

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR**  
**ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE DES FRERES MENTOURI-CONSTANTINE 1**  
**FACULTE DES SCIENCES EXACTES**  
**DEPARTEMENT DE PHYSIQUE**

N°d'ordre :.....

Série :.....

**THESE**

**PRESENTEE POUR OBTENIR LE DIPLOME DE DOCTORAT EN SCIENCES**

**SPECIALITE : PHYSIQUE**

**OPTION : ENERGETIQUE**

**THEME :**

**Elaboration d'une Stratégie Optimale pour l'Exploitation Combinée des  
Energies Renouvelables**

**Par : BELHOUR Souad**

**Soutenue le 17/03/2016**

**Devant le jury :**

<b>Président :</b>	<b>A. CHAKER</b>	<b>Prof.</b>	<b>Université des Frères Mentouri-Constantine 1</b>
<b>Rapporteur :</b>	<b>A. ZAATRI</b>	<b>Prof.</b>	<b>Université des Frères Mentouri-Constantine 1</b>
<b>Examineurs :</b>	<b>T. KERBACHE</b>	<b>Prof.</b>	<b>Université des Frères Mentouri-Constantine 1</b>
	<b>C. AZIZI</b>	<b>Prof.</b>	<b>Université Larbi Ben M'hidi -Oum El Bouaghi</b>
	<b>A. NOUIRI</b>	<b>Prof.</b>	<b>Université Larbi Ben M'hidi -Oum El Bouaghi</b>
	<b>M. DRAIDI</b>	<b>M.C.A</b>	<b>Université Larbi Ben M'hidi -Oum El Bouaghi</b>

أعوذ بالله من الشيطان الرجيم

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

لَبَّ أَوْعَيْهِ أَنْ أَشْكُرَ نِعْمَتَكَ الَّتِي أَنْعَمْتَ عَلَيَّ وَعَلَىٰ وَالِدَيَّ وَأَنْ

أَعْمَلَ بِهَا إِتْقَانًا وَأَمَانَةً بِرَحْمَتِكَ فِي عِبَادَتِكَ الصَّالِحِينَ

صَدَقَ اللَّهُ الْعَظِيمُ

# اهداء

للى كل من اضا اعمل مه عقل غيره  
أو هدى بل جواب الص صح جي ورة اى اى ه  
فأظهر بسم اح ت مواض علا لغ مء  
ور حلت هس ماح ة لا رغ ين .

إلى من تتسبب لظلمت لتخرج ميعوق عن مكن و نذاته  
إلى من غمق يال ص مود م همت بتل تال ظروف وعل تل ص عاب لأجلي  
للى من بلح في بحر حانه  
للى ولاتى لا غلية لتى لم أ ج هدى تى تى وتوحي هي  
...إلى أمي

إلى النور الذى يهين لى درب النجاح  
وسبب وجود في الحياة  
لك كل التلحى ولحترام

ولادى الهجى ب...أبى

للى أحبل الناس ويطبهم  
للى من ألح صالى وصرع ل عشق اوتى

..إلى زوجى

للى فلة بك بدي نور عني  
للى أجمل أحلام سريني  
للى قمر مبهلى لشر اقرن نفسى  
للى س لى و م ح مبراء

..إلى والدى

إلى من كان ولياً ضيقاً لي الطريق  
ويستدوني حين لنون عن حقوقهم لإرضائي ولعش في فناء  
حُبكم صلا لو مر لي أَرْضِقْ لِي لِقْفِ جرت من هويته لي ع ل م حمة  
...إلى أخوتي

إلى زوجتي أخي وأهلي زوجي  
إلى الأساتذة الذين ساعدوني في تصحيح رسالة دكتوراه  
إلى أصدقائي الذين وقفوا لي جلي  
إلى زملائي وفيأتي

إلى الشموع التي تشرق بضياء آل خين  
إلى كل من غفني حفا  
أهدي هذا للبحث لتوضيح رأيي من الملوى  
عز وجل أني الحق بول والنجاح

سعاد

# Dédicace

*À la mémoire de mon grand père et ma grande mère*

*À la plus belle créature que Dieu a créée sur terre,,,*

*À cet source de tendresse, de patience et de générosité,,,*

*À ma mère et mon père !*

*À mon mari qui a toujours était à mes cotés*

*À mes chères enfants : Salsabile, Mohamed baraa*

*À tous mes frères et soeurs, ainsi que leurs enfants*

*À ma belle soeur .*

*À mes beaux-parents et à toute ma famille*

*À Monsieur Salim Mahtali (Professeur au département de physique)*

*À Monsieur le directeur de l'institut de physique*

*À tous mes amis et collègues*

*À tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer .....*

*Souad*

# Remerciements

*Tout d'abord remercions Dieu tout puissant qui nous a éclairés vers le bon chemin*

*Le présent travail a été réalisé dans le laboratoire LATA, de l'Université MENTOURI Constantine.*

*En premier lieu, je tiens à remercier Monsieur Abdelouahab. ZAATRI, Professeur au département de mécanique, Université Mentouri Constantine, mon directeur de thèse, à qui j'exprime toute ma reconnaissance et ma gratitude. Ses compétences scientifiques et sa disponibilité, ses conseils et ses qualités humaines m'ont permis de mener à bien ce travail.*

*Mes vifs remerciements vont à Madame Abla. CHAKER, Professeur au département de physique de l'Université MENTOURI Constantine, d'avoir accepté de présider le jury d'examen.*

*Mes remerciements vont également à Monsieur Tahar. KERBACHE, Professeur au département de physique, Université MENTOURI Constantine, d'avoir accepté de juger ce document*

*Je remercie également Madame Cherifa. AZIZI, Professeur au département des sciences de la matière, Université Larbi Ben M'hidi (Oum El Bouaghi) d'avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse.*

*Mes remerciements vont également à Monsieur Abdelkader. NOURI, Professeur au département des sciences de la matière, Université Larbi Ben M'hidi (Oum El Bouaghi), qui me fait l'honneur d'accepter de juger ce travail.*

*Que Monsieur Mourad .DRAIDI, Maître de conférences au département des sciences de la matière, Université Larbi Ben M'hidi (Oum El Bouaghi) trouve ici l'expression de reconnaissance d'avoir accepté de faire parti de mon jury de thèse*

# **Table des matières**

**Table des matières**

**Introduction générale.....1**

**Chapitre1**

**Etat de l’Art sur les Energies Renouvelables**

**Introduction.....7**

**1 Les systèmes énergétiques.....7**

    1.1 Les énergies fossiles.....7

        1.1.1 Classification .....7

        1.1.2 Avenir.....9

    1.2 L'énergie nucléaire .....9

    1.3 Les énergies renouvelables.....10

**2 Les sources d'énergies renouvelables .....11**

    2.1 L'énergie photovoltaïque.....11

        2.1.1 Description des éléments d'un système de captage photovoltaïque.....11

        2.1.2 Le module photovoltaïque .....12

        2.1.3 Le panneau solaire .....14

        2.1.4 Les utilisations de l'énergie solaire photovoltaïque.....15

        2.1.5 Avantages et inconvénients d'une installation PV.....16

    2.2 L'énergie éolienne.....17

        2.2.1 Histoire des éoliennes.....17

        2.2.2 Les différents types d'éoliennes.....18

        2.2.3 Eléments constitutifs d'un aérogénérateur a axe horizontal .....18

        2.2.4 Principe de fonctionnement .....20

        2.2.5 Puissance récupérable par une turbine .....20

        2.2.6 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne.....21

        2.2.7 Les avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....23

    2.3 L'énergie photothermique.....24

        2.3.1 Les utilisations de l'énergie solaire thermique.....24

        2.3.2 Les avantages et les inconvénients de l'énergie photothermique.....25

    2.4 L'énergie biomasse.....25

        2.4.1 Sources de biomasse.....26

        2.4.2 Valorisation de la biomasse .....27

        2.4.3 L'utilisation de la biomasse.....27

        2.4.4 Les avantages et les inconvénients de l'énergie biomasse.....28

**3 Potentiels des énergies renouvelables en Algérie.....28**

    3.1 Potentiel solaire.....28

    3.2 Potentiel éolien .....30

    3.3 Potentiel géothermique.....31

    3.4 Potentiel hydroélectrique.....31

    3.5 Le potentiel de la biomasse.....31



3.5.1 Potentiel de forestier .....	31
3.5.2 Potentiel énergétique des déchets urbains et agricoles.....	31
<b>4 Les systèmes d'énergie hybrides (SEH) .....</b>	<b>32</b>
4.1 Définition .....	32
4.2 Classification.....	32
4.2.1 Le régime du fonctionnement.....	32
4.2.2 La structure du système hybride.....	32
4.3 Etudes des systèmes hybrides.....	33
4.3.1 Les combinaisons les plus courantes.....	33
4.3.2 Critères d'optimisation et logiciels de dimensionnement.....	33
4.3.2.1 Critères d'optimisation du système hybride.....	33
4.3.2.2 Logiciels pour l'étude des systèmes hybrides.....	34
4.4 Aperçu sur l'état de l'art des systèmes hybrides.....	34
<b>Conclusion.....</b>	<b>37</b>

## Chapitre2

### Les Systèmes D'Énergies Renouvelables Développées

<b>Introduction.....</b>	<b>40</b>
<b>1 Énergie photovoltaïque.....</b>	<b>40</b>
1.1 Modèle de la cellule solaire .....	40
1.1.1 Modèle de la cellule photovoltaïque .....	40
1.1.2 Expression de la caractéristique $I-V$ .....	41
1.2 Reconstitution de la caractéristique $I-V$ .....	42
1.2.1 Caractéristiques expérimentales du module solaire .....	42
1.2.2 Détermination des paramètres de la cellule .....	43
1.2.3 Représentation graphique.....	44
1.3 Expressions de la puissance .....	46
1.3. 1 Expression de la puissance en fonction du courant.....	46
1.3. 2 Expression de la puissance en fonction de la tension .....	48
1.4 Estimation de la puissance .....	50
1.4.1 Influence de l'éclairement et de la température .....	50
1.4. 2 Influence de la charge d'utilisation .....	51
1.4.3 Influence de l'orientation du module photovoltaïque .....	52
1.5 Calcul de la puissance à la sortie du module PV par quelques modèles mathématiques.....	52
1.5.1 Première approche .....	52
1.5.2 Deuxième approche.....	53
1.5.3 Troisième approche.....	54
1.5.4 Quatrième approche (Modèle de Jones et Underwood(2002)).....	55
1.6 La relation entre la puissance et la surface.....	56
1.7 Interface graphique.....	75
<b>2 Énergie éolienne.....</b>	<b>85</b>
2.1 Caractérisation de la Vitesse du Vent .....	75
2.1.1 Variation mensuelle de la vitesse du vent .....	75
2.1.2 Variations annuelles de la vitesse du vent .....	06
2.1.3 Détermination des caractéristiques statistiques.....	06
2.1.4 Variation de la vitesse du vent selon la hauteur.....	06
2. 2 Conception et réalisation de l'éolienne .....	06
2. 2.1 Conception des pales.....	06
2. 2.2 Conception de l'aérogénérateur.....	06
2.3. Estimation énergétique.....	06
2.3.1 Coefficient de puissance $C_P$ .....	06
2.3.2 La relations entre la puissance et la surface .....	00
2.3.3 Interface graphique et estimation énergétique .....	05
<b>3 Énergie photothermique.....</b>	<b>85</b>
<b>4 Énergie biomasse.....</b>	<b>07</b>
4.1 Système bioréacteur anaérobie .....	56
4.2 Relation entre la puissance et la surface .....	56

<b>Conclusion.....</b>	<b>71</b>
------------------------	-----------

### Chapitre3

## Système de Minimisation des Pertes de Conversion d'Energie PWM

<b>Introduction.....</b>	<b>74</b>
<b>Position du problème de conversion.....</b>	<b>74</b>
<b>1 Etude théorique du système.....</b>	<b>76</b>
1.1 Approche mathématique de l'élément « $N$ » .....	76
1.1.1 Equation caractéristique de l'élément « $N$ » .....	77
1.1.2 Comportement de l'élément ( $N$ ).....	78
1.2 Détermination des instants de commutation.....	79
1.2.1 Etude du système du 1er ordre .....	79
1.2.1.1 Détermination des durées d'impulsions.....	80
1.2.1.2 Détermination de la valeur moyenne de $U(t)$ .....	82
1.2.2 Etude du système du 2eme ordre.....	83
1.2.2.1 Détermination des durées d'impulsions .....	84
1.2.2.2 Analyse de la période d'oscillation du WRT en fonction du facteur d'amortissement.....	85
<b>2 Réalisation du hacheur PWM.....</b>	<b>86</b>
2.1 Relation du système étudié avec les alimentations à découpage .....	87
2.2 Réalisation du circuit.....	87
<b>3 Simulation essais et mesures.....</b>	<b>90</b>
3.1 Simulation du hacheur .....	90
3.1.1 Simulation du circuit du 1er ordre.....	91
3.1.1.1 Identification des éléments du circuit .....	91
3.1.1.2 Résultats de simulation.....	91
a- Variation des durées d'impulsions en fonction de la consigne $f_0$ .....91	
b- Variation de la période en fonction de la constance de temps $\tau$ .....	92
3.1.2 Simulation du circuit du 2eme ordre.....	94
3.1.2.1 Paramètre des éléments .....	94
3.1.2.2 Résultats de simulation .....	95
a- Variation de la période « $T$ » en fonction de « $\zeta$ » .....	95
b- Variation de la période « $T$ » en fonction de la tension « $E$ » .....	96
3.2 Essais et résultats expérimentaux.....	96
3.2.1 Systèmes du 1er ordre.....	97
3.2.1.1 Etude de la fréquence de découpage en fonction de $f_0$ .....	97
3.2.1.2 Comparaison des résultats.....	98
a- Etude de la fréquence de découpage en fonction de $f_0$ .....	98

b- Période $T$ en fonction de la constante du temps $\tau$ .....	99
c- Etude de la tension de sortie ( $U_m$ ) en fonction de la consigne $f_0$ .....	100
3.2.2 Système du 2eme ordre.....	101
3.2.2.1 Durées des impulsions $T_1$ , $T_2$ et $T$ en fonction de $f_0$ .....	101
3.2.2.2 La Variation de $T$ par rapport à $\xi$ avec les autres paramètres constants.....	102
<b>Conclusion.....</b>	<b>103</b>

## Chapitre 4

### Les Systèmes Hybrides et la Répartition Optimale de Différentes Ressources D'Energies Renouvelables

<b>Introduction .....</b>	<b>106</b>
<b>1 Un système hybride expérimental.....</b>	<b>107</b>
1.1 Schéma d'un système hybride général.....	107
1.2 Système hybride proposé.....	108
<b>2 L'estimation des ressources énergétiques .....</b>	<b>109</b>
2.1 Estimation de l'énergie photovoltaïque annuelle.....	109
2.2 Estimation de l'énergie éolienne annuelle .....	110
2.3 Estimation de l'énergie thermique annuelle .....	111
2.4 Estimation de l'énergie biogaz annuelle (production de biogaz) .....	112
<b>3 Couplage et intégration des systèmes énergétiques.....</b>	<b>113</b>
3.1 La puissance totale .....	113
3.2 La puissance électrique totale.....	114
<b>4 Le modèle mathématique hybride proposé.....</b>	<b>116</b>
<b>5 L'optimisation.....</b>	<b>117</b>
5.1 Définition d'une programmation linéaire (PL) .....	118
5.2 Les conditions de formulation d'un PL.....	118
5.3 Les étapes de formulation d'un PL .....	118
5.4 Formes et bases réalisables de PL.....	119
5.4.1 Formulation et expression générale d'un PL.....	120
5.4.2 Forme canonique.....	122
5.4.3 Forme standardisée d'un PL.....	123
5.5 Les méthodes de résolution des programmes linéaires (PL) .....	125
5.5.1 Méthodes de programmation linéaire dans le cas de variables continues.....	125
5.5.1.1 La méthode du simplexe.....	125
5.5.1.2 Automatisation de la procédure du simplexe.....	126
5.5.1.3 Cas de dégénérescence.....	127
5.5.2 La programmation linéaire (PL) avec contraintes d'égalité.....	127

5.5.3 Cas de programmation linéaire (PL) en nombres entiers.....128  
**Conclusion.....129**

**Chapitre 5**

**Simulation de Scénarios d’Optimisation des Energie Renouvelables  
Hybrides**

**Introduction .....132**  
**1 Les problèmes hybrides.....132**  
1.1 Cas d’énergie continue.....133  
1.1.1 Pour deux ressources.....133  
1.1.1.1 Applications.....133  
1.1.1.2 Commentaires.....134  
1.1.2 Pour trois ressources.....135  
1.1.2.1 Applications.....135  
1.1.2.2 Commentaires.....136  
1.1.3 Pour quatre ressources.....136  
1.1.3.1 Applications.....136  
a Exemple 1 pour la région (a et b) .....137  
b Exemple 2 pour la région (1, 2, et 3) .....138  
1.1.3.2 Commentaires.....139  
a Pour la région (a et b) .....139  
b Pour la région (1, 2, et 3) .....139  
1.2 Cas d’énergie discontinue.....140  
1.2.1 Applications.....141  
1.2.1.1 Energies électriques (photovoltaïque /éolienne) .....141  
1.2.1.2 Energies thermique (photothermique / biomasse) .....141  
1.2.2 Résultats.....142  
1.2.2.1 Energies électriques (photovoltaïque /éolienne) .....142  
1.2.2.2 Energies thermiques (photothermique / biomasse) .....143  
1.2.3 Commentaires.....143  
1.2.4 La sensibilité de la solution par rapport à un coût unitaire.....144  
1.2.5 Graphique.....145  
**2 Interface graphique.....146**  
**Conclusion.....147**  
**Conclusion Générale.....149**  
**Bibliographie.....152**  
**Liste des Publications.....159**  
**Liste des abréviations.....160**

# Liste des figures

Liste des figures

**Figure (1-1):** Production annuelle nette d'électricité dans le monde (1980-2011)..... 10

**Figure (1-2):** Production annuelle nette d'électricité par des énergies renouvelables dans le monde (1980-2011)..... 11

**Figure (1-3):** Présentation schématique d'une cellule solaire..... 12

**Figure (1-4):** Module photovoltaïque..... 13

**Figure (1-5):** Panneau de solaire [10, 15]..... 14

**Figure (1-6):** La puissance Installée Mondiale de 1996 à 2014..... 17

**Figure (1-7):** Technologies d'éoliennes..... 18

**Figure (1-8):** Les composantes de l'aérogénérateur..... 19

**Figure (1-9):** Coefficient aérodynamique de puissance en fonction de la vitesse de rotation normalisée  $\lambda$  [28]. ..... 21

**Figure (1-10):** Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent. 22

**Figure (1-11):** Le cycle de production de biomasse [34]. ..... 26

**Figure (1-12):** Irradiation globale journalière reçue sur un plan horizontal au mois de Juillet et de décembre..... 29

**Figure (1-13):** Irradiation globale journalière reçue sur plan normal au mois de Décembre et Juillet..... 30

**Figure (1-14):** Tracé des vitesses moyennes du vent à 10 m du sol..... 30

**Figure (2-1):** Schéma équivalent de la cellule solaire..... 41

**Figure (2-2):** Vue du panneau solaire utilisé..... 43

**Figure (2-3):** Caractéristique  $I - V$  en conditions standards..... 45

**Figure (2-4):** Caractéristiques  $I - V$  paramétrées par  $I_L$  ..... 46

**Figure (2-5):** Puissance en fonction du courant  $P = f(I)$  pour diverses valeurs de  $I_L$  ..... 47

**Figure (2-6):** Puissance en fonction de la tension paramétrée par  $I_L$  ..... 49

**Figure (2-7):** Variation de la puissance en fonction de la charge..... 51

**Figure (2-8):** Profil de la puissance maximale journalière correspondant à la première approche ..... 53

**Figure (2-9):** Profil de la puissance maximale journalière correspondant à la deuxième approche ..... 54

**Figure (2-10):** Circuit équivalent à une diode [38]..... 54

<b>Figure (2-11)</b> : La variation de la puissance photovoltaïque en fonction de la surface pour différentes valeurs de $G$ .....	56
<b>Figure (2-12)</b> : La variation de la surface photovoltaïque en fonction de la puissance pour différentes valeurs de $G$ .....	57
<b>Figure (2-13)</b> : Schéma pour l'estimation de la puissance du système photovoltaïque.....	57
<b>Figure (2-14)</b> : Fenêtre graphique.....	58
<b>Figure (2-15)</b> : La variation de la vitesse moyenne du vent en fonction des mois.....	59
<b>Figure (2-16)</b> : La variation de la vitesse moyenne annuelle entre 1983-2008.....	60
<b>Figure (2-17)</b> : La variation de la vitesse du vent avec l'altitude.....	61
<b>Figure (2-18)</b> : L'éolienne expérimentale.....	62
<b>Figure (2-19)</b> : Profil NACA 23015.....	62
<b>Figure (2-20)</b> : La variation de $r$ en fonction de $R$ .....	63
<b>Figure (2-21)</b> : Composants de l'aérogénérateur.....	64
<b>Figure (2-22)</b> : Coefficient de puissance en fonction de $\lambda$ .....	65
<b>Figure (2-23)</b> : La variation de la puissance éolienne en fonction de la surface pour différentes valeurs de $V$ .....	66
<b>Figure (2-24)</b> : La variation de la surface éolienne en fonction de la puissance pour différentes valeurs de $V$ .....	66
<b>Figure (2-25)</b> : Interface graphique.....	67
<b>Figure (2-26)</b> : Puissance mécanique en fonction de la vitesse du vent pour différents rayons.....	68
<b>Figure (2-27)</b> : Système bioréacteur anaérobie expérimental.....	70
<b>Figure (2-28)</b> : La puissance de la biomasse en fonction de la surface pour différentes valeurs de $h$ .....	71
<b>Figure (3-1)</b> : Schéma du système asservi.....	76
<b>Figure (3-2)</b> : Courbe de la variation de La fonction de transfert $U(t) = f\{X(t)\}$ .....	78
<b>Figure (3-3)</b> : Les tensions d'entrées et sorties $X(t)$ et $U(t)$ .....	79
<b>Figure (3-4)</b> : Filtre passe bas de 1 <sup>er</sup> ordre.....	79
<b>Figure (3-5)</b> : Filtre passe bas de 2 <sup>eme</sup> ordre.....	83
<b>Figure (3-6)</b> : Le circuit de l'alimentation à découpage.....	89
<b>Figure (3-7)</b> : Système expérimental.....	90
<b>Figure (3-8)</b> : Schéma de simulation du système de 1er ordre sur Simulink.....	91



<b>Figure (3-9):</b> Durée d'impulsion en fonction de $f_0$ .....	92
<b>Figure (3-10):</b> Durée d'impulsion en fonction de $\tau$ .....	93
<b>Figure (3-11):</b> Schéma de système de 2eme ordre sur Simulink.....	94
<b>Figure (3-12) :</b> Signal de sortie et d'entrée pour différentes valeur de $\xi$ .....	95
<b>Figure (3-13):</b> Signal de sortie et d'entrée pour différentes valeur de $E$ .....	96
<b>Figure (3-14):</b> Images de l'oscilloscope montrant $U(t)$ et $Z(t)$ .....	97
<b>Figure (3-15):</b> Les durées d'impulsions en fonction de $f_0$ .....	99
<b>Figure (3-16):</b> Evolution de la période $T$ en fonction de $\tau$ .....	99
<b>Figure (3-17):</b> Tension moyenne $U_m$ en fonction de la consigne $f_0$ .....	100
<b>Figure (3-18):</b> Durées des impulsions en fonction de $f_0$ .....	101
<b>Figure (3-19):</b> La variation de $T$ en fonction de $\xi$ .....	102
<b>Figure (4-1):</b> Schéma pour la Conception de Système Hybride général.....	107
<b>Figure (4-2-a):</b> Schéma pour la Conception de Système Hybride proposé.....	108
<b>Figure (4-2-b):</b> Système hybride expérimental.....	109
<b>Figure (4-3):</b> Le profil de la puissance totale journalier.....	114
<b>Figure (4-4):</b> La séparation entre les besoins et la puissance stockée en une journée.....	114
<b>Figure (5-1):</b> Répartition des ressources obtenue pour l'exemple1.....	133
<b>Figure (5-2):</b> L'analyse graphique d'une solution de programmation linéaire en nombres entiers.....	146
<b>Figure (5-3):</b> Interface Graphique Utilisateur.....	146

# **Introduction générale**

## **Introduction générale**

La croissance de la demande énergétique induite par l'augmentation de la population et de ses besoins croissants pour les prochaines années, la limitation des ressources en hydrocarbures et les dangers liées à leur exploitation comme la pollution des eaux par le gaz de schiste, le danger qui peut être causé par les accidents des centrales nucléaires et leurs déchets constituent autant de préoccupations sérieuses pour la communauté internationale. De plus, depuis 1997 (protocole de Kyoto), le réchauffement planétaire est devenu un souci majeur pour la communauté internationale qu'il faut absolument prendre en charge sous peine de compromettre l'avenir de l'humanité par les dangers qu'il engendrerait.

Des lors, il s'avère extrêmement urgent de trouver, et dès à présent une alternative fiable et mieux adaptée aux problèmes liés au respect de l'environnement et aux contraintes posées par les ressources d'énergies classiques comme les hydrocarbures et le nucléaire. A ce titre, les énergies renouvelables (ER) peuvent constituer une solution palliative à ce problème.

Néanmoins, pour satisfaire une demande énergétique de plus en plus importante, pour un endroit donné ayant des ressources énergétiques renouvelables données, la conception d'un système basé sur une seule ressource renouvelable conduit généralement à un surdimensionnement énergétique. A titre d'exemple, si l'on considère l'énergie solaire dans sa forme photovoltaïque ou thermique, l'énergie éolienne et l'énergie produite par la biomasse, ce surdimensionnement est du au fait qu'il faut tenir compte de la nature aléatoire dans le temps et distribuée dans l'espace de la ressources renouvelable utilisée.

### **Motivation et contexte**

Dans ce contexte, les énergies renouvelables (ER) constituent en principe une alternative aux énergies classiques pour un développement durable. Néanmoins, la conception d'un système basé sur une seule ressource renouvelable conduit généralement à un surdimensionnement énergétique.

En effet, chacune de ces sources d'énergie est fluctuante et dépend de nombreux facteurs comme le lieu, les conditions météorologiques, la saison, etc. Ce surdimensionnement est du aussi au fait, qu'il faut non seulement satisfaire la demande énergétique à un moment donnée mais aussi prévoir des capacités supplémentaires pour son stockage en vue de son utilisation ultérieure au cas où elle viendrait à manquer. Il y a lieu donc de considérer que ce surdimensionnement énergétique se traduit en général par une occupation spatiale exagéré (grande surface de panneaux photovoltaïque, grande pales de l'éolienne, grand bio digesteur, ..). Par conséquent, cela conduit à une élévation de la complexité technologique de l'installation et de son coût. De même, avec une seule source d'énergie, il peut y avoir des pertes par conversion à cause de différentes types d'utilisation de la forme de l'énergie demande (électrique, thermiques,..).

En vue de réduire le coût du système énergétique basé sur une seule ressource renouvelable, notre approche consiste à considérer en fonction des caractéristiques zonales et de la demande, la combinaison de deux ou plusieurs ressources renouvelables qui sont disponibles

(solaire photovoltaïque, solaire photo - thermique, énergie éolienne, biogaz obtenu par bio réacteurs anaérobies).

### **Objectifs de la thèse**

Aussi, le travail de recherche proposé dans cette thèse consiste à élaborer une stratégie optimale qui vise l'autonomie énergétique de la région au moindre coût. Cela signifie qu'il faut étudier, modéliser, analyser et concevoir un système énergétique qui combine de façon complémentaire les énergies renouvelables du lieu donné pour satisfaire la demande donnée.

Le travail consiste à effectuer dans une première phase une étude théorique, la modélisation, la simulation, ainsi que la réalisation de prototypes expérimentaux individuellement (solaire photovoltaïque, photo thermique, éolien, bioréacteur à méthane). Cette étude sera suivie d'une analyse critique qui devrait permettre de dégager les paramètres influençant le rendement et le coût de chaque système énergétique ainsi que leur comparaison.

Dans une deuxième étape, le travail devrait considérer le couplage de ressources renouvelables en vue de dégager la meilleure combinaison en tenant compte des potentialités énergétiques du lieu, de ses caractéristiques, de la demande ainsi que des capacités financières à court et moyen terme. Ainsi, le modèle énergétique et environnemental local proposé par l'approche envisagée devraient pouvoir se reproduire pour s'adapter au contexte régional.

### **Contributions**

\* L'étude théorique des systèmes photovoltaïques et l'analyse des paramètres internes et externes des cellules photovoltaïques en se basant sur le recueil les données de mesures de l'éclairement, de la température sur une longue période. On a entrepris une étude qui a permis de reconstituer la caractéristique I-V du panneau solaire utilisé en se basant sur les données du constructeur et des mesures en vue de pouvoir déterminer la puissance d'un système photovoltaïque. On a fait suivre cette étude par une analyse critique qui a permis de dégager les paramètres influençant le rendement et le coût de chaque système photovoltaïque utilisé. On a participé à la conception et à la réalisation du prototype expérimental PV de notre laboratoire.

\* la conception et à la réalisation d'une éolienne tripale au niveau de notre laboratoire. On a analysé et mis en évidence une expression qui permet d'estimer l'énergie annuelle produite par une éolienne tripale. Cette expression relie l'énergie annuelle produite aux caractéristiques régionales (latitude, longitude, hauteur, angle d'orientation du panneau), aux caractéristiques climatiques de la région (température, éclairement, vitesse du vent) ainsi qu'à caractéristiques spécifiques et dimensionnelles de l'éolienne (longueur des pales, profil NACA, etc.).

\*L'analyse et mis en évidence une expression qui permet d'estimer l'énergie annuelle produite par un bio digesteur en fonction des caractéristiques internes et environnementales, après étudié les modèles théoriques pour la production du méthane par digesteurs anaérobies. Et on a participé à la conception et à la réalisation d'un digesteur expérimental au niveau de notre laboratoire.

\*L'étude théorique des systèmes photothermiques et a participé à la conception et à la réalisation des capteurs photothermiques au niveau de notre laboratoire. On a analysé et mis en évidence une expression qui permet d'estimer l'énergie annuelle produite par un capteur photothermique plan en fonction des caractéristiques internes et environnementales.

\*l'expérimentation de prototype d'hacheurs PWM (Modulation de Largeur d'Impulsions) pour minimiser les pertes d'énergie par conversion et l'étude fine d'un asservissement par +/- à rétroaction via un filtre du premier et deuxième ordre. Le système étudié est capable de générer une modulation de largeur d'impulsions (PWM) de durée et de rapport cyclique variables.

\*la présentation d'un modèle de gestion de la répartition optimale des ressources à ER qui exploite les caractéristiques internes et environnementales. La modélisation en programmation linéaire a été utilisée dans le cas où les ressources sont continues ainsi que dans le cas où ces ressources sont disponibles en unités discrètes. Le programme est générique et peut être exploité pour toute autre ressource ER à condition de présenter l'expression qui relie l'énergie annuelle produite aux caractéristiques internes et environnementales.

### **Organisation du manuscrit**

Afin d'accomplir au mieux cette étude, la présente thèse a été structurée en cinq principaux chapitres en plus de l'introduction générale et de la conclusion générale.

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les différents systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables. Nous nous intéressons à l'état de l'art, La description générale des systèmes photovoltaïque, éolien, photo-thermique et à la biomasse.

Le deuxième chapitre concerne l'étude théorique, la modélisation et la simulation, ainsi que la réalisation de prototypes expérimentaux individuellement. Les systèmes étudiés et expérimentalement réalisés sont un système solaire photovoltaïque, une éolienne tripale, un système photo-thermique et un bioréacteur à méthane. L'étude a permis de mettre en évidence une estimation de la puissance et de l'énergie annuelle produite par chacune des ressources renouvelables concernées en fonction des caractéristiques environnementales et internes.

Le troisième chapitre est consacré à une étude de la conversion d'énergie électrique provenant des systèmes d'énergies renouvelables. L'étude et l'expérimentation de prototype d'hacheurs PWM (Modulation de Largeur d'Impulsions) permet de minimiser les pertes d'énergie par conversion. Les systèmes considérés sont des systèmes non linéaires par plus ou moins de filtre du premier et du deuxième ordre.

Dans le quatrième chapitre, nous définissons le modèle mathématique d'un système énergétique à base de ressources renouvelables combinées. Ce modèle est ramené sous forme d'un PL. Nous présentons également les différentes méthodes pour la résolution de ce type de problèmes dans le cas où les variables sont continues et entières.

Dans le cinquième chapitre nous présentons un modèle de gestion de la répartition optimale des ressources à ER qui se base sur les caractéristiques internes et environnementales pour optimiser la distribution des ER considérée. La modélisation en programmation linéaire a été utilisée dans le cas où les ressources sont continues ainsi que dans le cas où ces ressources sont disponibles en unités discrètes.

Dans ce contexte, le programme est générique et peut être exploité pour toute autre ressource ER à condition de présenter l'expression qui relie l'énergie annuelle produite aux caractéristiques internes et environnementales.

Enfin, nous terminerons ce travail par une conclusion générale qui résume notre étude et envisage un certain nombre de perspectives.

# **Chapitre1**

## **Etat de l'art sur les Energies renouvelables**

## Chapitre1

### Etat de l'art sur les Energies renouvelables

#### Sommaire

---

##### Introduction

#### 1 Les systèmes énergétiques

##### 1.1 Les énergies fossiles

###### 1.1.1 Classification

###### 1.1.2 Avenir

##### 1.2 L'énergie nucléaire

##### 1.3 Les énergies renouvelables

#### 2 Les sources d'énergies renouvelables

##### 2.1 L'énergie photovoltaïque

###### 2.1.1 Description des éléments d'un système de captage photovoltaïque

###### 2.1.2 Le module photovoltaïque

###### 2.1.3 Le panneau solaire

###### 2.1.4 Les utilisations de l'énergie solaire photovoltaïque

###### 2.1.5 Avantages et inconvénients d'une installation PV

##### 2.2 L'énergie éolienne

###### 2.2.1 Histoire des éoliennes

###### 2.2.2 Les différents types d'éoliennes

###### 2.2.3 Eléments constitutifs d'un aérogénérateur a axe horizontal

###### 2.2.4 Principe de fonctionnement

###### 2.2.5 Puissance récupérable par une turbine

###### 2.2.6 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

###### 2.2.7 Les avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

##### 2.3 L'énergie photothermique

###### 2.3.1 Les utilisations de l'énergie solaire thermique

###### 2.3.2 Les avantages et les inconvénients de l'énergie photothermique

##### 2.4 L'énergie biomasse

###### 2.4.1 Sources de biomasse

###### 2.4.2 Valorisation de la biomasse

###### 2.4.3 L'utilisation de la biomasse

###### 2.4.4 Les avantages et les inconvénients de l'énergie biomasse

#### 3 Potentiels des énergies renouvelables en Algérie

##### 3.1 Potentiel solaire

##### 3.2 Potentiel éolien

##### 3.3 Potentiel géothermique

##### 3.4 Potentiel hydroélectrique

##### 3.5 Le potentiel de la biomasse

###### 3.5.1 Potentiel de forestier

###### 3.5.2 Potentiel énergétique des déchets urbains et agricoles

#### 4 Les systèmes d'énergie hybrides (SEH)

##### 4.1 Définition

##### 4.2 Classification

###### 4.2.1 Le régime du fonctionnement

###### 4.2.2 La structure du système hybride

##### 4.3 Etudes des systèmes hybrides

###### 4.3.1 Les combinaisons les plus courantes

###### 4.3.2 Critères d'optimisation et logiciels de dimensionnement

###### 4.3.2.1 Critères d'optimisation du système hybride

###### 4.3.2.2 Logiciels pour l'étude des systèmes hybrides

##### 4.4 Aperçu sur l'état de l'art des systèmes hybrides

##### Conclusion

---



# Chapitre1

## Etat de l'art sur les Energies renouvelables

### Introduction

Dans ce chapitre, nous allons d'abord présenter les définitions des systèmes énergétiques concernant les énergies fossiles, l'énergie nucléaire et les énergies renouvelables. Ensuite, nous présenterons les sources d'énergies renouvelables, leurs principes de fonctionnement ainsi que leurs potentiels en Algérie. Nous introduirons également les systèmes d'énergie hybrides (SEH) à base d'énergies renouvelables. Enfin, nous présenterons l'état de l'art concernant les systèmes d'énergie hybrides.

### 1 Les systèmes énergétiques

Nous commençons par présenter les définitions des filières énergétiques suivantes : les énergies fossiles, l'énergie nucléaire et les énergies renouvelables,

#### 1.1 Les énergies fossiles

L'énergie fossile désigne l'énergie que l'on produit à partir de roches issues de la fossilisation des êtres vivants. Il s'agit du charbon, du pétrole et du gaz naturel. Ces énergies sont présentes en quantité limitée et non renouvelable et leur combustion entraîne des gaz à effet de serre [1].

Au cours du XX<sup>e</sup> siècle et XXI<sup>e</sup> siècle, l'utilisation des combustibles fossiles a permis le développement industriel à grande échelle de certaines régions du monde. L'énergie fossile a remplacé l'énergie des moulins à eau et l'énergie thermique produite par la combustion du bois. Les combustibles fossiles ont également permis un développement sans précédent du transport routier et du transport aérien [1].

##### 1.1.1 Classification

- Le charbon est un terme générique qui désigne des roches sédimentaires d'origine biochimique et riches en carbone. Ces roches sont des combustibles fossiles qui se sont formées au carbonifère, par lente transformation d'organismes morts sédimentés, sous l'action de la pression et de la température au cours des temps géologiques. Peu à peu, la tourbe constituée par les organismes morts se transforme ainsi en charbon, d'abord sous la forme de houille, puis de lignite et enfin d'antracite. Le charbon fut la source d'énergie de la révolution industrielle du XIX<sup>e</sup> siècle et ne fut supplanté comme source d'énergie principale

en occident qu'au XX<sup>e</sup> siècle, avec l'essor du pétrole. Aujourd'hui, cette source d'énergie fait débat, puisque ses réserves sont plus importantes que celles du pétrole mais que son bilan environnemental est très défavorable (polluants atmosphériques, CO<sub>2</sub>) [2].

- Le pétrole est une huile minérale résultant d'un mélange d'hydrocarbures et de divers composés organiques. Exploité par les hommes, le pétrole est une énergie fossile. Sa formation est le fruit de la transformation lente de matière organique, souvent végétale, qui se dépose sur le fond des océans et qui, sous l'effet de la pression des autres couches qui s'accumulent et d'une augmentation de température (résultant elle aussi de l'augmentation de pression) se transforme peu à peu en kérogène, puis en pétrole. Le pétrole se faufile ensuite entre les roches au milieu desquelles il a été formé et remonte vers la surface de la terre. Mais en chemin, il est piégé par des roches non perméables. Ce sont ces sites que les compagnies pétrolières traquent afin d'effectuer des forages pour in fine, exploiter le pétrole.

Enfin, il y a lieu de signaler qu'en fonction de la composition du pétrole et de la roche dans laquelle il s'est formé, on distingue différents types. La séparation la plus commune consiste à faire la distinction entre pétrole conventionnel et pétrole non conventionnel, en fonction de sa densité ou sa « légèreté » [3].

- Le gaz naturel est un combustible fossile constitué d'un mélange d'hydrocarbures gazeux, dont le méthane (CH<sub>4</sub>) est l'un des principaux composants. Formé par la transformation d'organismes morts il y a des millions d'années, le gaz naturel se trouve dans divers réservoirs souterrains, parfois associé à du pétrole. Le gaz naturel est exploité pour la production de chaleur et d'électricité, ainsi que dans le cadre de processus industriels.

L'usage du gaz naturel s'est accru dans le contexte de prise de conscience environnementale de ces dernières décennies. Cet hydrocarbure est en effet moins polluant et moins riche en CO<sub>2</sub> que les autres hydrocarbures (charbon, pétrole). En outre, ses réserves sont plus importantes que celles du pétrole [4].

Parmi les combustibles fossiles non conventionnels, on peut citer :

- Les schistes bitumineux ((en) oil shale) contenant du kérogène, qui doit encore être pyrolyse ;
- les sables bitumineux ((en) oil sands) contiennent du bitume ;
- les hydrates de méthane ;
- la tourbe est un peu à part, son cycle de formation se compte en milliers d'années, ce qui la place à mi-chemin entre les carburants fossiles (dont la formation se compte en millions d'années) et les renouvelables ;
- le gaz de schiste ;
- les huiles de schiste ;
- le gaz de couche, gaz de houille, plus connu sous le nom de grisou [5].

### 1.1.2 Avenir

Aujourd'hui, l'utilisation par l'humanité de quantités considérables de combustibles fossiles est à l'origine d'un déséquilibre important du cycle du carbone, ce qui provoque une augmentation de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère terrestre et, par voie de conséquence, entraîne des changements climatiques.

D'autre part, les réserves de combustibles fossiles de la planète sont fixes et, au rythme de consommation actuel, leur épuisement doit être envisagé.

## 1.2 L'énergie nucléaire

L'énergie nucléaire est l'énergie qui se trouve dans le noyau d'un atome. Les atomes sont les plus petites particules dans lesquelles peut se diviser un matériau. Dans le noyau de chaque atome, il existe deux types de particules (neutrons et protons) qui sont toujours unies. L'énergie nucléaire, c'est l'énergie qui permet l'union permanente des neutrons et des protons.

L'énergie nucléaire peut être utilisée pour produire de l'électricité. Tout d'abord, l'énergie doit être libérée. Cette énergie peut être obtenue de deux façons : la fusion nucléaire et la fission nucléaire. Dans la fusion nucléaire, l'énergie se libère lorsque les atomes se combinent ou se fusionnent entre eux pour former un atome plus grand. C'est ainsi que le soleil produit de l'énergie. En ce qui concerne la fission nucléaire, les atomes se séparent pour former des atomes plus petits, libérant ainsi de l'énergie. Les centrales nucléaires utilisent la fission nucléaire pour produire de l'électricité.

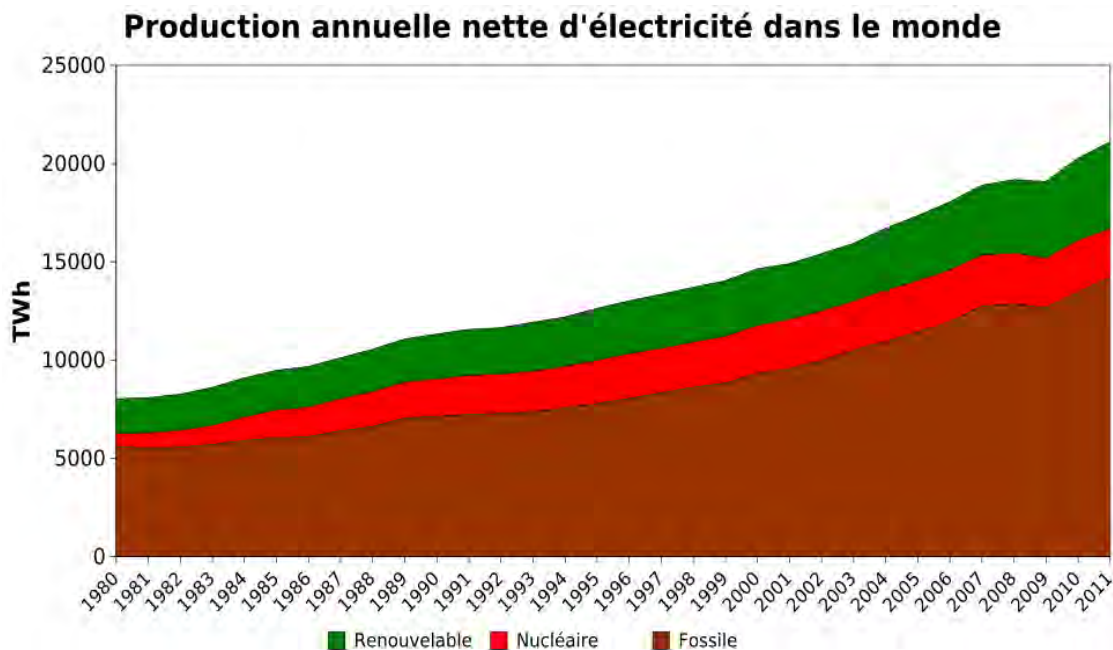
Lorsque l'une de ces deux réactions physiques se produit (fission nucléaire ou fusion nucléaire), les atomes souffrent une légère perte de masse. Cette masse perdue se transforme en une grande quantité d'énergie thermique comme le découvrit Albert Einstein dans sa célèbre équation  $E = mc^2$ .

Bien que la production d'énergie électrique soit l'utilité la plus fréquente donnée il ya de nombreuses autres applications de l'énergie nucléaire dans d'autres secteurs tels que la santé, l'environnement, les applications industrielles ou militaires (bombe atomique) [6].

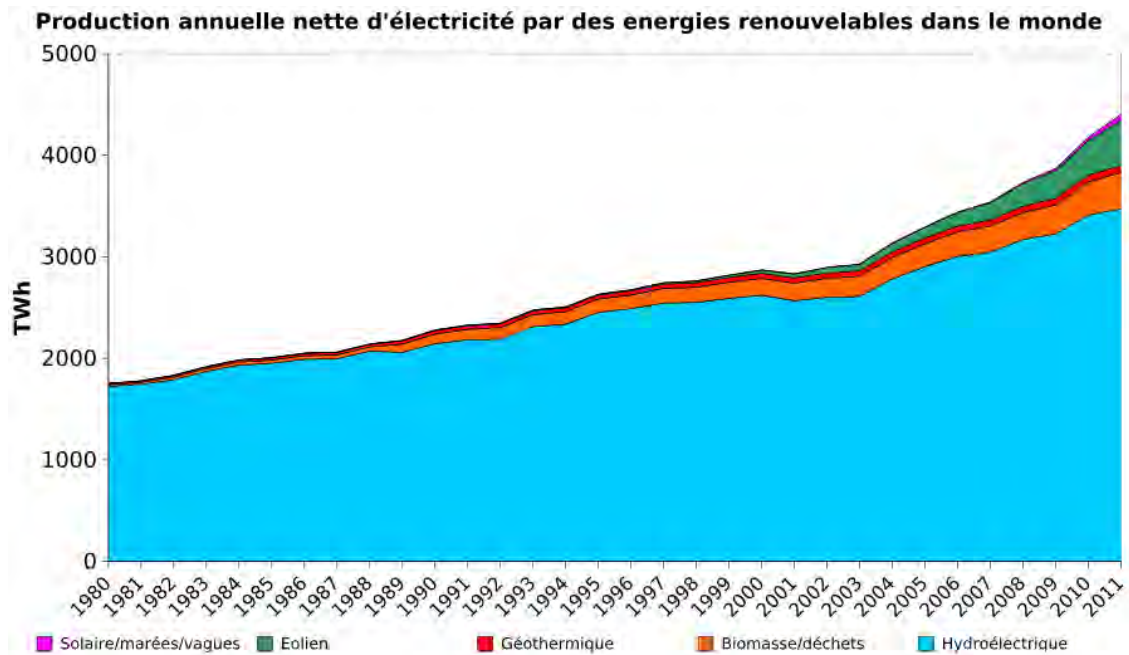
### 1.3 Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables (ER en abrégé) sont des sources d'énergies qui sont inépuisables à l'échelle du temps humain, largement disponibles, essentiellement gratuites et sont compatibles avec certain respect environnemental. Les ER les plus couramment utilisées sont décrites ci-dessous.

- Le solaire est une utilisation directe des rayons du soleil pour produire chaleur ou électricité.
- L'éolien est une énergie produite à partir de la force du vent, qui est utilisé de manière mécanique [7].
- La biomasse est l'ensemble de la matière organique d'origine végétale ou animale. C'est de l'énergie solaire transformée par les plantes chlorophylliennes qui sont utilisées soit directement (bois de chauffage) soit après de nouvelles transformations chimiques (biogaz, biocarburant) [8].
- L'hydroélectrique vient de la transformation de l'énergie potentielle de gravitation par évaporation de l'eau est convertie en énergie mécanique par des turbines. Ensuite ; elle peut être transformée en électricité [9].
- La géothermie est l'utilisation directe des gradients de température terrestre (énergies renouvelables) ou de sources chaudes (parfois non renouvelables).



**Figure (1-1) :** Production annuelle nette d'électricité dans le monde (1980-2011).



**Figure (1-2) :** Production annuelle nette d'électricité par des énergies renouvelables dans le monde (1980-2011).

Sur les Figures (1-1 et 1-2), nous avons reproduit la production annuelle nette d'électricité dans le monde et celle produite par les énergies renouvelables jusqu'en 2011, nous remarquons que cette dernière reste encore faible malgré les énormes potentialités que renferme la nature.

## 2 Les sources d'énergies renouvelables

### 2.1 L'énergie photovoltaïque

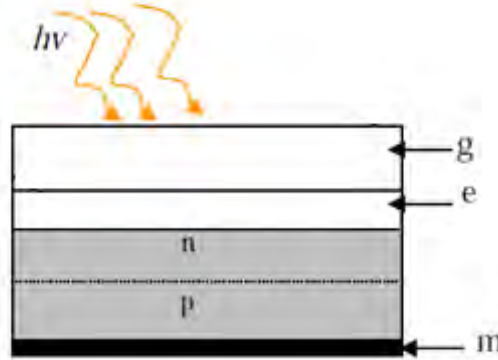
#### 2.1.1 Description des éléments d'un système de captage photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque ». Elles ont été découvertes par E. Becquerel en 1839 [10, 11]. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants.

