricole et les filières de l'élevage peuvent donc jouer un rôle important dans la production de l'électricité (Figure 4-12) nécessaire pour aider à la préservation de la qualité environnementale du territoire rural et de maîtriser les consommations d'énergie électrique et la réduction des émissions des gaz à effet de serre. Cette production d'électricité à partir d'énergie renouvelable fait donc partie des nouvelles missions confiées à l'agriculture.

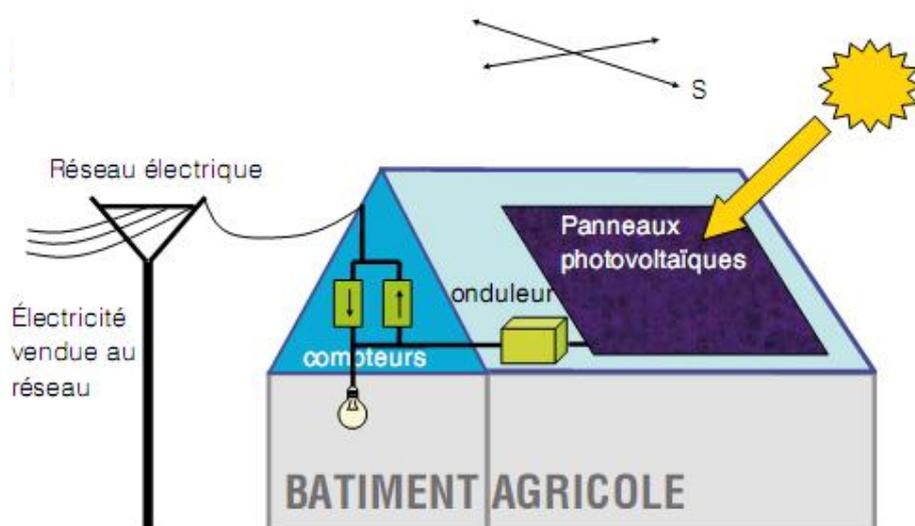


Fig 4-12 : Production de l'électricité dans une ferme agricole [59].

#### 4.9 Bases zootechniques recommandées pour des bâtiments d'élevage équipés d'installations photovoltaïques :

On désigne par bâtiment d'élevage une construction équipée de mangeoires et d'abreuvoirs pour l'engraissement des animaux. La conception de nouveaux types de bâtiments d'élevage plus économes en énergie est nécessaire et leur efficacité énergétique est à prendre en compte dès sa construction. La règle première est de toujours rechercher le compromis entre l'activité d'élevage et la production d'électricité. Le bâtiment doit assurer des conditions de travail correctes pour les intervenants et ne pas dégrader le bien être animal. Donc, construire un

bâtiment fonctionnel, économique et durable. L'ensemble de ces recommandation sont [58, 60] :

#### 4.9.1 Aire de vie :

Pour chaque espèce et catégorie d'animaux, des surfaces d'aire de vie sont nécessaires pour assurer le bien être des animaux et le bon fonctionnement du bâtiment (accès à l'alimentation, abreuvement, circulation, couchage, propreté...). Surdimensionner les aires de vies conduit à augmenter les frais de fonctionnement (surface et temps de raclage, curage et paillage plus importants). Cela augmente aussi les frais d'investissements (plus de terrassement, plus d'équipements intérieurs, plus de bétons au sol...). Le regroupement de tous les animaux, de surcroît d'âge différent, sous un même bâtiment, peut également engendrer des problèmes sanitaires.

#### 4.9.2 Résistance de la charpente :

En effet, les modules photovoltaïques peuvent faire une dizaine de kilo par mètre carré, aussi il est important de tenir compte des caractéristiques de la charpente du bâtiment agricole dans le dimensionnement de son installation photovoltaïque pour ne pas risquer de casse, notamment, par l'effet cumulé du poids des capteurs et de la neige en hiver. Si un renforcement de la structure est nécessaire, les coûts d'investissements seront d'autant plus importants, à l'inverse, en cas de construction neuve ou de rénovation de toiture, les capteurs solaires peuvent remplacer les matériaux classiques de couverture réduisant d'autant le coût d'investissement solaire.

#### 4.9.3 Ambiance – Ventilation :

- **Volume d'air :**

Pour assurer le confort des animaux, un minimum de volume d'air dans le bâtiment est nécessaire et doit être adapté aux animaux qui y seront logés. Lorsque le volume du bâtiment est surdimensionné, l'ambiance peut être fortement perturbée (notamment en période hivernale).

- Impossible de réchauffer le bâtiment (risques de pathologie sur les animaux les plus jeunes : diarrhées...).

- Impossible d'assurer l'évacuation des gaz et de la vapeur d'eau produits par les animaux et la litière par effet cheminée (risques de pathologies respiratoires).

- **Pente de toiture :**

Le pourcentage de pente des toitures a peu d'influence sur la production d'électricité mais en a beaucoup sur la hauteur du bâtiment et par conséquent sur son volume. L'optimum du volume est atteint pour une hauteur d'environ 8 m. Il est recommandé de ne pas dépasser des hauteurs de plus de 10 m au faîtage. La hauteur sous gouttière du bâtiment doit permettre de passer des engins (tracteurs, désileuses...) et d'assurer la ventilation. Une hauteur minimum de 3,80 m est souvent nécessaire. De plus, descendre trop bas le pan de modules photovoltaïque entraîne des risques d'empoussièrisme accrus et peut conduire à des détériorations par projection de pierres. Sur le rampant de 18 m, il est impérativement de prévoir un relais de ventilation à mi-toiture sur ces rampants, donc un décrochage au niveau d'un poteau, généralement de 0,5 m à 2 m, l'ouverture restant libre ou protégée par un système brise-vent, et de prévoir aussi une ou plusieurs "écailles" sur le rampant.

- **Renouvellement d'air :**

Le renouvellement d'air dans le bâtiment est primordial pour évacuer rapidement l'air vicié, l'humidité stagnante est source de nombreux problèmes sanitaires (maladies respiratoires, mammites...). L'objectif est de rendre le bâtiment le plus respirant possible pour assurer un renouvellement efficace de l'air sur toute la surface du bâtiment. Pour permettre un renouvellement rapide de l'air, les distances entre les entrées et les sorties d'air ne doivent pas dépasser 10 m. Dans le cas de distances supérieures, des relais sont indispensables (toiture décalée, écailles...). Il vaut mieux privilégier les toitures en bi-pente avec faîtage ouvert qui assurent des entrées et des sorties d'air mieux réparties. Les toitures mono-pentes supérieures à 12 m de large et d'un seul tenant sont à proscrire pour le logement d'animaux.

#### **4.9.4 Orientation :**

L'orientation et l'ouverture des longs pans des bâtiments ont une incidence sur la ventilation. Idéalement, en bâtiment dit « fermé », pour favoriser une bonne ventilation, il convient d'orienter un long pan face au vent dominant. Cependant, cette orientation optimale pour

l'élevage n'est pas compatible avec la production photovoltaïque (à l'exception des modules de silicium amorphe). Produire de l'électricité sur un bâtiment d'élevage induit donc une orientation plein sud pour un rendement électrique optimum. Des précautions deviennent alors nécessaires : bardage ventilant sur les 4 faces, largeur limitée du bâtiment et/ou relais de ventilation.

#### **4.9.5 Poussière :**

Si l'activité agricole est particulièrement génératrice de poussière (ex : bâtiments avicoles avec lanterneaux), il faut être très vigilant, la poussière risque de concourir à une perte de production.

#### **4.9.6 Matériaux de bardage :**

Ils doivent être à la fois perméables à l'air pour assurer la ventilation et suffisamment protecteurs contre la pluie. Il est préférable d'utiliser des matériaux à faible conductivité thermique afin de limiter les fortes variations de température et les phénomènes de condensation. Les bardages bois répondent le mieux à ces exigences.

#### **4.9.7 Luminosité :**

La lumière naturelle dans les bâtiments d'élevage participe à la bonne santé des animaux (reproduction, croissance, etc.). Il faut privilégier les structures bi-pente qui permettent de disposer des translucides sur le rampant de toiture non utilisé par les modules photovoltaïques. Une répartition judicieuse des zones éclairantes sur les longs pans et sur les pignons du bâtiment permet d'amener un complément de luminosité (haut des portails, pointes de pignons, bandeau translucides...). Un relais de ventilation par décalage de la toiture contribue aussi à l'éclairage de la stabulation.

#### **4.9.8 Champs électromagnétiques :**

Les modules photovoltaïques ne génèrent pas de champs électromagnétiques (courant continu et faible voltage). Par contre, les onduleurs dont le rôle est de transformer le courant continu en courant alternatif à 220 V ou 380 V, créent des champs électromagnétiques pouvant

présenter un risque pour les animaux et les équipements électroniques. Il convient donc d'installer les onduleurs dans un local spécifique, si possible à l'extérieur du bâtiment d'élevage et à l'écart des installations de traite. Tous les équipements doivent faire l'objet d'une mise à la terre soignée.

#### **4.9.9 La connectique :**

La déconnexion d'un câble peut générer un arc électrique important. Afin de limiter les risques d'incendie, dans les bâtiments d'élevage, il est nécessaire de veiller à ce que les câbles soient bien protégés et solidarisés.

#### **4.9.10 Paysage :**

Le respect des préconisations ci-dessus et l'implantation sur la parcelle conduiront à une intégration réussie du bâtiment dans son environnement. Donc, il est préférable d'éviter les grandes longueurs sans décalage de toiture et les mono-pentes de grande largeur. Des abords soignés, un ensemble intégré au paysage, des volumes raisonnables, donnent une image positive auprès du public. Cette perception ne doit pas être remise en cause par de mauvais choix de matériaux.

#### **Note :**

Concernant les bâtiments d'élevage avicole, beaucoup d'installateurs photovoltaïques émettent des réserves à les couvrir, car deux facteurs peuvent concourir à baisser la production, la température à l'intérieur du bâtiment liée à l'élevage et les importants dégagements d'ammoniac (risque possible de corrosion des modules). Problème que l'on ne retrouve pas avec les bâtiments d'élevage bovin ou ovin car ils sont souvent semi-ouverts, donc aérés.

#### **4.10 Exemples de coupes de bâtiments d'élevage compatibles avec la production d'électricité photovoltaïque (non exhaustifs et les dimensions sont en mètre) :**

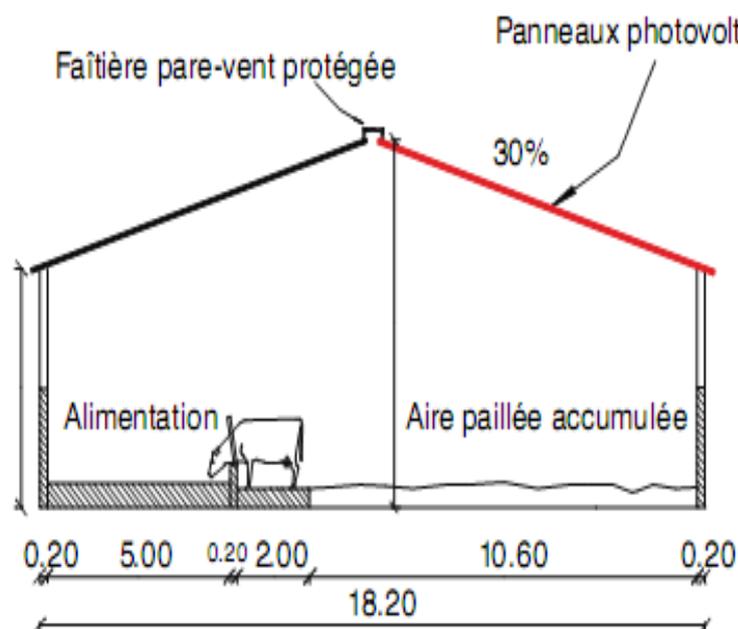


Fig 4-13 : Vaches allaitantes : aire paillée intégrale [58].

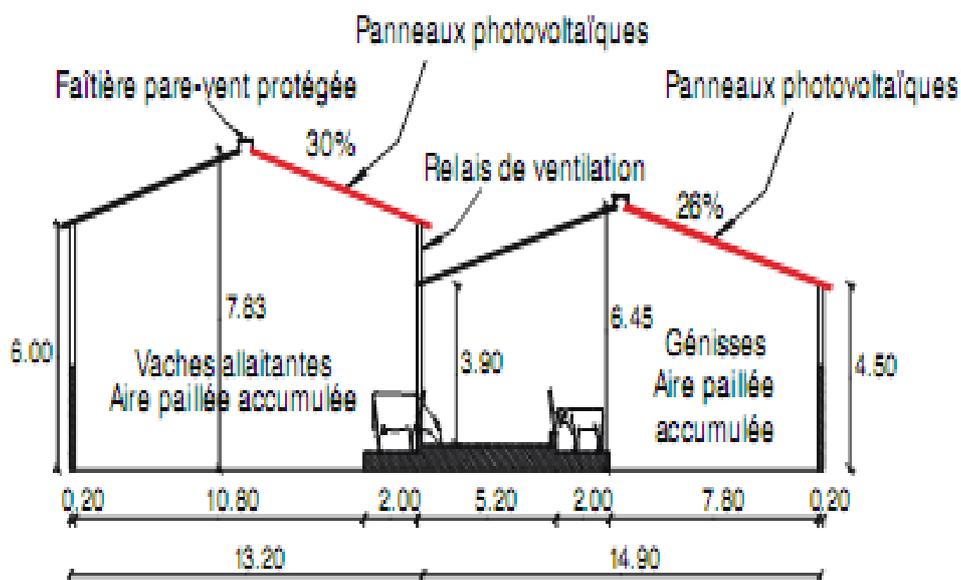


Fig 4-14 : Vaches allaitantes + génisses : aire paillée intégrale [58].

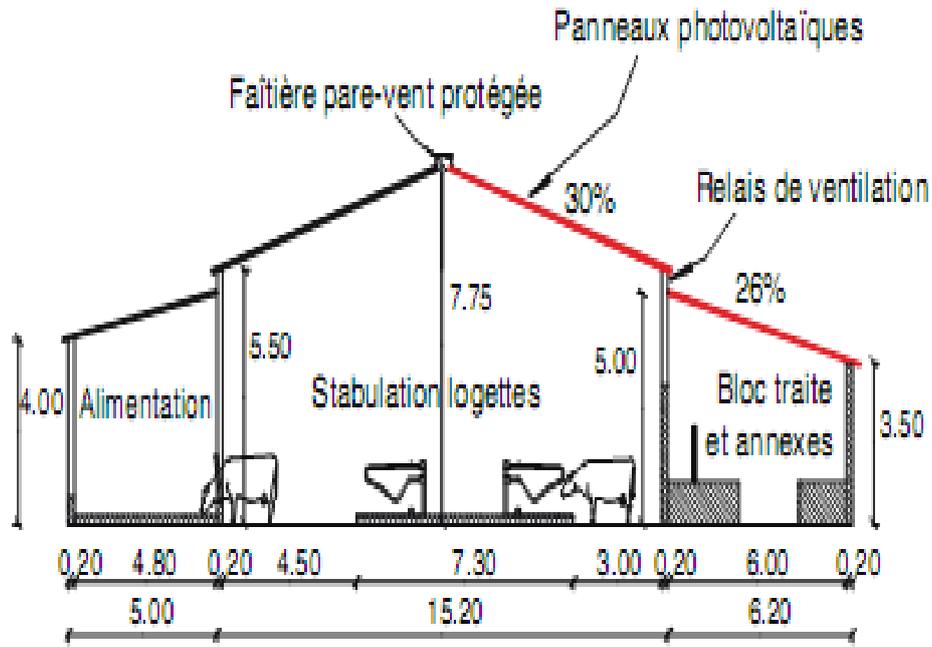


Fig 4-15 : Vaches laitières : stabulation logettes + bloc traite et annexes en long pan [58].

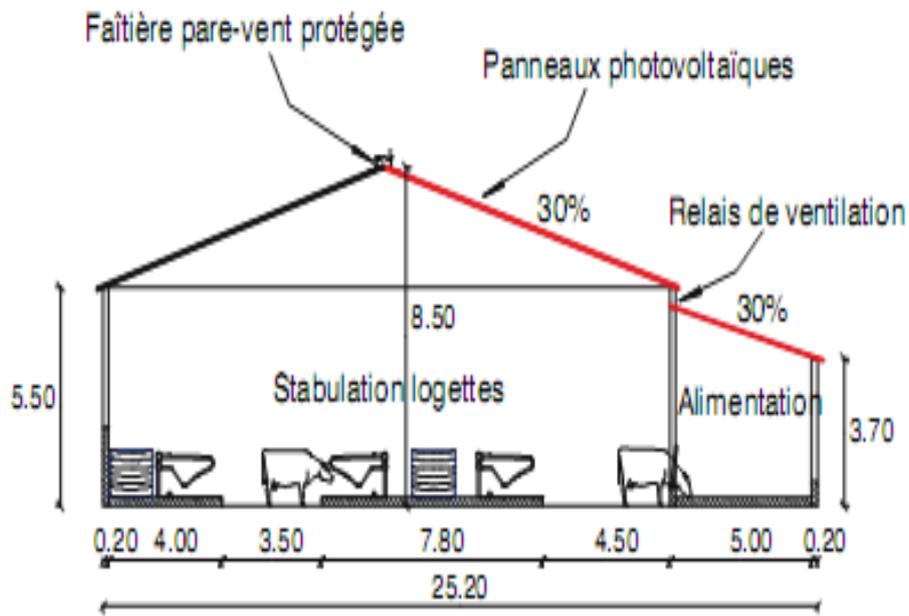


Fig 4-16 : Vaches laitières : stabulation logettes 3 rangs avec couloir de paillage [58].

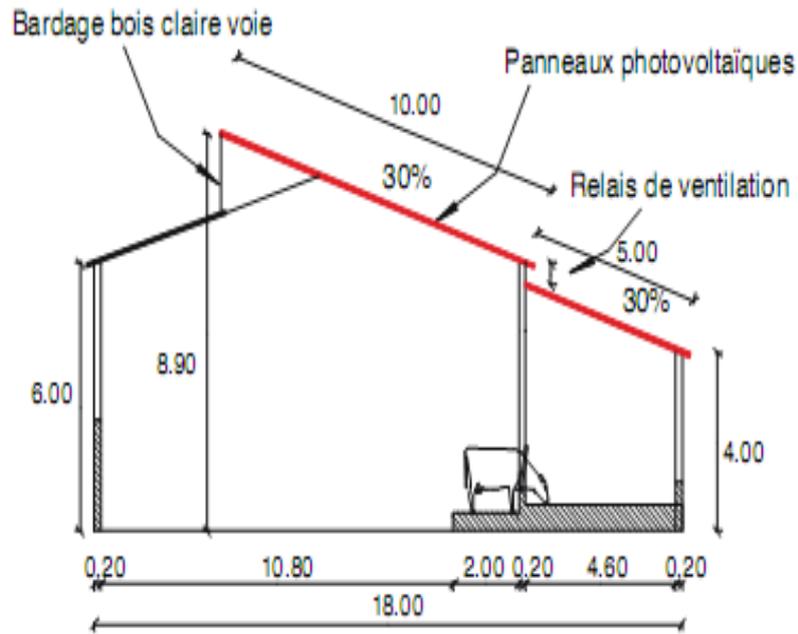


Fig 4-17 : Vaches allaitantes + génisses : aire paillée intégrale [58].

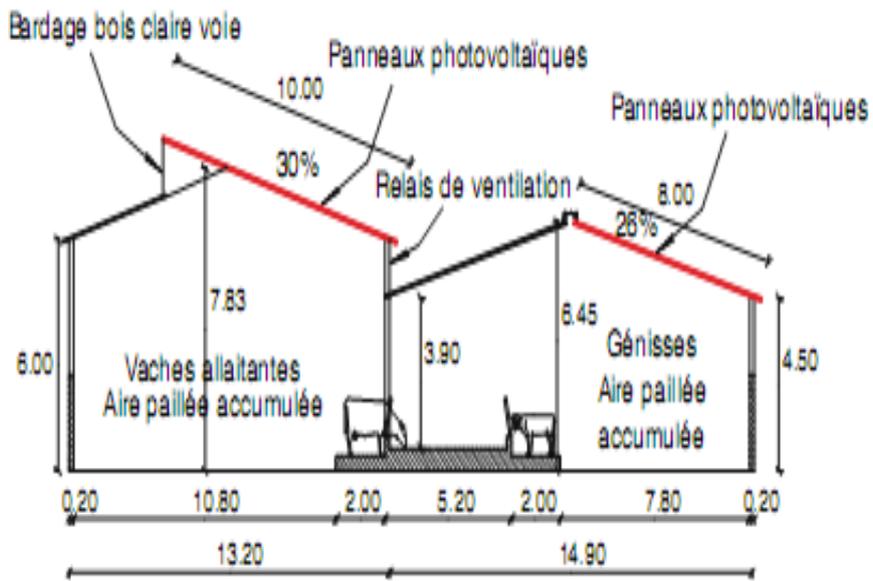


Fig 4-18 : Vaches allaitantes + génisses : aire paillée intégrale [58].

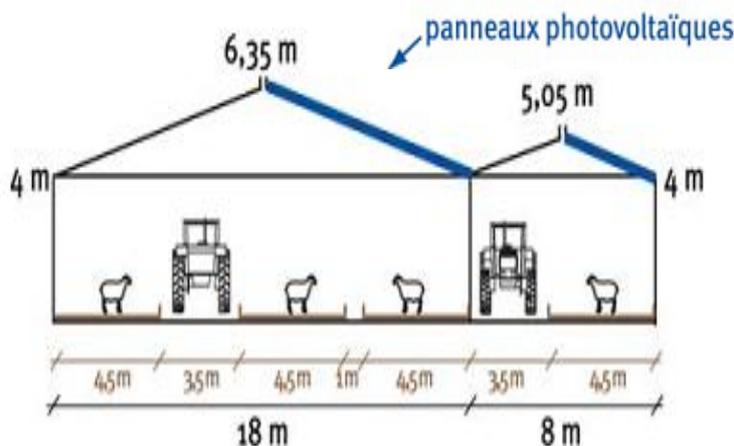


Fig 4-19 : Bergerie avec couloirs larges [61].

