

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR

\*\*\*

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES

\*\*\*



**THESE**

Présentée par

**M. Claude LISHOU**

pour obtenir le grade de

**Docteur d'Etat ès-Sciences**

**Etude, Modélisation et Simulation en temps réel de systèmes  
photovoltaïques à stockage d'énergie.  
Application à la Sûreté de Fonctionnement  
de centrales solaires hybrides.**

Soutenue le 30 Janvier 1998 devant la commission d'examen:

**Président:** M. Libasse DIOP, Professeur, Doyen de la Faculté des Sciences et Techniques

**Examineurs:** M. Mouhamadou DIOP SALL, Professeur à l'UCAD  
M. Christian Sina DIATTA, Professeur à l'UCAD  
M. Ahmadou WAGUE, Professeur à l'UCAD  
M. Ludovic PROTIN, Professeur à l'Université du Havre  
M. El Hadji Abib NGOM, Maître de Conférence à l'E.S.P  
M. Oumar SOCK, Directeur de l'Ecole Supérieure Polytechnique  
M. Bonaventure MVE-ONDO, Directeur du Bureau Afrique de l'AUPELF



UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR

\*\*\*

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES

\*\*\*



## THESE

Présentée par

**M. Claude LISHOU**

pour obtenir le grade de

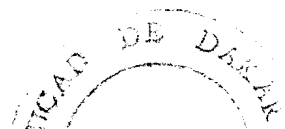
**Docteur d'Etat ès-Sciences**

**Etude, Modélisation et Simulation en temps réel de systèmes  
photovoltaïques à stockage d'énergie.  
Application à la Sûreté de Fonctionnement  
de centrales solaires hybrides.**

Soutenue le 30 Janvier 1998 devant la commission d'examen:

**Président:** M. Libasse DIOP, Professeur, Doyen de la Faculté des Sciences et Techniques

**Examineurs:** M. Mouhamadou DIOP SALL, Professeur à l'UCAD  
M. Christian Sina DIATTA, Professeur à l'UCAD  
M. Ahmadou WAGUE, Professeur à l'UCAD  
M. Ludovic PROTIN, Professeur à l'Université du Havre  
M. El Hadji Abib NGOM, Maître de Conférence à l'E.S.P  
M. Oumar SOCK, Directeur de l'Ecole Supérieure Polytechnique  
M. Bonaventure MVE-ONDO, Directeur du Bureau Afrique de l'AUPELF



*A mon père Arthur-LISHOU (In memoriam)*

*A Maman Suzanne*

*A mes frères et soeurs*

*A Adeline, Stanley et Jonathan*

*Mes sincères remerciements à*

*Mes honorables Professeurs,*

*Mes honorables Encadreurs,*

*Tous ceux qui m'ont supporté et soutenu dans les moments difficiles.*

*Que tous trouvent ici, l'expression de toute ma reconnaissance*

*Le travail que nous présentons dans ce mémoire a été réalisé dans le cadre des recherches effectuées sur les énergies renouvelables à l'École Supérieure Polytechnique (Centre de Dakar) au Laboratoire d'Énergies Renouvelables, "Groupe de Traitements Informatiques", Jeune Équipe de Recherches n°6008 associée à l'AUPELF-UREF.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à:*

*Monsieur le Professeur Libasse DIOP, Doyen de la Faculté des Sciences et Techniques, qui nous a accueilli et parrainé au sein de sa Faculté. Il n'a pas ménagé ses encouragements tout au long de la réalisation de ce travail, et nous fait l'honneur de présider le jury de thèse.*

*Monsieur le Professeur Mouhamadou DIOP SALL pour sa constante disponibilité et le grand honneur qu'il nous fait en acceptant d'examiner ce travail.*

*Monsieur le Professeur Christian Sina DIATTA, pour l'intérêt qu'il a toujours manifesté à l'égard de ce travail, son ouverture d'esprit et son dynamisme mais surtout ses orientations scientifiques, malgré son emploi du temps très chargé.*

*Monsieur le Professeur Ahmadou WAGUE, qui malgré ses nombreuses occupations a accepté de participer au jury.*

*Je remercie très sincèrement:*

*Le Professeur L. PROTIN, Directeur du Laboratoire d'Électronique de Puissance et d'Informatique Industrielle à la Faculté des Sciences de l'Université du Havre. Que Monsieur PROTIN trouve ici, notre profonde reconnaissance pour l'intérêt tout particulier qu'il a attaché à notre formation en Informatique Industrielle et l'encadrement sans faille dont nous avons été l'objet. Ses précieux conseils et sa contribution remarquable ont permis l'heureux aboutissement de nos travaux.*

*Monsieur Abib-NGOM, Maître de Conférences et Directeur des Études à l'ESP, pour son entière confiance d'avoir accepté la direction de ce travail. Je suis particulièrement satisfait de sa collaboration scientifique qui a contribué à mener à bien ce travail.*

*Monsieur Oumar SOCK, Directeur de l'École Supérieure Polytechnique, pour nous avoir toujours fait confiance. Il nous a facilité l'accès aux accords de coopération et crédits indispensables sans lesquels ce travail n'aurait pu aboutir. Nous sommes particulièrement fiers de contribuer sous sa direction, à l'édification de l'Institution d'enseignement et de recherches technologiques la plus prestigieuse de la sous-région.*

*Monsieur Bonaventure MVE-ONDO, Ancien Recteur de l'Université Omar BONGO, Directeur du Bureau Afrique de l'AUPELF-UREF pour l'ensemble de la gestion des programmes scientifiques du Fonds Francophone de la Recherche et en particulier d'avoir promu notre laboratoire comme Jeune Équipe de Recherches associée à l'UREF. Que Monsieur MVE-ONDO transmette à la Direction de la Recherche, aux Conseillers scientifiques et à tout son personnel notre reconnaissance discrète mais profonde.*

*Monsieur le Professeur Mansour KANE, Directeur du CERER pour avoir facilité le bon déroulement de ces travaux,*

*Que l'on me pardonne de ne pas pouvoir nommer tous les collègues de l'Université du Havre qui m'ont apporté leur concours. Je les remercie par l'intermédiaire du Président de l'Université J. LE BAS, et du Doyen de la Faculté des Sciences et Techniques, Madame le Professeur F. FLEURY.*

*Une pensée particulière pour l'équipe doctorale de l'Université Paris XII. Je tiens à exprimer ma gratitude à Messieurs CHAPPEY, GIRARDEY, CHAVAND, MADANI, SFAXI, ... qui m'ont encouragé et accueilli dans leur laboratoire et qui de loin m'ont apporté leur expérience. Qu'ils soient assuré de ma reconnaissance et de mon amitié.*

*A mes maîtres, G. MASSELOT, M. VILLAIN, P. ROUAN*

*Monsieur Mansour Assani Dahouenon, Directeur du Projet Sénégal-Allemand, pour nous avoir soutenu et autorisé à expérimenter sur les centrales solaires des communautés rurales de Ndiebel et Diaoulé.*

*Monsieur A. CORENTHIN et T. SECK pour leur complicité et leur aide sur bien des plans,*

*A Monsieur Siméon Fongang, pour ses conseils de « sage »*

*Messieurs M. ADJ, NG. DIEYE, G. SOW et P. NDIAYE "noyau dur" du Département Génie Electrique pour avoir facilité le bon déroulement de ces travaux,*

*Tout le personnel des Laboratoires d'Energies Renouvelables, d'Energétique Appliquée et de Physique de l'Atmosphère,*

*Aux familles, parents et alliés ARIAL, KANDE, AKONDE, SENOU, FAYEMI, AEDIRAN, SANTOS, DIA, FALL, EGOUNLETY, SOMBORN, ASSANI, NDIAYE, SY, PREIRA, LOPEZ, ...*

*A Roberto et Marcel pour leur fidélité et engagement à mes côtés,*

*Enfin, qu'il me soit permis de remercier mon épouse de m'avoir soutenu à réaliser ce travail, pour sa compréhension et pour le courage de prendre en charge la plupart des tâches de la famille.*

*Que mes fils reçoivent ce travail en gage de l'amour paternel, qui parfois a pu être négligé au profit de la réalisation de cette thèse. Ce mémoire leur est dédié à titre de remerciements pour tout ce qu'ils m'ont apporté pour mener à bien ce travail.*

# SOMMAIRE

<b>CHAPITRE 1 - LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES .....</b>	<b>5</b>
<b>1.1 INTRODUCTION .....</b>	<b>6</b>
<b>1.2 DEFINITION DU SYSTEME ETUDIE .....</b>	<b>6</b>
<b>1.3 LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE.....</b>	<b>7</b>
1.3.1 DÉFINITION .....	7
1.3.2 FONCTIONNEMENT .....	8
1.3.3 CELLULE IDÉALE .....	10
1.3.4 CELLULE RÉELLE .....	11
1.3.5 INFLUENCES DE L'ÉCLAIREMENT ET DE LA TEMPÉRATURE .....	13
<b>1.4 LE MODULE PHOTOVOLTAÏQUE .....</b>	<b>13</b>
<b>1.5 LE GENERATEUR: ENSEMBLE DE MODULES.....</b>	<b>15</b>
1.5.1 ARCHITECTURE .....	15
1.5.2 PROTECTION .....	16
<b>1.6 LE STOCKAGE D'ENERGIE .....</b>	<b>17</b>
1.6.1 RÔLE ET CARACTÉRISTIQUES DU STOCKAGE PAR ACCUMULATEURS .....	17
1.6.2 DÉFINITIONS .....	18
1.6.3 FACTEURS D'INFLUENCE.....	23
1.6.4 ACCUMULATEURS AU PLOMB.....	24
1.6.5 ACCUMULATEURS AU CADMIUM-NICKEL .....	25
1.6.6 CARACTÉRISTIQUES COMPARÉES .....	25
1.6.7 DÉVELOPPEMENTS RÉCENTS SUR LES BATTERIES .....	26
<b>1.7 LE GENERATEUR D'APPOINT.....</b>	<b>28</b>
1.7.1 COMPLÉMENTARITÉ DE SOURCES D'ÉNERGIE.....	28
1.7.2 CONVERSION DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE: STRUCTURE DES SYSTÈMES DE CONVERSION.....	29
1.7.3 CONVERSION OPTIMALE DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE.....	32
<b>1.8 MODES DE COUPLAGE DES SOURCES D'ENERGIES RENOUVELABLES.....</b>	<b>34</b>
1.8.1 FONCTIONNEMENT AVEC STOCKAGE D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE .....	34
1.8.2 FONCTIONNEMENT "AU FIL DU SOLEIL" .....	34
1.8.3 FONCTIONNEMENT AVEC BATTERIE TAMPON.....	35
<b>1.9 FONCTIONNEMENT OPTIMAL DE L'ENSEMBLE           GENERATEUR - ACCUMULATEURS - CHARGE .....</b>	<b>37</b>
1.9.1 FONCTIONNEMENT OPTIMAL DU GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE.....	37
1.9.2 CONVERTISSEUR CONTINU-CONTINU.....	37
1.9.3 RECHERCHE DU POINT DE FONCTIONNEMENT OPTIMAL .....	38
1.9.4 CONVERTISSEURS CONTINU-ALTERNATIF .....	39
1.9.5 COUPLAGE PAR ONDULEUR D'UNE CHARGE ALTERNATIVE COMPLEXE AU GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE .....	41
<b>1.10 GESTION, REGULATION ET FONCTIONNEMENT DU SYSTEME .....</b>	<b>44</b>
1.10.1 PRINCIPE DE GESTION.....	44
1.10.2 RÉGULATION .....	46
1.10.3 ANALYSE DU FONCTIONNEMENT DE L'ENSEMBLE DU SYSTÈME .....	47
<b>1.11 CONCLUSION.....</b>	<b>53</b>
<b>Liste des symboles .....</b>	<b>55</b>

<b>CHAPITRE 2 - MODELISATION ET SIMULATION DES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES.....</b>	<b>56</b>
<b>2.1 - INTRODUCTION.....</b>	<b>57</b>
<b>2.2 - MODELISATION DES ELEMENTS CONSTITUTIFS DU SYSTEME .....</b>	<b>58</b>
2.2.1 BASE DE DONNÉES DE L'IRRADIATION SOLAIRE.....	59
2.2.2 MODÈLE POUR LA TEMPÉRATURE AMBIANTE .....	60
2.2.3 MODÈLE COURANT-TENSION DU GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE .....	62
2.2.4 MODÈLE DE LA TEMPÉRATURE DES CELLULES.....	64
2.2.5 MODÈLE POUR LA CHARGE .....	65
2.2.6 MODÈLE DU RÉGULATEUR.....	66
2.2.7 MODÈLES DES CONVERTISSEURS STATIQUES.....	66
2.2.8 MODÈLE DE COMPORTEMENT DES BATTERIES D'ACCUMULATEURS .....	67
2.2.8.1 Equation décrivant la décharge.....	69
2.2.8.2 Equation décrivant la charge.....	72
2.2.8.3 Calcul de l'état de charge.....	73
2.2.9 MODÈLE DE L'ÉOLIENNE D'APPOINT .....	74
<b>2.3 - LES MODELES ANALYTIQUES PAR REGRESSION .....</b>	<b>83</b>
<b>2.4 - REALISATION DU LOGICIEL DE DIMENSIONNEMENT ET DE SIMULATION DIM_SOL.....</b>	<b>87</b>
2.4.1 LE DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL .....	89
2.4.2 ASPECT LOGICIEL .....	89
2.4.2.1 Logiciel de dimensionnement des installations.....	90
2.4.2.2. Logiciel de simulation .....	97
<b>2.5 CONCLUSION.....</b>	<b>100</b>
<b>LISTE DES SYMBOLES .....</b>	<b>101</b>
<b>CHAPITRE 3 - REALISATION MATERIELLE ET LOGICIELLE D'UN PROTOTYPE DE MICROCENTRALE PHOTOVOLTAÏQUE HYBRIDE.....</b>	<b>103</b>
<b>3.1 - INTRODUCTION.....</b>	<b>104</b>
<b>3.2 - GESTION MULTITACHE ET STRUCTURE MULTIPROCESSEURS.....</b>	<b>104</b>
3.2.1 CAHIER DES CHARGES .....	104
3.2.2 GESTION DES TÂCHES .....	106
3.2.2 STRUCTURE MULTIPROCESSEURS .....	109
3.2.3 - MODELISATION DU PROTOCOLE DE COMMUNICATION.....	112
<b>3.3 - REALISATION MATÉRIELLE DE LA STRUCTURE MULTIPROCESSEURS.....</b>	<b>113</b>
3.3.1 - CHAÎNE D'ACQUISITION.....	113
3.3.2 - LA COMMANDE NUMÉRIQUE .....	117
<b>3.4 - REALISATION LOGICIELLE DE LA STRUCTURE MULTIPROCESSEURS.....</b>	<b>122</b>
3.4.1 - PROCÉDURE DE MESURE.....	122
3.4.2 - PROCÉDURE DE COMMUNICATION.....	123
3.4.3 - PROCÉDURE D'OPTIMISATION .....	124
3.4.4 - PROCÉDURE DE TRANSFERT D'ÉNERGIE .....	125
3.4.5 - SUPERVISION.....	126
<b>3.5 - CONCLUSION.....</b>	<b>132</b>
<b>LISTE DES SYMBOLES .....</b>	<b>133</b>

<b>CHAPITRE 4 - SURETE DE FONCTIONNEMENT ET MAINTENANCE D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE HYBRIDE.....</b>	<b>134</b>
<b>4.1 - INTRODUCTION .....</b>	<b>135</b>
<b>4.2 - RAPPELS SUR LES MATHÉMATIQUES UTILISÉES EN SURETE DE FONCTIONNEMENT.....</b>	<b>135</b>
4.2.1 - RELATIONS FONDAMENTALES EN SÛRETÉ DE FONCTIONNEMENT .....	135
<i>A. Défaillance instantanée et lois de fiabilité .....</i>	<i>135</i>
<i>B. MTBF (Moyenne des Temps de Bon Fonctionnement).....</i>	<i>136</i>
<i>C. Cas d'un taux de défaillance <math>\lambda(t)</math> constant, loi exponentielle.....</i>	<i>136</i>
<b>4.3 - MODELES MATHÉMATIQUES.....</b>	<b>137</b>
4.3.1 - LOIS DISCRÈTES .....	137
4.3.2 - LOIS CONTINUES .....	139
<i>Loi de Weibull.....</i>	<i>139</i>
<i>Loi exponentielle.....</i>	<i>139</i>
<i>Lois normale et log-normale.....</i>	<i>139</i>
<b>4.4 - OUTILS DE LA SURETE DE FONCTIONNEMENT .....</b>	<b>140</b>
<b>4.5 - RESULTATS SUR LA FIABILITE DES SYSTEMES.....</b>	<b>140</b>
4.5.1 SYSTÈME SÉRIE.....	140
4.5.2 SYSTÈMES PARALLÈLES SIMPLES .....	141
4.5.3 SYSTÈMES PARALLÈLES PARTICULIERS .....	141
<b>4.6 - APPLICATION A LA MICROCENTRALE.....</b>	<b>142</b>
4.6.1 LE SYSTÈME DE PUISSANCE .....	142
4.6.2 LE SYSTÈME DE COMMANDE.....	143
4.6.3 BANQUES DE DONNÉES DE FIABILITÉ.....	144
4.6.4 ÉTUDE QUALITATIVE.....	148
4.6.5 ÉTUDE QUANTITATIVE .....	148
<i>A. Méthode du diagramme de succès (MDS).....</i>	<i>148</i>
<i>B. Méthode de l'Arbre des Causes .....</i>	<i>150</i>
<i>C. Méthode de l'Espace d'Etats.....</i>	<i>153</i>
<b>4.7 - CONCLUSION SUR LES METHODES.....</b>	<b>158</b>
<b>LISTE DES SYMBOLES.....</b>	<b>158</b>
<b>CHAPITRE 5 - VALIDATION SUR SITE: LESMICROCENTRALES DE NDIEBEL ET DIAOULE.....</b>	<b>159</b>
<b>5.1 - INTRODUCTION .....</b>	<b>160</b>
<b>5.2 - CONCEPTION TECHNIQUE.....</b>	<b>160</b>
5.2.1 - GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE.....	160
5.2.2 - LE STOCKAGE .....	161
5.2.3 - RÉGULATEUR DE CHARGE.....	162
5.2.4 - ONDULEURS .....	163
5.2.5 - UNITÉ DE DISTRIBUTION .....	164
5.2.6 - RÉSEAU DE DISTRIBUTION .....	164
5.2.7 - MESURES.....	165
5.2.7.1 - <i>Grandeurs météorologiques .....</i>	<i>165</i>
5.2.7.2 - <i>Grandeurs électriques .....</i>	<i>165</i>
5.2.8 - PROTECTION.....	166
5.2.8.1 - <i>Protection des personnes.....</i>	<i>166</i>
5.2.8.2 - <i>Protection contre les surintensités.....</i>	<i>166</i>



5.2.8.3 - Protection contre la foudre.....	167
<b>5.3 - FIABILITÉ.....</b>	<b>168</b>
<b>5.4 - PERFORMANCES ET BILAN ÉNERGÉTIQUE.....</b>	<b>168</b>
<b>5.5 - ETUDE ET REALISATION D'UN LOGICIEL D'ANALYSE DES PERFORMANCES D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE.....</b>	<b>185</b>
5.5.1 - INTRODUCTION.....	185
5.5.2 - CAHIER DES CHARGES.....	185
5.5.2.1 - Le système photovoltaïque.....	185
5.5.2.2 - Le système d'acquisition.....	186
5.5.2.3 - Grandeurs mesurées.....	186
5.5.2.4 - Objectifs.....	187
5.5.3 - DÉVELOPPEMENT LOGICIEL.....	187
5.5.3.1- Généralités.....	187
5.5.3.2 - Résultats de l'analyse.....	188
5.5.3.3 - Equations de modélisation paramétrique.....	189
5.5.3.4 - Présentation logicielle.....	190
5.5.4 - PERSPECTIVES.....	195
<b>5.6 - CONCLUSION.....</b>	<b>196</b>
<b>LISTE DES SYMBOLES .....</b>	<b>197</b>
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>198</b>

# Listes des figures

## Chapitre 1

Figure 1.1: Structure des systèmes étudiés.....	7
Figure 1.2: De la cellule au générateur.....	8
Figure 1.3: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque soumise à un éclairage.....	9
Figure 1.4: Caractéristique $I = f(V)$ .....	10
Figure 1.5: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale.....	11
Figure 1.6: Caractéristique $I_p = f(V_p)$ d'une cellule idéale.....	11
Figure 1.7: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.....	12
Figure 1.8: Caractéristique statique réelle d'une cellule photovoltaïque.....	12
Figures 1.9 et 1. 10: Influences de l'éclairage et de la température.....	14
Figure 1.11: Protection par diodes en série.....	16
Figure 1.12: Protection par diodes en parallèle.....	17
Figure 1.13a: Evolution de la tension aux bornes d'un élément en charge.....	19
Figure 1.13b: Evolution de la tension aux bornes d'un élément en décharge.....	19
Figure 1.14: Tension aux bornes d'un élément en fonction de la profondeur de décharge avec le temps de décharge en paramètre.....	20
Figure 1.15 a: Tension en fonction de l'état de charge pour divers régimes de charge.....	21
Figure 1.15 b: Tension de décharge en fonction de la température.....	23
Figure 1.16: Effet de la profondeur de décharge et de la température sur la durée de vie.....	24
Figure 1.17: Structure de conversion de l'énergie éolienne.....	29
Figure 1.18: Schéma général de conversion de l'énergie éolienne.....	31
Figure 1.19: Conversion optimale de l'énergie éolienne.....	32
Figure 1.20: Eléments du système énergétique éolien susceptibles d'être utilisés pour l'optimisation.....	32
Figure 1.21: Couplage multigénérateurs par diodes et batterie tampon.....	36
Figure 1.22: Techniques de poursuite du point de fonctionnement optimal.....	38
Figure 1.23: Contrôle numérique du point de fonctionnement optimal.....	39
Figure 1.24: Exemples de rendement selon quatre constructeurs.....	40
Figure 1.25: Synoptique de principe de l'onduleur de courant.....	43
Figure 1.26: Synoptique de principe de l'onduleur de tension.....	44
Figure 1.27: Schéma de principe du système.....	48
Figure 1.28: Représentation graphique du point de fonctionnement (GPV + Batteries + Charge).....	49
Figure 1.29: Représentation graphique du point de fonctionnement (GPV + Batteries + Charge).....	49
Figure 1.30: Représentation graphique du point de fonctionnement (Batteries + Charge).....	50
Figure 1.31: Représentation graphique du point de fonctionnement (GPV + Batteries).....	51
Figure 1.32: Déconnexion partielle du générateur.....	51
Figure 1.33: Schéma simplifié de la configuration.....	52
Figure 1.34: Adjonction d'une résistance série.....	52
Figure 1.35: Schéma simplifié de la configuration.....	53
Figure 1.36: Régulation par dérivation du courant.....	53

## Chapitre 2

Figure 2. 1: Schéma d'un système photovoltaïque.....	58
Figure 2. 2: Copie d'écran de "Météovil".....	59
Figure 2. 3: Caractéristiques comparées de température.....	61
Figure 2. 4: Ecart relatifs entre températures ambiantes mesurée et simulée.....	61
Figure 2. 5: Caractéristiques $I(V)$ à irradiances et températures données.....	63
Figure 2. 6: Evolution journalière de la température ambiante et de la température à la surface des modules.....	64
Figure 2. 7: Profils de charge (continu, continu avec une pointe, sinusoïdal).....	65
Figure 2. 8: Fonction $Z(t)$ des événements ERC et fonction $H(t)$ de DARC.....	66
Figure 2. 9: Caractéristiques de rendement.....	67
Figure 2. 10: Caractéristiques de charge et décharge en zone linéaire.....	68
Figure 2. 11: Tension en fonction de l'état de décharge pour différents courants.....	71
Figure 2. 12: Tension en fonction de l'état de charge pour différents courants.....	73

Figure 2. 13: Couple éolien en fonction de la vitesse sur l'axe .....	77
Figure 2. 14: Puissance éolienne en fonction de la vitesse sur l'axe .....	78
Figure 2. 15: Schéma de principe du générateur de courant continu.....	79
Figure 2. 16: Caractéristiques de l'éolienne et de la charge - étude qualitative .....	80
Figure 2. 17: Alternateur connecté à un pont triphasé.....	80
Figure 2. 18: Paramètres d'entrée/sortie de l'aérogénérateur .....	81
Figure 2. 19: Ensoleillement et Profil de charge .....	84
Figure 2. 20: Recherche d'un modèle analytique .....	85
Figure 2. 21: Profil de consommation .....	86
Figure 2. 22: Courbe de régression de la température ambiante .....	87
Figure 2. 23: Diagramme Fonctionnel de Dim_Sol.....	88
Figure 2. 24: Le dispositif expérimental .....	89
Figure 2. 25: Ecran principal.....	90
Figure 2. 26: Partitionnement de l'Afrique en zones énergétiques .....	90
Figure 2. 27: Ecrans d'exploitation des modèles.....	93
Figure 2. 28: Ecrans de saisie des données .....	94
Figure 2. 29: Ecrans d'exploitation des modes de couplage.....	96
Figure 2. 30: Rapport de dimensionnement .....	96
Figure 2. 31: Graphe d'interactions entre objets.....	97
Figure 2. 32: Ecrans de simulation.....	98
Figure 2. 33: Divers profils d'ensoleillement .....	99