La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque comporte une jonction entre deux zones dopées différemment du même matériau (homojonction) ou entre deux matériaux différents (hétérojonction). Le but de la structure photovoltaïque, c'est de créer un champ électrique interne.

Sur la Figure (1-3) est représentée une configuration schématique de la cellule solaire. Elle se compose d'un abri du verre ( $g$ ), un encapsulant ( $e$ ) et un métal ( $m$ ) en arrière constituant un contact afin de réduire les pertes par réflexion du rayonnement incident [10, 12]. La jonction  $p-n$  des deux matériaux fonctionne comme une diode. Lorsque cette diode est exposée à des photons dont l'énergie ( $h\nu$ ) est supérieure à celle de l'énergie du matériau,

appelée l'énergie de bande gap ( $E_g$ ), le nombre d'électrons libres du semi-conducteur de type- $n$  et celui de trous du semi-conducteur de type- $p$  augmente considérablement. Si les photons incidents ont une énergie inférieure à  $E_g$ , ils ne seront pas absorbés c'est-à-dire que leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque.



**Figure (1-3) :** Présentation schématique d'une cellule solaire.

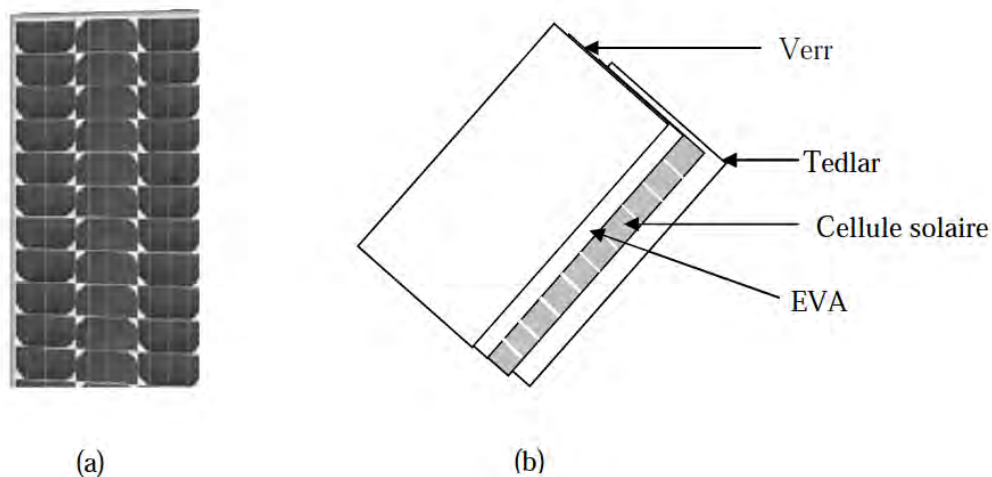
Dans une cellule PV, une large fraction de ces électrons et trous atteignent la jonction  $p-n$  et un champ électrique est créé. En conséquence, un courant électrique peut être établi en connectant les matériaux de type- $n$  et type- $p$  à un circuit extérieur. La direction de ce courant est l'opposé de celle de la cellule lorsqu'elle fonctionne en tant que diode. Autrement dit, quand la diode est illuminée, un courant positif  $I$  traverse de  $n$  vers  $p$ .

La puissance électrique produite par une cellule industrialisée est très faible typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins de 1 volt [10, 13].

Le rendement de conversion des cellules commercialisées est actuellement 15 à 19 % pour le silicium monocristallin, 12 à 16 % pour le silicium polycristallin, 7 à 9% pour le silicium amorphe.

### 2.1.2 Le module photovoltaïque

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module (Figure (1-4-a)). Ainsi, les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (L'éthylène-acétate de vinyle) (Figure (1-4-b)) et protégé sur la surface avant d'un verre trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique. Sur la surface arrière, elles sont protégées par une ou plusieurs couches de polyéthylène [10, 14].



**Figure (1-4) :** Module photovoltaïque.

Les modules sont généralement entourés d'un cadre rigide en aluminium anodisé comprenant des trous de fixation. A l'arrière de chaque module se trouve une boîte de jonction contenant 2 diodes antiparallèles. Ces diodes antiparallèles permettent d'éviter qu'un module au soleil ne se décharge dans un module à l'ombre [10, 15].

Les modules en silicium monocristallin ( $c-Si$ ) assurent 64% de la part du marché, tandis que ceux en silicium polycristallin ou multicristallin ( $xc-Si$ ) représentent 28% du marché, alors que ceux en silicium amorphe ( $a-Si$ ) seulement 13% du marché. L'ensemble délivre des tensions normalisées de 12, 24 et 48 volts et des puissances entre 10 et 100  $W_C$  (watt-crête : puissance obtenue pour l'ensoleillement maximal [10, 14].

La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, le courant de sortie, et la puissance seront proportionnels à la surface du module. Ils ont une efficacité de conversion (énergie électrique produite/énergie solaire incidente) de l'ordre de 10 à 20% [10, 16].

### 2.1.3 Le panneau solaire

Le panneau solaire ou champ solaire se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique.



**Figure (1-5) : Panneau de solaire [10, 15].**

La quantité d'électricité dans l'ensemble des composants des panneaux PV dépend :

- des besoins en électricité.
- la taille du panneau.
- L'ensoleillement du lieu d'utilisation.
- La saison d'utilisation.

La puissance délivrée par un panneau est importante dans les heures d'ensoleillement maximal, ce qui nécessite un élément de stockage.

Sur le plan pratique, il convient de remarquer que l'installation des modules peut se faire sur un toit si son orientation et son inclinaison sont bonnes ou à même le sol pour peu que l'endroit soit bien dégagé, aéré (10 cm d'espace sous les modules est vivement conseillé) et protégé. On les place habituellement avec la pente vers l'équateur (vers le sud dans l'hémisphère nord). L'inclinaison des panneaux n'est pas critique. On la prend en général égale à la latitude, avec une tolérance de 15°. La hauteur maximale du soleil variant au cours de l'année, on choisira une inclinaison supérieure ou inférieure à la latitude suivant que les besoins sont les plus importants lorsque la course du soleil est basse (éclairage, besoins importants en hiver dans l'hémisphère nord) ou haute (irrigation...) [12].

Toutefois, l'inclinaison des modules devrait rester supérieure à 10° pour assurer une auto nettoyage lors des pluies [17].

Il existe aussi des structures beaucoup plus complexes qui suivent le soleil dans son mouvement quotidien pour augmenter l'énergie captée, la présence des pièces mobiles réduit la fiabilité et entraîne des coûts supplémentaires élevés. Ces structures sont surtout utilisées pour des systèmes photovoltaïques à concentration où seul le rayonnement direct est concentré sur la surface active [17].



En ce qui concerne les caractéristiques d'un module, elles se présentent comme suit :

- La puissance de crête ( $P_C$ ): Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m<sup>2</sup>).
- La caractéristique ( $I-V$ ): Courbe représentant le courant  $I$  débité par le module en fonction de la tension  $V$  aux bornes de celui-ci.
- Tension à vide ( $V_{CO}$ ): Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ".
- Courant de court-circuit ( $I_{CC}$ ): Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ".
- Point de fonctionnement optimum ( $V_m, I_m$ ) : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil  $P_m = V_m \cdot I_m$ .
- Rendement maximal  $\eta$  : c'est le rapport entre la puissance maximale et la puissance lumineuse incidente.
- Facteur de forme  $FF$  : c'est le rapport entre la puissance maximale fournie par la cellule  $P_m$  sur le produit :  $V_{CO} \cdot I_{CC}$  [10, 17].

#### 2.1.4 Les utilisations de l'énergie solaire photovoltaïque

En 2009, les principales centrales électriques (ou parcs solaires) produisaient aux alentours de 60 MW. Tout cela nécessitait de très grands espaces et un très grand nombre de panneaux photovoltaïques qui captent le rayonnement solaire et le transforment en électricité.

L'installation d'un système photovoltaïque se fait facilement pour les bâtiments. Le système peut être sur ou à proximité du bâtiment. C'est un système attractif pour les particuliers désireux d'être autonomes énergétiquement ou isolés par rapport au réseau standard. Mais, la plupart du temps, les panneaux sont directement montés sur le toit. Certains sont positionnés à proximité des constructions. De plus en plus, les bâtiments modernes ont des panneaux directement intégrés dans leurs structures.

En ce qui concerne les transports, l'énergie photovoltaïque est rarement utilisée pour fournir la force motrice. Il existe bien quelques prototypes de voitures ou de bateaux qui se déplacent à l'énergie solaire, mais il n'existe pas encore de production en série. Par contre, l'énergie solaire est de plus en plus prise en compte pour les besoins auxiliaires dans les véhicules, comme par exemple dans les bateaux à voiles, où le système électrique interne est alimenté par l'énergie photovoltaïque.

Pour les autres domaines d'utilisation, nous résumons la situation comme suit :

- Les dispositifs autonomes : les quelques exemples d'applications utilisant l'énergie photovoltaïque sont : les pompes à eau, les parcomètres, les téléphones d'urgence, les compacteurs à déchets, les panneaux de signalisation temporaires, etc.
- L'électrification rurale : Les pays en développement, où la plupart des villages se situent à plus de cinq kilomètres du réseau électrique, commencent à utiliser l'énergie photovoltaïque. Le plus souvent, ce sont des programmes financés par l'aide

internationale ou par des organismes privés à vocation humanitaire. Ces initiatives sont encore rares.

- Les satellites : Les études de conception de grandes installations solaires sur des satellites ont été menées depuis des décennies. L'idée a été proposée par Peter Glaser, puis Arthur D. Little Inc. La NASA a mené une longue série d'études techniques et de faisabilité économique dans les années 1970 et a ravivé l'intérêt dans les premières années du XXI<sup>e</sup> siècle.

D'un point de vue économique, la question clé pour ces satellites semble être le coût de lancement [18].

### 2.1.5 Avantages et inconvénients d'une installation PV

Pour les avantages :

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du Milliwatt au Mégawatt.

- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.

- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [19].

Pour les inconvénients:

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 MW/km<sup>2</sup> par an pour le BENELUX) avec une limite théorique pour une cellule de 28%. · Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.

- Les rendements sont tributaire des conditions météorologiques.

- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.

- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

Enfin, le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur [19].

## 2.2 L'énergie éolienne

L'éolienne est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, elles sont généralement utilisées pour produire de l'électricité [20]. L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui est respectueuse de l'environnement, disponible localement et permet donc une certaine indépendance énergétique [21, 22].

### 2.2.1 Histoire des éoliennes

Ce sont les pêcheurs qui furent les premiers à utiliser l'énergie de vent afin de déplacer leurs embarcations sur les mers. Au Vème siècle av JC, les Perses se servaient des éoliennes pour irriguer leurs champs (roues à aube). Il faut attendre le VIIème siècle pour voir apparaître des moulins à vent pour moulinier le blé. La production d'électricité à partir d'éoliennes est apparue dans le milieu des années 1970 suite au premier choc pétrolier. Ce type d'éolienne est appelé aérogénérateur.

Voici l'historique des installations annuelles de la puissance installée mondiale de 1996 à 2014 [23]. On constate d'après la Figure (1-6) que l'évolution temporelle est de forme exponentielle.

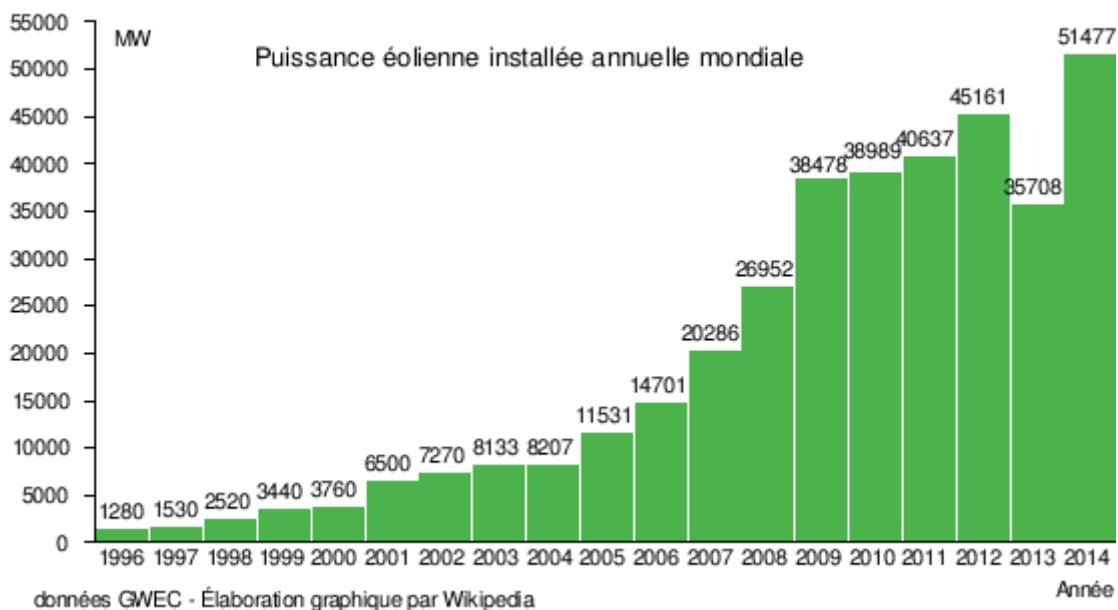


Figure (1-6) : La puissance Installée Mondiale de 1996 à 2014.

### 2.2.2 Les différents types d'éoliennes :

Il existe deux grandes familles d'éoliennes selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice [24] :

- les turbines éoliennes à axe horizontal Figure (1-7a);
- les turbines éoliennes à axe vertical. Figure (1-7b).



a) Eoliennes à axe horizontal

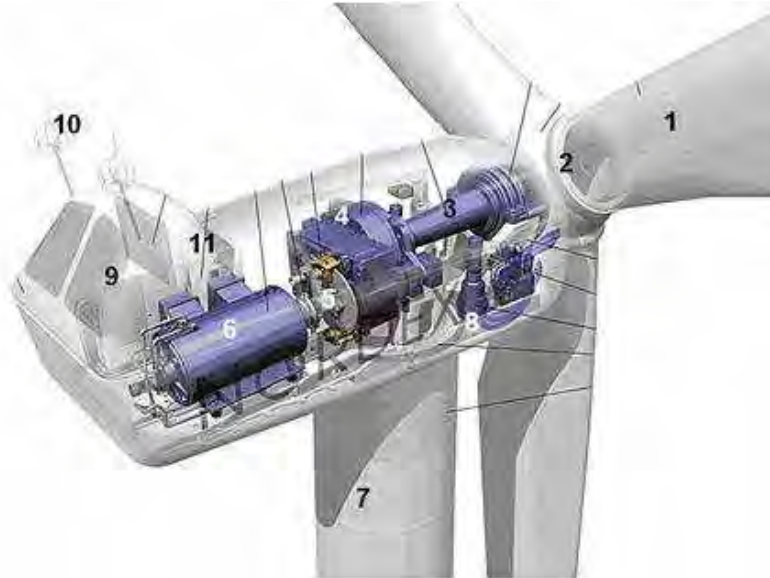
b) Eoliennes à axe vertical

**Figure (1-7) :** Technologies d'éoliennes.

Sur le plan aérodynamique, on peut comparer les différents types de turbines en comparant leurs coefficients aérodynamiques de puissance ou de couple en fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$  [25].

### 2.2.3 Eléments constitutifs d'un aérogénérateur à axe horizontal

L'aérogénérateur (Figure (1-8)) utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : cette énergie cinétique est convertie en énergie mécanique qui est elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique solidaire au rotor. L'électricité peut être envoyée dans le réseau de distribution, stockée dans des accumulateurs ou utilisée par des charges isolées [20,26].



**Figure (1-8) :** Les composantes de l'aérogénérateur.

Les composantes de l'aérogénérateur sont les suivantes :

1. Les pales: sont les capteurs de l'énergie cinétique qui transmettent l'énergie au rotor.
2. Le moyeu: il est pourvu d'un système qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation.
3. L'arbre primaire (ou arbre lent): relie les pales au multiplicateur.
4. Le multiplicateur: il permet de réduire le couple et d'augmenter la vitesse. C'est l'intermédiaire entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire.
5. L'arbre secondaire: il amène l'énergie mécanique à la génératrice. Il est équipé d'un frein à disque mécanique qui limite la vitesse de l'arbre en cas de vents violents.
6. Le générateur électrique: il assure la production électrique. Sa puissance peut atteindre jusqu'à 5 MW. Il peut-être une dynamo (produit du courant continu) ou un alternateur (produit du courant alternatif). L'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement.
7. Le mât: c'est un tube en acier, pilier de toute l'infrastructure. Sa hauteur est importante. Plus elle augmente, plus la vitesse du vent augmente mais en même temps le coût de la structure augmente. En général, le mât a une taille légèrement supérieure au diamètre des pales.
8. Le système d'orientation de la nacelle: c'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent grâce à un frein.
9. Le système de refroidissement: il est à air, à eau ou à huile et destiné au multiplicateur et à la génératrice.
10. Les outils de mesure du vent: girouette pour la direction et anémomètres pour la vitesse. Les données sont transmises à l'informatique de commande.
11. Le système de contrôle électronique: il gère le fonctionnement général de l'éolienne et de son mécanisme d'orientation.
12. Au pied du mât se trouve un transformateur.

### 2.2.4 Principe de fonctionnement :

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes [20]:

- Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique [27].

### 2.2.5 Puissance récupérable par une turbine

La puissance mécanique récupérée par une turbine éolienne dépend des facteurs suivants ; la vitesse et la direction du vent, la surface balayée par les pales, le mécanisme de conversion mécanique-électrique. Elle peut s'exprimer sous la forme :

$$P_{turbine} = 1/2.C_p.\rho.\pi.R^3.v^3 \quad (1-1)$$

Où

$v$  : La vitesse du vent (en m/s),

$R$  : Le rayon de la turbine ou longueur des pales (en m),

$\rho$  : La masse volumique de l'air (1,225 kg/m<sup>3</sup> au niveau de la mer à 15 °C),

$C_p$  : Le coefficient de puissance de la turbine (Le coefficient  $C_p$  dépend de la Vitesse spécifique de l'éolienne  $\lambda$  ( $C_p(\lambda)$ )).

La vitesse spécifique ou normalisée  $\lambda$  (sans unité) est le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales et la vitesse du vent :

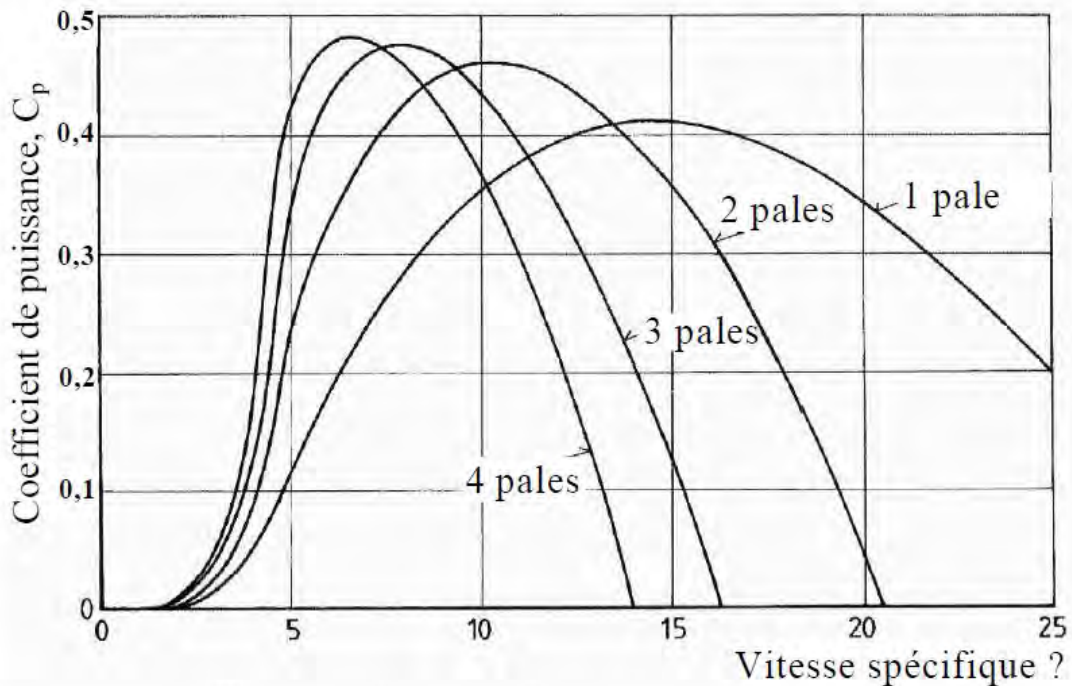
$$\lambda = U / v = R.\omega / v \quad (1-2)$$

$U$  : La vitesse de l'extrémité des pales  $U = R\omega$  (en m/s).

$\omega$  : vitesse angulaire de rotation de la turbine  $\omega = 2\pi.f$  (en rad/s).

$f$  : Fréquence de rotation du rotor (en s<sup>-1</sup> ou Hz).

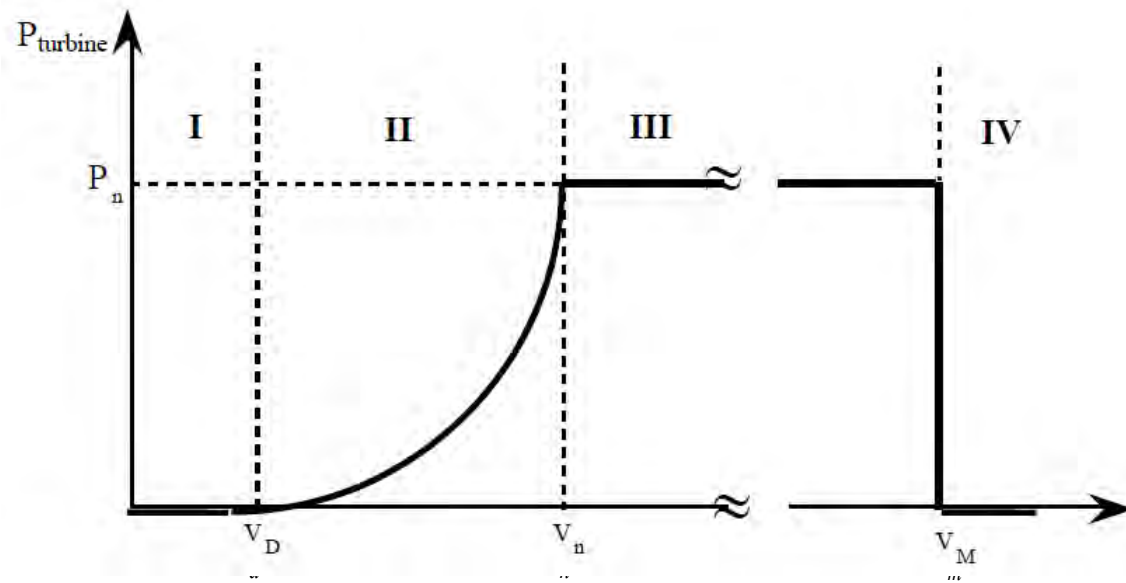
La Figure (1-9) montre l'évolution du coefficient de puissance  $C_p$  pour des turbines réelles à axe horizontal en fonction de la vitesse spécifique pour 1, 2, 3 et 4 pales [28, 29]. On remarque que pour chaque type d'éolienne correspond une vitesse spécifique  $\lambda_{opt}$  qui maximise le rendement aérodynamique. Ainsi un fonctionnement à vitesse de rotation variable, selon la vitesse du vent, peut permettre de rester sur le maximum de la courbe. Plus la caractéristique  $C_p(\lambda)$  sera en cloche, plus il sera bénéfique d'adapter la vitesse de rotation à la vitesse du vent, afin de rester dans la zone optimale [25].



**Figure (1-9):** Coefficient aérodynamique de puissance en fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$  [28].

### 2.2.6 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer une puissance nominale  $P_n$  à partir d'une vitesse de vent nominale  $v_n$ . Pour des vitesses de vents supérieures à  $v_n$ , la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques (turbines, mat et structure), de sorte que la puissance récupérée par la turbine ne dépasse pas la puissance nominale pour laquelle l'éolienne a été conçue. Il y a d'autres grandeurs dimensionnées:  $v_d$  la vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie et  $v_m$  la vitesse maximale de vent au-delà de laquelle l'éolienne doit être stoppée pour des raisons de sûreté de fonctionnement [25].



**Figure (1-10):** Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent.

Ainsi la caractéristique de puissance en fonction de la vitesse du vent comporte quatre zones [29] comme indiqué sur la Figure (1-10) et de manière suivante:

- la zone I, où  $P_{turbine} = 0$  (la turbine ne fournit pas de puissance);
- la zone II, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent  $v$  ;
- la zone III, où généralement la vitesse de rotation est maintenue constante par un dispositif de régulation et où la puissance  $P_{turbine}$  fournie reste sensiblement égale à  $P_n$  ;
- la zone IV, dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête la rotation et le transfert de l'énergie.

La plupart des grandes turbines éoliennes utilisent deux principes de contrôle aérodynamique pour limiter la puissance extraite à la valeur de la puissance nominale de la génératrice :

- système « pitch » ou « à pas ou calage variable » qui permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent, principalement pour maintenir une puissance sensiblement constante dans la zone III de vitesses [30] ;
- système « stall » ou à « décrochage aérodynamique », le plus robuste car c'est la forme des pales qui conduit à une perte de portance au-delà d'une certaine vitesse de vent, mais la courbe de puissance maximale n'est pas plate et chute plus vite. Il s'agit donc d'une solution passive et robuste (pas besoin de système d'orientation des pales). Chez certains fabricants de grandes machines, un système hybride se développe, le « stall actif », dans lequel le décrochage aérodynamique est obtenu progressivement grâce à une orientation minimale des pales nécessitant des moyens de réglage plus économiques et plus robustes que dans le système pitch.



D'autres systèmes de régulation, dans les petites éoliennes notamment, sont exploités :

- basculement (relèvement) de l'axe, normalement horizontal;
- pas variable par la pression du vent (modèle Air Wind : les pales en fibre, se déforment et provoquent un décrochage) ;
- déviation par rapport à l'axe du vent. La dérive se trouve légèrement décalée par rapport à l'axe de rotation vertical (qui permet normalement à la turbine d'être face au vent) et crée une force de déviation qui régule la puissance aérodynamique (la turbine reçoit un vent de travers) [25].

### 2.2.7 Les avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des désavantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement. Parmi les avantages de l'énergie éolienne, il convient de signaler que :

- Il s'agit d'une forme d'énergie indéfiniment durable et propre
- Elle ne nécessite aucun carburant.
- Elle ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs car une éolienne est entièrement en métal et plastique.
- Elle préserve les ressources hydriques.
- Elle ne produit pas d'émissions nocives d'origine.
- Elle est entièrement renouvelable, hautement fiable et très efficace.
- Elle est l'une des sources les plus économiques de nouvelle production d'électricité à grande échelle.-devient de plus en plus économique à produire à mesure que des économies d'échelle sont réalisées et que le prix de l'électricité augmente [31].

Quant aux inconvénients on remarque que :

- L'éolien a un faible rendement.
- Il n'y a pas de vent tout le temps.
- Il fait du bruit.
- Il est dangereux pour les oiseaux.

Enfin, l'énergie éolienne n'entraîne aucune émission atmosphérique. Les aérogénérateurs sont actionnés par le vent, tout naturellement. Ils ne polluent pas l'air. L'énergie éolienne ne provoque ni le smog ni les pluies acides ni un changement climatique [31].

## 2.3 L'énergie photothermique

C'est une forme d'énergie solaire. Elle désigne l'utilisation de l'énergie thermique du rayonnement solaire dans le but d'échauffer un fluide (liquide ou gaz). L'énergie reçue par le fluide peut être ensuite utilisée directement (eau chaude sanitaire, chauffage, etc.) ou indirectement (production de vapeur d'eau pour entraîner des alternateurs et ainsi obtenir de l'énergie électrique, production de froid, etc.).

C'est grâce au panneau solaire thermique que l'énergie de la lumière solaire est récupérée pour être transformée en chaleur et transmise à un fluide caloporteur, par exemple de l'eau (cas le plus fréquent pour les panneaux vendus dans le commerce, qui lui ajoutent un antigel) ou de l'air.

Le fluide circule dans un serpentin, peint en noir, éventuellement recouvert d'une surface vitrée et protégé sur les autres faces par un isolant. Le tube où circule le fluide peut également être doublé pour une isolation supplémentaire.

### 2.3.1 Les utilisations de l'énergie solaire thermique

Les utilisations potentielles de l'énergie solaire thermique se présentent comme suit :

- Cette énergie couvre en moyenne 50 % des besoins en chauffe-eau. L'installation se fait souvent sur la toiture d'une maison indépendante ou d'un bâtiment tout entier. Il s'agit de capteurs vitrés dans lesquels circule un liquide caloporteur réchauffé par le rayonnement du soleil.
- L'énergie solaire thermique est aussi utilisée pour les machines frigorifiques comme les réfrigérateurs à absorption de gaz, les camping-cars et les caravanes.
- D'autres utilisations de l'énergie thermique telle les sècheurs solaires et les cuisinières sont en vogue en Chine et en Inde.

Parmi ces autres utilisations, on peut citer le cas des cuiseurs. On distingue plusieurs types de cuiseurs:

- Les cuiseurs boîte sont des composés d'un ou plusieurs panneaux solaires qui concentrent l'énergie sur une boîte vitrée.
- Les cuiseurs à panneaux sont dotés de plusieurs panneaux qui concentrent la chaleur sur une cloche en verre dans laquelle sont placés les aliments.
- Les systèmes paraboliques qui sont des composés de disques concaves [18].

### 2.3.2 Les avantages et les inconvénients de l'énergie photothermique

L'énergie photothermique est une énergie renouvelable qui comporte des avantages comme:

- L'énergie solaire est inépuisable et non polluante.
- L'énergie est propre et ne dégage pas de gaz à effet de serre.
- L'énergie solaire thermique permet d'assurer une partie des besoins en eau chaude sanitaire et en chauffage. L'installation des panneaux solaires thermiques permet de réaliser des économies conséquentes.
- Les frais de maintenance et de fonctionnement d'une installation thermique sont relativement faibles.
- Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple des installations éoliennes.
- Le rendement énergétique est positif: il faut en moyenne entre 3 et 4 ans pour que le panneau produise l'énergie nécessaire à sa fabrication et un panneau solaire produit en moyenne entre 9 à 14 fois l'énergie qu'il a consommé pour sa fabrication.

Mais aussi des inconvénients :

- Le coût d'investissement d'une installation solaire thermique est relativement élevé.
- L'énergie solaire est une énergie intermittente. Il faut donc un système de chauffage d'appoint.
- La production d'énergie solaire n'est possible que lorsqu'il y a du soleil.
- Il faut pouvoir stocker la chaleur dans des ballons ou des dalles chauffantes [32].

### 2.4 L'énergie biomasse

La biomasse est l'ensemble de la matière organique d'origine végétale ou animale. Les principales formes d'énergie de biomasse sont les biocarburants pour le transport (produits essentiellement à partir de céréales, de sucre, d'oléagineux et d'huiles usagées), le chauffage domestique (alimenté au bois) et la combustion de bois et déchets dans des centrales produisant de l'électricité, de la chaleur ou les deux à la fois [8, 33].

Ci-dessous, nous reproduisant sur la Figure (1-11) le cycle de production de biomasse.

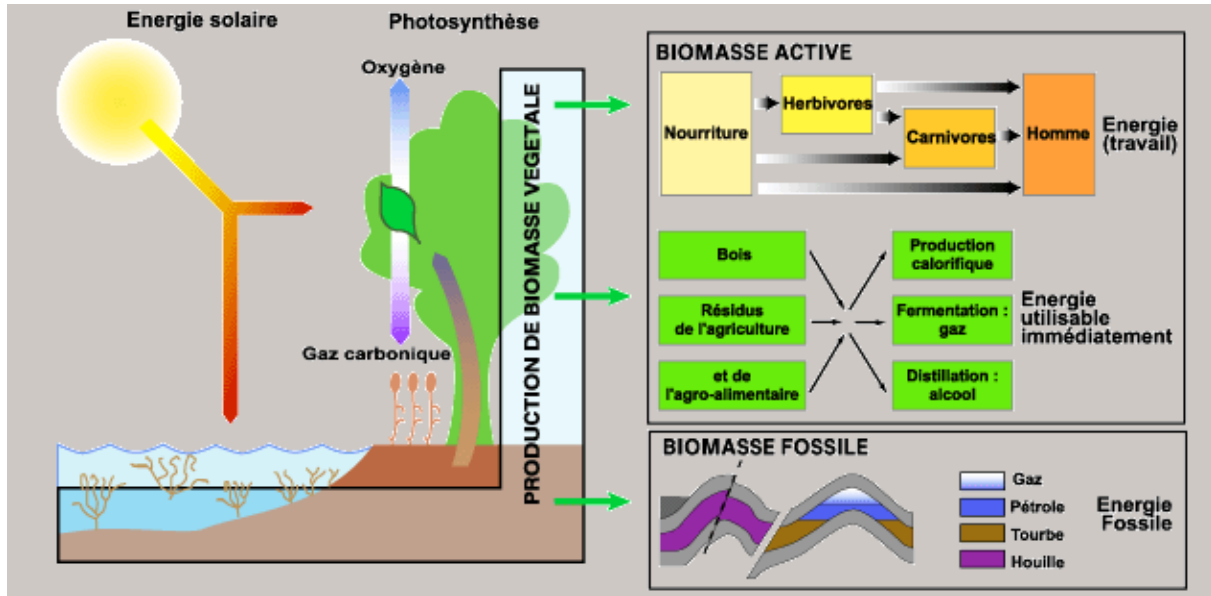


Figure (1-11) : Le cycle de production de biomasse [34].

### 2.4.1 Sources de Biomasse

On distingue essentiellement trois sources principales de biomasse:

- La biomasse ligneuse, comme le bois, les feuilles mortes, la paille ou le foin qui peuvent être utilisés pour le rendement énergétique de la biomasse. En règle générale, la biomasse ligneuse est convertie par voie sèche.
- La biomasse à glucide comme les céréales, la betterave sucrière et la canne à sucre dont la valorisation se fait par conversion biologique, c'est-à-dire par fermentation ou distillation.
- La biomasse oléagineuse qui regroupe les plantes riches en lipide comme le colza et le palmier à huile. La biomasse oléagineuse est principalement destinée à servir de biocarburants [34].

Mais en général, il existe deux approches principales concernant les plantes utilisées pour la production d'énergie [34] :

- les plantes cultivées spécialement pour l'énergie.
- l'utilisation des résidus de plantes pour autre choses.

### **2.4.2 Valorisation de la biomasse**

Il existe plusieurs méthodes valables pour transformer la biomasse en forme d'énergie utilisable. La valorisation de la biomasse dépend directement de sa nature, c'est pourquoi il existe trois grandes méthodes de conversion : la conversion thermique, la conversion biologique et la conversion chimique.

- La conversion thermique s'effectue par combustion, gazéification, torréfaction et pyrolyse. L'exemple le plus connu est celui du bois dont la combustion produit une chaleur non négligeable et utilisée par l'homme depuis la nuit des temps.
- La conversion biologique est obtenue soit par fermentation soit par distillation. Un des cas les plus marquants de la conversion biologique est celui des biogaz comme le méthane qui est créé par la matière organique en décomposition. L'intérêt d'utiliser le méthane est double. Dans un premier temps, l'utilisation de ce puissant gaz à effet de serre évite sa dispersion dans l'atmosphère. Ensuite, le méthane est très énergétique. Il est à son tour transformé par combustion pour obtenir soit de la vapeur soit de la chaleur, selon les utilisations.
- La dernière est la conversion chimique où l'on utilise des produits chimiques pour transformer la biomasse en produit énergétique [34].

### **2.4.3 L'utilisation de la biomasse**

A cet effet, la biomasse peut être convertie sous différentes formes :

- forme de chaleur.
- forme d'électricité.
- en biocarburant.

La consommation d'énergie biomasse représente environ 6.7 % de la consommation totale d'énergie au niveau mondial selon les Nations Unies. On peut beaucoup l'exploiter parce qu'elle est inépuisable. La biomasse est de plus en plus utilisée car les carburants deviennent de plus en plus rares et chers. Ainsi cette production d'énergie renouvelable est utilisée d'avantage dans le monde : l'électricité provient de 1.1 % de la biomasse et elle représente 6% des énergies renouvelables. Cette énergie ne pourrait pas subvenir à la consommation d'énergie mondiale mais pourrait en couvrir 3.3 % de nos besoins en énergies [35].

#### 2.4.4 Les avantages et les inconvénients de l'énergie biomasse

Comme toute énergie utilisée, la biomasse possède des avantages et des inconvénients.

Parmi les avantages, il y a lieu de dire que :

- C'est une matière première renouvelable. Elle peut être produite indéfiniment en l'utilisant raisonnablement et de façon durable.
- Qu'elle est rapidement biodégradable.
- Que les produits issus de la biomasse sont souvent non-toxiques.
- Qu'elle dégage autant de CO<sub>2</sub> qu'elle n'en absorbe (les plantes absorbent du CO<sub>2</sub> lors de la photosynthèse).
- La biomasse est l'une des énergies renouvelables les plus rentables.
- La biomasse est disponible partout.
- La biomasse peut être transformée en différentes sources d'énergie [36].

En ce qui concerne les inconvénients, nous retenons que:

- Le rendement énergétique de la biomasse est assez faible.
- Pour produire de l'énergie biomasse, il faut occuper des terres arables et donc baisser la production agricole.
- La biomasse dégage du CO<sub>2</sub>.
- Qu'une surexploitation de la biomasse peut entraîner une déforestation importante et donc un danger pour l'environnement.
- La biomasse provoque la pollution des eaux et des sols.
- Les coûts et les impacts du transport pour amener le bois là où la ressource manque sont importants [37].

### 3 Potentiels des énergies renouvelables en Algérie

#### 3.1 Potentiel solaire

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5 Kwh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 Kwh/m<sup>2</sup>/an au Nord et 2263 KWh/m<sup>2</sup>/an au sud du pays [38].

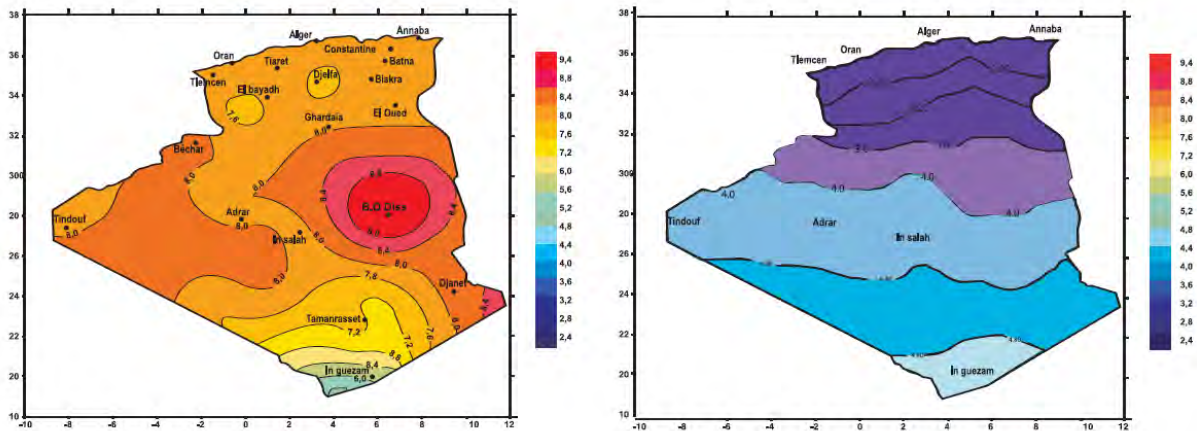
Le Tableau (1-1) ci-dessous indiqué, montre la durée moyenne d'ensoleillement et l'énergie moyenne reçue en Algérie.

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (Kwh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

**Tableau (1-1) :** Energie reçue et durée de l'ensoleillement suivant la région.

Le gisement solaire dépasse les 5 milliards de GWh et se situe essentiellement sur le Sahara qui représente 86% du territoire éclairé pour une durée moyenne d'ensoleillement de 3500h/an.

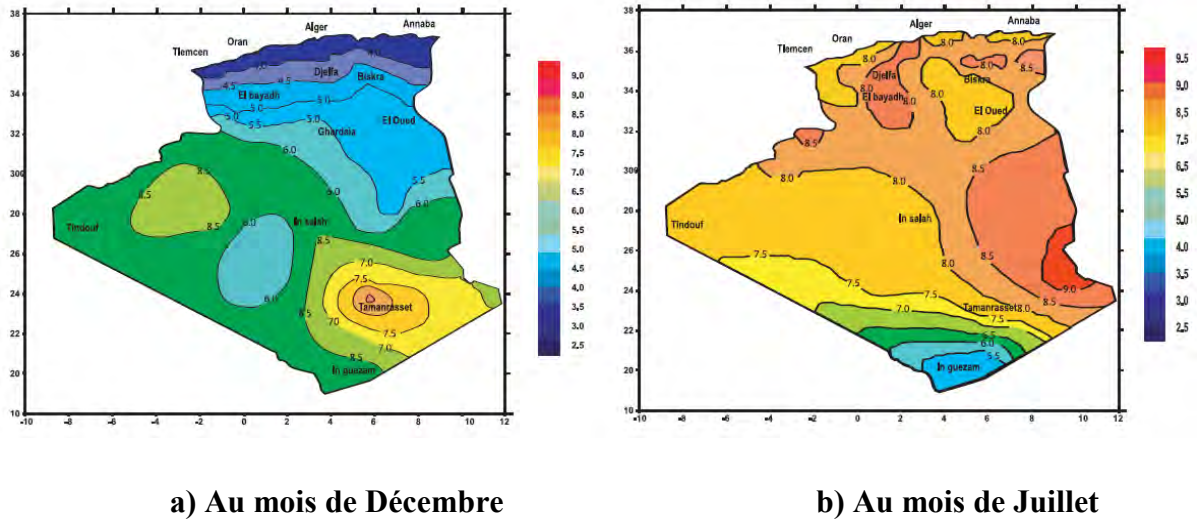
Sur les Figure (1-12) et Figure (1-13) ont été représentées les irradiations globales journalières reçues sur un plan horizontal et normal successivement, aux mois de Juillet et de décembre. Il apparait clairement que les irradiations sont plus importantes en été plus qu'en hivers et plus en s'éloignent des régions côtières allant vers le Sahara, plus l'irradiation augmente.



**a) Au mois de Juillet**

**b) Au mois de Décembre**

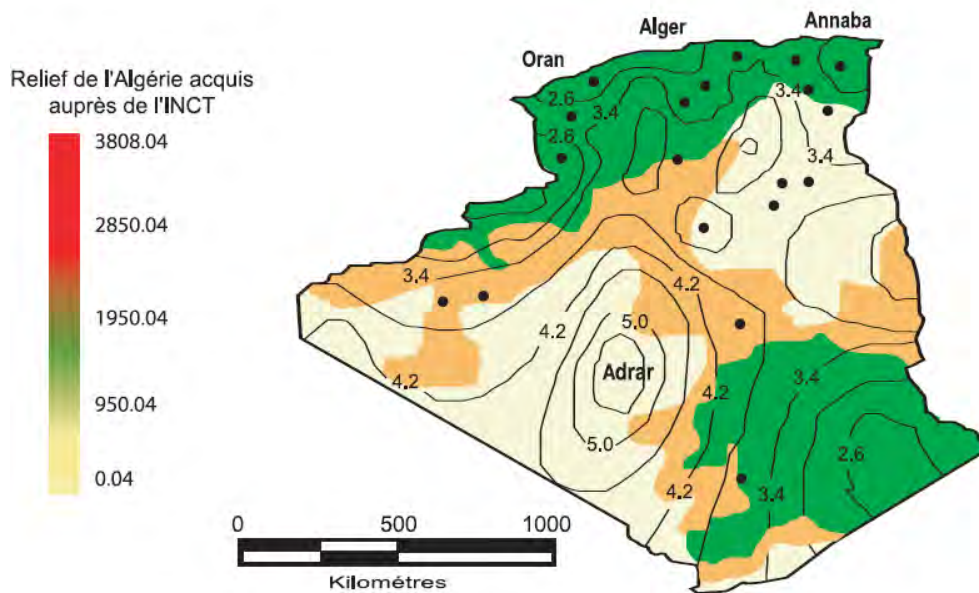
**Figure (1-12) :** Irradiation globale journalière reçue sur un plan horizontal au mois de Juillet et de décembre.



**Figure (1-13) :** Irradiation globale journalière reçue sur plan normal au mois de Décembre et Juillet.

### 3.2 Potentiel éolien

L'Algérie a un régime de vent modéré (2 à 6 m/s). Ce potentiel énergétique lui convient parfaitement bien pour le pompage de l'eau, particulièrement sur les Hauts Plateaux [40]. La Figure (1-14) donne un aperçu général des vitesses moyennes du vent sur l'ensemble du territoire, où l'on peut confirmer que pour les Hauts Plateaux, il est possible d'exploiter les potentialités éoliennes dans le domaine agricole pour palier aux difficultés du relief ou dans les zones d'accès difficile.



**Figure (1-14) :** Tracé des vitesses moyennes du vent à 10 m du sol.



### 3.3 Potentiel géothermique

Plus de deux cent (200) sources chaudes ont été inventoriées dans la partie nord du Pays. Un tiers environ (33%) d'entre elles ont des températures supérieures à 45 °C. Il existe des sources à hautes températures pouvant atteindre 118 °C à Biskra.

Des études sur le gradient thermique ont permis d'identifier trois zones dont le gradient dépasse les 5 °C/100 m [38] :

- Les zones de Relizane et Mascara
- Les zones de Aïn Boucif et Sidi Aïssa
- Les zones de Guelma et Djebel El Onk

### 3.4 Potentiel hydroélectrique

Les quantités globales de chutes pluies tombant sur le territoire algérien sont importantes et estimées à 65 milliards de m<sup>3</sup>, mais finalement profitent peu au pays en raison du nombre réduit de jours de précipitation, des concentrations sur des espaces limités, de la forte évaporation et de l'évacuation rapide vers la mer.

Schématiquement, les ressources de surface décroissent du nord au sud. On évalue actuellement les ressources utiles et renouvelables de l'ordre de 25 milliards de m<sup>3</sup>, dont environ 2/3 pour les ressources en surface. 103 sites de barrages ont été recensés. Plus de 50 barrages sont actuellement en exploitation [38].

### 3.5 Le Potentiel de la biomasse

#### 3.5.1 Potentiel de forestier

Le potentiel **forestier** actuel est évalué à environ 37 Millions de TEP (Tonnes équivalent pétrole). Le potentiel récupérable est de l'ordre 3,7 Millions de TEP. Le taux de récupération actuel est de l'ordre de 10% [38].

#### 3.5.2 Potentiel énergétique des déchets urbains et agricoles

5 millions de tonnes de déchets urbains et agricoles ne sont pas recyclés. Ce potentiel représente un gisement de l'ordre de 1.33 millions de Tep/an [38].

## 4 Les systèmes d'énergies hybrides (SEH)

### 4.1 Définition

Les Systèmes énergétiques renouvelables hybrides (SEH) sont des systèmes énergétiques qui combinent deux ou plusieurs sources d'énergie renouvelables.

En général, les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaires, qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité.

Comme ils sont dépendants en même temps de l'environnement et du site, on s'attend un peu à ce que leur combinaison judicieuse et complémentaire puisse surmonter certaines limites qui sont inhérentes à tout système individuel utilisé seul [39]. Dans ce contexte, il convient de rappeler que les systèmes hybrides peuvent également réduire le besoin de stockage d'énergie qui est très coûteux et l'espace consommé. Ainsi, l'application de système d'énergie renouvelable est devenue une alternative importante en tant que fournisseur d'énergie dans le programme d'électrification rurale lorsque le prix du pétrole atteint son plus haut niveau.

### 4.2 Classification

Plusieurs classifications de systèmes hybrides sont réalisées selon le critère choisi. Par la suite seront présentées les classifications les plus répandues [40].

#### 4.2.1 Le Régime de fonctionnement

Les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes. Dans le premier groupe, on trouve les systèmes hybrides travaillant en parallèle avec le réseau électrique, appelés aussi réseaux connectés. Ces systèmes contribuent à satisfaire la charge du système électrique du pays. Les systèmes hybrides du deuxième groupe fonctionnent en régime isolé ou en mode autonome. Ils doivent répondre aux besoins des consommateurs situés dans des sites éloignés du réseau électrique : refuges de montagne, îles, villages isolés, panneaux de signalisation routière etc... [40].

#### 4.2.2 La Structure du système hybride

Trois critères peuvent être pris en compte dans le classement en fonction de la structure du système. Le premier critère est la présence ou non d'une source d'énergie classique. Cette source conventionnelle peut être un générateur diesel, une micro turbine à gaz, et dans le cas d'une étude du réseau électrique complet – une centrale toute entière.

Un second critère possible est la présence ou non d'un dispositif de stockage. La présence d'un stockage permet d'assurer une meilleure satisfaction des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une ressource primaire à convertir en électricité. Les dispositifs de stockage peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène, des volants d'inertie, ... etc.