De façon plus générale : il faut faire attention à ne pas optimiser l'installation photovoltaïque au détriment de la fonction première du bâtiment qui est agricole.

*Ventiler et éclairer les bâtiments d'élevage neufs équipés en photovoltaïque, brsq'ils ont de longs rampants (exemple).*

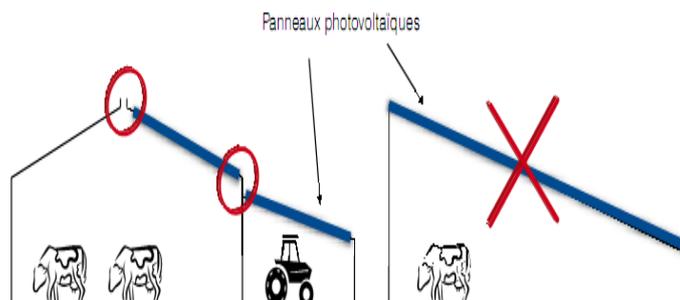


Fig 4-20 : Optimisation de l'installation photovoltaïque sur le bâtiment agricole [59].

#### 4.11 Bases techniques recommandées pour des bâtiments de matériels et de stockage du fourrage équipés d'installations photovoltaïques :

L'utilisation de bâtiments de matériels ou de stockage du fourrage pour la production d'électricité présente moins de contraintes en comparaison au logement d'animaux. Dans ce cas, la productivité peut être optimisée par l'orientation et la forme du bâtiment. Cependant, pour les mêmes raisons que les bâtiments d'élevage (la résistance de la charpente, pente de toiture, renouvellement d'air, orientation, la connectique), ces constructions doivent répondre aux conditions réglementaires d'urbanisme et s'intégrer au mieux dans leur environnement. La taille de l'ouvrage doit être en rapport avec l'activité de l'exploitation [58].

### **4.11.1 Orientation :**

Les bâtiments peuvent être orientés plein sud. Toutefois, cette orientation optimale pour la production d'électricité peut conduire à des surcoûts de terrassement, de voiries ou de réseaux selon le site d'implantation. Ces dépenses supplémentaires peuvent remettre en cause la rentabilité du projet.

### **4.11.2 Formes des bâtiments :**

Pour un bâtiment de stockage de fourrage, la hauteur minimale ne devrait pas être inférieure à 4 m. Cette hauteur permet au matériel d'évoluer sans risque. La hauteur du bâtiment ne doit pas non plus excéder les capacités de levage du matériel. Pour une toiture mono-pente, le point le plus haut devrait se situer à environ 10 m (accès aux bottes de paille par exemple). Il y a aussi la sécurité des éleveurs, des intervenants et des visiteurs, plus il y a de hauteur, plus les bottes sont difficiles à mettre en place, plus elles risquent d'être instables et donc plus il y a de risques de chute provoquant des accidents parfois mortels. Le matériel est aussi plus difficile à manipuler avec des risques de dégradation de la structure du bâtiment, voire des modules. Pour les hangars de stockage des matériels, la hauteur minimale devrait être de 4 m et la hauteur maximale de 10 m. A titre d'exemple, une benne de semi-remorque de 22 m<sup>3</sup> atteint seulement 8 m de haut quand elle est complètement levée.

### **4.11.3 Choix des matériaux de bardage et paysage :**

Le choix des bardages permettra au bâtiment de s'intégrer dans le paysage, pour autant que son insertion ait été réfléchi en amont (emplacement du projet sur la parcelle, accès aux réseaux, voirie...). Le choix du bardage bois reste la meilleure façon d'intégrer la construction. Pour les bardages métalliques, il faut privilégier les couleurs mates et non criardes et éviter les alternances de couleur. Les bardages peuvent être réalisés sur les quatre faces du bâtiment.

## **4.12 Exemples de coupes de bâtiments de stockage compatibles avec la production d'électricité photovoltaïque (les dimensions sont en mètre) :**

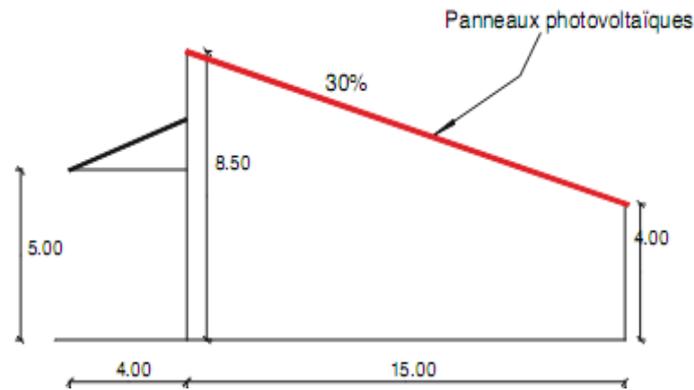


Fig 4-21 : Bâtiment de stockage de matériel [58].

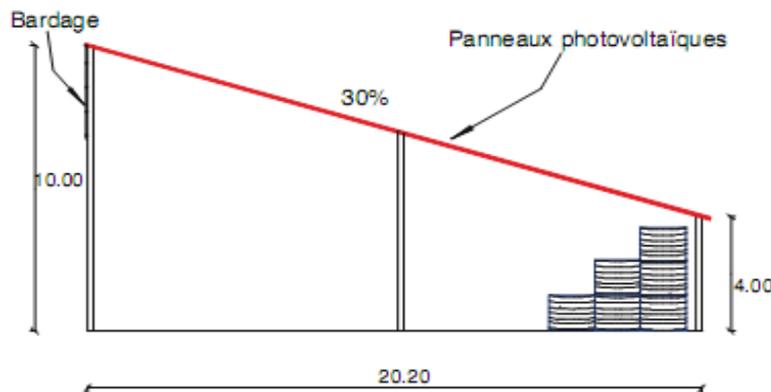


Fig 4-22 : Bâtiment de stockage de fourrage [58].

#### 4.13 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons donné une idée générale sur une ferme agricole, sur ses principales activités qui sont la culture et l'élevage des animaux, et sur les différents bâtiments agricoles, que ce soit des bâtiments d'élevage (Écurie, Étable, Bergerie, Poulailler) ou des bâtiments de matériel et de stockage du fourrage ou d'autres produits agricoles, et nous avons aussi décrit les trois systèmes d'élevage qui se pratiquent dans notre pays. Ensuite, et selon un recensement générale de l'agriculture de l'année 2001 établi par le ministère de l'agriculture et du développement rural, nous avons vu ceux qui font la distinction entre les exploitations agricoles en Algérie, occupation de la superficie agricole utile (SAU), l'irrigation, élevage et les bâtiments d'élevage et annexes, Après nous avons présenté les différentes bases zootechniques recommandées pour les bâtiments d'élevage ou de stockage équipés d'installations photovoltaïques.

CHAPITRE :

5

### 5.1 Introduction :

**Chlef** du nom de la rivière « Chellif » (anciennement **El Asnam** et **Orléans ville** à l'époque française, ou encore **Castelum Tinginitum** à l'époque romaine) est une ville d'Algérie et le chef-lieu de la wilaya du même nom. La ville de Chlef est située à 200 km à l'ouest d'Alger, au cœur de la vallée du Chellif, où elle occupe une place stratégique de par sa situation géographique. La superficie totale de la Wilaya étant de 4791 Km<sup>2</sup> et compte 907 356 habitants (estimation 2000). Elle se caractérise essentiellement par un relief diversifié constitué de deux chaînes, Montagneuses Dahra et Ouarsenis, une plaine du Cheliff au centre et une littorale [67].

### 5.2 Dimensionnement d'une mini-centrale alimentant une ferme agricole à Chlef :

#### 5.2.1 Présentation d'une ferme agricole à Chlef :

La ferme agricole (Figure 5-1) que nous avons étudiée se situe dans la commune de Chattia dans la ville de Chef, cette ferme agricole se compose de :

- Une étable qui abrite quinze (15) vaches et six (06) veaux.
- Deux (02) bâtiments de matériels et de stockage du fourrage.
- Une plantation d'orangers de vingt (20) hectares et un puits.
- Sept (07) chambres froides.
- Quatre (04) foyers rattachés à cette ferme.

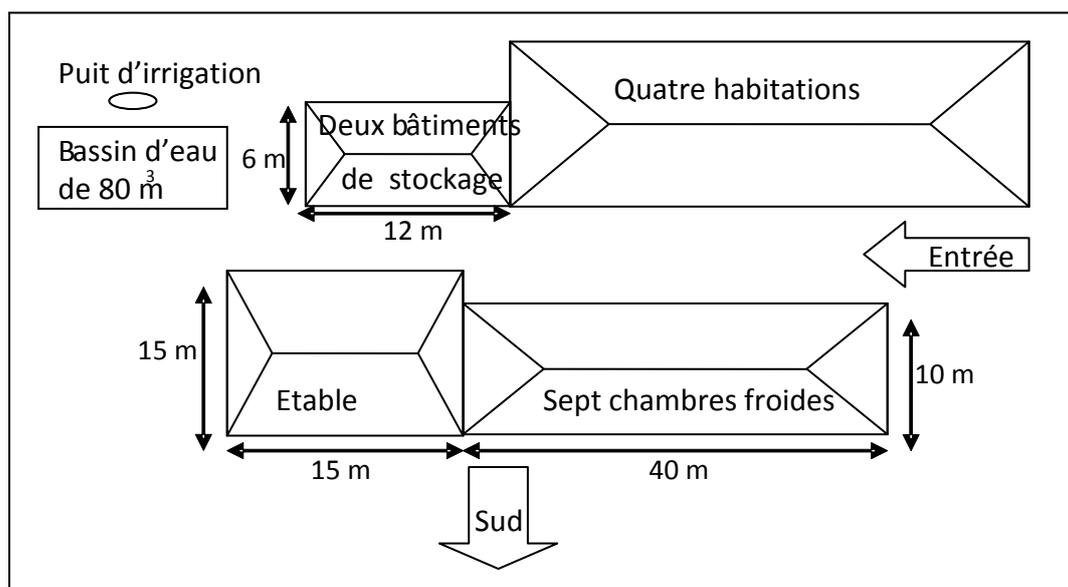


Fig 5-1 : Schéma d'une ferme agricole à Chlef.

Dans le site de « Google Earth », nous avons pris une photo aérienne de cette ferme agricole qui se montre sur la figure 5-2.



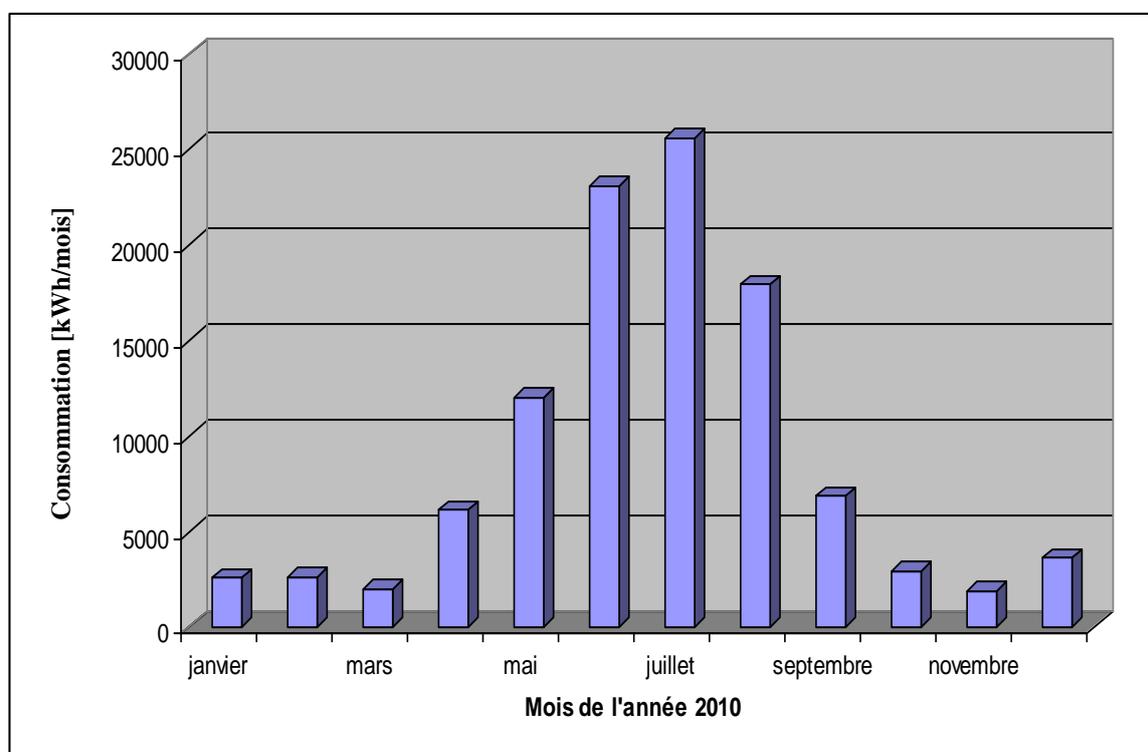
**Fig 5-2 :** Photo de la ferme agricole à Chlef.

### 5.2.2 Consommation électrique de la ferme agricole :

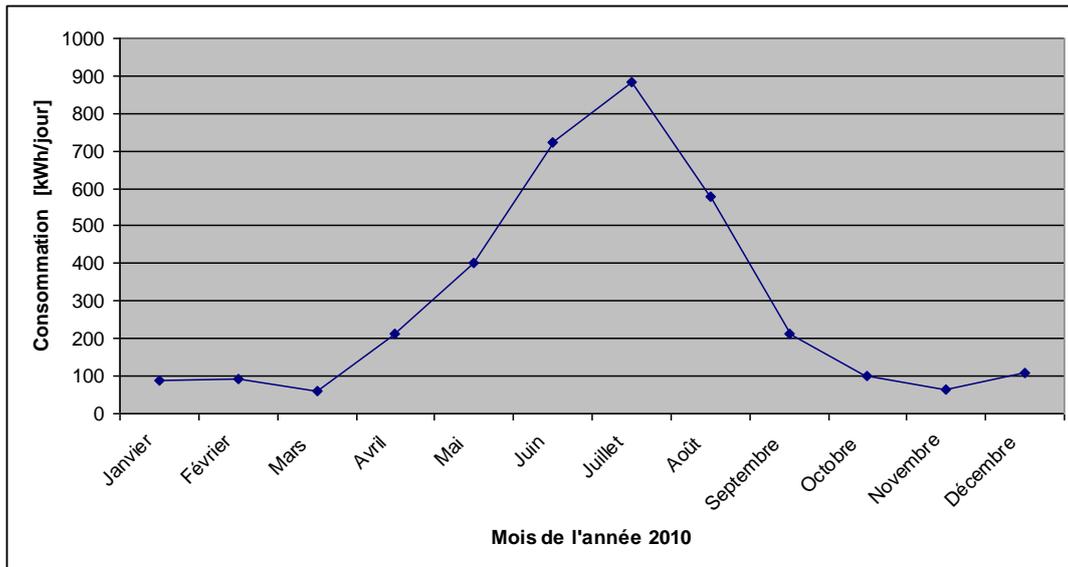
Le tableau 5-1 que nous avons établi en basant sur les 12 factures d'électricité de l'année 2010 donne la consommation électrique de l'année 2010 de cette ferme agricole y compris les quatre habitats, la figure 5-3 présente la consommation totale pour chaque mois et la figure 5-4 présente un courbe qui montre la consommation journalière moyenne pour chaque mois.

**Tableau 5-1 :** Consommation électrique de la ferme agricole durant l'année 2010.

Mois	Consommation dans le jour [kWh/mois]	Consommation dans la nuit [kWh/mois]	Consommation totale [kWh/mois]	Période de consommation en jours	Consommation journalière [kWh/jour]
Janvier	1917	642	2559	29	88
Février	1960	659	2619	28	94
Mars	1503	496	1999	33	61
Avril	4382	1733	6115	29	211
Mai	7985	4069	12054	30	402
Juin	15106	7965	23071	32	721
Juillet	16871	8716	25587	29	882
Août	12074	5842	17916	31	578
Septembre	4392	2447	6839	32	214
Octobre	2263	649	2912	29	100
Novembre	1422	475	1897	30	63
Décembre	2485	1128	3613	33	109
<b>Total</b>	<b>72360</b>	<b>34821</b>	<b>107181</b>	<b>365</b>	



**Fig 5-3 :** Consommation électrique totale de la ferme agricole durant l'année 2010



**Fig 5-4 :** Consommation journalière moyenne (kWh/jour) de la ferme agricole.

D'après la figure 5-3 et selon le mode de vie dans cette ferme agricole et dans ces quatre habitats, nous pouvons partager l'année 2010 en trois périodes de consommation électrique.

### **Première période :**

Cette période est caractérisée par une faible consommation électrique par rapport aux deux autres périodes de l'année 2010, elle s'étale de janvier jusqu'à mars et d'octobre jusqu'à décembre. Dans cette période, nous avons les consommations électriques suivantes :

- La consommation électrique des quatre habitats.
- La consommation électrique de la ferme agricole (la machine frigorifique permettant la réfrigération de la cuve du lait et l'agitateur assurant l'homogénéisation de la température du lait sont à l'arrêt).
- La consommation électrique de la pompe immergée pour le remplissage du bassin d'eau qui sert à l'alimentation en eau du bétail, des quatre habitats et à satisfaire d'autres besoins (Arrosage de jardins, nettoyage le matériel agricole...).
- Les chambres froides sont à l'arrêt.

### **Deuxième période :**

Cette période est caractérisée par une consommation moyenne de l'électricité par rapport aux deux autres périodes de l'année 2010, elle s'étale d'avril jusqu'à mai, et renferme aussi le mois de septembre. Dans cette période, nous avons les consommations électriques suivantes :

- La consommation électrique des quatre habitats.
- La consommation électrique de la ferme agricole (la machine frigorifique permettant la réfrigération de la cuve du lait et l'agitateur assurant l'homogénéisation de la température du lait sont à l'arrêt).
- La consommation électrique de la pompe immergée pour l'irrigation de la plantation d'orangers et le remplissage du bassin d'eau qui sert à l'alimentation en eau du bétail, des quatre habitats et à satisfaire d'autres besoins (Arrosage de jardins, nettoyage le matériel agricole...).
- Les chambres froides sont à l'arrêt.

### **Troisième période :**

Cette période est caractérisée par une grande consommation électrique par rapport aux deux autres périodes de l'année 2010, elle s'étale de juin jusqu'à août. Dans cette période, nous avons les consommations électriques suivantes :

- La consommation électrique des quatre habitats.
- La consommation électrique de la ferme agricole.
- La consommation électrique de la pompe immergée pour l'irrigation de la plantation d'orangers et le remplissage du bassin d'eau qui sert à l'alimentation en eau du bétail, des quatre habitats et à satisfaire d'autres besoins (Arrosage de jardins, nettoyage le matériel agricole...).
- La consommation électrique des chambres froides.

### **5.2.3 Elaboration d'un profil de consommation électrique de cette ferme agricole :**

#### **Nomenclature :**

- **Pour les quatre habitats :**

**E1** : Eclairage des foyers.

**TV** : Télévision.

**DM** : Démo sat.

**R** : Réfrigérateur.

**CLM** : Climatiseur.

**CG** : Congélateur.

**OR** : Ordinateur.

**FR** : Fer à repasser.

**SC** : Sèche à chevaux.

**RM** : Robot mixeur.

**PMP1** : Pompe d'eau pour les besoins domestique.

- **Pour la ferme agricole :**

**E2** : Eclairage du bâtiment d'élevage.

**E3** : Eclairage des deux bâtiments de matériels et de stockage du fourrage.

**PMP2** : Pompe d'eau pour l'abreuvement des vaches.

**MTM** : Machine à traire mobile.

**MRL** : Machine frigorifique permettant la réfrigération de la cuve du lait.

**AGT** : Agitateur assurant l'homogénéisation de la température du lait et une bonne répartition de la matière grasse dans la cuve.

**PMP3** : Pompe de forage immergée.

**E4** : Eclairage des chambres froides.

**GR** : Groupe de refroidissement avec compresseur semi-hermétique.

- **Equipements électriques des quatre habitats :**

**Tableau 5-2** : Equipements électriques des quatre habitats.

<b>Equipements</b>	<b>Nombre</b>
E1	48
TV	8
DM	8
R	4
CLM	8
CG	4
OR	4
FR	4
SC	4
RM	4
PMP1	1

**Eclairage (E1) :** Il y a environ 48 lampes de 75 W.

**TV+Démó :** Chaque habitat possède deux télévisions et deux démos sat, il y a donc 8 télévisions et 8 démos.

**Autres appareils :** Chaque habitat possède un réfrigérateur (R), un congélateur (CG), deux climatiseurs (CLM), un ordinateur (OR), un fer à repasser, une sèche à cheveu et un robot mixeur.

**Pompe d'eau pour les besoins domestiques et pour d'autres besoins (PMP1) :** Les quatre habitats sont alimentés par une pompe d'eau de 0.37 KW équipé d'un servomoteur de 1.5 KW avec un débit de 40 l/mn (2.4 m<sup>3</sup>/h).