### Chapitre 3

Figure 3.1: Synoptique de puissance .....	105
Figure 3.2: Synoptique de commande .....	105
Figure 3. 3: Synoptique des tâches.....	107
Figure 3. 4: Structure multiprocesseurs.....	111
Figure 3. 5: Réseaux de Pétri .....	113
Figure 3. 6: Synoptique de la chaîne d'acquisition .....	114
Figure 3. 7: Multiplexage et isolation galvanique .....	116
Figure 3. 8: Chaîne de conversion analogique numérique.....	117
Figure 3. 9: Le processeur spécialisé "standard".....	118
Figure 3. 10 : Le processeur de communication.....	119
Figure 3. 11: Organigramme de la procédure de mesure.....	122
Figure 3. 12: Organigramme de la procédure de communication .....	123
Figure 3. 13: Optimisation du générateur photovoltaïque .....	124
Figure 3. 14: Configuration du transfert d'énergie .....	125
Figure 3. 15: Principe de la supervision.....	126
Figure 3. 16: Supervision sous Excel .....	129
Figure 3. 17: Vue synoptique de l'application spécifique de supervision.....	131

### Chapitre 4

Figure 4. 1: Diagrammes série et parallèle .....	141
Figure 4. 2: Fiabilité de configurations de base .....	142
Figure 4. 3: Synoptique de la puissance .....	143
Figure 4. 4: Synoptique de la commande .....	143
Figure 4. 5: Agencement du sous-système de puissance .....	144
Figure 4. 6: Agencement du sous-système de commande .....	144
Figure 4. 7: Bloc diagramme multiprocesseur.....	150
Figure 4. 8: Bloc diagramme monoprocesseur à noyau temps réel .....	151
Figure 4. 9: Analyse quantitative par Arbre des causes.....	153
Figure 4. 10: Modèle d'étude du processus .....	156
Figure 4. 11: Chaîne de Markov .....	156

## Chapitre 5

Figure 5. 1: Synoptique de la centrale de Diaoulé.....	161
Figure 5. 2: Synoptique de la centrale de Ndiébel .....	161
Figure 5. 3: Variation annuelle de l'irradiation.....	171
Figure 5. 4: Variation annuelle de la consommation.....	171
Figure 5. 5: Variation annuelle Production/Consommation .....	172
Figure 5. 6: Production sur consommation Ndiébel - Juillet/Novembre 1995 .....	173
Figure 5. 7: Irradiation Diaoulé 1995.....	176
Figure 5. 8: Production sur consommation Diaoulé - 1995.....	173
Figure 5. 9: Production Diaoulé - 1995.....	174
Figure 5. 10: Production Ndiébel - 1995.....	174
Figure 5. 11: Courbe de charge Diaoulé .....	177
Figure 5. 12: Courbe de charge Ndiébel .....	177
Figure 5. 13: Evolution journalière de l'ensoleillement.....	178
Figure 5. 14: Evolution de la température ambiante .....	179
Figure 5. 15: Evolution de la température des modules .....	179
Figure 5. 16: Evolution de la puissance de sortie du générateur .....	180
Figure 5. 17: Evolution du courant de sortie du générateur .....	181
Figure 5. 18: Puissances fournie et consommée.....	182
Figure 5. 19: Profil de charge journalier .....	182
Figure 5. 20: Evolution du courant d'entrée de l'onduleur.....	183
Figure 5. 21: Evolution de la tension aux bornes des batteries .....	184
Figure 5. 22: Bilan PV - Batteries - Charge .....	184
Figure 5. 23: Architecture d'un système photovoltaïque décentralisé type.....	185
Figure 5. 24: Les modules fonctionnels. ....	188
Figure 5. 25: Choix du Site. ....	190
Figure 5. 26: Sélection d'une date.....	190
Figure 5. 27: Codage du nom du fichier archive .....	191
Figure 5. 28: Boîte de dialogue de visualisation des données d'acquisition. ....	192
Figure 5. 29: Sélection des voies pour une visualisation graphique.....	192
Figure 5. 30: Visualisation graphique des données d'acquisition. ....	193
Figure 5. 31: Les protocoles programmés. ....	194
Figure 5. 32: Date de début et période de référence du traitement.....	194
Figure 5. 33: Bilan énergétique mensuel moyen .....	195

## INTRODUCTION

Le recensement des sources d'énergies dont disposent les pays de la zone sahéenne montre une insuffisance notoire dans le domaine des combustibles primaires (pétrole, charbon etc ...)

Par ailleurs la dispersion et la faible densité des populations constitue un frein pour l'expansion du réseau électrique national dans les zones rurales. Le seul moyen de fournir de l'énergie à ces zones passe par la réalisation de microcentrales locales autonomes. La solution usuelle qui consiste à utiliser un groupe électrogène n'assure pas une autonomie réelle de l'installation à cause des problèmes d'approvisionnement.

Le transfert de la technologie nucléaire dans nos pays sous développés rencontre des problèmes parmi lesquels:

- le coût élevé des investissements,
- les problèmes d'environnement dus aux déchets toxiques,
- les problèmes de sécurité pour l'entreposage des déchets,
- le scepticisme des populations.

Dans ce contexte les sources d'énergies dites renouvelables constituent une bonne alternative pour répondre aux besoins énergétiques de nos pays. En effet, sous les tropiques, ces sources d'énergie ont l'avantage d'être abondantes, inépuisables et non polluantes. Cependant, l'inconvénient majeur réside dans la nature irrégulière de la fourniture énergétique dans le temps.

Afin de pallier à cet inconvénient, on a souvent recours à la combinaison de plusieurs sources d'énergie permettant une plus grande production d'énergie et une meilleure régularité dans le temps. Ceci nous amènera au cours de ce travail à nous intéresser aux différents modes d'associations des sources dans les microcentrales énergétiques dites à "énergies renouvelables".

L'utilisation judicieuse de ces sources d'énergies nécessite un travail de modélisation, de simulation, d'optimisation du fonctionnement, de la supervision des équipements installés (afin de minimiser le coût du Wh installé et d'augmenter le rendement global du système).

Dans cet optique, le Laboratoire d'Energies Renouvelables de l'E.S.P a développé depuis quelques années des travaux sur les centrales multigénérateurs/multirécepteurs éoliens

et photovoltaïques. Notre contribution sera essentiellement relative à l'étude de la chaîne énergétique solaire photovoltaïque. Néanmoins, nous prévoyons d'ore et déjà des possibilités d'intégration de sources d'appoint diverses.

La conversion photovoltaïque est désormais reconnue dans de nombreux pays n'ayant pas d'infrastructure suffisamment développée (routes, réseaux électriques...), et plus généralement pour tout développement d'activité en site isolé, comme une source d'énergie très fiable et de plus en plus souvent rentable économiquement, car elle est chaque jour moins onéreuse et souvent sans concurrence sur le plan de la fiabilité, de la souplesse d'utilisation et même parfois du coût.

En effet, depuis les premières utilisations de l'énergie photovoltaïque principalement dans le domaine spatial, la technologie de fabrication des photopiles et des modules a largement évolué vers une fiabilité accrue et un coût réduit de ces composants et parallèlement l'électricité photovoltaïque a vu son champ d'application s'étendre régulièrement.

Mais la photopile ou le module, bien qu'éléments fondamentaux, ne représentent cependant que l'un des maillons d'un ensemble plus complexe nommé "système photovoltaïque" que nous définirons comme un "ensemble de composants utilisant la conversion photovoltaïque du rayonnement solaire et chargé de fournir à un utilisateur un service en énergie sous une forme pouvant être variable (courant électrique alternatif, eau,...).

Le développement de l'utilisation de ces systèmes, bien que très porteur d'espoir, reste cependant trop vulnérable encore pour négliger certaines précautions au niveau de la prévision de performances et du risque de pénurie liés au caractère aléatoire du gisement énergétique.

Pour améliorer la connaissance des systèmes photovoltaïques, plusieurs voies sont possibles:

- L'expérimentation en vraie grandeur peut apporter les réponses aux questions posées, mais cette solution est longue, coûteuse à mettre en oeuvre, et ne permet pas de généraliser les résultats.
- L'autre voie, que nous avons choisie, fait appel à la simulation sur ordinateur qui permet de traiter un grand nombre de cas. La validation des outils de simulation développés est nécessaire pour accréditer les résultats obtenus.

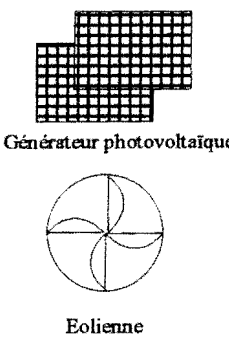
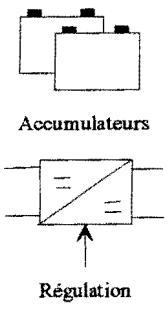
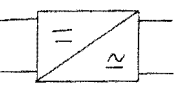

L'objet de cette thèse est donc de développer une méthode générale d'analyse des systèmes photovoltaïques permettant d'accéder à une meilleure connaissance du fonctionnement des installations, et de fournir des éléments indispensables à la conception

d'une méthode de dimensionnement de systèmes photovoltaïques plus précise que celles développées à ce jour. Pour atteindre ce but, nous avons retenu un schéma classique en matière d'analyse de systèmes, qui se singularise par des modèles originaux, d'une part pour traiter les ressources énergétiques, d'autre part pour caractériser de manière automatique les composants.

Le type de système concerné par cette étude possède les caractéristiques suivantes :

- il est multigénérateur : "photovoltaïque" ou "photovoltaïque + éolienne" et même éventuellement "éolienne" seule),
- il possède une batterie d'accumulateurs d'énergie électrique,
- il peut fournir une puissance électrique en courant alternatif, ou continu, ou "alternatif + continu" sur une ou plusieurs charges.

Les éléments de ce type de système sont ceux du tableau suivant:

SOURCES	STOCKAGE/GESTION	TRANSFORMATION	UTILISATION
 <p>Générateur photovoltaïque</p> <p>Eolienne</p>	 <p>Accumulateurs</p> <p>Régulation</p>		 <p>Eclairage</p> <p>Froid</p>

Dans un premier temps, après une présentation détaillée des composants du système étudié et de leur fonctionnement, nous développerons les méthodes de prévision de performances et de dimensionnement retenues.

Dans un second temps, à partir de l'étude théorique des différents phénomènes mis en jeu dans tous les composants du système, nous avons défini pour chacun d'entre eux un modèle mathématique capable de simuler leur comportement dans les conditions réelles de fonctionnement.

Nous présentons ensuite l'informatisation de l'ensemble des modèles développés à travers un logiciel de simulation du fonctionnement des systèmes, permettant à la fois la prédiction du fonctionnement ainsi que le suivi de systèmes réels en régime dynamique.

Trois applications ont été développées:

- un système expert d'aide à la conception des systèmes utilisant les énergies renouvelables,
- un système de prédiction du fonctionnement et des performances des installations appliqué à l'analyse du dimensionnement. Cette phase conduit à l'ébauche d'une méthode performante de dimensionnement prenant en compte tous les paramètres sensibles du système,
- une supervision graphique pour le suivi dynamique d'une installation réelle qui permet le diagnostic du système et l'analyse de ses performances.

L'étude de la sûreté de fonctionnement et la maintenance de la microcentrale font l'objet d'un chapitre dès lors que les coûts élevés des dispositifs impliquent une grande fiabilité.

L'ensemble des outils logiciels mis au point tout au long de ces travaux seront validés à partir d'expérimentations in situ, menées dans les villages de NDIEBEL et DIAOULE au Sénégal.

En conclusion, nous rappelons l'ensemble des points primordiaux pour l'analyse des systèmes photovoltaïques.



## **CHAPITRE 1**

# **LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES**

## 1.1 INTRODUCTION

Un système photovoltaïque, depuis les organes de captation jusqu'aux organes de restitution de l'énergie, représente un processus énergétique complexe. C'est pourquoi, avant d'aborder l'étude des problèmes concernant l'ensemble du système ou l'ensemble des composants dans leur inter-relation, nous nous proposons d'exposer les caractéristiques et le fonctionnement de chacun de ces composants pris individuellement. Cet exposé permettra aussi d'accéder plus facilement à la présentation des modèles informatiques que nous avons développés au cours de ce travail.

## 1.2 DEFINITION DU SYSTEME ETUDIE

Les éléments constitutifs des systèmes étudiés ont été donnés dans l'introduction générale.

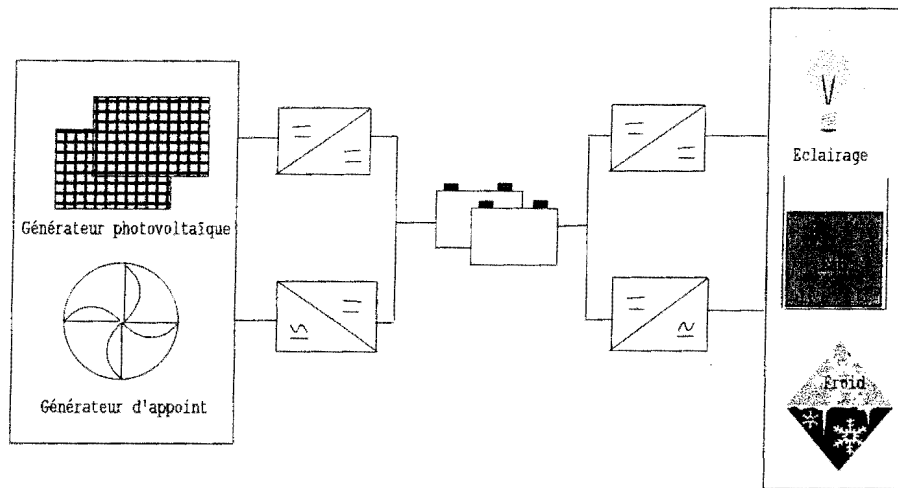
La gamme de puissance admise pour ces systèmes ne possède théoriquement pas de borne. Elle s'étend donc des systèmes comportant une installation de modules photovoltaïques de quelques dizaines de watts à des systèmes photovoltaïques de puissances plus importantes (plusieurs kW).

La plage des capacités admises pour le stockage est très large mais elle comporte une limite basse. En effet, d'une part la capacité des batteries ne peut être nulle, et d'autre part elle doit respecter une valeur minimum pour éviter les conditions de charge ou de décharge néfastes à la durée de vie des éléments de stockage. Cette valeur dépend des puissances de production et de consommation définies dans le cahier des charges.

Le système est chargé de produire une certaine puissance électrique délivrée sous forme continue, sous forme alternative, ou sous les deux formes à la fois. Le convertisseur courant continu - courant alternatif pourrait donc être optionnel et sera omis pour une production électrique intégralement en courant continu.

Le générateur d'appoint (éolienne, groupe électrogène,...) est optionnel. Cependant lorsqu'il existe, son choix est soumis à quelques contraintes. En effet, ce générateur doit pouvoir fournir la puissance excédentaire si la puissance appelée est supérieure à la puissance nominale en courant continu des batteries de manière à recharger celles-ci (il doit donc intégrer un redresseur pour fournir une tension continue correspondant à la tension des batteries, à moins que sa sortie soit en courant continu)

Le schéma synoptique du type de système étudié est donc le suivant:



*Figure 1.1: Structure des systèmes étudiés*

La gestion du système (déconnexion du générateur photovoltaïque, délestages sur la consommation, mise en route du générateur d'appoint..) est faite à l'aide de convertisseurs statiques dont la gestion des degrés de liberté obéit au contrôle de certains seuils. Cette gestion est basée sur une régulation de tension, ou plutôt sur la force électromotrice des batteries. Un tel système photovoltaïque constitue donc un système à seuils.

## 1.3 LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

### 1.3.1 Définition

Nous appellerons "générateur photovoltaïque" le sous-système énergétique situé en amont de l'ensemble convertisseur-batterie et produisant de l'énergie électrique par conversion photovoltaïque du rayonnement solaire. L'énergie produite est sous forme continue.

A la base, le générateur photovoltaïque est constitué de cellules. Ces cellules sont assemblées entre elles pour donner naissance aux modules, qui sont eux-mêmes réunis en série et/ou en parallèle pour former le générateur dont la tension dépend de l'agencement des modules (Figure 1.2).

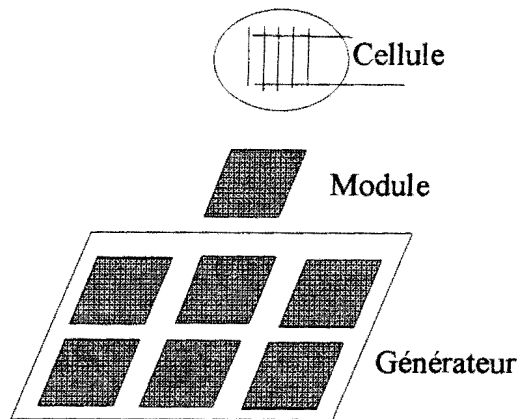


Figure 1.2: De la cellule au générateur

Dans cette étude, nous nous limiterons au cas de la seule cellule produite industriellement: la cellule au silicium. Pour cet usage, le silicium peut actuellement être utilisé sous trois formes différentes:

- *Silicium monocristallin*: la cellule est alors composée d'un seul cristal: le rendement de conversion énergie lumineuse - énergie électrique est bon (environ 15%) mais la fabrication est complexe,
- *Silicium multicristallin*: la cellule est composée d'une multitude de petits cristaux: le rendement de conversion énergie lumineuse - énergie électrique est un peu plus faible (environ 13 %) mais la fabrication est moins complexe,
- *Silicium amorphe hydrogéné*: il n'y a plus de structure cristalline à l'échelle macroscopique; la fabrication est beaucoup moins onéreuse mais le rendement reste faible (environ 5 à 7 %). [1]

### 1.3.2 Fonctionnement

Le fonctionnement de la cellule repose entièrement sur les propriétés d'une jonction PN soumise à un éclairage. Un rayon solaire est défini comme la superposition d'ondes électromagnétiques de fréquences différentes. C'est un faisceau de photons dont l'énergie  $E$  est liée à la longueur d'onde par la constante de Planck  $h$ :

$$E = h \cdot \nu \quad (\text{Eq. 1. 1})$$

avec:  $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ ,  
 $\nu = c/\lambda$  : fréquence du rayonnement,

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$  vitesse de la lumière,  
 $\lambda =$  longueur d'onde.

Sous l'effet de l'énergie incidente des photons, les porteurs minoritaires de la jonction peuvent acquérir l'énergie nécessaire  $E$  pour franchir la bande interdite de largeur  $E_g$ . [2]

La condition est alors :  $E > E_g$ .

Tout se passe comme si un générateur de courant supplémentaire prenait naissance, de telle façon que l'expression du courant  $I$  délivré par la jonction PN soumise à la différence de potentiel  $V$  est donnée par:

$$I = I_d - I_e \quad (\text{Eq. 1. 2})$$

avec:  $I_d = I_s \left[ \exp(eV/kT) - 1 \right]$  (Eq. 1. 3) courant direct de la diode ou courant d'obscurité,

$I_e$  = intensité du courant provenant uniquement de l'éclairement,

$I_s$  = courant de saturation de la jonction, dépend du matériau semi conducteur,

$V$  = tension directe aux bornes de la jonction,

$e$  = charge de l'électron =  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ,

$k$  = constante de Boltzmann =  $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ ,

$T$  = température de la jonction en Kelvin.

La figure 1.3 montre le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque soumise à un éclairement alors que la figure 1.4 présente la caractéristique  $I = f(V)$ .

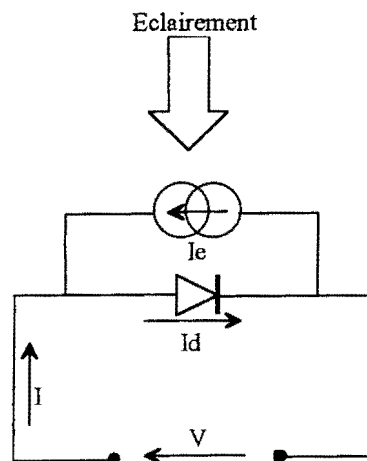


Figure 1.3: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque soumise à un éclairement

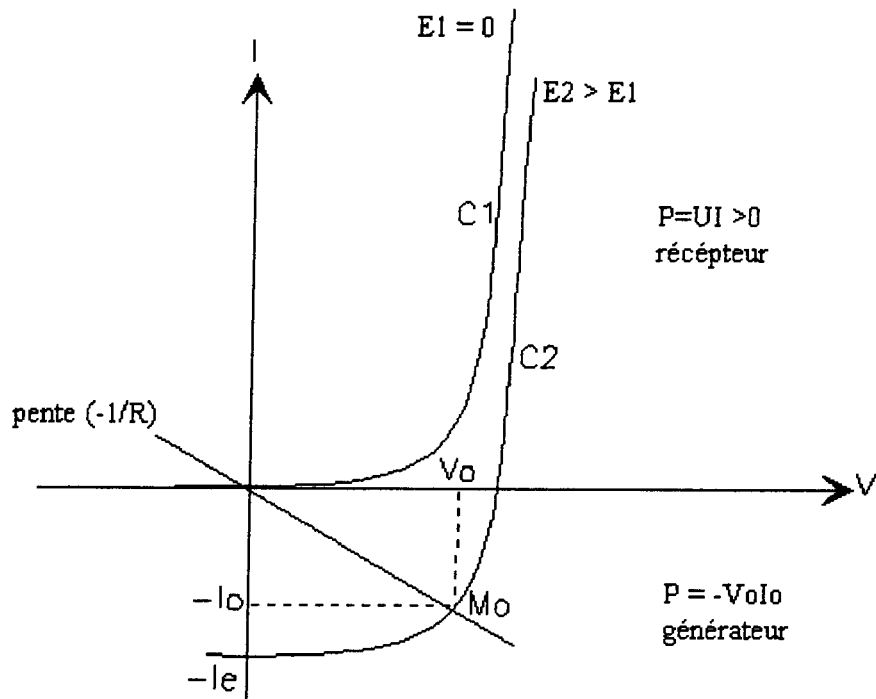


Figure 1.4: Caractéristique  $I = f(V)$ .

$C1$  est la caractéristique de la diode non éclairée et  $C2$  celle de la diode soumise aux radiations solaires.

La diode étant éclairée, on ferme le circuit sur une charge  $R$ , traversée par un courant  $I_0$ . Le point de fonctionnement  $M_0$  est obtenu, en cherchant l'intersection de la droite  $V = -RI$  et de la caractéristique  $I = I_s[\exp(eV/kT) - 1] - I_e$

Dans ce quadrant la puissance électrique fournie par le dispositif est égale à  $V_0 \times I_0$ .

### 1.3.3 Cellule idéale

Exposée à un flux de photons, une cellule photovoltaïque idéale peut être considérée comme une source de courant variable dont le schéma équivalent est donné par la figure 1.5. Lorsque les deux bornes de la cellule sont court-circuitées, le courant  $I_e$  de la figure 1.3 devient égal à  $I_{cc}$  courant de court-circuit. Le courant  $I_p = f(V_p)$  est donné par l'expression:

$$I_p = I_{cc} - I_s[\exp(eV/kT) - 1] \quad [3] \quad (Eq. 1. 4)$$

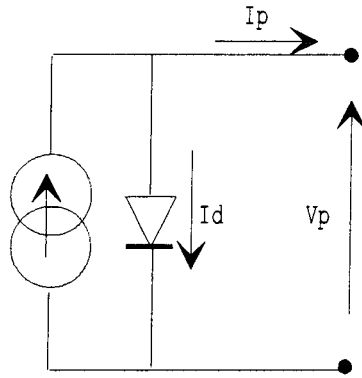


Figure 1.5: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale

la caractéristique  $I_p = f(V_p)$  est généralement représentée par la figure 1.6. L'amplitude du courant  $I_{cc}$  est proportionnelle à l'intensité lumineuse  $E$ .

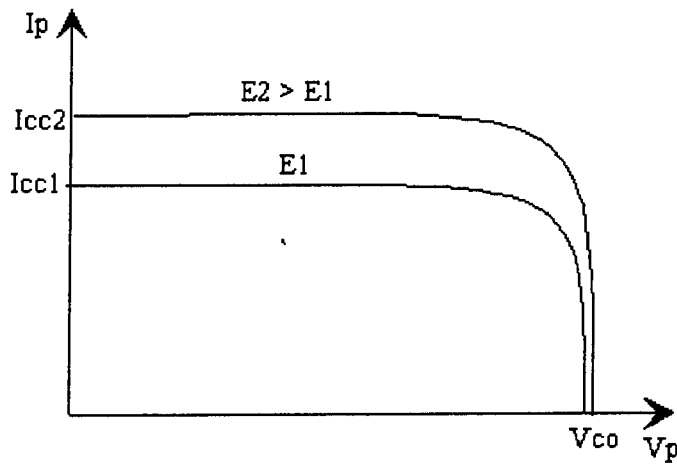


Figure 1.6: Caractéristique  $I_p = f(V_p)$  d'une cellule idéale

### 1.3.4 Cellule réelle

La figure 1.7 donne le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle alimentant une charge  $R_c$ .