La dernière classification possible est celle relative au type de sources d'énergie renouvelables utilisées. La structure du système peut contenir un système photovoltaïque, une

éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique (centrales hydroélectrique ou utilisation des vagues) ou une combinaison de ces sources. Un critère important pour la sélection de la source utilisée est le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit d'installation du système hybride. Un autre facteur déterminant est le niveau de consommation de l'énergie électrique d'alimentation. Son importance détermine le besoin d'une source supplémentaire, d'un dispositif de stockage et/ou d'une source conventionnelle,... etc [40].

### 4.3 Etudes des systèmes hybrides

Au vue de ces nombreux critères, il est aisé d'imaginer la diversité des études sur les systèmes hybrides disponibles. Une synthèse non exhaustive des études réalisées sur ces systèmes est présentée dans ce paragraphe [40].

Les systèmes d'énergie hybride sont en général constitués [41]:

- des sources d'énergies classiques (groupe électrogène par exemple),
- des sources d'énergie renouvelable (éolienne, solaire, hydroélectricité, marémotrice, géothermique etc.),
- des convertisseurs statiques et dynamiques, des systèmes de stockage (batterie, volant d'inertie, le stockage hydrogène...),
- des charges principales et de délestages et un système de supervision.

#### 4.3.1 Les combinaisons les plus courantes

Les combinaisons les plus courantes son les suivants :

- Solaire PV + GE + batterie
- Solaire PV + Aérogénérateur + batterie
- Solaire PV + réseau + batterie

#### 4.3.2 Critères d'Optimisation et Logiciels de Dimensionnement

##### 4.3.2.1 Critères d'optimisation du système hybride

Différents critères sont utilisés pour optimiser le système en fonction du site d'installation. Les critères les plus fréquemment utilisés sont [40] :

- La probabilité de perte de la charge (lost of load probability) ou la probabilité de perte d'approvisionnement (loss of power supply probability).
- Le coût d'énergie produite.

### 4.3.2.2 Logiciels pour l'étude des systèmes hybrides

Plusieurs logiciels pour l'analyse et l'optimisation des systèmes énergétiques hybrides ont été développés et sont effectivement largement utilisés comme HOMER, SOMES, RAPSIM, SOSIM, etc. [42, 43 et 44]. Réviser certains documents pertinents concernant les techniques de simulation et d'optimisation, ainsi que les outils existants qui sont nécessaires pour simuler et de conception autonome systèmes hybrides pour la production d'électricité et / ou de la chaleur, les plus connus sont [40]:

- HYBRID2 – ce logiciel est destiné à l'étude de différents systèmes hybrides avec divers éléments. Il dispose d'outils pour effectuer une analyse économique. La présentation des résultats peut être réalisée de deux manières – des résultats synthétisés ou des résultats détaillés avec variation dans le temps ;
- HOMER (Hybrid Optimisation Model for Electric Renewables) – avec ce logiciel, il est possible de modéliser des systèmes hybrides qui travaillent en parallèle avec le réseau électrique ou en régime autonome. Il dispose de modèles de générateurs conventionnels et de sources d'énergie renouvelables. De plus, le logiciel contient des algorithmes d'optimisation à l'aide desquels il est possible de choisir le meilleur système hybride ;
- RAPSIM (Remote Area Power Supply Simulator) – c'est un logiciel de simulation pour différents modes d'un approvisionnement en courant alternatif. Il peut être utilisé pour le dimensionnement d'installations photovoltaïques, de générateurs éoliens et diesel dans des systèmes hybrides isolés.
- SOMES, SOSIM. Ce sont des logiciels dont l'utilisation présente de grands inconvénients puisqu'ils limitent les modifications que peut apporter un utilisateur et empêchent une analyse approfondie des systèmes hybrides à cause de leur mode de protection.

## 4.4 Aperçu sur l'état de l'art des systèmes hybrides

Ces dernières années, de nombreuses études et applications ont été conduites concernant l'énergie hybride en vue d'optimiser l'intégration et la répartition des ressources disponibles en vue de satisfaire la demande exigée par la consommation.

Mentionnons avant de conclure sur ce chapitre, le nombre impressionnant de travaux publiés dans le domaine des énergies renouvelables, notamment ceux liés à l'effet photovoltaïque et plus récemment ceux en rapport avec les systèmes hybrides. Dans le présent document nous rappelons sommairement certaines de ces études rapportées par certains auteurs [45]. Ce rappel résume d'une manière succincte l'état des connaissances en la matière réalisé à ce jour.

Nous commencerons donc par Diaf et al., qui a proposé un système hybride : PV-éolienne avec batterie [46]. Car, il semblerait que la production d'électricité par l'énergie éolienne et photovoltaïque est celle qui prêche le mieux étant donné la disponibilité des ressources en vent et soleil, donc les mieux partagés à la production décentralisée d'électricité. Sur un autre registre, Hashimoto et al., a discuté un système hybride autonome (PV-éolienne) avec une batterie de secours secondaire. Leur système se compose de

modules photovoltaïques cylindriques montés sur poteau éolienne pour économiser l'espace d'installation et le coût [47]. Afin de décrire les principaux paramètres de production et de performance d'un système photovoltaïque (PV) relié au réseau et les relations entre eux, ainsi que pour sa production combinée avec celle d'un parc éolien, Sharaf et El-Sayed ont établi un système hybride : PV-éolienne relié au réseau [48]. Les systèmes, ainsi analysés individuellement sont ceux sans autoconsommation, sans moyens de stockage et sans moyens de production d'appoint

Par ailleurs, Bakos a réalisé un système hybride à partir d'une seule source éolienne, où l'énergie excédentaire est utilisée pour obtenir la 2<sup>ème</sup> source d'énergie hydraulique par stockage d'eau dans un réservoir en bénéficiant d'un système diesel [49]. Dans un village en Ethiopie, Bekele et Tedesse [50] ont imaginé un système hybride PV-hydro-éolienne qui peut fournir de l'électricité sans interruption afin d'optimiser le système global.

Quant à Ram Prabhakar et Ragavan [51], ils vont plus loin ont discuté un système hybride presque identique : PV-éolienne-hydro en rajoutant des batteries de soutien. Un système de gestion est mis en place pour estimer la charge grâce à un modèle de bilan énergétique. Il utilise un stockage de l'eau dans le réservoir pour une utilisation future, en raison de la non-disponibilité de toute ressource en énergie renouvelable ; Le système est capable de fonctionner en multi-mode : hydro-éolienne-solaire, éolienne-solaire, hydro-solaire, et l'éolienne-hydro. Lorsque le temps est favorable, PV et l'éolienne sont excédentaires. Alors l'eau est stockée dans le réservoir pour une utilisation future.

Actuellement, le générateur diesel est la technique la plus utilisée pour l'électrification des sites isolés. Néanmoins, l'accès à ces sites étant généralement long et difficile, les coûts de maintenance et d'approvisionnement en carburant sont très élevés. En conséquence, envisager de coupler – au sein d'un système hybride – un générateur diesel avec deux sources d'énergies renouvelables (éolien-photovoltaïque) représente alors souvent l'option la plus économique. A cet effet, Saheb-Koussa et al. a proposé un système hybride constitué des PV-éolienne-diesel. Il a présenté les résultats de l'analyse technico-économique. Pour tous les six sites qu'il a étudié, il a découvert que le site isolé PV est la meilleure solution, compte tenu de ses aspects économiques. Mais il y aurait un déficit au cours de la saison d'hiver, et en utilisant un système hybride, il a surmonté cette difficulté. Son étude suggère que ce système hybride serait fiable, mais il n'est pas économique [52].

Donc, d'une manière générale les systèmes d'alimentation traditionnels pour les régions éloignées ou rurales restent basées sur les combustibles fossiles. Après la mise en œuvre des ressources en énergies renouvelables (ER), des applications de l'énergie solaire sont devenues populaires dans les systèmes d'énergie à distance. Les travaux de recherche récents montrent que la combinaison de certains autres ER ressources telles que l'énergie éolienne et l'hydroélectricité pourrait faire un système d'alimentation plus rentable et respectueux de l'environnement. En outre, les systèmes d'énergie renouvelable hybrides pour électrifications rurales ont connu une croissance rapide au cours des dernières années. Dans la présente étude, un aperçu de DRESS appliquée pour les zones rurales est présenté pour aider les travaux actuels et futurs dans ce domaine. C'est ainsi que Fadaeenejad et al., a étudié un système hybride : PV-éolienne-batterie et PV- éolienne –diesel. Pour l'optimisation des logiciels

HRES iHOGA développé par le Dr Rodolfo, Dufo-Lopez a utilisé une étude où est suggère un système hybride : PV-éolienne-batterie comme une meilleure option [53].

En plus des combinaisons déjà évoquées, Akikur et al., a établi le système hybride : solaire-éolien-diesel-Hydro-biogaz. Il a réalisé une étude sur les systèmes solaires, les systèmes hybrides autonomes, les systèmes hybrides solaire-éolienne, les systèmes hybride solaire-hydro, l'hybride solaire-éolien-diesel et l'hybride solaire-éolien-diesel-hydro-biogaz. Il a discutés la viabilité et l'importance de l'énergie solaire (à la fois dans la version autonome et la forme hybride) dans l'électrification globale [39].

Dans une autre étude, M.S. Is mail, M. Moghavvemi and T. M. I. Mahlia, ont analysé le système hybride PV-batterie-diesel et on conclut que le système hybride est la meilleure alternative lorsque le générateur diesel est utilisé comme source de sauvegarde [54]. Pour Kalantar et Mousavi [55] le système hybride proposé est du type éolienne-solaire-micro turbine-batterie. Dans leur système, micro-turbine et batterie agissent comme une alimentation de secours pendant la carence énergétique. Mais dans ces systèmes le rôle des batteries est vital. La taille des batteries et leur capacité sont d'une importance capitale pour les systèmes d'alimentation à énergie renouvelable.

Pour Menshsari et al., un système hybride constitué de l'hydro-éolienne-solaire-pile à combustible a été proposé et l'optimisation du système a été discuté en utilisant l'algorithme de colonie de fourmis. La fiabilité du système a également été évaluée à l'aide de la probabilité de perte d'alimentation électrique (LPSP). Ce système a été optimisé pour le coût et la fiabilité [56]. Un autre auteur (Saha et al. [21]) a proposé un système hybride hypothétique de l'éolienne-solaire-biogaz-micro-hydro des principales sources d'énergie et aussi un générateur diesel utilisé comme source de sauvegarde d'urgence. Mais une telle combinaison optimale dépend des conditions météorologiques non conventionnelles d'énergie sources-solaire et éolienne, et des sources d'énergie indépendante comme la biomasse pour éliminer complètement la dépendance de la météo de l'énergie renouvelable. La source assure également une production à moindre coût. La séquence de fonctionnement de ces sources d'énergie en cas de carence de puissance est: l'hydroélectricité, éolienne, photovoltaïque, la batterie, le biogaz et le moteur diesel. Heure par heure, l'analyse du système proposé a été simulée avec MATLAB si l'analyse ne considère pas la synchronisation de l'autre système d'alimentation.

De même, Suha Yazici et al. [22] ont décrit un système hybride d'alimentation cellulaire : PV-éolienne-carburant pour alimenter des équipements dans un véhicule récréatif (VR) de type studio installations de vie appelés H2Eko Karavan. Dans ce cas éolienne et solaire sont les sources d'énergie primaire du système. Cependant que, l'énergie excédentaire serait utilisée pour l'électrolyse de l'eau qui peut être utilisée pour alimenter la pile à combustible et peut être brûlée comme combustible dans l'hydrogène cuiseur. Le dimensionnement des composants se fait en utilisant un logiciel appelé HOGA qui considère le profil de charge journalière, solaire et données de vent, les options d'équipement, les prix, et la stratégie de contrôle. La facilité d'utilisation de ce véhicule a permis de l'utiliser comme centre médical mobile pour une zone de télécommande, comme un véhicule d'intervention d'urgence et moyen de coordination des secours ou centre de communication lorsque l'alimentation du réseau est indisponible.

Enfin dans le cas où il a des panneaux photovoltaïques et des éoliennes comme des unités spécifiques, Xu. D, et al., considère que le problème consiste à déterminer le nombre de panneaux photovoltaïques, éoliennes, et des batteries. Sa formulation conduit à un problème de programmation non linéaire de nombre entier. Il résout ainsi le problème en utilisant le LPSP dans le cadre de systèmes de fourmis en minimisant l'investissement en capital initial [57]. D'un autre côté, Yang.H, W. Zhou, Lin Lu, and Z. Fang ont présenté une méthode de dimensionnement optimal pour un système hybride solaire-éolien autonome avec la technologie LPSP basé sur des algorithmes génétiques. Elle consiste à déterminer, parmi d'autres éléments, le nombre de PV et le nombre d'éoliennes [58].

Plusieurs études ont été faites montrant la capacité d'optimiser les configurations hybrides de systèmes d'énergie renouvelable afin de maximiser les performances tout en minimisant les coûts. C'est ainsi que Ashok. S a utilisé le modèle d'optimisation d'un système hybride et la formulation logicielle afin de déterminer le nombre de microcentrales hydraulique, de modules photovoltaïque, d'éoliennes et de piles en minimisant le coût de cycle de vie [59]. Pour H.Yand. H et al, le modèle LPSP est utilisé et le plus bas coût actualisé de l'énergie est considérée comme configuration de l'économique optimale. La configuration optimale pour déterminer le nombre de modules PV, la capacité de l'éolienne, et la capacité de la banque de la batterie est prise en compte, suite à la formulation simple mais attrayante utilisant la programmation linéaire pour modéliser et résoudre le problème des sources de répartition sans prendre en compte la question du stockage [60].

## **Conclusion**

Nous venons de présenter les classifications des filières énergétiques, les sources d'énergies renouvelables ainsi que les potentialités des énergies renouvelables disponibles en Algérie,

Nous avons remarqué que les énergies renouvelables constituent une bonne solution pour le changement climatique provenant du CO<sub>2</sub> et l'effet de serre. Nous avons constaté qu'il existe un problème quant à l'utilisation d'une seule source d'énergie renouvelable du fait la variabilité des conditions climatiques.

Dans cette analyse de l'état de l'art dans les systèmes hybrides nous avons remarqué aussi que les chercheurs dans ce domaine ne disposent pas de méthodologies définitivement bien établies et généralisables

Pour cette raison, il est nécessaire de proposer un modèle de gestion de la répartition optimale des ressources à ER qui exploite les caractéristiques internes et environnementales.

# **Chapitre2**

## **Les Systèmes D'Énergies Renouvelables Développées**



## Chapitre2

### Les Systèmes D'Energies Renouvelables Développées

#### Sommaire

---

##### Introduction

##### 1 Energie photovoltaïque

###### 1.1 Modèle de la cellule solaire

###### 1.1.1 Modèle de la cellule photovoltaïque

###### 1.1.2 Expression de la caractéristique $I-V$

###### 1.2 Reconstitution de la caractéristique $I-V$

###### 1.2.1 Caractéristiques expérimentales du module solaire

###### 1.2.2 Détermination des paramètres de la cellule

###### 1.2.3 Représentation graphique

###### 1.3 Expressions de la puissance

###### 1.3.1 Expression de la puissance en fonction du courant

###### 1.3.2 Expression de la puissance en fonction de la tension

###### 1.4 Estimation de la puissance

###### 1.4.1 Influence de l'éclairement et de la température

###### 1.4.2 Influence de la charge d'utilisation

###### 1.4.3 Influence de l'orientation du module photovoltaïque

###### 1.5 Calcul de la puissance à la sortie du module PV par quelques modèles mathématiques

###### 1.5.1 Première approche

###### 1.5.2 Deuxième approche

###### 1.5.3 Troisième approche

###### 1.5.4 Quatrième approche (Modèle de Jones et Underwood(2002))

###### 1.6 La relation entre la puissance et la surface

###### 1.7 Interface graphique

##### 2 Energie éolienne

###### 2.1 Caractérisation de la Vitesse du Vent

###### 2.1.1 Variation mensuelle de la vitesse du vent

###### 2.1.2 Variations annuelles de la vitesse du vent

###### 2.1.3 Détermination des caractéristiques statistiques

###### 2.1.4 Variation de la vitesse du vent selon la hauteur

###### 2.2 Conception et réalisation de l'éolienne

###### 2.2.1 Conception des pales

###### 2.2.2 Conception de l'aérogénérateur

###### 2.3. Estimation énergétique

###### 2.3.1 Coefficient de puissance $C_p$

###### 2.3.2 La relations entre la puissance et la surface

###### 2.3.3 Interface graphique et estimation énergétique

##### 3 Energie photothermique

##### 4 Energie biomasse

###### 4.1 Système bioréacteur anaérobie

###### 4.2 Relation entre la puissance et la surface

##### Conclusion

---

# Chapitre2

## Les Systèmes D'Energies Renouvelables Développées

### Introduction

Nous allons présenter dans ce chapitre les systèmes d'énergies renouvelables que nous avons développées et expérimentées au sein de notre laboratoire : un système photovoltaïque, un système éolien, un système photo-thermique et un système de production de biomasse. Nous focaliserons notre attention, notamment sur les systèmes photovoltaïques et éoliens qui feront l'objet de développements plus détaillée. Pour chaque système, nous présenterons sa conception, son évaluation énergétique ainsi que son organisation expérimentale.

Enfin, et afin de caractériser les paramètres concernant les ER, nous nous baserons sur des mesures expérimentales réalisées dans la région de Constantine, et ce recueillis sur plusieurs années.

### 1 Energie photovoltaïque

Dans cette étude, on s'intéresse à l'estimation de la puissance fournie par un générateur photovoltaïque constitué de panneaux solaires au silicium monocristallin. Dans ce but, un modèle de la cellule solaire à une exponentielle a été étudié [61, 62]. Les expressions de la puissance ont été déterminées en négligeant la résistance shunt. La fonction de Lambert  $W$  a été utilisée pour exprimer la puissance en fonction du courant et de la tension [63]. Les expressions de la puissance en fonction du courant et de la tension sont également présentées en tenant compte de la résistance shunt conformément à quelques références [64, 65].

Les courbes caractéristiques  $I-V$  et de puissance en fonction du courant et de la tension ont été reconstituées et graphiquement représentées. Un programme a été établi pour permettre d'estimer la puissance délivrée par le panneau solaire en fonction de ses caractéristiques, de l'état de l'environnement et de son l'emplacement.

#### 1.1 Modele de la cellule solaire

##### 1.1.1 Modèle de la cellule photovoltaïque

Il existe deux modèles de la cellule photovoltaïque qui sont communément utilisés: le modèle à une exponentielle et le modèle à deux exponentielles [61, 62]. Dans cette étude, on considérera le modèle à une exponentielle. Figure (2-1) présente le schéma électrique équivalent de la cellule solaire photovoltaïque conformément au modèle à une exponentielle [62, 64-67]. Ce modèle comporte:

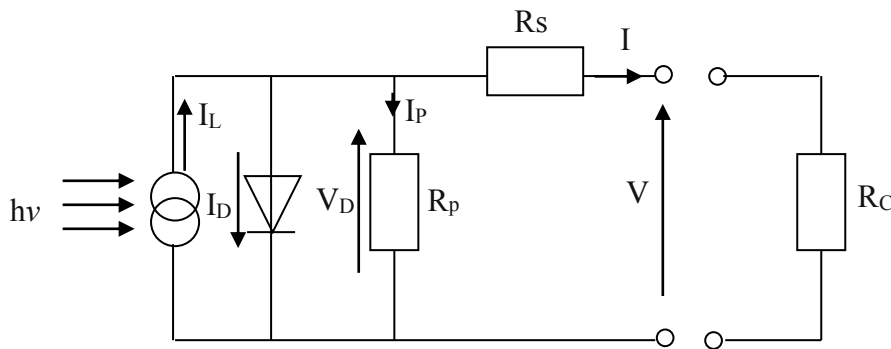
- Un générateur de courant délivrant un photocourant  $I_L$  généré par la lumière dans la cellule. Le photocourant qui est proportionnel à la quantité de lumière et à la surface de la cellule.
- Une diode, représentant la jonction  $P-N$  dans le silicium. Cette jonction induit une barrière de potentiel, laquelle absorbe un courant  $I_D$ .
- Une résistance parallèle  $R_p$ , et une résistance série  $R_s$  qui représente les pertes ohmiques dans la cellule.

Le courant  $I$  est celui qui est réellement fourni par la cellule solaire pour alimenter une charge  $R_C$  sous la tension  $V$ .

### 1.1.2 Expression de la caractéristique $I - V$

En Appliquant les lois de Kirchoff au schéma équivalent de la Figure (2-1), le courant  $I$  débité par la cellule est la somme algébrique de trois courants:

$$I = I_L - I_D - I_P \quad (2-1)$$



**Figure (2-1):** Schéma équivalent de la cellule solaire.

La tension aux bornes de la diode est:

$$V_D = R_p I_P = V + R_s I \quad (2-2)$$

Où  $I_p$  représente le courant traversant la résistance parallèle,  $R_p$

$$I_P = \frac{V_D}{R_p} = \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (2-3)$$

Le courant de la diode  $I_D$  s'écrit donc sous la forme:

$$I_D = I_0 \left( e^{\frac{qV_D}{nKT}} - 1 \right) \quad (2-4)$$

En remplaçant dans (2-1), les expressions des courants (2-3) et (2-4), on obtient l'équation de la caractéristique  $I-V$  de la cellule photovoltaïque:

$$I = I_L - I_0 \left( \exp \left[ \frac{q(V + R_S I)}{nKT} \right] - 1 \right) - \frac{V + R_S I}{R_P} \quad (2-5)$$

$n$  : est le facteur d'idéalité de la diode;

$K$  : Constante de Boltzman;

$T$  : Température;

$q$  : La charge de l'électron;

$V$  : La tension appliquée à la charge utilisatrice  $R_C$  ;

$I_0$  : Courant de saturation de la diode ( $I_S$ ).

## 1.2 Reconstitution de la caractéristique $I-V$

L'expression (2-5) de la caractéristique  $I-V$  est une équation transcendante et ne peut être résolue que numériquement. Pour représenter la caractéristique, on considère une valeur donnée de  $V$  et on détermine le courant  $I$  correspondant et vice-versa.

Cependant, pour pouvoir exploiter cette caractéristique, il faut d'abord déterminer les paramètres ( $n, R_S, R_P, I_0, I_L$ ) qui sont présents dans l'expression (2-5). Une technique proposée pour la détermination de ces paramètres est la méthode des trois points [68].

Elle consiste à utiliser trois points situés sur la courbe  $I-V$  expérimentale qui correspondent au courant de court-circuit  $I_{CC}$ , à la tension du circuit ouvert  $V_{CO}$  et au maximum de puissance  $P_m$  qui sont mesurables ou fournis par le constructeur.

### 1.2.1 Caractéristiques expérimentales du module solaire

Dans cette étude, on s'intéresse à l'estimation de la puissance fournie par un générateur photovoltaïque [64, 65].

Conformément au constructeur des cellules que nous avons utilisé (Belgosolar), le module solaire (Figure (2-2)) est constitué de 36 cellules de silicium monocristallin de forme circulaire, de diamètre 10 cm. Les cellules sont disposées en série et en parallèle. Les éléments suivants sont donnés aux conditions standards:

Puissance crête:	$P_C = 33 \text{ Watts}$
Tension de circuit ouvert:	$V_{CO} = 21.0 \text{ Volts}$
Courant de court-circuit:	$I_{CC} = 2.18 \text{ Ampères}$

Puissance maximale:  $\{ P_m (V_m = 16.5 \text{ Volts}, I_m = 2.0 \text{ Ampères}) \}$



Figure (2-2): Vue du panneau solaire utilisé.

On peut en déduire le facteur de forme qui indique le degré d'idéalité de la caractéristique [69], soit le rapport:

$$FF = \frac{P_m}{V_{CO} \cdot I_{CC}} = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{CO} \cdot I_{CC}} \quad (2-6)$$

Avec  $P_m = 33 \text{ Watts}$  et  $V_{CO} \cdot I_{CC} = 45.78 \text{ Watts}$ , on obtient  $FF = 0.72$

### 1.2.2 Détermination des paramètres de la cellule

La méthode de détermination des paramètres intrinsèques ( $n, R_S, R_P, I_0, I_L$ ) que nous allons utiliser, exploite les données expérimentales fournies par le constructeur dans la section précédente ( $I_{CC}, V_{CO}$  et  $P_m$ ) et un certain nombre d'hypothèses simplificatrices du modèle.

- **Facteur d'idéalité  $n$**

Dans le cas de cellules solaires au silicium monocristallin, on considère l'hypothèse d'une cellule idéale. Le facteur d'idéalité est alors considéré comme égal à l'unité, soit.  $n = 1$

- **Courant photonique**

Pour l'estimation du courant photonique  $I_L$ , si on considère l'expression (2-5) en situation de court-circuit ( $I = I_{CC}$  et  $V = 0$ ), on a:

$$I_{CC} = I_L - I_0 \left[ e^{\frac{qR_S I_{CC}}{KT}} - 1 \right] - \frac{R_S I_{CC}}{R_P} \quad (2-7)$$

Dans le cas d'une cellule idéale avec  $n=1$  et ( $R_S \rightarrow 0$  et  $R_P \rightarrow \infty$ ), le courant est approximativement égal au courant photonique:

$$I_{CC} = I_L \quad (2-8)$$

• **Courant de saturation de la diode  $I_0$**

En situation de circuit ouvert, le courant est nul ( $I=0$  et  $V=V_{CO}$ ). La tension en circuit ouvert est obtenue à partir de l'équation (2-5).

$$0 = I_L - I_0 \left[ e^{\frac{qV_{CO}}{KT}} - 1 \right] - \frac{V_{CO}}{R_P} \quad (2-9)$$

Dans le cas d'une cellule idéale  $\{ R_S \rightarrow 0$  et  $R_P \rightarrow \infty, I_L = I_{CC}$  et  $n=1 \}$ , on a :

$$V_{CO} = \frac{KT}{q} \text{Log} \left[ 1 + \frac{I_{CC}}{I_0} \right] \quad (2-10)$$

La détermination de courant  $I_0$ , basée sur l'expression (2-10), donne dans le cas de notre module solaire un courant  $I_0$  qui est très négligeable, de l'ordre de ( $1,6.10^{-10}$  Ampères). A cause des approximations utilisées, pour certaines cellules solaires, il arrive d'obtenir des résultats incohérents comme notés par quelques auteurs [68].

• **Résistance série  $R_S$**

L'estimation de la résistance série  $R_S$ , après quelques corrections pour faire coïncider la caractéristique théorique au point  $P_m$  est de l'ordre de  $1,2 \text{ ohm}$ . Cette résistance correspond à la mise en série des 36 résistances des cellules photovoltaïques, d'où la résistance d'une cellule est:  $0.033 \text{ ohm}$ .

### 1.2.3 Représentation graphique

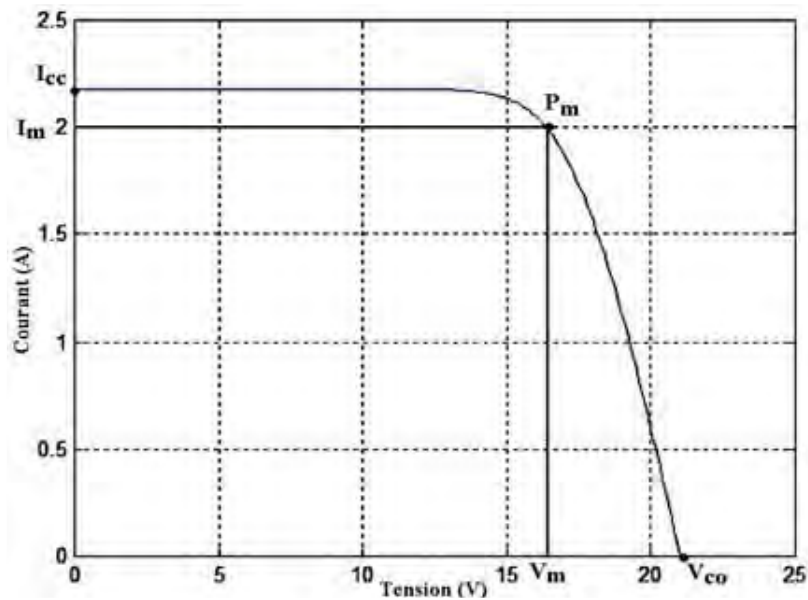
Comme les mesures concernent le module solaire, qui est constitué de 36 cellules disposées en série, on introduira le nombre de cellules  $M=36$  dans l'expression de la caractéristique en prenant

$R_P \rightarrow \infty, n=1$ ,  $I_0 = 1,6.10^{-10}$  Ampères,  $R_S = 1,2 \text{ ohm}$  et  $I_{CC} = I_L$ , l'expression (2-5) s'exprime comme suit:

$$I = I_L - I_0 \left( e^{\frac{(V+R_S I)}{M.V_T}} - 1 \right) \quad (2-11)$$

Avec 
$$V_T = KT/q$$

Cette expression, obtenue à l'aide des points fournis par le constructeur, permet de reconstituer la caractéristique  $I-V$  du module photovoltaïque. Une représentation graphique  $I = f(V)$  basée sur l'expression (2-11) est donnée à la Figure (2-3). On voit bien que les points donnés par le constructeur correspondent avec ceux de la caractéristique tracée.



**Figure (2-3):** Caractéristique  $I-V$  en conditions standards.

La Figure (2-4) représente des courbes caractéristiques du panneau solaire utilisé en variant le courant  $I_L$  qui dépend directement de l'éclairement reçu par la cellule et de la température de la cellule.

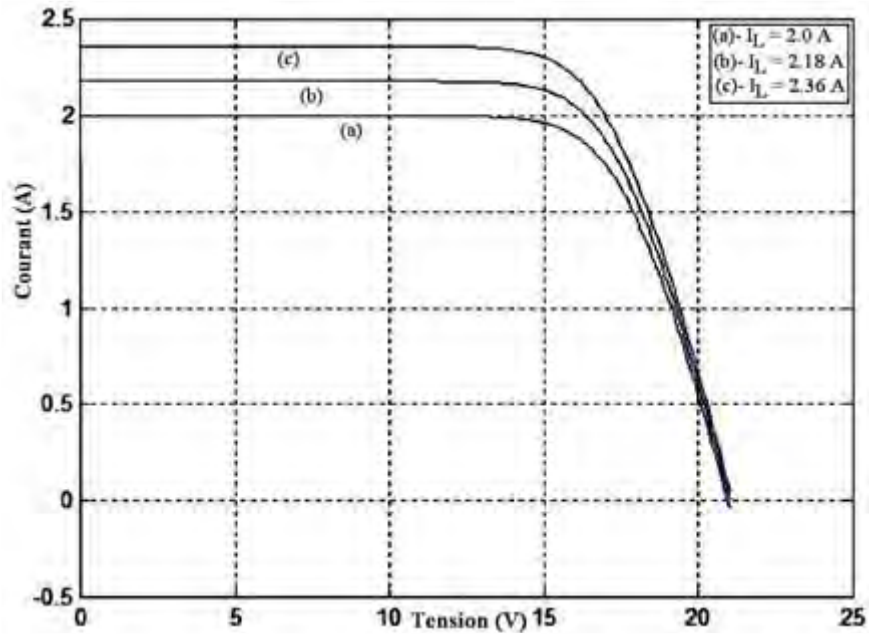


Figure (2-4): Caractéristiques  $I-V$  paramétrées par  $I_L$ .

### 1.3 Expressions de la puissance

#### 1.3.1 Expression de la puissance en fonction du courant

Si on néglige  $R_p$ , de l'expression (2-11), on peut en déduire l'expression de  $V$  en fonction de  $I$ . Elle peut s'exprimer explicitement en fonction de  $I$  de la sorte:

$$V = V_T \left[ \ln \left( 1 + \frac{I_L - I}{I_0} \right) - \frac{R_S I}{V_T} \right] \quad (2-12)$$

D'où la détermination de la puissance qui s'exprime aussi explicitement en fonction de :  $I$

$$P = V.I = V_T \left[ I \cdot \ln \left( 1 + \frac{I_L - I}{I_0} \right) - \frac{R_S I^2}{V_T} \right] \quad (2-13)$$

Une représentation graphique de la puissance  $P$  en fonction du courant  $I$  paramétrée par le courant photonique  $I_L$  est donnée à la figure suivante (Figure (2- 5)).



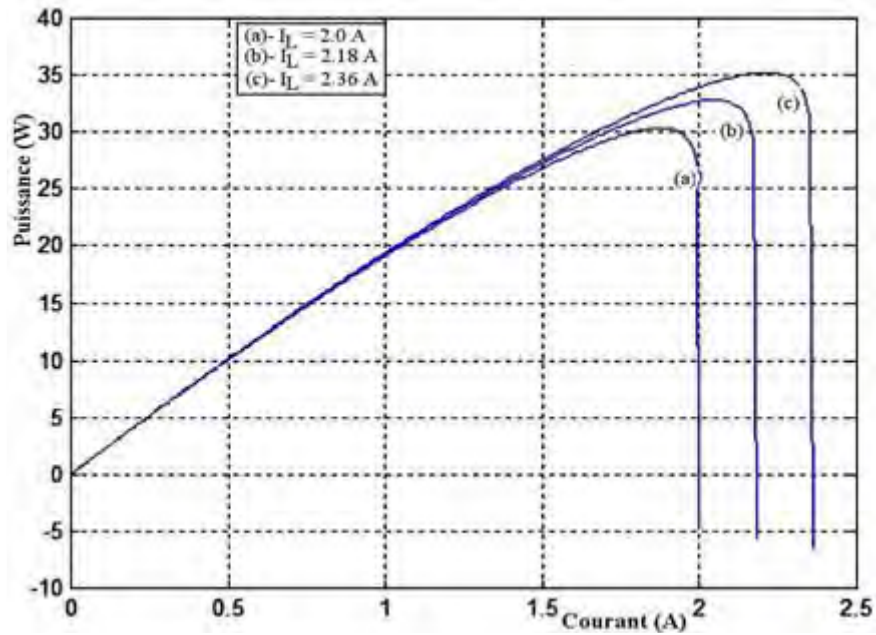


Figure (2-5): Puissance en fonction du courant  $P = f(I)$  pour diverses valeurs de  $I_L$ .

A titre indicatif, on donnera l'expression de la tension en fonction du courant sans négliger la résistance parallèle  $R_p$  de l'équation (2-5). En utilisant la fonction  $W$  de Lambert, cette expression peut se mettre sous la forme suivante [64, 65, 67]:

$$V = I.R_S + \left( -Lambert W \left( \frac{I_0 \cdot R_p e^{\left( \frac{R_p(I+I_L+I_0)}{nV_T} \right)}}{nV_T} \right) + \frac{R_p(I+I_L+I_0)}{nV_T} \right) nV_T \quad (2-14)$$

$$P = I^2 R_S + I \left( -Lambert W \left( \frac{I_0 \cdot R_p e^{\left( \frac{R_p(I+I_L+I_0)}{nV_T} \right)}}{nV_T} \right) + \frac{R_p(I+I_L+I_0)}{nV_T} \right) nV_T \quad (2-15)$$

Cependant, ce modèle ne permet pas de reconstituer la courbe caractéristique au moyen des trois points. La détermination des paramètres nécessite la courbe expérimentale de la caractéristique.

### 1.3. 2 Expression de la puissance en fonction de la tension

La détermination de l'expression de la puissance en fonction du courant peut s'établir de la sorte. En négligeant la résistance parallèle  $R_p$ , on peut écrire l'expression (2-5) sous la forme:

$$e^{(V+R_S \cdot I)/V_T} = 1 + \frac{I_L - I}{I_0} \quad (2-16)$$

Avec quelques transformations, on peut écrire :

$$\frac{R_S}{V_T} (I_0 + I_L - I) e^{R_S(I_0+I_L-I)/V_T} = \frac{R_S \cdot I_0}{V_T} \cdot e^{V/V_T} \cdot e^{R_S(I_0+I_L)/V_T} \quad (2-17)$$

En posant:

$$X = \frac{R_S}{V_T} (I_0 + I_L - I) \quad (2-18)$$

$$A = \frac{R_S \cdot I_0}{V_T} \cdot e^{R_S(I_0+I_L)/V_T} \quad (2-19)$$

L'expression (2-17) peut se mettre sous la forme:

$$X \cdot e^X = A \cdot e^{V/V_T} \quad (2-20)$$

Le courant s'exprime en fonction de la tension à l'aide de la fonction  $W$  de Lambert qui est de la forme :

$$Y \cdot e^Y = a \Rightarrow Y = W(a) \quad (2-21)$$

D'ou la solution de (2-20):

$$X = W(A \cdot e^{V/V_T}) = \frac{R_S}{V_T} (I_0 + I_L - I) \quad (2-22)$$

L'expression  $I = f(V)$  en utilisant la fonction  $W$  de Lambert est :

$$I = (I_0 + I_L) - \frac{V_T}{R_S} W(A \cdot e^{V/V_T}) \quad (2-23)$$

D'où l'expression de la puissance en fonction de  $V$

$$P = V.I = (I_0 + I_L).V - \frac{V_T.V}{R_S} W(A.e^{V/V_T}). \quad (2-24)$$

Une représentation graphique de la puissance  $P$  en fonction de la tension  $V$  paramétrée par le courant  $I_L$  est donnée à la figure suivante (Figure (2-6)).

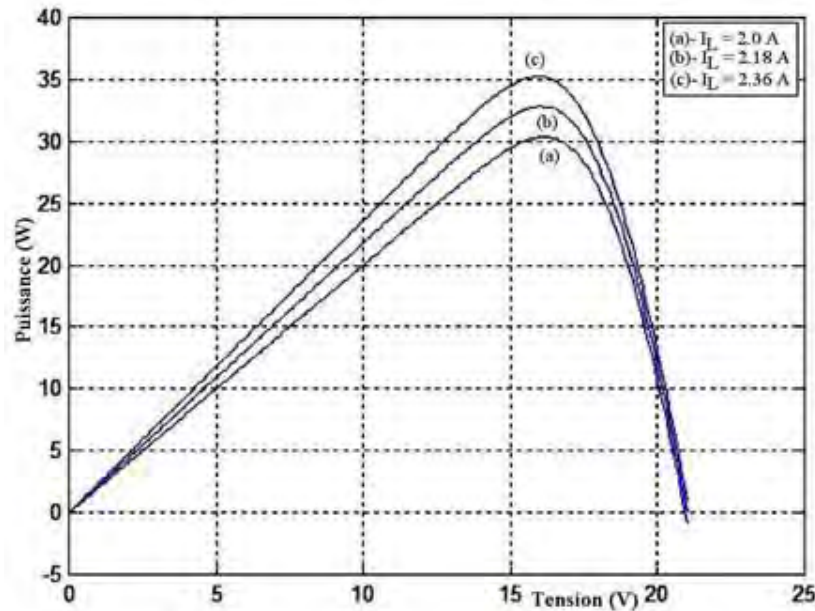


Figure (2-6): Puissance en fonction de la tension paramétrée par  $I_L$ .

Si on ne néglige pas la résistance parallèle de l'équation (2-5), on en déduit une expression du courant en fonction de la tension qui peut se mettre sous la forme [64, 65]:

$$I = \frac{-V + \left( -Lambert W \left( \frac{R_S . I_0 . R_P e^{\left( \frac{R_P (R_S I_L + R_S I_0 + V)}{n V_T (R_S + R_P)} \right)}}{R_S n V_T + R_P n V_T} \right) + \frac{R_P (R_S I_L + R_S I_0 + V)}{n V_T (R_S + R_P)} \right) . n V_T}{R_S} \quad (2-25)$$

Où on peut en déduire la puissance en fonction de la tension.

### 1.4 Estimation de la puissance

Si le nombre et la configuration des modules photovoltaïques sont donnés, les expressions (2-13) et (2-24) permettent fondamentalement d'estimer la puissance délivrée par le système photovoltaïque.

Cependant, cette puissance dépend de l'éclairement reçu par les modules photovoltaïques, de la température ambiante, de la vitesse du vent, de la charge utilisatrice et de l'orientation des modules par rapport au soleil.

Pour une estimation réaliste de la puissance, il faut donc tenir compte de l'influence de ces facteurs dans les expressions (2-13) et (2-24).

#### 1.4.1 Influence de l'éclairement et de la température

Le rendement d'une cellule solaire dépend de l'éclairement et de la température. Le modèle physique de la cellule permet d'exprimer le photocourant en fonction de l'éclairement et de la température [70, 71]:

$$I_L = \left( \frac{G}{G_{ref}} \right) (I_{CC,ref} + K_1(T - T_{ref})) \quad (2-26)$$

$I_L$  est le photocourant,  $G$  l'éclairement,  $G_{ref}$  l'éclairement dans les conditions standards,  $I_{CC,ref}$  le courant de court-circuit dans les conditions standards,  $T$  la température de la cellule,  $T_{ref}$  la température de la cellule dans les conditions standards,  $K_1$  le coefficient de température en court-circuit.

Le courant de saturation inverse  $I_0$  dépend essentiellement de la température de la jonction  $T$  et s'exprime par la relation [69-74]:

$$I_0 = I_{0,ref} \cdot \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \cdot e^{-\frac{q \cdot E_g}{k \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)}} \quad (2-27)$$

$I_{0,ref}$  est le courant de saturation inverse dans les conditions standards,  $E_g$  la bande de valence du semi-conducteur considéré.

La température de la cellule peut s'exprimer de la sorte [72]:

$$T = a_0 + a_1 G + a_2 T_a + a_3 v \quad (2-28)$$

$T_a$  est la température ambiante,  $v$  est la vitesse du vent,  $a_0, a_1, a_2, a_3$ , sont des constantes.

Ainsi donc, l'estimation de la puissance nécessite d'abord l'estimation de la température de la cellule photovoltaïque à partir des mesures de la température  $T_a$ , de l'éclairement  $G$ , et de la vitesse du vent  $v$  conformément à l'expression (2-28).

On détermine ensuite le courant de saturation inverse  $I_0$  à l'aide de (2-27) et le courant photonique  $I_L$  à partir de (2-26). Des exemples de courbes caractéristiques conduisant à une variation du courant  $I_L$  par suite de la variation de l'éclairement sont montrés en Figures (2-4, 2-5 et 2-6).

#### 1.4.2 Influence de la charge d'utilisation

La charge d'utilisation  $R_c$  impose le courant et la tension à ses bornes et donc la puissance conformément à la loi d'ohm. Sur la caractéristique, l'expression de la charge s'exprime par une droite:

$$I = C.V \quad (2-29)$$

C est la conductance de la charge utilisée ( $C = 1/R_c$ ).

Le point d'intersection de cette droite avec la caractéristique  $I-V$  définit la puissance que délivre effectivement le module à la charge utilisatrice (Figure (2-7)). Cette puissance varie avec la conductance de la charge utilisée comme le montre les points d'intersection des droites a, b et c.

On remarque qu'il existe un seul point à la puissance optimale  $P_m$  et qu'il correspond à la droite b avec une résistance:  $R_{optimale} = V_m / I_m = 8.25 \text{ Ohms}$ , ( $C = 0.1212$ ).

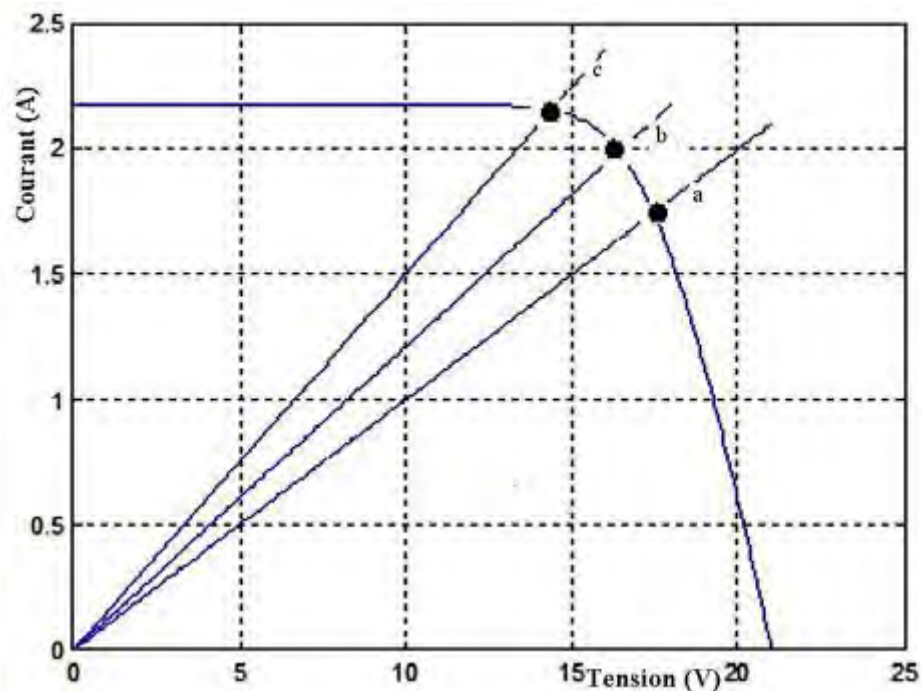


Figure (2-7): Variation de la puissance en fonction de la charge.

La puissance optimale varie donc en fonction des conditions extérieures (température, éclairage), mais aussi en fonction de la charge. Aussi, pour bénéficier de la puissance optimale, il faut donc suivre ce point de puissance optimale en adaptant la source photovoltaïque à la charge, d'où la technique du MPPT (Maximum Power Point Tracking) [72].

### 1.4.3 Influence de l'orientation du module photovoltaïque

La position du module photovoltaïque par rapport au soleil influence le rendement de ce dernier, d'où l'importance de la poursuite de la trajectoire du soleil permettant de mieux exploiter le système photovoltaïque.

En effet, beaucoup de travaux centrent leur intérêt sur le tracking afin de maximiser l'ensoleillement en gardant la surface active du module solaire perpendiculaire aux radiations solaires durant toute la journée [75].

## 1.5 Calcul de la puissance à la sortie du module pv par quelques modèles mathématiques

### 1.5.1 Première approche

Le modèle d'essai présenté ci-dessous permet de calculer la puissance maximale fournie par le module, en utilisant la température et l'éclairement solaire incident. Ce modèle a été élaboré et validé expérimentalement par Lu Lin en 2004 [74, 75].

$$P_m = -(a * G + b) * T_C + c * G + d \quad (2-30)$$

$P_m$  : Puissance maximale produite (Watts) ;

$a, b, c$  et  $d$  : sont des constantes positives qui peuvent être connues expérimentalement; sont égales, respectivement à 0.0002 , 0.0004 , 0.1007 et 0.1018 [76].

$T_C$  : Température de la cellule, qui varie en fonction de l'éclairement et de la température ambiante, selon la relation linéaire suivante [79, 80]:

$$T_C = T_a + [(NOCT - 20) / 800] \quad (2-31)$$

$T_a$  : Température ambiante (Kelvin) ;

$NOCT$  : Température nominale de fonctionnement de la cellule solaire (Nominal Operating Cell Temperature). Elle est définie comme étant la température de la cellule, si le module est soumis sous certaines conditions comme l'éclairement solaire ( $800 \text{ Watts} / \text{m}^2$ ), la distribution spectrale (AM 1.5), la température ambiante (20 °C) et la vitesse de vent ( $> 1 \text{ m} / \text{s}$ ) ;

$G$  : Eclairement solaire incident sur un plan incliné ( $\text{Watts} / \text{m}^2$ ) .

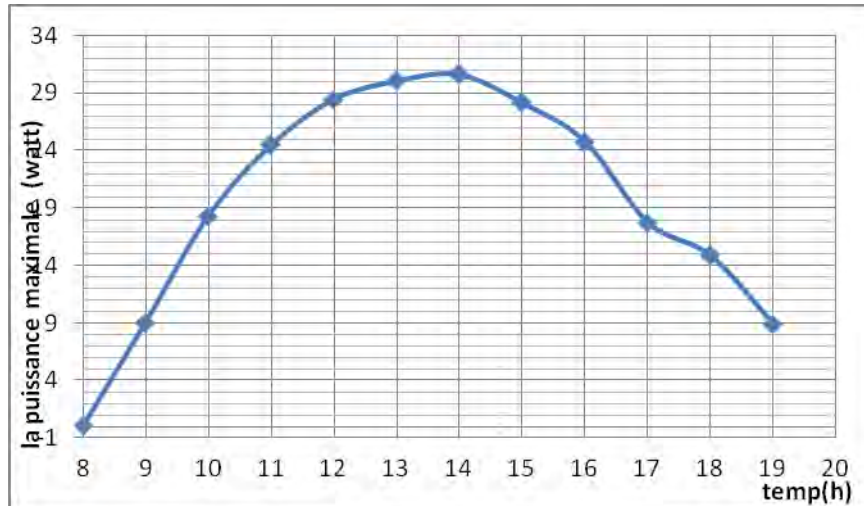


Figure (2-8): Profil de la puissance maximale journalière correspondant à la première approche.

### 1.5.2 Deuxième approche

La puissance produite du générateur photovoltaïque peut être calculée à partir de l'équation suivante [80]:

$$P = \eta * S_{ph} * N * G \quad (2-32)$$

$S_{ph}$  : Surface du module photovoltaïque;

$N$  : Nombre de modules constituant le champ photovoltaïque.