- **Equipements électriques de la ferme agricole :**

**Tableau 5-3 :** Equipements électriques de la ferme agricole.

<b>Equipements</b>	<b>Nombre</b>
E2	5
E3	2
PMP2	1
MTM	1
MRL	1
AGT	1
PMP3	1
E4	18
GR	9

**Bâtiment d'élevage :** Il y a 05 lampes de type néon de 36 watts.

**Deux bâtiments de matériels et de stockage du fourrage :** Il y a 02 lampes de 75 watts.

**Pompe d'eau pour l'abreuvement des vaches (PMP2) :** Le volume de l'abreuvoir est environ 3.5 m<sup>3</sup>, le remplissage de l'abreuvoir se fait par une pompe d'eau de 0.37 KW équipé d'un servomoteur de 1.5 KW avec un débit de 40 l/mn (2.4 m<sup>3</sup>/h).

Remarque : Les vaches et leurs veaux boient une quantité supérieure à ce volume et qui peut atteindre jusqu'à 4 m<sup>3</sup> à chaque opération de l'abreuvement.

Les vaches et leurs veaux ont besoins de boire deux fois par jour en hiver et trois fois par jour en été. La durée de fonctionnement de la pompe en hiver pour les besoins d'eau en hiver est 3.34 heures et sa durée de fonctionnement en été est 4.75 heures.

**Machine à traire mobile (MTM) :** Le nombre de traite de quinze (15) vaches par jour est deux fois (matin et soir) à l'aide d'une machine à traire mobile dont la puissance est 0.55 kW, le volume du lait pour ces deux (02) traites par jour est 150 litres. Le temps de traite de quinze (15) vaches varie de 1h30 à 2h00 pour chaque traite.

**Machine frigorifique permettant la réfrigération de la cuve du lait (MRL) :** Cette machine est composée d'une cuve dont le volume est 500 litres, d'un groupe frigorifique et un agitateur (AGT), elle permet de conserver le lait jusqu'à l'arrivée du camion de collecte du lait après chaque deux jours. Elle fonctionne seulement en juin, juillet et août.

**Irrigation :** Cette ferme possède aussi une plantation d'orangers de vingt (20) hectares et un puit dont le diamètre est 60 cm, sa profondeur varie de 40 mètres en hiver à 45 mètres en été, dans ce puit, il y a une pompe immergée de 75 kW avec un débit de 120 m<sup>3</sup>/h qui sert à l'irrigation de cette plantation et au remplissage d'un bassin de 80 m<sup>3</sup> qui sert à l'abreuvement du bétail et aux besoins domestiques et d'autres besoins, entre 10 et 15 minutes de fonctionnement de cette pompe permet de satisfaire les besoins domestiques, l'abreuvement du bétail et d'autres besoins.

La période d'irrigation s'étale de mi-avril jusqu'à la fin de septembre. Pour savoir la consommation électrique de cette pompe immergée par mois, nous avons fait la différence entre deux consommations totales de deux mois (voir le tableau 5-1) :

- La consommation totale du mois de mai qui est 12054 kWh où la pompe immergée a fonctionné dans tout les jours de ce mois (Dans ce mois nous avons la consommation des quatre habitats, la consommation de la ferme agricole et la consommation de la pompe immergée pour l'irrigation et le remplissage du bassin d'eau).
- La consommation totale du mois de mars qui est 1999 kWh qui représente la plus faible consommation électrique de l'année 2010 et pour donner à la pompe immergée sa consommation maximale (Dans ce mois nous avons la consommation des quatre habitats, la consommation de la ferme agricole et la consommation de la pompe immergée pour le remplissage du bassin d'eau).
- Pour savoir la consommation électrique de cette pompe immergée par jour durant le moi de mai, nous avons divisé cette différence de consommation électrique par 30 jours (selon la période indiquée par la facture). Nous avons trouvé 335 kWh/jour.

**Chambres froides :** Il y a dans cette ferme sept (07) chambres équipées de neuf (09) groupes de refroidissement avec compresseurs semi-hermétiques pour le refroidissement de ces chambres, nous trouvons aussi 18 lampes de type néon de 36 watts. Ces chambres froides sont destinées pour stocker et refroidir la pompe de terre durant la période d'été, juin, juillet et août.

Pour savoir la consommation électrique de ces chambres froides par mois, nous avons fait la différence entre deux consommations totales de deux mois (voir le tableau 5-1) :

- La consommation totale du mois de mai qui est 12054 kWh (Dans ce mois nous avons la consommation des quatre habitats, la consommation de la ferme agricole (Machine frigorifique permettant la réfrigération de la cuve du lait et l'agitateur assurant l'homogénéisation de la température sont à l'arrêt) et la consommation de la pompe immergée pour l'irrigation de la plantation d'orangers et le remplissage du bassin d'eau).
- La consommation totale du mois de juillet qui est 25587 kWh (Dans ce mois nous avons la consommation des quatre habitats, la consommation de la ferme agricole, la consommation de la pompe immergée pour l'irrigation et le remplissage du bassin d'eau et la consommation des chambres froides (toutes les chambres froides sont en marche dans ce mois)).
- Ensuite nous avons déduit de cette différence la consommation mensuelle de la machine frigorifique permettant la réfrigération de la cuve du lait et de l'agitateur assurant l'homogénéisation de la température du lait ( $29 \times (24 \times (0.1 + 0.04))$ ), et pour savoir donc la consommation électrique de ces chambres froides par jour, nous avons divisé cette différence de consommation électrique par 29 jours (selon la période indiquée par la facture). Nous avons trouvé 463 kWh/jour.

Nous allons maintenant établir un profil (Tableau 5-4) qui donne les consommations électriques journalières en hiver et en été qui correspondent aux consommations journalières du mois de mars (61 kWh/jour) et du mois d'août (882 kWh/jour) d'après le tableau 5-1.

D'après le tableau 5-4, nous constatons que :

- La consommation des quatre habitats est 34 kWh/jour en hiver et 69 kWh/jour en été, nous trouvons que la consommation en été est égale environ à deux fois la consommation en hiver.

## Chapitre 5 Dimensionnement et simulation d'une mini-centrale hybride PV-Réseau

- La consommation de la ferme agricole est 27 kWh/jour en hiver et 813 kWh/jour en été, nous trouvons que la consommation en été est égale environ à trente fois la consommation en hiver.
- Nous remarquons que les fermes agricoles consomment beaucoup d'électricité en été qu'en hiver.

**Tableau 5-4 :** Profil de consommation électrique de la ferme agricole et des quatre habitats.

Equipements électriques		Nombre d'équipements	Puissance [kW]	Durée d'utilisation en hiver [h]	Durée d'utilisation en été [h]	Consommation en hiver [kWh/jour]	Consommation en été [kWh/jour]
Quatre habitats	E1	16	0.075	6.00	4.00	7.20	4.80
	TV	6	0.075	4.00	5.00	1.80	2.25
	DM	6	0.04	4.00	5.00	0.96	1.20
	R	4	0.063	24.00	24.00	6.05	6.05
	CLM	8	1.20	0.00	3.00	0.00	28.80
	CG	4	0.07	0.00	24.00	0.00	6.72
	OR	4	0.041	4.00	3.00	0.66	0.49
	FR	4	1.20	0.50	0.50	2.40	2.40
	SC	4	1.40	0.50	0.50	2.80	2.80
	RM	4	0.20	0.17	0.17	0.14	0.14
	PMP1	1	1.87	6.50	7.00	12.16	13.09
Ferme agricole	E2	5	0.036	6.00	4.00	1.08	0.72
	E3	2	0.075	4.00	2.00	0.60	0.30
	PMP2	1	1.87	3.34	4.75	6.25	8.88
	MTM	1	0.55	4.00	4.00	2.20	2.20
	MRL	1	0.04	0.00	24.00	0.00	0.96
	AGT	1	0.10	0.00	24.00	0.00	2.40
	PMP3	1	75.00	0.22	4.47	16.50	335.00
	E4	4	0.036	0.00	2.00	0.00	0.29
	GR	9	2.14	0.00	24.00	0.00	463.00
<b>Total</b>		<b>86</b>	<b>83.794</b>	<b>65.84</b>	<b>163.75</b>	<b>61</b>	<b>882</b>

### 5.2.4 Elaboration d'un profil de consommation électrique économique :

Pour établir une mini-centrale PV-Réseau efficace et fiable avec le moindre coût d'investissement dans cette ferme agricole, il est nécessaire de recourir à l'utilisation des équipements électriques qui consomment moins d'électricité par rapport à ceux utilisés dans les quatre habitats et dans la ferme agricole. Parmi ces équipements que nous allons substituer sont :

**Eclairage :** Les lampes des quatre habitats, du bâtiment d'élevage, des deux bâtiments de matériels et de stockage du fourrage et des chambres froides.

**Irrigation :** La pompe immergée que le fermier utilise pour l'irrigation a une puissance de 75 kW et un débit de 120 m<sup>3</sup>/h, elle fonctionne 4.47 heures par jour de mi-avril jusqu'à la fin de septembre (168 jours). Le volume d'eau pompé par cette pompe durant cette période d'irrigation est 90 115 m<sup>3</sup>.

Nous allons utiliser dans notre dimensionnement une pompe immergée électrique pour puits d'eau (figure 5-5) dont le débit maximum est 90 m<sup>3</sup>/h, sa puissance est 37 kW et la hauteur manométrique HMT est 231 m.

Pour que le fermier continue à irriguer sa plantation d'orangers avec le même volume d'eau de mi-avril jusqu'à mi-septembre en utilisant cette pompe, il devrait dans ce cas faire 6 heures d'irrigation par jour et cette durée est acceptable, parce que la durée d'insolation moyenne de la ville de Chlef entre avril et septembre est toujours supérieure à 8 heures (Tableau 1-2), et pour qu'il couvre ses besoins en eau en hiver avec le même volume d'eau qui est environ 26 m<sup>3</sup>, il devrait faire fonctionner la pompe environ 17 minutes.

Nous allons maintenir l'utilisation des deux pompes d'eau pour pouvoir couvrir les besoins domestiques, les besoins de l'élevage et les autres besoins dans le jour.



**Fig 5-5 :** Pompe immergée électrique semi-axiale pour puits d'eau [68, 69].

**Tableau 5-5 :** Profil de consommation électrique économique de la ferme agricole et des quatre habitats.

Equipements électriques		Nombre d'équipements	Puissance [kW]	Durée d'utilisation en hiver [h]	Durée d'utilisation en été [h]	Consommation en hiver [kWh/jour]	Consommation en été [kWh/jour]
Quatre habitats	E1	16	0,015	6,00	4,00	1,44	0,96
	TV	6	0,075	4,00	5,00	1,80	2,25
	DM	6	0,04	4,00	5,00	0,96	1,20
	R	4	0,063	24,00	24,00	6,05	6,05
	CLM	8	1,20	0,00	3,00	0,00	28,80
	CG	4	0,07	0,00	24,00	0,00	6,72
	OR	4	0,041	4,00	3,00	0,66	0,49
	FR	4	1,20	0.50	0.50	2,40	2,40
	SC	4	1,40	0.50	0.50	2,80	2,80
	RM	4	0,20	0.17	0.17	0,14	0,14
	PMP1	1	1,87	6,50	7,00	12,16	13,09
Ferme agricole	E2	5	0.03	6,00	4,00	0,90	0,60
	E3	2	0.015	4,00	2,00	0,12	0,06
	PMP2	1	1,87	3,34	4,75	6,25	8,88
	MTM	1	0,55	4,00	4,00	2,20	2,20
	MRL	1	0,04	0,00	24,00	0,00	0,96
	AGT	1	0,10	0,00	24,00	0,00	2,40
	PMP3	1	37,00	0.28	6,00	10,36	222,00
	E4	4	0.03	0,00	2,00	0,00	0,24
	GR	9	2.14	0,00	24,00	0,00	463,00
<b>Total</b>		<b>86</b>	<b>45.734</b>	<b>65.84</b>	<b>169.75</b>	<b>48</b>	<b>765</b>

D'après le tableau 5-5 nous constatons que :

- La consommation des quatre habitats est 28 kWh/jour en hiver et 65 kWh/jour en été, nous constatons que la consommation en été est égale environ deux fois la consommation en hiver.
- La consommation de la ferme agricole est 20 kWh/jour en hiver et 700 kWh/jour en été, nous constatons que la consommation en été est égale environ trente cinq fois la consommation en hiver.

- Nous trouvons que les fermes agricoles consomment beaucoup d'électricité en été qu'en hiver.
- Lorsque nous comparons les tableaux 5-4 et 5-5, nous trouvons que la consommation électrique a baissé avec 13 kWh/jour en hiver et 117 kWh/jour en été.

Pour avoir une simulation plus précise que possible qui va donner un dimensionnement d'une installation plus proche de la réalité, nous allons faire trois tableaux qui donnent la consommation de l'électricité par heure selon trois périodes de l'année de cette ferme agricole et de ces quatre habitats.

Dans les tableaux 5-6, 5-7 et 5-8, nous allons établir une consommation d'électricité journalière économique en basant sur l'optimisation du temps d'utilisation des différents équipements et machines électriques et le moment d'utilisation (surtout en plein jour où la présence du soleil est forte et surtout en été où ce moment coïncide avec une grande consommation de l'électricité) mais en conservant toujours les habitudes de travail du fermier.

Dans la première période la consommation journalière sera 48 kWh/jour.

Dans la deuxième période la consommation journalière sera 260 kWh/jour.

Dans la troisième période la consommation journalière sera 764.45 kWh/jour.

**Tableau 5-6 :** Distribution de la consommation électrique par heure dans la première période.

<b>Heure</b>	<b>Charges actives de 4 foyers et d'une ferme agricole</b>	<b>Mois de consommation [kWh/jour] : Jan-Fev-Mar-Oct - Nov-Dec</b>
1	4R	0.252
2	4R	0.252
3	4R	0.252
4	4R	0.252
5	4R	0.252
6	4R+16E1+5E2+MTM+2E3	1.222
7	4R+16E1+4SC(0.5h)+5E2+MTM+2E3	3.622
8	4R	0.252
9	4R+PMP1+PMP2	3.992
10	4R+PMP1+PMP2 (0,67h)	3.375
11	4R+4RM (0.17h)+PMP1	2.262
12	4R+PMP1 (0,5h)	1.187
13	4R+PMP3 (0,28h)	10.612
14	4R+4FR (0.5h)	3.052
15	4R+PMP1	2.122
16	4R+PMP1+PMP2	3.992
17	4R+16E1+6TV+6DM+4OR+PMP1+5E2+2E3+PMP2 (0,67h)	4.469
18	4R+16E1+6TV+6DM+4OR+5E2+2E3+MTM	2.076
19	4R+16E1+6TV+6DM+4OR+5E2+MTM	2.046
20	4R+16E1+6TV+6DM+4OR+5E2	1.496
21	4R	0.252
22	4R	0.252
23	4R	0.252
24	4R	0.252
<b>Energie totale</b>		<b>48</b>

**Tableau 5-7 :** Distribution de la consommation électrique par heure dans la deuxième période.

Heure	Charges actives de 4 foyers et d'une ferme agricole	Mois de consommation [kWh/jour] : Avr-Mai-Sept
1	4R	0.252
2	4R	0.252
3	4R	0.252
4	4R	0.252
5	4R	0.252
6	4R+16E1+5E2+MTM+2E3	1.222
7	4R+16E1+4SC (0.5h)+5E2+MTM+2E3	3.772
8	4R	0.252
9	4R+PMP1+PMP2	3.992
10	4R+PMP1+PMP2 (0,67h)	3.375
11	4R+4RM (0.17h)+PMP1+PMP3	39.262
12	4R+PMP1 (0,5h)+PMP3	38.187
13	4R+PMP3	37.252
14	4R+4FR (0.5h)+PMP3	40.052
15	4R+PMP1+PMP3	39.122
16	4R+PMP1+PMP2+PMP3	40.992
17	4R+PMP1+5E2+2E3+PMP2 (0,67h)	3.555
18	4R+16E1+6TV+6DM+4OR+5E2+2E3+MTM	2.076
19	4R+16E1+6TV+6DM+4OR+5E2+MTM	2.046
20	4R+16E1+6TV+6DM+4OR+5E2	1.496
21	4R+16E1+6TV+6DM+4OR	1.346
22	4R	0.252
23	4R	0.252
24	4R	0.252
<b>Energie totale</b>		<b>260</b>

**Tableau 5-8 :** Distribution de la consommation électrique par heure dans la troisième période.

Heure	Charges actives de 4 foyers et d'une ferme agricole	Mois de consommation [kWh/jour] : Juin-Juillet-Août
1	4R+4CG+MRL+AGT+9GR	19.932
2	4R+4CG+MRL+AGT+9GR	19.932
3	4R+4CG+MRL+AGT+9GR	19.932
4	4R+4CG+MRL+AGT+9GR	19.932
5	4R+4CG+MRL+AGT+9GR+5E2+2E3+MTM	20.662
6	4R+4CG+MRL+AGT+9GR+16E1+MTM	20.722
7	4R+4CG+MRL+AGT+9GR+4SC (0.5h)+PMP2	24.202
8	4R+4CG+MRL+AGT+9GR+PMP1+PMP2 (0,58h)	22.887
9	4R+4CG+MRL+AGT+9GR+PMP1+E4	21.832
10	4R+4CG+MRL+AGT+9GR+PMP1+E4	21.832
11	4R+4CG+MRL+AGT+9GR+PMP1+4RM (0.17h)+PMP3	58.942
12	4R+4CG+MRL+AGT+9GR+PMP2+PMP3	58.802
13	4R+4CG+MRL+AGT+9GR+8CLM+PMP2(0,58h)+PMP3	67.617
14	4R+4CG+MRL+AGT+9GR+4FR (0.5h)+8CLM+PMP3	69.332
15	4R+4CG+MRL+AGT+9GR+8CLM+PMP1+PMP3	68.402
16	4R+4CG+MRL+AGT+9GR+PMP1+PMP3	58.802
17	4R+4CG+MRL+AGT+9GR+PMP1+MTM	22.352
18	4R+4CG+MRL+AGT+9GR+6TV+6DM+4OR+5E2+2E3+MTM	21.516
19	4R+4CG+MRL+AGT+9GR+16E1+6TV+6DM+4OR+5E2+PMP2	23.046
20	4R+4CG+MRL+AGT+9GR+16E1+6TV+6DM+4OR+5E2+PMP2 (0,58h)	22.261
21	4R+4CG+MRL+AGT+9GR+16E1+6TV+6DM+4OR	21.026
22	4R+4CG+MRL+AGT+9GR+6TV+6DM	20.622
23	4R+4CG+MRL+AGT+9GR	19.932
24	4R+4CG+MRL+AGT+9GR	19.932
<b>Energie totale</b>		<b>764. 45</b>

### 5.2.5 Analyse de la consommation électrique :

La consommation journalière moyenne par an se calcule en divisant la consommation totale de toute l'année 2010 par 365 jours.

Selon les factures d'électricité, la consommation totale de toute l'année 2010 égale 107 181 kWh/an et la consommation journalière pour cette année égale à 294 kWh/jour.

## Chapitre 5 Dimensionnement et simulation d'une mini-centrale hybride PV-Réseau

Selon notre dimensionnement, la consommation totale de toute l'année 2010 égale 102 725 kWh/an et la consommation journalière pour cette année égale à 281 kWh/jour.

Le logiciel HOMER va utiliser cette dernière consommation journalière « 281 kWh/j » dans la simulation de notre mini-centrale.

**Tableau 5-9** : Analyse de la consommation électrique.

Mois de l'année	Profil de consommation de la ferme agricole et les quatre habitats selon les factures d'électricité		Période de consommation en jours	Profil de consommation de la ferme agricole et les quatre habitats selon notre dimensionnement	
	Consommation journalière [kWh/jour]	Consommation totale [kWh/mois]		Consommation journalière [kWh/jour]	Consommation totale [kWh/mois]
Janvier	88,2	2559	29	48	1392
Février	93,5	2619	28	48	1344
Mars	60,6	1999	33	48	1584
Avril	210,9	6115	29	260	7540
Mai	401,8	12054	30	260	7800
Juin	721,0	23071	32	764.45	24462
Juillet	882,4	25587	29	764.45	22169
Août	577,9	17916	31	764.45	23698
Septembre	213,7	6839	32	260	8320
Octobre	100,4	2912	29	48	1392
Novembre	63,2	1897	30	48	1440
Décembre	109,5	3613	33	48	1584
<b>Total</b>		<b>107181</b>	<b>365</b>		<b>102725</b>

D'après le tableau 5-9, nous constatons qu'il n'y a pas de grande différence entre la consommation annuelle totale de l'année 2010 de notre dimensionnement et celle donnée par les factures d'électricité de cette année, mais en réalité, notre dimensionnement est basé sur :

- Le mois de la troisième période où la consommation était maximale 25587 kWh/mois, toutes les chambres froides étaient en marche dans ce mois, et nous avons réduit cette valeur jusqu'à 22169 kWh/mois, et cela veut dire que les autres mois de la troisième

période auront cette consommation journalière de ce mois, mais en réalité, cette consommation électrique selon notre dimensionnement sera inférieure dans ces mois de cette troisième période.

- Le mois de la deuxième période où la consommation était maximale 12054 kWh/mois, l'irrigation de la plantation d'oranger se faisait tous les jours dans ce mois, et nous avons réduit cette valeur jusqu'à 7800 kWh/mois, et cela veut dire que les autres mois de la deuxième période auront cette consommation journalière de ce mois, mais en réalité, cette consommation électrique selon notre dimensionnement sera inférieure dans le mois d'avril et le mois de septembre.
- Le mois de la première période où la consommation était minimale 1999 kWh/mois.
- Et si nous voulons avoir une consommation réelle selon notre dimensionnement, nous devrions établir pour chaque mois un profil de consommation mais cela sera au détriment de la variation des besoins du fermier dans les mois où la consommation n'était pas maximale, donc nous avons dimensionné la consommation selon le mois de la deuxième période et le mois de la troisième où le fermier utilise tous ses équipements qu'il a besoins dans chaque période.