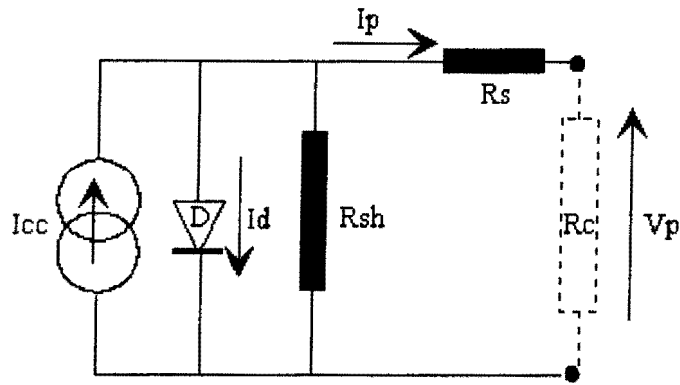


Figure 1.7: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle

Il comprend:

- un générateur de courant dont le courant  $I_{cc}$  est proportionnel à l'éclairement,
- une diode dont la tension directe  $V_j$  est de l'ordre de 0,5 volts,
- une résistance série  $R_s$  représentant les diverses résistances de contact et de connexion,
- une résistance shunt  $R_{sh}$  qui caractérise un courant de fuite au niveau de la jonction.

L'équation de la cellule réelle est alors donnée par :

$$\begin{aligned} I_p &= I_{cc} - I_d - V_j/R_{sh} \\ V_p &= V_j - R_s I_p \\ V_p &= R_c I_p \end{aligned} \quad (\text{Eq. 1.5})$$

Les valeurs respectives de ces éléments déterminent les performances de la cellule réelle, en particulier les caractéristiques courant-tension  $I_p = f(V_p)$  comme le montre la figure 1.8.

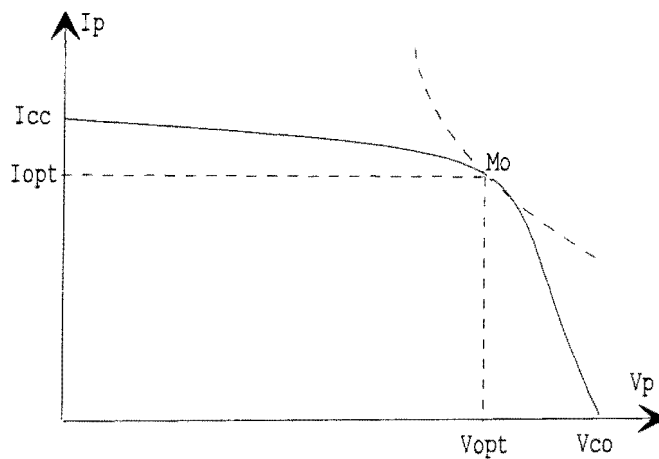


Figure 1.8: Caractéristique statique réelle d'une cellule photovoltaïque



Pour un éclairage donné on distingue trois (3) points particuliers de la courbe  $I_p = f(V_p)$ :

- le point de fonctionnement optimal  $M_o$ , de coordonnées  $V_{opt}$ ,  $I_{opt}$  pour lequel la cellule délivre sa puissance maximale  $P_{opt}$  (hyperbole d'isopuissance),
- le point de fonctionnement en circuit ouvert  $V_{co}$  où le courant  $I_p$  est nul,
- le point de fonctionnement en court-circuit de la cellule auquel correspond un courant  $I_{cc}$ .

En conclusion, une cellule photovoltaïque est un générateur de puissance électrique. Sous éclairage, elle transforme l'énergie lumineuse des photons qu'elle absorbe en énergie électrique. Selon la charge à laquelle elle est connectée, la cellule peut se comporter soit en générateur de tension soit en générateur de courant. Au point de fonctionnement optimal le comportement du système est complexe.

### 1.3.5 Influences de l'éclairage et de la température

#### - Eclairage

La figure 1.9 montre la variation de la caractéristique  $I-V$  d'une cellule du commerce en fonction de l'éclairage  $E$ . Le courant de court-circuit est pratiquement proportionnel à  $E$  alors que la tension de circuit ouvert ne diminue que très légèrement avec  $E$ .

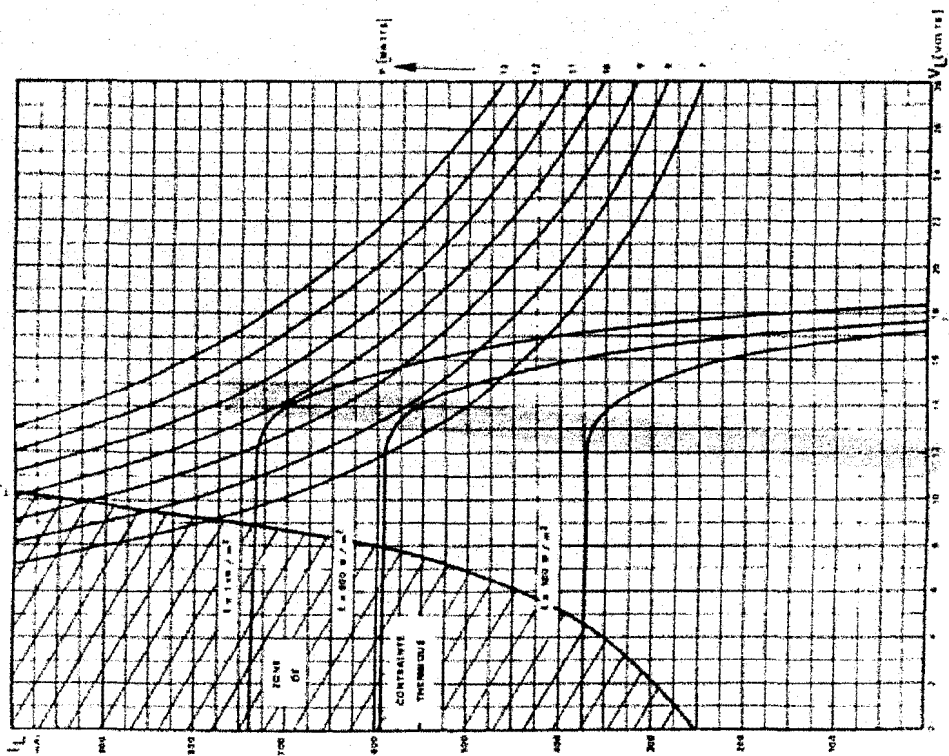
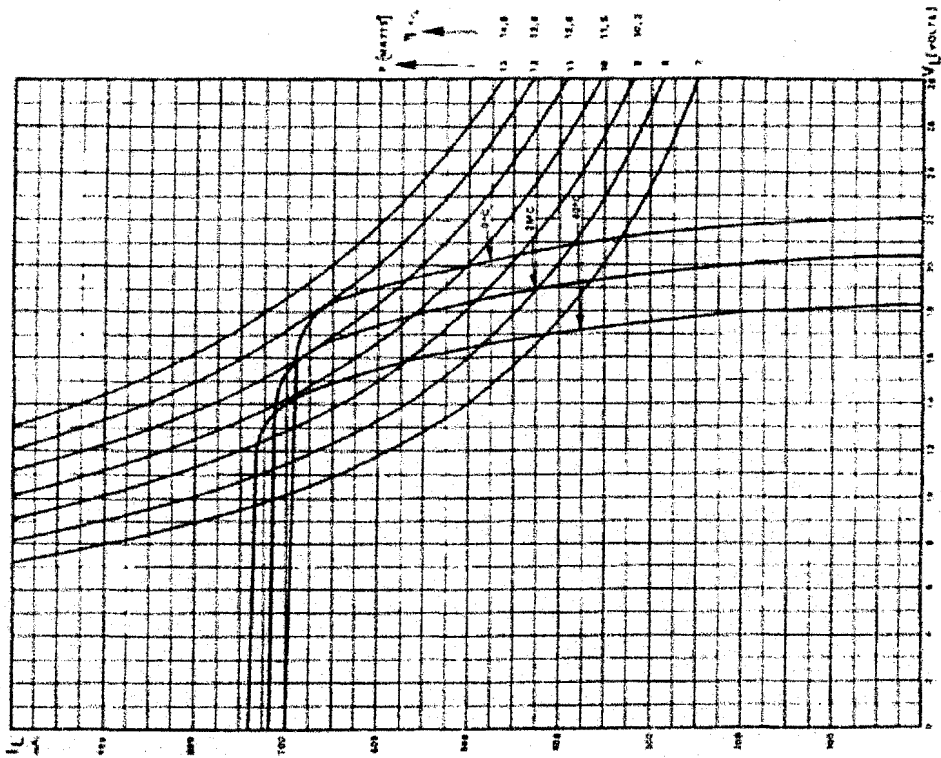
La puissance optimale fournie par la photopile est donc pratiquement proportionnelle à l'éclairage.

#### - Température

On remarque sur la figure 1.10 une diminution importante de la tension  $V_{co}$  avec la température  $T_j$  qui entraîne, malgré une légère augmentation du  $I_{cc}$ , une diminution notable de la puissance maximale disponible.

## 1.4 LE MODULE PHOTOVOLTAÏQUE

Une cellule est un élément fragile, dont la puissance est beaucoup trop faible pour la plupart des applications. En conséquence, l'élément de base commercialisé est un ensemble de cellules qui sont montées en série et en parallèle pour donner des tensions compatibles avec les utilisations envisagées. Ces cellules sont encapsulées dans un matériau adéquat (verre, résine...) qui les protège contre les agressions dues à l'environnement.



Zona de contrainte termica do modelo «PK47A»  
 a temperatura ambiente (T) por ig celula parcialmente  
 iluminada em função a lamp. 45 °C

Figures 1.9 et 1. 10: Influences de l'éclaircement et de la température

La caractéristique courant-tension d'un module est aisée à obtenir: il suffit de multiplier la tension d'une cellule par le nombre  $ns$  de cellules en série, et le courant par le nombre  $np$  de cellules en parallèle.

Les caractéristiques des modules sont mesurées pour des conditions standards d'éclairement et de température [4]. Pour l'éclairement, ces conditions sont dites "AM 1,5" (pour "Air Mass 1,5"). L'éclairement arrivant sur les modules possède le spectre du rayonnement solaire arrivant au sol après avoir traversé une épaisseur d'atmosphère égale à 1,5 fois l'épaisseur de l'atmosphère (modélisée à 7,8 km) à la verticale du lieu. [5]

La température mentionnée est celle de la jonction elle-même et non celle du module.

On appelle puissance nominale la puissance fournie par le module sous un éclairement de  $1000\text{W/m}^2$  et dans les conditions standards.

Dans ces conditions standards, la plupart des modules fournissent leur puissance nominale à la tension nominale d'environ 16V. En conditions réelles, et pour le même éclairement, la température de jonction étant souvent très supérieure à  $25^\circ\text{C}$ , la puissance nominale est fournie à une tension inférieure à 16V (diminution d'environ 0,09V par  $^\circ\text{C}$ ). [6]

*Remarque:* Lorsqu'on parle de la tension d'un module, la valeur la plus couramment utilisée par les constructeurs est celle de la "tension de référence", en référence à la tension des batteries d'accumulateurs, et qui a en général pour valeur 12V.

## 1.5 LE GENERATEUR: ENSEMBLE DE MODULES

### 1.5.1 Architecture

Les modules ont une puissance nominale unitaire faible qui varie, selon les modèles proposés, de quelques watts à quelques dizaines de watts. Dès que l'application envisagée nécessite une puissance installée plus importante, il est nécessaire de regrouper les modules selon une architecture bien déterminée.

Cette architecture dépend de trois facteurs:

- la puissance nominale installée nécessaire,
- la tension continue sous laquelle cette puissance doit être fournie,
- la puissance et la tension d'un module.

Prenons un exemple: le générateur de NDIEBEL au SENEGAL d'une puissance de 20KW est constitué de 400 modules de 50W en silicium polycristallin de type *AEG PQ 40/50*. Répartis sur 20 travées, ces modules sont branchés par travées, en deux lots de 10 modules en série. Pour obtenir au total 20KW, 20 lots sont montés en parallèle présentant ainsi à la sortie une tension de circuit ouvert de 228V, soit une tension optimale de l'ordre de 189V. Nous n'avons pas pris en compte les pertes inévitables qui surviennent lors de l'assemblage. [7]

Tous les modules constituant un générateur doivent être de même type. En particulier, dans des conditions de fonctionnement données, ils doivent tous fournir la même tension.

### 1.5.2 Protection

Tout choc électrique doit être évité aux cellules, qui sont des éléments fragiles. En particulier, elles peuvent être détruites par un échauffement excessif par effet Joule si elles deviennent réceptrices de courant. Les modules doivent donc être protégés par des diodes. [8]

- *Les diodes séries*: Un module peut devenir récepteur du courant fourni par les autres séries de modules ayant une tension plus élevée. Pour empêcher la batterie de se décharger la nuit dans les photopiles, ou pour empêcher une série de modules contenant un module défaillant ou masqué, une diode "d'anti-retour" est intégrée dans chaque série.

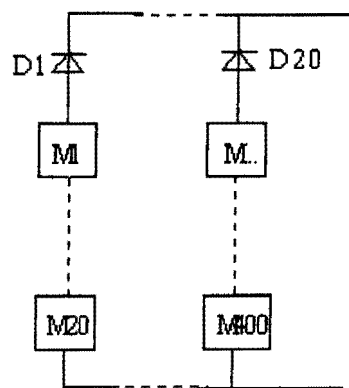


Figure 1.11: Protection par diodes en série

- *Les diodes parallèles*: Dans un couplage série, un module qui ne peut plus produire d'énergie (masquage, défaillance) doit être protégé pour ne pas devenir récepteur et s'endommager irrémédiablement. Des diodes sont donc placées en parallèle sur chacun des modules du générateur. Elles permettent de dévier le courant produit par les autres modules de la série.

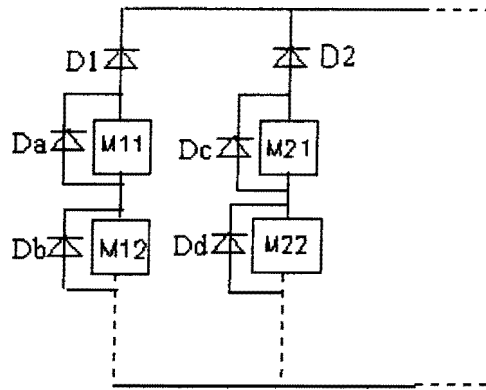


Figure 1.12: Protection par diodes en parallèle

## 1.6 LE STOCKAGE D'ENERGIE

Les périodes de production et les périodes de consommation d'énergie sont très fréquemment décalées. Même lorsqu'elles sont partiellement en phase, il est peu probable qu'il existe une parfaite adéquation entre les niveaux de production et de consommation. Dans ce cas un minimum de stockage d'énergie s'avère indispensable. [9]

Ce stockage peut prendre plusieurs formes selon les applications auxquelles le système photovoltaïque est destiné: stockage d'énergie potentielle (eau, pour les systèmes de pompage), d'énergie frigorifique (glace, pour les réfrigérateurs), etc... Mais quand les utilisations sont multiples pour un même système, le stockage retenu est en général un stockage d'énergie électrique par batterie d'accumulateurs électrochimiques, même si celle-ci possède souvent un rendement moindre par rapport aux stockages en "nature" comme l'eau ou la glace. Les accumulateurs sont de toutes façons indispensables pour certaines applications (éclairage, appareillages électroménagers...) [10]

Comme nous l'avons vu dans l'introduction générale, la batterie d'accumulateurs est la seule forme de stockage retenue pour cette étude.

### 1.6.1 Rôle et caractéristiques du stockage par accumulateurs

La fonction des accumulateurs au sein d'un système photovoltaïque est double:

- D'une part, fonction de réserve ou stockage d'énergie, que nous avons déjà évoqué, nous veillerons à minimiser sa capacité.

- d'autre part, fonction d'adaptation d'impédance: Le générateur photovoltaïque ne fixe pas la tension du système. Pour fixer et optimiser le point de fonctionnement des modules, il est nécessaire qu'un élément du système fixe la tension du générateur. Les accumulateurs sont à même de jouer ce rôle puisque leur tension varie peu en fonction des conditions de fonctionnement.

Le caractère spécifique des systèmes photovoltaïques (énergie relativement coûteuse, installation en site isolé...) impose le choix d'accumulateurs possédant les caractéristiques suivantes:

- Rendement de charge/décharge élevé (c'est à dire: faible résistance interne et faibles pertes par autodécharge),
- Bonne aptitude au cyclage (bonne durée de vie),
- Grande réserve d'électrolyte,
- Coût le plus faible possible.

Il existe plusieurs technologies d'accumulateurs électrochimiques. La recherche actuelle promet un bel avenir à la mise au point de batteries de nouvelles générations à partir du Lithium. Cependant, nous nous bornerons, après avoir énoncé certaines définitions, à présenter sommairement les deux types utilisés le plus couramment sur les installations photovoltaïques: les accumulateurs au plomb et les accumulateurs au cadmium-nickel. Le chapitre II apportera les compléments théoriques permettant d'aboutir à une modélisation des accumulateurs.

### 1.6.2 Définitions

- *Tension aux bornes de l'élément*

Elle est fonction de la charge ou de la décharge de l'élément et dépend de la technologie utilisée par le constructeur.

Les figures 1.13 montrent la différence de potentiel aux bornes d'un élément de batterie en charge puis en décharge au régime  $C/10$ .

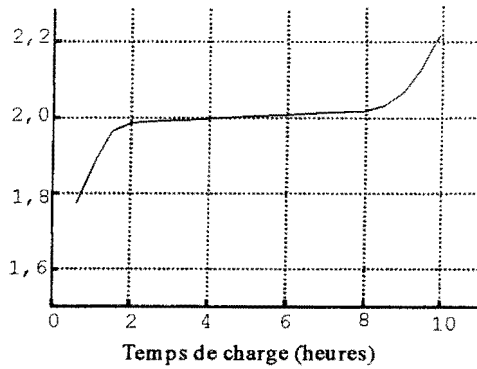


Figure 1.13a: Evolution de la tension aux bornes d'un élément en charge

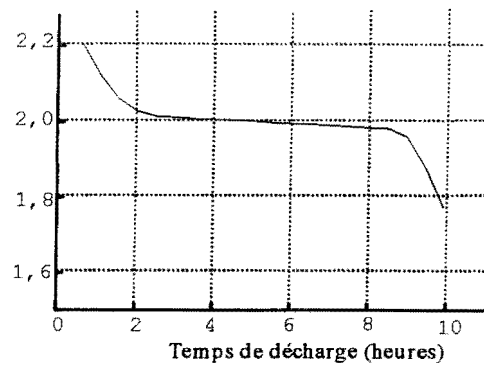


Figure 1.13b: Evolution de la tension aux bornes d'un élément en décharge

La décharge est caractérisée par deux notions fortement liées:

- le taux de décharge
- la profondeur de décharge.

- *Taux de décharge*

Il est normalisé par la capacité estimée de la batterie, pour des durées de décharge indiquées. Ainsi, le taux de décharge d'une batterie de 500 Ah, pour un temps de décharge de 10 heures, est:

$$\frac{\text{capacité estimée}}{\text{temps de décharge}} = \frac{500\text{Ah}}{10\text{h}} = 50\text{A} = \frac{C}{10} \quad (\text{Eq. 1. 6})$$

- *Profondeur de décharge*

C'est la quantité d'Ah extraite d'une batterie pleinement chargée. Elle est exprimée en pourcents de la capacité estimée.

Lors d'une décharge, la tension aux bornes de l'élément est fonction du courant et de la profondeur de décharge autorisée.

Le temps de décharge varie en fonction du courant délivré par l'accumulateur. La figure 1.14 montre l'évolution de la différence de potentiel aux bornes d'un élément de batterie en fonction de la profondeur de décharge avec le temps comme paramètre de décharge.

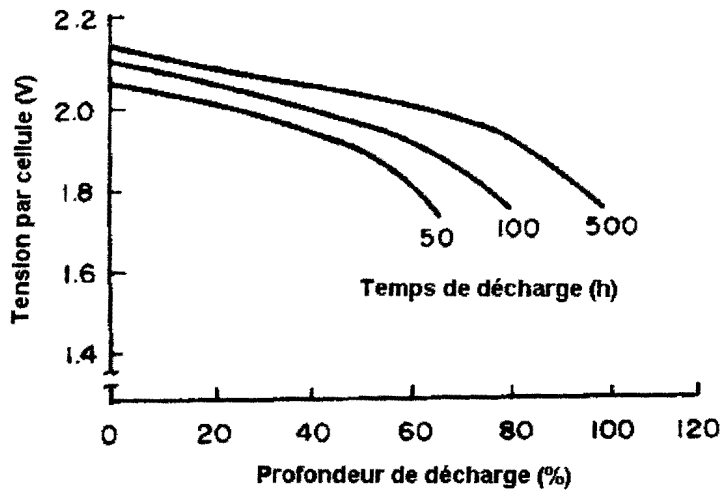


Figure 1.14: Tension aux bornes d'un élément en fonction de la profondeur de décharge avec le temps de décharge en paramètre

- *Taux de charge*

Comme le taux de décharge, il est normalisé par rapport à la capacité estimée et la durée de charge. Le taux de charge est le rapport du courant consommé par la durée de temps nécessaire pour retrouver la charge complète de l'élément de batterie.

Lors d'une charge, la différence de potentiel varie dans le même sens que le taux de charge et l'état de charge de l'élément.

- *Etat de charge*

C'est une grandeur qui caractérise la disponibilité énergétique d'un accumulateur. Il peut être exprimé en pourcents de la capacité estimée. L'état de charge est aussi appelé état de décharge par certains auteurs. D'autres préfèrent les appellations d'état de charge lorsque l'élément est en charge et d'état de décharge dans le cas contraire. Cependant, aucune dénomination n'est connue lorsque la batterie n'est ni en charge ni en décharge.



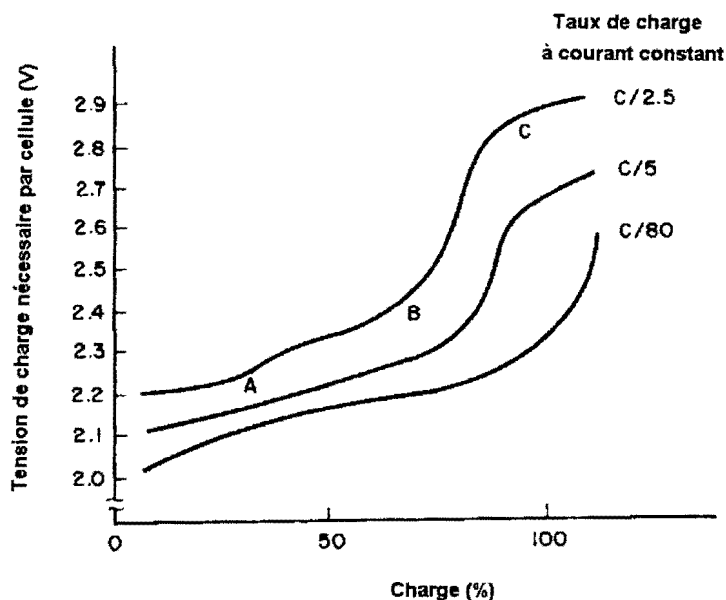


Figure 1.15 a: Tension en fonction de l'état de charge pour divers régimes de charge

- *Capacité de la batterie*

Lorsque l'on désire connaître l'autonomie d'un accumulateur, c'est-à-dire le temps durant lequel il peut débiter, on se rend rapidement compte que cette grandeur varie suivant le courant débité: on parle alors de régime de décharge.

Le *régime de décharge* est l'intervalle de temps nécessaire à la décharge complète d'une batterie ou d'un élément de batterie; cette décharge se faisant à courant constant. Ainsi une batterie de capacité 350 Ah fournirait de façon permanente 35A en 10 heures de fonctionnement et 3.5A en 100 heures: ce sont respectivement les régimes de décharge *C/10* et *C/100*.

La capacité s'exprime en Ah ou en Wh et revêt suivant son unité différentes significations.

- *Capacité en Ah*: c'est la quantité de courant qui peut être extraite en décharge durant un intervalle de temps donné et à un certain taux de décharge.
- *Capacité en Wh*: elle est encore appelée capacité énergétique et représente l'énergie que peut fournir la batterie pendant un intervalle de temps donné. Elle est fonction de la capacité en Ah, de la tension de fonctionnement de l'accumulateur et de la profondeur de

décharge autorisée. Précisons que cette dernière grandeur permet la détermination de la quantité d'énergie que peut fournir la batterie.

$$WC = BF \cdot AH \cdot V \quad (\text{Eq. 1. 7})$$

avec:

$WC$  : capacité en Wh

$BF$  : profondeur de décharge

$AH$  : capacité en Ah

$V$  : tension de service

La tension de service étant sujette à des fluctuations, il serait plus précis de connaître une loi régissant son évolution notamment lorsque l'élément est en décharge.