$\eta$  : Le rendement instantané est représenté par la relation suivante [77, 79, 80]:

$$\eta = \eta_r [1 - \gamma(T_C - T_0)] \quad (2-33)$$

$$\eta_r = P_m / (G_0 * S)$$

$\eta_r$  Rendement de référence du module sous les conditions standard.  
( $T = 25^\circ C$ ,  $G = 1000 W / m^2$  et  $AM 1.5$ )

$$P_m = 33W \quad S_{ph} = 0.42m^2 \quad \eta_r = 0.078$$

$\gamma$  : Coefficient de température ( $^\circ C$ ) déterminé expérimentalement, il est défini comme étant la variation du rendement du module pour une variation de  $1^\circ C$  de la température de la cellule. Les valeurs typiques de ce coefficient se situent entre  $0.004$  et  $0.006^\circ C$  [80]. L'intérêt de ce modèle réside dans sa simplicité et sa facilité de mise en oeuvre à partir des caractéristiques techniques données par le constructeur dans les conditions standard (la puissance totale  $P$ , la tension en circuit ouvert  $V_{CO}$ , le courant de court-circuit  $I_{CC}$  et la surface du panneau).

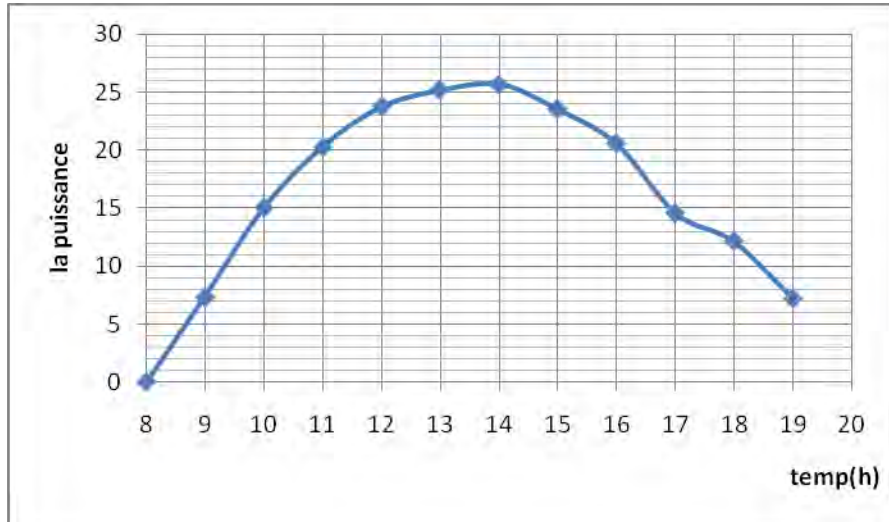


Figure (2-9): Profil de la puissance maximale journalière correspondant à la deuxième approche.

### 1.5.3 Troisième approche

Ce modèle mathématique a été développé par Borowy et Salameh en 1996. Ce modèle est basé sur le circuit équivalent à une diode Figure (2-10).

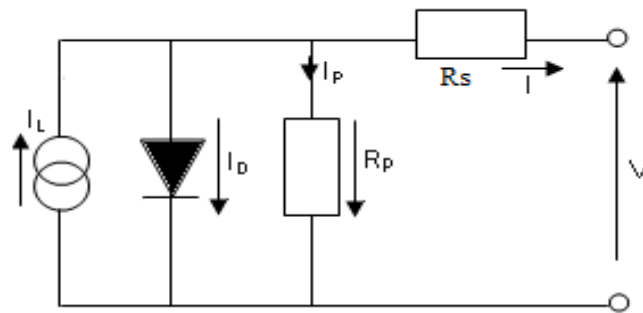


Figure (2-10): Circuit équivalent à une diode [38].

Ce modèle fait usage des spécifications des modules photovoltaïques données par les fabricants. Donc il offre une façon très simple de connaître la puissance produite par les modules photovoltaïques [10, 81].

$$I_m = I_{CC} \cdot \left\{ 1 - \left[ C_1 \exp\left( \frac{V_m}{C_2 \cdot V_{CO}} \right) - 1 \right] \right\} + \Delta I \tag{2-34}$$

$C_1$  ,  $C_2$  sont des paramètres qui peuvent se calculer par les relations (2-35) et (2-35).

$$C_1 = \left( 1 - \frac{I_{mp}}{I_{CC}} \right) \cdot \exp\left( - \frac{V_{mp}}{C_2 \cdot V_{CO}} \right) \tag{2-35}$$

$$C_2 = \frac{V_{mp}}{V_{CO}} - 1 / \ln\left( 1 - \frac{I_{mp}}{I_{CC}} \right) \tag{2-36}$$



$\Delta I$  est un paramètre qui dépend de la différence de température et de l'éclairement solaire. Il est défini par l'expression (2-37).

$$\Delta I = \alpha_0 \left( \frac{G}{G_0} \right) \Delta T + \left( \frac{G}{G_0} - 1 \right) \cdot I_{CC} \quad (2-37)$$

$$\Delta T = T_C - T_0$$

La tension  $V_m$  du module est déterminée par l'équation suivante:

$$V_m = V_{mp} \cdot \left[ 1 + 0.0539 \log \left( \frac{G}{G_0} \right) \right] + \beta_0 \cdot \Delta T - R_s \cdot \Delta I \quad (2-38)$$

La résistance série  $R_s$  est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière.

La puissance optimale à la sortie d'un module est déterminée par:

$$P_m = I_m * V_m \quad (2-39)$$

#### 1.5.4 Quatrième approche (modèle de Jones et Underwood(2002))

Le modèle pratique pour la production de la puissance optimale de sortie d'un module photovoltaïque. [71]:

$$P = FF \cdot (I_{CC} \cdot G / G_0) \cdot (V_{CO} \cdot \frac{\ln(K_c \cdot G)}{\ln(K_c \cdot G_0)} \cdot \frac{T_0}{T_C}) \quad (2-40)$$

Où

$K_c$ : est un coefficient constant peut être calculé par la formule suivante :  $K_c = I_{CC} / G$

$I_{CC}$ : Le courant de court circuit (Ampères).

$V_{CO}$ : La tension de circuit ouvert (Volts).

$FF$ : Facteur de forme.

### 1.6 La relations entre la puissance et la surface

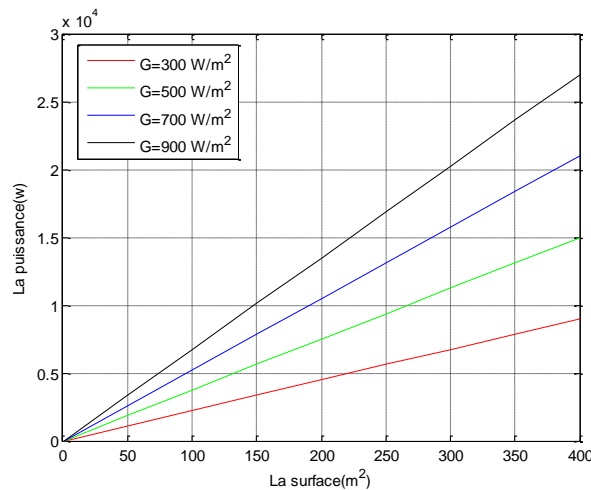
La relation entre la puissance et la surface de déploiement du système énergétique considéré. A titre d'exemple, on présentera ces relations de la deuxième approche

**\*l'expression de la puissance du système photovoltaïque est :**

La puissance du système photovoltaïque ( $N=1$ ) de surface balayée  $S_{ph}$  est l'éclairement  $G$  est [80]:

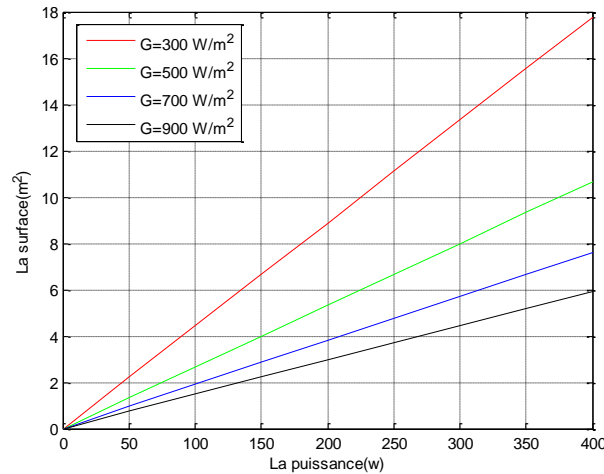
$$P_{ph0} = \eta \cdot G \cdot S_{ph0} \quad (2-32)$$

La Figure (2-11) représente la puissance photovoltaïque en fonction de la surface pour différentes valeur de  $G$ .



**Figure (2-11) :** La variation de la puissance photovoltaïque en fonction de la surface pour différentes valeurs de  $G$ .

La Figure (2-12) représente La variation de la surface photovoltaïque en fonction de la puissance pour différentes valeur de  $G$ .



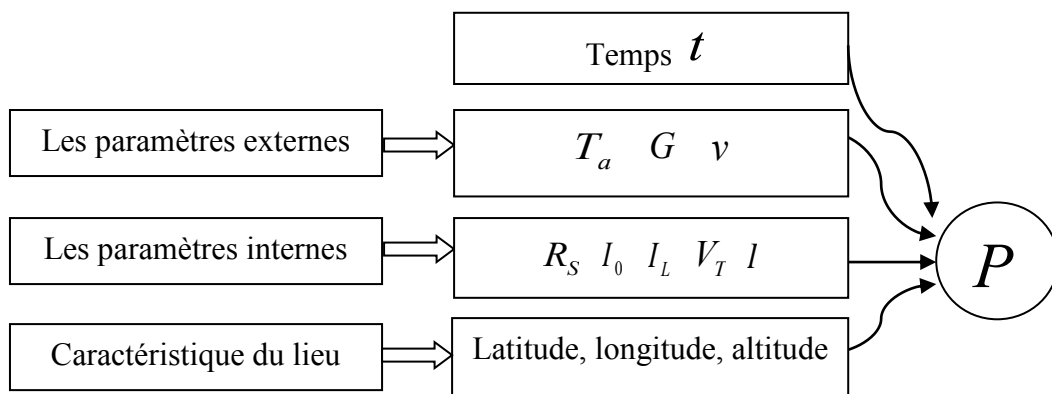
**Figure (2-12) :** La variation de la surface photovoltaïque en fonction de la puissance pour différentes valeurs de  $G$ .

La relation entre la surface et la puissance générée par un photovoltaïque est une relation linéaire.

NB : il est possible de jouer sur la disposition des panneaux pour réduire la surface disponible.

### 1.7 Interface graphique

Une interface graphique permettant d'estimer la puissance du système photovoltaïque a été implémentée. L'estimation de la puissance à l'instant désiré s'effectue conformément à l'expression (2-30) et au schéma de la figure (Figure (2-13)) qui montre les différents paramètres influençant la puissance du système photovoltaïque : il s'agit des paramètres externes ( $T_a, G, \nu$ ), des paramètres internes ( $R_s, I_0, I_L, V_T, I$ ) et des caractéristiques du lieu (Latitude, longitude, altitude).



**Figure (2-13):** Schéma pour l'estimation de la puissance du système photovoltaïque.

La procédure d'estimation est conduite en trois étapes. En premier lieu, on effectue les opérations d'acquisition des mesures des paramètres externes (température ambiante, éclairement, vitesse du vent).

En second lieu Les paramètres du panneau ( $R_s$ ,  $I_0$ ,  $I_L$  et  $V_T$ ) sont indirectement représenté dans le modèle exploité dans les coefficients (a, b, c, d). En dernier lieu, on estime la puissance maximale délivrée par le système photovoltaïque pour une journée conformément à l'expression (2-30) de la première approche).

La Figure (2-14) montre une fenêtre graphique qui permet d'estimer automatiquement la puissance délivrée par le système photovoltaïque.

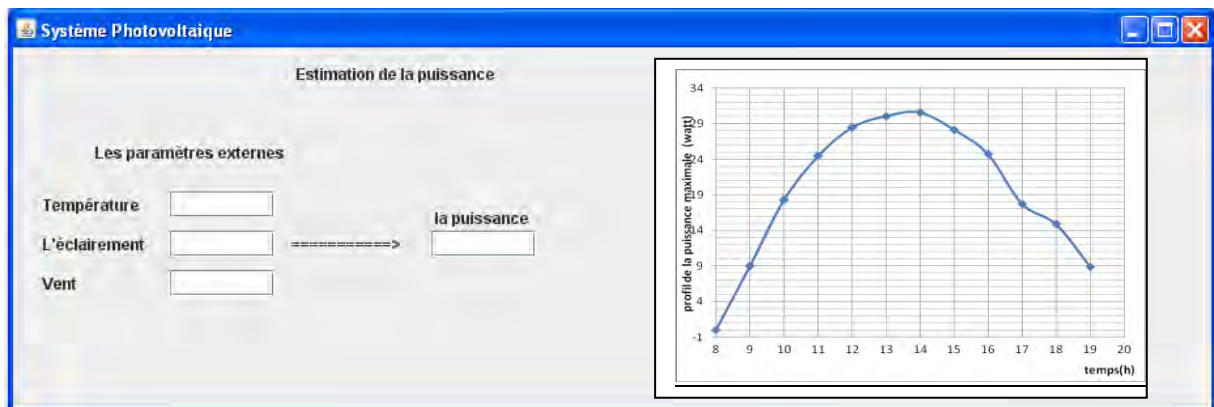


Figure (2-14): Fenêtre graphique.

## 2 Energie éolienne

Les recherches dans le domaine des éoliennes concernent l'optimisation de la géométrie des pâles, le développement de matériaux nouveaux plus léger et plus robuste, ainsi que l'orientation automatique des pales. Du point de vue conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique, la recherche concerne la conception de nouvelles turbines adaptées aux faibles vitesses (générateur à entraînement direct qui travaille à moins de 5m/s) [29, 82, 83]. D'autres thèmes de recherches récents sont: l'amélioration des rendements, réduction de la maintenance, Réduction du bruit, Accès et transmission au réseau, stockage, recherche spécifique à l'offshore et Amélioration des prévisions [84, 85].

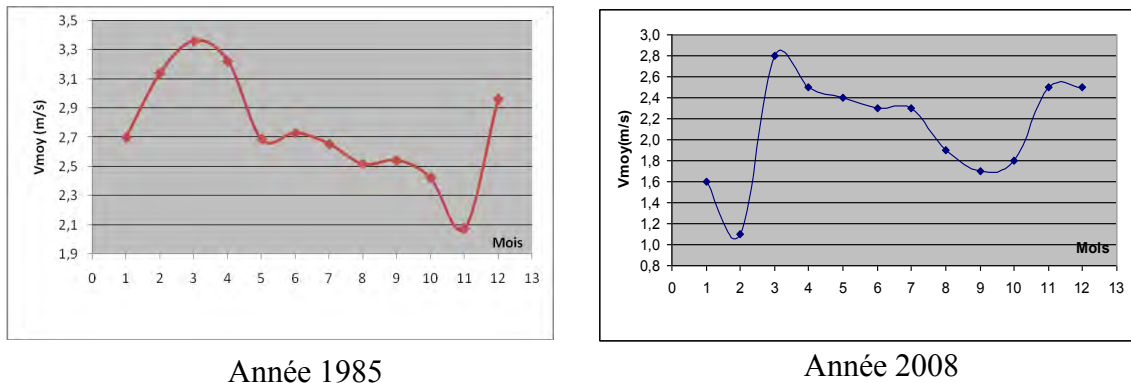
Bien que disposant d'un potentiel relativement intéressant, en Algérie, l'énergie éolienne reste totalement négligée. Notre travail se situe dans le contexte du développement et de l'exploitation de l'énergie éolienne. Le but de notre étude vise à concevoir, à réaliser et à estimer la puissance délivrée par une éolienne de faible puissance en se basant sur des données météorologiques recueillies auprès de la région de Constantine.

## 2.1 Caractérisation de la vitesse du vent

Dans cette section, on introduit les données météorologiques concernant la vitesse du vent. On effectue leur analyse en vue de déterminer les caractéristiques mensuelles et annuelles de la vitesse du vent, ainsi que certaines caractéristiques statistiques. Les données recueillies sont fournies par le service de la météo de Constantine durant ces 25 dernières années (entre 1983 et 2008).

### 2.1.1 Variation mensuelle de la vitesse du vent

La vitesse du vent varie en général au cours de l'année et d'une région à l'autre. La courbe (Figure (2-15)) présente la variation des vitesses moyennes du vent en fonction des mois pour les années 1985 (courbe à gauche de la Figure (2-15)) et 2008 (courbe à droite de la Figure (2-15)).

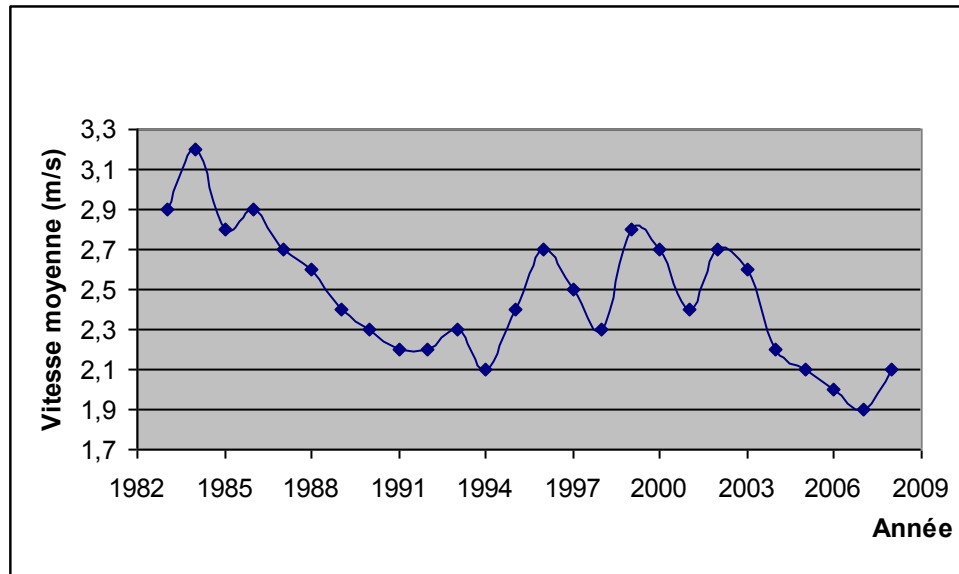


**Figure (2-15):** La variation de la vitesse moyenne du vent en fonction des mois.

D'après cette figure, on constate que la vitesse varie significativement d'un mois à l'autre. Si on considère par exemple l'année 1985, on remarque que la vitesse du vent est très importante dans la saison de printemps, et atteint une valeur maximale au mois de mars. Par contre elle est minimale dans la saison d'automne, et surtout dans le mois de novembre.

### 2.1.2 Variations annuelles de la vitesse du vent

La Figure (2-16) présente les valeurs moyennes annuelles de la vitesse du vent durant les 25 dernières années à Constantine (entre 1983-2008).



**Figure (2-16):** La variation de la vitesse moyenne annuelle entre 1983-2008.

On constate que la vitesse varie de façon significative d'une année à l'autre; par exemple on remarque que la vitesse moyenne annuelle du vent est très importante en 1984 où elle atteint 3.2 m/s, et atteint une valeur minimale en 2007 de 1.9 m/s. la vitesse moyenne est approximativement de 2.5 m/s.

### 2.1.3 Détermination des caractéristiques statistiques

La variation et l'écart type pour ces 25 dernières années sont les suivants:

\*La moyenne:

$$V_M = 1/26 \sum_{i=1}^{26} V_i = 2.46(m/s) \quad (2-41)$$

$V_i$  : étant la vitesse moyenne pour chaque année.

\* la variance:

$$S^2 = 1/26 \left[ \sum_{i=1}^{26} n_i V_i^2 - 26 V_M^2 \right] = 0.10 \quad (2-42)$$

$n_i$  : L'effectif c'est-à-dire le nombre de fois par lequel chaque vitesse  $V_i$  se répète (entre 1983 et 2008).

\*L'écart type:

$$S = \sqrt{S^2} = 0.32 \tag{2-43}$$

Remarquant que la vitesse moyenne est relativement faible, ce qui veut dire que dans le site de Constantine domine des faibles vitesses. Donc c'est une région favorable à l'exploitation des éoliennes lentes.

**2.1.4 Variation de la vitesse du vent selon la hauteur**

On présente une estimation de l'amélioration que peut apporter l'élévation en hauteur de l'éolienne conformément à l'expression ((2-45) [86].

$$v = v_0 \cdot \left(\frac{H}{H_0}\right)^\alpha \tag{2-44}$$

$v$  : La vitesse du vent observée à la hauteur  $H$  ;

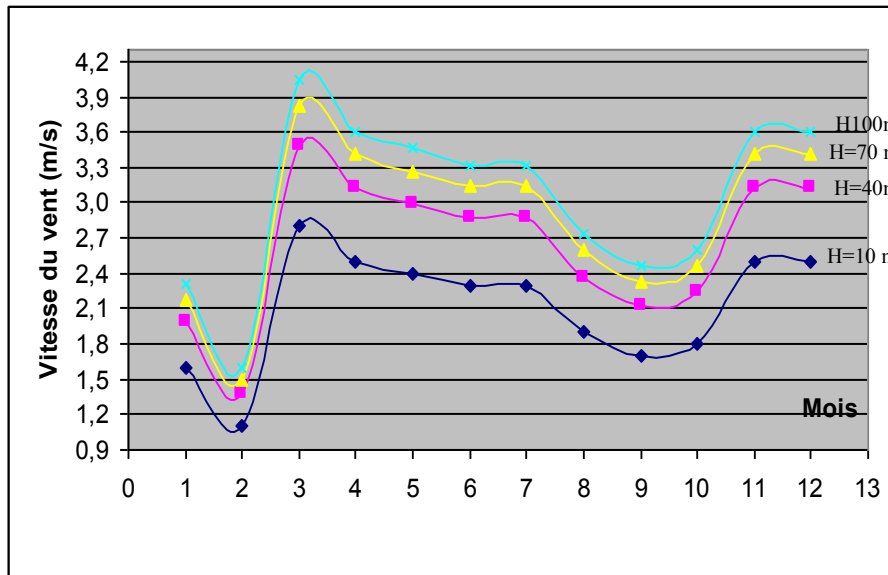
$v_0$  : La vitesse du vent observée à la hauteur  $H_0$  ;

$H$  : La hauteur du moyeu ;

$H_0$  : Hauteur de référence qui est habituellement  $H_0 = 10\text{ m}$  ;

$\alpha$  : L'exposant de loi de puissance, qui est généralement considéré comme 1/7.

La courbe (Figure (2-17)) présente la variation de la vitesse du vent en fonction de la hauteur en 2008 pour le coefficient  $\alpha = 0.16$ .



**Figure (2-17):** La variation de la vitesse du vent avec l'altitude.

On aura donc intérêt pour recueillir le maximum de puissance à placer le moteur éolien le plus haut possible par rapport au sol et dans un espace sans obstacles.

## 2. 2 Conception et réalisation de l'éolienne

Dans cette section, on présentera la conception et la réalisation de notre éolienne. Il s'agit d'une éolienne à axe horizontale tripale, de diamètre 1.5 m. Les pales sont réalisées conformément au profil NACA 23015. Une image de notre éolienne est présentée à la Figure (2-18).



Figure (2-18): L'éolienne expérimentale.

### 2.2.1 Conception des pales

Les pales sont conçues conformément au profil NACA 23015 [87, 88, 89] qui est présenté à la Figure (2-19).

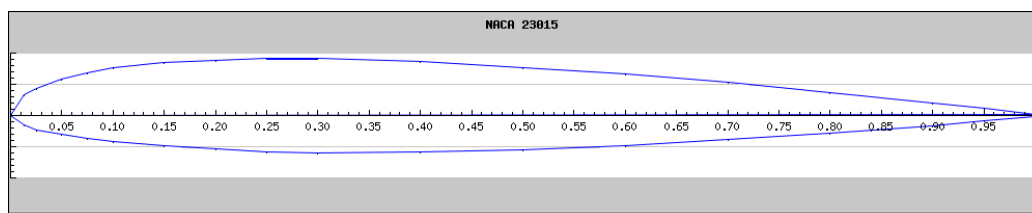


Figure (2-19): Profil NACA 23015.



La variation des coefficients de portance et de traînée de ce profil NACA 23015 en fonction de l'angle d'incidence  $i$  est donnée par les relations suivantes :

$$\text{Pour } i < 10 \Rightarrow \begin{cases} C_z(i) = 0.1 + 0.11 \cdot i \\ C_x(i) = 0.0055 \cdot (C_z(i) - 0.2)^2 + 0.007 \end{cases}$$

$$\text{Pour } 10 < i < 15 \Rightarrow \begin{cases} C_z(i) = 1.5 - 0.00188 \cdot (i - 1.4)^2 \\ C_x(i) = 0.0125 + 0.16 \cdot (C_z(i) - 1.1)^2 \end{cases}$$

De même, la variation de l'angle d'incidence en fonction de la distance à l'axe  $r$  et le rayon de l'hélice  $R$  est donnée par la relation (2-46) qui est présentée sur la Figure (2-20) [90].

$$i = 12.75 - 7.5 \cdot \frac{r}{R} \tag{2-45}$$

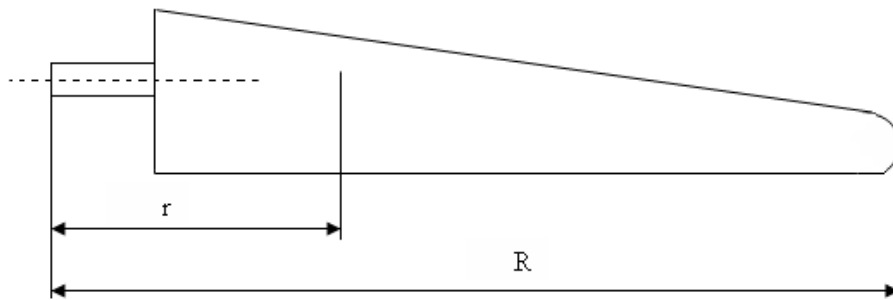


Figure (2-20): La variation de  $r$  en fonction de  $R$ .

### 2.2.2 Conception de l'aérogénérateur

La conception de l'aérogénérateur est conforme au schéma de la Figure (2-21). L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor: celle-ci est alors convertie en énergie mécanique elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique accouplée à la turbine éolienne. Ce couplage mécanique peut être soit direct si la turbine et la génératrice ont des vitesses du même ordre de grandeur, soit réalisé par l'intermédiaire d'un multiplicateur dans le cas contraire. Enfin, il existe plusieurs types d'utilisation de l'énergie électrique produite: soit elle est stockée dans des accumulateurs, soit elle est distribuée par le biais d'un réseau électrique ou soit elle alimente des charges isolées [91].

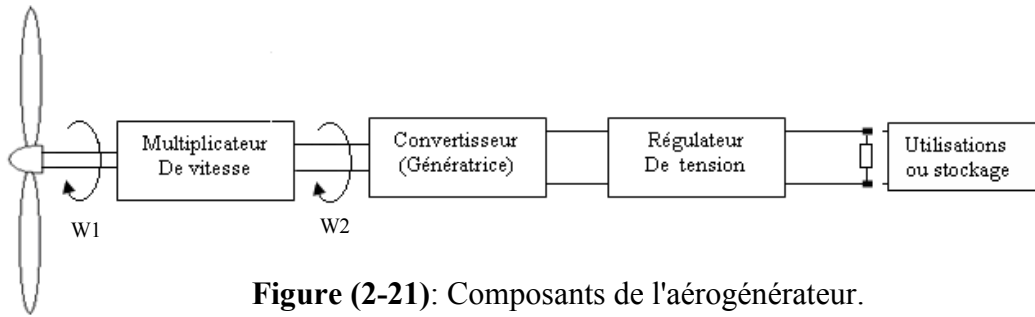


Figure (2-21): Composants de l'aérogénérateur.

### 2.3 Estimation énergétique

Le dimensionnement de l'éolienne et l'estimation de la puissance fournie dépendent essentiellement du rayon  $R$  de la longueur d'une pale, de la vitesse du vent, et du profil de la pale.

#### 2.3.1 Coefficient de puissance $C_p$

L'énergie du vent est l'énergie cinétique de l'air récupérable qui traverse une certaine surface  $S_{\text{éol}} = \pi R^2$ . La puissance développée par le vent est proportionnelle au cube de la vitesse du vent  $V$  (m/s):

$$P_{\text{Vent}} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 \quad (2-46)$$

L'énergie mécanique effectivement récupérée par l'éolienne dépend du coefficient de puissance  $C_p$  conformément à l'expression (1-1) suivant:

$$P_{\text{Turbine}} = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 v^3 \quad (1-1)$$

Le coefficient  $C_p$  caractérise le niveau du rendement d'une turbine éolienne et dépend de la Vitesse spécifique de l'éolienne qui est le rapport de la vitesse d'extrémité des pales sur la vitesse du vent [29, 92, 93]:

$$\lambda = \frac{R\omega}{v} \quad (1-2)$$

Pour notre exemple d'éolienne, le coefficient de puissance  $C_p$  donné par la relation suivante [96].

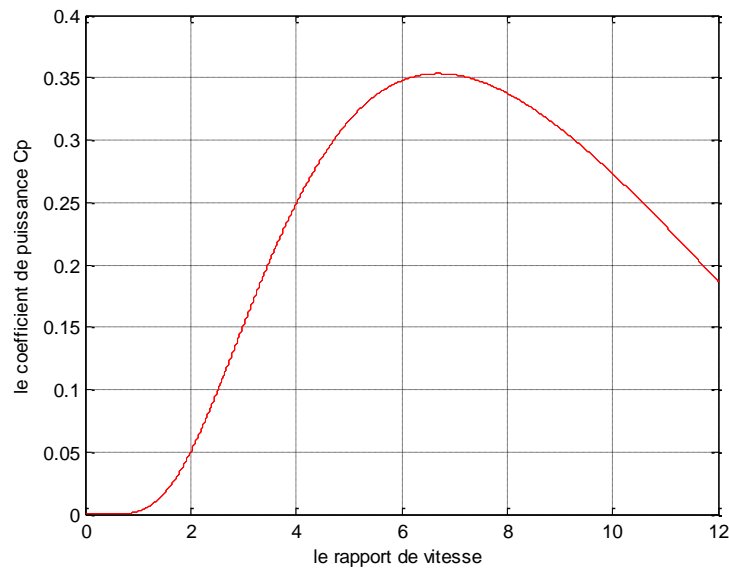
$$C_p = .0.22 \times \left( \frac{116}{\lambda'} - 0.4 \times \beta - 5 \right) e^{\frac{-12.5}{\lambda'}} \quad (2-47)$$

Ou

$$\frac{1}{\lambda'} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

$\beta$  : Angle de calage des pales (en degrés).

La Figure (2-22) présente l'allure de coefficient  $C_p$  en fonction de  $\lambda$  et pour un angle de calage  $\beta = 2^\circ$ .



**Figure (2-22):** Coefficient de puissance en fonction de  $\lambda$ .

Cette courbe est caractérisée par le point optimal ( $\lambda \cong 7$ ) qui est le point correspondant au maximum du coefficient de puissance  $C_p$  et donc au maximum de la puissance mécanique récupérée

2.3.2 La relation entre la puissance et la surface

La puissance du système éolien de surface balayée  $S_{éo}$  est la vitesse du vent  $V$  est :

$$P_{éo0} = \frac{16}{27} V^3 S_{éo0} \tag{2-48}$$

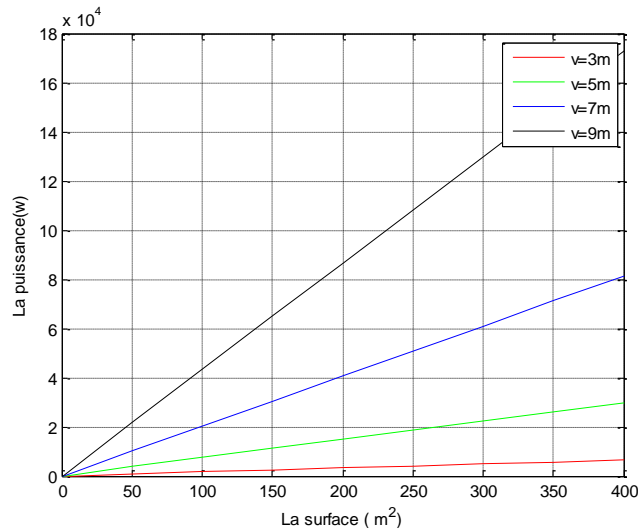


Figure (2-23) : La variation de la puissance éolienne en fonction de la surface pour différentes valeurs de  $V$ .

La relation entre la surface et la puissance générée par une éolienne est une relation linéaire qui peut s'exprimer comme suit:

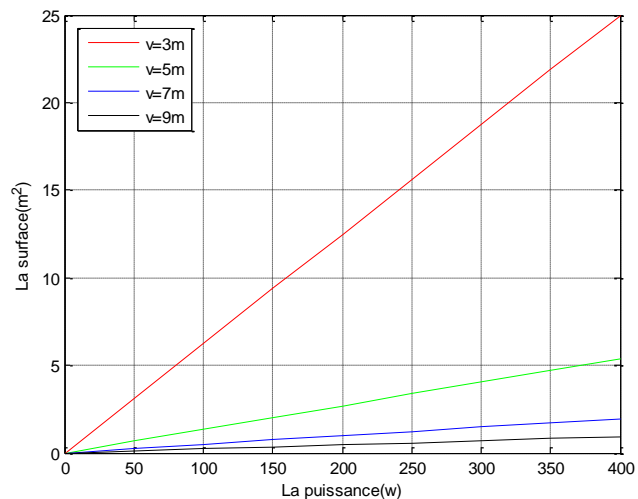


Figure (2-24) : La variation de la surface éolienne en fonction de la puissance pour différentes valeurs de  $V$ .

NB : cette surface correspond à une seule éolienne, cependant, il est possible de considérer cette même surface pour placer plusieurs éoliennes de plus petite taille. (Si l'installation d'une éolienne de grande taille pose des problèmes).

### 2.3.3 Interface graphique et estimation énergétique

Nous avons développé un programme informatique qui permet d'estimer la puissance fournie par l'éolienne étant donné les caractéristiques géométriques et la vitesse du vent. Ou bien, de déterminer les dimensions de l'éolienne étant donné la vitesse du vent et la puissance demandée. Ce programme permet également de tracer la courbe de puissance en fonction de la vitesse du vent paramètres la dimension de la pale. Les estimations de puissance et des caractéristiques de l'éolienne, sont obtenues au moyen d'une interface graphique Figure (2-25).

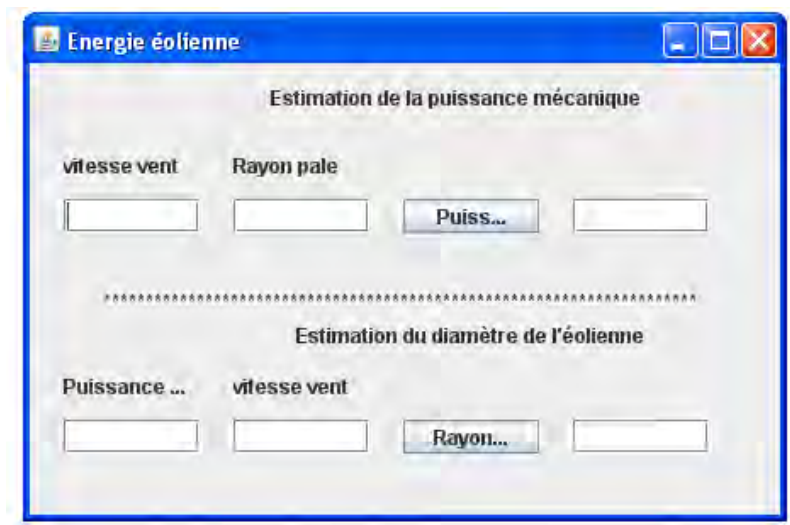
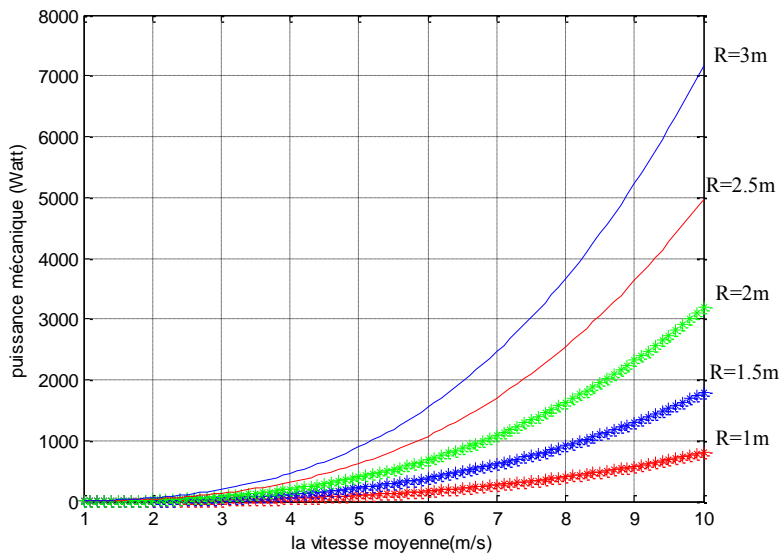


Figure (2-25): Interface graphique.

La Figure suivante (Figure (2-26)) montre la relation entre la puissance mécanique fournie par l'éolienne en fonction de la vitesse moyenne du vent, paramétrée par le rayon des pales de l'éolienne. Cette figure permet d'estimer le rayon que doit avoir les pales de l'éolienne pour une puissance demandée et une vitesse moyenne du vent du site en question.



**Figure (2-26):** Puissance mécanique en fonction de la vitesse du vent pour différents rayons.

Une estimation plus réaliste fait intervenir les rendements du multiplicateur, de la génératrice et du régulateur de tension.

### 3 Energie photothermique

La production énergétique instantanée d'un capteur solaire plan peut être définie par une équation caractéristique simple dans laquelle le capteur est caractérisé par sa formule et par deux coefficients caractéristiques. Cette équation admet différentes formes. Au niveau de la normalisation internationale, on utilise la température d'entrée du fluide. On a ainsi l'expression suivante [95, 96] :

$$P_{th} = S_{th} \cdot [ A \cdot G - B \cdot (T_{fe} - T_a) ] \quad (2-49)$$

Ou :

$S_{th}$  : Surface de l'absorbeur (  $m^2$  ).

$A$  : Coefficient caractérisant les gains (0,7-0,8).

$G$  : Rayonnement global horizontal instantané [  $W / m^2$  ].

$B$  : Coefficient caractérisant les pertes thermiques (4-10  $Watts / m^2 \cdot ^\circ C$  ).

$T_{fe}$  : Les températures des fluides entrant dans le collecteur (  $^\circ C$  ).

$T_a$  : Température d'extérieur (  $^\circ C$  ).

Les deux coefficients caractérisant les gains et les pertes thermiques représentent les termes qui suivent :

$$A = F_R \cdot \tau \cdot \alpha \quad (2-50)$$

$$B = F_R \cdot U_L \quad (2-51)$$

Ou

$F_R$  : Facteur de correction (d'élimination de chaleur).

$\tau \cdot \alpha$  : Produit transmittance-absorptance (coefficient de transmission de la vitre, coefficient d'absorption du tube absorbeur).

$U_L$  : Coefficient des pertes thermiques ( *Watts / m<sup>2</sup>°C* ).

Dans ces conditions, l'expression (2-49) devient :

$$P_{th} = S_{th} \cdot [F_R \cdot \tau \cdot \alpha \cdot G - F_R \cdot U_L \cdot (T_{fe} - T_a)] \quad (2-52)$$

La formule suivante peut calculer une valeur approchée de la température de l'eau froide pour un mois (i) [96] :

$$T_{fe}(i) = (T_a(i) + T_{em}) / 2$$

$T_a(i)$  : Moyenne de la température extérieure mensuelle [°C].

$T_{em}$  : Moyenne de la température extérieure annuelle [°C].

## 4 Energie biomasse

### 4.1 Système bioréacteur anaérobie

Les digesteurs anaérobies réalisés sont constitués de cuves métalliques étanches dans lesquelles différents microorganismes cohabitent pour biodégrader les déchets organiques et produire du biogaz. Le type de culture est le mode batch. La nature du substrat est de la boue enrichie provenant de la station d'épuration biologique des eaux usées. La technologie du bioréacteur réalisé repose sur un dispositif constitué d'une cuve de capacité de 200 litres, contenant 130 litres (Figure (2-27)). La cuve dispose d'une entrée pour la boue activée; une sortie pour la récupération du biogaz équipé d'une vanne, ainsi que des entrées prévues pour l'instrumentation nécessaire aux mesures des grandeurs comme la température, le pH et l'outil d'agitation. La préparation est incubée à 30°C et le gaz méthane est détecté de façon remarquable après 27 jours [97].



**Figure (2-27):** Système bioréacteur anaérobie expérimental.

### 4.2 Relation entre la puissance et la surface

L'énergie instantanée produite par un bio digesteur de type continue de surface  $S_{bio}$  et la hauteur  $h$  selon le modèle de Chen-Hashimoto [98] est:

$$P_{bio} = [h \cdot B \cdot (MO/TRH)] \cdot S_{bio} \quad (2-35)$$

$h$  : Hauteur du digesteur (m);

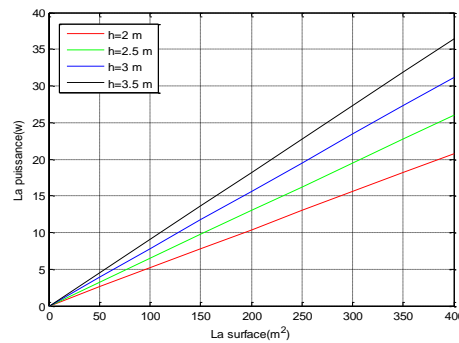
$B$  : Rendement biologique;

$Mo$  : Matières oxydables ( $g/l$ );

$TRH$  : Temps de rétention hydraulique;

$S_{bio}$  : Surface du digesteur ( $m^2$ ).





**Figure (2-28):** La puissance de la biomasse en fonction de la surface pour différentes valeurs de  $h$ .

## Conclusion

Nous venons de présenter les différentes sources d'énergies renouvelables en nous focalisant sur la production d'électricité dans ses formes photovoltaïques et éoliennes.

En ce qui concerne la partie photovoltaïque, nous avons utilisé le modèle à une exponentielle pour reconstituer la caractéristique  $I-V$ . Ceci n'a été rendu possible qu'à l'aide de la méthode des trois points qui sont fournis par le constructeur en négligeant la résistance parallèle. Pour cela, nous avons exprimé la puissance photovoltaïque en fonction du courant  $I$  et de la tension  $V$ . L'expression de la puissance en fonction de la tension  $V$  a nécessité l'utilisation de la fonction  $W$  de Lambert. Ces expressions nous ont permis de pouvoir estimer la puissance fournie par le module solaire en fonction des conditions de son utilisation à savoir, l'éclairement, la température, la charge utilisatrice et son orientation par rapport au soleil et enfin, de calculer la puissance à la sortie du module photovoltaïque par quelque modèles mathématiques.

Pour la partie éolienne, nous avons exploité le recueil de données concernant la vitesse du vent pour la région de Constantine et étalées sur une période de 25 années, soit de 1983 à 2008. A cet effet, Il a été constaté une vitesse moyenne du vent de 2.5 m/s fluctuant entre une vitesse minimale de 1.9 m/s et une vitesse maximale de 3.2 m/s. Ces données ont permis d'estimer les caractéristiques du vent (vitesse moyenne mensuelle, vitesse moyenne annuelle, moyenne, écart type et variation de la vitesse du vent en fonction de la hauteur de l'aérogénérateur). La conception de l'éolienne tripale avec le profil des pales choisies (type : NACA 23015) a été effectuée et suivie de la réalisation d'un prototype expérimental. Enfin, des estimations de rendements énergétiques des éoliennes ont été effectuées.

La production énergétique instantanée d'un capteur solaire plan et la puissance générée par un digesteur de méthane ont été estimées à l'aide du modèle de Chen-Hashimoto.

# **Chapitre3**

## **Systeme de Minimisation des Pertes de Conversion d'Energie PWM**

## Chapitre3

### Système de Minimisation des Pertes de Conversion d'Energie PWM

#### Sommaire

---

##### Introduction

##### Position du problème de conversion

#### 1 Etude théorique du système

##### 1.1 Approche mathématique de l'élément « $N$ »

###### 1.1.1 Equation caractéristique de l'élément « $N$ »

###### 1.1.2 Comportement de l'élément ( $N$ )

##### 1.2 Détermination des instants de commutation

###### 1.2.1 Etude du système du 1<sup>er</sup> ordre

###### 1.2.1.1 Détermination des durées d'impulsions

###### 1.2.1.2 Détermination de la valeur moyenne de $U(t)$

###### 1.2.2 Etude du système du 2<sup>eme</sup> ordre

###### 1.2.2.1 Détermination des durées d'impulsions

###### 1.2.2.2 Analyse de la période d'oscillation du WRT en fonction du facteur d'amortissement

#### 2 Réalisation du hacheur PWM

##### 2.1 Relation du système étudié avec les alimentations à découpage

##### 2.2 Réalisation du circuit

#### 3 Simulation essais et mesures

##### 3.1 Simulation du hacheur

###### 3.1.1 Simulation du circuit du 1<sup>er</sup> ordre

###### 3.1.1.1 Identification des éléments du circuit

###### 3.1.1.2 Résultats de simulation

a- Variation des durées d'impulsions en fonction de la consigne  $f_0$

b- Variation de la période en fonction de la constante de temps  $\tau$

###### 3.1.2 Simulation du circuit du 2<sup>eme</sup> ordre.

###### 3.1.2.1 Paramètre des éléments

###### 3.1.2.2 Résultats de simulation

a- Variation de la période «  $T$  » en fonction de «  $\zeta$  ».

b- Variation de la période «  $T$  » en fonction de la tension «  $E$  ».

##### 3.2 Essais et résultats expérimentaux

###### 3.2.1 Systèmes du 1er ordre

###### 3.2.1.1 Etude de fréquence de découpage en fonction de $f_0$ (Essais)

###### 3.2.1.2 Comparaison des résultats

a- Etude de la fréquence de découpage en fonction de  $f_0$

b- Période  $T$  en fonction de la constante du temps  $\tau$

###### 3.2.2 Système du 2eme ordre

###### 3.2.2.1 Durées des impulsions $T_1$ , $T_2$ et $T$ en fonction de $f_0$

###### 3.2.2.2 La Variation de $T$ par rapport à $\zeta$ avec les autres paramètres constants

#### Conclusion

---

## Chapitre3

# Système de Minimisation des Pertes de Conversion d'Énergie PWM

### Introduction

Nous allons présenter l'étude fine d'un asservissement par +/- à rétroaction via un filtre de premier et deuxième ordre. Le système étudié est capable de générer une modulation de largeur d'impulsions (PWM) de durée et de rapport cyclique variables.

Dans la première étape, nous avons conçu et construit un convertisseur expérimental *DC/DC* basé sur un élément on/off avec une rétroaction via un filtre de premier ordre. La charge était en dehors de la boucle. En conséquence, le système était capable de réguler la tension de sortie par rapport à des fluctuations de l'énergie solaire, mais il ne permettait pas de régler le WRT de la tension en fonction de la variation de la charge [114]. La deuxième étape concerne l'étude d'un système de contrôle on/off utilisant une rétroaction par l'intermédiaire d'un filtre de deuxième ordre dont la charge. Ainsi conçu, ce système permet en principe de compenser les variations découlant de l'irradiation et de la charge.

### Position du problème de conversion

Ces dernières années, les énergies renouvelables ont repris de l'intérêt dans la plupart des pays développés. En effet, ces énergies sont non polluantes, renouvelables, distribuées dans l'espace, pouvant être collectées et converties par l'intermédiaire de convertisseurs. Parmi les sources d'énergies renouvelables qui ont connu un grand développement, on peut citer l'énergie solaire photovoltaïque, l'énergie éolienne et la biomasse. Cependant, un des problèmes majeurs concernant la généralisation des énergies renouvelables reste la réduction du coût des systèmes et l'augmentation de leur rendement.

Mais, si ce premier challenge tient à la technologie de fabrication, il existe un autre problème qui concerne les systèmes d'adaptation de cette énergie en vue de son exploitation dans différentes applications telles que le pompage de l'eau, la commande de moteurs électriques, l'éclairage, le chargement de batteries, etc. [101-105]. Il s'agit en fait de dispositifs de régulation et de conversion de l'énergie dont les convertisseurs *DC/DC* (hacheurs) et *DC/AC* (onduleurs). L'intérêt pour ce problème est lié au fait que le rendement de ces dispositifs influence directement le rendement global de l'alimentation dans son ensemble.

Par ailleurs, les recherches dans le domaine des convertisseurs *DC/DC* et *DC/AC* ont révélé depuis plus d'une décennie l'importance des alimentations à découpage. En effet, l'emploi des transistors de puissance (bipolaire et VMOS) à commutation rapide comme

contacteurs statiques dans les amplificateurs de puissance permet de réduire la consommation propre du convertisseur. Cela permet également de travailler à des fréquences de découpage suffisamment élevées facilitant ainsi le filtrage des harmoniques et réduisant en conséquence le poids, l'encombrement et le coût du convertisseur. À cet égard, les convertisseurs à découpage basés sur la technique de modulation de largeur d'impulsions (PWM) se sont imposés en tant que systèmes viables pour le cas des faibles puissances [105-111].

À cet effet, le modèle proposé peut se ramener à un problème de commande en temps optimal et peut être, par conséquent, étudié dans le cadre de la théorie du "principe du maximum" tel qu'établi par L. Pontriaguin [107].