### **5.3 Techniques de modélisation et logiciels pour l'analyse des systèmes multi-sources d'énergies :**

#### **5.3.1 Techniques de modélisation :**

Il existe essentiellement deux types de techniques de modélisation des systèmes multi-sources d'énergies : les modèles de séries chronologiques et les modèles statistiques [38].

- **Modèles de séries chronologiques :**

Dans les modèles de séries chronologiques, l'analyse est divisée en pas de temps discret et la performance du système est simulée à chaque pas de temps. Normalement, le comportement dynamique du système n'est pas modélisé mais considéré comme une succession d'états d'équilibre sur chaque pas de temps de calcul. La plupart des modèles utilisent un pas de temps d'une heure car il équilibre à la fois l'exactitude et la non disponibilité de données des ressources et des charges à un pas de temps meilleur. Le cœur d'un modèle de séries chronologiques est le bilan énergétique sur le flux d'énergie

entrant et sortant de toutes les composantes du système. Une ou plusieurs stratégies d'exploitation doit être mise en place afin de savoir comment procéder pour passer d'un pas de temps au suivant et prendre des décisions (par la surproduction, la perte de charge, etc.). Les modèles de séries chronologiques exigent parfois des algorithmes pour créer des valeurs horaires de charges et des ressources (rayonnement solaire, vitesse du vent), souvent plus facilement disponibles sous forme de valeurs moyennes. De même, des algorithmes pour représenter la production horaire sont utilisés pour permettre une interprétation plus compréhensible des résultats.

- **Modèles statistiques :**

Dans les modèles statistiques la performance du système est évaluée pour chaque mois d'une année, et afin de prendre en compte l'effet des variations à court terme (plus court que le mois par exemple) une certaine forme de manipulation statistique est utilisée. Les données nécessaires sont limitées aux valeurs mensuelles ou annuelles moyennes de charge, aux données sur les ressources, et certains paramètres de performance des composantes. D'autres paramètres tels que la mesure dans laquelle une charge est liée à une source peut être fournie si elle n'est pas calculée par le modèle lui-même. Enfin, les modèles statistiques sont plus simples et plus rapides que les modèles de séries chronologiques au détriment de la précision et de la flexibilité. Il n'est, en fait, pas si facile à mettre en oeuvre les configurations de systèmes complexes (plusieurs sources d'énergie renouvelables, de multiples générateurs, les stratégies de contrôle sophistiquées, etc) dans ces modèles.

### **5.3.2 Logiciels pour l'analyse des systèmes multi-sources d'énergies :**

La plupart des logiciels utilisés pour modéliser et optimiser un système multi-source d'énergies sont basés sur des modèles de séries chronologiques et d'autres sur des modèles statistiques [38].

- **EnergyPlus :**

EnergyPlus c'est un programme de simulation énergétique et thermique des bâtiments qui a ses racines dans les deux logiciels de simulation US DOE-2 et BLAST, produits

respectivement par le Ministère américain de l'énergie et le Ministère américain de la défense. Plus de vingt ans de mises à jour de ces deux programmes ont en fait conduit à des centaines de sous algorithmes difficiles à gérer dans la mise en oeuvre de nouveaux algorithmes. Il a donc été décidé, en 1996, de construire de toutes pièces un programme de simulation modulaire par la réécriture complète du code en langage Fortran 90, tout en gardant quelques-unes des routines les plus avancés de DOE-2 et de BLAST.

L'équipe qui a fait le programme comprend, outre le DOE et le CERL (US Army Construction Engineering Research Laboratories), l'Université de l'Illinois, le Lawrence Berkeley National Laboratory, l'Oklahoma State University, et le Gard Analytics. Le résultat est un programme qui combine les plus détaillés algorithmes de DOE-2 et BLAST, mais qui est un nouveau logiciel fondé sur l'intégration de la simulation du bâtiment et des systèmes. C'est la différence avec les programmes précédents où l'information sur les charges thermiques était envoyée, en cascade, aux autres composants (bâtiment → système de distribution des énergies → systèmes).

Le programme permet de simuler la plupart des systèmes communs. La première version du logiciel a été publiée en 2001. Des versions de mise à jour sont publiées deux fois par an et ajoutent constamment de nouvelles fonctionnalités et des modules, par exemple les systèmes photovoltaïques, la cogénération, les piles à combustible et la production électrique distribuée, les pompes à chaleur géothermiques, les échangeurs de chaleur avec le sol pour les équipements à condensation.

En règle générale, le nombre et la précision des données d'entrée nécessaires pour tous ces modèles sont tellement élevés que ce type de logiciel n'est pas conçu pour être mis à la disposition de l'architecte ou de l'ingénieur.

- **HOMER :**

HOMER est un modèle de séries chronologiques et effectue un bilan énergétique horaire le long d'une année pour chaque configuration de système rentrée par l'utilisateur. Il affiche ensuite la liste des configurations de systèmes triés par le coût actuel net (qui combine le coût en capital - annualisé par l'amortissement du composant au cours de sa durée de vie en utilisant les taux d'actualisation réelle – et celui de remplacement, fonctionnement et entretien). Des analyses de sensibilité peuvent également être effectuées pour certaines variables (par exemple des coûts de carburant, la vitesse moyenne annuelle du vent).

- **RETScreen International :**

RETScreen International est une collection de feuilles de calcul pour évaluer les technologies des énergies renouvelables (RET) des projets élaborés par le ministère des Ressources naturelles du Canada. De nombreuses applications sont disponibles en modèles de feuilles de calcul unique - L'énergie éolienne, petite hydraulique, photovoltaïque, la production combinée de chaleur et d'énergie, de chauffage à la biomasse, de chauffage solaire, chauffe-eau solaire, chauffage solaire passif, les pompes à chaleur géothermiques - jusqu'à ce qu'une seule version du logiciel ait été publiée et qui comprend des mises à jour de tous les modèles précédents. Chaque module est constitué de 5 feuilles de calcul, le modèle énergétique, l'analyse des coûts, l'analyse des émissions de gaz à effet de serre, le bilan financier, la sensibilité et l'analyse des risques. RETScreen est un modèle statistique pour la conception du système de production d'énergie renouvelable, la principale caractéristique qui distingue RETScreen d'autres outils est l'accent mis sur l'exactitude des analyses. Ce logiciel a également acquis une plus large acceptation dans la communauté scientifique.

- **DER-CAM :**

DER-CAM (Distributed Energy Resources-Customer Adoption Model) est un outil de sélection et d'optimisation pour les ressources énergétiques mis au point par le Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL). Les données d'entrée sont les profils des charges, l'information sur les tarifs et les prix du carburant, les informations sur les technologies DER (CHP, capteurs solaires) et il fournit à la fois le meilleur choix technologique et le profil de fonctionnement optimal pour la fourniture d'électricité et de chaleur ainsi que d'autres résultats tels que les coûts de l'énergie et les émissions. L'optimisation est effectuée en réduisant le coût énergétique annuel pour un client donné. Cet outil a été utilisé par Zhou et al afin de sélectionner les meilleures technologies sur beaucoup de bâtiments différents (hôtel, hôpital, école, commerce, restaurant).

- **HYBRIDS :**

HYBRIDS est une feuille de calcul d'évaluation de l'application des sources d'énergie renouvelables développé par Solaris Homes (Queensland, Australie). Il exige la

connaissance de la moyenne quotidienne de charges (moyenne quotidienne de consommation d'énergie en kWh) et des données sur les ressources estimées pour chaque mois. Contrairement à d'autres outils, HYBRIDS ne peut simuler qu'une configuration du système à la fois, et par conséquent, l'optimisation doit être effectuée hors-ligne en simulant un ensemble de configurations et en les triant en fonction d'un critère d'optimisation. Il exige la spécification par l'utilisateur de nombreux facteurs d'efficacité et les propriétés des convertisseurs d'énergie qui ne sont pas pris en compte, ou sont assumés lors d'équations sous-jacentes dans d'autres outils. Il implique un niveau élevé de connaissances sur les systèmes d'énergies renouvelables et des configurations, et comme c'est une feuille de calcul, toutes les formulations sont visibles par l'utilisateur. Dans une analyse de faisabilité d'un système isolé d'énergie renouvelable pour un grand hôtel l'outil a donné des résultats semblables à ceux d'HOMER.

- **Hybrid2 :**

Hybrid2, développé par le Renewable Energy Research Laboratory de l'Université du Massachusetts est un logiciel permettant d'effectuer des analyses à long terme de l'économie des systèmes énergétiques hybrides qui comprennent trois types de charges électriques, des éoliennes, du PV, des générateurs diesel, des batteries de stockage et d'autres dispositifs. Il est basé sur des séries chronologiques des ressources, mais ne tient pas compte de la courte durée des fluctuations causées par la dynamique des systèmes entre les composants. L'outil a une interface utilisateur graphique et une bibliothèque d'équipements disponibles dans le commerce avec les spécifications des constructeurs.

- **FACES :**

FACES (Forecasts of Air Conditioning system's Energy environmental and economical performance by Simulation) est un outil pour la sélection des sources d'énergie les plus appropriées au début de la conception des bâtiments. Il est basé sur la simulation énergétique, environnementale et économique d'un système de climatisation. L'écart entre l'insuffisance des données disponibles au début de la phase de conception et les nombreuses données d'entrée nécessaires à la réalisation de programmes de simulation à grande échelle est couvert par la conception d'algorithmes et de données définis par défaut qui sont intégrés dans l'outil. Le logiciel nécessite d'un minimum de données d'entrée très faible (par

exemple, la localisation, la surface, le nombre d'étages, le type de système) et fourni les charges de refroidissement, chauffage et électricité, les configurations du système, l'énergie consommée, les évaluations environnementales et économiques des alternatives. Certains sous-modules sont appelés de façon séquentielle, par exemple celui qui calcule les charges thermiques et électriques. L'outil de simulation, développé par Nikken Sekkei Ltd, l'Université de Chubu et de Tokyo, les entreprises Chubu et Kansai Electric Power en coopération avec de nombreuses autres compagnies d'électricité de villes japonaises (Hokkaido, Tohoku, Hokuriku, Chugoku, Shikoku, Okinawa) s'est avéré simple et précis.

### **5.3.3 Synthèse :**

Certains des outils présentés ci-dessus ont été conçus en particulier pour la simulation et l'optimisation des systèmes hybrides (par exemple, HOMER, RETScreen, HYBRIDS), tandis que d'autres ont été initialement conçus pour modéliser le bâtiment et ses systèmes de climatisation, mais ont ensuite été élargis pour couvrir la possibilité de simuler des générateurs d'électricité, des technologies à énergies renouvelables (c'est le cas de EnergyPlus). Un autre outil similaire à EnergyPlus, TRNSYS, a été conçu à l'origine pour effectuer la modélisation dynamique des systèmes solaires thermiques, puis il a été élargi pour effectuer la simulation de toute la construction et des équipements d'un bâtiment. Une autre particularité peut être trouvée dans le but de l'outil, certains d'entre eux sont destinés à être utilisés comme outils de simulation, ce qui signifie qu'ils peuvent vérifier un scénario mais pas effectuer une optimisation (du moins pas dans l'outil lui-même), d'autres sont destinés à être utilisés comme un outil d'aide à la décision pour effectuer une optimisation, en donnant notamment une optimisation de la configuration du système (par exemple HOMER) [38].

Dans notre projet d'étude de l'alimentation des fermes agricoles à partir d'une mini-centrale PV-Réseau, nous allons utiliser le logiciel HOMER pour optimiser notre mini-centrale, puisque ce logiciel permet la simulation et l'optimisation des systèmes d'alimentation électrique qui peuvent être connectés ou non au réseau électrique. Il peut donc modéliser des combinaisons de plusieurs systèmes notamment éolien, photovoltaïque, groupe électrogène diesel et batterie d'accumulateurs, et il peut aussi répondre à un grand nombre de questions surtout lorsque nous voulons construire un système d'alimentation électrique qui renferme plusieurs sources d'énergie et auxquelles, nous n'avons pas de réponse telles que :

- Quelle sont les sources d'énergie qui peuvent donner un rapport de coût-efficacité meilleur ?
- Quelle est la puissance nécessaire de chaque source d'énergie ?
- Quelle sera le bilan économique du système si le coût ou la demande de l'énergie changent ?

La multiplicité des paramètres d'entrée et des sources d'énergie rend ainsi la réponse à ces questions difficile et le temps de réponse très grand. Le logiciel HOMER utilise des simulations horaires pour optimiser la conception des systèmes d'alimentation électrique suivant le rapport coût-efficacité « Total NPC (Net Present Cost) », les options qu'il utilise comme optimisation et sensibilité de la variation des caractéristiques des sources d'alimentation peuvent répondre à ce grand nombre de questions et dans un temps court [70].

### **5.4 Simulation d'une mini-centrale hybride PV-Réseau :**

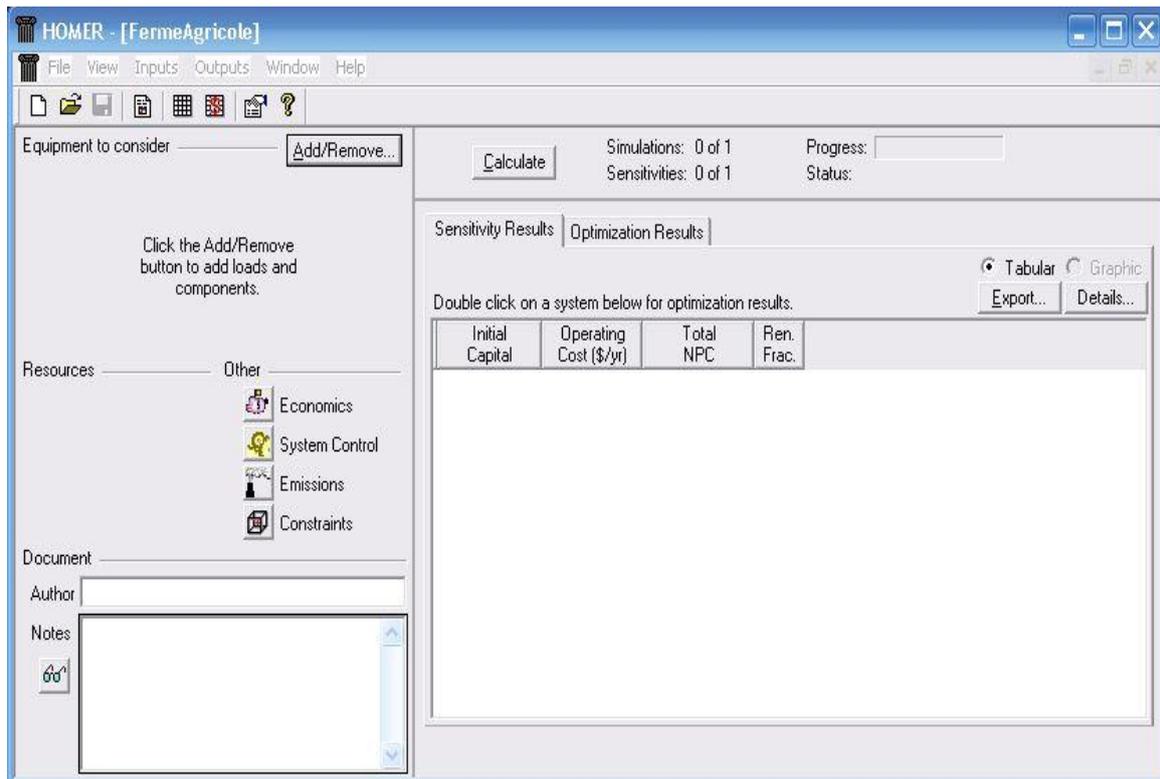
#### **5.4.1 Etapes d'analyse d'un système multi-source :**

- **1<sup>ère</sup> Etape : Formuler une question à laquelle HOMER peut répondre :**

Dans notre cas, nous avons une ferme agricole, une plantation d'orangers de vingt hectares, des chambres froides et quatre habitations qui sont toutes alimentées du réseau électrique, leur consommation électrique est calculée par un seul compteur. Et nous voulons savoir dans ce cas si leur alimentation à partir d'une mini-centrale électrique PV-Réseau est possible avec le gisement solaire que possède la ville de Chlef et quelle sera la puissance optimale de l'installation photovoltaïque, et pour avoir une réponse à ces questions, le logiciel HOMER va nous aider à prendre une décision.

- **2<sup>ème</sup> Etape : Créer une nouvelle interface du logiciel HOMER**

Cette interface (Figure 5-6) contient l'ensemble des informations concernant les différentes options de la technologie utilisée dans la conception d'un système multi-source tels que le coût initial des installations et la disponibilité des sources d'énergie renouvelable ou fossile. Elle contient aussi l'option d'affichage de l'optimisation des résultats pour tout un calcul.



**Fig 5-6 :** Interface du logiciel HOMER.

- **3<sup>ème</sup> Etape : Construire une configuration**

Cliquer sur **Add/Remove...** pour choisir les installations que le logiciel HOMER va prendre en compte.

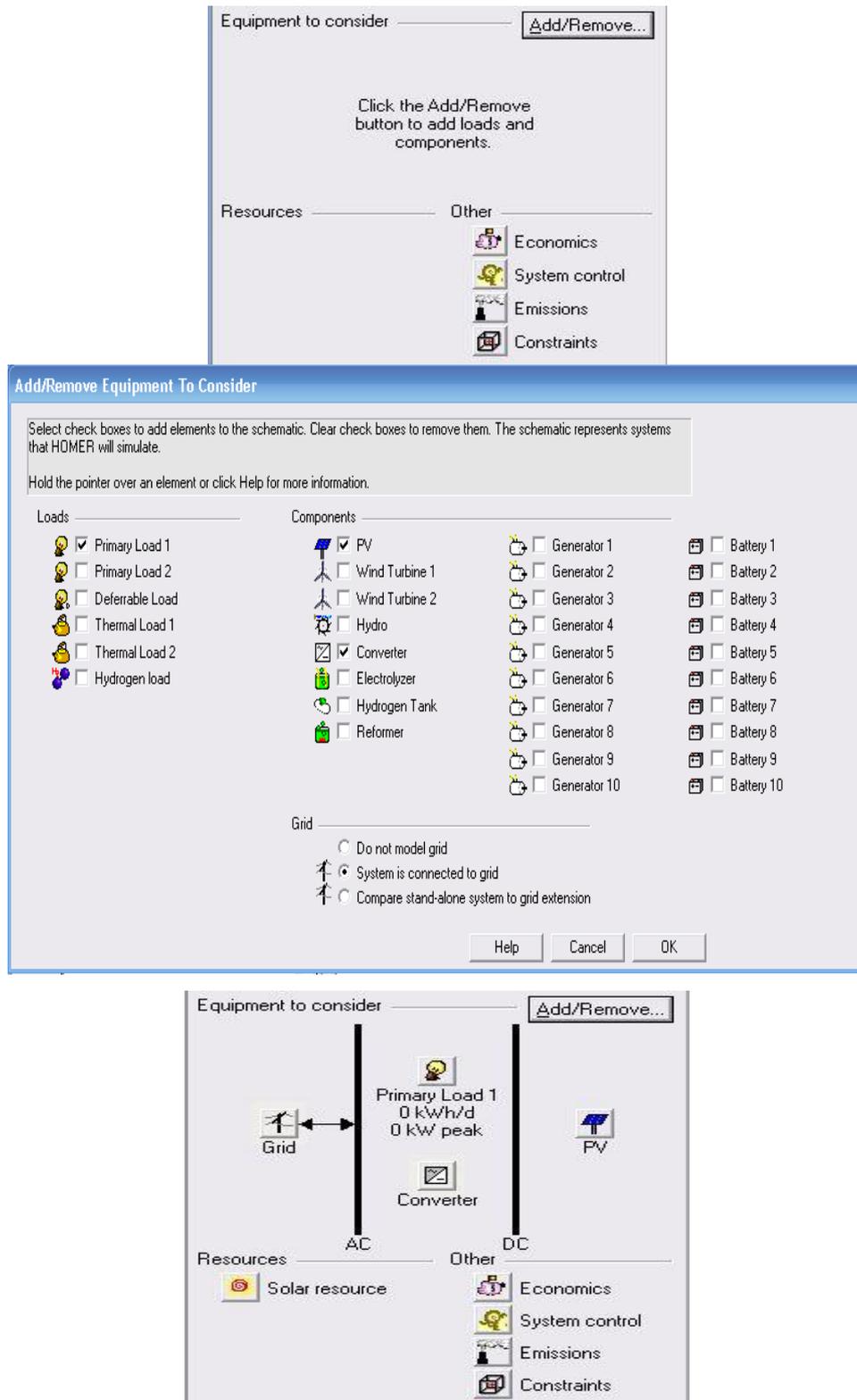


Fig 5-7 : Configuration de l'installation PV-Réseau.

Nous allons construire une configuration pour fournir au logiciel HOMER une information sur la charge électrique consommée et les différentes installations d'alimentation électrique (réseau électrique, champ photovoltaïque et un convertisseur du courant électrique) que nous

voulons utiliser pour avoir une réponse sur nos questions. Après avoir choisi les différentes installations, HOMER affiche un schéma regroupant les installations d'alimentation électrique et la charge à alimenter que nous avons choisies, et juste au dessous de ces installations, HOMER affiche aussi la source d'énergie solaire qu'utilise l'installation du système photovoltaïque (Figure 5-7).

- **4<sup>ème</sup> Etape : Entrer la demande d'énergie par heure**

Cliquer sur « Primary load1  » qui se trouve dans le schéma regroupant les installations d'alimentation électrique et la charge à alimenter.