Précisons enfin qu'il existe plusieurs types de capacité. Les plus couramment rencontrés sont:

- *Capacité estimée*: c'est une estimation faite par le constructeur quant à la quantité d'Ampère heure (Ah) que l'on pourrait extraire de la batterie.
- *Capacité disponible*: c'est le nombre total d'ampères heure que l'on peut extraire d'une batterie pleinement chargée pour des conditions de service données: taux de décharge, état de charge initial, tension de seuil bas, température, âge de l'équipement, ...etc.

- *Autodécharge*

L'autodécharge est l'ensemble des réactions chimiques et électrochimiques (notamment les pertes d'eau) qui se produisent au sein de la batterie. Ces réactions engendrent une faible consommation énergétique prélevée sur l'énergie disponible au niveau des accumulateurs [11].

Il s'en suit que la batterie, même inutilisée se décharge lentement.

Le taux d'autodécharge est la grandeur qui rend compte de ce phénomène. Il représente la diminution, par autodécharge, de la capacité par unité de temps. [12]

- *Rendement*

Deux types de rendement peuvent être exprimés:

- Rendement faradique: rapport des ampères-heures déchargés aux ampères-heures chargés.
- Rendement énergétique: rapport des wattheures déchargés aux wattheures chargés.

Le dernier est plus faible que le précédent car, à cause de la résistance interne, les ampères-heures sont stockés à une certaine tension et restitués à une tension plus faible.

### 1.6.3 Facteurs d'influence

- *Température*

La température est le principal facteur qui agit sur le fonctionnement de la batterie. En effet, pour une batterie au plomb-acide, une augmentation de la température de 1° provoque une diminution de 1% de la capacité de la batterie. Ainsi, les meilleures performances pour un tel type de batterie s'observent aux basses températures.

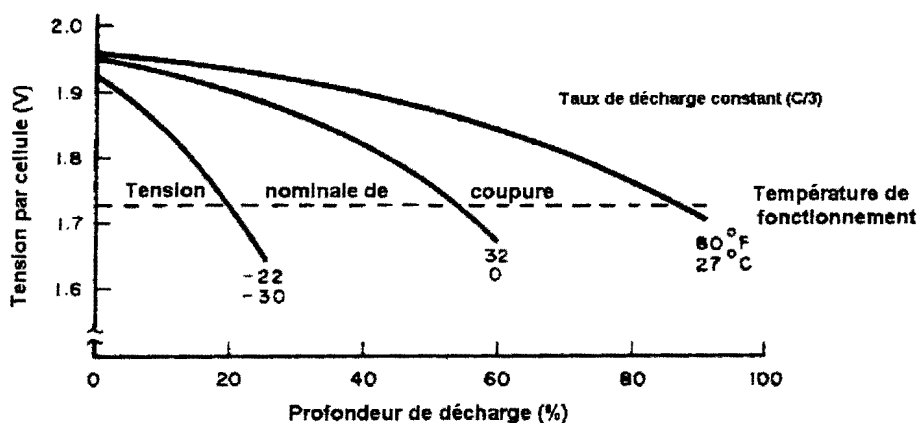


Figure 1.15 b: Tension de décharge en fonction de la température

D'autres facteurs imposés par les conditions d'exploitation sont pris en compte quant à la durée de vie de l'équipement. Il s'agit en l'occurrence du taux de décharge, de la profondeur de décharge et des cycles de charge-décharge.

- *Taux de décharge*

Un taux de décharge élevé est synonyme d'une forte absorption de courant durant un intervalle de temps faible. Il en résulte une forte diminution de la capacité de la batterie.

Une décharge profonde survient d'autant plus rapidement que le taux de décharge est élevé.

- *Profondeur de décharge*

La durée de vie s'exprime en nombres de cycles de charge-décharge. Bien qu'ayant diverses définitions selon les constructeurs, la durée de vie est atteinte lorsque la capacité ne peut plus excéder 20% de la capacité estimée.

Cette durée de vie est estimée par le constructeur pour des températures et des profondeurs de décharge données.

Il va sans dire qu'une batterie ayant des taux de charge et de décharge élevés arrive à terme plus tôt qu'une autre batterie d'accumulateurs moins sollicitée.

Le rapport entre la durée de vie telle que définie ici et l'âge de l'équipement dépend uniquement des conditions d'exploitation.

La figure 1.16 montre l'effet combiné de la température des cellules et de la profondeur de décharge sur la durée de vie de la batterie.

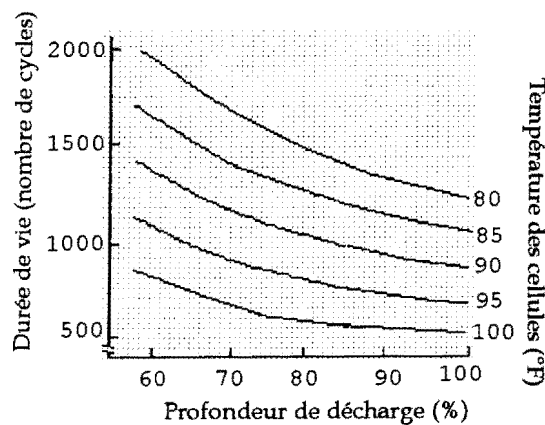
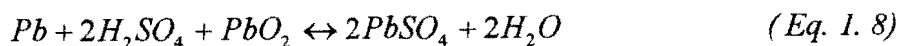


Figure 1.16: Effet de la profondeur de décharge et de la température sur la durée de vie

#### 1.6.4 Accumulateurs au plomb

Ils représentent de très loin le type d'accumulateur le plus utilisé [13]. L'électrolyte est une solution aqueuse d'acide sulfurique, l'électrode positive est constituée d'oxyde de plomb  $PbO_2$  et l'électrode négative de plomb  $Pb$ . La réaction mise en jeu est la suivante:



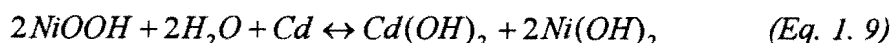
La tension d'un élément varie de 1,7V (état de charge minimum) à 2,5V (état de charge maximum). Le rendement énergétique de l'ordre de 75% est jugé bon, mais les surcharges ou décharges profondes doivent impérativement être évitées pour cette technologie d'accumulateurs. Comme la connaissance précise de l'état de charge n'est pas aisée à obtenir, pour éviter les risques il faut s'attacher à conserver les accumulateurs dans un intervalle d'état de charge de l'ordre de 40% à 80% (éventuellement jusqu'à 100% avec un courant de charge faible car les accumulateurs peuvent indéfiniment supporter sans dommage une charge d'entretien faible).

### 1.6.5 Accumulateurs au cadmium-nickel

Ce type d'accumulateurs est beaucoup moins utilisé que celui au plomb, car il est plus onéreux, même si sa durée de vie est supérieure. Il peut cependant, eu égard à ses caractéristiques, être intéressant pour certaines applications (petits systèmes, systèmes embarqués pour lesquels le poids doit être minimisé, etc...).

L'électrolyte est à base de potasse, l'électrode positive est composée d'hydroxyde de nickel et l'électrode négative de cadmium.

Ces éléments réagissent de la manière suivante:



La tension d'un élément varie de 1,15V (état de charge minimum) à 1,45V (état de charge maximum). Le rendement énergétique, de l'ordre de 70% est plus faible que pour le plomb.

### 1.6.6 Caractéristiques comparées

CARACTERISTIQUES	PLOMB	CADMIUM-NICKEL
Capacité nominale à 25°C	100 à 900 Ah	10 à 400 Ah
Tension nominale	2,45V	1,25 V
Valeur minimum de tension conseillée (en charge)	1,75V	1,0 V
Capacité disponible à 25°C	70%	90%
Durée de vie	10 à 20 ans	24 ans
Nombre de cycles de charge - décharge (pour une profondeur de décharge de 80%)	1000 à 1500	1500 à 2000
Rendement énergétique nominal	70 à 80%	60 à 70%

Propriété en charge	sensible à la charge	admet 5 à 10% de surcharge
Puissance massique	environ 13 à 29 Wh/g	environ 22 Wh/g
Coût	environ 75000 CFA par kW/h	environ 135.000 CFA par 1000 kW/h

Tableau 1. 1: Comparaison des caractéristiques d'un accumulateur au plomb - acide et d'un accumulateur au nickel - cadmium

### 1.6.7 Développements récents sur les batteries

Certains couples électrochimiques nouveaux connaissent aujourd'hui un développement industriel très important. Ce sont des accumulateurs de petites dimensions utilisés pour des applications telles qu'ordinateurs ou téléphones portables. Leur mise en oeuvre dans des générateurs de grandes dimensions fait actuellement l'objet d'une activité de développement intense. Ce sont les couples à base d'hydrures métalliques ou de lithium. Dans cette partie, sont seuls décrits ces nouveaux couples électrochimiques les plus prometteurs et faisant l'objet de développements avancés. [14]

#### A. Les accumulateurs Nickel/Hydrures métalliques

Principe:



Dans l'équation électrochimique, on remarquera que l'eau ne participe plus à la réaction, comme dans le cas du *NiCd*. L'électrolyte est cependant le même, c'est à dire une solution de potasse concentrée. Le bilan en terme d'énergie spécifique est très positif, puisque des prototypes de 6V - 127 Ah ont d'ores et déjà démontré une énergie spécifique de 66 Wh/kg et 132 Wh/l à un régime de C/3 (décharge en 3 heures). Le gain par rapport au *NiCd* est particulièrement sensible sur l'énergie volumique (+27%). La densité de puissance est analogue à celle du *NiCd*, soit 200 W/kg à 80% d'état de décharge. Ces prototypes sont réalisés en version sans maintenance et leur production industrielle est prévue pour 1998.

#### B. Les accumulateurs au Lithium

Sous ce nom générique entrent tous les accumulateurs utilisant le lithium comme matériau actif réducteur. L'intérêt du lithium réside dans son pouvoir réducteur très élevé, permettant

d'obtenir des tensions de couple électrochimique élevées. Issues de travaux de recherche ayant commencé au début des années 60, les piles au lithium sont maintenant largement répandues. Il en existe différents types en fonction du matériau oxydant qui est associé au lithium.

*Principe:*

La réaction qui leur est commune est celle de l'électrode négative:



L'utilisation du carbone comme structure d'accueil du lithium dans l'électrode négative vaut à cet accumulateur le nom de "batterie au lithium-carbone". Les matériaux positifs les mieux adaptés sont des oxydes métalliques lithiés, pouvant être oxydés et libérer une partie des ions  $Li^+$ .

Une particularité de ces accumulateurs non aqueux, est un excellent rendement de charge. Le rendement faradique est de 1, seules les pertes par effet Joule dues à la résistance interne limitent le rendement énergétique qui est voisin de 95%.

Le tableau 2 résume les caractéristiques des filières en cours de développement.

FILIERE	Pb/acide /PbO2	AlcalinesNi/Cd , H2	Alcalines Ni / Zn MnO2 / Zn	Na / SNa / NiCl2	Li / FeS2
température de fonctionnement (°C)	amb - 20 à + 50	amb- 30 à + 40	amb	300 - 350 régulée	450 régulée
énergie massique (Wh/kg)	25 / 45	25 / 65	50 / 70	75 / 120	100 / 170
nombre de cycles profonds	300 / 1500	300 / 1500	100 / 300 30	500 / 1500	300 / 1000
énergie volumique (Wh/dm3)	60 / 120	100 / 160	110 / 140	85 / 130	150 / 250
puissance massique (W/kgperman/ 30s)	80 / 150	75 / 250	90 / 125	50 / 150	40 / ?
rendement charge/décharge (%)	70 / 75	60 / 75	70 / 75	80	75
auto-décharge	2 à 5% /mois	25% /mois	30% /mois	24- 48 h à chaud	24h à chaud
prix (CFA/kwh)	700 /1200	2500 / 8000	1200 / 2000	1000 / 2000	

*Tableau 1. 2: Caractéristiques comparées de diverses filières d'accumulateurs électrochimiques*

Le développement des systèmes de production d'électricité à partir de sources d'énergies renouvelables, en dehors de l'aspect technico-économique, se heurte à des problèmes liés aux fluctuations des grandeurs météorologiques [11],[12]. La solution est d'utiliser des sources d'énergies complémentaires pour assurer un fonctionnement sans rupture de l'installation.

## **1.7 LE GENERATEUR D'APPOINT**

### **1.7.1 Complémentarité de sources d'énergie**

En période de vent fort (Novembre à Juin pour le site de Dakar) [15], l'énergie éolienne est abondante et peut compenser efficacement le manque journalier du rayonnement solaire (nuit). En dehors des sources d'énergies renouvelables, des batteries sont couplées aux dispositifs de production pour fournir l'énergie durant les moments de pénurie.

Mais la solution la plus sûre pour éliminer les ruptures énergétiques, reste l'utilisation de sources d'énergies conventionnelles. Dans les zones rurales le groupe diesel est fréquemment utilisé en appoint, mais il pose souvent des problèmes d'approvisionnement en carburant et de maintenance. [16]

Dans les zones urbaines où il existe un réseau de distribution électrique, les énergies renouvelables peuvent être couplées aux centrales thermiques pour économiser de l'énergie en diminuant la consommation de fuel. [17]

L'appoint de l'énergie éolienne à l'énergie solaire permet de rendre à priori moins aléatoire la puissance fournie par le système global dans la mesure où ces sources d'énergie ne sont pas corrélées. Mais le risque demeure d'en avoir trop à certains moments et pas assez à d'autres (absence de vent par temps couvert par exemple). C'est la raison pour laquelle on veillera à emmagasiner l'excédent énergétique lorsqu'il existe. Ce stockage pourra se faire comme nous l'avons annoncé par l'intermédiaire de batteries d'accumulateurs, ou sous forme de froid [18]. Dans les zones sahéniennes où il existe un déficit d'eau, l'excédent d'énergie peut être utilisé pour alimenter un dispositif de pompage; l'eau ainsi pompée est stockée ou utilisée immédiatement selon les besoins de la communauté rurale. [19], [20]

On considérera ici l'appoint sous la forme d'énergie éolienne. Nous avons déjà vu (cf 1.2) que cette énergie, serait non seulement chargée de fournir l'énergie appelée en courant alternatif si il y a défaillance de l'alimentation photovoltaïque, mais aussi, si sa puissance le



permet, de recharger les accumulateurs ou de fournir l'énergie appelée en courant continu. Par conséquent:

- sa puissance est au moins égale à l'énergie maximum appelée.
- son rendement dépend essentiellement de la génératrice dont elle est équipée. [21]

### 1.7.2 Conversion de l'énergie éolienne: Structure des systèmes de conversion

Les installations classiques utilisant l'énergie éolienne comportent cinq parties :

- une turbine éolienne, avec ses annexes mécaniques (régulation, sécurité, réduction), qui, lorsqu'elle est exposée à un vent de vitesse  $v$ , tourne à la vitesse  $\Omega$  et fournit sur son arbre un couple de moment  $\Gamma$ ,
- un générateur électrique, qui transforme l'énergie éolienne en énergie électrique alternative ou continue,
- une charge, ou utilisation, qui reçoit cette énergie électrique. Traditionnellement, cette charge peut être une résistance, un moteur, une pompe, un réseau de distribution d'énergie électrique. Selon la nature de cette charge les exigences sur le conditionnement de l'énergie électrique utilisée sont très différentes ,
- un convertisseur qui est en général placé entre le générateur électrique et la charge et qui adapte la forme de l'énergie électrique fournie par le générateur à ce qu'exige la charge,
- un système de commande et de régulation qui assure la conversion optimale en régime stationnaire et, éventuellement en régime dynamique [22].

Une structure simple de conversion de l'énergie éolienne est présentée à la figure 1.17, où :  $T$  est la turbine,  $M$  le multiplicateur de vitesse,  $GE$  le générateur électrique et  $EP$  le circuit électronique de puissance. On considère que le système alimente une charge électrique isolée.

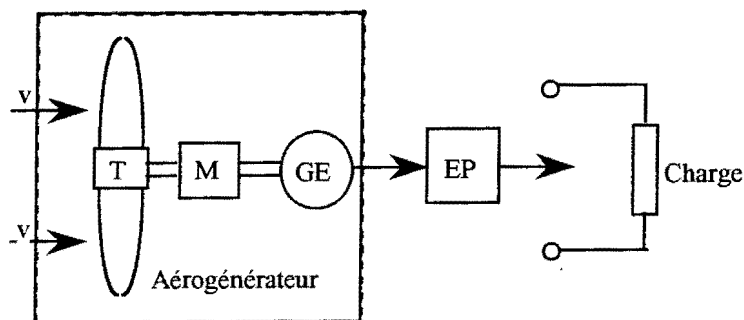


Figure 1.17: Structure de conversion de l'énergie éolienne

Le caractère aléatoire du vent pose le problème de la régularisation de l'énergie fournie aux consommateurs par les aérogénérateurs. Il est possible que, dans certains intervalles de temps, la demande d'énergie soit plus grande que l'énergie pouvant être fournie par l'aérogénérateur. C'est pourquoi on prévoit des solutions de régularisation par :

- des sources alternatives d'énergie (générateurs photovoltaïques, réseau, groupes électrogènes),
- l'utilisation de l'énergie stockée pendant les périodes de surproduction de l'aérogénérateur (systèmes de pompage, accumulateurs). [23]

Le schéma général de conversion de l'énergie éolienne (figure 1.18) montre le bilan des puissances dans le réseau d'un utilisateur.

Les puissances qui entrent en jeu dans le réseau local sont :

- $P_a$ , puissance fournie par l'aérogénérateur,
- $P_{esa}$ , puissance fournie par les sources alternatives,
- $P_{er}$ , puissance fournie par le réseau de distribution électrique,
- $P_{ess}$ , puissance fournie par le système de stockage.

Les puissances qui sortent du réseau local sont :

- $P_{ul}$ , puissance consommée par l'utilisateur,
- $P_{sss}$ , puissance transmise au système de stockage d'énergie,
- $P_{sr}$ , puissance transmise au réseau de distribution électrique.

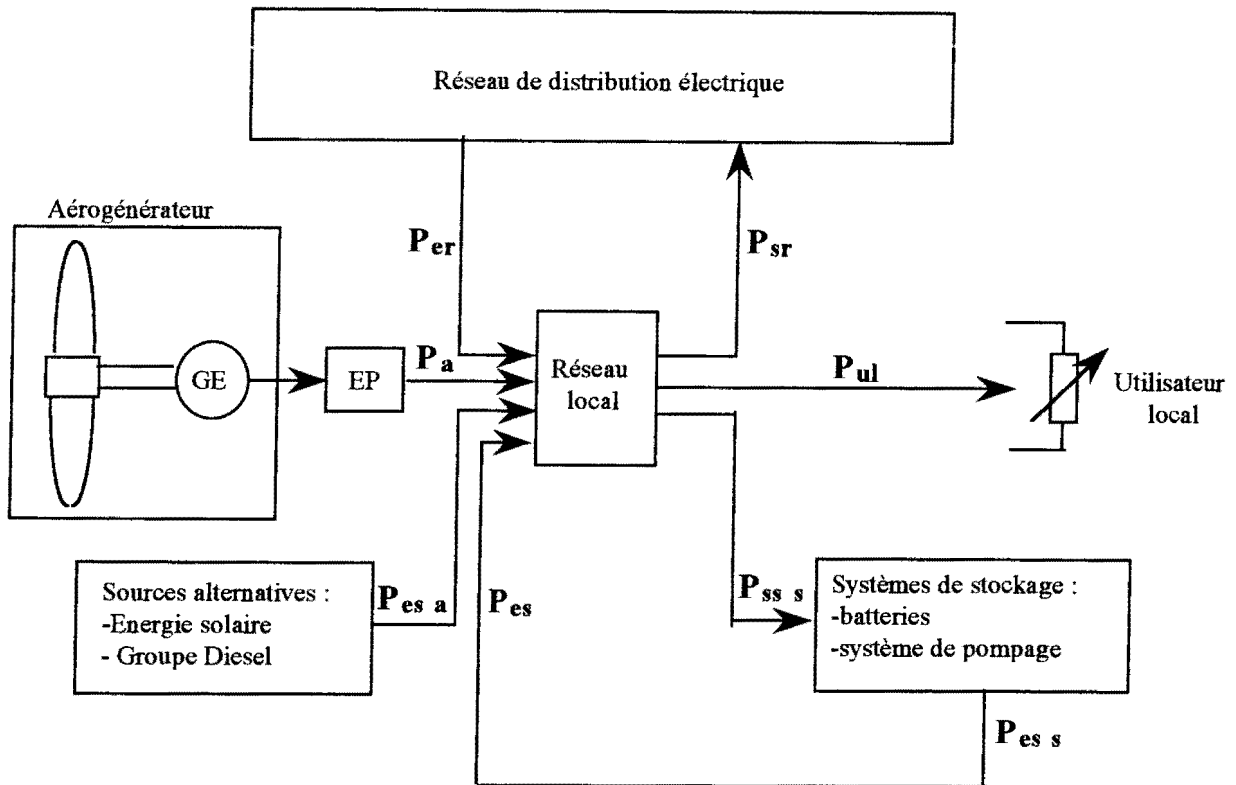


Figure 1.18: Schéma général de conversion de l'énergie éolienne

Naturellement, dans une configuration énergétique réelle, avec aérogénérateur, seulement une partie des flux mentionnés dans la figure 1.18 existe [24]. Présentons quelques situations particulières :

-1.  $P_a \neq 0 ; P_{ul} \neq 0$

Les autres puissances sont nulles ; c'est le cas d'une éolienne autonome, sans sources alternatives et sans systèmes de stockage.

-2.  $P_a \neq 0 ; P_{esa} \neq 0 ; P_{ess} \neq 0 ; P_{ul} \neq 0 ; P_{sss} \neq 0 ; P_{er} = P_{sr} = 0$  ; c'est le cas d'une éolienne utilisée dans un site isolé, avec des sources alternatives et un système de stockage.

-3.  $P_a \neq 0 ; P_{sr} \neq 0$

C'est le cas des aérogénérateurs de grande puissance qui débitent dans un réseau énergétique national ; le réseau local est le réseau de raccordement au système énergétique conventionnel.

-4.  $P_a \neq 0 ; P_{er} \neq 0 ; P_{ul} \neq 0 ; (P_{sr} \neq 0)$

Les autres puissances sont nulles. C'est le cas d'un aérogénérateur qui alimente un utilisateur, la source alternative étant le réseau de distribution électrique.

Dans tous les cas, il est souhaitable que l'aérogénérateur assure une conversion optimale de l'énergie éolienne instantanée disponible, de manière à ce que la production des sources alternatives soit minimale.

### 1.7.3 Conversion optimale de l'énergie éolienne

La conversion optimale de l'énergie éolienne est assurée quand, pour diverses valeurs de la vitesses du vent ( $V_1, V_2, V_3, \dots$ etc), les valeurs maximales des caractéristiques  $P_e(\Omega, v_1), P_e(\Omega, v_2), P_e(\Omega, v_3), \dots$ etc, sont situées sur la caractéristique de charge  $P_c(\Omega)$ , (Figure 1.19).

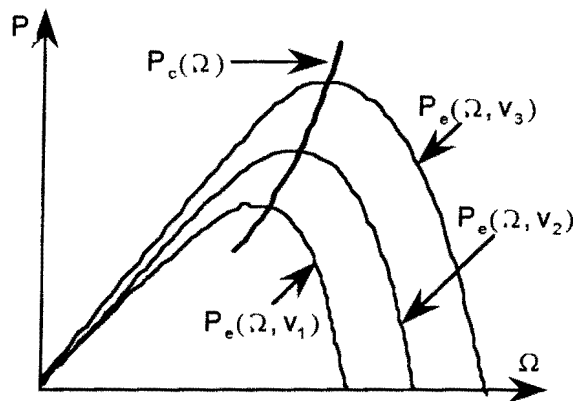


Figure 1.19: Conversion optimale de l'énergie éolienne

Le régime optimal de conversion doit prendre en compte le caractère aléatoire de la vitesse du vent et le fait que la puissance utile  $P_{ul}$ , consommée par l'utilisateur, est variable. Il vient que, l'optimisation en temps réel du fonctionnement du système énergétique éolien, nécessite une structure qui comporte des sources alternatives ou éléments de stockage, conformément à la figure 1.20.

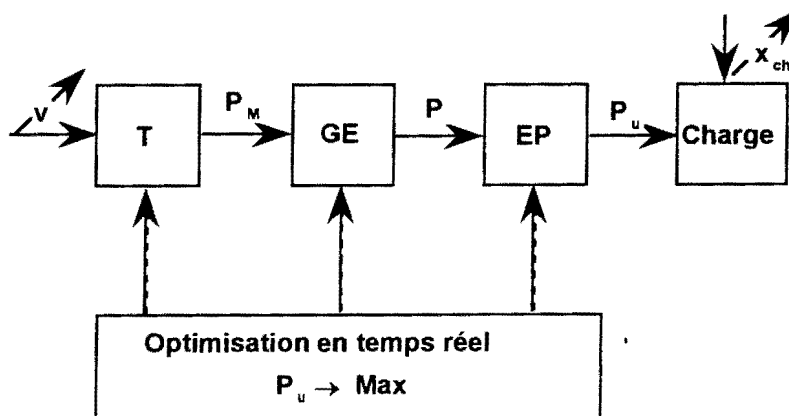


Figure 1.20: Eléments du système énergétique éolien susceptibles d'être utilisés pour l'optimisation

Sur cette figure, on présente les principaux éléments du système énergétique éolien: la turbine  $T$ , le générateur électrique  $GE$ , l'électronique de puissance du système  $EP$  et la charge  $Ch$ . La charge a une composante aléatoire, due aux consommations courantes,  $P_{ul}$ , et une composante réglable ou ajustable,  $P_{sa} = P_{sr} + P_{sss}$ , nécessaire pour la régularisation des paramètres.