Un tel système est capable de générer une modulation de largeur d'impulsion (PWM) qui est exploitée pour la conception et la réalisation d'un hacheur à modulation de largeur d'impulsions (PWM). Ce système est exploité dans le contexte des convertisseurs destinés aux alimentations fluctuantes (photovoltaïque, éolienne, etc.) [112], en particulier pour la conception et la réalisation d'un hacheur. Dans cette étude, il s'agit essentiellement de déterminer le lien entre les grandeurs telles que la consigne, l'amplitude de la tension moyenne de sortie de l'asservissement, les fréquences de découpage en fonction des paramètres du système et les contraintes technologiques afférentes. Les relations obtenues par l'étude théorique ont conduit à l'établissement de conditions qui déterminent les performances du système en fonction des paramètres choisis. L'étude théorique est suivie par la simulation et par la réalisation d'un hacheur expérimental. Des expériences seront menées pour évaluer la correspondance théorie pratique.

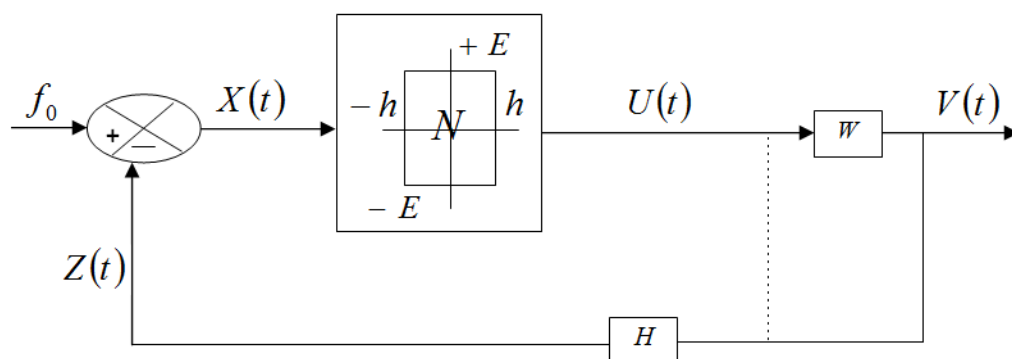
## 1 Etude théorique du système

La détermination des durées d'impulsions ou des instants de commutation est un problème fondamental lors de l'analyse fine des systèmes par +/-, Dans le cas général, l'obtention d'une solution analytique est fort complexe, voire impossible. Et ce sont surtout les méthodes graphiques ou de simulation qui permettent d'analyser le problème. Néanmoins, pour le cas que nous envisageons dans cette étude, des solutions analytiques seront trouvées.

### 1.1 Approche mathématique de l'élément « N »

Le modèle du hacheur PWM (Le système d'asservissement) proposé est présenté schématiquement à la Figure (3-1). Il peut être ramené à l'étude d'un asservissement par +/- . Ce système comprend dans la chaîne d'action directe l'élément non linéaire par +/- symétrique à hystérésis, noté  $N$  . Cet asservissement comprend aussi dans la chaîne de rétroaction un filtre linéaire du premier ordre noté  $H$  , Le système d'asservissement est suivi d'un filtre linéaire du second ordre noté  $W$  . Les grandeurs entrant en jeu sont:

- La grandeur de consigne  $f_0$  supposée constante dans le cas d'un hacheur.
- La grandeur de commande  $X(t)$ .
- La grandeur commandée  $U(t)$ .
- La grandeur asservie  $Z(t)$ .
- la grandeur de sortie  $V(t)$ .



**Figure (3-1) :** Schéma du système asservi.

La grandeur de consigne  $f_0$  est comparée à la grandeur asservie  $Z(t)$  . L'erreur obtenue constitue la grandeur de commande  $X(t)$  qui commande l'entrée de l'élément non linéaire  $N$  . Le signal  $U(t)$  à la sortie de  $N$  , est transformé par un filtre linéaire du second

ordre, noté  $W$ . Ce dernier fournit en sortie la grandeur de sortie  $V(t)$  qui sera utilisée par la charge effective.

Notre système est divisé en deux versions selon le fil de rétroaction Figure (3-1) :

- 1- En pointillé qui est numéroté (1) c'est un système de 1<sup>er</sup> ordre.
- 2- En trait continu qui est numéroté (2) c'est un système de 2<sup>eme</sup> ordre.

L'inclusion du filtre  $W$  dans l'asservissement permet de réguler la tension de sortie vis-à-vis des fluctuations (rayonnement, vitesse du vent,...) et des variations de la charge.

### 1.1.1 Equation caractéristique de l'élément « $N$ »

L'équation de la caractéristique de l'élément  $N$  par (+/-) d'entrée  $X(t)$  et de sortie  $U(t)$  fait intervenir en plus de la grandeur d'entrée  $X(t)$  (amplitude); le sens de sa variation  $dX/dt$  de telle sorte qu'elle puisse s'exprime de la façon suivante :

$$U(t) = N\left(X, \frac{dX}{dt}\right) = \begin{cases} E \cdot \text{sign}(X - h) & \text{si } \frac{dX}{dt} > 0 \\ E \cdot \text{sign}(X + h) & \text{si } \frac{dX}{dt} < 0 \end{cases} \quad (3-1)$$

La fonction «  $\text{sign}$  » est définie comme suit :

$$\text{sign}(y) = \begin{cases} +1 & \text{si } y > 0 \\ -1 & \text{si } y < 0 \end{cases} \quad (3-2)$$

La condition sur le signe de la dérivée est appelée condition de sens conforme de commutation, Dans ces conditions, on dira que le comparateur présente un cycle d'hystérésis, la courbe qui représente les variations de la fonction de transfert du circuit comparateur à hystérésis est schématisée dans la Figure (3-2).

\* +/-  $h$  Représente la demi-largeur d'hystérésis.

\* +/-  $E$  Représente la valeur de la tension de sortie (+/-  $V_{CC}$  d'alimentation).

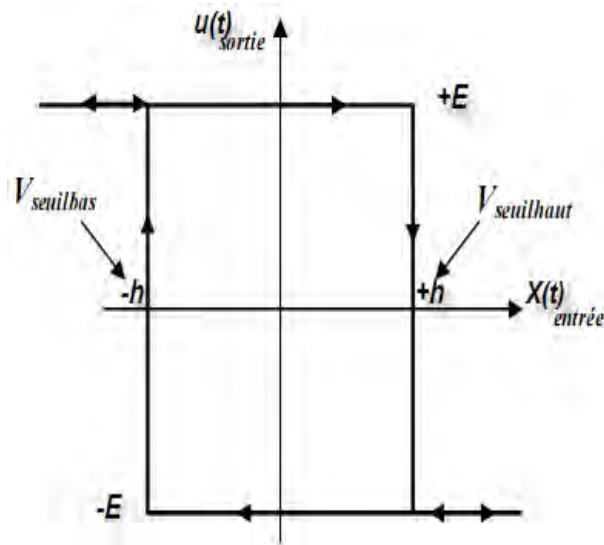


Figure (3-2) : Courbe de la variation de La fonction de transfert  $U(t) = f\{X(t)\}$  .

### 1.1.2 Comportement de l'élément « N »

Pour simplifier, on suppose que la tension d'entrée  $X(t)$  est de type triangulaire et qu'elle peut franchir les seuils  $(+/- h)$  à des instants précis. La sortie  $U(t)$  sera donc une succession d'impulsions d'amplitude constante et de signe alterné, de durées et d'intervalles de répétitions variables. Les instants pendant lesquels  $U(t)$  effectuent les sauts sont appelés les instants de commutation et sont déterminés par les conditions suivantes:

$$\begin{aligned}
 \text{si } X(t) > +h \quad \text{et} \quad \frac{dX(t)}{dt} > 0 &\Rightarrow U(t) = -E \\
 \text{si } X(t) < -h \quad \text{et} \quad \frac{dX(t)}{dt} < 0 &\Rightarrow U(t) = +E
 \end{aligned}
 \tag{3-3}$$

L'évolution temporelle du signal de sortie en correspondance avec le signal d'entrée est représentée à la Figure (3-3).



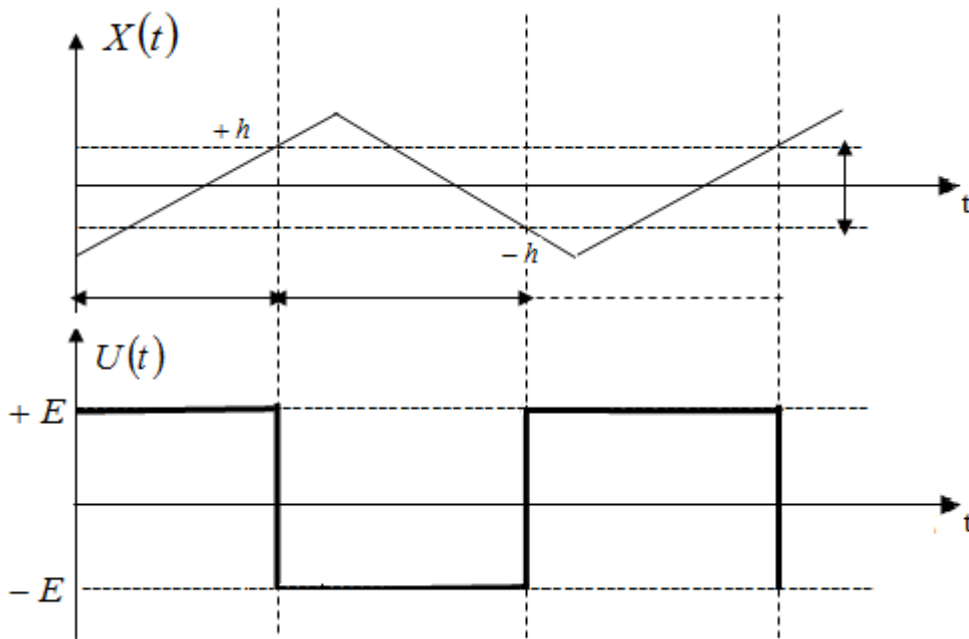


Figure (3-3): Les tensions d'entrées et sorties  $X(t)$  et  $U(t)$ .

## 1.2 Détermination des instants de commutation

### 1.2.1 Étude du système du 1<sup>er</sup> ordre

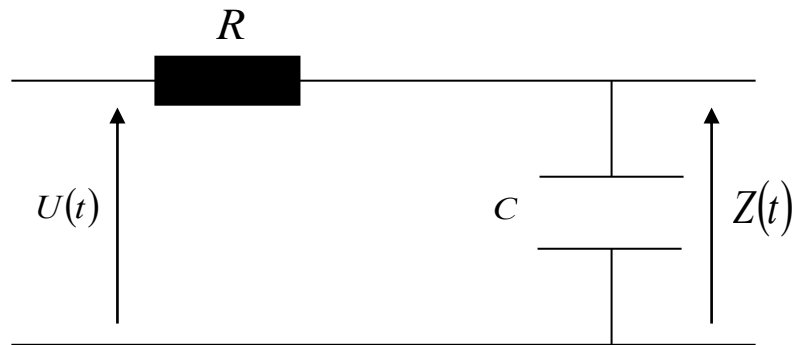


Figure (3-4): Filtre passe bas du 1<sup>er</sup> ordre.

La partie linéaire est constituée par le filtre de rétroaction d'entrée  $U(t)$  et de sortie  $Z(t)$ . D'après le fonctionnement du système on sait que  $U(t)$  est une suite d'impulsions prenant alternativement les valeurs  $+/- E$ . En admettant la continuité par morceaux pour  $U(t)$  sur tout intervalle de temps limité par deux instants successifs de commutation  $t_k$  et  $t_{k+1}$  ( $k = 0, 1, 2, \dots, n$ ) ; alors la relation d'entrée-sortie du filtre est une équation différentielle de la forme: [113].

$$U(t) - Ri(t) - Z(t) = 0 \quad (3-4)$$

Avec :

$$U(t) = (-1)^k \cdot E$$

$$i(t) = C \cdot \frac{dZ(t)}{dt} = C \cdot \frac{dZ_k}{dt}$$

Donc (3-4) devient :

$$\tau \frac{dZ_k}{dt} + Z_k = (-1)^k \cdot E \quad (3-5)$$

Dans laquelle  $\tau$  est la constante de temps du filtre  $\tau = RC$ .

### 1.2.1.1 Détermination des durées d'impulsions

La détermination des durées d'impulsions ou des instants de commutation est un problème fondamental lors de l'analyse fine des systèmes par (on-off) +/-. Dans le cas général, l'obtention d'une solution analytique est fort complexe, voire impossible. Et ce sont surtout les méthodes graphiques ou de simulation qui permettent d'analyser le problème. Néanmoins, pour le cas que nous envisageons dans cette étude, une solution analytique sera trouvée. Pour ce faire, considérons la partie linéaire qui est constituée par le filtre de rétroaction d'entrée  $U(t)$  et de sortie  $Z(t)$ . En fonctionnement,  $U(t)$  est une suite d'impulsion prenant alternativement les valeurs +/-.

L'intégration de (3-5) sur l'intervalle ( $k$  et  $k+1$ ) en tenant compte des conditions aux limites, permet de mettre en évidence l'expression donnant les durées d'impulsions ( $t_{k+1} - t_k$ ) qui après quelques transformations mathématiques élémentaires peut s'écrire comme suit :

$$t_{k+1} - t_k = 2 \cdot \tau \cdot \operatorname{argth} \left( \frac{h}{E + (-1)^{k+1} \cdot f_0} \right) \quad (3-6)$$

D'après l'équation (3-6), on constate que les durées d'impulsions sont en fonction des paramètres du système ( $h, E, \tau$  et  $f_0$ ) et de l'intervalle  $k$ . L'analyse de l'expression (3-6) révèle l'existence d'une périodicité mise en évidence par la série  $(-1)^{k+1}$ .

La détermination des durées d'impulsions aboutit aux expressions (3-7) et (3-8).

\* pour  $k$  pair, on obtient la durée d'impulsion (*ON*), notée  $T_1$  est donnée par l'expression (3-7) :

$$T_1 = t_{K+1} - t_K = 2.\tau.\operatorname{argth}\left(\frac{h}{E - f_0}\right) \text{ À condition que } h < |E - f_0| \quad (3-7)$$

\*Pour  $k$  impair, on obtient la durée d'impulsion (*OFF*), notée  $T_2$  est donnée par l'expression (3-8) :

$$T_2 = t_{K+1} - t_K = 2.\tau.\operatorname{argth}\left(\frac{h}{E + f_0}\right) \text{ À condition que } h < |E + f_0| \quad (3-8)$$

Ces expressions sont fonction des paramètres du système ( $h, E, \tau$ ) et de la grandeur de consigne  $f_0$ . Il découle de ces résultats que  $U(t)$  est un signal périodique de forme rectangulaire, de période  $T = T_1 + T_2$ , pouvant se mettre sous la forme:

$$T = 2.\tau.\operatorname{argth}\left(\frac{2hE}{E^2 - f_0^2 + h^2}\right) \quad (3-9)$$

### Commentaires

Les relations (3-7), (3-8) et (3-9) reliant les durées d'impulsions à l'amplitude de la consigne  $f_0$  sont à la base de la PWM. Notons par ailleurs, que la PWM ainsi obtenue est à rapport cyclique variable  $\frac{T_1}{T}$  et à période variable ( $T$ ). D'autre part, on constate qu'en l'absence de consigne ( $f_0 = 0$ ), le système asservi génère une auto oscillation qui correspond à un signal de forme carré et de période  $T_0$  donnée par la relation suivante:

$$T_0 = 4.\tau.\operatorname{argth}\left(\frac{h}{E}\right) \quad (3-10)$$

De plus on remarque que cette période est la plus petite période du système et correspond donc inversement à la fréquence maximale que peut produire ce système.

### 1.2.1.2 Détermination de la valeur moyenne de $U(t)$

La décomposition du signal asservi  $U(t)$  à la sortie de l'élément non linéaire  $N$  en série de Fourier donne pour valeur moyenne, l'expression:

$$Um = E \frac{(T_1 - T_2)}{(T_1 + T_2)} \quad (3-11)$$

En remplaçant  $T_1$  et  $T_2$  par les expressions trouvées précédemment, on obtient l'expression suivante :

$$Um = f_0 \cdot \frac{\operatorname{argth}\left(\frac{2hE}{E^2 - f_0^2 - h^2}\right)}{\operatorname{argth}\left(\frac{2hE}{E^2 - f_0^2 + h^2}\right)} \quad (3-12)$$

Cette expression met en évidence la relation entre la valeur moyenne asservie  $Um$  et la grandeur de consigne  $f_0$ . Cette relation est paramétrée par la grandeur  $E$  et la largeur d'hystérésis  $h$ .

En approximant au premier ordre  $\operatorname{argth}(x) \cong x$  on peut écrire :

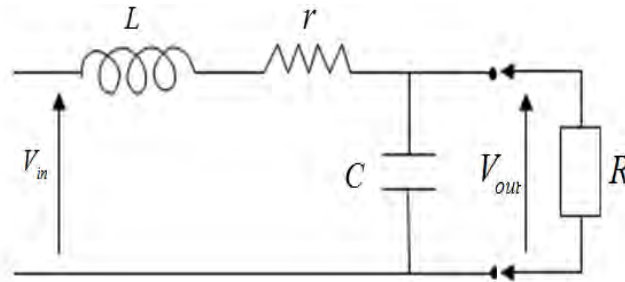
$$Um = \left( \frac{E_0^2 - f_0^2 + h^2}{E_0^2 - f_0^2 - h^2} \right) \cdot f_0 \quad (3-13)$$

Expression qui révèle que l'asservissement de  $Um$  à  $f_0$  est d'autant efficace que  $h$  est négligeable devant la racine carrée de  $(E^2 - f_0^2)$  puisque la tension moyenne tend à égaler  $f_0$ . Ceci prouve les capacités d'asservissement du système étudié puisque la tension de sortie moyenne suit pratiquement la valeur de la consigne  $f_0$ .

### 1.2.2 Etude du système du 2<sup>ème</sup> ordre

La rétroaction est effectuée après la sortie d'un élément linéaire qui est le filtre du deuxième ordre de type  $RLC$  noté  $W$ .

Le filtre du second ordre étudié comme montré dans la Figure (3-5) est constitué d'une bobine d'inductance  $L$ , la résistance interne  $r$  et d'un condensateur  $C$  en parallèle avec la résistance  $R$ . L'entrée et la sortie de ce filtre sont respectivement  $V_{in}$  et  $V_{out}$  conformément à la Figure (3-5).



**Figure (3-5) :** Filtre passe bas du 2<sup>ème</sup> ordre.

La relation d'entrée-sortie du filtre est une équation différentielle de la forme [113]:

$$V_{in} = (-1)^k E = V_{out} + RC \frac{dV_{out}}{dt} + LC \frac{d^2V_{out}}{dt^2} \quad (3-14)$$

En utilisant la transformation de Laplace, la fonction de transfert de ce filtre est:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = F(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} = \frac{\omega_n^2}{s_1 - s_2} * \left[ \frac{1}{s - s_1} - \frac{1}{s - s_2} \right] \quad (3-15)$$

Où

$s$  : est la variable de Laplace.

$s_1$ ,  $s_2$  : sont les racines du dénominateur de la fonction de transfert.

$\omega_n$ ,  $\xi$  : la pulsation propre du système et le coefficient d'amortissement du système.

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \xi = \frac{R}{2} * \sqrt{\frac{C}{L}}$$

### 1.2.2.1 Détermination des durées d'impulsions

La détermination de l'expression analytique de la période d'oscillation dans le cas où  $f_0 \neq 0$  est difficile à obtenir. Cependant, une solution analytique peut être trouvée dans le cas où  $f_0 = 0$ . C'est ce cas que nous discuterons dans cette sous section.

Pour  $f_0 = 0$ , le signal d'entrée  $V_{in}$  du filtre du second ordre est une onde carrée définie par :

$$V_{in}(s) = X(s) = \frac{2E}{s} th \frac{Ts}{4} \quad (3-16)$$

L'équation (3-16) caractéristiques du filtre du 2 ordre étant:

$$s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 = 0 \quad (3-17)$$

On distingue trois cas particuliers selon le facteur d'amortissement  $\xi$ , on a les deux racines  $s_1$  et  $s_2$ .

➤ Pour  $\xi > 1 \Rightarrow$  notre système à deux racines réelles :

$$s_{1,2} = -\xi\omega_n \pm \omega_n \sqrt{\xi^2 - 1}$$

➤ Pour  $\xi < 1 \Rightarrow$  le système à une tendance à l'oscillation, notre système à deux racines imaginaires :

$$s_{1,2} = -\xi\omega_n \pm j\omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$$

➤ Pour  $\xi = 1 \Rightarrow$  régime 'critique', notre système à une racine double:

$$s_{1,2} = -\omega_n$$

La sortie du filtre en boucle ouverte est :

$$Y(s) = F(s) * X(s) \quad (3-18)$$

En remplaçant  $F(s)$  et  $X(s)$  par leur expression (3-15) et (3-16) ; on trouve:

$$Y(s) = \frac{2E}{s} * th \frac{Ts}{4} * \frac{\omega_n^2}{s_1 - s_2} * \left[ \frac{1}{s - s_1} - \frac{1}{s - s_2} \right] \quad (3-19)$$

La condition de commutation d'après le théorème des résidus, est donnée par la condition de bouclage :

$$Y(t_i) = 2E \int \frac{1}{s} th \frac{Ts}{4} \left[ \frac{\omega_n^2}{s_1 - s_2} \right] \left( \frac{1}{s - s_1} \right) e^{-st} ds + 2E \int \frac{1}{s} th \frac{Ts}{4} \left[ \frac{\omega_n^2}{s_1 - s_2} \right] \left( \frac{1}{s - s_2} \right) e^{-st} ds = h \quad (3-20)$$

Elle peut s'écrire sous la forme suivante:

$$\frac{1}{s_1} th \frac{Ts_1}{4} - \frac{1}{s_2} th \frac{Ts_2}{4} = \frac{h}{2E\omega_n^2} (s_1 - s_2) \quad (3-21)$$

Cette expression est au centre de notre analyse. Nous remarquons :

\* que La période d'auto oscillation  $T$  dépend des paramètres du système non linéaire ( $E$ ,  $h$ ) ainsi que des paramètres du filtre de deuxième ordre ( $\omega_n, \xi$ ).

\*Le cas où  $f_0$  est constante reste compliqué à déterminer analytiquement par rapport au filtre du premier ordre par contre on peut simuler  $f_0$  quelconque.

### 1.2.2.2 Analyse de la période d'oscillation du WRT en fonction du facteur d'amortissement

#### a) - Premier cas (racines réelles):

Pour le premier cas les deux racines sont réelles, l'expression (3-21) devient :

$$\frac{th \frac{T}{4} \left( -\xi\omega_n + \omega_n \sqrt{\xi^2 - 1} \right)}{-\xi\omega_n + \omega_n \sqrt{\xi^2 - 1}} - \frac{th \frac{T}{4} \left( -\xi\omega_n - \omega_n \sqrt{\xi^2 - 1} \right)}{-\xi\omega_n - \omega_n \sqrt{\xi^2 - 1}} = \frac{h}{2E\omega_n} \sqrt{\xi^2 - 1} \quad (3-22)$$

- Pour  $\xi \gg 1$  ;  $Th x = x$

Donc :

$$s_1 = -\xi\omega_n + \omega_n \sqrt{\xi^2 - 1} \Rightarrow s_1 = 0$$

$$s_2 = -\xi\omega_n - \omega_n \sqrt{\xi^2 - 1} \Rightarrow s_2 = -2\xi\omega_n$$

On obtient :

$$T = \frac{4}{\omega_n} \frac{h}{E} \xi \quad (3-23)$$

**b) - Deuxième cas (racines imaginaires):**

Pour le deuxième cas nous avons des racines imaginaires, l'expression (3-21) devient :

$$\frac{-\xi \sin\left(\frac{T}{2} \omega_n \sqrt{\xi^2 - 1}\right) + \sqrt{\xi^2 - 1} \operatorname{sh}\left(\frac{T}{2} \xi \omega_n\right)}{ch\left(\frac{T}{2} \xi \omega_n\right) + \cos\left(\frac{T}{2} \omega_n \sqrt{\xi^2 - 1}\right)} = \frac{h}{2E} (1 + 2\xi^2) \sqrt{\xi^2 - 1} \quad (3-24)$$

Et la présence de fonctions oscillatoires qui compliquent la solution de cette équation.

- Pour  $\xi \ll 1$

Notre système réagit d'une façon oscillatoire, et on ne peut trouver une approche mathématique, on peut regarder le comportement du système par simulation.

**c) - Troisième cas (racine double) :**

Pour le troisième cas à une racine double, l'expression (3-21) devient

$$\frac{-\omega_n T + 4sh\left(\frac{\omega_n T}{2}\right)}{2\omega_n \left(1 + ch\left(\frac{T\omega_n}{2}\right)\right)} = \frac{h}{2E\omega_n^2} \quad (3-25)$$

Cette étude a mis en évidence, la variation de la période d'auto oscillation par rapport au coefficient d'amortissement, la pulsation propre du système ainsi le paramètre  $h/E$ .

Les durées d'impulsion sont données par des fonctions non linéaires résolues par les méthodes numériques.

**2 Réalisation du hacheur PWM**

Dans cette section on présentera les étapes de réalisation du hacheur PWM, donc le but recherché c'est comment dimensionner le hacheur pour une bonne régulation de la tension provenant de la source fluctuante ? et comment adapter cette tension à la variation de la charge d'utilisation ? Pour ce but nous allons détailler l'étude du circuit électrique du système. En basant sur le dimensionnement du hacheur.



## 2.1 Relation du système étudié avec les alimentations à découpage

Le système d'asservissement étudié est exploité en vue de concevoir et réaliser des alimentations à découpage. Dans le cas de l'application envisagée ici, il s'agit, précisément, de concevoir un régulateur de tension  $DC - DC$  ou hacheur qui permette de réguler la tension que l'on doit délivrer à une charge donnée malgré les fluctuations de la tension provenant des sources d'énergies fluctuantes comme les énergies renouvelables. La correspondance entre l'étude présentée et le hacheur PWM envisagé s'interprète comme suit. La grandeur  $E$  qui apparaît dans les différentes expressions précédentes correspond à la tension délivrée par exemple par un panneau photovoltaïque qui dépend de l'ensoleillement, de la température et d'autres facteurs [101]. Elle est donc, en général fluctuante et c'est une tension qui doit être régulée avant de pouvoir alimenter les charges.  $V$  est la tension effective qui s'applique réellement à la charge utile (moteur, pompe, batterie, etc.). Celle-ci est composée par la superposition de la tension moyenne  $Um$  et des harmoniques qui sont plus ou moins filtrées par le filtre du second ordre.  $f_0$  est la grandeur de consigne. Les autres paramètres qui interviennent dans le dimensionnement de l'onduleur PWM restent la largeur d'hystérésis  $2h$ , la constante de temps du filtre du premier ordre  $\tau$  ainsi que les paramètres du filtre du second ordre (self  $L$ , capacité  $C$ ). Les grandeurs  $h$  et  $\tau$  interviennent dans la détermination des fréquences de découpage  $T$ ,  $T_1$  et  $T_2$ . Ils ont aussi pour effet de fixer en conséquence  $Um$ . Le filtre du second ordre de sortie, permet de filtrer les harmoniques associées à  $V$  pour extraire idéalement  $Um$ . Le dimensionnement du filtre du second ordre permet de limiter le taux d'ondulation résiduelle de  $V$ .

## 2.2 Réalisation du circuit

Le circuit du hacheur PWM que nous avons réalisé se compose essentiellement des parties suivantes (voir Figure (3-6)):

- L'amplificateur opérationnel est configuré en comparateur-amplificateur de l'erreur qui résulte de la rétroaction. L'élément non linéaire est réalisé à l'aide d'une bascule de schmidt.

- le circuit préamplificateur est constitué d'un pont de Darlington.

- le circuit de puissance est réalisé avec des transistors bipolaires de puissance à commutation rapide. On notera que les circuits préamplificateur et de puissance sont directement alimentés par la source fluctuante (les panneaux photovoltaïques) ou des sources de tension simulant ces dernières.

- Le filtre du second ordre de sortie sert au filtrage des harmoniques. La charge se place à la sortie de ce filtre.

Dans nos expériences, la source, de tension fluctuante a été remplacée par une alimentation de laboratoire dont nous faisons varier lentement la valeur. La plage des

fréquences de travail utilisée se situe en général entre 800 *Hz* et 20 *KHz* . Il s'agit d'un compromis à faire entre la fréquence de découpage et les pertes dans les transistors de puissance. Pour nos expériences, la gamme de fréquence qui donne le meilleur compromis en considération aux contraintes citées se situe autour de 10*KHz* .

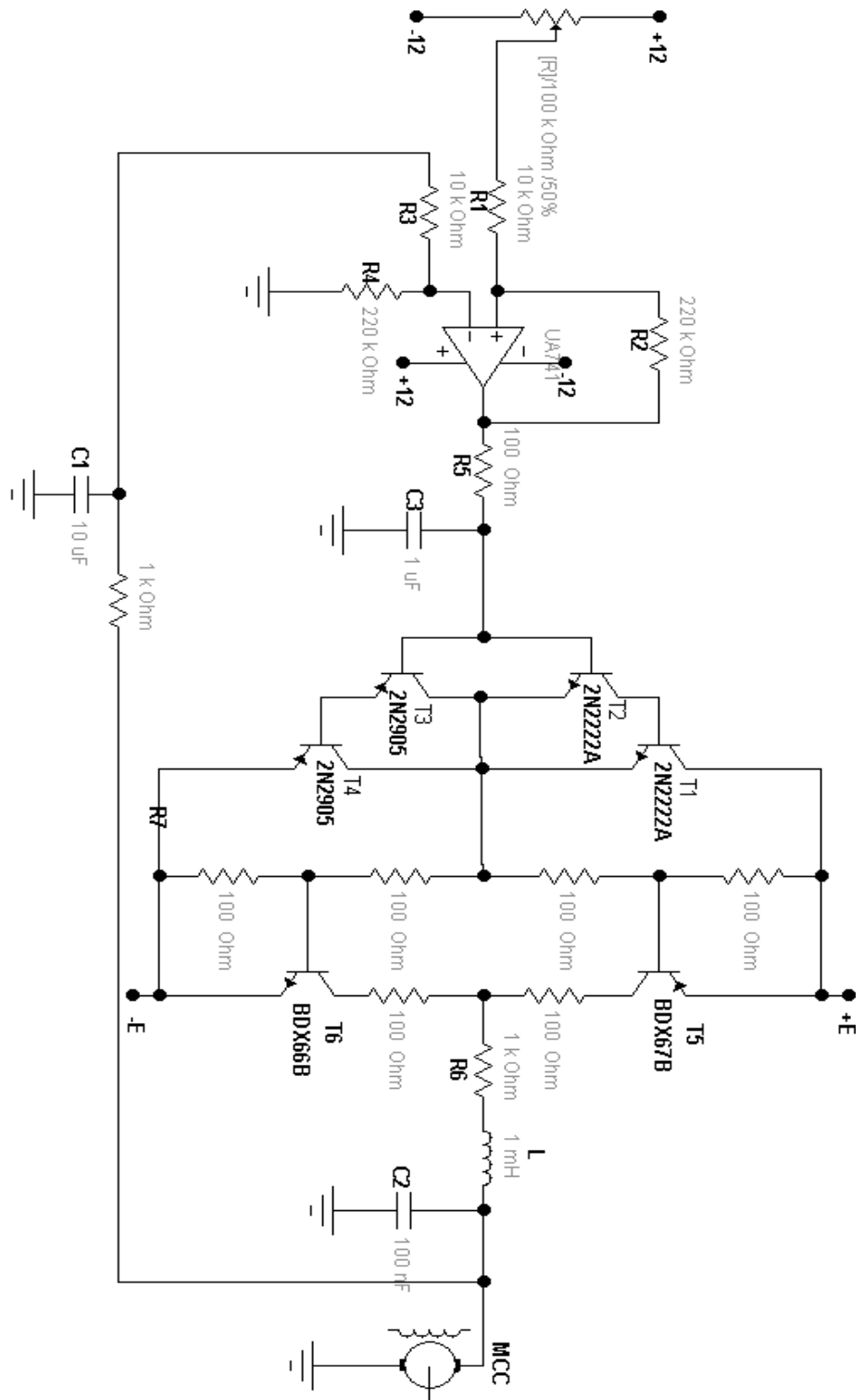


Figure (3-6) : Le circuit de l'alimentation à découpage

### 3 Simulation essais et mesures

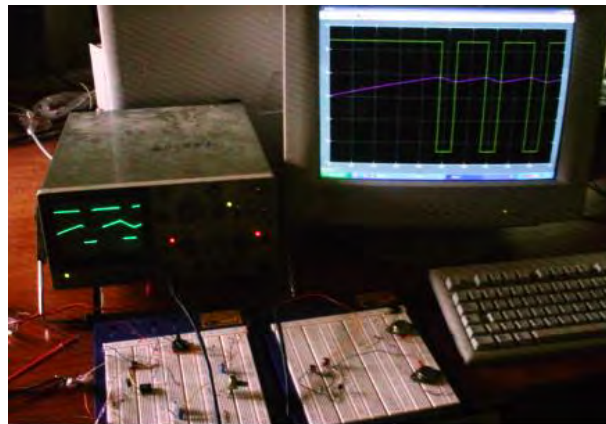
Dans le domaine électronique comme d'autres domaines l'étude théorique ne suffit pas pour valider l'efficacité d'un système et la validité de sa théorie, pour cette raison dans cette section, nous présentons les résultats théoriques et expérimentaux ainsi que leur comparaison en vue de déterminer les possibilités et les limites d'exploitation de notre système ce qui permettra de mieux dimensionner notre système.

Pour cette raison, nous avons étudié les points suivants :

- \*La simulation par « Simulink de Matlab » du hacheur réalisé.
- \* l'étude expérimentale du circuit réalisé.
- \* comparaison des résultats théorique, de simulation et expérimentaux.

#### 3.1 Simulation du hacheur

La Figure (3-7) présente une image de notre système expérimental. On y distingue le système PWM, les résultats de simulation sur l'écran du PC ainsi que les résultats expérimentaux visualisés sur l'oscilloscope.



**Figure (3-7):** Système expérimental.

La simulation est effectuée avec les hypothèses suivantes :

- \*les transistors sont des interrupteurs parfaits.
- \*l'élément  $N$  se remplace par une bascule à hystérésis.
- \*les filtres ( $RC$ ) et ( $RLC$ ) se remplacent par des blocks décrivent les fonctions de transfert de ces filtres dans le domaine de la place.

### 3.1.1 Simulation du circuit du 1<sup>er</sup> ordre.

La Figure (3-8) représente notre circuit de simulation du 1<sup>er</sup> ordre :

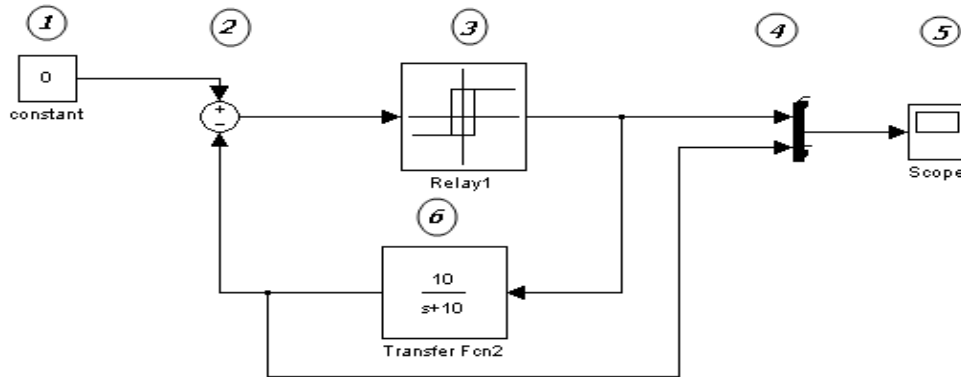


Figure (3-8): Schéma de simulation du système de 1<sup>er</sup> ordre sur Simulink.

#### 3.1.1.1 Identification des éléments du circuit :

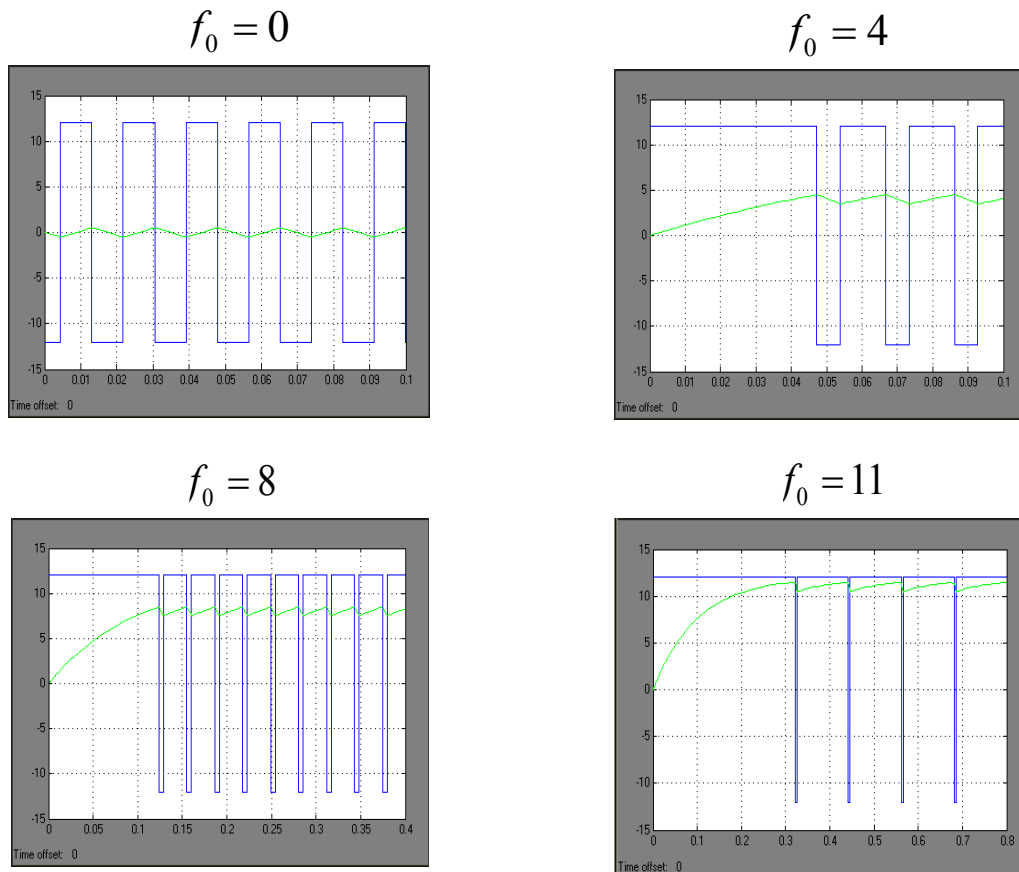
- \*l'élément [1] représente la consigne  $f_0$  .
- \*l'élément [2] représente le comparateur.
- \*l'élément [3] représente l'élément non linéaire (comparateur a hystérésis).
- \*l'élément [4] est le Mux (Multiplexeur) pour visualiser deux signaux sur le même scope.
- \*l'élément [5] est le scope pour visualiser les signaux.
- \*l'élément [6] représente le filtre du 1<sup>er</sup> ordre.

#### 3.1.1.2 Résultats de simulation

Dans cette section, on présentera quelques résultats de la simulation du système PWM étudié. Dans l'exemple présenté, la simulation a été effectuée pour mettre en évidence la variation des durées d'impulsions en fonction de  $f_0$  et de  $\tau$  pour les paramètres (  $h = \pm 0.52V$  ,  $E = \pm 12V$  ).

##### a- Variation des durées d'impulsions en fonction de la consigne $f_0$

Dans l'exemple présenté ci-dessus, la simulation a été effectuée avec le paramètre  $\tau = 0.1s$  pour mettre en évidence la variation des durées d'impulsions en fonction de  $f_0$  . Quelques résultats graphiques de simulation sont présentés à la Figure (3-9) et ce pour 4 valeurs différentes de la consigne ( $f_0 = 0, 4, 8, 11$ ). On obtient les résultats suivants:



**Figure (3-9):** Durée d'impulsion en fonction de  $f_0$ .

### Commentaires :

On remarque que les durées des impulsions  $T_1$  et  $T_2$  ainsi que la période  $T$  changent en fonction de la consigne  $f_0$ . Ceci va changer le rapport cyclique ( $\alpha = \frac{T_1}{T}$ ), il y a bien donc une modulation de largeur d'impulsions via la commande.

### b- Variation de la période en fonction de la constante de temps $\tau$

Lorsqu'on fait varier la constante du temps  $\tau$  en fixant  $f_0 = 0V$ , on obtient les résultats suivants qui sont visualisés par la simulation et ceci pour différentes valeurs de la constante de temps  $\tau$  Figure (3-10).

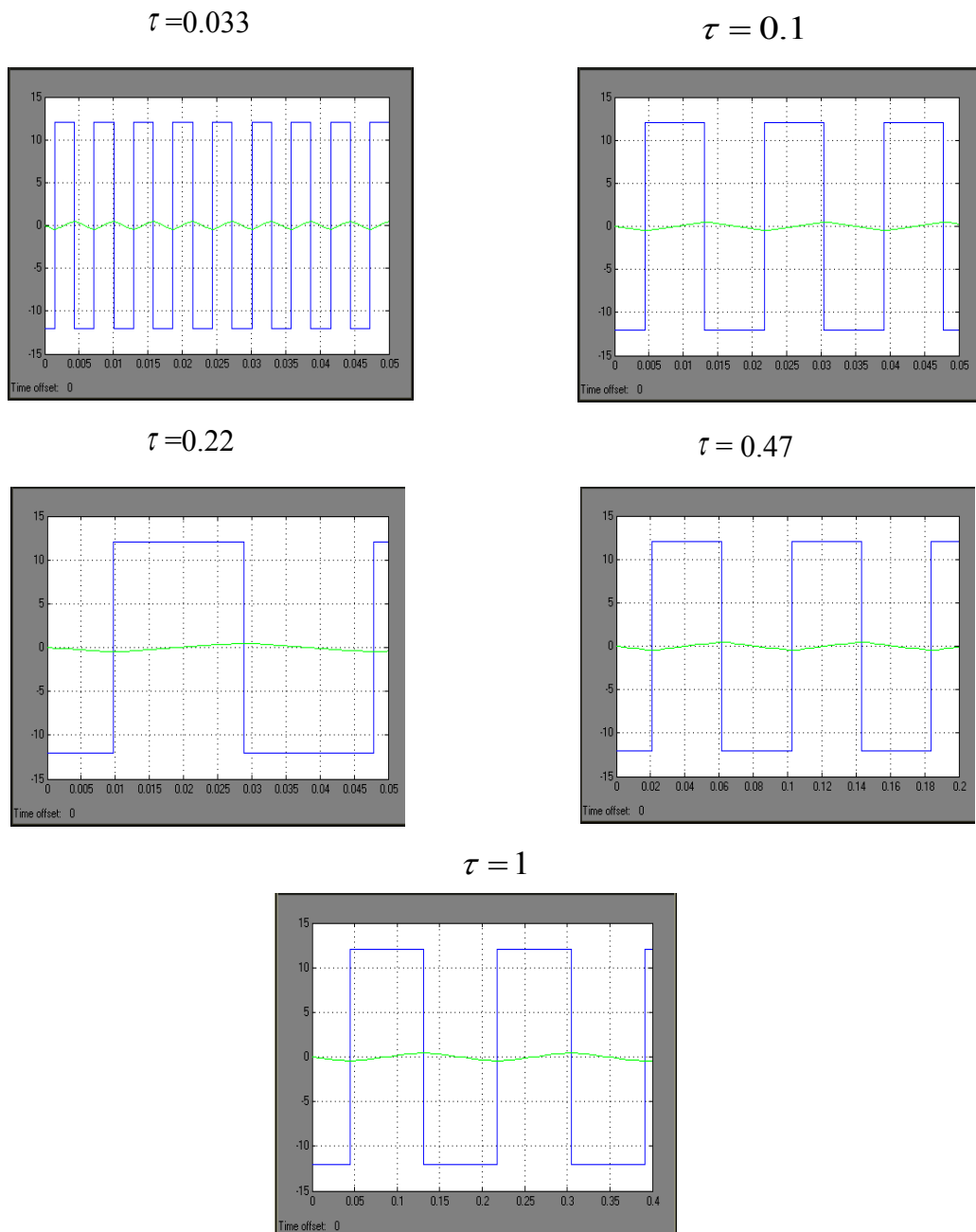
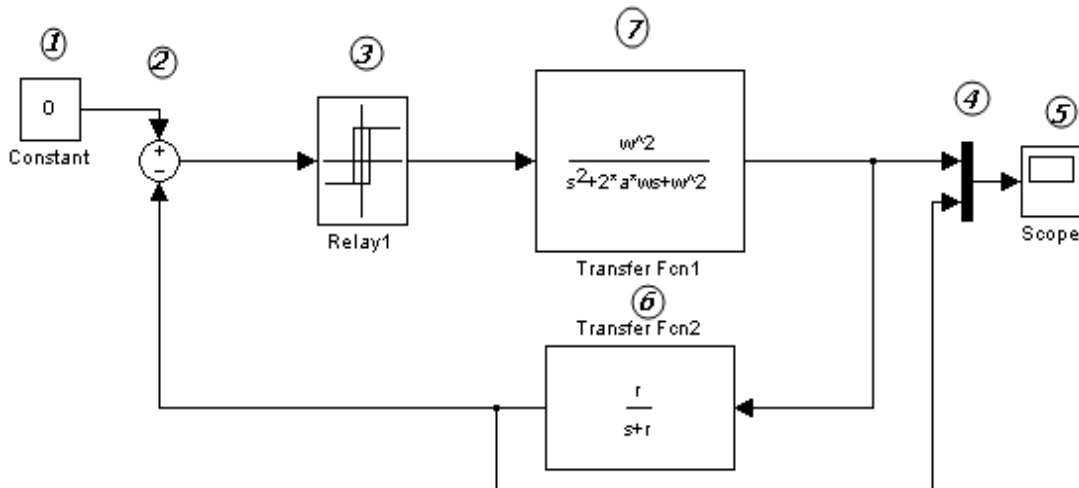


Figure (3-10): Durée d'impulsion en fonction de  $\tau$ .

**Commentaire :**

Nous observons que : lorsque  $\tau$  augmente la fréquence de découpage décroît. C'est – à-dire nous pouvons commander la fréquence de découpage.

**3.1.2 Simulation du circuit du 2<sup>ème</sup> ordre.**

**Figure (3-11):** Schéma de système de 2<sup>ème</sup> ordre sur Simulink.

**Remarque :**

Les éléments du circuit de 2<sup>ème</sup> ordre sur la Figure (3-11) sont les mêmes éléments du circuit du 1<sup>er</sup> ordre sauf l'élément [7] qui représente le filtre du 2<sup>ème</sup> ordre.

**3.1.2.1 Paramètre des éléments**

Pour que le système fonctionne il faut bien choisir les éléments du circuit et respecter la condition :

$$T_{\min} \ll 2\pi\sqrt{LC}$$

Cette condition c'est pour assurer un bon filtrage des harmoniques associées à la tension de sortie. Ce qui signifie que la fréquence de coupure de filtre du 1<sup>er</sup> ordre est très inférieure à celle du 2<sup>ème</sup> ordre, cette condition est bien vérifiée sur la simulation. Sachant que pour l'influence de la consigne sur les instants de commutation dans le circuit de 2<sup>ème</sup> ordre ne se change plus, donc pour cette raison on va s'intéresser par l'influence des éléments du filtre du 2<sup>ème</sup> ordre.



L'influence de la constante de temps reste la même mais elle est soumise à la condition.

$$T_{\min} \ll 2\pi\sqrt{LC} \quad \text{car} \quad T_{\min} = 2\pi RC$$

### 3.1.2.2 Résultats de simulation

Dans cette section, nous présentons la variation des durées d'impulsions en fonction du paramètre d'amortissement  $\zeta$  et de la tension  $E$  et nous fixons les paramètres suivants ( $f_0 = 0V$ ,  $h = \pm 0.52V$ ,  $\tau = 0.1s$ ,  $\omega_n = 10000 \text{ rd/s}$ ).

#### a- Variation de la période « $T$ » en fonction de « $\zeta$ ».

Lorsqu'on fait varier  $\zeta$  on obtient les résultats suivants pour  $\zeta < 1$ ,  $\zeta = 1$ ,  $\zeta > 1$  :

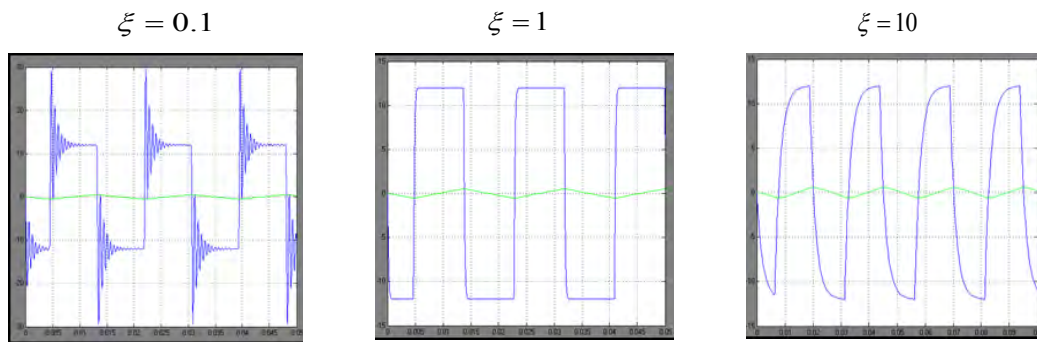


Figure (3-12) : Signal de sortie et d'entrée pour différentes valeur de  $\zeta$ .