HOMER présente dans la fenêtre « Primary Load Inputs » 12 tableaux de 24 heures qui correspondent aux 12 mois de l'année et demande de les remplir avec de l'énergie demandée dans chaque heure, et demande aussi de choisir le type de courant qui sera utilisé.

Dans notre cas d'étude, la consommation électrique est répartie selon trois périodes.

**1<sup>ère</sup> période :** Janvier, Février, Mars, Octobre, Novembre et Décembre (Figure 5-8).

**2<sup>ème</sup> période :** Avril, Mai et Septembre (Figure 5-9).

**3<sup>ème</sup> période :** Juin, Juillet et Août (Figure 5-10).

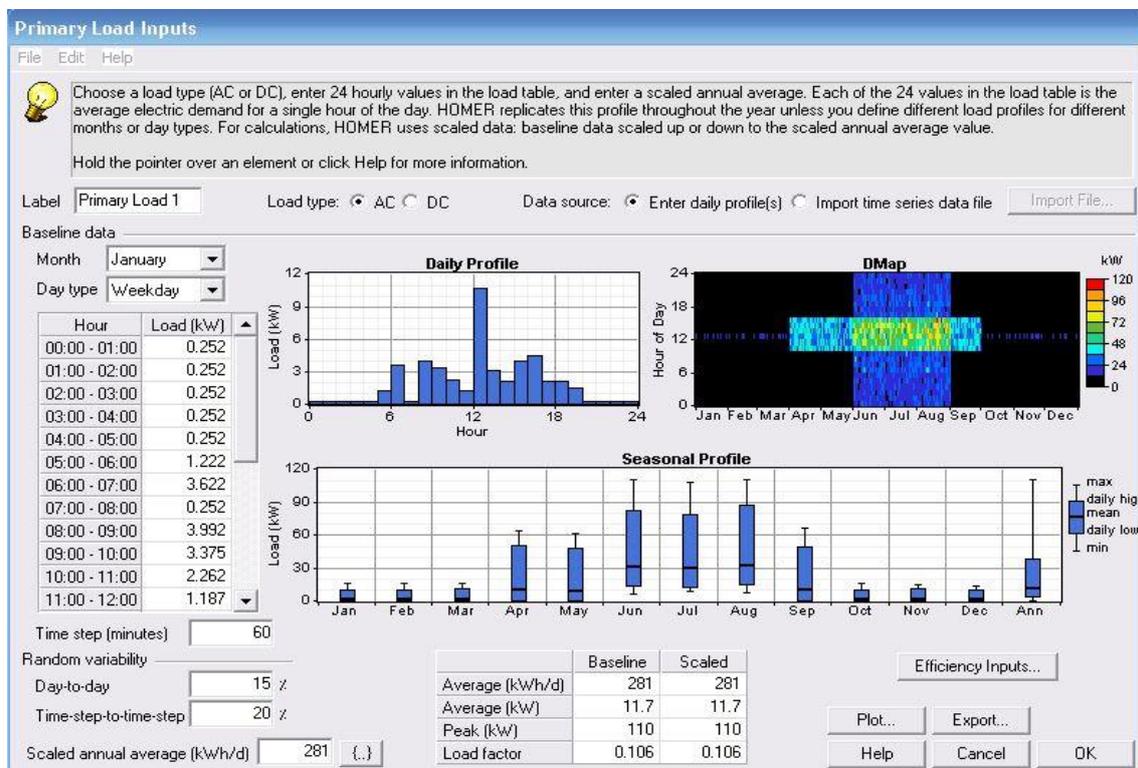


Fig 5-6 : Fig 5-8 : 1<sup>ère</sup> période de consommation.

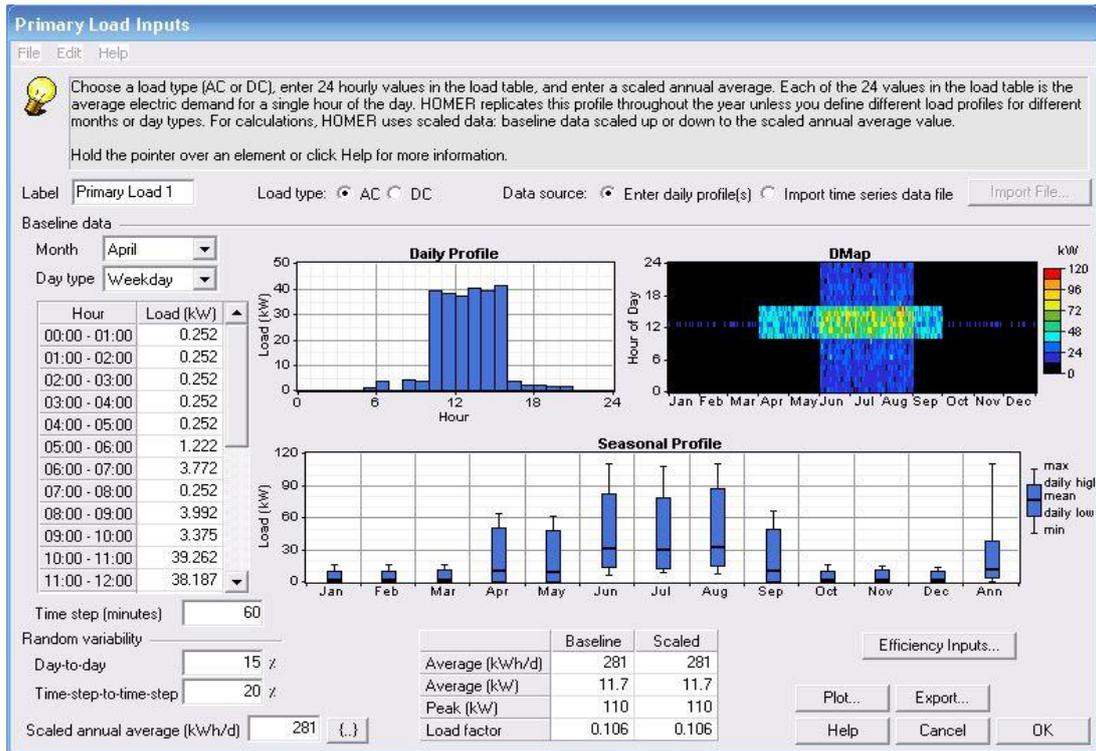


Fig 5-9 : 2<sup>ème</sup> période de consommation.

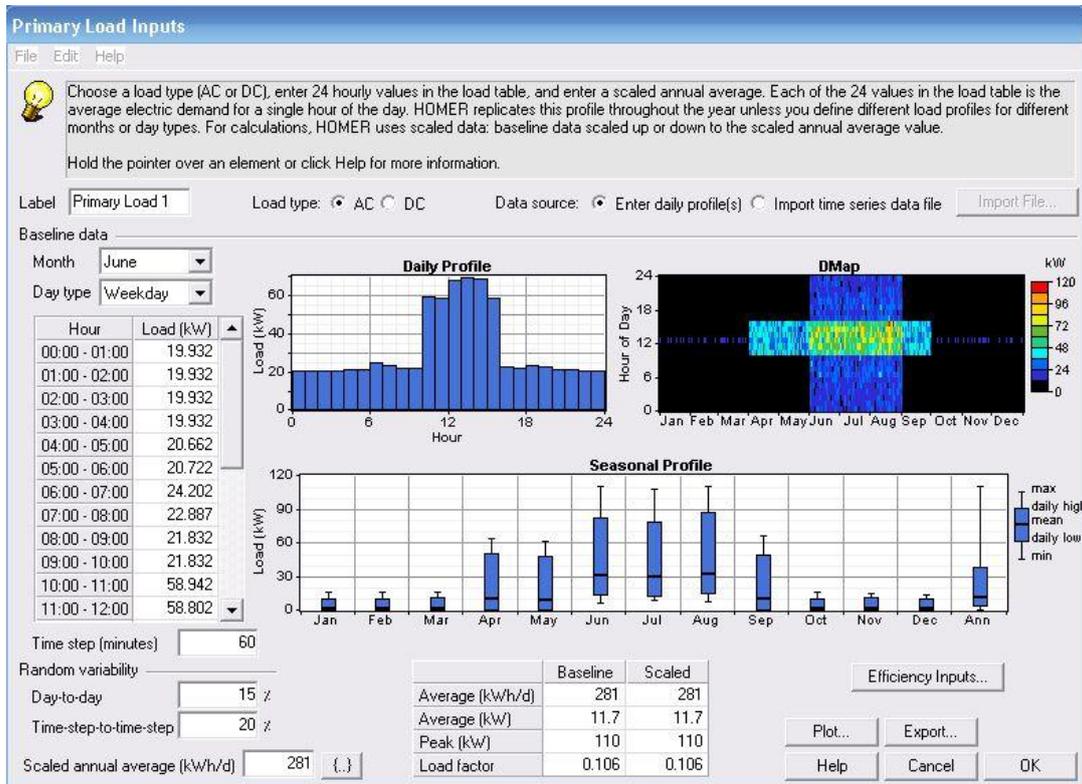


Fig 5-10 : 3<sup>ème</sup> période de consommation.

Après avoir fourni au logiciel HOMER la demande d'énergie dans chaque heure, nous remarquons dans la figure 5-11 une flèche qui se dirige du conducteur du courant alternatif vers la charge à alimenter et nous remarquons aussi que nous pouvons prendre ou injecté le courant électrique dans le réseau électrique, et juste au-dessous de la charge, il s'affiche la consommation journalière « 281 kWh/jour » et l'énergie maximum demandée à un moment de la journée.

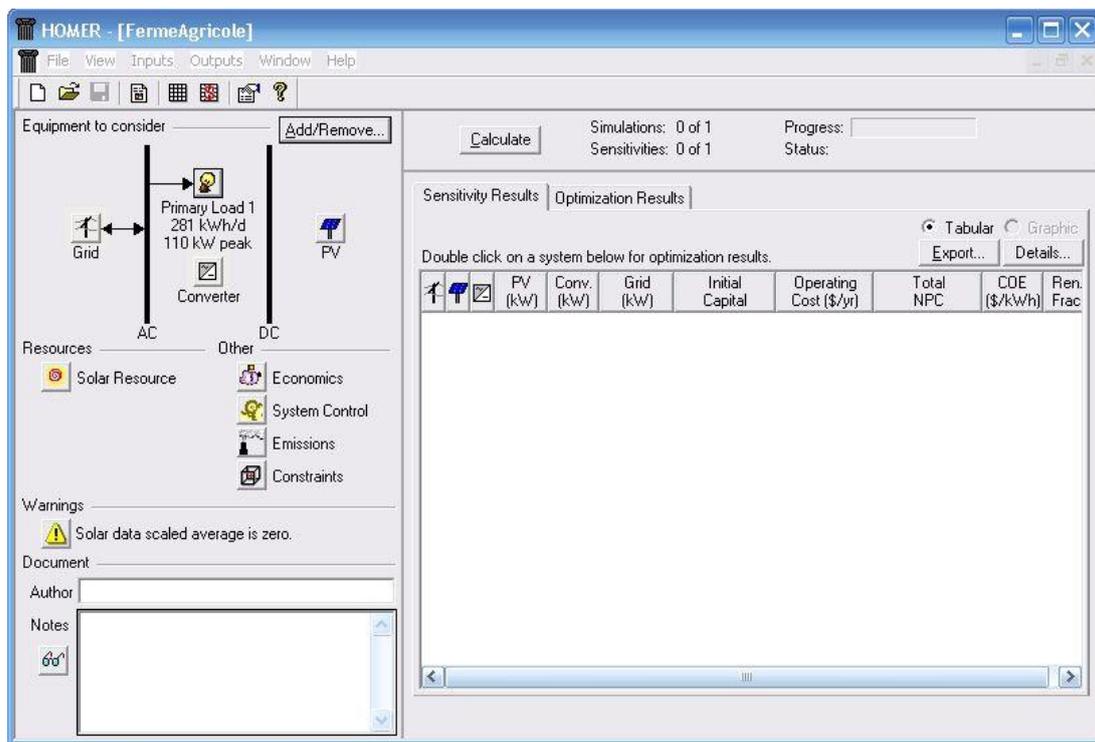


Fig 5-11 : Demande d'énergie par jour.

- **5<sup>ème</sup> Etape : Entrer les caractéristiques des installations d'alimentation électrique**

Cette étape permet de fournir au logiciel HOMER la puissance, le coût de l'installation ou le coût de son remplacement et le coût de la maintenance.

1. Cliquer sur PV  pour ouvrir la fenêtre « PV Inputs »

Dans cet étape, nous allons calculer la puissance crête de notre générateur PV qui pourrait satisfaire la consommation journalière calculée par le logiciel HOMER, puisque nous avons un système hybride, le calcul de cette puissance se fait en utilisant le rayonnement du mois le plus favorable qui dépend de l'angle d'inclinaison choisie, nous allons calculer pour chaque angle d'inclinaison du tableau 1-4 la puissance crête qui lui correspond en utilisant les équations 5-1 ,5-2 et 5-3.

- Calcul de l'énergie totale consommée

$$E_T = \frac{E_{AC}}{\eta_{Ond}} \quad (5-1)$$

$E_T$ : Energie totale consommée [kWh].

$E_{AC}$ :Energie journalière consommée en courant alternatif [kWh].

$\eta_{Ond}$ : Rendement de l'onduleur.

$$E_T = \frac{281}{0.96} = 293 \text{ kWh} \quad (5-2)$$

- Calcul de la puissance crête :

$$P_C = \frac{E_T}{G \times f} \quad (5-3)$$

$P_C$ : Puissance crête du générateur PV [kWc].

$G$ : Irradiation globale sur un plan incliné [kWh/m<sup>2</sup>].

$f$ : Facteur de correction globale (variant entre 0.65 et 0.9).

$$P_C = \frac{293}{6.8 \times 0.8} = 54 \text{ kWc} \text{ Pour l'angle } 20^\circ$$

$$P_C = \frac{293}{6.68 \times 0.8} = 55 \text{ kWc} \text{ Pour l'angle } 25^\circ$$

$$P_C = \frac{293}{6.52 \times 0.8} = 57 \text{ kWc} \text{ Pour l'angle } 30^\circ$$

$$P_C = \frac{293}{6.33 \times 0.8} = 58 \text{ kWc} \text{ Pour l'angle } 35^\circ$$

$$P_C = \frac{293}{6.1 \times 0.8} = 60 \text{ kWc} \text{ Pour l'angle } 40^\circ$$

Nous allons fournir au logiciel HOMER la puissance du champ photovoltaïque, le coût d'investissement, le coût de remplacement et les frais de maintenance (Figure 5-12), il offre également la possibilité d'entrer plusieurs puissances crêtes concernant le générateur photovoltaïque qu'il prendra en considération dans la simulation. Dans cette fenêtre le logiciel HOMER présente un graphe qui montre que le coût de l'installation augmente avec l'augmentation de sa puissance crête.

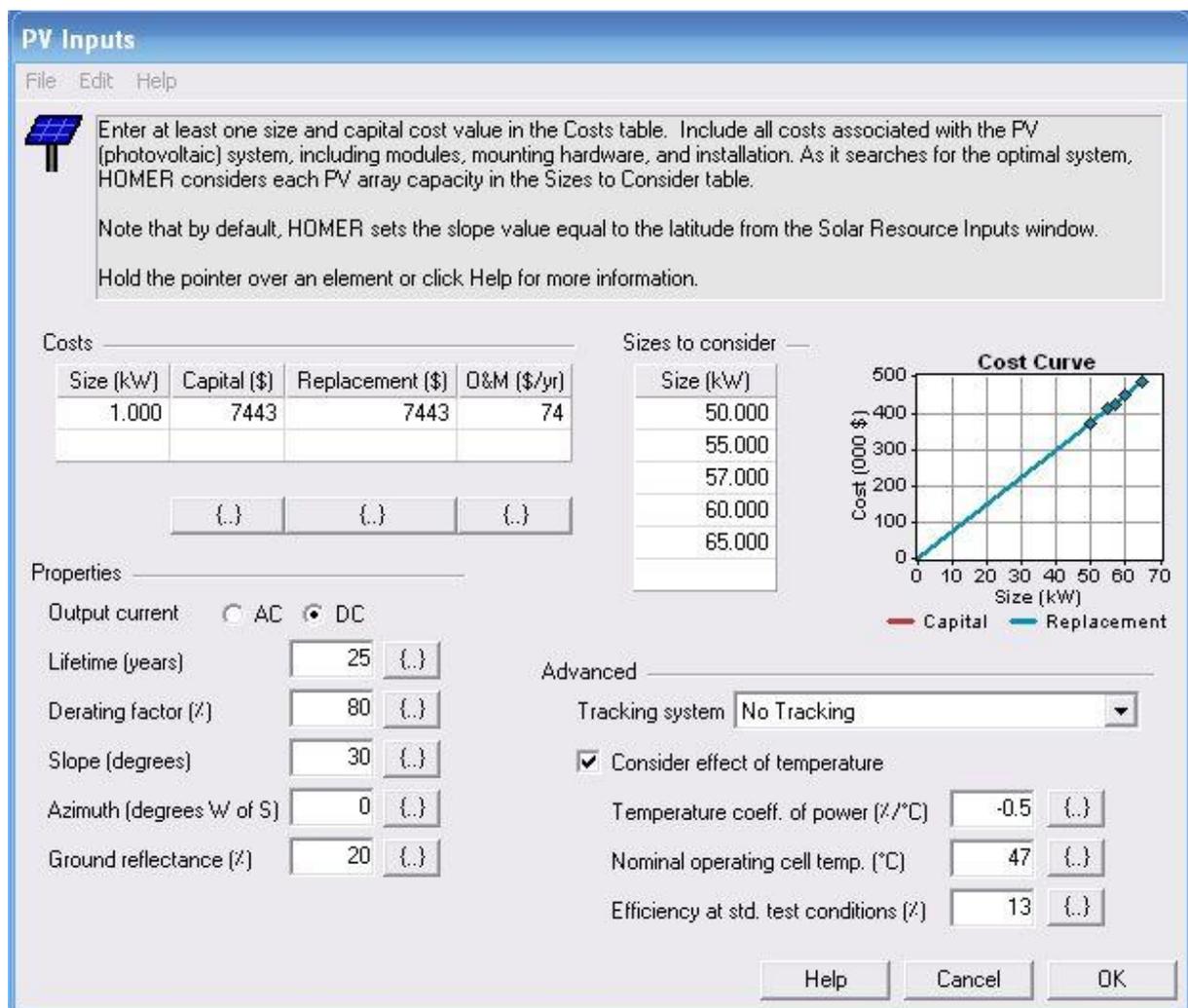
## Chapitre 5 Dimensionnement et simulation d'une mini-centrale hybride PV-Réseau

Le prix du matériel dépend principalement de la taille du système et de son mode d'intégration au bâtiment. Le tableau 5-10 donne un ordre de grandeur des prix « matériel + pose », en €/Wc TTC, qui peuvent être rencontrés dans diverses configurations [71].

D'après le tableau 5-10, nous allons fournir au logiciel HOMER le prix 5 €/Wc qui correspond à 7443 \$/kWc.

**Tableau 5-10 : Prix matériel et pose inclus [71].**

	Intégration toiture, simple	Intégration verrière, tuiles PV...
<b>1 à 3 kWc</b>	5 à 6,5 €/Wc	>6,5€/Wc
<b>3 à 10 kWc</b>	5 à 6 €/Wc	>6€/Wc
<b>+ de 10 kWc à plusieurs MW</b>	3,2 à 5 €/Wc	>5 €/Wc



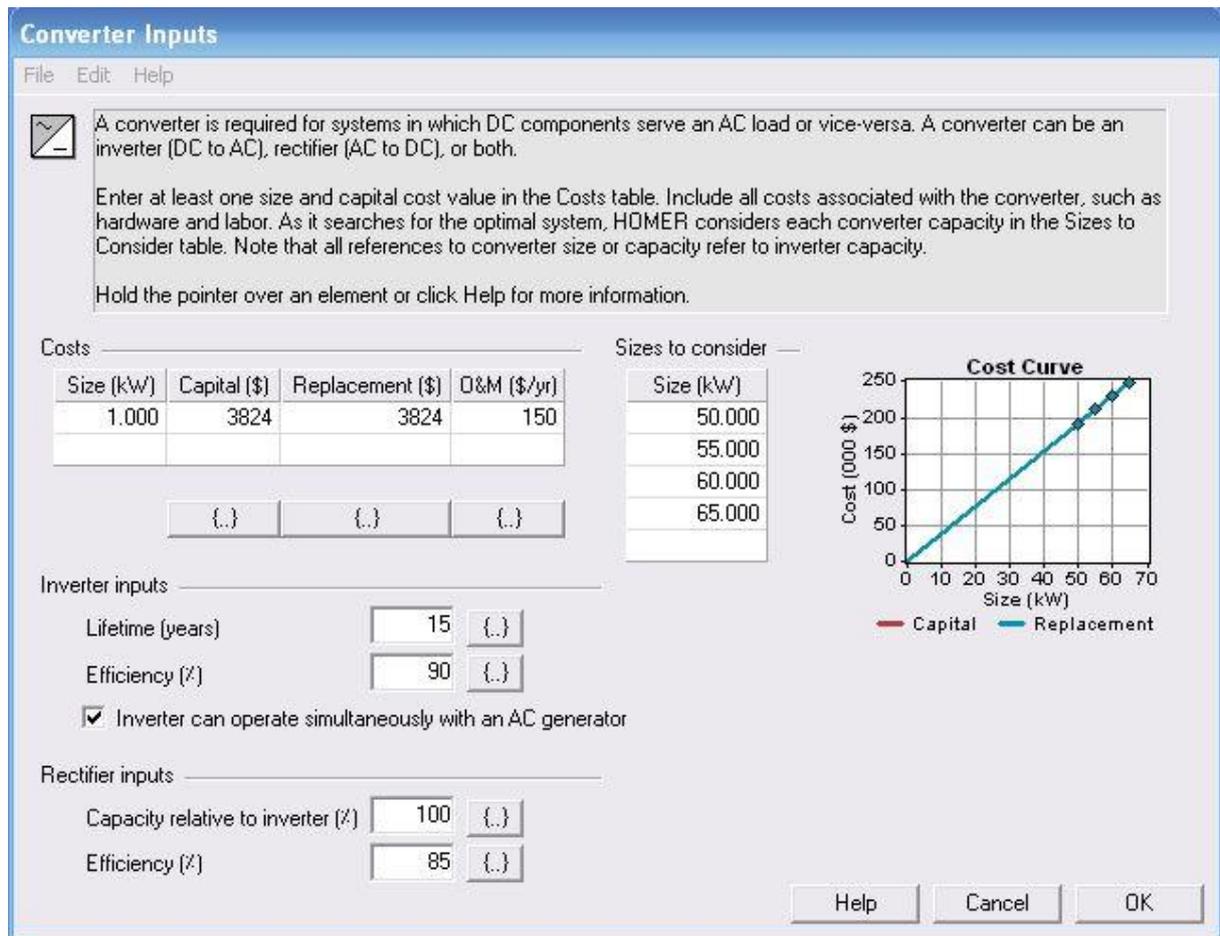
**Fig 5-12 : Données du générateur PV.**



2. Cliquer sur **Convertir** pour ouvrir la fenêtre « Converter Inputs».

Entrer la puissance du convertisseur du courant continu en courant alternatif, le coût d'investissement, le coût de remplacement et les frais de maintenance, HOMER offre également la possibilité d'entrer plusieurs puissances concernant le convertisseur qui les prendra en considération dans la simulation.