Par conséquent, la puissance utile fournie dans la charge est :  $P_u = P_{ul} + P_{sa}$

où la consommation de l'utilisateur peut être considérée proportionnelle à une variable indépendante  $x_{ch}$  et où la composante réglable s'ajuste avec un circuit d'électronique de puissance.

L'optimisation en temps réel de la puissance dans la charge peut s'effectuer par des commandes sur :

- les paramètres de l'éolienne (ex: angle de calage  $\beta$  ),
- les paramètres du générateur électrique (la tension d'excitation pour les générateurs de courant continu ou synchrones, le nombre des pôles pour les générateurs asynchrones, etc.),
- le régime ou/et les paramètres du circuit électronique de puissance.

Le fonctionnement optimal d'un système énergétique hétérogène aussi complexe, est lié au comportement individuel de chacun des composantes et à une gestion rigoureuse de l'énergie disponible. Les différents travaux effectués au LER de Dakar et LEPII du Havre [25], [26] ont abouti au fonctionnement optimal des générateurs éoliens et photovoltaïques pris séparément et au transfert optimal de l'énergie fournie à leur charge respective.

Quelles que soient les sources disponibles pour assurer un fonctionnement "continu" des installations, un choix adéquat du mode d'interconnexion s'impose.

## **1.8 MODES DE COUPLAGE DES SOURCES D'ENERGIES RENOUEVELABLES**

### **1.8.1 Fonctionnement avec stockage d'énergie électrique**

Nous avons montré que dans certaines conditions, le couplage direct d'un générateur photovoltaïque à une batterie permettait d'obtenir un fonctionnement sensiblement optimal du générateur ( $V_{opt} = U_B$ ). Cette structure avec stockage de l'énergie autorise une utilisation en différé de l'énergie emmagasinée. La capacité de la batterie est déterminée en fonction de l'autonomie souhaitée et de la puissance du générateur. Cette structure est utilisée actuellement pour la réalisation de microcentrales autonomes, telle celle de NIAGA WOLOFF [20] au SENEGAL d'une puissance installée de 10kW ou pour l'alimentation de dispositifs mobiles (télécommunications, alimentation d'appareils électroniques, montres à quartz, micro-ordinateurs, etc...).

Le principal avantage de ces structures est de permettre le fonctionnement des récepteurs en l'absence d'ensoleillement.

Cependant, le rendement médiocre des batteries (60 à 80%), le coût relativement élevé, le poids et l'encombrement n'autorisent le choix de ces dispositifs que pour des puissances installées relativement faibles (< 25kW).

### **1.8.2 Fonctionnement "au fil du soleil"**

Dans certaines applications photovoltaïques, le stockage de l'énergie électrique n'est pas nécessaire. Dans le cas du pompage photovoltaïque l'énergie produite est utilisée pour stocker de l'eau. Le fonctionnement "au fil du soleil" est obtenu par l'utilisation de groupes à vitesse variable utilisant des machines à commutateurs électroniques associées à des pompes centrifuges. Dans ce dernier cas le couplage s'effectue par l'intermédiaire d'un convertisseur continu-alternatif. Le fonctionnement optimal du système photovoltaïque est obtenu par une étude approfondie de l'ensemble du dispositif. [27], [28]

### 1.8.3 Fonctionnement avec batterie tampon

La production d'énergie solaire étant aléatoire (périodes non ensoleillées et nocturnes), il est nécessaire de faire appel à des énergies complémentaires pour obtenir un fonctionnement permanent sans stockage d'énergie électrique. L'énergie complémentaire peut être apportée soit par les énergies renouvelables (énergie éolienne, biogaz,...), soit par les dispositifs conventionnels (groupes diesels, traction animale...). [9]

Nous abordons dans ce cas, le principe des microcentrales multigénérateurs. Les problèmes posés par ce type de microcentrales, sont:

- l'optimisation du fonctionnement des sources d'énergies renouvelables par suite de leur coût d'installation,
- le couplage de ces diverses sources entre elles,
- le transfert en temps réel de toute l'énergie produite vers les récepteurs.

Etudions les principales solutions envisageables pour résoudre ces problèmes.

Nous avons montré que l'optimisation du fonctionnement du générateur photovoltaïque couplé à une charge quelconque était réalisable par un convertisseur statique [29]. Il en est de même pour d'autres générateurs d'énergie électrique tels les éoliennes à axe horizontal.

Le problème du couplage des divers générateurs est plus délicat par suite de la nature même des sources et des grandeurs délivrées (tensions, courants). La structure de couplage doit permettre d'imposer une tension de sortie commune à toutes ces sources afin de simplifier le couplage avec les récepteurs. Diverses solutions ont été proposées ou sont en cours d'étude actuellement;

- le couplage par diode et asservissement de la tension de sortie de chaque générateur à une valeur commune,
- le couplage par diode et batterie tampon qui a déjà fait l'objet de travaux antérieurs et dont le synoptique est donné à la figure 1.21. [30]

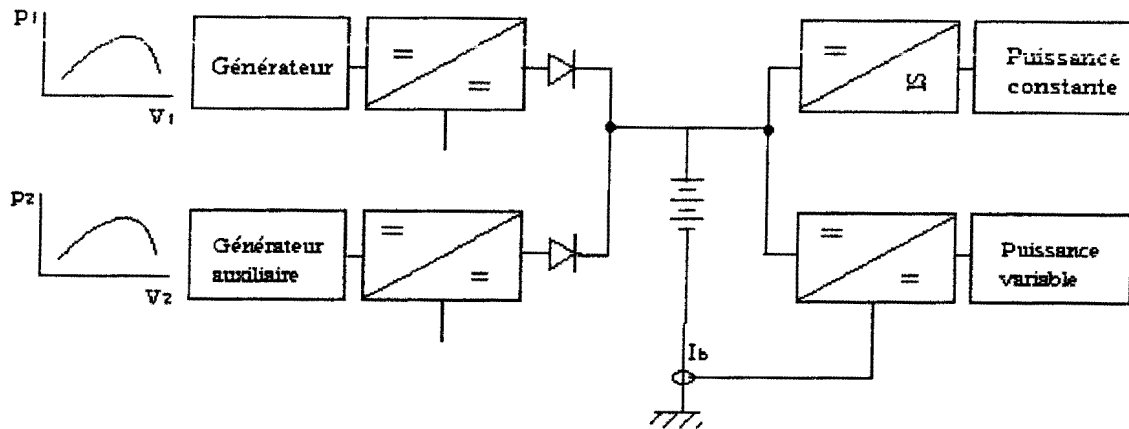


Figure 1.21: Couplage multigénérateurs par diodes et batterie tampon

Dans ce dispositif, la tension de sortie du couple générateur-convertisseur statique est imposée par la batterie qui fonctionne alors en tampon. Le degré de liberté qu'offre chaque convertisseur peut alors être utilisé pour l'optimisation du fonctionnement du générateur associé.

Le seul problème restant alors à résoudre dans cette configuration, est le transfert de toute l'énergie produite par les générateurs vers le (ou les) récepteurs, la batterie devant rester transparente. La solution retenue lors de travaux antérieurs consiste à effectuer un asservissement à courant nul dans la batterie par contrôle de la puissance transmise au récepteur à l'aide d'un convertisseur statique.

Dans ces conditions, toute la puissance fournie est transmise au récepteur et la batterie supposée chargée fonctionne alors en tampon.

Ce type de fonctionnement suppose que le récepteur puisse fonctionner à puissance variable et qu'il est dimensionné pour pouvoir absorber la puissance maximale fournie par les divers générateurs.

Les avantages d'un tel dispositif sont évidents:

- dimensionnement des batteries beaucoup plus faible, soit diminution du coût, du poids et de l'entretien,
- rendement excellent puisque uniquement lié au rendement des convertisseurs statiques.

A partir des considérations de l'étude précédente, nous nous proposons maintenant de décrire les configurations de fonctionnement du système pour assurer un transfert optimal d'énergie vers une charge complexe.



## 1.9 FONCTIONNEMENT OPTIMAL DE L'ENSEMBLE GENERATEUR - ACCUMULATEURS - CHARGE

### 1.9.1 Fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque

Pour des conditions d'éclairement et de température données la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque passe par un maximum qui correspond, dans le plan  $(V_p, I_p)$ , au point de contact de la caractéristique avec une hyperbole d'équipuissance. Ce point qui correspond à une puissance délivrée maximale relative aux conditions est appelé point de fonctionnement optimal  $(V_{opt}, I_{opt})$ . Lorsque les conditions varient le lieu des points  $(V_{opt}, I_{opt})$  définit la caractéristique de charge optimale. L'utilisation optimale du générateur consiste à adapter la charge de façon à ce que sa caractéristique électrique coïncide au mieux avec la caractéristique optimale ou demeure dans son voisinage.

Dans le cas général, l'adaptation d'impédance doit être réalisée en insérant entre le générateur et la charge électrique un dispositif adaptateur d'impédance.

La commande d'adaptation agit de manière à ce que l'adaptateur d'impédance présente toujours à ses bornes d'entrée l'impédance optimale correspondant aux conditions extérieures instantanées.

L'adaptation comporte deux aspects :

- l'adaptateur constitué par un convertisseur statique convenablement choisi,
- la commande de l'adaptateur, basée sur l'analyse du fonctionnement du système global. Elle fait appel à des procédés d'optimisation divers.

L'allure générale de la caractéristique de charge optimale représentée figure 1.9 conduit à remarquer que la tension optimale  $V_{opt}$  varie assez peu au cours de la journée. Aussi peut-on considérer qu'en première approximation le fonctionnement optimal du générateur correspond à un fonctionnement à tension constante, propriété mise à profit dans les installations qui utilisent des accumulateurs électrochimiques pour stocker l'énergie électrique, et qui constituent une charge "naturellement" presque optimale.

### 1.9.2 Convertisseur continu-continu

Afin de transférer l'énergie maximale disponible aux bornes du générateur photovoltaïque il convient de positionner la caractéristique de la charge dans le coude de la

caractéristique statique du générateur photovoltaïque. Pour ce faire, une adaptation d'impédance s'impose.

L'énergie peut être transférée à la charge sous une forme hachée par l'utilisation d'un convertisseur statique continu (hacheur) possédant les propriétés d'un adaptateur d'impédance. En appelant  $\alpha$  le rapport cyclique du hacheur, on peut déduire l'expression suivante pour la résistance vue par le générateur:

$$R_e = V_e / I_e = f(\alpha) R_{opt} \quad (\text{Eq. 1. 12})$$

Pour le hacheur série (abaisseur de tension)  $f(\alpha) = 1/\alpha$ , alors que pour le hacheur parallèle (élevateur de tension)  $f(\alpha) = 1-\alpha$

En agissant sur  $\alpha$ , la valeur de  $R_e(V_e)$  peut être ramenée à celle de la résistance  $R_{opt}(V_{opt})$  correspondant au fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque, d'où un transfert optimal de l'énergie.

### 1.9.3 Recherche du point de fonctionnement optimal

La technique utilisée pour assurer le fonctionnement optimal s'opère sous un mode d'asservissement de la tension d'entrée du convertisseur  $V_e$  (ou de la tension de sortie du générateur  $V_g$ ) en boucle fermée.

Un signal d'erreur résultant d'une comparaison entre  $V_g$  mesurée et une tension de référence agit sur  $\alpha$  de telle sorte que  $V_g$  soit égale à la tension optimale (Figure 1.22).

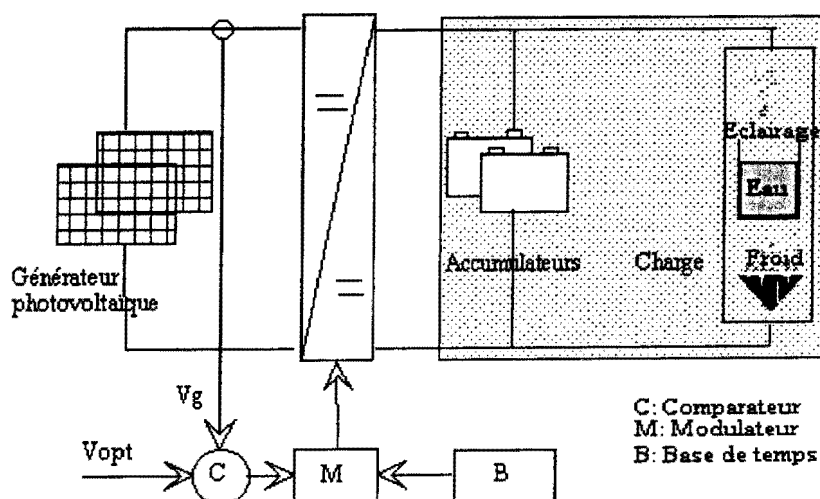


Figure 1.22: Techniques de poursuite du point de fonctionnement optimal

L'autre technique en boucle fermée, généralement utilisée dans les systèmes photovoltaïques de puissance supérieure à 1kW, consiste à faire une perturbation sur  $\alpha$  et à observer après une période, la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque, un microprocesseur gérant la démarche. Si une perturbation sur  $\alpha$  entraîne une augmentation ou une diminution de la puissance, la perturbation suivante sera faite sur  $\alpha$  respectivement dans le même sens ou dans le sens opposé (Figure 1.23).

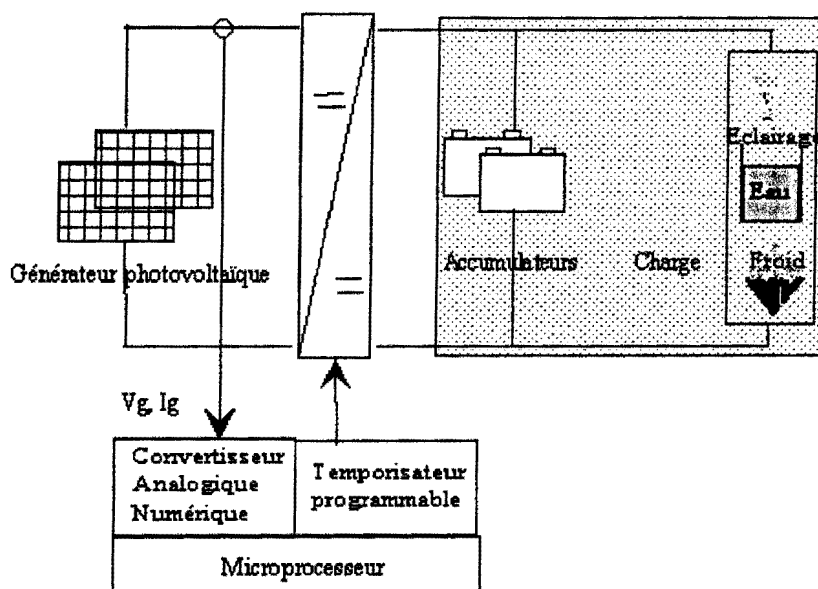


Figure 1.23: Contrôle numérique du point de fonctionnement optimal

Au cours du temps nous assistons à une alternance de ces configurations qui permet, si la régulation a été bien étudiée, d'optimiser la production du système.

#### 1.9.4 Convertisseurs continu-alternatif

Cet élément est indispensable pour tout système photovoltaïque devant fournir de l'énergie électrique en courant alternatif. Ses caractéristiques principales sont les suivantes:

#### CARACTERISTIQUES

##### A. Tension d'entrée

Celle-ci est importante dans la mesure où elle conditionne la tension de la batterie d'accumulateurs - qui est aussi celle du système - et par là même l'architecture du générateur. Les tensions d'entrée couramment employées sont 12V, 24V, 48V, 120V,...

### B. Puissance nominale

C'est la puissance maximum que peut délivrer le convertisseur en fonctionnement continu. Dans un système photovoltaïque cette puissance est au moins égale à la puissance maximum appelée en courant alternatif.

### C. Rendement

Il doit être maximum pour ne pas trop nuire au rendement global du système. Il est variable en fonction de la charge appliquée et de la technologie électronique utilisée (Figure 1.24).

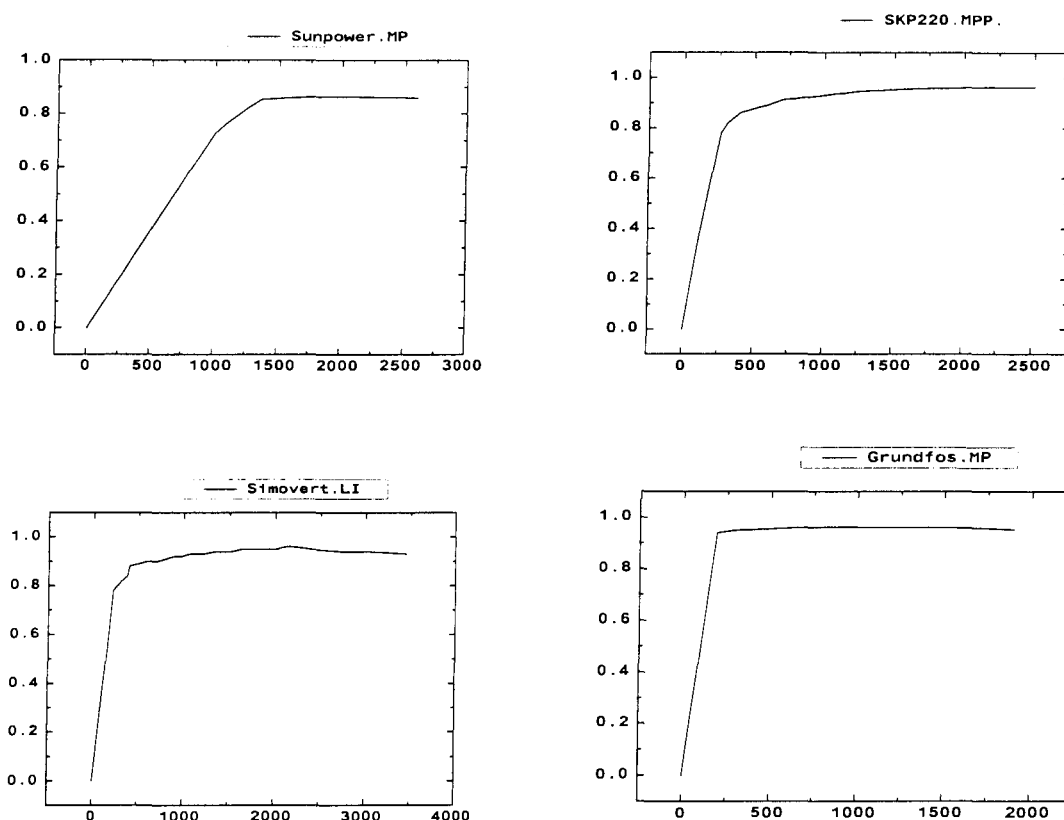


Figure 1.24: Exemples de rendement selon quatre constructeurs

### D. Signal de sortie

Le signal obtenu est variable selon les modèles: signal sinusoïdal, pseudo-sinusoïdal, carré. La forme de ce signal n'est cependant pas sans conséquences. En effet, outre la plus ou moins bonne tolérance des appareils électriques aux signaux non sinusoïdaux, ces derniers entraînent un déclassement des récepteurs qui se traduit, si le travail fourni reste le même, par une surconsommation d'énergie électrique.

### 1.9.5 Couplage par onduleur d'une charge alternative complexe au générateur photovoltaïque

Le couplage d'une charge alternative au générateur photovoltaïque pose certains problèmes du fait de la nature particulière de ce dernier.

Ces problèmes sont liés d'une part au régime dynamique et d'autre part au régime moyen statique ou lentement variable dans le temps.

#### *- Problèmes liés au régime dynamique*

Les contraintes dynamiques liées à l'association du générateur avec des récepteurs électromécaniques comportent deux aspects, l'un électrotechnique, l'autre énergétique.

##### *a/ Aspect électrotechnique*

L'ensemble onduleur-charge doit être alimenté par une source continue à réversibilité instantanée en tension avec l'onduleur de courant ou en courant avec l'onduleur de tension. Or le générateur photovoltaïque du fait de ses propriétés particulières, ne peut pas satisfaire ces conditions.

Les problèmes sont résolus en insérant une inductance en série avec l'onduleur de courant et une capacité en parallèle à l'entrée de l'onduleur de tension. [31]

##### *b/ Aspects énergétiques dynamiques*

L'utilisation optimale du générateur photovoltaïque consiste à amener à tout instant le point de fonctionnement du générateur confondu avec le point optimal. Or les montages onduleurs sont en général à l'origine d'une ondulation importante des grandeurs continues, vc pour le commutateur de courant.

L'interaction résultante avec le générateur se traduit par des oscillations périodiques du point de fonctionnement sur la caractéristique statique, autour d'une position moyenne. Cette ondulation résiduelle pénalise la conversion photovoltaïque, et cela même autour du point optimal.

En raison de cet aspect énergétique il est nécessaire d'atténuer efficacement ces ondulations. Un filtre convenablement dimensionné, inséré entre le générateur et le convertisseur résout généralement le problème.

Notons cependant que le dimensionnement de ce filtre n'est pas aisé. En effet, dans son calcul, il faut tenir compte, pour un taux d'ondulation donné, d'une part de l'oscillation renvoyée par le convertisseur, cette oscillation dépend du point de fonctionnement de la machine; d'autre part de l'impédance dynamique du générateur qui, elle, varie fortement dans la zone de fonctionnement optimal.

Une étude détaillée de cet aspect conduite au laboratoire pour le couplage à un onduleur de courant a montré la nécessité de disposer un filtre du second ordre ( $L, C$ ) entre le générateur et l'onduleur.

*- Problèmes liés au régime lentement variable: Fonctionnement optimal*

Dans un système photovoltaïque, les principales entrées de perturbation sont de deux types :

- celles liées à l'état du générateur telles que l'éclairement et la température, le masquage par la poussière, le vieillissement,
- les variations des pertes de charges.

Ces perturbations correspondent à des phénomènes lentement variables dans le temps relativement aux constantes de temps électriques.

Rappelons que dans une installation photovoltaïque un critère d'utilisation optimale du générateur est d'en extraire à chaque instant, pour un éclairement et une température donnés, la puissance maximale c'est-à-dire la puissance optimale.

Comme la puissance disponible varie au cours de la journée, pouvant entraîner des variations importantes du rendement de conversion électromécanique, il peut être nécessaire d'optimiser également cette dernière.

L'optimisation simultanée des deux conversions photovoltaïque et électromécanique demande a priori deux variables de commande, soit deux degrés de liberté. Le système se présente alors comme un système multivariable. [32], [33]

De manière générale le nombre de degrés de liberté pour optimiser la conversion d'énergie globale dans un système photovoltaïque est défini comme étant égal à la dimension du vecteur de commande de celui-ci.

On utilise essentiellement deux types de convertisseurs continu-alternatif: onduleur de courant ou onduleur de tension.

- l'alimentation en courant, dans laquelle on impose les courants et leur phase notée  $y$  par rapport aux fem (courant et fem par phase),
- l'alimentation en tension, dans laquelle on impose les tensions et leur phase  $d$  par rapport aux fem (grandeurs définies par phase).

### A. Alimentation par onduleur de courant

L'onduleur de courant est constitué principalement par un pont de Graetz à quatre thyristors, avec une commande autonome (Figure 1.25).

L'étage continu doit présenter les propriétés dynamiques d'une source de courant, donc une impédance instantanée infinie. En outre cet étage doit être réversible en tension car la tension instantanée  $v_c$  peut changer de signe pour certains points de fonctionnement. Le transfert d'énergie est d'ailleurs réversible par inversion du signe de la tension moyenne  $V_c$  côté continu. En pratique on insère une inductance en série en tête de l'onduleur de courant, ce qui est un artifice répondant à ces contraintes.

Cet onduleur commute le courant d'une phase à l'autre de l'étage alternatif qui doit présenter les propriétés d'une source de tension.

Le thyristor est un interrupteur de puissance à amorçage commandé et blocage spontané par annulation du courant, puis application d'une tension inverse pendant un temps supérieur au temps de recouvrement  $t_r$ . Lorsque ces conditions sont réalisées par la structure de base du convertisseur statique on dit qu'il y a commutation naturelle. Ces conditions sont satisfaites si le courant alternatif présente sur la tension une avance de phase suffisante. Dans le cas contraire des circuits additionnels sont nécessaires pour assurer la commutation forcée.

Pour notre application nous n'avons retenu que le dispositif fonctionnant en commutation naturelle dont la relative simplicité apporte fiabilité et moindre coût.