#### Commentaires

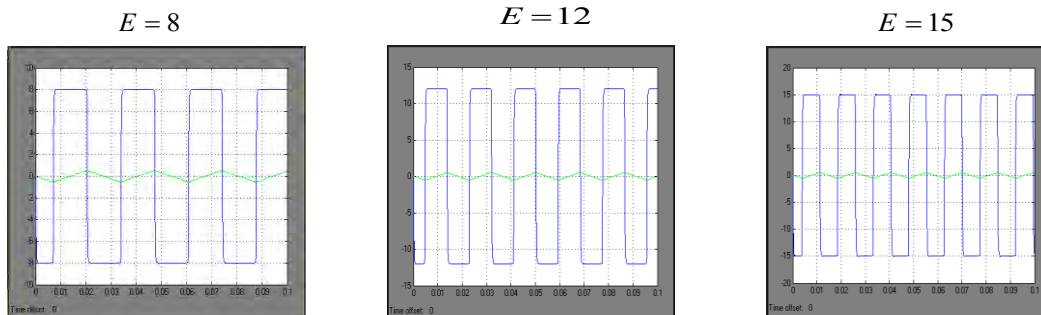
D'après les schémas précédents on remarque que :

- ✓ Pour  $\zeta < 1 \Rightarrow$  le système à une tendance à l'oscillation.
- ✓ Pour  $\zeta = 1 \Rightarrow$  régime rapide « critique ».
- ✓ Pour  $\zeta > 1 \Rightarrow$  régime pseudo périodique.

On remarque que la bonne réponse est lors que  $\zeta$  est au voisinage de 1.

### b- Variation de la période « $T$ » en fonction de la tension « $E$ ».

On donne pour  $E$  trois valeurs ( $E = 8V$ ,  $E = 12V$ ,  $E = 15V$ ), on choisit  $\xi = 1$ , On obtient les résultats suivants:



**Figure (3-13) :** Signal de sortie et d'entrée pour différentes valeur de  $E$ .

On conclue que l'asservissement de la tension  $E$  est assuré par la variation de la fréquence de coupure.

### 3.2 Essais et résultats expérimentaux

Dans cette section, on présentera quelques résultats expérimentaux (par l'étude du système de 1<sup>er</sup> ordre) et on cherche à valider la théorie établie. Trois séries d'expériences seront présentées :

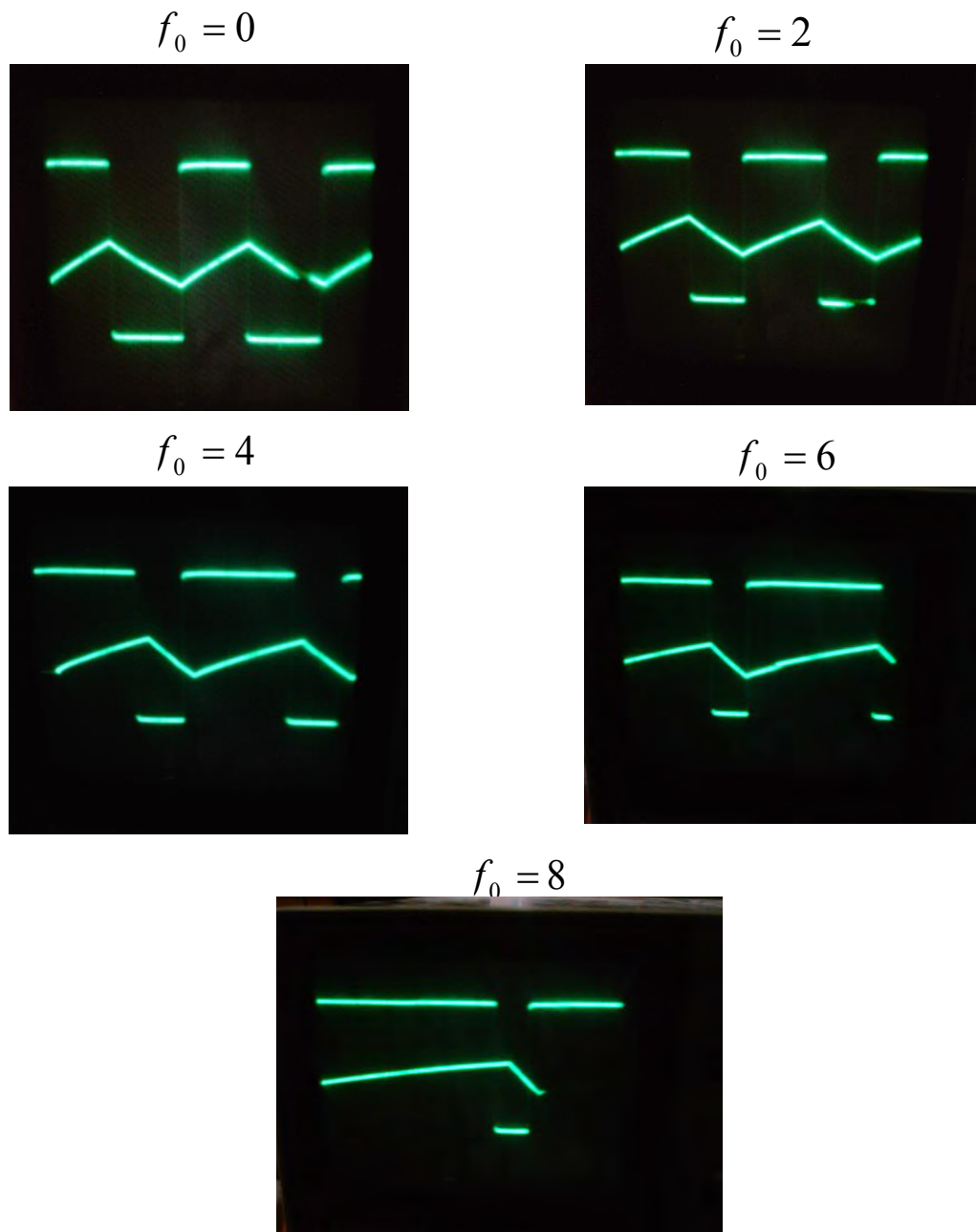
- \* La première concerne la vérification expérimentale des expressions liant les durées d'impulsions à la grandeur de consigne  $f_0$  ( $T$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  en fonction de  $f_0$ ).
- \* La deuxième série d'expériences concerne la vérification expérimentale de la tension moyenne  $Um$  en fonction de la consigne  $f_0$ .
- \* La troisième concerne l'influence de la constante de temps sur la fréquence de découpage.

### 3.2.1 Systèmes du 1<sup>er</sup> ordre

#### 3.2.1.1 Étude de la fréquence de découpage en fonction de $f_0$

Comme pour la simulation, des essais expérimentaux ont été effectués en vue de valider les relations théoriques  $T_1$ ,  $T_2$  et  $T$  qui relie les durées d'impulsions en fonction de  $f_0$  et de  $\tau$ .

Nous faisons varier la consigne  $f_0$  avec la fixation d'autres éléments dans lesquelles ( $E = 12 V$ ,  $h = 0.52 V$ ,  $\tau = 0.1 s$ ).



**Figure (3-14) :** Images de l'oscilloscope montrant  $U(t)$  et  $Z(t)$ .

La Figure (3-14) présente des chronogrammes pris directement sur l'oscilloscope qui montrent que les durées d'impulsions  $T_1$ ,  $T_2$  et  $T$  changent de valeur chaque fois qu'il y a une variation de la consigne; d'où la modulation de largeur d'impulsions.

### 3.2.1.2 Comparaison des résultats

Par la suite nous allons comparer les résultats suivants.

#### a- Etude de la fréquence de découpage en fonction de $f_0$

Cette première série d'expériences consiste à valider les relations théoriques (3-7), (3-8) et (3-9) qui relient les durées d'impulsions en fonction de  $f_0$ . Cette série d'expériences consistait à faire varier  $f_0$  et à mesurer  $T_1$ ,  $T_2$  et  $T$ . Les résultats expérimentaux obtenus sont représentés graphiquement sur la Figure (3-15). Dans cette Figure, nous avons superposé les points expérimentaux et les courbes données par les expressions théoriques. On peut identifier, sur cette figure, la courbe qui correspond à l'expression théorique (3-7) donnant  $T_1$  en fonction de  $f_0$ .

Les mesures expérimentales correspondantes sont représentées par les ensembles de points  $T_{1X}$ . On peut aussi identifier la courbe correspondant à l'expression théorique (3-8) exprimant  $T_2$  en fonction de  $f_0$ . Les mesures expérimentales correspondantes sont représentées par  $T_{2X}$ . La troisième courbe est l'addition des deux premières et correspond à la période totale en fonction de  $f_0$  et correspondant à l'expression théorique (3-9). Les mesures expérimentales correspondantes sont représentées par  $T_X$ .

De la comparaison des résultats théoriques aux résultats expérimentaux, il ressort, qu'il y'a une excellente concordance entre les résultats théoriques et les résultats expérimentaux et ce pour  $T_1$ ,  $T_2$  et  $T$ . Cependant, la concordance peut diminuer lorsque  $f_0$  atteint des valeurs comparables à  $E$ , ceci s'explique par le fait que l'on s'écarte de la condition de validité  $h \ll$  devant  $(E - f_0)$ . Dans notre cas, on choisit  $E = 12\text{volts}$ .

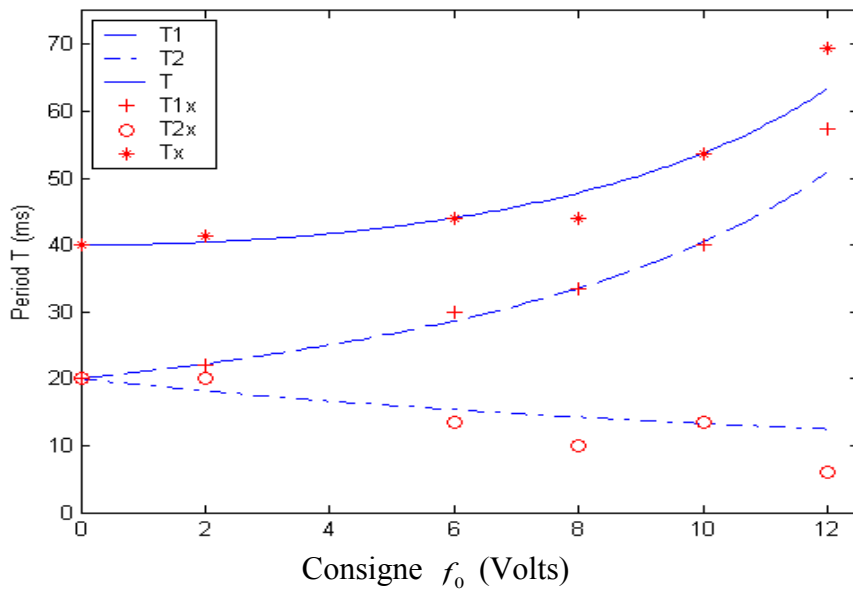


Figure (3-15) : Les durées d'impulsions en fonction de  $f_0$ .

**b- Période  $T$  en fonction de la constante du temps  $\tau$**

L'évolution de période  $T$  en fonction de constante du temps  $\tau$  est représentée sur la Figure (3-16).

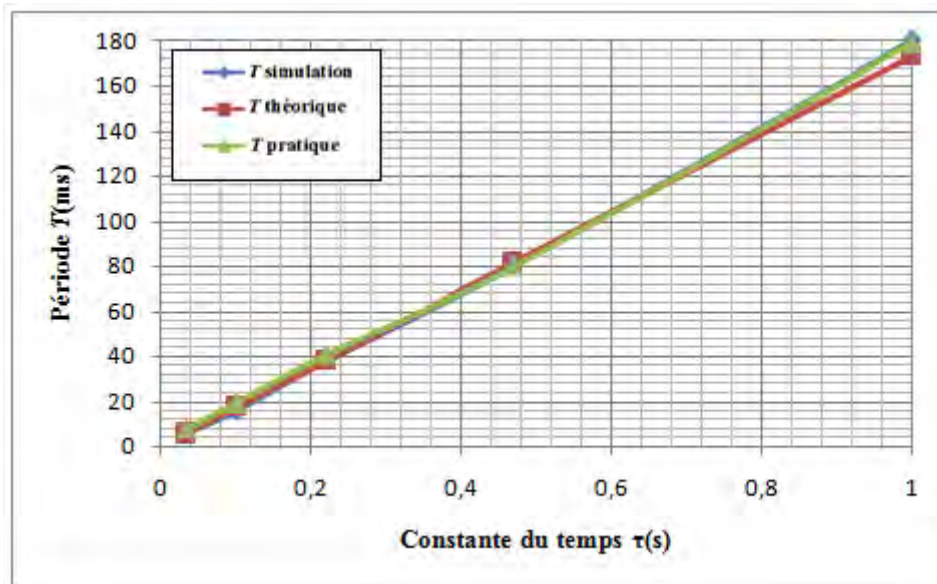


Figure (3-16) : Evolution de la période  $T$  en fonction de  $\tau$ .

### Commentaire

D'après la Figure (3-16), la relation entre la période  $T$  et la constante du temps  $\tau$  est linéaire, on observe la concordance entre les résultats théoriques et expérimentaux.

#### c- Etude de la tension de sortie ( $U_m$ ) en fonction de la consigne $f_0$

Dans cette série d'expériences, on cherche à déterminer la relation expérimentale entre la tension de sortie  $U_m$  et la consigne  $f_0$  tout en maintenant la valeur de la charge fixe. Cette charge est choisie de type purement résistif. La Figure (3-17) montre en traits (en couleur bleu) la relation obtenue théoriquement qui relie  $U_m$  à  $f_0$ .

On constate qu'il s'agit d'une relation linéaire mais qui s'écarte de la linéarité dès que  $h$  devient comparable à  $E - f_0$ . Les résultats expérimentaux obtenus sont superposés sur le graphe de la Figure (3-17). On constate que l'on a une correspondance telle que prévue par la théorie (voir expression (3-12)).

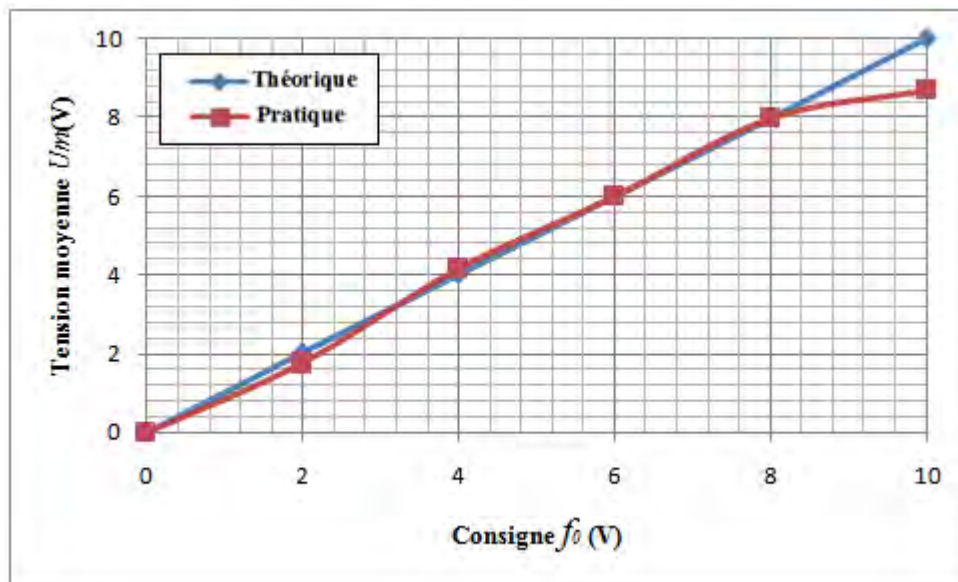


Figure (3-17) : Tension moyenne  $U_m$  en fonction de la consigne  $f_0$ .

### 3.2.2 Système du 2<sup>ème</sup> Ordre

Soit :  $E = 12\text{ V}$  ,  $h = 0.52\text{ V}$  ,  $\tau = 0.1\text{ s}$  .

#### 3.2.2.1 Durées des impulsions $T_1$ , $T_2$ et $T$ en fonction de $f_0$

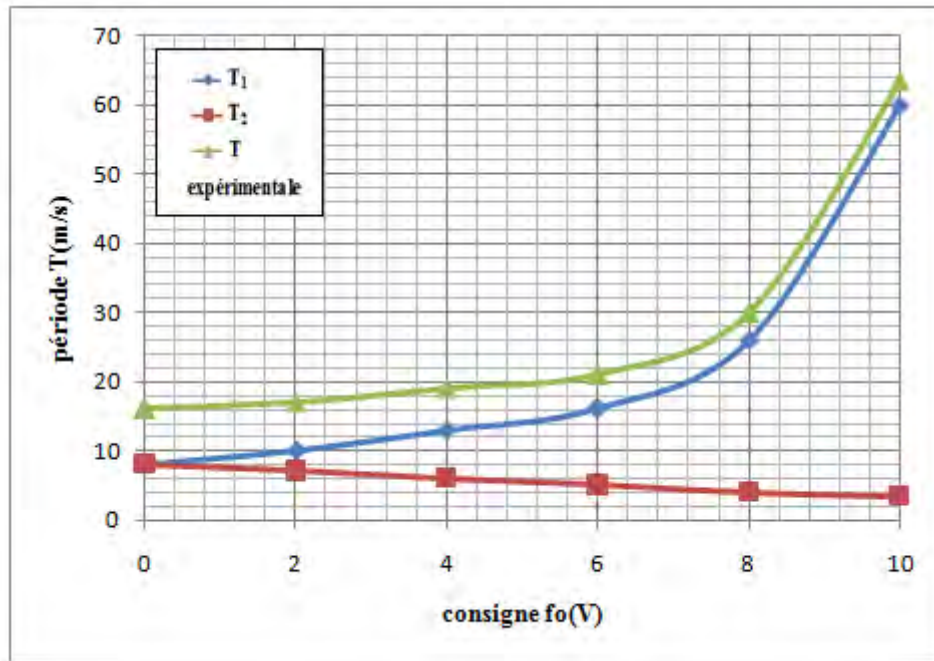
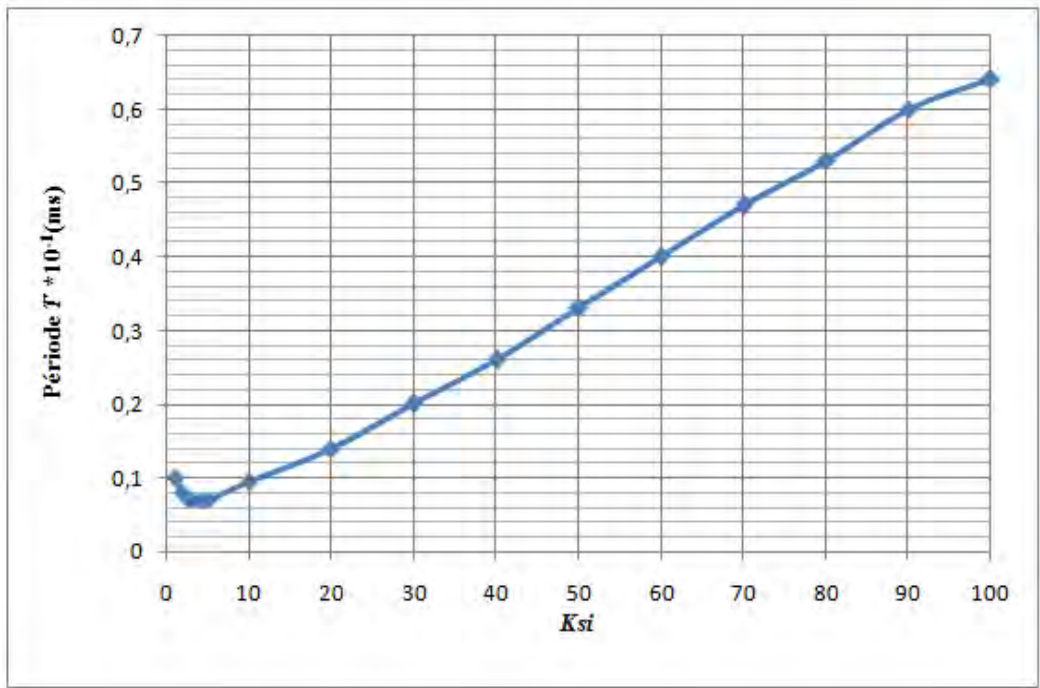


Figure (3-18) : Durées des impulsions en fonction de  $f_0$ .

On remarque que l'évolution des durées d'impulsions en fonction de la consigne  $f_0$  dans le système du 2<sup>ème</sup> ordre ne se change pas Figure (3-18).

### 3.2.2.2 La Variation de $T$ par rapport à $\xi$ avec les autres paramètres constants

La variation des durées d'impulsion ( $T$ ) par rapport à  $\xi$  ont été obtenues par la simulation et les résultats sont présentés sur la Figure (3-19).



**Figure (3-19) :** La variation de  $T$  en fonction de  $\xi$ .

Cette courbe nous montre que la variation de  $T$  et  $\xi$  est linéairement croissante jusqu'à une certaine valeur de  $\xi$  où l'on ne peut pas suivre le signal du système.

Nous remarquons une valeur minimale de  $T$  ( $T = 10 \mu s$ ) qui correspond à  $\xi$  l'approche unité. Pour  $\xi < 1$  que le système devient inexplicable. Cette relation est la base pour le dimensionnement et l'optimisation du hacheur PWM considéré.



## Conclusion

Nous venons de présenter une étude fine d'un asservissement par +/- à rétroaction via un filtre de premier et deuxième ordre. Le système étudié est capable de générer une modulation de largeur d'impulsions (PWM) de durée et de rapport cyclique variables.

Deux versions de rétroaction ont été étudiées :

- Un retour via un filtre du premier ordre pour la régulation de la tension pour une charge d'utilisation fixe.
- Un retour via un filtre du deuxième ordre pour la régulation de la tension pour une charge d'utilisation variable.

Pour les deux versions, l'étude théorique a permis de relier analytiquement les durées d'impulsions à la grandeur de commande  $f_0$  ainsi qu'aux différents paramètres intervenant dans la réalisation du système asservi  $(h, E, \tau, \xi, \omega_n)$ . Elle a également permis de déterminer la tension moyenne asservie  $Um$  en fonction de  $f_0$ . Ces relations résultant de l'étude théorique ont permis à leur tour de dimensionner un hacheur destiné à une alimentation photovoltaïque. On notera aussi que ce système correspond au cas de la commande en temps optimal telle que développée par L. Pontriaguine.

Cette étude fut suivie par la simulation et la réalisation expérimentale d'un hacheur PWM. Les expériences menées avec ce dispositif ont permis de valider les résultats théoriques et de montrer les limites des hypothèses admises pour notre modèle. D'autres perspectives sont potentiellement disponibles telles que la possibilité de régulation en tenant compte des variations de la charge et la possibilité d'utiliser ce système en tant qu'onduleur.

## **Chapitre 4**

# **Les Systèmes Hybrides et la Répartition Optimale de Différentes Ressources D'Énergies Renouvelables**

## Chapitre 4

### Les Systèmes Hybrides et la Répartition Optimale de Différentes Ressources D'Énergies Renouvelables

#### Sommaire

---

##### Introduction

- 1 Un système hybride expérimental
  - 1.1 Schéma d'un système hybride général
  - 1.2 Système hybride proposé
- 2 L'estimation des ressources énergétiques
  - 2.1 Estimation de l'énergie photovoltaïque annuelle
  - 2.2 Estimation de l'énergie éolienne annuelle
  - 2.3 Estimation de l'énergie thermique annuelle
  - 2.4 Estimation de l'énergie biogaz annuelle (production de biogaz)
- 3 Couplage et intégration des systèmes énergétiques
  - 3.1 La puissance totale
  - 3.2 La puissance électrique totale
- 4 Le modèle mathématique hybride proposé
- 5 L'optimisation
  - 5.1 Définition d'une programmation linéaire (PL)
  - 5.2 Les conditions de formulation d'un PL
  - 5.3 Les étapes de formulation d'un PL
  - 5.4 Formes et bases réalisables de PL
    - 5.4.1 Formulation et expression générale d'un PL
    - 5.4.2 Forme canonique
    - 5.4.3 Forme standardisée d'un PL
  - 5.5 Les méthodes de résolution des programmes linéaires (PL)
    - 5.5.1 Méthodes de programmation linéaire dans le cas de variables continues
      - 5.5.1.1 La méthode du simplexe
      - 5.5.1.2 Automatisation de la procédure du simplexe
      - 5.5.1.3 Cas de dégénérescence
    - 5.5.2 La programmation linéaire (PL) avec contraintes d'égalité
    - 5.5.3 Cas de programmation linéaire (PL) en nombres entiers

##### Conclusion

---

## Chapitre 4

# Les Systèmes Hybrides et la Répartition Optimale de Différentes Ressources D'Énergies Renouvelables

### Introduction

Les systèmes hybrides d'énergies renouvelables sont basés sur l'intégration et la combinaison des différentes sources d'énergies renouvelables. Lorsqu'ils sont intégrés, ces derniers permettent de surmonter les limitations inhérentes à l'utilisation d'une seule ressource énergétique. La technique hybride appliquée aux énergies renouvelables permet de réduire les moyens de stockage à cause de la complémentarité des différentes ressources. Ils constituent ainsi une bonne solution pour l'installation de systèmes autonomes et présentent l'avantage de réduire les moyens de stockage et de respecter l'environnement. Ceci conduit à une réduction du coût du kWh.

Dans ce chapitre, Nous allons présenter le principe d'hybridation d'un système d'énergies renouvelables. Nous l'appliquerons aux systèmes que nous avons développés et expérimentés au sein de notre laboratoire. Nous étudierons à cet effet l'évaluation énergétique de chaque source énergétique renouvelable : photovoltaïque, éolienne, photo-thermique et biomasse. Ce travail vise à déterminer la meilleure combinaison de ces ressources pour satisfaire une demande énergétique pour une région spécifique. Le problème peut se ramener à un problème de répartition optimale de ressources limitées avec une demande à satisfaire en tenant compte des contraintes sur l'énergie et sur les surfaces déployées.

La formulation de ce problème se ramène à un problème de programmation linéaire PL. Pour cela, nous avons adoptée la méthode de programmation linéaire PL du simplexe pour la résolution de ce problème. Enfin, nous présenterons les méthodes de résolution des PL dans le cas continu et discret.

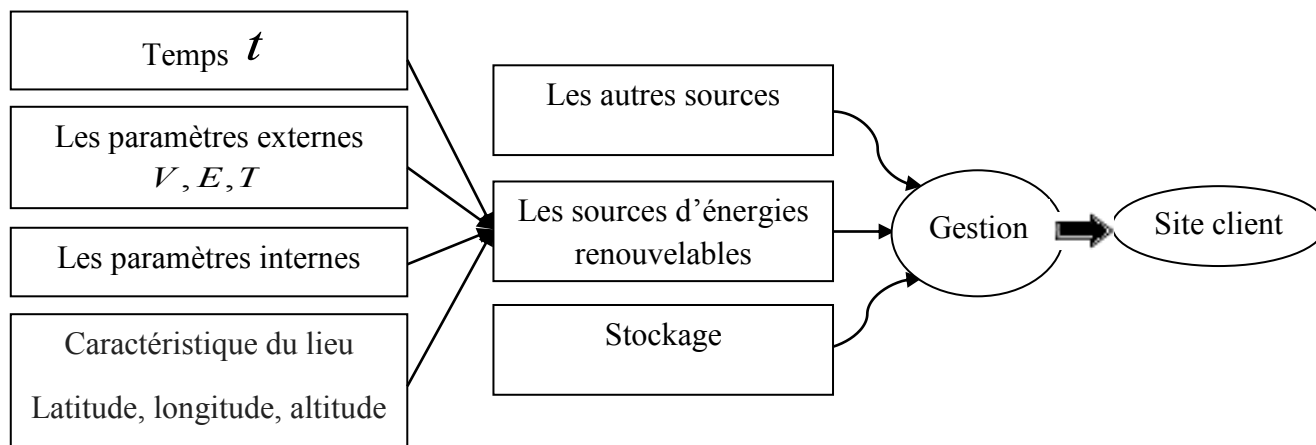
## 1 Un système hybride expérimental

Ces dernières années, de nombreuses études et applications ont été conduites concernant l'énergie hybride en vue d'optimiser l'intégration et la répartition des ressources disponibles en vue de satisfaire la demande exigée par la consommation.

Les systèmes d'énergies renouvelables considérés dans notre recherche sont de très faible puissance et concernent l'énergie solaire photovoltaïque; photo-thermique, éolienne et l'énergie produite par la biomasse.

### 1.1 Schéma d'un système hybride général

La conception de système hybride générale peut être schématisée conformément à la Figure (4-1). Il existe plusieurs types de systèmes hybrides.



**Figure (4-1):** Schéma pour la conception de système hybride général.

Où

Les paramètres externes : \*la vitesse du vent  $V$

\* l'éclairement  $E$

\* La température  $T$

Les paramètres internes : les caractéristiques de chaque source.

Les autres sources : comme les énergies fossiles et l'énergie nucléaire.

Stockage : le stockage d'énergie permet de lisser les pointes et les creux de production d'énergie renouvelable (des batteries de stockage comme réserve).

Gestion : Le système de gestion permet d'adapter l'énergie disponible pour satisfaire la demande.

Site client : Bénéficiaires de l'énergie

## 1.2 Système hybride proposé

Le but de cette étude est de combiner de façon économique des énergies renouvelables pour satisfaire la demande énergétique d'une localité donnée (maison, ferme, agglomération,..) Figure (4-2-a).

La Figure (4-2-b) montre un prototype de maison qui utilise l'énergie hybride : éolienne, solaire, et biomasse. Les sources d'énergies apparaissant en images sur la Figure (4-2-b) sont des systèmes d'énergies renouvelables expérimentaux de très faible puissance qui ont été développés au niveau de notre laboratoire. -L'image (a) montre un panneau solaire du système photovoltaïque, l'image (b) présente un système photo-thermique avec concentrateur et poursuite du soleil, L'image (c) montre une éolienne de faible puissance, l'image (d) montre un bioréacteur expérimental pour la production du méthane à partir des eaux usées et des déchets biologiques.

Le système de gestion permet d'adapter l'énergie disponible pour satisfaire la demande. Comme les énergies renouvelables considérées sont fluctuantes, il est d'usage de rajouter des batteries de stockage comme réserve. L'exemple de la Figure (4-2-b) correspond à une situation où le choix du système énergétique est déjà donné, le problème consiste à gérer ces ressources afin de satisfaire la demande.

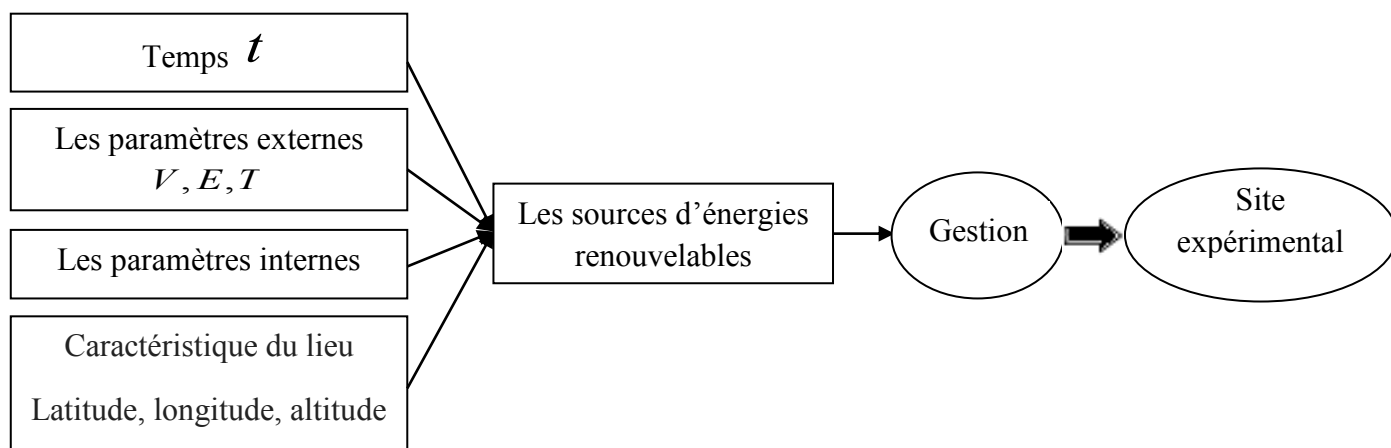


Figure (4-2-a): Schéma pour la conception de système hybride proposé.

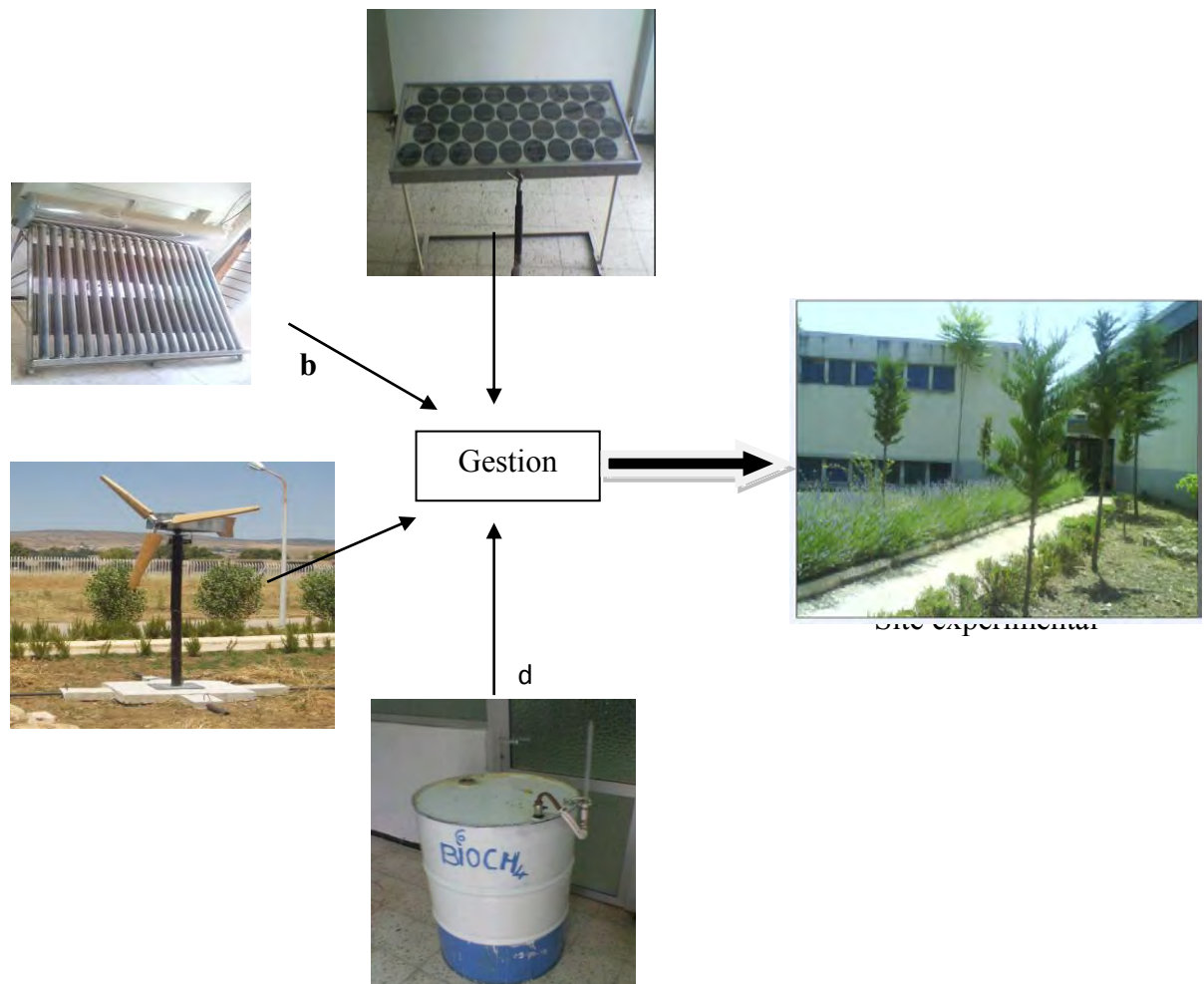


Figure (4-2-b): Système hybride expérimental

## 2 L'estimation des ressources énergétiques

Nous allons présenter l'estimation des énergies produites à chaque énergie renouvelable en fonction des paramètres internes et des paramètres externes.

### 2.1 Estimation de l'énergie photovoltaïque annuelle

L'énergie produite par un panneau photovoltaïque sur une période de temps donnée dépend de nombreux facteurs, mais principalement de la surface du panneau, sa puissance de crête, l'éclairement incident sur son emplacement et de la saison, l'heure de la journée, les conditions météorologiques, l'ombrage, etc. L'énergie  $E_{ph}$  produite par un panneau photovoltaïque sur une période de temps peut être estimée par l'expression suivante [114]:

$$E_{ph} = P_r \cdot F_0 \cdot \left( \frac{G_{eff}}{G_0} \right) \cdot P_c \quad (4-1)$$

$P_r$  : Le taux de rendement (valeur moyenne 0.72 ou 0,75) avec 0,75 pour une orientation optimale du panneau.

$F_0$  : Le facteur qui tient compte des pertes.

$G_{eff}$  : L'irradiance incidente efficace annuelle.

$G_0$  : L'éclairement dans des conditions standard ( $1000 W / m^2$ ).

$P_c$  : La puissance nominale dans des conditions standard telle que fournie par le fabricant.

Nous pouvons estimer la puissance annuelle produite par un panneau photovoltaïque selon (4-1), mais nous pouvons aussi utiliser une règle empirique, dans une zone ensoleillée comme notre site, en considérant que un watt de puissance de crête produit une énergie annuelle d'environ  $2 kWh$ .

Les modules PV qui sont disponibles dans notre laboratoire sont composées de cellules de silicium monocristallin et ont une puissance de crête  $P_c = 33 W$  de sorte qu'un panneau photovoltaïque unique (une unité) produit environ:  $66 kWh / an$ . La surface d'un panneau étant de  $0,42 m^2$

## 2.2 Estimation de l'énergie éolienne annuelle

Afin estimer la puissance générée par une éolienne, nous avons utilisé l'expression suivante [115]: donnée par (1-1).

$$P_{Turbine} = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 V^3 \quad (1-1)$$



Dans l'emplacement où les mesures ont été obtenues, la valeur moyenne de la vitesse du vent sur 25 ans est d'environ 2,5 m/s, ce qui signifie que le site n'est pas très intéressant pour l'exploitation de l'éolienne. Néanmoins, il y a des sites qui sont plus venteux.

Ainsi, si nous considérons notre petite éolienne expérimentale construite dans notre laboratoire avec un diamètre de pale de 2 m et un facteur d'efficacité  $C_p = 20\%$  fonctionnant à une vitesse du vent moyenne de référence de 4 m/s, ensuite élevée seulement à 30 m de hauteur, on obtient une vitesse du vent d'environ 4,67 m/s. Cela donne une puissance estimée de l'ordre de  $P_{\text{Turbine}} = 38 \text{ Watts}$ . Si nous supposons que l'éolienne produit une puissance attendue de 2190 heures par an, alors il serait produit environ 83 kWh/an. La surface balayée par l'éolienne est de 3.14 m<sup>2</sup>.

Toutefois, étant donné que la puissance varie suivant les conditions de l'environnement (rayonnement solaire, la vitesse du vent, température ...), il n'y a pas de moyen d'éviter le stockage de l'énergie ou la production d'énergie pour compenser le manque d'énergie pour certains moments.

### 2.3 Estimation de l'énergie thermique annuelle

La production énergétique instantanée d'un capteur solaire plan peut être définie par l'expression (2-52) [95, 96] :

$$P_{th} = S_{th} \cdot [F_R \cdot \tau \cdot \alpha \cdot G - F_R \cdot U_L \cdot (T_{fe} - T_a)] \quad (2-52)$$

Nous pouvons estimer la puissance annuelle produite par le collecteur thermique à partir de la relation (2-52) et nous pouvons également utiliser une règle empirique dans une zone ensoleillée comme notre site [96]. Dans notre cas; on considère un collecteur avec une surface de l'absorbeur de 2 m<sup>2</sup> qui produit environ 200 watts. On estime le nombre d'heures de soleil par an à 2190; la température du fluide entrant dans le collecteur étant 45°C et la température ambiante de 25°C. Donc l'énergie annuelle transmise à l'eau est d'environ 438 kWh/an.

### 2.4 Estimation de l'énergie biogaz annuelle (production de biogaz)

Pour estimer la puissance générée par un digesteur de méthane, nous considérons un digesteur anaérobie continu complètement mélangé en fonctionnement à l'état stable. Nous utilisons le modèle Chen-Hashimoto qui est donnée dans [89]. L'expression de la production de méthane par rapport aux différents paramètres qui interviennent dans ce modèle peut être écrite comme suit :

$$P_{bio} = [ B . (Mo / TRH) ].V \quad (4-2)$$

$$P_{bio} = Q_m = Bo.[1 - (K/\mu_m - TRH + K - 1) ](Mo/TRH)).V \quad (4-3)$$

Ou

$TRH$  : Temps de rétention hydraulique ( $TRH = V / Q(jour)$ ).

$Mo$  : Matières oxydables ( $g/l$ ).

$V$  : Volume de digesteur ( $m^3$ ).

$B$  : Rendement biologique,  $B = Bo[1 - (K/(Mm - TRH) + K - 1)]$ .

$Q_m$  : Débit volumique ( $m^3 / j$ ).

$Bo$  : Le potentiel de production de méthane ( $m^3 / kg Mo$ )

$K$  : Constante d'inhibition ( $K = 0.6 + 0.021.10^{0.05} . Mo$ ).

$\mu_m$  : Coefficient cinétique ( $\mu_m = 0.013 * T - 0.129$ ).

$T$  : Température de fermentation ( $T = 25^\circ C$ ).

$VVJ$  : Rendement technologique  $VVJ = B . (Mo / TRH)$ .

Cette expression est utilisée pour estimer l'énergie annuelle produite par un réacteur donné dans des conditions données d'exploitation.

D'autre part, on peut utiliser pour la conception d'un réacteur donné, une estimation de l'énergie prévue. A titre d'exemple, prenons un bioréacteur continu de volume  $V = 4 m^3$ , avec un débit volumétrique  $Q = 0.3 m^3 / jour$ , le temps de rétention hydraulique peut être déduit tel que  $TRH = V/Q = 13.33 jours$ .

Dans notre contexte régional, nous utilisons la fraction organique des déchets solides mélangés à de la boue activée en état mésophile, avec la matière oxydable  $MO = 5g/l$ . A une température de  $25^\circ C$ , le coefficient cinétique peut être estimée par  $\mu_m = 0.013 * T - 0.129$  et  $Bo = 0.1 m^3/kg MO$ ; donc l'énergie estimée produite par jour est d'environ  $Q_m = 0.07 m^3$ . Si

nous considérons un fonctionnement du réacteur pendant 335 jours par an, nous pouvons estimer la production annuelle d'énergie sous forme  $E_{bio} = Q_m \cdot 335 = 23.5m^3 / an$ .

Cette production d'énergie peut être convertie en d'autres formes d'énergie comme le chauffage, l'électricité ou les deux,  $1m^3$  d'énergie fournit, lorsqu'elle est convertie en électricité, environ  $10 kWh$ . Si nous convertissons la production annuelle de méthane en électricité, nous pouvons nous attendre à une énergie de l'ordre de  $235 kWh/an$  [88].

### 3 Couplage et intégration des systèmes énergétiques

La multiplicité des combinaisons possibles de couplage entre les moyens de production d'électricité à partir de l'éolien ou du solaire photovoltaïque (ou les autres sources d'énergies), les systèmes d'effacement de la consommation et des moyens de stockage illustre l'importance des enjeux à cerner dans les années à venir.

Le domaine « couplage et intégration des systèmes énergétiques » concerne l'ensemble de ces combinaisons et les interactions associées. On peut dégager trois axes :

- la combinaison de différentes sources d'énergies renouvelables sur un système énergétique d'un site donné,
- l'insertion et le management de capacités de stockage sur les réseaux ou sur des sites industriels,
- la combinaison de la maîtrise de la demande d'énergie et des sources de production d'énergie [116].

Dans cette étude on considère le première axe.

#### 3.1 La puissance totale

La puissance totale = La puissance électrique + La puissance thermique

$$P_{tot} = P_{électrique} + P_{thermique}$$

$$P_{électrique} = P_{tot1} = P_{ph} + P_{eo}$$

$$P_{thermique} = P_{tot2} = P_{th} + P_{bio}$$

$$P_{tot} = P_{ph} + P_{eo} + P_{th} + P_{bio}$$

$$P_{tot} = k_1 \cdot \eta \cdot G \cdot S_{ph} + k_2 \cdot \frac{16}{27} V^3 \cdot S_{éo} + k_3 [A \cdot G - B \cdot (T_{fe} - T_a)] \cdot S_{th} + k_4 [B \cdot (M0 / TRH)] \cdot V_{bio}$$

$$P_{tot}(t) = k_1 \cdot \eta \cdot G(t) \cdot S_{ph} + k_2 \cdot \frac{16}{27} V(t)^3 \cdot S_{éo} + k_3 [A \cdot G(t) - B \cdot (T_{fe} - T_a)(t)] \cdot S_{th} + k_4 [B(t) \cdot (M0 / TRH(t))] \cdot V_{bio}$$

### 3.2 La puissance électrique totale

La puissance électrique totale ou bien globale est la somme de la puissance photovoltaïque et la puissance éolienne

$$P_{totl} = P_{ph} + P_{eo} = k_1 \cdot \eta \cdot G \cdot S_{ph} + k_2 \cdot \frac{16}{27} V^3 \cdot S_{éo} \tag{4-4}$$

$$P_{totl}(t) = P_{ph}(t) + P_{eo}(t) = k_1 \cdot \eta \cdot S_{ph} \cdot G(t) + k_2 \cdot \frac{16}{27} \cdot S_{éo} \cdot V(t)^3 \tag{4-5}$$

Pour :  $k_1 = 1$  et  $k_2 = 1$

$$P_{totl}(t) = P_{ph}(t) + P_{eo}(t) = \eta \cdot S_{ph} \cdot G(t) + \frac{16}{27} \cdot S_{éo} \cdot V(t)^3 \tag{4-6}$$

On suppose que la surface éolienne et la surface photovoltaïque constante comme suit :

$$S_{ph} = 0.44 \text{ m}^2, \quad S_{éo} = 1.77 \text{ m}^2$$

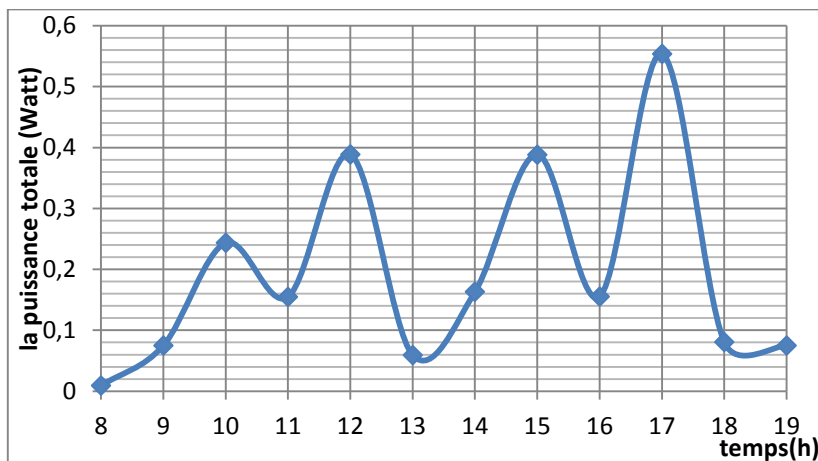
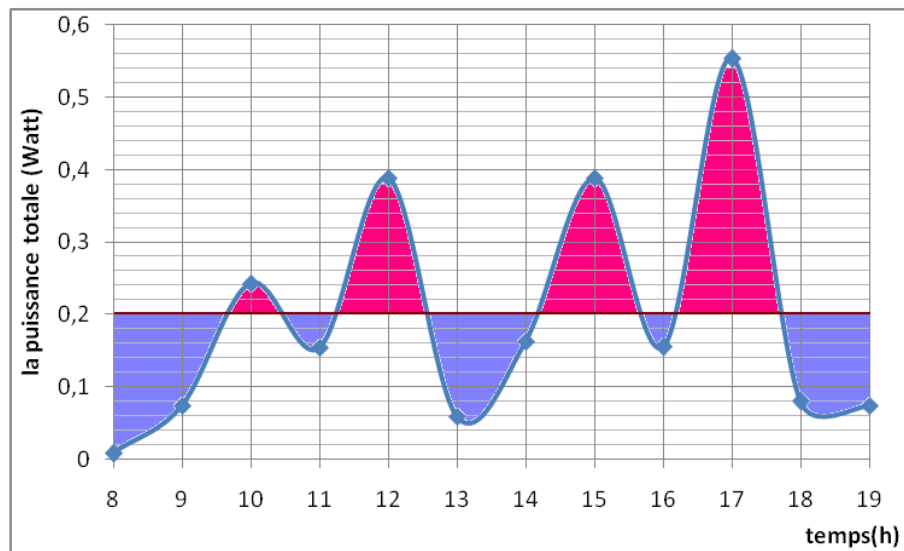


Figure (4-3): Le profil de la puissance totale journalière.