Dans cette fenêtre, le logiciel HOMER présente un graphe qui montre que le coût du convertisseur augmente avec l'augmentation de sa puissance (Figure 5-13).



**Fig 5-13 : Données du convertisseur électrique**



3. Cliquer sur **Grid** pour ouvrir la fenêtre « Grid Inputs».

Dans cette fenêtre nous allons entrer le prix d'achat de l'électricité du réseau et aussi le prix de vente de l'électricité au réseau (Figure 5-14), le prix d'achat d'après les factures d'électricité du fermier est 3,57 DA/kWh (0.050 \$/kWh).

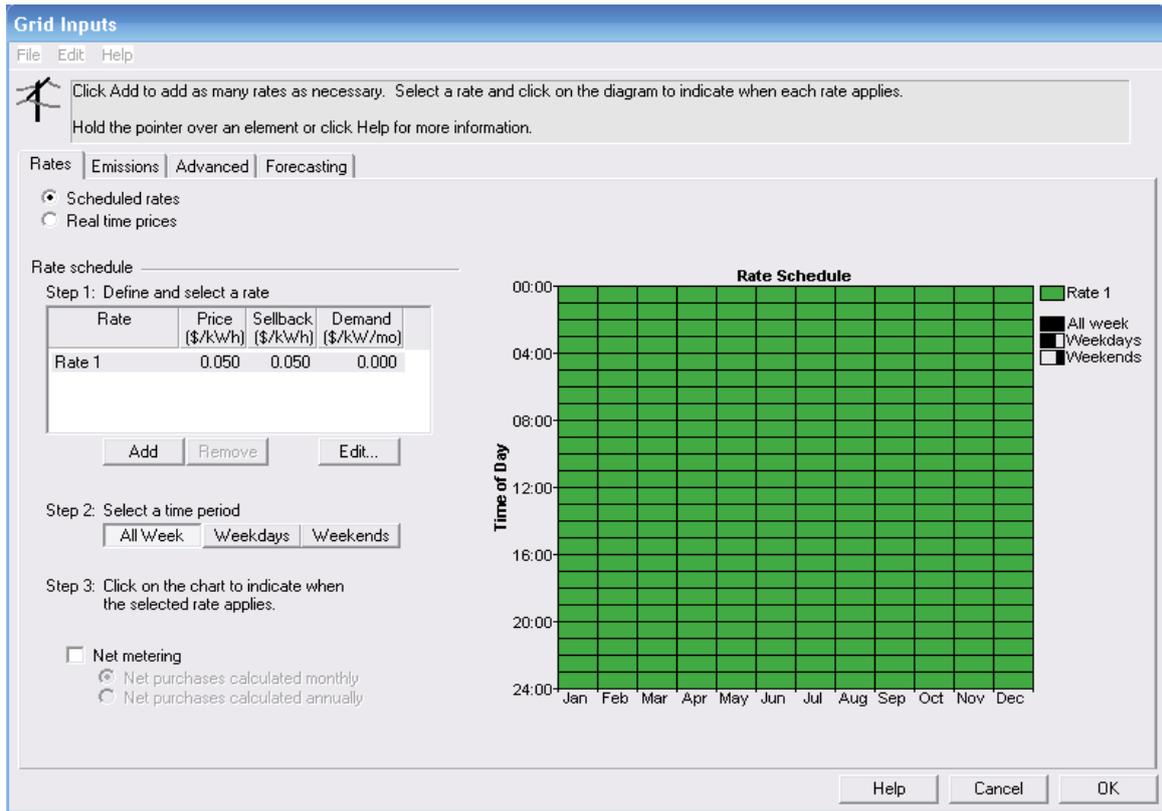


Fig 5-14 : Données du réseau électrique.

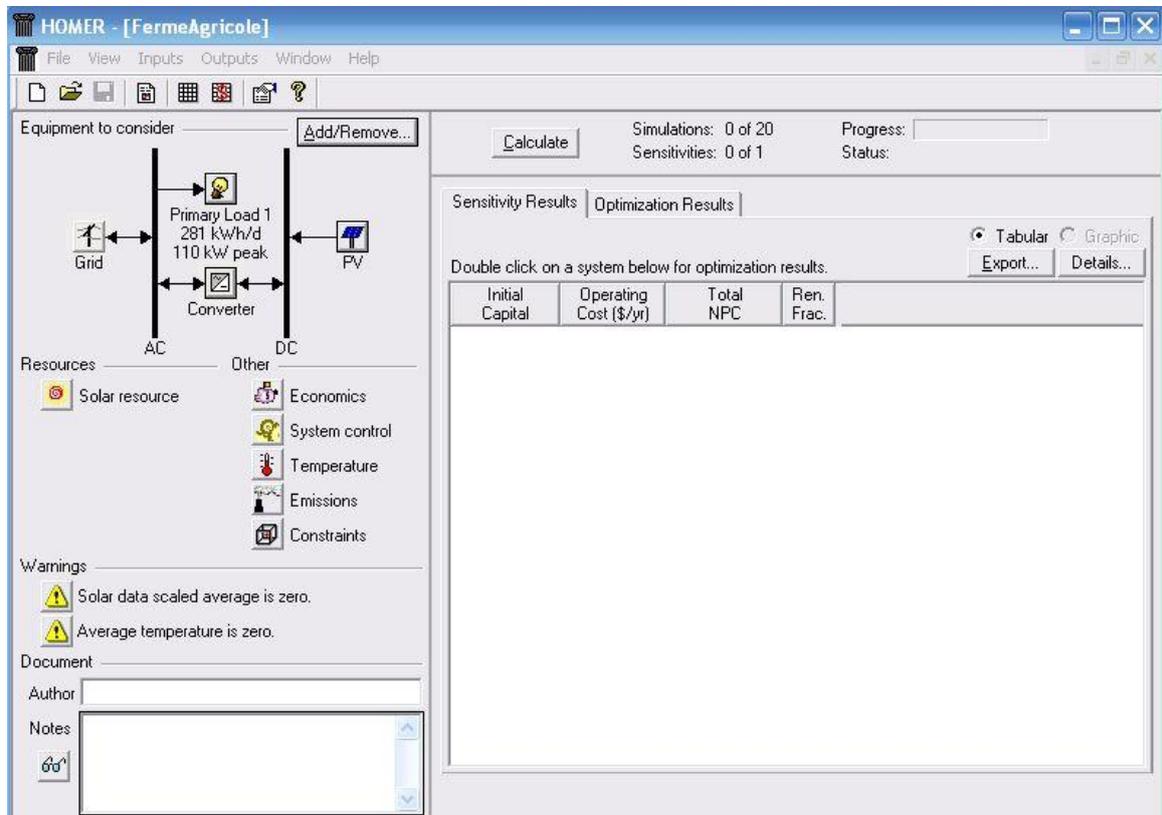


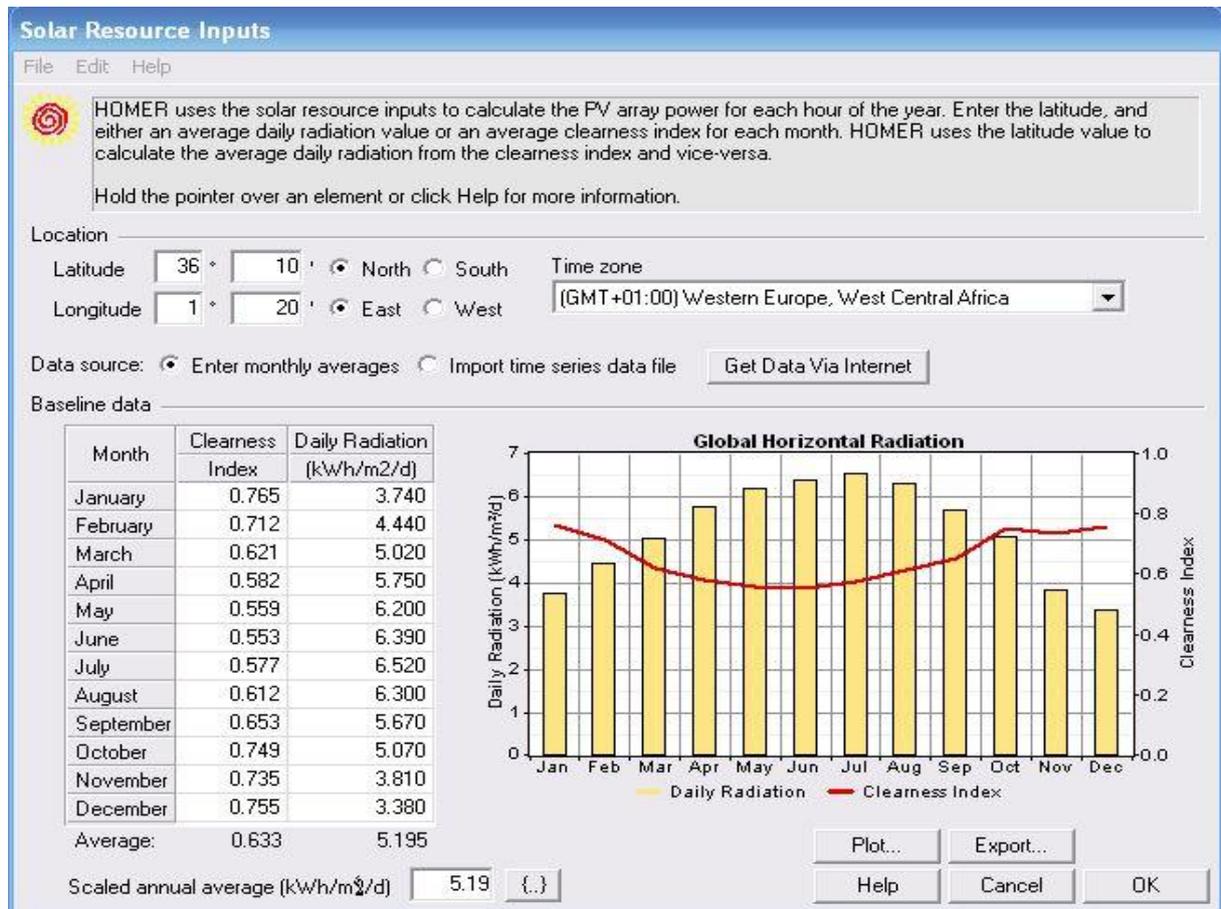
Fig 5-15 : Schéma de l'installation d'alimentation électrique et la charge à alimenter.

Maintenant, nous avons introduit toutes les caractéristiques concernant les installations que nous avons choisies comme il apparaît sur la figure 5-15.

• **6<sup>ème</sup> Etape : Entrer les caractéristiques de la source solaire et de la température**

Cette étape permet de fournir au logiciel HOMER à partir du schéma des sources d'énergie l'ensemble des caractéristiques et des paramètres concernant l'ensemble de ces sources d'énergie que HOMER va les utiliser dans la simulation.

1. Cliquer sur  Solar resource pour ouvrir la fenêtre « Solar resource inputs » (Figure 5-16).



**Fig 5-16 :** Irradiation selon l'angle de 30° (Wh/m<sup>2</sup>).

2. Cliquer sur  Temperature pour ouvrir la fenêtre « Temperature inputs » (Figure 5-17).

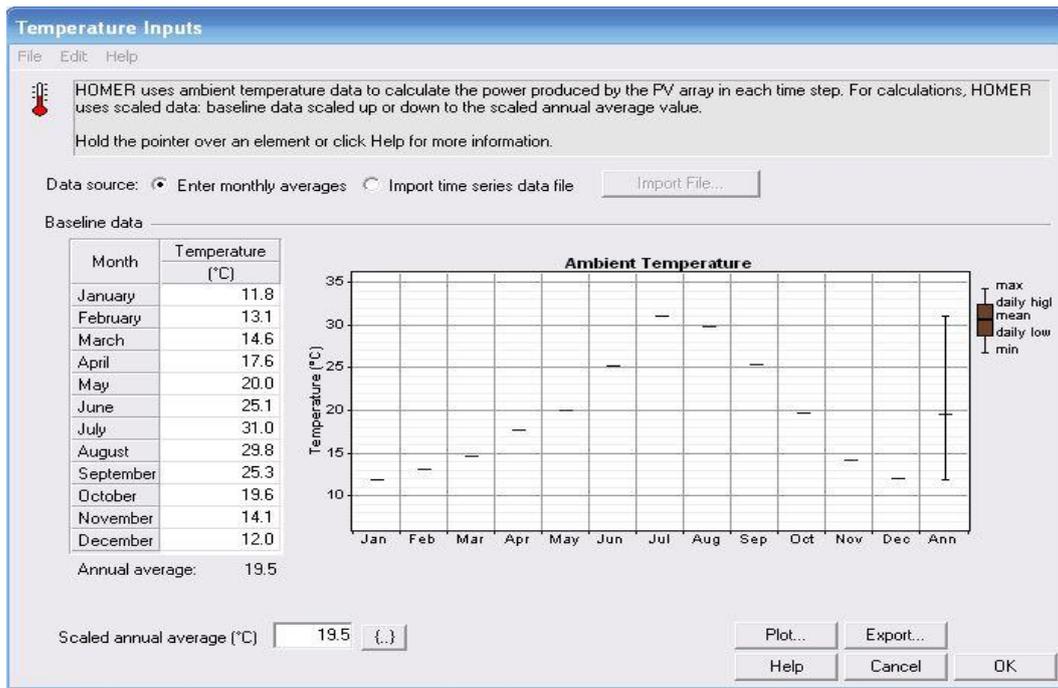


Fig 5-17 : Températures moyennes mensuelles en °C de l'année 2010.

• 7<sup>ème</sup> Etape : Afficher l'ensemble de l'installation

Dans la fenêtre principale, cliquer sur « Search Space  ». Dans cette fenêtre, nous trouvons l'ensemble des valeurs que nous avons introduites et qui concernent l'installation que nous avons choisie.

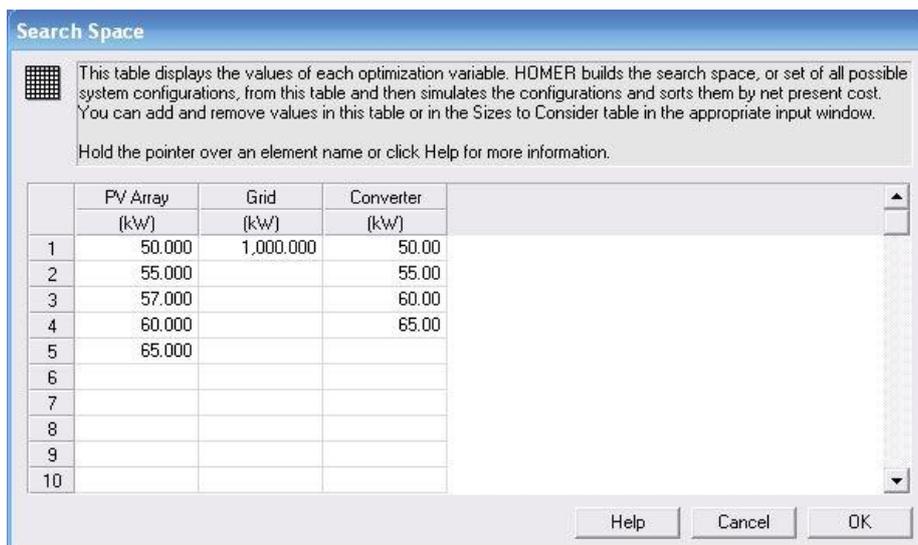


Fig 5-18 : Ensemble des valeurs de différents équipements de notre installation.

Le logiciel HOMER va simuler tous les systèmes qui seront faits à partir des combinaisons qu'il peut faire à partir du tableau de la fenêtre « Search Space » (Figure 5-18). Le nombre de

combinaisons sera calculé comme suit : nous avons 5 valeurs pour le champ photovoltaïque, 1 valeur pour le réseau électrique et 4 valeurs pour le convertisseur.

Le nombre de combinaisons égale à  $5 \times 1 \times 4 = 20$ .

- **8<sup>ème</sup> Etape : Examen des résultats optimisés**

1. Cliquer sur  pour démarrer la simulation. HOMER va simuler 20 configurations.
2. Lorsque HOMER termine la simulation, Cliquer sur « Optimization Results tab » et cliquer sur « Overall » pour voir la liste qui contient tous les systèmes faisables.

HOMER affiche dans une liste (Figure 5-19) après 1 seconde de calcul tous les résultats optimisés trouvés et faisables, ils sont classés par ordre selon le rapport coût-efficacité "Total NPC" (Net Present Cost) qui combine le coût en capital - annualisé par l'amortissement du composant au cours de sa durée de vie en utilisant les taux d'actualisation réelle – et celui de remplacement, fonctionnement et entretien. Nous constatons donc que le logiciel HOMER a trouvé que la configuration de 50 kWc a le meilleur rapport NPC qui est 787 220 \$.

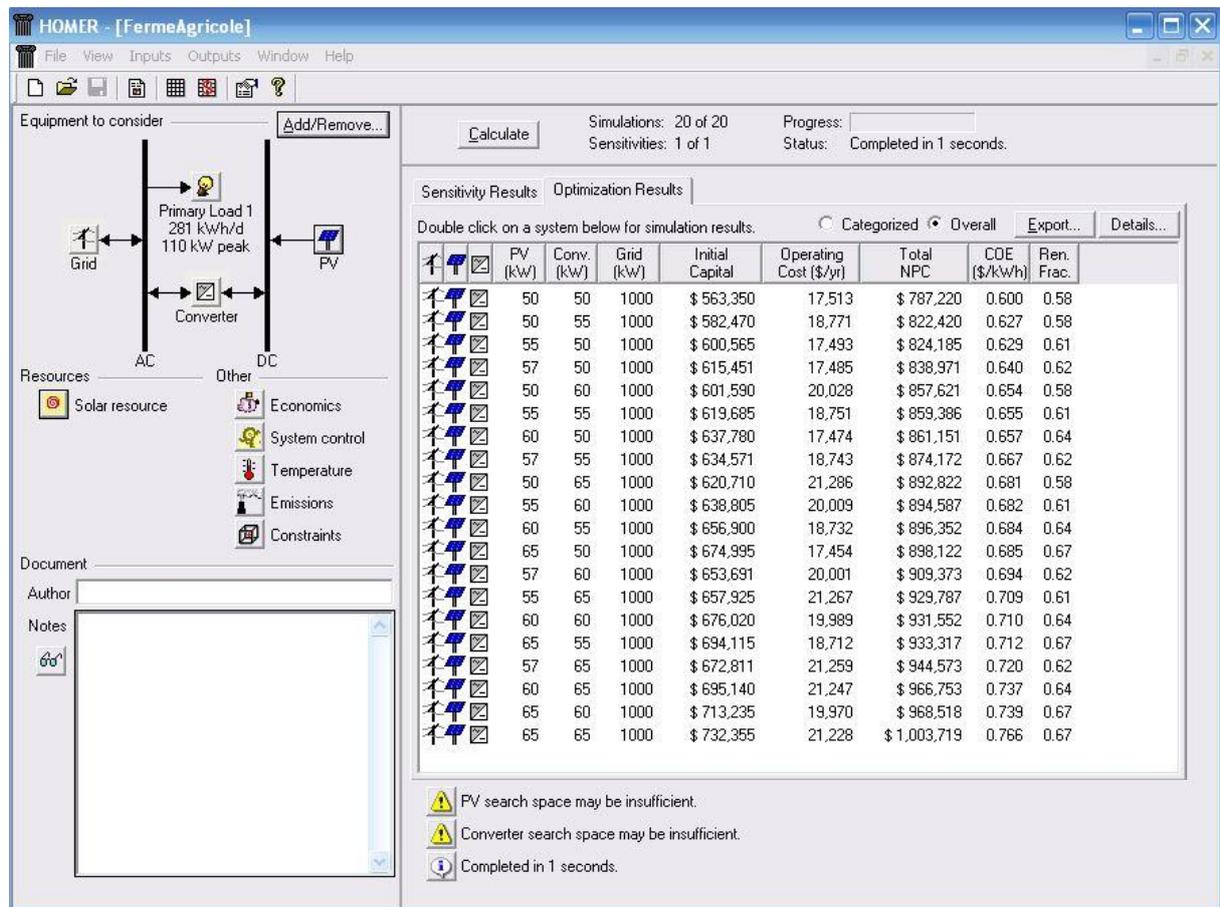


Fig 5-19 : Résultats optimisés trouvés et faisables.