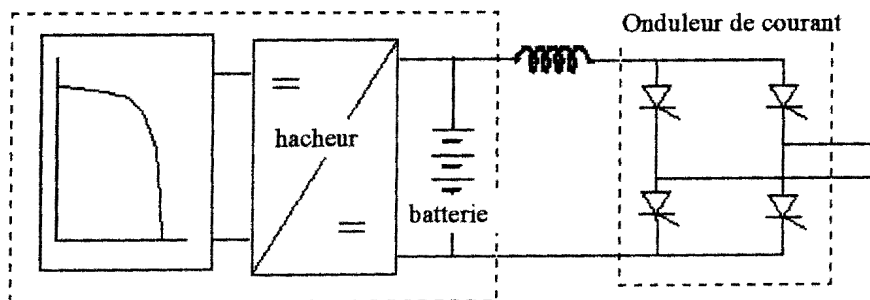


Figure 1.25: Synoptique de principe de l'onduleur de courant

### B. Alimentation par onduleur de tension

L'onduleur de tension utilise quatre interrupteurs bidirectionnels en courant. Les contraintes de fonctionnement de l'interrupteur permettent de mettre en oeuvre une technologie de type transistor, ce qui offre des possibilités de fonctionnement beaucoup plus variées que pour la structure précédente.

La structure du montage est présentée sur la figure 1.26.

L'étage continu doit présenter les propriétés dynamiques d'une source de tension (impédance instantanée nulle). Il doit de plus être réversible en courant en raison des courants de récupération circulant dans les diodes. En pratique on dispose une capacité en parallèle sur l'entrée continue de l'onduleur pour répondre à ces contraintes. Le transfert énergétique est réversible par inversion du signe du courant continu moyen.

L'étage alternatif doit posséder les propriétés dynamiques d'une source de courant, ce qui est le cas pour une machine électrique. Les formes d'ondes obtenues en pratique sont donc très proches des formes d'onde théoriques, la machine n'intervenant pas lors des phénomènes de commutation.

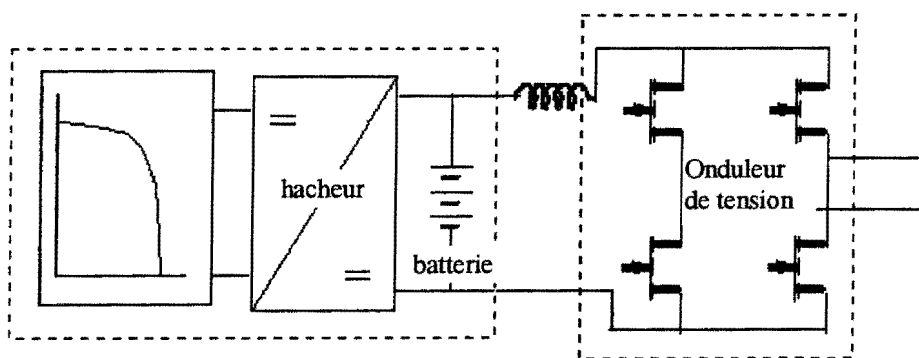


Figure 1.26: Synoptique de principe de l'onduleur de tension

## 1.10 GESTION, REGULATION ET FONCTIONNEMENT DU SYSTEME

### 1.10.1 Principe de gestion

Pour obtenir un rendement maximum de l'installation photovoltaïque, il est nécessaire de mettre en place une gestion des transferts d'énergie qui optimise le fonctionnement de chacun des composants du système tout en garantissant le respect de leur plage de fonctionnement.

L'élément situé au coeur des transferts d'énergie est la batterie d'accumulateurs, qui est aussi le composant le plus vulnérable (le convertisseur et le générateur photovoltaïque sont facilement protégés). La gestion est donc basée sur la connaissance de l'état de charge des accumulateurs, qui devient dès lors contrôlable.

Le rôle de la gestion est alors le suivant:



- Protéger les accumulateurs des surcharges tout en essayant de récupérer le maximum d'énergie du générateur.
- Protéger les accumulateurs des décharges trop profondes, tout en couvrant au maximum la demande en énergie s'il n'y a pas de générateur d'appoint pour assurer cette couverture.

Pour ce faire, la démarche la plus adaptée semble être la suivante:

- Si l'état de charge est moyen: le générateur doit délivrer le maximum d'énergie au reste du système qui assure de son côté la couverture de la demande énergétique.
- Si l'état de charge est supérieur à 80%: la difficulté de connaître précisément l'état de charge impose qu'à partir de ce seuil des précautions sont prises pour protéger la batterie. Nous avons le choix à ce stade entre deux possibilités:

- la connexion complète du générateur,

- une réduction de la production du générateur pour conserver par exemple une production d'énergie équivalente à la consommation, ou pour conserver une production suffisamment faible pour ne faire courir aucun risque aux accumulateurs. Nous proposons au paragraphe 1.10.2 différentes méthodes pour réduire la production du générateur photovoltaïque. Cette deuxième possibilité permet des gains de productivité intéressants; elle est en générale retenue.

- Si l'état de charge atteint 100%: pour éviter tout risque et même si le courant de charge est faible, le générateur est entièrement déconnecté.
- Si l'état de charge atteint le bas de l'intervalle qui a été fixé (en générale 40% d'état de charge):
- Si le système comprend un générateur d'appoint: celui-ci est chargé de suppléer au stockage.
- S'il n'y a pas de générateur d'appoint: la charge est délestée, en partie ou totalement. Un délestage partiel (pour continuer par exemple à couvrir des besoins faibles mais qualitativement importants) implique l'existence d'un autre seuil légèrement inférieur au seuil bas pour assurer un délestage complet.

Tous ces seuils d'états de charge sont doublés pour éviter des battements intempestifs. Dans le cas du seuil bas, le seuil de reconnexion de la charge est relevé de manière à assurer une certaine recharge du stockage.

### 1.10.2 Régulation

La régulation chargée de faire respecter la gestion a donc pour critère l'état de charge des accumulateurs. Le problème est alors de pouvoir mesurer celui-ci. Différentes méthodes sont proposées:

- Mesure de la densité d'électrolyte: imprécis car pour des batteries stationnaires il y a stratification de l'électrolyte.
- Mesure de la résistance interne: mesure de la partie réelle de l'impédance des accumulateurs à une certaine fréquence; nécessite un matériel (analyseur de fonction de transfert...).
- Mesure de la tension: méthode la plus répandue, simple à mettre en oeuvre.

La dernière méthode est en général utilisée mais il faut préciser certaines précautions d'emploi: en effet, la tension seule n'est pas représentative de l'état de charge puisqu'elle varie avec le régime de charge ou de décharge auquel les accumulateurs sont soumis. Il est donc nécessaire de corriger la tension de l'effet du régime, ce qui revient à réguler sur la F.e.m. de la batterie. Pour agir plus précisément encore, il faut aussi tenir compte de la température, surtout pour les accumulateurs au cadmium-nickel qui y sont particulièrement sensibles.

Une bonne régulation doit prendre en compte ces paramètres correctifs. Le régulateur agit alors en fonction de la tension corrigée du système, sur des relais chargés de déconnecter ou de reconnecter le générateur photovoltaïque, de délester ou de reconnecter la charge (absence de générateur d'appoint) ou de démarrer ou d'arrêter le générateur d'appoint.

La mise en oeuvre d'une telle régulation est simple, mais il faut cependant étudier plus avant les moyens de réduire la production du générateur au seuil de 80% d'état de charge des accumulateurs. Trois méthodes peuvent être retenues :

#### *A. Déconnexion partielle du générateur*

Il s'agit dans ce cas de déconnecter une partie des branches (séries de modules) du générateur; il suffit d'avoir prévu dans le câblage un "point milieu" au générateur. Le courant produit est diminué dans une proportion équivalente au nombre de branches mises hors circuit.

### *B. Déplacement du point de fonctionnement*

Il s'agit d'augmenter la tension vue par les modules pour s'éloigner de leur point de puissance maximum. Le courant fourni est alors beaucoup diminué.

Il est possible d'agir de deux manières pour arriver à ce résultat:

- Mettre en série avec le générateur photovoltaïque une résistance pour augmenter la tension vue par le générateur.

- Isoler un ou deux modules par série pour que la tension vue par les autres modules augmente.

Mettre en oeuvre des convertisseurs statiques avec une structure particulièrement adaptée.

### *C. Dérivation de courant*

Une partie du courant produit par le générateur photovoltaïque est dissipée dans une résistance  $R$  placée en parallèle sur les accumulateurs:

Ces trois méthodes de réduction de la production du générateur peuvent aussi s'utiliser de manière progressive: déconnexion progressive des branches, augmentation progressive d'une résistance série...

## **1.10.3 Analyse du fonctionnement de l'ensemble du système**

L'analyse du fonctionnement des principaux organes des systèmes photovoltaïques réalisée nous permet maintenant d'effectuer celle d'un système complet et d'envisager le comportement des différents organes pour un fonctionnement réel.

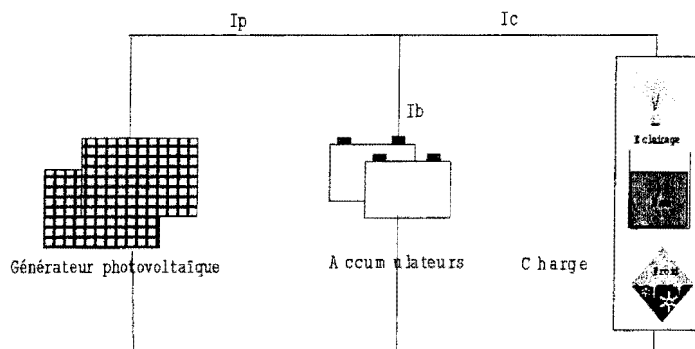
Dans cette partie notre objectif est d'analyser de quelle manière s'effectue la répartition des courants et comment se détermine la tension du système. Pour cela nous avons utilisé une représentation graphique à partir des courbes caractéristiques  $I-V$  des divers composants.

Dans tout système photovoltaïque, exceptés ceux qui n'utilisent pas d'accumulateurs, la régulation engendre différentes configurations du système. Nous allons donc examiner les différentes configurations possibles.

- Configuration 1: Le générateur photovoltaïque alimente la charge et les batteries.
- Configuration 2: La charge est alimentée par le générateur photovoltaïque et les batteries.
- Configuration 3: Les batteries alimentent la charge, le générateur photovoltaïque est déconnecté.
- Configuration 4: Le générateur photovoltaïque recharge les batteries; la charge est déconnectée.
- Configuration 5: La puissance de recharge est limitée.

Configuration 1: Générateur photovoltaïque et charge connectés:

Cette configuration est la plus fréquente, elle représente le fonctionnement normal d'un système photovoltaïque où le générateur fournit à la fois la puissance nécessaire à la charge et dont la puissance excédentaire est utilisée pour la recharge de batteries. Dans ce cas, le régulateur n'a aucune action. Le schéma de principe est le suivant:



*Figure 1.27: Schéma de principe du système*

L'énoncé de la loi de Kirchhoff aux noeuds du système nous indique que:

$$I_p = I_b + I_c \quad (\text{Eq. 1. 13})$$

En utilisant les caractéristiques  $I-V$  des divers composants, nous définissons graphiquement le point de fonctionnement du système.

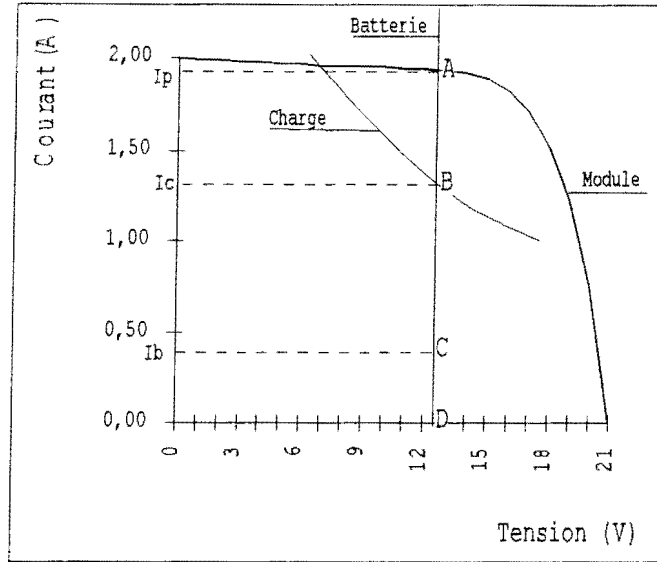


Figure 1.28: Représentation graphique du point de fonctionnement (GPV + Batterie + Charge)

Configuration 2: La charge est alimentée par le générateur photovoltaïque et les batteries

Cette configuration est identique à la précédente mais présente le cas où le générateur ne peut fournir la puissance appelée par la charge. Les batteries doivent fournir la puissance complémentaire. La loi de Kirchhoff s'écrit donc:

$$I_c = I_p + I_b \quad (\text{Eq. 1. 14})$$

La détermination graphique du point de fonctionnement est donc la suivante:

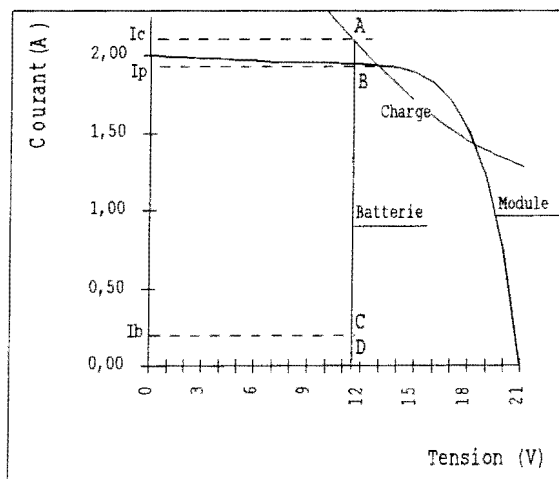


Figure 1.29: Représentation graphique du point de fonctionnement (GPV + Batteries + Charge)

Configuration 3: Les batteries alimentent la charge; le générateur photovoltaïque est déconnecté

Ce cas correspond à la mise en oeuvre du régulateur sans optimisation de la recharge. La régulation a déconnecté le générateur photovoltaïque. Seule la batterie peut répondre à l'appel de puissance de la charge. Cette configuration est effective pour le fonctionnement de nuit.

Le représentation graphique de ce cas est la suivante:

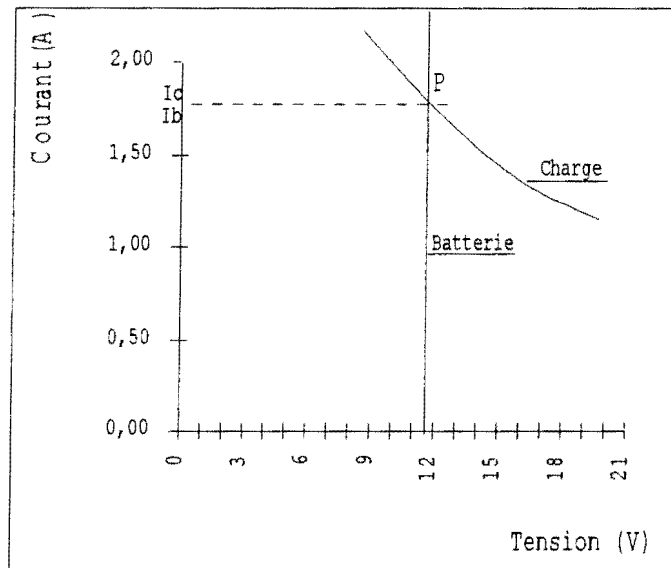


Figure 1.30: Représentation graphique du point de fonctionnement (Batteries + Charge)

Configuration 4: Le générateur photovoltaïque recharge les batteries; la charge est déconnectée

Cette configuration est due soit à la déconnexion de la charge par le régulateur, soit à l'absence de charge à l'instant considéré. Le générateur photovoltaïque est utilisé pour recharger les accumulateurs. Le point de fonctionnement est déterminé par l'unique intersection des deux caractéristiques. On peut noter, les variations dues à l'état énergétique de la batterie.

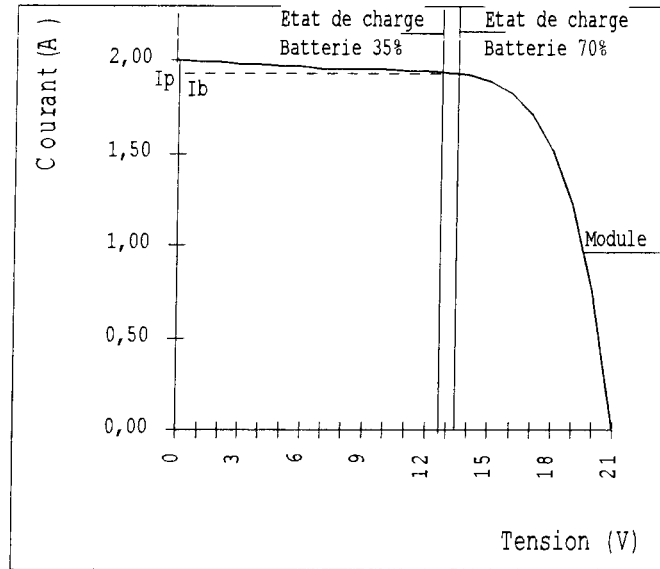


Figure 1.31: Représentation graphique du point de fonctionnement  
(GPV + Batteries)

Configuration 5: La puissance de recharge est limitée

Pour cette configuration représentant la mise en oeuvre d'un régulateur avec optimisation de la recharge, plusieurs méthodes sont proposées parmi lesquelles:

**Régulateur à déconnexion partielle:** Une partie des modules constituant le générateur est déconnectée. Selon la réduction de la puissance du champ, la recharge des batteries peut être réduite ou les batteries peuvent être à même d'alimenter la charge. Au point de fonctionnement,  $I_c = I_p + I_b$ .

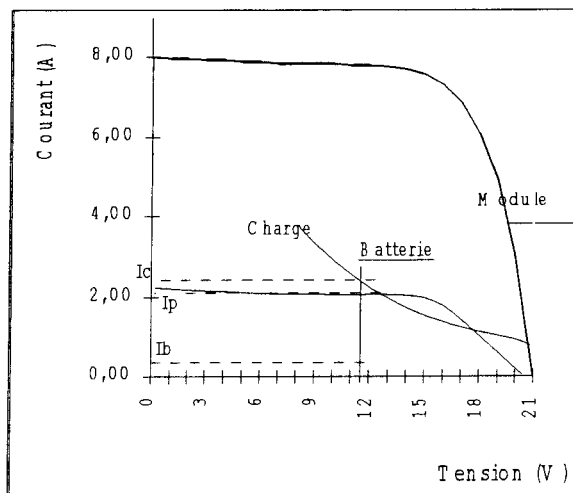


Figure 1.32: Déconnexion partielle du générateur

**Régulateur par déplacement du point de fonctionnement:** Une résistance est adjointe en série au générateur photovoltaïque et a pour conséquence de diminuer le courant fourni puisque le point de fonctionnement glisse vers la tension de circuit ouvert.

$$V' = V + R_s I_p$$

$$I_c = I_p + I_b$$

$$V' = V + R_s (I_c - I_b)$$

$$(V' - V) / R_s + I_b = I_c$$

(Eq. 1. 15)

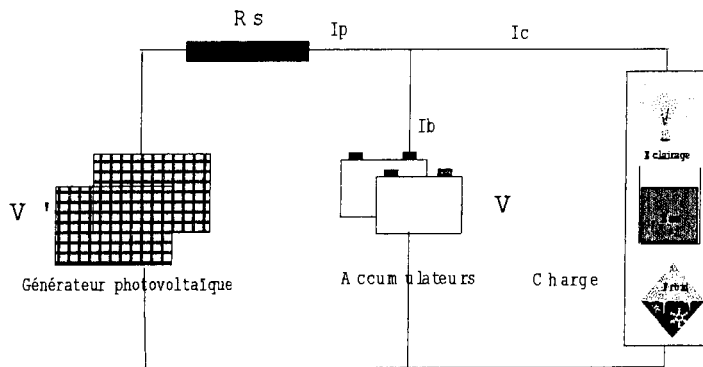


Figure 1.33: Schéma simplifié de la configuration

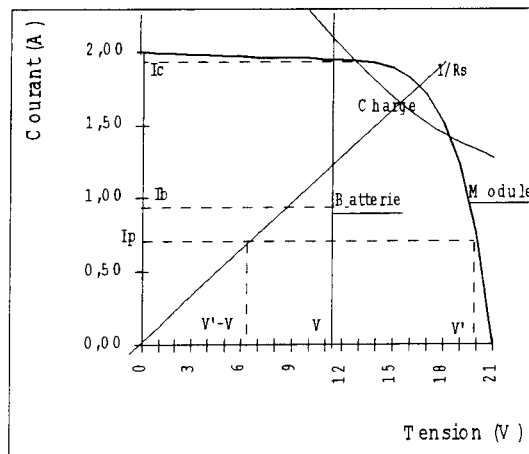


Figure 1.34: Adjonction d'une résistance série

**Régulateur par dérivation de courant:** Une partie du courant fourni par le générateur photovoltaïque est dérivée sur une résistance en parallèle.

$$I_c = I_b + I_p - I_{rsh} \quad \text{ou} \quad I_p - I_{rsh} = I_c - I_b \quad (\text{Eq. 1. 16})$$



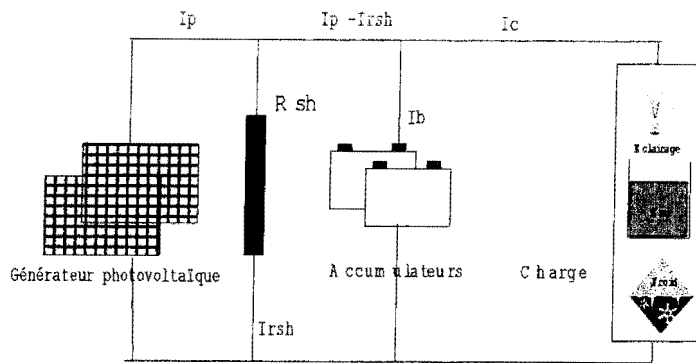


Figure 1.35: Schéma simplifié de la configuration

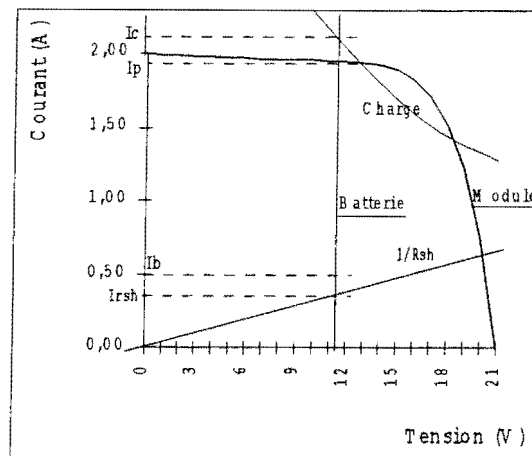


Figure 1.36: Régulation par dérivation du courant

## 1.11 Conclusion

L'analyse du fonctionnement du système a été menée à partir de la caractérisation de chacun des composants. Cette analyse a pu conduire à la détermination totale du système. En effet, l'approche graphique adoptée a permis de déterminer à la fois la tension du système ainsi que les courants dans les différents composants, pour une configuration donnée du système. Le type d'analyse a consisté à observer un système figé au temps T. Le fonctionnement réel de l'ensemble du système au cours du temps représente une succession de configurations semblables. Les principales évolutions sont dues:

- d'une part aux conditions extérieures
  - conditions météorologiques
  - profil de charge de l'installation
- d'autre part à des conditions propres au système en particulier aux actions de la régulation.

Les études théoriques menées sur les différents composants des systèmes photovoltaïques ont permis de définir les hypothèses de base pour l'élaboration des différents modèles. Elles ont aussi fourni les dépendances des grandeurs électriques caractéristiques des phénomènes en fonction des diverses variables externes ainsi que des paramètres internes. Les phénomènes rencontrés sont complexes et fortement non linéaires, l'étude de leur application aux systèmes photovoltaïques permettra toutefois,

- de les linéariser pour la plage de fonctionnement,
- de définir des relations semi-empiriques à partir de la sensibilité aux différents paramètres.

Ainsi, les modèles à définir devront faire appel à des résultats expérimentaux pour la détermination des valeurs des paramètres.

Au niveau de l'analyse du fonctionnement des systèmes, nous avons vérifié que la prédiction des caractéristiques I-V de chacun des composants permettait de définir le comportement global du système et de caractériser toutes les configurations accessibles. En effet l'étude menée à partir d'une approche graphique a montré qu'il était possible de déterminer à la fois la tension du système ainsi que les courants dans les diverses branches de l'installation.

La sensibilité du fonctionnement aux conditions météorologiques et au profil de charge de l'installation nous font entrevoir la nécessité de simuler le comportement du système à pas de temps fin si l'on ne veut pas trop s'écarter de la réalité.