Si on pose que la demande est fixe ( $D = 0.2 \text{ Watt}$ ), on obtient la Figure (4-4):



**Figure (4-4):** La séparation entre les besoins et la puissance stockée en une journée.

### Commentaires

La demande énergétique pour cette région change avec le temps, on obtient trois cas :

- Si la  $P < D$
- Si la  $P = D$
- Si la  $P > D$

Pour le cas où la  $P < D$ , on utilise le stockage. On peut utiliser aussi l'augmentation de la puissance dans le cas  $P > D$  pour compenser le manque dans les cas où la  $P < D$ .

### Remarque

La même chose pour le couplage de la puissance thermique totale (photothermique et la biomasse) et le couplage de la puissance électrique et thermique (photovoltaïque, éolienne, photothermique et la biomasse).

#### 4 Le modèle mathématique hybride proposé

Dans ce modèle ; on cherche à déterminer la combinaison optimale des différentes sources renouvelables à installer. Pour cela, on considère les sources d'énergies renouvelables  $E_i$  avec la limite disponible  $L_i$ , les coûts unitaires de chaque ressource énergétique  $C_i$  et la demande  $D$ . La forme générale peut être celle d'un problème de Programmation Linéaire qui consiste à minimiser une fonction de coût  $Z_T$  sous des contraintes données [117, 118]. Le problème peut s'exprimer comme suit :

$$\left. \begin{array}{l} \min Z_T = \sum C_i \cdot E_i \\ \sum E_i = D \\ E_i \leq L_i \\ E_i \geq 0 \end{array} \right\} \quad (i = \text{ph, th, éo, bi}) \quad (4-7)$$

A cet effet, plusieurs méthodes ont été utilisées, comme la Programmation Linéaire, la Programmation Dynamique, les Algorithmes génétiques, etc. [118-121]. Des programmes de simulation et d'optimisation des systèmes hybrides ont été également développés, on citera en particulier HOMER, SOMES, RAPSIM, SOSIM, [42-44, 59].

Cependant, La résolution de ce type de problèmes peut s'effectuer par des techniques dérivées de la méthode du simplexe ou la méthode du point intérieur. De nombreux programmes informatiques sont disponibles comme (LINDO [117], Linsolve [122], Z-PL [123],...) et permettent de déterminer les quantités à utiliser pour chaque source d'énergie qui minimisent la fonction objective en respectant toutes les contraintes.

Dans notre cas, nous avons adopté la méthode de PL du simplexe et nous avons utilisé le programme Linsolve pour déterminer la répartition optimale de nos ressources.

On présentera la méthode de résolution des PL dans le cas continu et discret.

## 5 L'optimisation

Au lendemain, donc, de cette 2<sup>ème</sup> guerre mondiale, la Recherche Opérationnelle (RO) a émergé en tant que discipline scientifique se développant comme outil d'aide à la résolution des problèmes de décisions. Et, compte-tenu du succès fulgurant remporté par l'application de ses techniques à des problèmes réels tout aussi bien complexes que variés, la RO a depuis lors conquis de très nombreux domaines d'application, industriels et organisationnels. Aujourd'hui, la RO est devenu un domaine scientifique passionnant qui regroupe l'ensemble des techniques de résolution des problèmes de décision. Elle intervient dans de nombreux aspects de l'activité humaine: économie, gestion, sciences, technologie,...etc. Les plus grandes entreprises, les armées et les gouvernements des pays modernes utilisent extensivement les techniques de la RO.

L'importance de l'optimisation et la nécessité d'un outil simple pour modéliser des problèmes de décision que soit économique, militaire ou autres on fait de la programmation linéaire un des champs de recherche les plus actifs au milieu du siècle précédent. Les premiers travaux (1947) sont celle de George B. Dantzig et ses associés du département des forces de l'air des Etats Unis d'Amérique.

Comment, en effet, exploiter les ressources disponibles mais nécessairement limitées (temps, espace, énergie, moyens financiers, etc.) en vue d'atteindre des objectifs assignés, de la manière qui soit la plus avantageuse. Et du fait que le problème considéré peut, en général admettre plusieurs solutions, il faut en déterminer la meilleure. Cette optimalité étant, bien entendu, perçue au vu des critères bien définis tels que: minimiser les pertes et augmenter les profits.

Les problèmes de programmations linéaires sont généralement liés à des problèmes d'allocations de ressources limitées, de la meilleure façon possible, afin de maximiser un profit ou de minimiser un coût. Le terme meilleur fait référence à la possibilité d'avoir un ensemble de décisions possibles qui réalisent la même satisfaction ou le même profit. Ces décisions sont en général le résultat d'un problème mathématique.

Dans ce contexte, une certaine classe de problèmes a pu trouver une formulation mathématique adéquate désignée sous la dénomination de Programmation Mathématique. Cette classe de problèmes est caractérisée par le fait qu'il s'agit de rechercher l'optimum (minimum ou maximum) d'une fonction  $f(X_1, X_2, \dots, X_n)$  soumise à certaines contraintes  $g(X_1, X_2, \dots, X_n)$  où  $X_1, X_2, \dots, X_n$  sont les variables du problème dont la détermination, lorsqu'elle est possible et lorsqu'elle a un sens, fournit la solution du problème donné. Faisant partie de la programmation mathématique, la Programmation Linéaire (PL), sujet de ce travail, recouvre une classe bien particulière de problème d'optimisation. Ceux qui se distinguent par le fait que la fonction à optimiser  $f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ , ainsi que les contraintes  $g(X_1, X_2, \dots, X_n)$ , s'expriment mathématiquement sous une forme linéaire par rapport aux variables [123, 124].

### 5.1 Définition d'une programmation linéaire (PL)

En mathématiques, les problèmes de Programmation Linéaire (PL) sont des problèmes d'optimisation où la fonction objective et les contraintes sont toutes linéaires. Néanmoins, la plupart des résultats présentés ici sont également vrais si l'objectif est une fonction monotone croissante de chaque variable considérée.

Le terme programmation linéaire suppose que les solutions à trouver doivent être représentées en variables réelles. S'il est nécessaire d'utiliser des variables discrètes dans la modélisation du problème, on parle alors de programmation linéaire en nombres entiers (PLNE). Il est important de savoir que ces derniers sont nettement plus difficiles à résoudre que les PL à variables continues [125].

### 5.2 Les conditions de formulation d'un PL

La programmation linéaire comme étant un modèle admet des hypothèses (des conditions) que le décideur doit valider avant de pouvoir les utiliser pour modéliser son problème. Ces hypothèses sont :

1. Les variables de décision du problème sont positives
2. Le critère de sélection de la meilleure décision est décrit par une fonction linéaire de ces variables, c'est à dire, que la fonction ne peut pas contenir par exemple un produit croisé de deux de ces variables. La fonction qui représente le critère de sélection est dite fonction objectif (ou fonction économique).
3. Les restrictions relatives aux variables de décision (exemple: limitations des ressources) peuvent être exprimées par un ensemble d'équations linéaires. Ces équations forment l'ensemble des contraintes.
4. Les paramètres du problème en dehors des variables de décisions ont une valeur connue avec certitude [124].

### 5.3 Les étapes de formulation d'un PL

Généralement il y a trois étapes à suivre pour pouvoir construire le modèle d'un programme linéaire :

1. Identifier les variables du problème à valeur non connues (variable de décision) et les représenter sous forme symbolique (exp.  $x_i, y_i$ ).
2. Identifier les restrictions (les contraintes) du problème et les exprimer par un système d'équations linéaires.
3. Identifier l'objectif ou le critère de sélection et le représenter sous une forme linéaire en fonction des variables de décision. Spécifier si le critère de sélection est à maximiser ou à minimiser [124].



#### 5.4 Formes et bases réalisables de PL

La méthode de résolution graphique des PL a permis de mettre en évidence les caractéristiques principales liées à ces problèmes.

Rappelons ces caractéristiques :

- 1- L'ensemble des solutions réalisables est un polyèdre convexe dont les sommets (points externes) correspondent aux intersections des droites délimitant les contraintes.
- 2- La solution optimale, lorsqu'elle existe, se situe nécessairement sur un des sommets du polyèdre convexe.

Ces résultats suggèrent une première approche algébrique qui consiste :

- A énumérer tous les sommets du polyèdre convexe,
- à évaluer la fonction objective en chacun de ses sommets ;
- et enfin à déterminer par comparaison la solution optimale.

Néanmoins, une telle approche, bien qu'intéressante sur le plan théorique, ne pourrait être envisagée sur le plan pratique car elle ne fonctionnerait effectivement que pour des PL de petites dimensions. Déjà, pour des PL de taille moyenne, l'ensemble des points extrêmes, quoique fini, peut devenir extrêmement grand. Par exemple, un PL composé de 10 variables et 3 contraintes; considéré comme petit, compte 120 points extrêmes. L'augmentation du nombre de point extrême en fonction de l'augmentation du nombre de variables et contraintes est quasi-exponentielle. Ce fait rend impraticable cette approche, en particulier pour des PL de grandes dimensions car le temps de calcul devient prohibitif.

Compte tenu de cet inconvénient majeur, l'algorithme du simplexe se présente dès lors comme une alternative intéressante. Son avantage provient du fait qu'il recherche la solution optimale sans passer en revue tous les points extrêmes. De fait, il apporte, donc, un gain de temps très appréciable dans la résolution des PL de moyennes et de grandes dimensions.

L'algorithme du simplexe recherche la solution optimale en passant d'un point extrême vers un autre qui améliore la valeur de la fonction objective.

L'analyse théorique des PL montre que les points extrêmes du polyèdre convexe correspondent à ce que l'on appellera les bases réalisables. Ces dernières sont mises en évidence dans une représentation algébrique particulière du PL, dénommée forme standardisée.

La forme standardisée est une opération qui transforme le système d'inégalités représentant les contraintes du PL en un système d'égalités. Elle sert d'étape préparatoire pour l'application de la méthode du simplexe où la solution optimale est essentiellement obtenue par une série de changement de base (passage d'un point extrême à un autre) [123].

### 5.4.1 Formulation et expression générale d'un PL

Partant de la définition précédente, l'expression mathématique d'un problème de PL consiste à chercher la valeur optimale (maximale ou minimale) d'une expression appelée fonction objective ou fonction économique :

$$F = C_1 X_1 + C_2 X_2 + C_3 X_3 + \dots + C_N X_N \quad (4-8)$$

$$\text{Maximiser } F = C_1 X_1 + C_2 X_2 + \dots + C_N X_N$$

Ou  $\text{Minimiser } F = C_1 X_1 + C_2 X_2 + \dots + C_N X_N$

Cette fonction est, en général, soumise à un certain nombre de contraintes qui s'expriment sous la forme d'équation et d'inéquations linéaires. Ces contraintes peuvent se décomposer sous la forme d'égalités et d'inégalités regroupées en tenant compte de leur sens comme suit :

$$\begin{cases} a_{i1} X_1 + a_{i2} X_2 + \dots + a_{iN} X_N \leq b_i & i = 1, 2, \dots, k \\ a_{i1} X_1 + a_{i2} X_2 + \dots + a_{iN} X_N = b_i & i = k + 1, k + 2, \dots, r \\ a_{i1} X_1 + a_{i2} X_2 + \dots + a_{iN} X_N \geq b_i & i = r + 1, r + 2, \dots, m \end{cases}$$

Ces contraintes sont appelées contraintes technologiques ou contraintes principales.

Dans les expressions de la fonction objective F et des contraintes, les variables  $X_1, X_2, \dots, X_n$  supposées continues, sont appelées les variables de décision ou les variables d'activité.

Comme on s'intéressera uniquement à des problèmes qui ont une signification pratique, cela astreindra les variables de décision à être non négatives, d'où les conditions supplémentaires

$$X_1 \geq 0, X_2 \geq 0, \dots, X_n \geq 0.$$

Ces conditions sont appelées les contraintes de non-négativité des variables de décision.

Les coefficients  $C_1, C_2, \dots, C_N$  sont appelées les coefficients de la fonction objective. Les coefficients  $a_{ij}$  sont appelées les coefficients des contraintes. Les constantes  $b_j$  qui sont les membres à droite du signe d'égalité ou d'inégalité sont désignées en anglais par le terme « Right Hand Side ou RHS en abrégé (la partie droite d'une équation ou d'une inéquation) ». Pour un problème de PL donné, les coefficients  $a_{ij}, b_j, C_i$  constituent les

données du problème. La solution du problème de PL consiste à déterminer les valeurs des  $X_i$  qui optimisent la fonction objective [123]

**La formulation mathématique générale d'un PL se résume en ce qui suit :**

a)- tout problème linéaire est un problème d'optimisation (maximisation ou minimisation) dont la fonction objective est linéaire et s'exprime à l'aide de l'expression générale suivante sous forme condensée.

$$\left\{ \begin{array}{l} * \text{Max } F = \sum_{j=1}^n C_j X_j \\ \text{ou} \\ * \text{Min } F = \sum_{j=1}^n C_j X_j \end{array} \right.$$

b)- tout problème linéaire est sujet à des contraintes qui s'expriment mathématiquement, et dans le cadre le plus général, par un système d'équations et d'inéquations linéaires.

En décomposant les contraintes de façon à regrouper les équations d'une part et les inéquations d'autre part, en tenant compte de leur sens, on peut les mettre sous les formes condensées suivantes:

Il y a r contraintes de type ( $\leq$ )

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} X_j \leq b_i \quad i = 1, 2, \dots, r$$

Il ya (s-r) contraintes de type ( $\geq$ )

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} X_j \geq b_i \quad i = r + 1, 2, \dots, s$$

Il ya (m-s) contraintes de type (=)

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} X_j = b_i \quad i = s + 1, s + 2, \dots, m$$

c)- pour les problèmes qui nous intéressent ici, toutes les variables sont non négatives.

### 5.4.2 Forme canonique

La forme canonique est une transformation qui permet d'harmoniser l'écriture d'un PL. elle peut prendre deux formes distinctes: recherche d'un maximum ou recherche d'un minimum.

#### Problème de maximum

Dans le cas où le problème est un problème de maximum, la forme canonique impose, et ceci par convention, de le poser comme suit :

1)- la fonction objective est à maximiser

$$\text{Max } F = \sum_{j=1}^n C_j X_j$$

2)- toutes les contraintes sont du type inférieur ou légal ( $\leq$ )

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} X_j \leq b_i \quad i = 1, 2, \dots, m$$

3)- toutes les variables de décision doivent être non négatives.

$$X_j \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n$$

#### Problème de minimisation

Dans le cas de problèmes de PL où il est question de minimiser la fonction objective, les caractéristiques de la forme canonique se rédigent comme suit :

1)-la fonction objective est à minimiser

$$\text{Min } F = \sum_{j=1}^n C_j X_j$$

2)- toutes les contraintes sont du type supérieur ou égal ( $\geq$ )

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} X_j \geq b_i \quad i = 1, 2, \dots, m$$

3)- toutes les variables de décision doivent être non négatives

$$X_j \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n$$

Dans la mesure où ces deux formulations des problèmes de PL sont liées par une certaine symétrie, nous allons focaliser notre attention d'abord sur la forme du type maximisation [123].

### 5.4.3 Forme standardisée d'un PL

La forme standardisée d'un PL est la dernière étape de préparation du PL avant de procéder à sa résolution à l'aide de l'algorithmique du simplexe.

Cette résolution peut s'effectuer tout aussi bien manuellement qu'automatiquement. C'est parce que le modèle d'un PL contient un système d'inéquations linéaires qui n'est pas facile à résoudre, qu'il est fait appel à la forme standardisée. Cette dernière transforme le système d'inéquation en un système d'équations pour lequel on dispose de méthode de résolution. C'est cette forme standardisée qui permettra de mettre en évidence la correspondance entre les bases réalisables et les sommets du polyèdre convexe de la représentation graphique.

Pour obtenir la forme standardisée d'un PL, il faut compenser toutes les inéquations autres que celle de non-négativité, en rajoutant, dans chaque inéquation, une variable auxiliaire non négative.

Si le sens de l'inéquation est de type ( $\leq$ ), c'est -à-dire :

$$a_{i1}X_1 + a_{i2}X_2 + \dots + a_{in}X_n \leq b_i$$

On rajoute au membre de gauche de l'inéquation une variable non-négative appelée variable d'écart.

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}X_j + s_i = b_i$$

Si le sens de l'inéquation, est du type ( $\geq$ ), c'est-à-dire :

$$a_{i1}X_1 + a_{i2}X_2 + \dots + a_{in}X_n \geq b_i$$

On retranche au membre de droite de l'inéquation une variable non-négative appelée variable de surplus.

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}X_j - s_i = b_i$$

Si une contrainte s'exprime par une égalité, c'est-à-dire :

$$a_{i1}X_1 + a_{i2}X_2 + \dots + a_{in}X_n = b_i$$

Alors elle ne nécessite pas de changement.

Dans l'un ou l'autre cas, la variable d'écart ou de surplus doit être non négative, c'est-à-dire :

$$s_i \geq 0$$

**La formulation générale de la forme standard s'écrit :**

$$\text{Max } F = \sum_{j=1}^n C_j X_j$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} X_j = b_i \quad \text{pour } i = 1, 2, \dots, m$$

$$X_j \geq 0$$

### Caractéristique de la forme standard

L'élaboration de la forme standard consiste à effectuer des transformations sur le PL donné jusqu'à obtenir les caractéristiques suivantes :

- 1- toutes les inéquations relatives aux contraintes, à l'exception de celles de non-négativité, doivent être remplacées par des égalités.
- 2- Tout membre à droite du signe d'égalité doit être non-négatif ( $b_i \geq 0$  quelque soit  $i$ )
- 3- Toutes les variables doivent être non-négatives.
- 4- La fonction objective peut être de type maximum ou minimum.

Cela se résume au fait qu'un problème de PL est écrit sous la forme standard si tous les  $X_i$  et  $b_j$  sont supérieurs ou égaux à zéro et les contraintes exprimées par  $AX = B$  [123].

## 5.5 Les méthodes de résolution des programmes linéaires (PL)

L'objectif de la programmation linéaire (PL) est de trouver la valeur optimale d'une fonction linéaire sous un système d'équations d'inégalités linéaires. La fonction à optimiser est baptisée "fonction économique" (utilisée en économie dans le cadre d'optimisations) et on la résout en utilisant une méthode dite "méthode simplexe".

### 5.5.1 Méthodes de programmation linéaire dans le cas de variables continues

Nous allons présenter des techniques qui permettent de résoudre les programmes linéaires que l'on convient désormais de noter (PL). Diverses méthodes ont été proposées dans la littérature.

Parmi les méthodes que les mathématiciens ont eu à utiliser on peut citer:

- La méthode graphique: l'utilisation de cette méthode est restreinte aux (PL) ayant un nombre de variables au plus égal à 3.
- La méthode d'énumération des sommets: le nombre de sommets étant prohibitif, cette méthode est très coûteuse en temps de calcul.
- La méthode du simplexe : algorithme itératif mis au point par George Dantzig en 1951.
- les méthodes de points intérieurs

#### 5.5.1.1 La méthode du simplexe

L'algorithme du simplexe est un procédé itératif qui permet de résoudre algébriquement les problèmes de PL. il consiste à effectuer une suite de changement de base en partant d'une base initiale réalisable jusqu'à l'obtention de la base optimale, si elle existe. Géométriquement, cela signifie que l'on a d'un sommet du polyèdre convexe, puis on transite d'un sommet vers un sommet adjacent qui améliore la valeur de la fonction objective jusqu'à l'obtention du sommet pour lequel elle atteint sa valeur optimale.

Pratiquement, cela se traduit comme suit :

L'algorithme commence par déterminer une première solution de base réalisable et teste son optimalité. Si cette base est optimale, alors l'algorithme indique cette solution et se termine.

Autrement, l'algorithme identifie une solution de base réalisable adjacente, qui conduit à une nouvelle solution qui est examinée, et le processus entier est répété, jusqu'à l'obtention d'une solution de base réalisable qui soit optimale.

La convergence du processus est garantie par le fait que l'ensemble des bases réalisables est fini, on rappellera, encore une fois, que les bases réalisables correspondent aux sommets du polyèdre convexe dans la représentation géométrique. Il s'ensuit que l'algorithme se terminera nécessairement en un nombre fini d'itérations.

Une caractéristique très importante de l'algorithme du simplexe est donc liée au fait que cet algorithme ne visite pas tous les sommets du polyèdre mais passe d'un sommet à un autre qui améliore la valeur de la fonction objective. Par ce processus, un gain de temps très appréciable peut être obtenu particulièrement lors de la résolution des problèmes de grandes dimensions.

Dans cette section, nous appliquerons l'algorithme du simplexe à la résolution des problèmes de PL qui peuvent s'écrire dans la forme canonique de type maximum ; soit :

$$\text{Max } C^T X$$

$$A.X \leq b$$

$$X \geq 0$$

Et pour lesquelles, une solution de base réalisable peut être mise en évidence directement pour les problèmes de PL pour lesquels on ne peut pas trouver de solution de base réalisable dans la forme standard. Il existe aussi des situations particulières pour lesquelles, l'algorithme peut cycler indéfiniment. De telles situations seront examinées ultérieurement [123].

### 5.5.1.2 Automatisation de la procédure du simplexe

La présentation de la méthode du simplexe appliquée à quelques exemples montre qu'elle se prête bien à l'automatisation des calculs. Ceci est d'autant plus nécessaire que les problèmes de PL peuvent être de grandes dimensions. En effet, depuis l'avènement des micro-ordinateurs, l'utilisation des techniques de la programmation linéaire s'est facilement généralisée. De plus, grâce aux développements des programmes et des interfaces graphiques, les utilisateurs peuvent résoudre des PL sans avoir à en connaître le fond qui constitue le support mathématique, algorithmique et informatique. Ces utilisateurs n'ont pas besoin de comprendre les détails seulement savoir comment préparer les données d'entrée, interpréter les résultats et traiter un certain nombre de problèmes qui peuvent surgir lors de la PL, parmi les problèmes, on peut citer :

- \*le cas de l'inexistence de solution réalisable,
- \*le cas où la solution est non bornée,
- \*le cas où la solution est dégénérée,
- \*le cas où nous avons des solutions optimales multiples.



La plupart de ces programmes proposent également des techniques pour analyser la sensibilité des solutions par rapport aux variations et aux incertitudes qui peuvent affecter les données.

Il existe une grande variété de logiciels dédiés à la résolution des PL. On peut citer, entre autres, CPLEX, LINDO, MINOS qui sont commerciaux et peuvent être employés pour résoudre des problèmes de grandes dimensions. Il existe des logiciels non commerciaux tels que: DQRLESS, LinProg, LIPSOL-beta v.2.1, PCx, sqrlss.

Il ya deux autres logiciels disponibles sur le web : Linsolve et Lp\_solve.

### 5.5.1.3 Cas de dégénérescence

Il existe certaines situations particulières de PL. il ya quatre types de situation.

- 1)- la solution existe et peut être dégénérée
- 2)- la solution existe mais elle n'est pas unique (solutions multiples).
- 3)- la solution peut être arbitrairement grande (solution non bornée).
- 4)- le problème n'a pas de solution.

Parmi ces quatre variantes, celle qui pose de sérieux problèmes lors de la résolution des PL par la méthode du simple est la *dégénérescence*.

#### **\*Les problèmes à solution dégénérée**

Graphiquement, on appelle solution dégénérée le point où au moins trois contraintes concourent. La résolution d'un PL dégénéré ne pose pas de problèmes avec la méthode graphique. Par contre, elle peut poser de sérieux problèmes lorsque la recherche de la solution est menée à l'aide de la méthode du simplexe; car l'algorithme peut cycliser indéfiniment. Ce genre de comportement doit être identifié, de préférence, avant de commencer à résoudre le problème, sinon nous perdrons un temps énorme. Il faut noter cependant que tous les problèmes dégénérés ne conduisent pas nécessairement à cycliser indéfiniment.

Lorsque l'algorithme cycle, il est à noter que la valeur de la fonction objective  $F$  n'augmente pas lors des pivotages successifs.

### 5.5.2 La programmation linéaire (PL) avec contraintes d'égalité

Afin que l'algorithme du simplexe puisse s'exécuter normalement, nous avons déjà indiqué qu'il est nécessaire de l'initialiser à partir d'une solution de base réalisable. Cependant, pour certains problèmes de PL, une solution de Base Réalisable (sbr) ne peut être facilement mise en évidence. Bien sur, on peut aisément obtenir une sbr si dans la formulation canonique de PL toutes les contraintes sont du type ' $\leq$ ' et les coefficients  $b_i$  sont non négatifs. Cette sbr se composera de toutes les variables d'écart qui apparaissent dans la formulation standardisée et qui prennent pour valeurs les coefficients  $b_i$  des lignes correspondantes.

On considère le cas plus général, où la formulation originelle du PL contient également des contraintes représentées par des inégalités de type ' $\geq$ ' ou par des équations de telle sorte qu'une sbr ne peut pas être identifiée facilement. Dans ce cas, on ne peut pas l'exécuter si le problème n'a définitivement pas de solution. Dans de telles circonstances, nous devons essayer de trouver une sbr. Pour ce faire, nous introduirons des variables artificielles.

Une variable artificielle est une variable non négative que l'on rajoute à une contrainte d'un PL qui s'écrit dans la forme standardisée. Elle n'a pas de signification physique et sert artificiellement comme variable de base lorsqu'il est impossible d'en trouver une dans la forme standardisée. En pratique, on rajoute une variable artificielle par équation ou inéquation dès que l'on ne peut pas mettre en évidence une variable de base réalisable dans la forme standardisée pour cette équation ou inéquation. Les variables artificielles aident à générer une sbr mais elles doivent être exclues de la solution finale. Le rôle des variables artificielles se réduit à nous permettre de trouver une sbr ; lorsque l'on ne peut pas exclure les variables artificielles de la base, cela signifie alors tout simplement que le PL donné n'a pas de solution [123].

Les deux techniques qui sont communément utilisées avec les variables artificielles sont [123]:

- \* La méthode des deux phases.
- \* Méthode du big-M.

### 5.5.3 Cas de programmation linéaire (PL) en nombres entiers

Nous présentons dans ce paragraphe les idées qui fondent les principales méthodes connues de résolution des programmes linéaires en nombres entiers. L'ordre de notre présentation suit pratiquement la chronologie selon laquelle ont été successivement développées les différentes méthodes. R. Gomory a été, dès la fin des années 1950, le pionnier du premier courant de recherche consistant à généraliser l'algorithme du simplexe pour prendre en compte les conditions d'intégrité sur les variables. La deuxième approche, qui suit historiquement de peu la première, est connue sous le nom de « recherche arborescente par séparation et évaluation » (*Branch & Bound*). La troisième approche, connue depuis le début des années 1980 sous le nom de « combinatoire polyédrique » peut être considérée comme une combinaison des deux précédentes [126].

- \* Méthode des « coupes de Gomory ».
- \* Recherche arborescente par séparation et évaluation (*Branch & Bound*).
- \* Méthodes de la « combinatoire polyédrique ».

## **Conclusion**

Après avoir conçu et réalisé des systèmes expérimentaux d'énergies renouvelables de très faibles puissance (solaire photovoltaïque, solaire thermique, éolienne et biomasse.), nous envisageons la répartition (la gestion) des ressources combinés de façon optimale. Dans ce but, nous avons modélisé le problème en termes de programmation linéaire. On a présenté les techniques de résolution des PL en insistant particulièrement sur la méthode du simplexe.

Nous avons présenté une formulation pour combiner de manière optimale les sources d'énergie renouvelables afin de mettre en place des systèmes énergétiques hybrides économiques dans le cas où ces énergies sont disponibles sous une forme continue ou sous une forme d'unités spécifiques discontinues. Les modèles proposés concernent directement le groupe de paramètres d'entrée qui sont la puissance estimée et la production annuelle d'énergie de chaque source d'énergie renouvelable.

Ces paramètres dépendent des conditions environnementales (vitesse du vent, rayonnement solaire, température), sur les caractéristiques géographiques du site (latitude, longitude, altitude), et sur les caractéristiques de conception de chaque système énergétique (diamètre du rotor et la hauteur du moyeu de l'éolienne, puissance de crête, orientation du panneau, volume du bio-digesteur, etc.).

# **Chapitre 5**

## **Simulation de Scénarios d'Optimisation des Energie Renouvelables Hybrides**

---

## Chapitre 5

# Simulation de Scénarios d'Optimisation des Energie Renouvelables Hybrides

## Sommaire

---

### Introduction

#### 1 Les problèmes hybrides

##### 1.1 Cas d'énergie continue

###### 1.1.1 Pour deux ressources

###### 1.1.1.1 Applications

###### 1.1.1.2 Commentaires

###### 1.1.2 Pour trois ressources

###### 1.1.2.1 Applications

###### 1.1.2.2 Commentaires

###### 1.1.3 Pour quatre ressources

###### 1.1.3.1 Applications

###### a Exemple 1 pour la région (a et b)

###### b Exemple 2 pour la région (1, 2, et 3)

###### 1.1.3.2 Commentaires

###### a Pour la région (a et b)

###### b Pour la région (1, 2, et 3)

##### 1.2 Cas d'énergie discontinue

###### 1.2.1 Applications

###### 1.2.1.1 Energies électriques (photovoltaïque /éolienne)

###### 1.2.1.2 Energies thermique (photothermique / biomasse)

###### 1.2.2 Résultats

###### 1.2.2.1 Energies électriques (photovoltaïque /éolienne)

###### 1.2.2.2 Energies thermiques (photothermique / biomasse) 160

###### 1.2.3 Commentaires

###### 1.2.4 La sensibilité de la solution par rapport à un coût unitaire

###### 1.2.5 Graphique

#### 2 Interface graphique

### Conclusion

---

# Chapitre 5

## Simulation de Scénarios d'Optimisation des Energies Renouvelables Hybrides

### Introduction

Dans ce chapitre, on considère un certain nombre de scénarios faisant intervenir différentes combinaisons des ER. Les exemples choisis concernent le cas de disponibilité de ressources à la fois continues ou discrètes. Ils seront traités étant donné une estimation de la production annuelle d'énergie et un coût de chaque unité de la source d'énergie renouvelable ainsi que d'une demande annuelle. Les résultats seront fournis par l'algorithme du simplexe et donnent la répartition optimale de chaque source d'énergie renouvelable à installer. Connaissant l'énergie et les caractéristiques du site, cela permet de dimensionner le système d'énergie renouvelable à utiliser.

A cette fin, une interface graphique a été développée permettant aux utilisateurs d'introduire le coût unitaire et la capacité limite de chaque énergie de façon aisée pour obtenir la répartition qui minimise la fonction de coût. La méthode de programmation linéaire a été adoptée pour la résolution de ce problème. Des exemples typiques sont examinés permettant d'appliquer cette technique pour optimiser la répartition combinée des ressources considérées.

### 1 Les problèmes hybrides

Généralement, les problèmes hybrides peuvent se ramener à des problèmes de distribution optimale des ressources énergétiques avec la contrainte de satisfaire la demande en tenant compte des limitations des ressources et des espaces disponibles [123]. Dans ce contexte, il y a généralement deux types de problèmes à considérer. Le premier problème consiste, étant données les capacités en ressources déjà installées, à déterminer le mode de gestion pour tirer le meilleur profit de l'installation. Le deuxième problème consiste, étant donnée une estimation des ressources potentielles, à déterminer la répartition optimale pour chacune de ces ressources.

Dans cette étude, on s'intéressera au deuxième problème pour lequel peu de travaux ont été consacrés [118]. Comme dans cette dernière référence, nous avons modélisé le problème de répartition de ressources en termes de programme linéaire. Les ressources considérées peuvent être une combinaison des énergies suivantes, et cela selon les régions : solaire photovoltaïque, solaire photo-thermique, éolienne et biomasse.

## 1.1 Cas d'énergie continue

Le problème peut s'exprimer comme suit :

$$\left. \begin{array}{l} \min Z_T = \sum C_i \cdot E_i \\ \sum E_i = D \\ E_i \leq L_i \\ E_i \geq 0 \end{array} \right\} (i = \text{ph, th, éo, bi}) \quad (4-9)$$

### 1.1.1 Pour deux ressources

#### 1.1.1.1 Applications

Dans cette section, on illustrera notre étude par deux exemples de répartition de ressources hybrides en optimisant l'énergie. La fonction du coût à minimiser est la somme des coûts des énergies utilisées. En tenant compte des couts unitaires, pour les données relatives à la région spécifiée, le programme de répartition des ressources s'exprime comme suit:

- **Exemple 1:**

$$\min Z = C_{ph} E_{ph} + C_{bio} E_{bio}$$

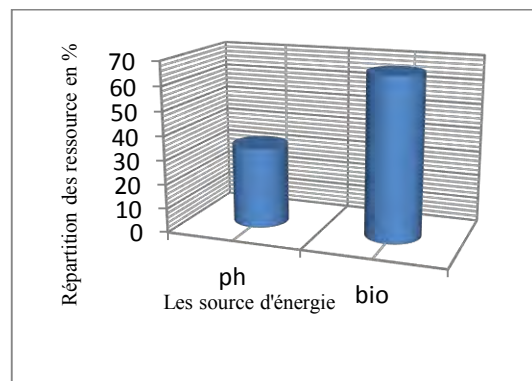
$$\min Z = 0.3 E_{ph} + 0.1 E_{bio}$$

$$E_{ph} + E_{bio} = 60 \text{ (KWh / an)}$$

$$E_{ph} \leq 30 \text{ (kWh / an)}$$

$$E_{bio} \leq 40 \text{ (kWh / an)}$$

Les résultats sont présentés sur la Figure (5-1)



**Figure (5-1).** Répartition des ressources obtenue pour l'exemple 1.

- **Exemple 2:**

$$\min Z = C_{ph} E_{ph} + C_{\acute{e}o} E_{\acute{e}o}$$

$$\min Z_T = 0.3 E_{ph} + 0.08 E_{\acute{e}o}$$

$$E_{ph} + E_{\acute{e}o} = 3000 \text{ (kWh/an)}$$

$$E_{ph} \leq 1650 \text{ (kWh/an)}$$

$$E_{\acute{e}o} \leq 1700 \text{ (kWh/an)}$$

Les résultats sont présentés sur le Tableau (5-1).

Les données			Résultats	
Les énergies	Les prix	Les capacités	La répartition	
$E_i$	€/kWh	kWh/an	kWh/an	en %
$E_{ph}$	03.0	1650	1300	43.3
$E_{\acute{e}o}$	0300	1700	1700	56.7
$D = 3000 \text{ (KWh / an)}$			$\text{Min } Z = 526 \text{ (€ / an)}$	

**Tableau (5-1).** Répartition des ressources obtenues pour l'exemple2.

### 1.1.1. 2 Commentaires

- **Exemple 1:**

\* Pour cette région, on obtient la répartition suivante ; la biomasse la plus grande capacité au plus faible coût est utilisée à 66.67 %. L'autre ressource a été utilisée pour un faible pourcentage : photovoltaïque 33.33%.

\*En plus de la répartition optimale fournie par le programme linéaire, il reste d'autres possibilités pour mieux répartir les ressources en cas de limitation de la surface en arrangeant la disposition, l'architecture, et la géométrie de l'installation énergétique. A titre d'exemple, on peut disposer la totalité ou une partie des panneaux photovoltaïques sur le toit du bio digesteur.



• Exemple 2

Pour le cas de l'énergie continue: on obtient la répartition suivante; le photovoltaïque qui a le plus bas coût, de sorte qu'il est complètement consommé. Sa capacité est complètement utilisée et il participe à 43,3%. Autres ressources ont été utilisées selon leur moindre coût et la capacité. ( $E_{\acute{e}o} = 56.7\%$ ).

1.1.2 Pour trois ressources

1.1.2.1 Applications

On considère les trois sources d'énergies renouvelables suivantes: l'énergie éolienne  $E_{\acute{e}o}$  avec la limite  $L_{\acute{e}o}$ , l'énergie thermique  $E_{th}$  avec la limite  $L_{th}$ , l'énergie du biogaz  $E_{bio}$  avec la limite  $L_{bio}$ . D'après les données fournies dans le Tableau (5-2), le problème peut être exprimé comme suit

$$\begin{aligned} \min Z_T &= 0.08 E_{\acute{e}o} + 0.2 E_{th} + 0.1 E_{bio} \\ E_{\acute{e}o} + E_{th} + E_{bio} &= 280 \text{ (kWh/an)} \\ E_{\acute{e}o} &\leq 130 \text{ (kWh/an)} \\ E_{th} &\leq 60 \text{ (kWh/an)} \\ E_{bio} &\leq 98 \text{ (kWh/an)} \end{aligned}$$

Les données			Résultats	
Les énergies	Les prix €/kWh	Les capacités en (kWh/an)	La répartition en (kWh/an)	La répartition en %
$E_{\acute{e}o}$	0.08	130	$E_{\acute{e}o} = 130$	46.4
$E_{th}$	0.2	60	$E_{th} = 52$	18.6
$E_{bio}$	0.1	98	$E_{bio} = 98$	35
D=280 (kWh/an)			Min Z= 30.6 (€/an)	

Tableau (5-2): La répartition optimale des énergies renouvelables.

### 1.1.2.2 Commentaires

Le coût le plus bas concerne l'énergie éolienne, par conséquent; il a été utilisé complètement, ce qui donne 46,4%. La deuxième ressource utilisée est la biomasse. Il a été totalement utilisé jusqu'à 35%.

### 1.1.3 Pour quatre ressources

#### 1.1.3.1 Applications

On considère les sources d'énergies renouvelables suivantes: solaire photovoltaïque  $E_{ph}$  avec la limite disponible  $L_{ph}$ , solaire thermique  $E_{th}$  avec la limite disponible  $L_{th}$ , éolienne  $E_{éo}$  avec la limite disponible  $L_{éo}$ , biomasse  $E_{bi}$  avec la limite disponible  $L_{bi}$ ,

Dans cette section, on illustrera notre étude par des exemples de répartition de ressources hybrides en optimisant l'énergie. La fonction de coût à minimiser est la somme des coûts des énergies utilisées. En tenant compte des coûts unitaires, elle peut se mettre sous la forme :

$$\begin{aligned}
 \min Z &= C_{ph}E_{ph} + C_{th}E_{th} + C_{éo}E_{éo} + C_{Bi} E_{Bi} \\
 E_{ph} + E_{th} + E_{éo} + E_{Bi} &= D \\
 E_{ph} &\leq L_{ph}, \quad E_{éo} \leq L_{éo} \\
 E_{th} &\leq L_{th}, \quad E_{bio} \leq L_{bio} \\
 E_{ph} &\geq 0, \quad E_{éo} \geq 0 \\
 E_{th} &\geq 0, \quad E_{bio} \geq 0
 \end{aligned} \tag{5-1}$$

Ces problèmes ont été résolus par une technique de programmation linéaire. La répartition optimale des énergies renouvelables et leur pourcentage à satisfaire la demande sont présentés dans Tableau (5-3) et Tableau (5-4).

**a Exemple 1 pour la région (a et b)**

Pour les données relatives à la région (a et b), le programme de répartition des ressources et les résultats sont présentés dans le Tableau (5-3).

	Région (a)	Région (b)
La forme générale	$\min Z = 0.3 E_{ph} + 0.08 E_{\acute{e}o} + 0.2 E_{th} + 0.06 E_{bio}$ $E_{ph} + E_{\acute{e}o} + E_{th} + E_{bio} = 80 (kWh / an)$ $E_{ph} \leq 20 (kWh / an)$ $E_{\acute{e}o} \leq 10 (kWh / an)$ $E_{th} \leq 18 (kWh / an)$ $E_{bio} \leq 40 (kWh / an)$	$\min Z = 0.6 E_{ph} + 0.8 E_{\acute{e}o} + 0.5 E_{th} + 0.4 E_{bio}$ $E_{ph} + E_{\acute{e}o} + E_{th} + E_{bio} = 120 (kWh / an)$ $E_{ph} \leq 45.35 (kWh / an)$ $E_{\acute{e}o} \leq 12.20 (kWh / an)$ $E_{th} \leq 20.13 (kWh / an)$ $E_{bio} \leq 80.18 (kWh / an)$
résultats		
La répartition en ( kWh / an )	$E_{ph} = 12$ $E_{\acute{e}o} = 10$ $E_{th} = 18$ $E_{bio} = 40$	$E_{ph} = 19.69$ $E_{\acute{e}o} = 00$ $E_{th} = 20.13$ $E_{bio} = 80.18$
La répartition en%	$E_{ph} = 15$ $E_{\acute{e}o} = 12.5$ $E_{th} = 22.5$ $E_{bio} = 50$	$E_{ph} = 16.40$ $E_{\acute{e}o} = 0.0$ $E_{th} = 16.77$ $E_{bio} = 66.82$
Min Z ( €/an )	10.40	53.95

**Tableau (5-3):** Répartition des ressources obtenues pour la région (a et b).

**b Exemple 2 pour la région (1, 2, et 3)**

D'après les données correspondant la région (1, 2 et 3), le programme de répartition des ressources et les résultats sont présentés dans le Tableau (5-4).

	Région (1)	Région (2)	Région (3)
La forme générale	$\min Z_T = 0.3 E_{ph} + 0.08 E_{\acute{e}o} + 0.2 E_{th} + 0.1 E_{bio}$ $E_{ph} + E_{\acute{e}o} + E_{th} + E_{bio} = 340 \text{ (kWh/an)}$ $E_{ph} \leq 90 \text{ (kWh/an)}$ $E_{\acute{e}o} \leq 120 \text{ (kWh/an)}$ $E_{th} \leq 50 \text{ (kWh/an)}$ $E_{bio} \leq 88 \text{ (kWh/an)}$	$\min Z_T = 0.3 E_{ph} + 0.08 E_{\acute{e}o} + 0.2 E_{th} + 0.1 E_{bio}$ $E_{ph} + E_{\acute{e}o} + E_{th} + E_{bio} = 340 \text{ (kWh/an)}$ $E_{ph} \leq 60 \text{ (kWh/an)}$ $E_{\acute{e}o} \leq 80 \text{ (kWh/an)}$ $E_{th} \leq 100 \text{ (kWh/an)}$ $E_{bio} \leq 120 \text{ (kWh/an)}$	$\min Z_T = 0.6 E_{ph} + 0.8 E_{\acute{e}o} + 0.5 E_{th} + 0.4 E_{bio}$ $E_{ph} + E_{\acute{e}o} + E_{th} + E_{bi} = 340 \text{ (kWh/an)}$ $E_{ph} \leq 90 \text{ (kWh/an)}$ $E_{\acute{e}o} \leq 50 \text{ (kWh/an)}$ $E_{th} \leq 120 \text{ (kWh/an)}$ $E_{bio} \leq 88 \text{ (kWh/an)}$
résultats			
La répartition en ( kWh/an )	$E_{ph} = 82$ $E_{\acute{e}o} = 120$ $E_{th} = 50$ $E_{bio} = 88$	$E_{ph} = 40$ $E_{\acute{e}o} = 80$ $E_{th} = 100$ $E_{bio} = 120$	$E_{ph} = 90$ $E_{\acute{e}o} = 112$ $E_{th} = 50$ $E_{bio} = 88$
La répartition en%	$E_{ph} = 24.1$ $E_{\acute{e}o} = 35.3$ $E_{th} = 14.7$ $E_{bio} = 25.9$	$E_{ph} = 11.8$ $E_{\acute{e}o} = 23.5$ $E_{th} = 29.4$ $E_{bio} = 35.3$	$E_{ph} = 26.5$ $E_{\acute{e}o} = 32.9$ $E_{th} = 14.7$ $E_{bio} = 25.9$
Min Z (€/an)	53	50.40	203.80

**Tableau (5-4):** Répartition des ressources obtenues pour la région (1,2 et 3).

### 1.1.3. 2 Commentaires

#### a Pour la région (a et b)

\*Pour la première région (a), on obtient la répartition suivante; la biomasse qui a la plus grande capacité au plus faible coût est utilisée à 50 %. Les autres ressources ont été utilisées à faible pourcentage: thermique 22,5%, photovoltaïque 15%, et l'éolien 12,5%.

\*Pour la deuxième région (b), inversement, comme l'énergie éolienne est de faible capacité au coûts le plus élevé par rapport aux autres ressources concurrentes, elle n'a pas été utilisée (0%). la biomasse qui a la plus grande capacité au plus faible coût est utilisée à 66.82 %. Les autres ressources ont été utilisées à faible pourcentage: thermique 16.77%, photovoltaïque 16.40%.

L'analyse des résultats obtenus montre une répartition qui favorise la ressource disponible à faible coût.

Nous avons examiné à l'aide de notre programme la répartition optimale des ressources selon les données de la référence [118], on a constaté des résultats semblables puisque la même approche a été adoptée.

#### b Pour la région (1, 2, et 3)

\* Pour la région (1): le coût le plus bas concerne l'énergie éolienne, par conséquent; il a été utilisé complètement, ce qui donne 35,3%. La deuxième ressource utilisée est la biomasse. Il a été totalement utilisé jusqu'à 25,9%.

\* Pour la région (2) : on obtient la répartition suivante; l'énergie éolienne a le coût le plus bas, de sorte qu'elle est complètement consommé. Sa capacité est complètement utilisée et elle participe à 23,5%. Les autres ressources ont été utilisées pour leurs plus faibles coûts et de leurs capacité.

\* Pour la région (3) : on obtient la répartition suivante; la biomasse a le coût le plus bas, de sorte qu'il est complètement consommé. Sa capacité est complètement utilisée et il participe à 25,9%. Autres ressources ont été utilisées selon leur moindre coût et la capacité.

Au Final; nous remarquons que le système de gestion fonctionne comme suit: il sélectionne d'abord l'énergie qui a le coût le plus bas jusqu'à ce qu'il soit complètement consommé, puis sélectionne le prochain faible coût et ainsi de suit .

Connaissant les caractéristiques de l'énergie et du site, ce qui permet de dimensionner le système d'énergie renouvelable approprié pour être utilisé.

## 1.2 Cas d'énergie discontinue

Le problème consiste à déterminer le nombre de panneaux photovoltaïques ainsi que le nombre d'éoliennes ou (le nombre d'unités thermiques ainsi que le nombre d'unités de biodigesteurs). Par conséquent, il peut être transformé en un programme d'optimisation connu comme un problème de programmation linéaire qui nécessite des solutions entières pour les variables de décision  $N_1$  et  $N_2$ .

La forme générale de base consiste à minimiser une fonction de coût  $Z_T$  tout en satisfaisant la demande  $D$ . Les coûts unitaires de chaque ressource énergétique sont  $C_i$  et sa production annuelle d'énergie est  $E_i$ . Le problème peut être exprimé comme suit:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min (Z_T) = \sum_i C_i N_i \\ \sum_i E_i \cdot N_i = D \quad i = 1, 2, 3, \dots \\ N_i \geq 0 \\ N_i \text{ Entiers} \end{array} \right. \quad (5-2)$$

Par rapport aux problèmes de programmation linéaire, les problèmes de programmation linéaire en nombres entiers sont plus difficiles à résoudre et disposent de techniques spécifiques pour leur résolution. Au cours des vingt dernières années, la technique la plus efficace a été basée sur la division du problème en un certain nombre de petits problèmes dans une méthode appelée séparation et évaluation (ou branch and bound). Pour le cas simple de deux variables de décision, la représentation graphique peut aider à analyser et à résoudre le problème si une solution existe.

## 1.2.1 Applications

### 1.2.1.1 Energies électriques (photovoltaïque /éolienne)

Prenons l'exemple suivant d'un petit système hybride PV / éolienne. L'énergie estimée produite par un panneau photovoltaïque (une unité) est  $E_{ph} = 66 \text{ KWh/an}$  et l'énergie estimée produite par une éolienne (une unité) est  $E_{wi} = 83 \text{ KWh/an}$ .

Si nous supposons un coût de 4\$ par watt de puissance de crête, alors le coût unitaire d'un panneau photovoltaïque est autour de  $C_{ph} = 130 \text{ \$}$ . D'autre part, la réduction du coût du type d'éolienne qui a été mis en place (sauf la partie électrique) dans notre laboratoire peut être estimé à environ  $C_2 = 100 \text{ \$}$ . Cela conduit à  $2\text{\$/Watt}$ .

Pour plus de simplicité, nous ne pouvons considérer dans cette analyse que l'investissement pour le coût en capital du système hybride qu'implique le nombre de panneaux photovoltaïques ( $N_1$ ) et le nombre d'éoliennes ( $N_2$ ).

### 1.2.1.2 Energies thermiques (photothermique / biomasse)

Prenons l'exemple suivant d'un petit système hybride thermique / biomasse. L'énergie estimée produite par (une unité) thermique est  $E_{th} = 160 \text{ KWh/an}$  et l'énergie estimée produite par un biodigester (une unité) est  $E_{bio} = 83 \text{ KWh/an}$ .

Si nous supposons un coût de 0.8\$ par watt de puissance de crête, alors le coût unitaire d'un capteur thermique est autour de  $C_{th} = 70 \text{ \$}$ .