Nous allons maintenant étudier cette configuration selon différents angles d'inclinaison avec le logiciel HOMER.

**Tableau 5-11 : Variation de production du générateur PV en fonction de l'angle d'inclinaison**

Angle d'inclinaison [°]	Production du générateur PV [%]	Rapport NPC [\$]
20	56.47	790 477
25	57.44	788 306
30	57.66	787 220
35	57.74	786 240
40	57.45	785 813

D'après le tableau 5-11, nous trouvons que l'angle de 35° donne un meilleur pourcentage de production du générateur PV avec un rapport NPC inférieur à ceux des angles 20°, 25° et 30°. Nous allons choisir 35° qui sera l'inclinaison de nos modules PV. Nous allons maintenant voir les détails de la configuration 50 kWc dont l'angle d'inclinaison est 35°, telles que la production électrique du générateur PV, la consommation électrique de la charge, et la quantité d'électricité injectée dans le réseau. La figure 5-20 donne la production annuelle de notre générateur PV, la quantité d'électricité annuelle prise du réseau, la quantité d'électricité annuelle injectée dans le réseau et la consommation annuelle des équipements électriques et elle indique aussi qu'il n'y a pas de pertes électriques.



**Fig 5-20 : Configuration de 50 kWc.**

Le tableau 5-12 donne un bilan énergétique mensuel et annuel entre la quantité d'électricité prise du réseau et celle injectée dans le réseau.

**Tableau 5-12 : Bilan énergétique**

Mois	Quantité d'électricité prise du réseau [kWh]	Quantité d'électricité injectée dans le réseau [kWh]	Bilan énergétique [kWh]
Janvier	340	6 716	6 376
Février	276	5 767	5 491
Mars	294	5 542	5 248
Avril	3 057	1 423	-1 634
Mai	3 128	1 486	-1 641
Juin	17 616	38	-17 578
Juillet	17 345	14	-17 331
Août	18 667	27	-18 640
Septembre	2 891	1 505	-1 387
Octobre	320	6 640	6 320
Novembre	325	5 977	5 653
Décembre	341	6 331	5 990
<b>Total</b>	<b>64 599</b>	<b>41 467</b>	<b>-23 132</b>

**Simulation Results**

System Architecture: 1,000 kW Grid      50 kW Rectifier  
 50 kW PV  
 50 kW Inverter

Cost Summary | Cash Flow | Electrical | PV | Converter | Grid | Emissions | Hourly Data

Pollutant	Emissions (kg/yr)
Carbon dioxide	14,619
Carbon monoxide	0
Unburned hydrocarbons	0
Particulate matter	0
Sulfur dioxide	63.4
Nitrogen oxides	31

**Fig 5-21 : Réduction des émissions des gaz à effet de serre.**

La figure 5-21 nous permet de savoir les quantités des gaz à effet de serre en Kg/an qui pourraient être évitées d'être émises dans l'air.

Parmi les avantages du logiciel HOMER, il donne le prix de revient de l'installation qui est égal à 0.378 \$/kWh (27 DZD/ kWh), ainsi qu'il offre une base de donnée de plusieurs paramètres tels que, le rayonnement globale, le rayonnement incident selon l'angle d'inclinaison, la production du générateur PV, la quantité d'électricité injectée dans le réseau, la quantité d'électricité prise du réseau et d'autres paramètres, et cela se fait dans chaque heure durant toute l'année.

Dans notre travail, nous allons comparer pour trois jours, que chaque jour appartient à une période de consommation différente des autres, entre leurs rayonnements globaux (Figure 5-22), leurs rayonnements incidents (Figure 5-23), les puissances du générateur PV (Figure 5-24), les quantités d'électricité prises du réseau (Figure 5-25), les quantités d'électricité injectées dans le réseau (Figure 5-26).

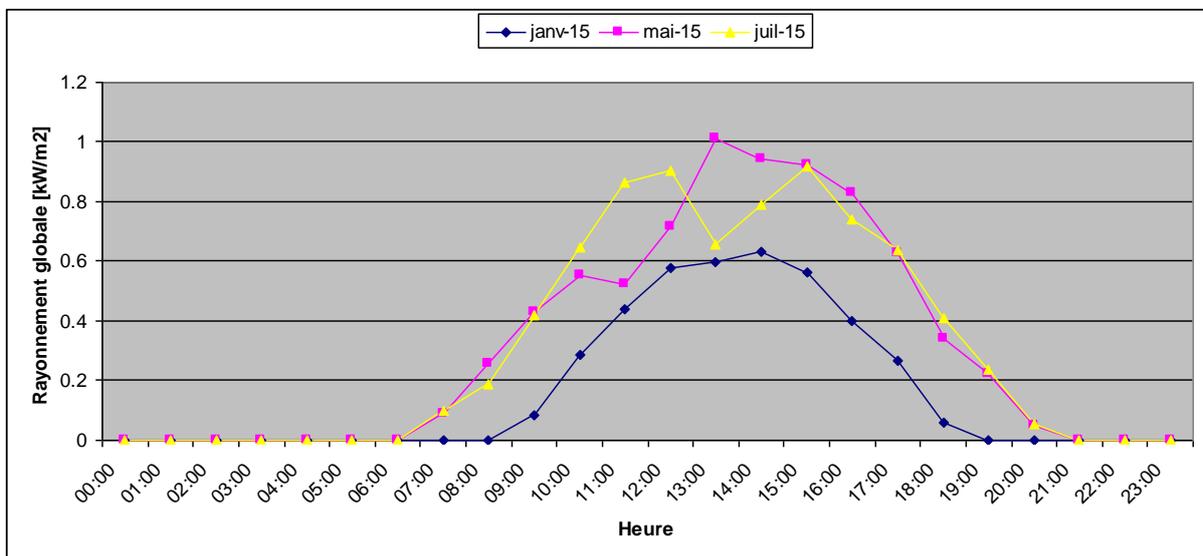


Fig 5-22 : Rayonnement global dans trois jours différents.

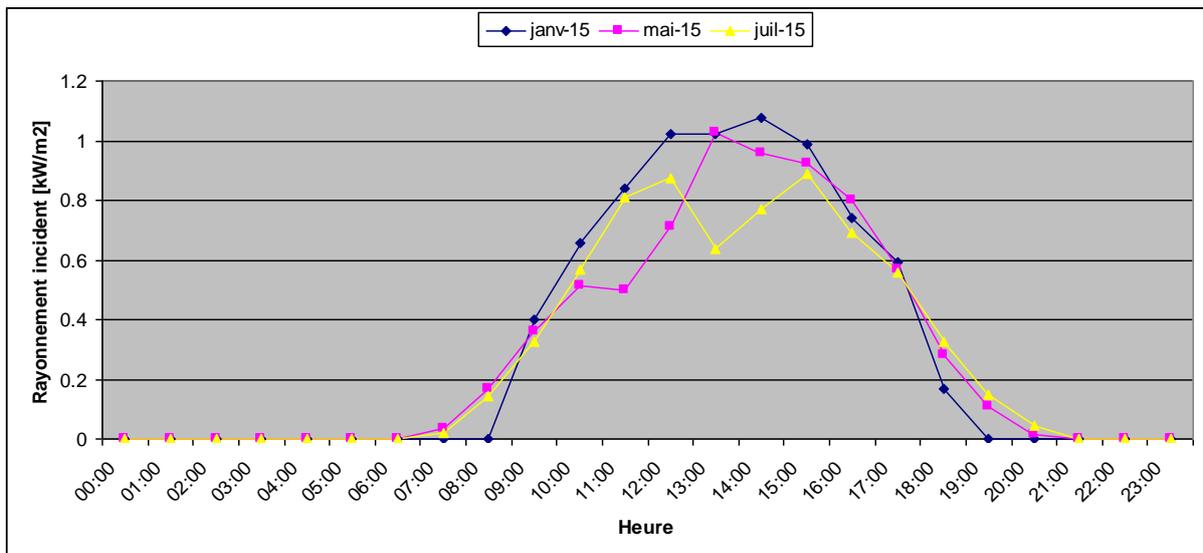


Fig 5-23 : Rayonnement incident dans trois jours différents.

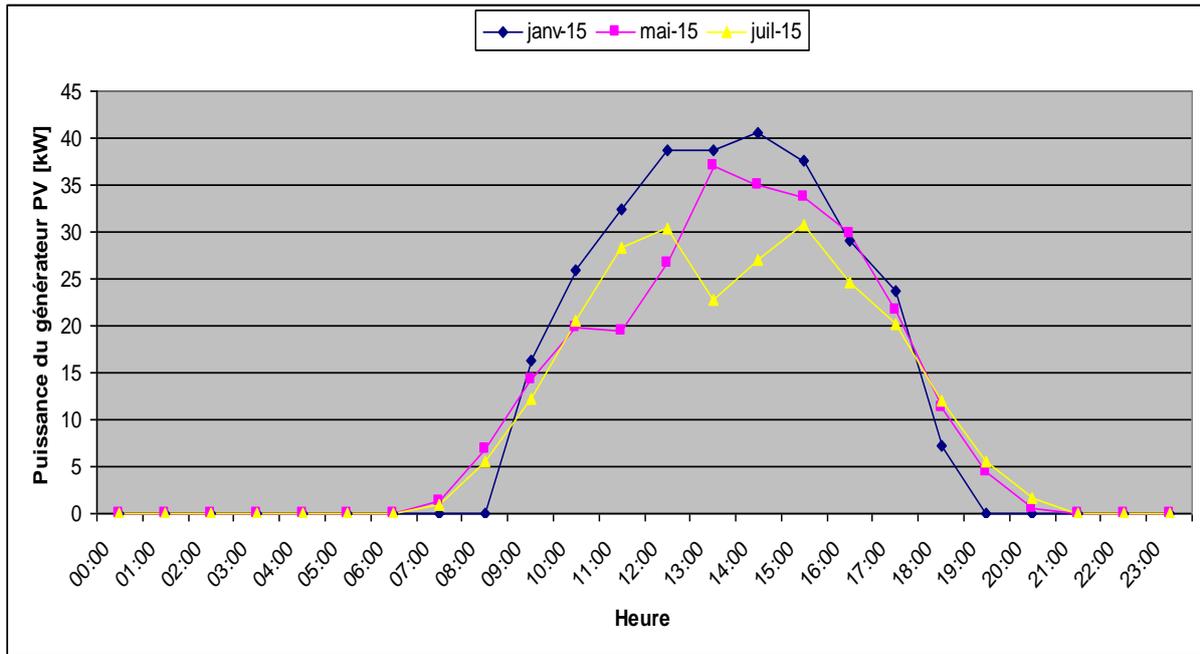


Fig 5-24 : Puissance du générateur PV dans trois jours différents.

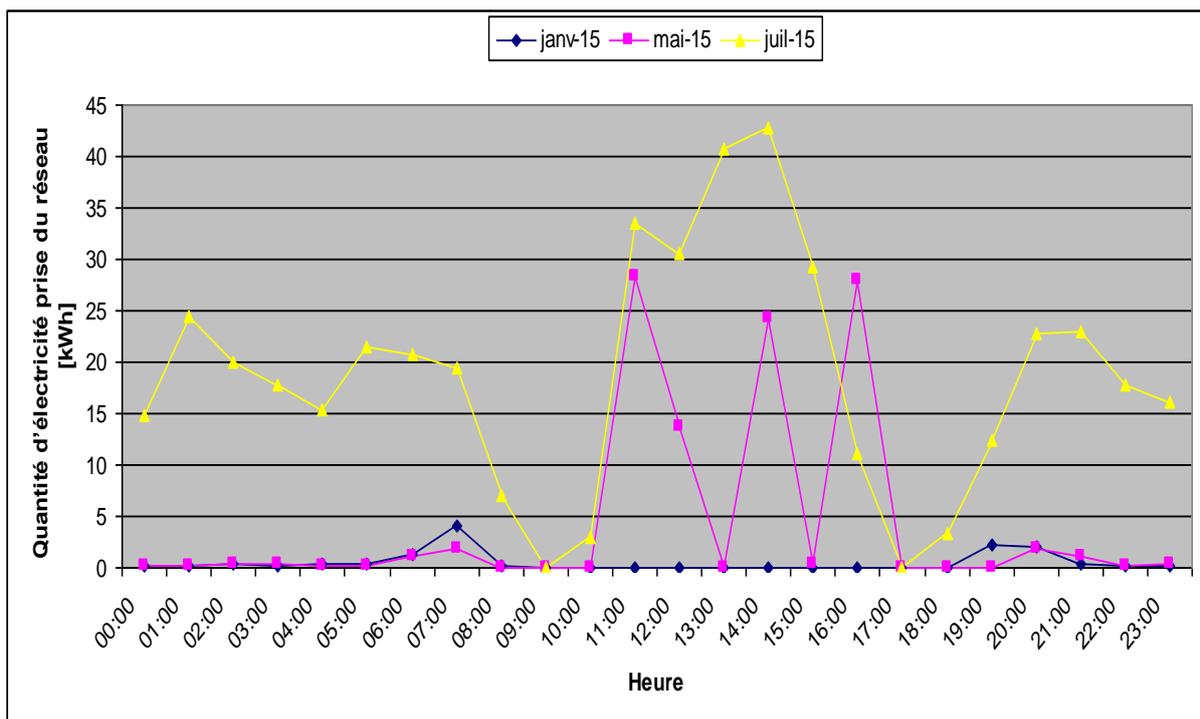


Fig 5-25 : Quantité d'électricité prise du réseau dans trois jours différents.

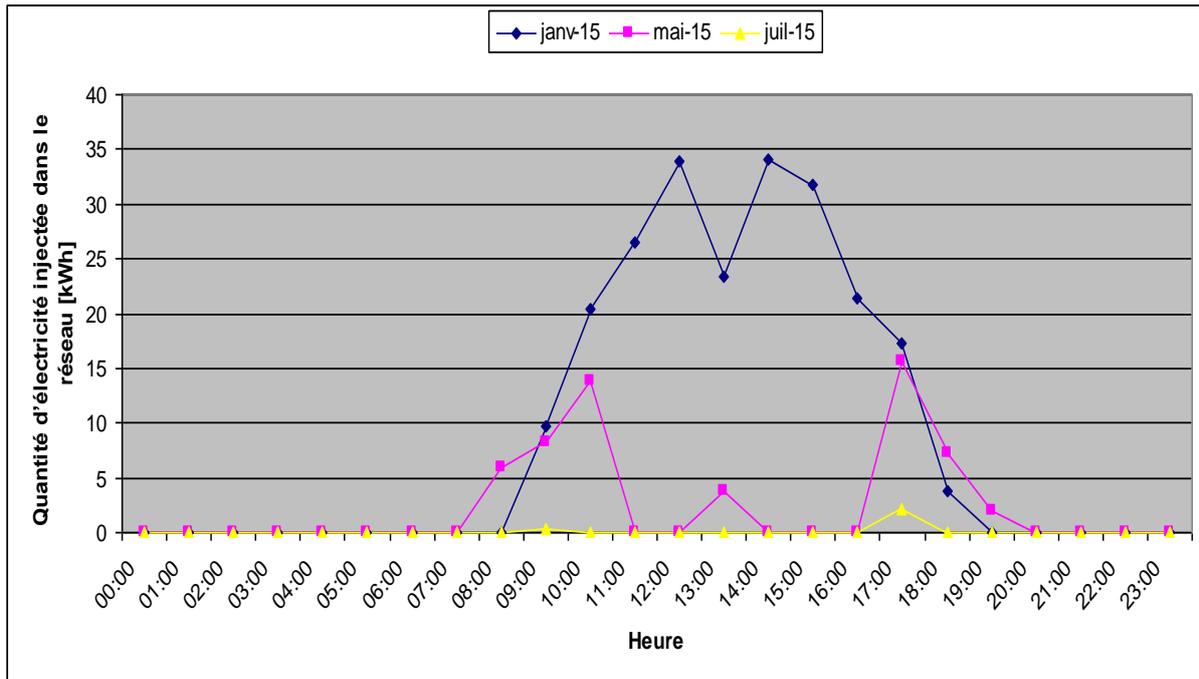


Fig 5-26 : Quantité d'électricité injectée dans le réseau dans trois jours différents.

#### 5.4.2 Conclusion :

- Lorsque nous faisons un bilan annuel de la configuration  de 50 kWc dont le rapport NPC égale à 786 240 \$ entre la quantité d'électricité prise du réseau qui est 64 599 kWh et celle injectée dans ce réseau qui est 41 467 kWh, nous aurons un bilan négatif de 23 132 kWh, et ce bilan devient positif lorsque nous opterons pour une configuration  de 65 kWc mais avec un rapport de NPC égale à 1 002 445 \$. Vu que la consommation annuelle réelle de la ferme agricole et des quatre habitats est inférieure à 102 566 kWh/an, nous trouvons que la configuration  de 50 kWc avec l'inclinaison de 35° des modules PV pourrait satisfaire pleinement les besoins électriques de la ferme agricole et les quatre habitations, et cela veut dire que le bilan énergétique entre la quantité d'électricité prise du réseau et celle injectée dans ce réseau pourrait être proche du positif.
- Nous constatons que les fermes agricoles injectent une quantité énorme de l'électricité en hiver dans le réseau électrique, ce qui est très avantageux, parce que d'après l'opérateur Système « filiale du Groupe Sonelgaz en charge de la sûreté du système électrique », la consommation d'électricité atteint ses plus hauts niveaux en hiver en raison de la vague de froid qui traverse le pays et des températures actuelles exceptionnellement basses [3].

### **CONCLUSION GÉNÉRALE :**

La production d'énergie électrique basée sur l'exploitation des sources d'énergie nouvelle et renouvelable constitue un excellent moyen de protéger l'environnement et d'acquiescer une sécurité à long terme sur le plan énergétique.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne la modélisation et la simulation d'une mini-centrale multi-source PV-Réseau alimentant une ferme agricole dans le but de réduire le taux de dépendance en matière d'alimentation électrique au réseau de distribution électrique et de l'approvisionner en même temps en électricité. Ainsi, après un bref rappel sur les ressources énergétiques renouvelables les plus disponibles dans toutes les fermes agricoles et sur les systèmes de production associés, nous nous sommes intéressés à la production photovoltaïque dont l'installation est intégrée sur les toits des bâtiments agricoles, et par là, elle s'adapte parfaitement avec le paysage de la ferme, et d'un autre côté, elle n'est pas gênante aux travaux agricoles par rapport aux autres systèmes de productions qui demandent des surfaces sur le sol et qui ne doivent pas être en contact direct avec les animaux. Donc, notre système de production d'électricité décentralisé couplé au réseau est un système qui se base sur l'intégration des générateurs photovoltaïques sur les bâtiments agricoles qui possèdent des toits de grandes surfaces, et il se présente donc comme une solution idéale pour l'alimentation des fermes agricoles.

Notre étude théorique a démontré qu'avec une production électrique annuelle à partir des modules photovoltaïques dans la région de Chlef, nous pouvons avoir un résultat satisfaisant qui permet de contribuer énormément au développement durable de la région et la préservation de la nature de la pollution, et de cela, nous prévoyons que les fermes agricoles auront dans l'avenir proche un autre rôle primordial à jouer outre leurs diverses activités agricoles, et c'est celui de la production électrique à partir de sources d'énergies nouvelles et renouvelables.

Des perspectives pouvant contribuer à l'amélioration de notre mini-centrale :

- Association d'autres types d'énergies renouvelables telle que l'énergie éolienne pour assurer plus d'autonomie en matière de consommation électrique.
- Association des dispositifs de stockage d'énergie surtout lorsque il y a des coupures d'électricité de longues durées.
- Avoir une bonne gestion des systèmes multi-sources par l'utilisation des équipements électriques qui ont un bon rendement et l'optimisation du temps de leur utilisation.