## Liste des symboles

$E$  : énergie d'un faisceau de photons  
 $h$  : constante de Planck  $6.62 \cdot 10^{-34}$  JS  
 $l$  : longueur d'onde  
 $\nu$  : fréquence du rayonnement  
 $c$  : vitesse de la lumière =  $3 \cdot 10^8$  ms<sup>-1</sup>  
 $E_g$  : énergie nécessaire aux photons pour franchir la bande interdite  
 $I$  : courant délivré par la jonction PN  
 $V$  : différence de potentiel à la jonction PN  
 $I_d$  : intensité du courant direct de la diode ou courant d'obscurité  
 $I_e$  : intensité du courant provenant uniquement de l'éclairage,  
 $I_s$  : courant de saturation de la jonction, dépend du matériau semi conducteur,  
 $V$  : tension directe aux bornes de la jonction,  
 $e$  : charge de l'électron =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  C  
 $k$  : constante de Boltzmann =  $1,38 \cdot 10^{-23}$  JK<sup>-1</sup>  
 $T$  : température de la jonction en Kelvin.  
 $I_p$  : courant de sortie d'un module  
 $V_p$  : différence de potentiel au bornes d'un module  
 $I_{opt}$  : intensité du courant au point de fonctionnement  
 $V_{opt}$  : tension au point de fonctionnement  
 $V_{co}$  : tension de circuit ouvert  
 $I_{cc}$  : courant de court-circuit  
 $R$  : résistance d'une charge  
 $WC$  : capacité en Wh  
 $BF$  : profondeur de décharge  
 $AH$  : capacité en Ah  
 $U_b$  : tension aux bornes de la batterie  
 $P_a$  : puissance fournie par l'aérogénérateur,  
 $P_{esa}$  : puissance fournie par les sources alternatives,  
 $P_{er}$  : puissance fournie par le réseau de distribution électrique,  
 $P_{ess}$  : puissance fournie par le système de stockage.  
 $P_{ul}$  : puissance consommée par l'utilisateur,  
 $P_{sss}$  : puissance transmise au système de stockage d'énergie,  
 $P_{sr}$  : puissance transmise au réseau de distribution électrique.  
 $\Omega$  : vitesse sur l'arbre de l'aérogénérateur  
 $V_g$  : tension de sortie du générateur  
 $a$  : rapport cyclique  
 $L$  : inductance  
 $C$  : capacité  
 $I_b$  : courant batterie  
 $I_c$  : courant dans la charge

**CHAPITRE 2**  
**MODELISATION ET SIMULATION**  
**DES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES**

## 2.1 - INTRODUCTION

L'une des principales préoccupations lors de la conception d'un système photovoltaïque est la détermination du meilleur rapport entre le générateur photovoltaïque et la batterie de stockage afin de fournir de l'énergie avec une fiabilité donnée. Il est parfois inadéquat d'utiliser l'irradiation moyenne quotidienne ou mensuelle et une valeur estimée du nombre de jours successifs "sans soleil" pour la détermination de la puissance du générateur et de la capacité de batterie parce que le comportement dynamique du système photovoltaïque et la nature stochastique de l'irradiation solaire influencent considérablement le dimensionnement de la batterie et du générateur photovoltaïque.

L'approche de simulation exposée dans ce chapitre utilise des données météorologiques et énergétiques à pas de temps fin pour simuler le transfert d'énergie dans un système photovoltaïque. Elle prédit également la fiabilité du système sous diverses capacités de batterie et de puissance du générateur. Par des méthodes numériques, on peut formuler ce rapport sous une forme analytique. Plusieurs combinaisons de capacités de batterie et de puissance de générateur sont susceptibles d'avoir la même fiabilité. D'un point de vue économique, il faut minimiser le coût du système pour une fiabilité donnée.

Dans de nombreux travaux [34], [35] on admet la durée annuelle de rupture de charge (DARC) comme paramètre pour exprimer cette fiabilité. Dans ce qui va suivre, DARC exprime le nombre d'heures dans une année pendant lesquelles le système photovoltaïque ne répond pas aux exigences de la charge. Cette pénurie énergétique n'inclut pas les pannes de composants du système ou les arrêts d'entretien. La pénurie énergétique considérée ici est liée aux résultats obtenus lors du dimensionnement et de la conception. Ces problèmes incluent la puissance du générateur photovoltaïque, la capacité de la batterie de stockage, la prédiction quotidienne des données météorologiques, l'estimation des pointes de charge ou du profil de charge, et la prédétermination du gradient énergétique au niveau de la charge.

Une fois l'irradiation, les données météorologiques et le profil de charge de façon quotidienne, exactement prédits (si possible) pour une période donnée (1 année), un calcul est alors effectué afin de déterminer la combinaison optimum entre la capacité de la batterie et le générateur photovoltaïque susceptible de présenter une fiabilité précisée. Evidemment, à fiabilité basse (DARC élevée), la capacité globale générateur-batterie peut être réduite. Il peut être montré que le rapport de prix  $P_w/P_B$  du générateur photovoltaïque à la batterie affecte la combinaison optimum générateur-batterie.

Cependant, le modèle de climat et le profil de charge ne peuvent guère être prédits de façon exacte. Dans le cas d'un système exclusivement solaire où plus de 97% de la fiabilité est requise, le système peut être surdimensionné et son installation coûteuse. Le système doit

couvrir ces quelques peu probables jours "sans soleil", les pointes de charge imprévues et les changements dans le modèle de consommation dans l'année. Il a été montré [35] qu'un système exclusivement solaire peut être combiné avec un système conventionnel de générateur pour obtenir un système hybride. D'autre part, un tel système est souvent plus économique que chacun des systèmes pris séparément avec des fiabilités de plus de 97%.

Afin d'accroître les performances du système, il faut dès sa conception étudier à travers une modélisation le comportement de ses éléments constitutifs. Ce chapitre présente également la combinaison énergétique optimum pour un système hybride photovoltaïque-éolien opérant avec une fiabilité de 100%.

## 2.2 - MODELISATION DES ELEMENTS CONSTITUTIFS DU SYSTEME

Un des objectifs assignés à ce travail est la réalisation d'un logiciel, pour simuler un système constitué d'un générateur photovoltaïque, d'une batterie de stockage, d'un régulateur de charge et d'une source auxiliaire (Figure 2.1).

Les données météorologiques (irradiation et température ambiante) et profil de consommation représentent les entrées du système qui influencent la performance de chaque sous-système ainsi que celle du système global. Les modèles mathématiques pour chaque sous-système sont décrits dans les sections suivantes.

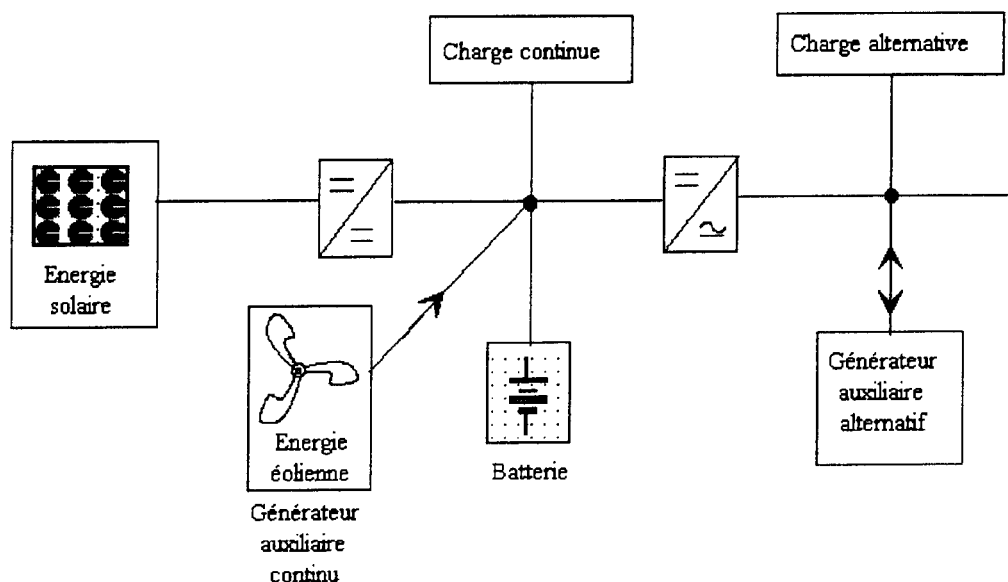


Figure 2. 1: Schéma d'un système photovoltaïque

### 2.2.1 Base de données de l'irradiation solaire

Dans l'objectif de réduire le temps de calcul requis, la base de données d'irradiation [36] utilisée pour la simulation est générée par "Météovil" logiciel mis au point dans le cadre de ce travail (Figure 2.2).

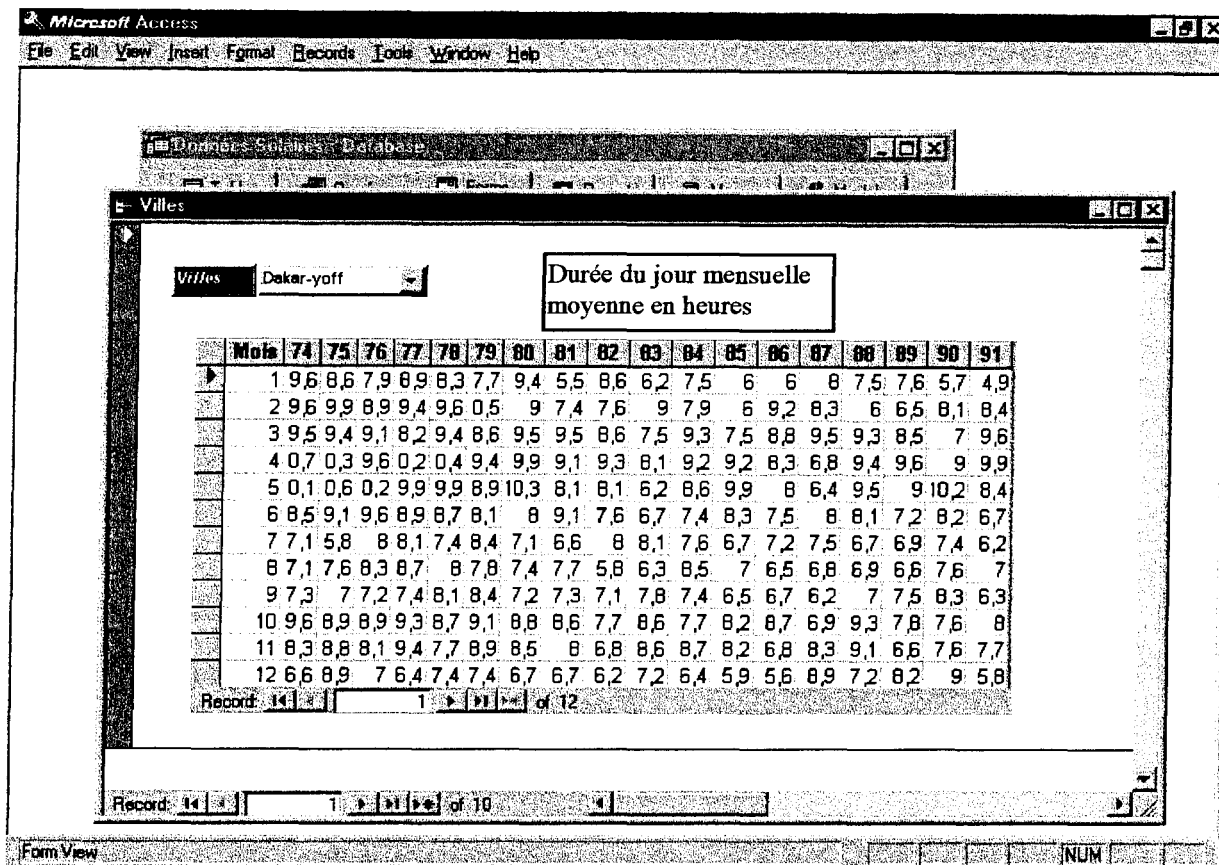


Figure 2. 2: Copie d'écran de "Météovil"

Le modèle d'irradiation utilise la collecte, sur plusieurs années, d'informations sur l'irradiation solaire en Afrique sous une forme compacte qui reproduit les totaux horaires et journaliers de l'irradiation solaire. Ce modèle est susceptible d'être appliqué partout où il y a un climat sahélien entre des latitudes 21°N et 10°N (Tableau 2.1). L'irradiation sur n'importe quel niveau à n'importe quelle période peut être simulée.

Villes	Latitudes	Villes	Latitudes
NOUADHIBOU	20°93	GEORGETOWN	13°53
ATAR	20°52	NIAMEY	13°48
PORT SUDAN	19°58	SOKOTO	13°02
BILMA	18°68	METEMA	12°95
TIDJIKJA	18°57	KAOLACK	12°73
KIDAL	18°43	EN NAHUD	12°70
NOUAKCHOTT	18°10	BAMAKO	12°63
FAYA-LARGEAU	18°00	KEDOUGOU	12°57

ATBARA	17°70	ALAMATA	12°52
PONTA DO SOL	17°20	KASS	12°52
AGADEZ	16°97	OUAGADOUGOU	12°35
MINDELO	16°88	NOVA LAMEGO	12°28
TOMBOUCTOU	16°73	MONGO	12°18
NAKFA	16°67	N'DJAMENA	12°13
KIFFA	16°63	BISSAU	11°88
NEMA	16°60	MAIDUGURI	11°85
ST° LOUIS	16°05	DJIBOUTI-SERPENT	11°60
MENAKA	15°87	BOLAMA	11°58
MATAM	15°65	BOBO-DIOULASSO	11°17
MASSAWA	15°62	KANDI	11°13
KHARTOUM	15°60	KADUGLI	11°00
PRAIA	14°90	KOUROUSSA	10°65
TAHOUA	14°90	KADUNA	10°60
DAKAR-YOFF	14°73	MAROUA	10°45
MOPTI	14°52	BERBERA (SOMALIA)	10°42
KAYES	14°43	DEBRE MARKOS	10°35
WAD MEDANI	14°40	SCUSCIUBAN	10°30
N'GUIGMI	14°25	BIRAO	10°28
TILLABERY	14°20	GEWANI	10°08
KAOLACK	14°13	WA	10°05
EL FASHER	13°62		

Tableau 2.1: Villes sahéliennes

### 2.2.2 Modèle pour la température ambiante

La température ambiante est modélisée par une fonction sinusoïdale [37], en considérant les extrema journaliers de température et leurs variations durant l'année divisée en huit périodes:

$$T_a(t) = 0.5 \left[ (T_{a\max} + T_{a\min}) + (T_{a\max} - T_{a\min}) \sin \left( \frac{2\pi(t - t_p)}{24} \right) \right] \quad (\text{Eq. 2. 1})$$

où:

$T_a(t)$  est la température ambiante à l'instant  $t$ ,

$T_{amax}$  est la température ambiante maximale du jour,

et  $T_{amin}$  est la température ambiante minimale du jour.

Nous avons pris  $t_p$  égal à la durée du jour. Cela nous a permis de mieux approcher la courbe réelle comme le montre la figure 2.2.



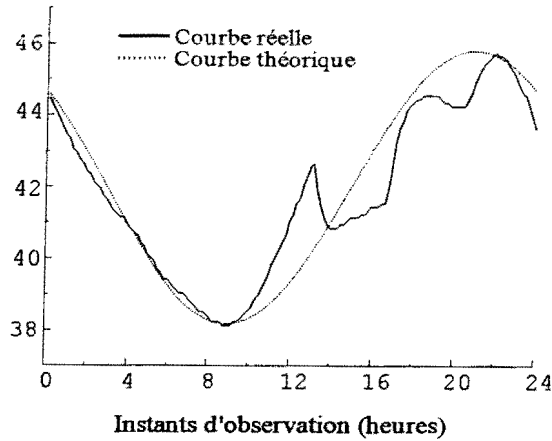


Figure 2. 3: Caractéristiques comparées de température

La figure 2.3 montre les écarts relatifs entre les valeurs réelles et théoriques de la température ambiante.

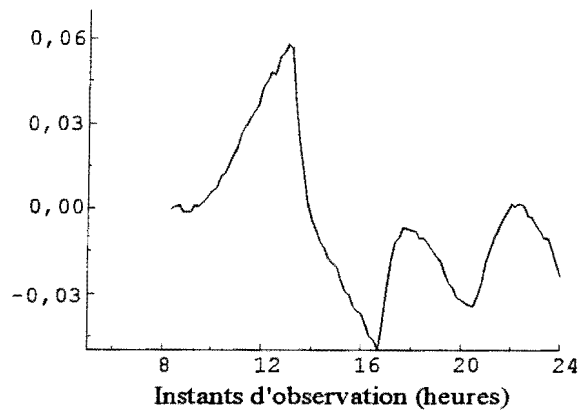


Figure 2. 4: Ecart relatif entre températures ambiantes mesurée et simulée

Ainsi, on peut observer une erreur relative maximum d'environ 6% observée aux environs de 12 heures.

Notons que la qualité des résultats est fortement influencée par l'exactitude des extréma de températures observées sur le site.

Les variations saisonnières de  $T_{amax}$  et  $T_{amin}$  sont considérées en partageant une année en huit périodes durant lesquelles les valeurs moyennes de  $T_{amax}$  et  $T_{amin}$  sont prises. La table ci-dessous énumère les variations de température sur les huit périodes à Dakar.

		$T_{amax}$ (°C)	$T_{amin}$ (°C)
1	14 Janvier - 26 Février	28,7	14,2
2	27 Février - 12 Avril	31,5	17
3	13 Avril - 28 Mai	30,3	20
4	29 Mai - 15 Juillet	34,5	24,2
5	16 Juillet - 31 Août	38	25
6	1 Septembre - 15 Octobre	38,2	25,3
7	16 Octobre - 29 Novembre	38	26
8	30 Novembre - 13 Janvier	36,8	23

Table 2.2: Variations de température sur huit (8) périodes

### 2.2.3 Modèle courant-tension du générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est constitué de modules reliés en série/parallèle. La caractéristique courant-tension (I-V) de chaque module est représentée par une équation [38] de la forme:

$$I = I_{cc} \left\{ 1 - C_1 \left[ \exp\left(\frac{V_r}{C_1 * V_{co}}\right) - 1 \right] \right\} \quad (\text{Eq. 2. 2})$$

à température de cellules et irradiation données et où:

$$\begin{cases} C_1 = \left(1 - \frac{I_{pm}}{I_{cc}}\right) * \exp\left(-\frac{V_{pm}}{C_2 * V_{co}}\right) \\ C_2 = \left(\frac{V_{pm}}{V_{co}} - 1\right) * \left[\ln\left(1 - \frac{I_{pm}}{I_{cc}}\right)\right]^{-1} \end{cases}$$

$$V_r = V - \beta * V_{co} * (T_c - T_a) + R_s * (\Delta I + I_{cc}) - K_1$$

$$\Delta I = \alpha * I_{cc} * (T_c - T_a) * \frac{G}{G_{ref}} + \frac{G - G_{ref}}{G_{ref}} * I_{cc}$$

$$K_1 = \frac{G}{G_{ref}} * \left[ V_{co} + R_s * I_{cc} - C_2 * V_{co} * \ln\left(\frac{1}{C_1} + 1\right) \right]$$

$I, V$  : courant et tension de sortie du module,  
 $I_{pm}, V_{pm}$  : courant et tension à puissance maximale,  
 $V_{co}$  : tension de circuit ouvert,  
 $I_{cc}$  : courant de court-circuit

- $T_a$ : température ambiante
- $T_c$ : température des cellules
- $G$ : irradiation globale
- $G_{ref}$ : irradiation de référence
- $R_s$ : résistance série d'un module

Pour obtenir le réseau de caractéristiques I(V) à irradiation et température de cellule données, les transformations suivantes sont appliquées:

$$I_0 = I + I_{cc} \left( \frac{G}{G_0} - 1 \right) + \alpha (T_c - T_{c0}) \quad (Eq. 2. 3)$$

$$V_0 = V + \beta (T_c - T_{c0})$$

$$\text{où } \begin{cases} \alpha = \frac{dI_{cc}}{dT} \\ \beta = \frac{dV_{co}}{dT} \end{cases}_{G=Cte}$$

sont appelés coefficients de température pour  $I_{cc}$  et  $V_{co}$ .

Application numérique aux modules MSX-10 et MSX-5 de *Solarex*:

	MSX-10	MSX-5
$V_{co}$	21,4V	21,4V
$I_{cc}$	0,6A	0,28A
$\alpha$	0,5mA/°C	0,275mA/°C
$\beta$	-72mV/°C	-72mV/°C

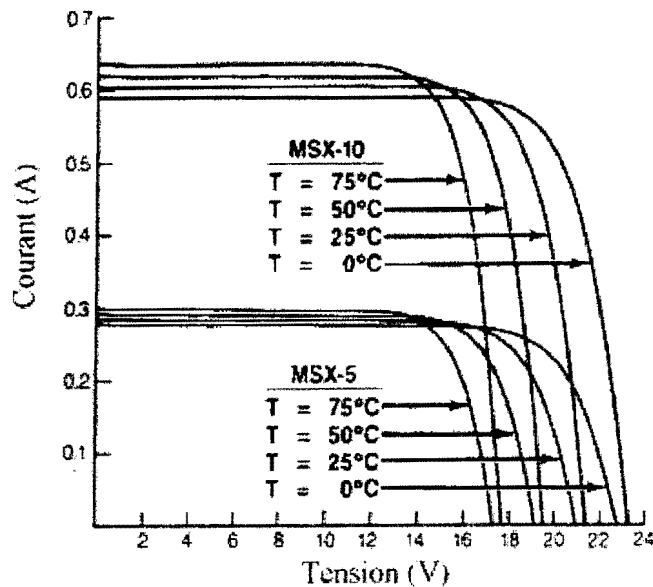


Figure 2. 5: Caractéristiques I(V) à irradiations et températures données

### 2.2.4 Modèle de la température des cellules

Un modèle expérimental simple est utilisé pour la prédiction de la température des cellules [39]. Ce modèle tient compte de l'irradiation solaire, de la température ambiante et de la vitesse du vent:

$$T_c = T_a + \theta_G (1 + \theta_{Ta} \cdot T_a) (1 - \theta_v \cdot v) \cdot G \quad (\text{Eq. 2. 4})$$

où:

$T_c$  (°C) est la température des cellules,

$T_a$  (°C) est la température ambiante,

$v$  (m/s) est la vitesse du vent,

et  $G$  ( $W/m^2$ ) est l'ensoleillement.

$\theta_G = 0.0138$ ,  $\theta_{Ta} = 0.031$ ,  $\theta_v = 0.042$  sont des constantes déterminées par des données expérimentales.

La vitesse du vent est prise constante et égale à 1 m/s. En outre, un coefficient de correction  $(1 - 1,055\eta)$ , où  $\eta$  est le rendement du générateur, peut être ajouté à l'équation pour la compensation des effets Joule dus à la circulation du courant électrique.

La température des cellules évolue globalement de la même façon que la température ambiante comme le montre la figure 2.6.

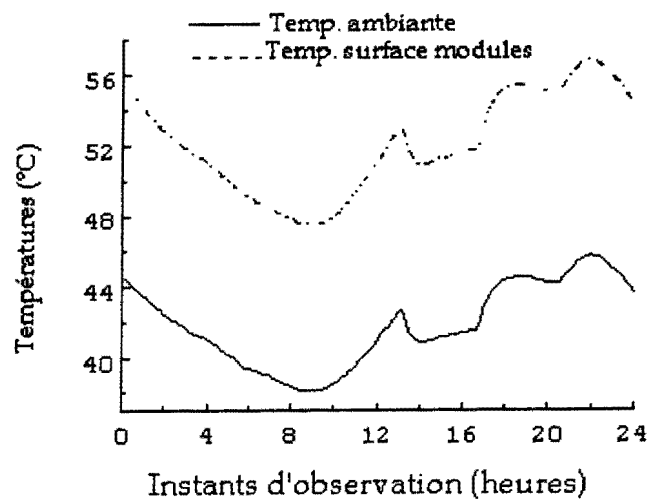


Figure 2. 6: Evolution journalière de la température ambiante et de la température à la surface des modules

### 2.2.5 Modèle pour la charge

Trois différents profils de charge journaliers ont été sélectionnés pour être alimentés avec de l'électricité photovoltaïque. Ces profils sont définis de façon horaire et la consommation énergétique électrique annuelle est maintenue constante. La figure 2.7 montre ces trois profils: le profil constant, la demande constante avec 1h de pointe et un profil sinusoïdal.

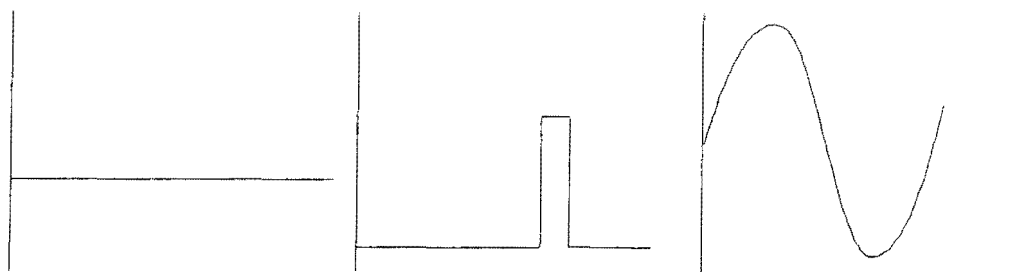


Figure 2. 7: Profils de charge (continu, continu avec une pointe, sinusoïdal)

La formule mathématique pour chacun des profils se définit comme suit.