D'autre part, la réduction du coût du type de digesteur qui a été mis en place dans notre laboratoire peut être estimé à environ  $C_2 = 100 \text{ \$}$ . Cela conduit à  $2\text{\$/Watt}$ .

Pour plus de simplicité, nous ne pouvons considérer dans cette analyse que l'investissement pour coût en capital du système hybride qu'implique le nombre d'unités thermiques ( $N_1$ ) et le nombre d'unités de biodigesteurs ( $N_2$ ).

1.2.2 Résultats

Différents scénarios ont été simulés. Dans la plupart des cas, nous avons remarqué que la contrainte d'égalité est parfois difficile de s'acquitter de conduire à des solutions infaisables. Pour surmonter ces cas, nous devons libérer la contrainte d'égalité par une contrainte d'inégalité.

Nous présentons dans les Tableau (5-5) et Tableau (5-6) ci-dessous, la formulation et les exemples applicatifs pour les deux cas. Ces problèmes ont été résolus par une technique de programmation linéaire. La répartition optimale des énergies renouvelables et leur pourcentage de participer à satisfaire la demande sont donnés ci-dessous.

1.2.2.1 Energies électriques (photovoltaïque /éolienne)

	Cas discontinue		
	Contrainte d'égalité		Contrainte d'inégalité
La forme générale	$\begin{cases} \min Z_T = C_1.N_1 + C_2.N_2 \\ E_{ph}.N_1 + E_{\acute{e}o}.N_2 = D \\ N_1, N_2 \geq 0 \\ N_1, N_2 \text{ Entiers} \end{cases}$		$\begin{cases} \min Z_T = C_1.N_1 + C_2.N_2 \\ E_{ph}.N_1 + E_{\acute{e}o}.N_2 \geq D \\ N_1, N_2 \geq 0 \\ N_1, N_2 \text{ Entiers} \end{cases}$
Application	$\begin{cases} \min Z_T = 130.N_1 + 100.N_2 \\ 66.N_1 + 83.N_2 = 3000 \\ N_1, N_2 \geq 0 \\ N_1, N_2 \text{ Entiers} \end{cases}$	$\begin{cases} \min Z_T = 130.N_1 + 100.N_2 \\ 66.N_1 + 84.N_2 = 3000 \\ N_1, N_2 \geq 0 \\ N_1, N_2 \text{ Entiers} \end{cases}$	$\begin{cases} \min Z_T = 130.N_1 + 100.N_2 \\ 66.N_1 + 83.N_2 \geq 3000 \\ N_1, N_2 \geq 0 \\ N_1, N_2 \text{ Entiers} \end{cases}$
La répartition en ( KWh / an )	Pas de solution	N1=6 N2=31	N1=0 N2=37
Min Z (\$/an)	Pas de solution	Min Z <sub>T</sub> =3880	Min Z <sub>T</sub> =3700

Tableau (5-5) : La répartition optimale des énergies électriques



1.2.2.2 Energies thermiques (photothermique / biomasse)

	Cas discontinue		
	Contrainte d'égalité		Contrainte d'inégalité
la forme générale	$\begin{cases} \min Z_T = C_1.N_1 + C_2.N_2 \\ E_{th}.N_1 + E_{bio}.N_2 = D \\ N_1, N_2 \geq 0 \\ N_1, N_2 \text{ Entiers} \end{cases}$		$\begin{cases} \min Z_T = C_1.N_1 + C_2.N_2 \\ E_{th}.N_1 + E_{bio}.N_2 \geq D \\ N_1, N_2 \geq 0 \\ N_1, N_2 \text{ Entiers} \end{cases}$
Application	$\begin{cases} \min Z_T = 70.N_1 + 100.N_2 \\ 160.N_1 + 83.N_2 = 2000 \\ N_1, N_2 \geq 0 \\ N_1, N_2 \text{ Entiers} \end{cases}$	$\begin{cases} \min Z_T = 70.N_1 + 100.N_2 \\ 160.N_1 + 84.N_2 = 2000 \\ N_1, N_2 \geq 0 \\ N_1, N_2 \text{ Entiers} \end{cases}$	$\begin{cases} \min Z_T = 70.N_1 + 100.N_2 \\ 160.N_1 + 83.N_2 \geq 2000 \\ N_1, N_2 \geq 0 \\ N_1, N_2 \text{ Entiers} \end{cases}$
La répartition en (KWh/an)	Pas de solution	N1=2 N2=20	N1=13 N2=0
Min Z (\$/an)	Pas de solution	Min Z <sub>T</sub> =2140	Min Z <sub>T</sub> =910

Tableau (5-6): La répartition optimale des énergies thermiques.

1.2.3 Commentaires

Pour le cas d'énergie discrète, il y a un problème particulier lié à la demande. Si l'on considère la demande comme une contrainte d'égalité, la solution n'est donc pas garantie. Mais si nous la formulons comme une contrainte d'inégalité, la possibilité de trouver une solution est beaucoup plus évidente. Pour le cas étudié (voir Tableau (5-5) et Tableau (5-6)), si l'on considère la demande comme un cas d'égalité, il n'y a pas de solution. Dans le cas où les demandes sont considérées comme une inégalité, il y a une solution.

- Pour les énergies électriques (photovoltaïque /éolienne)

La solution donne une valeur de fonction objective égale à 3700\$ avec  $N_1 = 0$  panneaux photovoltaïques et  $N_2 = 37$  éoliennes. Selon ce résultat, le système sera composé uniquement d'éoliennes en raison du fait qu'une éolienne est moins chère et produit plus d'énergie qu'un panneau photovoltaïque.

- **Pour les énergies thermique (thermique / biomasse)**

La solution donne une valeur de fonction objective égale à 910\$ avec  $N_1 = 13$  panneaux photothermiques et  $N_2 = 0$  Biodigesteurs. Selon ce résultat, le système sera composé uniquement des panneaux photothermiques en raison du fait qu'un panneau photothermique est moins cher et produit plus d'énergie qu'un biodigesteur.

#### Remarque

Mais on remarquera que cette solution n'est pas réaliste si l'on considère la variabilité de l'énergie produite avec des saisons. Si nous ne limitons pas la capacité maximale des ER, nous ne pouvons pas obtenir un système hybride.

#### 1.2.4 La sensibilité de la solution par rapport à un coût unitaire

Nous allons analyser la sensibilité de la solution (si elle existe) du programme entier avec la contrainte d'égalité par rapport à un petit changement dans le coût unitaire caractérisant la production d'énergie annuelle d'une unité de turbine éolienne (ou une unité de biodigesteurs). Le Tableau (5-7) ou le Tableau (5-8), montre la sensibilité de la solution par rapport à  $E_{\text{éol}}$  (ou  $E_{\text{bio}}$ ).

$E_{\text{éol}}$ (Le coût de turbine éolienne)	$Z(\text{\$})$ : fonction d'objectif	$N_1$ (Les panneaux PV)	$N_2$ (Les turbines éoliennes)
80	4700	20	21
81	4480	16	24
82	5540	38	6
83	Pas de solution	//	//
84	3880	6	31
85	5100	30	12

**Tableau (5-7) : Sensibilité de la solution W.R.T  $E_{\text{éol}}$**

$E_{bio}$ (Le coût de turbine éolienne)	Z(\$): fonction d'objectif	$N_1$ (Les panneaux Photo-thermiques)	$N_2$ (Les bio-digesteurs)
80	940	12	1
81	Pas de solution	//	//
82	Pas de solution	//	//
83	Pas de solution	//	//
84	2140	2	20
85	1880	4	16
86	Pas de solution	//	//

Tableau (5-8) : Sensibilité de la solution W.R.T  $E_{bio}$

D'après le Tableau (5-7) et le Tableau (5-8) nous pouvons constater combien le programme entier est sensible à un petit changement par rapport à  $E_{éol}$  (ou  $E_{bio}$ ).

Pour illustrer la recherche de solutions en programmation linéaire, nous présentons et discutons la solution graphique du programme suivant avec la contrainte de l'égalité et  $E_{éol} = 84$  ou ( $E_{bio} = 84$ ).

### 1.2.5 Graphique

L'analyse graphique est présentée sur la Figure (5-2) où l'axe des x représente  $N_1$  et l'axe des y représente  $N_2$ . La ligne rouge représente la contrainte d'égalité ( $160.N_1 + 84.N_2 = 2000$ ) ou ( $66.N_1 + 84.N_2 = 3000$ ). Les lignes bleues représentent la fonction objectif ( $Z = 70.N_1 + 100.N_2$ ) ou ( $Z = 130.N_1 + 100.N_2$ ) qui est paramétrée par la valeur de Z. Ainsi en augmentant la valeur de Z tout en déplaçant la ligne bleue dans le sens des flèches, nous cherchons à nous intéresser à la ligne rouge en un point où  $N_1$  et  $N_2$  devrions être des entiers. S'il y a de nombreux points qui répondent à cette condition d'intégralité, nous devrions sélectionner le point qui correspond à la valeur minimale de Z.

Dans l'exemple considéré, la valeur optimale correspond au point M où  $Z = 2140$  \$ ( $Z = 3880$  \$) avec  $N_1 = 2$  ( $N_1 = 6$ ) et  $N_2 = 20$  ( $N_2 = 31$ ). Si l'on considère le programme linéaire en nombres entiers, il n'y aura pas d'intersection entre la contrainte d'égalité et la fonction objective correspond à un point de coordonnées entières.

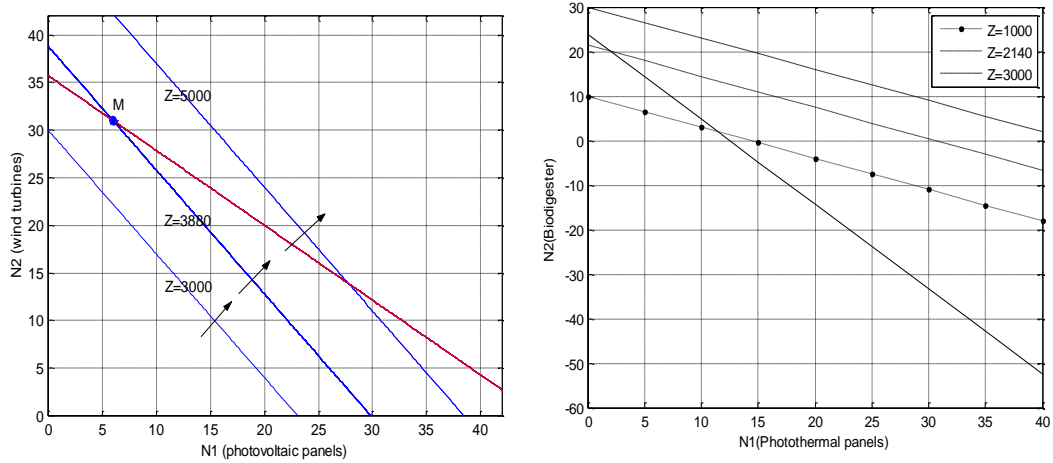


Figure (5-2): L'analyse graphique d'une solution de programmation linéaire en nombres entiers<sup>3</sup>

## 2 Interface graphique

Une interface graphique a été développée en langage Java permettant aux utilisateurs d'introduire les coûts unitaires, les capacités de chaque énergie ainsi que la demande. Le programme détermine la répartition optimale des ressources considérées et le minimum de la fonction de cout (Figure (5-3)).



Figure (5-3): Interface Graphique Utilisateur.

## **Conclusion**

Dans le cas de l'énergie en continu, étant donné une estimation de la production annuelle d'énergie et un coût de chaque unité de la source d'énergie renouvelable, ainsi que d'une demande annuelle, les sorties de l'algorithme simplex (si possible), la répartition optimale de chaque source d'énergie renouvelable et connaissant l'énergie et les caractéristiques du site, ceci permet de dimensionner le système d'énergie renouvelable à être utilisé.

Selon diverses simulations, nous remarquons enfin que le système de gestion fonctionne comme suit: il sélectionne d'abord l'énergie qui a le coût le plus bas jusqu'à ce que sa capacité soit complètement consommée, puis sélectionne la ressource à faible coût et file sur la prochaine.

Dans le cas d'unités discrètes, étant donné une estimation de la production annuelle d'énergie et le coût de chaque unité de la source d'énergie renouvelable ainsi que d'une demande annuelle, les résultats du programme (si possible) le nombre d'unités de chaque source pour répondre à la demande tout en satisfaisant toutes les contraintes. Les deux approches sont génériques car elles s'adaptent aux différents sites, demandes, et sources d'énergie. Des exemples illustratifs ont été donnés combinant sources photovoltaïques et éoliennes (thermique et biomasse). Toutefois, la résolution de programmes entiers est beaucoup plus difficile que la résolution de programmes linéaires.

Nous avons développé une interface graphique utilisateur en vue de faciliter la simulation et l'analyse du système hybride pour différentes situations. Cette technique a été illustrée par des exemples pratiques.

# **Conclusion générale**

## **Conclusion Générale**

Le travail présenté dans cette thèse a consisté à élaborer une stratégie optimale qui vise l'autonomie énergétique d'une région au moindre coût. Cela signifie qu'il faut étudier, modéliser, analyser et concevoir un système énergétique qui combine de façon complémentaire les énergies renouvelables du lieu donné pour satisfaire la demande donnée. Pour résumer le bilan de ce travail, nous citons les principales étapes de notre contribution.

Nous avons présenté les généralités sur les différents systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables. Notre travail a consisté à effectuer une étude théorique, une modélisation, une simulation, ainsi que la réalisation de prototypes expérimentaux individuellement (solaire photovoltaïque, photo thermique, éolien, bioréacteur à méthane). Cette étude doit a été suivie d'une analyse critique qui nous a permis de dégager les paramètres influençant le rendement et le coût de chaque système énergétique ainsi que leur comparaison.

- Pour le système photovoltaïque, nous avons utilisé le modèle de la cellule photovoltaïque à une exponentielle pour reconstituer la caractéristique  $I-V$  à l'aide de la méthode des trois points qui sont fournis par le constructeur et en négligeant la résistance parallèle. Nous avons exprimé la puissance en fonction du courant, ainsi qu'en fonction de la tension. Ces expressions nous ont permis de pouvoir estimer la puissance fournie par le module solaire en fonction de l'éclairement, de la température, de la charge utilisatrice et de son orientation par rapport au soleil.

- Pour le système éolien, l'objectif de ce travail est de concevoir et réaliser une éolienne tripale économique, facile à réaliser et à installer, n'occupant pas de grand espace et pouvant couvrir quelques besoins énergétiques d'un foyer. Les données de la région de Constantine ont permis d'estimer les caractéristiques du vent : vitesse moyenne mensuelle, vitesse moyenne annuelle, moyenne, écart type et variation de la vitesse du vent en fonction de la hauteur de l'aérogénérateur. La conception de l'éolienne tripale avec le profil des pales choisi : NACA 23015 a été effectuée suivi d'une réalisation d'un prototype expérimental. Des estimations du rendement énergétiques des éoliennes ont été effectuées.

- Pour le système photo thermique et la biomasse, nous avons choisi des modèles pour l'estimation de la production énergétique instantanée d'un capteur solaire plan et la puissance générée par un digesteur de méthane, nous avons utilisons le modèle Chen-Hashimoto.

Nous avons étudié la conversion d'énergie électrique provenant des systèmes d'énergies renouvelables. Cette étude fut suivie par la simulation et la réalisation expérimentale d'un hacheur PWM. Pour minimiser les pertes d'énergie par conversion les systèmes considérés sont non linéaires avec filtre du premier et du second ordre.

Dans la dernière partie de notre travail, nous nous sommes intéressés à la combinaison de deux ou plusieurs ressources énergétiques renouvelables que nous avons étudiées (photovoltaïque, éolien, photo thermique et biomasse). A fin de réduire le coût du système énergétique avec une seule ressources

Nous présentons une formulation pour combiner de manière optimale les sources d'énergie renouvelables afin de construire des systèmes énergétiques hybrides économiques dans le cas où ces énergies sont disponibles sous une forme continue ou sous une forme d'unités spécifiques discontinues.

Les deux approches sont génériques car elles sont adaptables à différents sites, demandes et sources d'énergie. Nous avons développé une interface graphique utilisateur en vue de faciliter la simulation et l'analyse du système hybride pour différentes situations

Les résultats obtenus montrent l'adaptabilité des modèles utilisés et des méthodes créées. Ces méthodes peuvent être améliorées de diverses manières : amélioration des stratégies de contrôle des sources d'énergie, prise en compte d'autres critères et notamment économiques.

Enfin, Les résultats d'analyses peuvent être utilisés pour répondre à des questions générales sur les options technologiques pour former les décisions politiques et les décisions de planification. Le système hybride développé pourra constituer un moyen très économique pour l'énergie d'électrification rurale.



# **Bibliographie**

## Bibliographie

- [1] <http://www.ceder-provence.fr/article/les-energies-fossiles.html>.
- [2] <http://www.futura-sciences.com/magazines/environnement/infos/dico/d/developpement-durable-charbon-6636/>.
- [3] <http://www.futura-sciences.com/magazines/matiere/infos/dico/d/chimie-petrole-9749/>.
- [4] <http://www.futura-sciences.com/magazines/environnement/infos/dico/d/developpement-durable-gaz-naturel-6640/>.
- [5] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Combustible\\_fossile#Classification](https://fr.wikipedia.org/wiki/Combustible_fossile#Classification).
- [6] <http://energie-nucleaire.net/qu-est-ce-que-l-energie-nucleaire>.
- [7] [http://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire\\_environnement/definition/energie\\_eolienne.php4](http://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/energie_eolienne.php4).
- [8] [http://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire\\_environnement/definition/biomasse.php4](http://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/biomasse.php4).
- [9] [http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie\\_hydraulique](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_hydraulique).
- [10] M. Belhadj, “Modélisation D’un Système De Captage Photovoltaïque Autonome”, *Mémoire de Magister, Microélectronique -Photovoltaïque, Centre Universitaire De Bechar, 2007-2008*.
- [11] Marc Orgeret, “ Les piles solaires, le composant et ces applications”, *Edition. Masson, 1985*.
- [12] A. buyers, “ les systèmes photovoltaïques”, *guide, Canada 2002*, Article PDF.
- [13] A. Zerga, F. Benyarou et B. Benyousef, “Optimisation du Rendement d’une Cellule Solaire N+P au Silicium Monocristallin”, *Rev .Energ. Ren: physique Energétique*, pp.95-100, 1998.
- [14] T. Fogelman, “Système Photovoltaïque pour les Pays en Déventement, Manuel d’Installation et d’Utilisation,” *Agence Française pour la Maîtrise de l’énergie, (AFME)*.
- [15] C. Bernard, J. Chauvin, D. Lebrun, J. F. Muraz, P. Stassi, “ Station Solaire Autonome pour l’Alimentation des Antennes de l’Expérience de Radio Détection à l’Observatoire Pierre Auger”, *HAL-IN2P3, archive numérique des publications scientifiques et techniques de l’IN2P3*, pp. 22, 2006.
- [16] A. Guen, “Contribution à l’Etude des Systèmes de Télécommunications Mobiles Alimentés par Energie Solaire,” *thèse de magister, Université de Tlemcen, février 1992*.
- [17] [www.solarelectripower.org](http://www.solarelectripower.org).
- [18] <http://www.energie-renouvelable.fr/energie-solaire.php>.
- [19] D. Turcotte, M. Ross and F. Sheriff, “Photovoltaic Hybrid System Sizing and Simulation Tools: Status and Needs”, *PV Horizon : Workshop on Photovoltaic Hybrid Systems, Montreal, September 10, 2001, 2001-119\_OP-J\_411-HYBRND, Canada November 2001*.
- [20] H. Hassini-Belghitri, “Modelisation, Simulation et Optimisation d’un Système Hybride Eolien-Photovoltaïque”, *Mémoire De Magister, Université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen, 2010*.
- [21] N. C. Saha, S. Acharjee, M. A. S. Mollah, K. T. Rahman, F. H. M. Rafi and et al, “Modeling and Performance Analysis of a Hybrid Power System”, *Proc. of International Conference on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV)*, pp. 1-5, 2013.

- [22] M.Suha Yazici, H. A.Yavasoglu, and M.Eroglu, “A Mobile Off- Grid Platform Powered with Photovoltaic/Wind/Battery/Fuel Cell Hybrid Power Systems”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38, N° 26, pp. 11639-11645, 2013.
- [23] [http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie\\_%C3%A9olienne](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_%C3%A9olienne).
- [24] W. Shepherd, L. Zhang, “Eléctricité Génération Using Wind Power”, *World Scientific Publishing Co.Pte. Ltd. 2011 - Business & Economics*, J.F.Walker, N. JenkinS, *Wind energy technology*, John Wiley & Sons, Inc, 1997.
- [25] O. Gergaud, “Modélisation Energétique et Optimisation Economique d'un Système de Production Eolien et Photovoltaïque Couplé au Réseau et Associé à un Accumulateur”, *Thèse de Doctorat de l'école Normale Supérieure de Cachan Spécialité: Électrotechnique*, 2002.
- [26] <http://oooxygene.alwaysdata.net/eolienne.html>.
- [27] N. Laverdure, D. Roye, S. Bacha, R. Belhomme, “Technologie des Systèmes Eoliens – Intégration dans les Réseaux Electriques”, *la Revue 3EL*, N° 39, 2004.
- [28] E. HAU, “Wind-turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics”, book, *Editions Springer*, 2000.
- [29] B. Multon, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, X. Roboam, S. Astier, B. Dakyo, C. Nikita, “Etat de l'Art des Aérogénérateurs”, *L'électronique de Puissance Vecteur d'Optimisation pour les Energies Renouvelables*, Ed. NOVELECT - ECRIN, ISBN 2-912154-8-1, pp.97-154, mai 2002.
- [30] Site Internet de l'institut allemand DEWI, <http://www.dewi.de>.
- [31] <http://developpementdurable-lag.blogspot.com/2010/02/avantages-et-inconvenients-de-lenergie.html>.
- [32] <http://unblogsurlaterre.com/actualites-environnement-sur-la-terre/avantages-et-inconvenients-energie-solaire-011/>.
- [33] <http://energie-biomass.e-monsite.com/pages/definition-d-ela-biomasse.html>.
- [34] <http://defialimentairemonde.forum-canada.com/t18-la-biomasse>
- [35] <http://www.energie-renouvelable.fr/biomasse.php>.
- [36] <http://energie-biomass.e-monsite.com/pages/les-avantages.html>.
- [37] <http://energie-biomass.e-monsite.com/pages/les-inconvenients.html>.
- [38] <http://www.mem-algeria.org/francais/index.php?page=potentiels>.
- [39] R. K. Akikur, R. Saidur, H. W. Ping and K. R. Ullah, “Comparative Study of Stand-Alone and Hybrid Solar Energy Systems Suitable for Off-Grid Rural Electrification: A Review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 27, pp. 738-752, November 2013.
- [40] L. Stoyanov, “Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables”, *Thèse de Doctorat en Energétique de L'université Technique de Sofia*, 2011.
- [41] J. Duval, “Systèmes D'énergie Hybrides Solaires PV”, *Energie Solaire Photovoltaïque et Son Stockage*, ASPROM -Paris, 24 -25 novembre 2010.
- [42] G.Bekele, and B. Palm, “Feasibility Study for a Standalone Solar–Wind-Based Hybrid Energy System for Application in Ethiopia”, *Applied Energy*, Elsevier, Vol. 87, Issue 2, pp. 487–495, February 2010.

- [43] F.A. Farret and M.G. Simoes, “Integration of Alternative Sources of Energy”, books, Wiley-IEEE Press, ISBN: 978-0-471-71232-9, 504 pages, February 2006.
- [44] J. L. Bernal-Agustin and R. Dufo-Lopez, “Simulation and Optimization of Stand-Alone Hybrid Renewable Energy Systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, Vol. 13, Issue 8, pp. 2111–2118, October 2009.
- [45] B. Bhandari, S.R. Poudel, K.T. Lee, S.H. Ahn, “Mathematical Modeling of Hybrid Renewable Energy System: A Review on Small Hydro-Solar-Wind Power Generation”, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, Vol. 1, N°2, pp. 157-173, April 2014.
- [46] S. Diaf, G. Notton, M. Belhamel, M. Haddadi, and A. Louche, “Design and Techno-Economical Optimization for Hybrid PV/Wind System under Various Meteorological Conditions”, *Applied Energy*, Vol. 85, pp. 968-987, 2008.
- [47] S.Hashimoto, T. Yachi and T. Tani, “A New Stand-Alone Hybrid Power System with Wind Turbine Generator and Photovoltaic Modules for a Small-Scale Radio Base Station”, *IEEE Transactions on Power and Energy*, Vol. 125, N°11, pp. 1041-1046, 2005.
- [48] A. M Sharaf and M. A. H.El-Sayed, “A Novel Hybrid Integrated Wind-PV Micro Co-Generation Energy Scheme for Village Electricity”, *Proc. of IEEE International Electric Machines and Drives Conference(IEMDC '09)*, pp. 1244-1249, 2009.
- [49] G. C. Bakos, “Feasibility Study of a Hybrid Wind/Hydro Power-System for Low-Cost Electricity Production”, *Applied Energy*, Vol. 72, N° 3-4, pp. 599-608, 2002.
- [50] G. Bekele and G.Tadesse, “Feasibility Study of Small Hydro/PV/ Wind Hybrid System for Off-Grid Rural Electrification in Ethiopia”, *Applied Energy*, Vol. 97, pp. 5-15, 2012.
- [51] J. Ram Prabhakar and K.Ragavan, “Power Management Based Current Control Technique for Photovoltaic-Battery Assisted Wind– Hydro Hybrid System”, *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, Vol. 14, N° 4, pp. 351-362, 2013.
- [52] D. Saheb-Koussa, M. Haddadi, and M. Belhamel, “Economic and Technical Study of a Hybrid System (wind-photovoltaic-diesel) for Rural Electrification in Algeria”, *Applied Energy*, Vol. 86, N°7-8, pp. 1024-1030, 2009.
- [53] M. Fadaeenejad, M. A. M. Radzi, M. Z. A.AbKadir and H.Hizam, “Assessment of Hybrid Renewable Power Sources for Rural Electrification in Malaysia”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 30, pp. 299-305, 2014.
- [54] M. S. Ismail, M. Moghavvemi and T. M. I. Mahlia, “Technoeconomic Analysis of an Optimized Photovoltaic and Diesel Generator Hybrid Power System for Remote Houses in a Tropical Climate”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 69, pp. 163- 173, 2013.
- [55] M. Kalantar, and G. S. M. Mousavi, “Dynamic Behavior of a Stand- Alone Hybrid Power Generation System of Wind Turbine, Microturbine, Solar Array and Battery Storage”, *Applied Energy*, Vol. 87, N°10, pp. 3051-3064, 2010.
- [56] A.Menshshari, M.Ghiamy, M. M. Mir Mousavi and H. A.Bagal, “Optimal Design of hybrid Water-Wind-Solar System based on Hydrogen Storage and Evaluation of Reliability Index of System using Ant Colony Algorithm”, *International Research Journal of Applied and Basic Science*, Vol. 4, N° 11, pp. 3582-3600, 2013.

- [57] D. Xu, L. K. Jiaotong, B. Cao, “Graph-Based Ant System for Optimal Sizing of Standalone Hybrid Wind/PV Power Systems”, *Computational intelligence, Lecture Notes in Computer Science*, Springer Berlin Heidelberg, Vol. 4114, pp.1136-1146, 2006.
- [58] H. Yang, W. Zhou, L. Lu and Z. Fang, “Optimal Sizing Method for Stand-Alone Hybrid Solar–Wind System With LPSP Technology by Using Genetic Algorithm”, *Solar Energy, Elsevier*, Vol.82, Issue 4, pp.354–367, April 2008.
- [59] S. Ashok, “Optimized Model for Community-Based Hybrid Energy System”, *Renewable Energy, Elsevier*, Vol. 32, Issue 7, pp. 1155–1164, June 2007.
- [60] H. Yang, H. L. Lu, W. Zhou, “A Novel Optimization Sizing Model for Hybrid Solar-Wind Power Generation System”, *Solar Energy, Elsevier*, Vol. 81, Issue 1, pp. 76–84, January 2007.
- [61] A. Ortiz-Conde, F.J. Garcia Sanchez and J. Muci, “New Method to Extract the Model Parameters of Solar Cells from the Explicit Analytic Solutions of Their Illuminated I–V Characteristics”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 90, N°3, pp. 352 – 361, 2006.
- [62] M. Wolf and H. Rauschenbach, “Series Resistance Effects on Solar Cell Measurements”, *Advanced Energy Conversion*, Vol. 3, N°2, pp. 455 – 479, 1963.
- [63] R.M. Corless, G.H. Gonnet, D.E.G. Hare, D.J. Jeffrey and D.E. Knuth, “On the Lambert W-Function”, <http://www.cs.uwaterloo.ca/research/tr/1993/03/W.pdf>.
- [64] A. Jain and A. Kapoor, “A New Approach to Study Organic Solar Cells using Lambert W-Functions”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 86, N°2, pp. 197 – 205, 2005.
- [65] A. Jain, S. Sharma and A. Kapoor, “Solar Cell Array Parameters using Lambert W-function”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 90, N°1, pp. 16 – 23, 2006.
- [66] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule\\_photovoltaique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule_photovoltaique).
- [67] E. Ya. Shvets, S.L. Khrypko and E.I. Zubko, “Investigation of Methods Used in Calculations of Solar Cell Parameters”, *Radioelectronics and Communications Systems*, Vol. 52, N°1, pp. 16 – 23, 2009.
- [68] N. Mwiinga, “On the Dynamics of Solar Cell Optoelectronic Device Parameters with the Lambert W-Function”, <http://www.geocities.com/chichizm/fsodp.pdf>.
- [69] T. Skočil and M.P. Donsión, “Mathematical Modeling and Simulation of Photovoltaic Array”, *Proceedings of the International Conference On Renewable Energies And Power Quality, ICREPO'08*.
- [70] F.M. Gonzales Longatt, “Model of Photovoltaic Module in Matlab”, *2do Congreso Iberoamericano De Estudiantes De Ingeniería Eléctrica, Electrónica Y Computación (II Cibelec 2005)*.
- [71] R.K. Nema, S. Nema and G. Agnihotri, “Computer Simulation Based Study of Photovoltaic Cells/Modules and their Experimental Verification”, *International Journal of Recent Trends in Engineering*, Vol. 1, N°3, pp. 151 – 156, 2009.
- [72] H.R. Kamath, R.S. Aithal, P.K. Singh, A. K. Sinha and A.R. Danak, “Modeling of Photovoltaic Array and Maximum Power Point Tracking using ANN”\_ [http://journal.esrgroups.org/jes/papers/4\\_3\\_4.pdf](http://journal.esrgroups.org/jes/papers/4_3_4.pdf), Vol. 4, N°3, 2008.

- [73] V. Di Dio, D. La Cascia, R. Miceli and C. Rando, “A Mathematical Model to Determine the Electrical Energy Production in Photovoltaic Fields under Mismatch Effect”, *Clean Electrical Power, 2009 International Conference on, IEEE*, pp.46 – 51, 9-11 June 2009
- [74] H. L. Tsai, C.S. Tu and Y. J. Su, “Development of Generalized Photovoltaic Model Using MatLab/Simulink”, *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, WCECS 2008, San Francisco, USA*, October 22 - 24, 2008,
- [75] H. Mousazadeh, A. Keyhani, A. Javadi, H. Mobli, K. Abriniac and A. Sharifi, “Review of Principle and Sun-Tracking Methods for Maximizing Solar Systems Output”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, N°8, pp. 1800 – 1818, 2009.
- [76] L. Lu, “Investigation on Characteristics and Application of Hybrid Solar/Wind Power Generation Systems”, *Ph. D Thesis, the Hong Kong Polytechnic University*, 2004.
- [77] L. Lu and H. X. Yang, “A Study on Simulation of the Power Output and Practical Models for Building Integrated Photovoltaic Systems”, *ASME Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 126, N°3, pp. 1-7, 2004.
- [78] M. Belhadj, T. Benouaz et A. Cheknane, “Approche Appliquée à l’Optimisation et Dimensionnement d’un Système Photovoltaïque: Application dans le Site de Bechar (Algérie)”, *Actes de la Conférence Internationale sur les Energies Renouvelables et l’Environnement, Monastir, Tunisie*, 19 Mars 2009.
- [79] T. Markvart, ‘Solar Electricity’, *John Wiley & Sons, Chichester*, 1994.
- [80] S. Diaf, D. Diaf, M. Belhamel, M. Haddadi, A. Louche, “A Methodology for Optimal Sizing of Autonomous Hybrid PV/Wind System”, *Energy Policy*, Vol. 35, N°11, pp. 5708 – 5718, 2007.
- [81] B.S. Borowy, Z.M. Salameh, L. Pierrat and Y.J. Wang, “Methodology for Optimally Sizing the Combination of a Battery Bank and PV Array in a Wind/PV Hybrid System”, *IEEE Transactions on Energy Conversion, Congrès, 1995 IEEE/PES Summer Meeting, Portland, OR, USA (23/07/1995)*, Vol. 11, N°2, pp. 367 -375, 1996.
- [82] F. Jamati, “Étude Numérique D’une Éolienne Hybride Asynchrone ”, *Mémoire Présenté en vue de L’obtention du Diplôme de Maîtrise ès Sciences Appliquées, Département de Génie Mécanique Ecole Polytechnique de Montréal*, Août 2011.
- [83] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, “ Éoliennes”, *Techniques de l’Ingénieur, traité Génie mécanique*, Doc. BM 4 640.
- [84] <http://www.developpement-durable.gouv.fr/energie/recherche/energie-eolienne.htm>, 05/06/2007.
- [85] G. Gaudiosi , “Offshore Wind Energy Prospects”, *Renewable Energy*, Vol. 16, Issues 1-4, pp. 828-834, January-April 1999.
- [86] S. Delenclos, “L’énergie Eolienne 2011-2012”, *ULCO Université du Littoral Coté D’opale, génie thermique et énergie*, 2012.
- [87] <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca23015-il>.
- [88] <http://www.bing.com/search?q=NACA+23015%2Bpdf&qsn=&form=QBRE&pq=naca+23015%2Bpdf&sc=0-11&sp=-1&sk=&cvid=7947ad1b8837481cb2fbabae16a6c2b>.
- [89] L. Charles Ladson, et al, “Computer Program To Obtain Ordinates for NACA Airfoils”, *NASA Technical Memorandum 4741m*, December 1996.

- [90] D. LE Gourières (G), “Théorie Conception et Calcul Pratique des Installations”, *Livre Energie Eolienne, édition EYROLLES*, 1980 et 2008.
- [91] A. Belguidoum, “Les Aspects Technologiques des Eoliennes et Leur Utilisation dans la Production d’Energie dans les Zones Arides”, *Mémoire Génie Mécanique, Université de Biskra*, 2012.
- [92] A. Norimichi Nanami, “Vibration and Structural Response of Hybrid Wind Turbine Blades”, *Thesis, Submitted to the Office of Graduate Studies of Texas A&M University*.
- [93] Z. L. Mahri, M. S. Rouabah et S. Zid, “Calcul des Efforts Aérodynamiques Agissant sur les Pales d’une Petite Eolienne”, *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 10, N°2, pp. 241 – 256, 2007.
- [94] S. Rechka, G. Roy, S. Denetiere et J. Mahseredjian, “Modélisation de Systèmes Electromécaniques Mult-Masses à Base de Machines Asynchrones, A L’aide des Outils Matlab et EMTP, avec Application aux Eolienne”, *EPM-RT-2004-04, Département de Génie Electrique Ecole Polytechnique de Montréal*.
- [95] S. A. Kalogirou, “Solar Thermal Collectors and Applications”, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 30, Issue 3, pp. 231–295, 2004.
- [96] [www.tecsol.fr/letters/articles/documents/ecssolaire3.pdf](http://www.tecsol.fr/letters/articles/documents/ecssolaire3.pdf).
- [97] A. Zaatri, N. Kacem Chaouche, M. Karaali, “Etude de Bioréacteurs Anaérobies Expérimentaux pour la Production de Méthane”, *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 14, N°2, pp. 291 – 300, 2011.
- [98] W. C. Hu, K. Thayanithy, C.F. Forster, “A Kinetic Study of the Anaerobic Digestion of Ice-Cream Wastewater”, *Process Biochem*, Vol. 37, Issue 9, pp. 965–971, April 2002.
- [99] R. Coudure, J. Castaing, “Bilan de Fonctionnement d’une Unité de Méthanisation de Lisier de Porc”, *JournéesRech. Porcine en France*, 29, pp. 335-342, 1997.
- [100] J.A. Gow, and C.D Manning, “ Photovoltaic Converter System Suitable for use in Small Scale Stand Alone or Grid Connected Applications ”, *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, Vol. 147, N°6, pp. 535 – 543, November 2000.
- [101] H. Wilk, “Inverters for Photovoltaic System, in Photovoltaic Systems”, *Comett-Book, Fraunhofer –ISE, Freiburg, Germany*, 1995.
- [102] M.Yantsch, and C.W.G. Verhoere, “Inverters with Three Phase Output and Without Electrolyte Capacitor for Improved Lifetime, Efficiency and Costs of Grid Connected Systems”, *P7B.6, 14<sup>th</sup> EC PVSEC Barcelona, Spain*, 1997.
- [103] D. Grant G Hearn, W Maggs and I. Gonzalez, “ An Electrostatic Charge Meter Using a Microcontroller Offers Advanced Features and Easier ATEX Certification”, *Journal of Electrostatics*, Vol. 67, N°2–3, pp. 473–476, May 2009.
- [104] A. Eida, M. Abdel-Salam, H. El-Kishky and T. El-Mohandes, “Simulation and Transient Analysis of Conventional and Advanced Aircraft Electric Power Systems with Harmonics Mitigation ”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 79, N°4, pp. 660 – 668, 2009.
- [105] R. Akkaya and A. A. Kulaksiz, “A Microcontroller-Based Stand-Alone Photovoltaic Power System for Residential Appliances ”, *Applied Energy* Vol. 78, N°4, pp. 419–431, 2004.
- [106] F.Barone, “ Future Developments of Inverters ”, *Proceedings of Seminar on Lead Acid Batteries, Sydney*, 16-17th November, 1992.
- [107] L.S. Pontriaguine, V.G. Boltianski and R.V. Gamkrelidze, “Théorie Mathématique des Processus Optimaux”, *Editions MIR, Moscou*, vol.1, pp 317, 1974.

- [108] A. Maalouf, “Commande Numérique d’un Alternateur-Synchroniseur à Trois Etages en Mode Générateur”, *JCGE’08 LYON*, 16 et 17 décembre 2008.
- [109] K. Górecki, “Non-Linear Average Electrothermal Models of Buck and Boost Converters for SPICE”, *Microelectronics Reliability*, Vol. 49, N°4, pp. 431-437, 2009.
- [110] S. Banerjee, D. Prasad, J. Pal, “Design, Implementation, and Testing of a Single Axis Levitation System for the Suspension of a Platform”, *ISA Transactions*, Vol. 46, N°2, pp 239–246, 2007.
- [111] M.H. Ali, M. Park, I.K. Yu, T. Murata, J. Tamura and W. Bin, “Enhancement of Transient Stability by Fuzzy Logic-Controlled SMES Considering Communication Delay”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 31, N° 7–8, pp 402–408, Septembre 2009.
- [112] S. Chikhi, M.D. Draou, F. Chikhi, A. Mehdaoui et A. Mammeri, “ Etude, Modélisation et Réalisation d’un Convertisseur DC/AC pour Système de Pompage Photovoltaïque de 4 kVA”, *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 16, N°2, pp. 201 – 212, 2013.
- [113] A.Zaatri and T.Kerbache, “Design of DC-DC PWM Converter Dedicated for a Photovoltaic System”, *World Renewable Energy Congress VII (WREC 2002)*, Cologne, Germany, 22 June – 5 July, 2002.
- [114] P. Gilman, “A Comparison of Three Free Computer Models for Evaluating PV and Hybrid System Designs: HOMER, HYBRID2, and RETSCREEN”, 2007, from [http://swera.unep.net/uploads/media/Gilman\\_Solar2007.pdf](http://swera.unep.net/uploads/media/Gilman_Solar2007.pdf)
- [115] H. Polinder, M. R. Dubois, and J.G. Slootweg, “Generator systems for wind turbines. Proc. of the international conference and exhibition on power conversion”, *intelligent motion and power quality*, Nuremberg, 2003.
- [116] <http://www.capenergies.fr/index.php?Couplage-et-integration-des-systemes-energetiques>
- [117] <http://www.lindo.com/>
- [118] A.K. Akella, M.P. Sharma, and R.P. Saini. “Optimum Utilization of Renewable Energy Sources in a Remote area,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11: 894–908, 2007.
- [119] D. Manolagos, G. Papadakis, D. Papantonis and S. Kyritsis. “ A Simulation-Optimization Program for Designing Hybrid Energy Systems for Supplying Electricity and Fresh Water Through Desalination to Remote Areas,” *Journal Energy*, Elsevier, 26: 679–704, 2001.
- [120] M.K. Deshmukha and S.S. Deshmukhb. “Modeling of Hybrid Renewable Energy Systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, 12: 235–249, 2008.
- [121] R. Ramakumar, P.S. Shetty, and K. Ashenai. “A Linear Programming Approach to the Design of Integrated Renewable Energy Systems for Developing Countries,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. EC-1, No. 4, 1986.
- [122] <http://archives.math.utk.edu/software/msdos/discrete.math/tslin/.html>
- [123] A. Zaatri, “Les Techniques de la Recherche Opérationnelle: Algorithme du Simplexe”, *Les Mathématiques à L’université*, Constantine, Mars 2002.
- [124] [http://www.academia.edu/5765110/Formulation\\_dun\\_programme\\_lin%C3%A9aire\\_PL](http://www.academia.edu/5765110/Formulation_dun_programme_lin%C3%A9aire_PL)
- [125] <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=6353>
- [126] <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/sciences-fondamentales-th8/methodes-numeriques-42105210/optimisation-en-nombres-entiers-af1251/methodes-de-programmation-lineaire-continue-af1251niv10003.html>



# Liste des abréviations

## **Liste des abréviations**

- ER:** Energies Renouvelables.
- EVA:** Ethylène-Acétate de Vinyle (en anglais: Ethylene-Vinyl acetate).
- MPPT :** Maximum Power Point Tracking.
- NOCT:** Température Nominale de Fonctionnement de la Cellule Solaire (Nominal Operating Cell Temperature).
- PL:** Programmation Linéaire.
- PLNE:** Programmation Linéaire en Nombres Entiers.
- PV:** Photovoltaïque.
- RHS:** Right Hand Sid.
- RO:** Recherche Opérationnelle.
- Sbr:** Solution de Base Réalisable.
- SEH:** Systèmes d'Energie Hybrides.
- TEP:** Tonnes Equivalent Pétrole.
- VR :** Véhicule Récréatif.

# **Elaboration of an Optimal Strategy for the Exploitation of Combined Renewable Energies**

## **Abstract**

The research topic formulated initially concerned the study and the development of an optimal strategy for the operation of hybrid energy systems based on renewable energy.

To do this, we theoretically and experimentally studied some photovoltaic systems. The procedure was the analysis of the internal and external parameters of photovoltaic cells based on the code data of the illumination measurements, the temperature over a long period. We studied the theory of wind systems and performed experiments on an experimental system developed locally. We studied the theoretical models for the production of methane by anaerobic digesters, and carried out experiments on an experimental digester performed locally. We studied the theory of photo-thermal systems and conducted tests on photo-thermal developed locally.

Given the energy loss during conversion and regulation, we studied the conversion of electrical energy from Renewable Energy systems. We conducted the study and choppers prototype simulation PWM (Pulse Width Modulation) to minimize energy conversion losses. The systems considered are nonlinear systems with more or less filter first and second order.

To reduce the cost of energy system based on a single renewable resource; we have adopted an approach of considering based on zonal characteristics and demand, the combination of two or more renewable resources that are available (solar photovoltaic, solar photo-thermal, wind power, biogas obtained by anaerobic bio reactors).

We used an optimal allocation of management resources ER model that exploits the internal and environmental characteristics. Linear programming model has been used in the case where resources are continuous and in case where these resources are discrete units, they also available.

The program is generic and can be used for any other ER resource provided to present the expression that connects the internal annual energy and environmental characteristics.

**Keywords:** hybrid energy systems, renewable energy, photovoltaic systems, wind energy systems, photothermal systems, anaerobic digesters, PWM, Linear Programming.

## ال عن وان : نظوي إساتي جية العهل ال تغال ل هس نوك لل طلق قلامت جدة

### ملخص:

يتعلق موضوع البحث بوساسة ووضع إستراتيجية نظمية لتشغيل أنظمة الطاقة لهيمنة اعتماداً على الطاقات المتجددة.

من أجل ذلك : -درسن لبعض الأنظمة الكهروضوئية نظرياً وتجارياً. وكان لنا إجرائنا تحليل على التغيرات الداخلية ولخارجي لنقل خبايا الضوئية لتتقنا على جميع الجوانب التي انتمنا لمثل في اساتك الإضاءة، ودرجة لحرارة على مهن فترة طويلة.

-كنا كدرسن ان نظرياً الأنظمة الهوائية وأجينا كجارب على النظام المطور من قبلنا  
-درسن النماذج النظرية لإنتاج غاز الهيدروجين عن طريق التحليل الكهربائي. كما أجينا كجارب على تحليل كيميائي في المختبر

-و درسن النظام الضوئية حراري نظرياً وأجينا عليه اعتبارات متطورة طبعياً.

ونظراً لتعلقنا بالطاقات المتجددة، ولتعزيز التحول والتكامل، درسننا تحويل الطاقة الكهروضوئية من أنظمة الطاقة المتجددة. وأجينا دراسة ومحاكاة لنموذج لمروحيات PWM (تحويل عرض النض) لنقل خبايا تحوّل الطاقة. والأنظمة الهوائية هي أنظمة غير خطية وواسطة أكثر أو أقل مع المرشح الأول لتوليد درجة.

للحصول على أفضل أداء لنظام الطاقة الذي يعتمد على مورد متجدد واحد فقد اعتمدنا نهجاً فائقاً لنظرياً خصائص المناطق والطلب، والجمع بين نظرياً وأكثراً من الموارد المتجددة المتوفرة للطاقة للشهيرة الضوئية، الطاقة الشمسية - لحرارية، طاقة الرياح و طاقا غاز الهيدروجين المتحصل على هب ولس طاقا مفاعلات الهوائية الهوائية ().

استخدمنا نموذج إداري لتوزيع الأمثل لموارد الطاقة المتجددة الذي يستغل الخصائص الداخلية والهوائية بقدرنا ممكن من أجل برمجة الخطة في حالة الموارد المتوفرة في حالة الموارد المتاح في وحداتنا فصلية.

هناك برنامج هو عام، هيكلنا لتتقنا دامه لأي مورد متجدد آخر يشترك في المعيار التي تربط الطاقة الهوائية المتجددة بالخصائص الداخلية والهوائية.

**الكلمات المفتاحية:** أنظمة الطاقة لهيمنة، الطاقات المتجددة، النظام الكهروضوئي، النظام الهوائي، النظام الضوئية حراري، RWM البرمجة الخطة

## Résumé

Le sujet de recherche formulé initialement concernait l'étude et l'élaboration d'une stratégie optimale pour l'exploitation de systèmes énergétiques hybrides basées sur les énergies renouvelables.

Pour ce faire, nous avons étudié théoriquement et expérimentalement quelques systèmes photovoltaïques. On a ainsi procédé à l'analyse des paramètres internes et externes des cellules photovoltaïques en nous basant sur le recueil des données de mesures de l'éclairement et de la température sur une longue période. De même nous avons étudié la théorie des systèmes éoliens et effectué des expériences sur un système expérimental développé localement. Nous avons particulièrement étudié les modèles théoriques pour la production du méthane par digesteurs anaérobies et effectué des expériences sur un digesteur expérimental réalisé localement. Nous avons également étudié la théorie des systèmes photo-thermiques et effectué des essais sur les mêmes systèmes développés localement.

Compte tenu des pertes d'énergie lors de la conversion et de la régulation, nous avons étudié la conversion d'énergie électrique provenant des systèmes d'énergies renouvelables. Nous avons effectué l'étude et la simulation de prototype d'hacheurs PWM (Modulation de Largeur d'Impulsions) pour minimiser les pertes d'énergie par conversion. Les systèmes considérés sont des systèmes non linéaires par plus ou moins avec filtre du premier et du deuxième ordre.

En vue de réduire le coût du système énergétique basé sur une seule ressource renouvelable, nous avons adopté une approche qui consiste à considérer en fonction des caractéristiques zonales et de la demande, la combinaison de deux ou plusieurs ressources renouvelables qui sont disponibles (solaire photovoltaïque, solaire photo - thermique, énergie éolienne, biogaz obtenu par bio réacteurs anaérobies).

Nous avons utilisé un modèle de gestion de la répartition optimale des ressources à ER qui exploite les caractéristiques internes et environnementales. La modélisation en programmation linéaire a été utilisée dans le cas où les ressources sont continues ainsi que dans le cas où ces ressources sont disponibles en unités discrètes.

Le programme est générique et peut être exploité pour toute autre ressource ER à condition de présenter l'expression qui relie l'énergie annuelle produite aux caractéristiques internes et environnementales.

**Mots clés:** Systèmes Energétiques Hybrides, Energies Renouvelables, Systèmes Photovoltaïques, Systèmes d'Energie Eolienne, Systèmes Photothermiques, PWM, Programmation Linéaire.