## BIBLIOGRAPHIE :

- [1] <http://unfccc.int>
- [2] <http://www.aprue.org.dz/publications.html>
- [3] <http://portail.cder.dz/spip.php?article932>
- [4] **A.Labouret et M.Villoz**, "Energie solaire photovoltaïque", Dunod 3<sup>ème</sup> édition, Paris 2006
- [5] <http://www.cite-sciences.fr/lexique/Site/upload/media/419/grand/soleil.swf>
- [6] [http://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin\\_002\\_07.pdf](http://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin_002_07.pdf)
- [7] **A.WEREME** "Contribution à la mise au point d'un modèle de calcul des composantes spectrales du rayonnement solaire au sol dans les conditions d'une atmosphère de brume sèche en Afrique sahélienne " Thèse de doctorat en sciences et techniques, université de Cheikh Anta Diop de Dakar, 2001.
- [8] [http://www.defcom92.ac-versailles.fr/article.php3?id\\_article=429](http://www.defcom92.ac-versailles.fr/article.php3?id_article=429)
- [9] Google Earth
- [10] **A.B.O.NDEFFOTSING**, "Exploitation des nouvelles capacités d'observation de la terre pour évaluer le rayonnement solaire", Thèse de doctorat en énergétique, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2009.
- [11] **John A. Duffie et William A. Beckman**, "Solar engineering of thermal processes", Wiley-Interscience 2<sup>ème</sup> édition, New York juin 1980.
- [12] <http://www.thermique55.com/principal/thermiquesolaire.pdf>
- [13] [http://www.san-fr.com/stele\\_gb/levercoucher.gif](http://www.san-fr.com/stele_gb/levercoucher.gif)
- [14] Station de météo de Chlef.
- [15] <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps3/pvest.php?lang=fr&map=europe>
- [16] **A.O.Mahmoud**, "Caractérisation, modélisation, fonctionnement et impact d'un système hybride pour l'alimentation de charges mixtes", Thèse de doctorat en énergie renouvelable, université de Cheikh Anta Diop de Dakar, 2008.
- [17] **O.GERGAUD**, "Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur", Thèse de doctorat en électrotechnique, école Normale Supérieure de Cachan, 2002.
- [18] <http://www.agriculture-durable.org/wp-content/uploads/2010/05/nrj6volets.pdf>
- [19] **J.L. BOBIN** et al, "L'énergie de demain", Edition EDP Sciences, France 2005.
- [20] **A.C.Pastor**, " Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques", Thèse de doctorat en Conception des Circuits Microélectroniques et Microsystèmes, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006.
- [21] **S.VIGHETTI**, "Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion", Thèse de doctorat en Génie Electrique, Université de Grenoble, 2010.
- [22] <http://www.edf.com/html/panorama/production/individuels/photovoltaique/intro.html>
- [23] Le photovoltaïque raccordé au réseau en milieu agricole, Guide d'aide au montage de projets portés par des exploitants ou sociétés agricoles, Rhône-Alpes Energie Environnement (RAEE) Édition 2009, France.
- [25] **C.Dubois**, "Le guide de l'éolien, techniques et pratiques", Édition Eyrolles, Paris 2009.
- [26] <http://www.iscience.ca/energieeo/ateliers/energieeoliennecomposantes.php>
- [27] [http://codev.pays-des-paillons.fr/fichiers/etatArt\\_ARENE+.pdf](http://codev.pays-des-paillons.fr/fichiers/etatArt_ARENE+.pdf)
- [28] <http://tpe-energie-eolienne.e-monsite.com/rubrique,-,16531,0.html>
- [29] <http://www.energiepropre.net/maison4.html>
- [30] [http://www.discip.ac-caen.fr/phch/college/troisieme/exos\\_interactifs/centrales\\_web/co/centrale\\_eolienne.html](http://www.discip.ac-caen.fr/phch/college/troisieme/exos_interactifs/centrales_web/co/centrale_eolienne.html)
- [31] [http://www.thermya.com/index\\_thermya.php?id=20](http://www.thermya.com/index_thermya.php?id=20)

- [32] [http://www.discip.ac-caen.fr/phch/college/troisieme/exos\\_interactifs/centrales\\_web/res/cent\\_biomasse.swf](http://www.discip.ac-caen.fr/phch/college/troisieme/exos_interactifs/centrales_web/res/cent_biomasse.swf)
- [33] <http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=38550&ref=14223&p1=111>
- [34] [http://ec.europa.eu/europeaid/where/acp/regional-cooperation/energy/documents/res\\_document\\_\\_position\\_biomasse\\_fr.pdf](http://ec.europa.eu/europeaid/where/acp/regional-cooperation/energy/documents/res_document__position_biomasse_fr.pdf)
- [35] **J. Virgone** et al, "Commande des systèmes multi-énergies pour les bâtiments à haute performance énergétique", Journée thématique SFT-IBPSA mars 2006
- [36] **L. Stoyanovet** al, "Optimisation des systèmes multi-sources de production d'électricité à énergies renouvelables", Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°1 (2007) 1 – 18
- [37] **J. Lagorse**, "Modélisation et optimisation d'alimentations électriques autonomes stationnaires multi-sources", Laboratoire SeT (Systèmes et Transports) — Université de Technologie de Belfort Montbéliard, JCGE'08 LYON, 2008
- [38] **E. FABRIZIO**, "Modélisation des systèmes multi énergies dans les bâtiments", Thèse de doctorat en Energetica et Génie Civil, L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2008
- [39] [http://www.didapix.com/anim1/anim\\_ph.swf](http://www.didapix.com/anim1/anim_ph.swf)
- [40] **Y. PANKOW**, "Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau Basse Tension. Application au générateur photovoltaïque", Thèse de doctorat en Electronique, Electrotechnique et Automatique, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre Nationale de Recherche Technologique de Lille 2004.
- [41] **A. Chouder et al.** "Etude comparative de simulation entre PVsyst3 et PSpice de la centrale photovoltaïque connectée au réseau du CDER", Revue des Energies Renouvelables CER'07 Oujda (2007) 131 – 136
- [42] **S. Zaamta et al.** "Réalisation d'un régulateur solaire à base de microcontrôleur pour le contrôle de l'état de charge et la protection des accumulateurs", Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°1 (2009) 137 – 147
- [43] **B. ABDELMALEK**, "Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque", Mémoire de magister en électronique, Université Mentouri de Constantine 2008
- [44] **M. Rachid**, "Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et Bouzareah", Mémoire de magister en Physique Energétique et Matériaux, Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen 2005
- [45] **N. Oleksiy**, "Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités", Thèse de doctorat en Génie Electrique, L'institut national des sciences appliquées de Lyon 2005
- [46] **A. Ould Mohamed Yahia et al**, "Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque", Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°3 (2008) 473 – 483
- [47] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Ferme\\_\(agriculture\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Ferme_(agriculture))
- [48] <http://www.tenesol.com/-Exploitations-agricoles-.html>
- [49] <http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89levage>
- [50] <http://societe.dz.lesnews.tk/2010/12/face-au-deficit-de-fourrage-vert-les.html>
- [51] [http://epe.cirad.fr/fr/doc/appel\\_ndj\\_2005.pdf](http://epe.cirad.fr/fr/doc/appel_ndj_2005.pdf)
- [52] <http://www.reussir-lait.com/actualites/algerie-une-production-laitiere-fortement-dependante-des-importations&fldSearch=:18528.html>
- [53] <http://ebookbrowse.com/l/la-ferme-des-animaux?page=5>
- [54] <http://tounane.maktoobblog.com/1519227/agriculture-forets-peche-et-chasse/>
- [55] **S. Kirat**, "Les conditions d'émergence d'un système d'élevage spécialisé en engraissement et ses conséquences sur la redynamisation de l'exploitation agricole et

- la filière des viandes rouges bovines - Cas de la Wilaya de Jijel en Algérie", Thèse « Master of Science », Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier 2006
- [56] Recensement Générale de l'Agriculture de l'année 2001, Ministère de l'Agriculture et du Développement rural  
<http://www.minagri.dz/pdf/RGA%20rapport%20general.pdf>
- [57] **J.COMPÈRE**, "Architecture agricole Bâtiments d'élevage", Techniques de l'Ingénieur C 4 140
- [58] Institut Elevage et Chambres d'agriculture de France  
[http://polebiomasseenergie.fr/%5Cdmdocuments%5Cb\\_\\_t\\_et\\_PV\\_2010\\_CA\\_Pays\\_Loire.pdf](http://polebiomasseenergie.fr/%5Cdmdocuments%5Cb__t_et_PV_2010_CA_Pays_Loire.pdf)
- [59] Guide d'aide au montage de projets portés par des exploitants ou sociétés agricoles Édition 2009  
[http://www.raee.org/administration/publis/upload\\_doc/20091109083851.pdf](http://www.raee.org/administration/publis/upload_doc/20091109083851.pdf)
- [60] [http://www.agri72.fr/bibliotheque\\_pdf/Infos%20Conseils/Energies/energies%20renouvelables/20100226\\_photovoltaique\\_.pdf](http://www.agri72.fr/bibliotheque_pdf/Infos%20Conseils/Energies/energies%20renouvelables/20100226_photovoltaique_.pdf)
- [61] Institut Elevage et Chambres d'agriculture de France  
[http://www.mp.chambagri.fr/IMG/pdf/photovoltaique\\_elevage.pdf](http://www.mp.chambagri.fr/IMG/pdf/photovoltaique_elevage.pdf)
- [62] [http://www.global-download.schneider-electric.com/85257578007E5C8A/all/896BD115C61A6CAB88257578006F2F59/\\$File/deswed105010fr.pdf](http://www.global-download.schneider-electric.com/85257578007E5C8A/all/896BD115C61A6CAB88257578006F2F59/$File/deswed105010fr.pdf)
- [63] [http://www.machinisme-agricole.wikibis.com/machine\\_a\\_traire.php](http://www.machinisme-agricole.wikibis.com/machine_a_traire.php)
- [64] [http://www.alliance-elevage.com/chep30\\_80\\_01\\_001\\_0800335\\_fiche\\_chariot\\_traite\\_vache\\_1p\\_1f\\_el.html#](http://www.alliance-elevage.com/chep30_80_01_001_0800335_fiche_chariot_traite_vache_1p_1f_el.html#)
- [65] <http://www.fao.org/docrep/003/x6550f/X6550F03.htm#ch111>.
- [66] <http://www.puitsbrunette.com/fr/services-et-produits/equipements-de-pompages.php>
- [67] <http://www.el-annabi.com/algerie/wilaya/chlef.htm>
- [68] <http://www.directindustry.fr/prod/saer/pompes-immergees-electriques-semi-axiales-pour-puit-d-eau-19914-505378.html>
- [69] <http://www.saerelettropompe.com/pict/download/S-151.pdf>
- [70] NREL (National Renewable Energy Laboratory). Getting started guide for HOMER version 2.1, April 2005
- [71] <http://www.photovoltaique.info/Couts-d-investissement.html>

## Résumé :

L'utilisation de l'énergie électrique dans l'agriculture représente une part non négligeable dans la consommation énergétique électrique nationale. L'élevage est l'un des secteurs qui consomme énormément l'énergie électrique. Les systèmes d'élevages en Algérie peuvent être classés en trois principaux systèmes à l'instar des pays d'Afrique du nord : le système d'élevage extensif pastoral, le système d'élevage en fermes et le système d'élevage familial. Face aux orientations nationales pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et pour réduire la consommation d'énergies de source fossile, ce projet de recherche s'intéresse à l'alimentation en énergie électrique de source renouvelable les systèmes d'élevage en ferme. Ainsi, le projet propose une étude sur l'état de l'art de la consommation électrique des fermes agricoles et de proposer des configurations pour la rationalisation de la consommation électrique et de simuler les performances d'une mini-centrale électrique multi-source pour l'alimentation en électricité des fermes agricoles en Algérie. Dans cette étude, la priorité est donnée pour les fermes éloignées des agglomérations en Algérie.

## Mots clés :

Effet de serre; Energie photovoltaïque; Énergie renouvelable; Fermes agricoles; Mini-centrale électrique.

## Abstract :

The use of electric energy in agriculture represents a significant part in the national electrical energy consumption. Livestock is one of the sectors that consume much electricity. Farming systems in Algeria can be classified into three major systems like the countries of North Africa: the system of extensive livestock pastoral, farming system in farms and family farming system. Meet national guidelines for reducing emissions of greenhouse gases and reduce energy consumption of fossil source, this research focuses on the supply of renewable electrical energy systems in farm livestock .Thus, the project proposes a study on the state of the art of the power consumption of farms and to propose configurations for rationalization of electricity consumption and simulate the performance of a mini-power station of multi-source of electricity to supply farms in Algeria. In this study, priority is given to farms away from urban areas in Algeria.

## Key words:

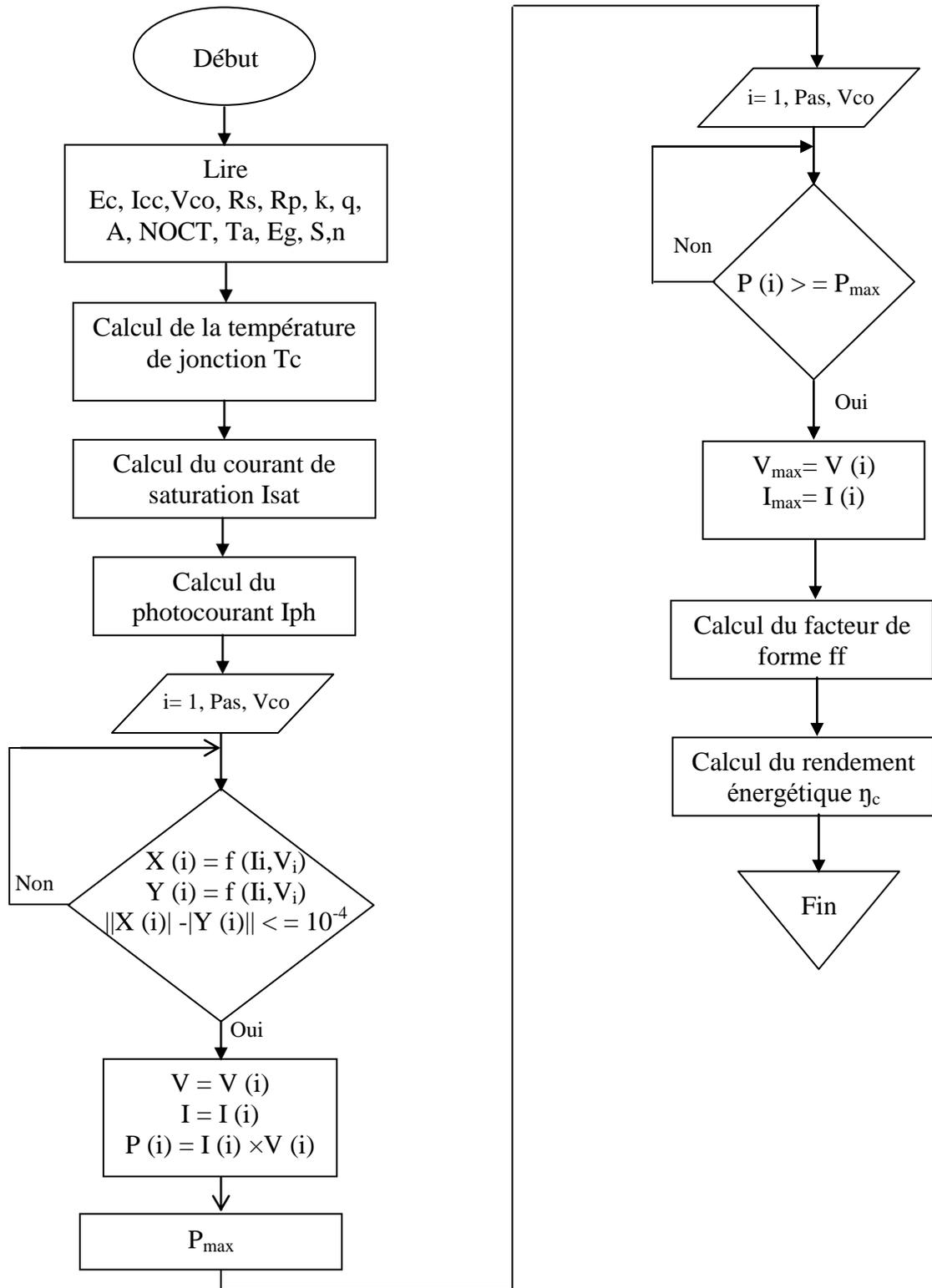
Farms; Greenhouse; Mini-power station; Photovoltaic energy; Renewable energy.

استخدام الطاقة الكهربائية في الفلاحة يشكل جزءا كبيرا في استهلاك الطاقة الكهربائية الوطنية. الثروة الحيوانية هي واحدة من القطاعات التي تستهلك الكهرباء كثيرا. ويمكن تقسيم تربية الحيوانات في الجزائر الى ثلاثة أنظمة رئيسية مثل بلدان شمال أفريقيا : نظام الرعي في المناطق السهلية نظام تربية الحيوانات في المزارع و نظام تربية الحيوانات في البيوت. تماشيا مع الأهداف الوطنية للحد من انبعاث غازات الاحتباس الحراري وخفض استهلاك الطاقة من المصادر التي تلوث المحيط، فهذا البحث يركز على تزويد المزارع الفلاحية بالطاقة من المصادر المتجددة. وبالتالي، فإن المشروع يقترح إجراء دراسة تحصى استهلاك الطاقة في المزارع الفلاحية واقتراح نموذج لاستهلاك الكهرباء بطريقة عقلانية و تصميم محطة مصغرة متعددة مصادر الطاقة لتزويد المزارع الفلاحية بالكهرباء في الجزائر. في هذه الدراسة، تعطى الأولوية للمزارع البعيدة عن المناطق الحضرية في الجزائر.

## الكلمات الرئيسية

الاحتباس الحراري ، الطاقة الشمسية ، الطاقة المتجددة ، المزارع ، محطات مصغرة للطاقة.

**Annexe A :**



Organigramme pour calculer et Tracer I (V) et P(V) d'une cellule PV réelle et d'un module PV réel.

## **Annexe B :**

### **Définition de HOMER :**

HOMER est un logiciel pour la simulation et l'optimisation de systèmes de génération électrique distribuée développé par le National Renewable Energy Laboratory (NREL). Le modèle doit être renseigné des ressources disponibles, des options technologiques, des coûts et des charges à respecter par le système. Les composants qui peuvent être modélisés sont des modules photovoltaïques, des éoliennes, des générateurs, des batteries, des convertisseurs AC/DC, des électrolyseurs, des réformateurs, des réservoirs d'hydrogène. Les éléments clés du modèle sont les deux AC et DC bus, auxquels chaque convertisseur doit être lié. Les charges peuvent être saisies en tant que profil de charge quotidien ou importées d'un fichier de données horaires.

### **Comment fonctionne le logiciel HOMER?**

En tout état de cause, les valeurs horaires des charges doivent être définies pour chacune des 8760 heures d'une année. En ce qui concerne les composants, des fonctions de coût linéaires sont adoptées et les dimensions des composants à prendre en considération doivent être préalablement prévues afin de réaliser l'optimisation. Le nombre de tailles multiplié par le nombre de composants donne le nombre de configurations de systèmes simulés par le programme. HOMER est un modèle de séries chronologiques et effectue un bilan énergétique horaire le long d'une année pour chaque configuration de système rentrée par l'utilisateur. Il affiche ensuite la liste des configurations de systèmes triés par le coût actuel net (qui combine le coût en capital - annualisé par l'amortissement du composant au cours de sa durée de vie en utilisant les taux d'actualisation réelle – et celui de remplacement, fonctionnement et entretien).

HOMER est largement utilisé et accepté comme un outil de simulation distribué, tant au niveau national que international. De nombreuses analyses de systèmes énergétiques hybrides ont été effectuées à l'aide de cet outil et ont été publiées sous forme d'articles, en particulier sur la revue « Renewable Energy » : voir par exemple les travaux de Iqbal pour des applications dans les Newfoundland (au Canada), Shaahid et Elhadidy pour les systèmes hybrides photovoltaïques-diesel-batteries, Beccali et al pour les systèmes à hydrogène.

## Etapes d'analyse

- 1<sup>ère</sup> Etape : Formuler une question à laquelle HOMER peut répondre :
- 2<sup>ème</sup> Etape : Créer une nouvelle interface du logiciel HOMER
- 3<sup>ème</sup> Etape : Construire une configuration
- 4<sup>ème</sup> Etape : Entrer la demande d'énergie par heure
- 5<sup>ème</sup> Etape : Entrer les caractéristiques des installations d'alimentation électrique
- 6<sup>ème</sup> Etape : Entrer les caractéristiques des sources d'énergie
- 7<sup>ème</sup> Etape : Vérification des données et correction des erreurs
- 8<sup>ème</sup> Etape : Examen des résultats optimisés
- 9<sup>ème</sup> Etape : Affinement des résultats
- 10<sup>ème</sup> Etape : Ajout et analyse de sensibilité pour certaines variables

## Comment HOMER calcule la Puissance à la sortie du module PV

HOMER utilise l'équation suivante pour calculer la puissance à la sortie du module  $P_{pv}$  :

$$P_{PV} = Y_{PV} f_{PV} \left( \frac{\overline{G}_T}{\overline{G}_{T,STC}} \right) \left[ 1 + \alpha_P (T_c - T_{c,STC}) \right]$$

$Y_{PV}$  : Puissance dans les conditions de test standard [kW]

$f_{PV}$  : Facteur de correction [%]

$\overline{G}_T$  : Irradiation solaire incidente [kW/m<sup>2</sup>]

$\overline{G}_{T,STC}$  : Irradiation solaire incidente dans les conditions de test standard [1 kW/m<sup>2</sup>]

$\alpha_P$  : Coefficient de température [%/°C]

$T_c$  : Température de la cellule [°C]

$T_{c,STC}$  : Température de la cellule dans les conditions de test standard [25 °C]

## Calcul de l'irradiation solaire incidente :

$$\overline{G}_T = (\overline{G}_b + \overline{G}_d A_i) R_b + \overline{G}_d (1 - A_i) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left[ 1 + f \sin^3 \left( \frac{\beta}{2} \right) \right] + \overline{G} \rho_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

$\overline{G}_b$  : Irradiation direct [kW/m<sup>2</sup>]

$\overline{G}_d$  : Irradiation diffuse [kW/m<sup>2</sup>]

$A_i$  : indice de clarté de l'atmosphère.

$\overline{G}$  : Irradiation globale [kW/m<sup>2</sup>]

$R_b$  : Rapport entre l'indice de clarté pour une irradiation incidente sur une surface inclinée et celui d'une irradiation incidente sur une surface horizontale.

$\beta$  : Angle d'inclinaison [°]

$\rho_g$  : Albedo [%]

$f$  : Fraction diffuse horaire entre Irradiation direct et Irradiation globale.

### Calcul de la Température de la cellule :

$$T_c = T_a + G_T \left( \frac{\tau\alpha}{U_L} \right) \left( 1 - \frac{\eta_c}{\tau\alpha} \right)$$

$\tau$  : Transmittance du module PV [%]

$\alpha$  : Absorption du module PV [%]

$G_T$  : Irradiation solaire incidente [kW/m<sup>2</sup>]

$\eta_c$  : facteur de conversion électrique du module PV [%]

$U_L$  : Coefficient de transfert de chaleur [kW/m<sup>2</sup>°C]

$T_a$  : Température ambiante [°C]