Type de profil	Formules
Continu	$D(t) = \frac{E}{24} = D_0$ (Eq. 2. 5)
Avec une pointe	$D(t) = \begin{cases} \frac{K \cdot E}{23 + K} \text{ pour } t = t_p \\ \frac{E}{23 + K} \text{ pour } t \neq t_p \end{cases}$ (Eq. 2. 6)
Sinusoïdal	$D(t) = D_0 + D_m \cdot \cos\left(\frac{2\pi(t - t_p)}{24}\right)$ avec $D_m = D_0 \frac{K - 1}{K + 1}$ (Eq. 2. 7)

$E$  (kWh) consommation énergétique journalière,

$K$  rapport de la pointe de charge à la demande la plus basse,

$t_p$  (h) temps de pointe de charge.

$D_m$  amplitude de la fonction cosinus.

A partir des habitudes de consommation d'une communauté rurale on peut aussi établir un profil de charge dynamique (cf modèles analytiques).

Ce dernier profil sera retenu comme cas de base de notre étude. Les autres profils seront utilisés pour étudier les effets de modèles de charge sur la fiabilité du système.

### 2.2.6 Modèle du régulateur

Un régulateur de charge est utilisé pour gérer le transfert de l'énergie entre le générateur photovoltaïque, les batteries et l'utilisation. Il protège aussi les batteries de surcharge et de décharge profonde.

Le régulateur de charge est modélisé comme suit:

L'énergie électrique provenant du générateur photovoltaïque est utilisée pour alimenter la charge avant tout stockage dans les batteries. Si ces dernières sont pleinement chargées, l'excès est dévié vers une charge fonctionnant à puissance variable. Si la charge ne peut pas être alimentée uniquement par le générateur, la différence est demandée aux batteries. Quand l'état de charge de la batterie (EDC) tend vers la valeur minimale autorisée (30% de la capacité), le régulateur déconnecte la charge. La durée de déconnexion de la charge est enregistrée comme DARC et un tel événement est dit événement de rupture de charge (ERC); ces ERC sont cumulés sur une durée précisée (1 année) et sont indiqués par la fréquence de rupture de charge (FRC).

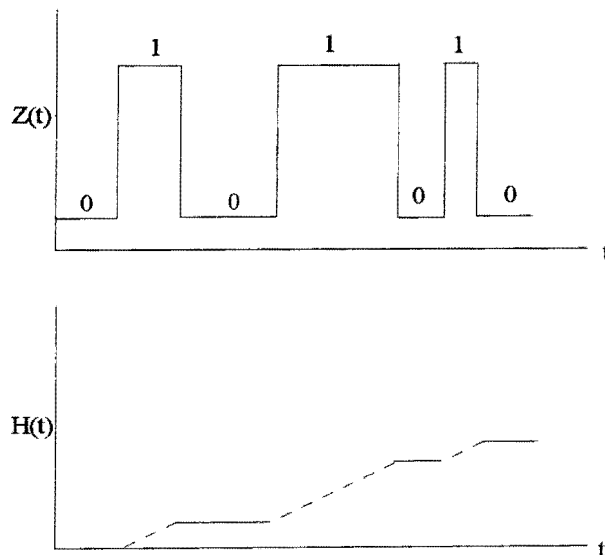


Figure 2. 8: Fonction  $Z(t)$  des événements ERC et fonction  $H(t)$  de DARC

### 2.2.7 Modèles des convertisseurs statiques

Nous avons opté pour un modèle prenant en compte la puissance appelée ( $P$ ), la puissance nominale ( $P_n$ ), ainsi que des points particuliers sur la caractéristique de rendement du constructeur. [40]

Le rendement se modélise donc ainsi:

$$\eta = \frac{P}{(1+k)P + aP_n} \text{ avec } \begin{cases} a = \frac{1}{99} \left[ \frac{10}{\eta_{10}} - \frac{1}{\eta_{100}} - 9 \right] \\ k = \frac{1}{\eta_{100}} - a - 1 \end{cases} \quad (\text{Eq. 2. 8})$$

où  $\eta_{10}$  et  $\eta_{100}$  sont respectivement les rendements à 10% et à 100% de la puissance nominale.

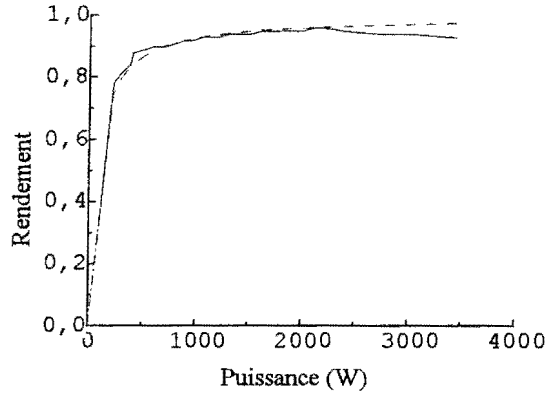


Figure 2. 9: Caractéristiques de rendement

### 2.2.8 Modèle de comportement des batteries d'accumulateurs

La batterie de stockage est modélisée par le rendement de charge-décharge et les résistances internes, le taux d'auto-décharge de la batterie et son état de charge  $EDC$ .

Le  $EDC(t+\delta t)$  à venir peut être estimée en fonction de l'actuel  $EDC(t)$  en calculant les entrées-sorties d'énergie, et les pertes d'auto-décharge et de conversion de la batterie [41]:

$$EDC(t + \delta t) = EDC(t)(1 - D_s \delta t) + K_1 (V_B I_B - R_B I_B^2) \delta t \quad (\text{Eq. 2. 9})$$

où  $EDC(t)$  (Wh) est l'état de charge de la batterie à l'instant  $t$ ,

$D_s$  ( $\text{Wh}^{-1}$ ) est le taux d'auto-décharge de la batterie,

$K_1$  est le rendement de charge- décharge de la batterie

$R_B$  est la résistance interne,

$V_B$  (V) est la tension aux bornes de la batterie,

et  $I_B$  (A) est le courant dans la batterie.

Ce modèle est bien adapté dans la partie linéaire des caractéristiques de charge et de décharge.

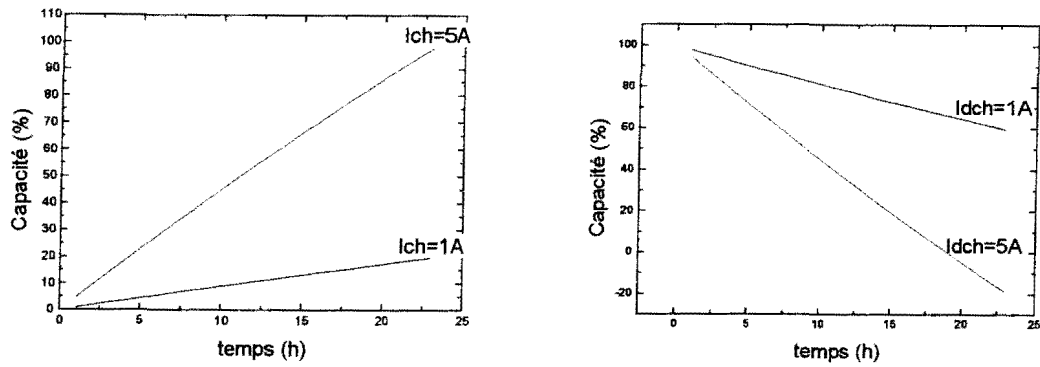


Figure 2. 10: Caractéristiques de charge et décharge en zone linéaire

Une étude théorique plus fine des accumulateurs au plomb [42] en particulier a montré que le courant  $i$  peut être relié à la tension de l'électrode par la relation:

$$i = i_0 \left[ \frac{[O]_{0,t}}{[O]} e^{-\alpha f \eta} - \frac{[R]_{0,t}}{[R]} e^{-(1-\alpha) f \eta} \right] \quad (\text{Eq. 2. 10})$$

avec  $i_0 = nFAk^*[O]^{(1-\alpha)}[R]^\alpha$ , appelé courant d'échange.

et où:

$A$  est la surface de l'électrode,

$k^*$  appelé constante intrinsèque de vitesse (ou de transfert de charge)

$\alpha$  appelé coefficient de transfert

$f = F/RT$ ,  $T$  est la température ('K)

$[O]^{(1-\alpha)}$  et  $[R]^\alpha$  les concentrations en oxydants et réducteurs au temps  $t$ , à la surface de l'électrode.

$\eta = E - E_0$

$E$  : potentiel de l'électrode

$E_0$  : potentiel d'équilibre de l'électrode.

La modélisation que nous avons adoptée, est fondée sur cette relation et sur des hypothèses simplificatrices liées aux conditions de fonctionnement des accumulateurs dans les systèmes photovoltaïques.



En effet, le courant faible qui circule dans la batterie, le choix des seuils de régulation limitent les transferts de masse dans l'électrolyte ainsi que la surtension  $\eta$ . Ces conditions d'utilisation nous placent dans le cas particulier où l'expression (Eq. 2. 10) peut être linéarisée.

$$i = -i_0(fn\eta) \quad (\text{Eq. 2. 11})$$

Le courant  $i$  peut être représenté linéairement en fonction de la surtension  $\eta$  jusqu'à des valeurs de  $\eta$  de l'ordre de 0,2 - 0,4 V, pour des éléments de 2V.

### 2.2.8.1 Equation décrivant la décharge

Compte tenu des hypothèses citées ci-dessus, et si tous les facteurs autres que la polarisation sont ignorés, alors le potentiel de la cathode  $E_c$  durant la décharge est défini comme

$$E_c = E_{sc} - K_c I_{ma} \quad (\text{Eq. 2. 12})$$

où

$E_{sc}$  = potentiel constant

$K_c$  = le coefficient de polarisation par unité de densité de courant de matière active

$I_{ma}$  = la densité de courant de matière active.

Dans le cas d'une électrode poreuse, [43], la densité de courant de matière active  $I_{ma}$  est définie comme étant inversement proportionnelle au total de la matière active non utilisée et est aussi égale à  $i$  au début de la décharge. Donc

$$I_{ma} = \left[ \frac{Q_c}{Q_c - it} \right] * i \quad (\text{Eq. 2. 13})$$

où

$t$  est le temps à chaque point au cours de la décharge

$Q_c$  est la quantité totale de la matière active disponible à la cathode (Pb) exprimée en Ampères-heure par unité de surface.

Quand on substitue l'équation dans (Eq. 2. 13) l'équation (Eq. 2. 12), on obtient:

$$E_c = E_{sc} - K_c \left[ \frac{Q_c}{Q_c - it} \right] * i \quad (\text{Eq. 2. 14})$$

et de façon analogue pour l'anode

$$E_a = E_{sa} - K_a \left[ \frac{Q_a}{Q_a - it} \right] * i \quad (\text{Eq. 2. 15})$$

$Q_a$  = quantité totale de matière active disponible à l'anode (PbO2).

Bien entendu, la décharge de la batterie est limitée par les plus petites des quantités  $Q_a$  et  $Q_c$ . La batterie est en effet complètement déchargée dès que l'une ou l'autre de ces quantités devient nulle. Si  $Q_c$  est approximativement égale à  $Q_a$ , ce qui est généralement le cas pour un accumulateur bien dimensionné

$$V = E_s - K \left[ \frac{Q}{Q - it} \right] * i \quad (\text{Eq. 2. 16})$$

avec:

$$E = E_{sa} + E_{sc}$$

$$K = K_a + K_c$$

$$Q = Q_a = Q_c$$

Dans l'expression (Eq. 2. 16), le terme  $K \left[ \frac{Q}{Q - it} \right] * i$  représente la chute de potentiel due seulement au fait que la batterie a débité ( $it$ ) ampères-heure.

Le milieu constituant l'électrode présente une résistance interne, notée  $N$  qui provoque également une charge de tension  $Ni$ . La tension devient alors:

$$V = E_s - K \left[ \frac{Q}{Q - it} \right] * i - Ni \quad (\text{Eq. 2. 17})$$

Lors de la décharge, la concentration au sein de l'électrolyse varie. Considérons que la chute de tension est proportionnelle à la fraction de matière active mise en jeu. La tension devient:

$$V = E_s - K \left[ \frac{Q}{Q - it} \right] * i - Ni - C \frac{it}{Q} \quad (\text{Eq. 2. 18})$$

L'expression (Eq. 2. 18) représente le modèle de la tension aux bornes de la batterie. Les paramètres  $E_s$ ,  $K$ ,  $Q$ ,  $N$  et  $C$  sont caractéristiques de chaque batterie. Ces paramètres ne sont pas réellement mesurables, ni définissables de façon théorique. Il nous faudra donc les déterminer de façon empirique à partir de données expérimentales et cela pour les divers types d'accumulateurs. De cette relation, on peut tirer la forme de la résistance interne totale:

$$V = \left[ E_s - C \frac{it}{Q} \right] - \left[ K \frac{Q}{Q - it} + N \right] * i \quad (\text{Eq. 2. 19})$$

qui, comparativement à la forme générale de la tension d'une batterie en cours de décharge  $V = E - ri$ , donne:

$$r = K \left[ \frac{Q}{Q - it} \right] + N \quad (\text{Eq. 2. 20})$$

et

$$E = E_s - C \left[ \frac{it}{Q} \right]$$

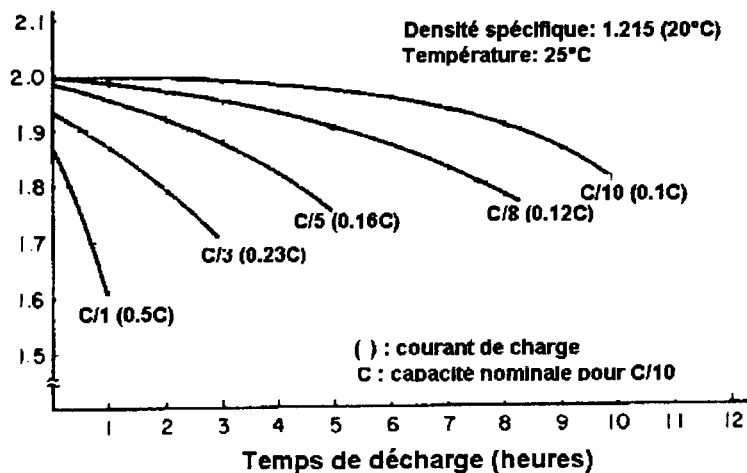


Figure 2. 11: Tension en fonction de l'état de décharge pour différents courants

Les courbes de décharge (Figure 2.11) montrent au début une brusque chute de tension Ce phénomène, appelé "coup de fouet", peut être décrit par le terme:

$$A \cdot \exp\left[-B \frac{it}{Q}\right]$$

où les constantes A et B sont déterminées expérimentalement Une expression plus complète de la tension serait:

$$V = E_s - K \left[ \frac{Q}{Q-it} \right] * i - Ni - C \frac{it}{Q} + A \cdot \exp\left[-B \frac{it}{Q}\right] \quad (\text{Eq. 2. 21})$$

Notons toutefois que la durée du "coup de fouet" est très courte comparée à la durée de décharge, en particulier dans le cas d'un système photovoltaïque. C'est pourquoi le terme

$A \cdot \exp\left[-B \frac{it}{Q}\right]$  sera négligé. L'expression retenue pour la tension dans le cas de décharge, est:

$$V = E_s - K \left[ \frac{Q}{Q-it} \right] * i - Ni - C \frac{it}{Q} \quad (\text{Eq. 2. 22})$$

#### 2.2.8.2 Equation décrivant la charge

Si les mêmes hypothèses de base sont considérées valables au cours de la charge de l'accumulateur, alors l'équation suivante peut être retenue pour la tension durant la charge:

$$V = E_s + C \frac{it}{Q} - K \left[ \frac{Q}{Q-it} \right] * i + Mi - A \cdot \exp\left[-B \frac{it}{Q}\right] \quad (\text{Eq. 2. 23})$$

Cette équation est obtenue à partir de l'équation (Eq. 2. 21) en inversant les signes des quatre derniers termes.

Rappelons que le terme  $it$  représente le nombre d'ampères-heure mis en jeu.

Le terme  $A \cdot \exp\left[-B \frac{it}{Q}\right]$  comme précédemment peut être négligé, son influence est de courte durée.

La relation montre que quand ( $it$ ) tend vers  $Q$ ,  $V$  tend vers l'infini. En réalité, lorsque le nombre d'ampères-heure est proche de la quantité totale de matière active, les réactions électrochimiques sont terminées si bien que la tension tend vers une constante qui correspond à la tension de l'électrolyse de la solution (Figure 2.12).

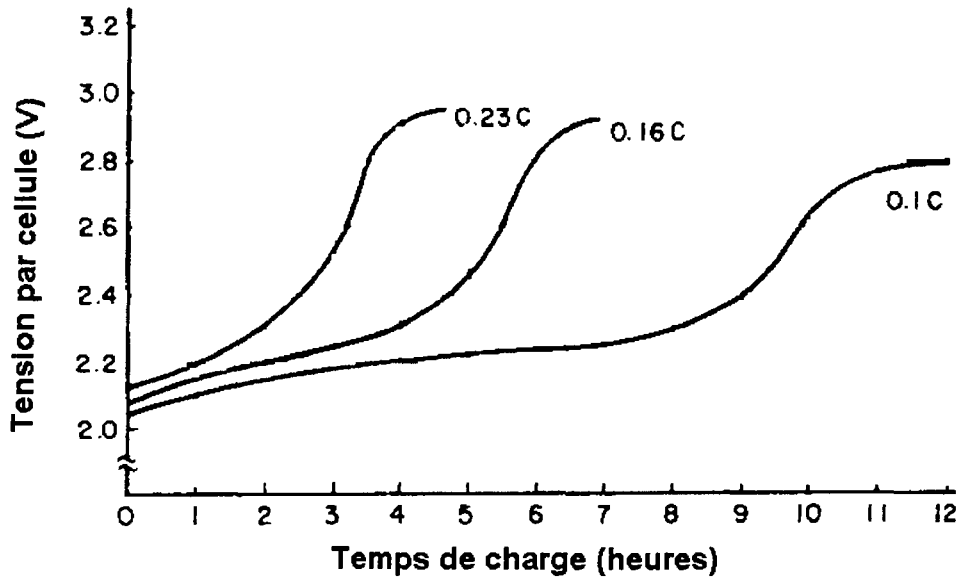


Figure 2. 12: Tension en fonction de l'état de charge pour différents courants

Cependant l'expression retenue est suffisante pour notre application. En effet, le seuil haut de régulation des systèmes photovoltaïques est inférieur à la tension d'électrolyse de la solution.

Il est possible de définir un modèle capable de prendre en compte ce palier. En effet, ceci correspond à un des cas particuliers mentionnés dans l'Annexe 1, pour les surtensions importantes. Auquel cas l'expression à considérer n'est plus linéaire mais exponentielle (loi de Tafel).

$$i = i_0 \exp[(1 - \alpha)nj\eta] \quad (\text{Eq. 2. 24})$$

Comme pour le cas de la décharge, l'ensemble des paramètres  $E_s$ ,  $K$ ,  $M$ ,  $C$  et  $Q$  est à définir à partir de données expérimentales.

### 2.2.8.3 Calcul de l'état de charge

Un accumulateur reçoit ou délivre pendant le temps  $dt$ , une énergie

$$\delta W = (Vi - Ri^2) \delta t \quad (\text{Eq. 2. 25})$$

où

$i$  est le courant de charge ( $i > 0$ ) ou de décharge ( $i < 0$ ).

Le terme  $Ri^2 \delta t$  correspond à l'énergie perdue par effet Joule dans l'élément.

Dans cette expression, l'énergie perdue par autodécharge n'est pas prise en compte, il convient donc d'ajouter la terme  $pstock * \delta t$ , d'où:

$$\delta W = (Vi - Ri^2) \delta t - pstock * \delta t \quad (\text{Eq. 2. 26})$$

A toute variation  $\delta W$  d'énergie échangée, correspond une variation de l'état de charge  $\delta S$  définie par:

$$\delta S = K_1 \frac{\delta W}{V} \quad (\text{Eq. 2. 27})$$

Le coefficient  $K_1$  représente le rendement faradique de l'accumulateur et  $V$  est la tension de la batterie. L'état de charge des accumulateurs est donné en Ampères-heure.

Nous pouvons donc écrire:

$$\delta S = K_1 (V - Ri) \frac{i}{V} \delta t - \frac{pstock}{V} \delta t \quad (\text{Eq. 2. 28})$$

Cette relation permet d'avoir une estimation de la variation de l'état de charge au cours de la simulation.

Le terme  $\frac{pstock}{V}$  peut être identifié à un courant de fuite déterminé à partir de résultats expérimentaux.

### 2.2.9 Modèle de l'éolienne d'appoint

L'intégration d'un générateur éolien dans le système énergétique est modélisée comme suit:

$$P_{gen} = \begin{cases} \text{équations en fonctionnement} \\ 0 \text{ à l'arrêt} \end{cases} \quad (\text{Eq. 2. 29})$$

où  $P_{gen}$  est la puissance en sortie du générateur éolien. Dans le but du dimensionnement, le modèle du générateur n'est pas inclus dans le programme de simulation. Ce modèle est plutôt utilisé dans l'analyse économique du système "appoint".

Après avoir choisi la structure de commande (en vitesse ou couple) pour le simulateur, on étudie les modèles de chacun des éléments : turbine, générateur. Ce qui nous permet de présenter des modèles statiques et dynamiques de l'éolienne et des générateurs électriques les plus utilisés dans les systèmes éoliens.

## A. MODELES STATIQUES DE L'EOLIENNE

Généralement, on exprime les caractéristiques statiques des aérogénérateurs sous deux formes :

- une représentation analytique théorique, modélisant le fonctionnement statique à partir des lois physiques,

- une représentation numérique: table de données ou courbe de régression de ces données. Les données numériques utilisées peuvent être des résultats de mesures sur un aérogénérateur réel, ou bien le résultat d'une représentation analytique plus ou moins élaborée.

Pour la turbine éolienne, on utilise en première approximation la deuxième forme de représentation, les modélisations proposées par les mécaniciens des fluides ayant des temps de calcul trop longs, alors que pour les générateurs, nous avons utilisé les deux représentations.

Les caractéristiques statiques de la turbine éolienne sont programmées:

- soit sous la forme d'équation algébrique donnant le couple éolien en fonction d'une ou plusieurs variables.

- soit directement sous la forme d'un tableau de valeurs discrètes:  $\Gamma_e = f(\Omega, v)$ .

On considère généralement deux approches simples pour obtenir les caractéristiques statiques sous forme d'équation. [44]

Dans la première approche, on tient compte des pertes par rapport à la puissance du vent  $P_v$  et le couple correspondant  $\Gamma_v$ :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 \quad (\text{Eq. 2. 30})$$

$$\text{et } \Gamma_v = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v^2$$

On introduit les pertes en puissance et en couple  $P_p$  et  $\Gamma_p$ :

$$\begin{aligned} P_p &= P_v - P_e \\ \Gamma_p &= \Gamma_v - \Gamma_e \end{aligned} \quad (\text{Eq. 2. 31})$$

Les essais expérimentaux en soufflerie fournissent les pertes de couple. Ces pertes sont décrites en fonction de la vitesse de rotation  $\Omega$  et de la vitesse du vent:

$$\Gamma_p(\Omega, v) = f_0(v) + f_1(v)\Omega + f_2(v)\Omega^2 + \dots \quad (\text{Eq. 2. 32})$$

En général, on ne considère que les trois premiers termes. Les valeurs des coefficients  $f_0, f_1, f_2$  sont données par les relations :

$$f_0(v) = K_{f_0}v^2 ; f_1(v) = K_{f_1}v ; f_2(v) = K_{f_2} \quad (\text{Eq. 2. 33})$$

où les constantes  $K_{f_0}, K_{f_1}, K_{f_2}$  sont obtenues expérimentalement.

Le couple d'une éolienne peut donc être calculé à partir de ces trois paramètres:

$$\begin{aligned} \Gamma_e &= \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v^2 - K_{f_0}v^2 - K_{f_1}v\Omega - K_{f_2}\Omega^2 \\ P_e &= \Omega \Gamma_e \end{aligned} \quad (\text{Eq. 2. 34})$$

Dans la deuxième approche, on exprime le coefficient de couple  $C_T$  en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  :

$$C_T = C_T(\lambda) \text{ avec } \lambda = \frac{\Omega R}{v} \quad (\text{Eq. 2. 35})$$

Cette caractéristique statique de l'éolienne est fournie par le fabricant ou calculée pour un profil de pale donné.

Ces données expérimentales peuvent être traitées par régression polynomiale. On obtient alors le coefficient de couple sous la forme suivante :

$$C_T(\lambda) = a_0 + a_1\lambda + a_2\lambda^2 + \dots + a_n\lambda^n \quad (\text{Eq. 2. 36})$$

Le couple éolien s'en déduit par:  $\Gamma_e = C_T \Gamma_v$ .



Un exemple de résultat numérique en utilisant les résultats expérimentaux obtenus pour un profil de pale type NACA 23015 est présenté dans la table suivante:

$\alpha_0$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$
0,01254	$-10,74 \cdot 10^{-3}$	$13,62 \cdot 10^{-3}$	$-2,453 \cdot 10^{-3}$	$1,344 \cdot 10^{-4}$	$-3,0 \cdot 10^{-7}$	$-10^{-7}$

Les familles de caractéristiques  $\Gamma_e(\Omega, v)$  et  $P_e(\Omega, v)$ , paramétrées en vitesse du vent (3, 4, 5, 6, 7 m/s), sont présentées dans les figures ci-dessous :

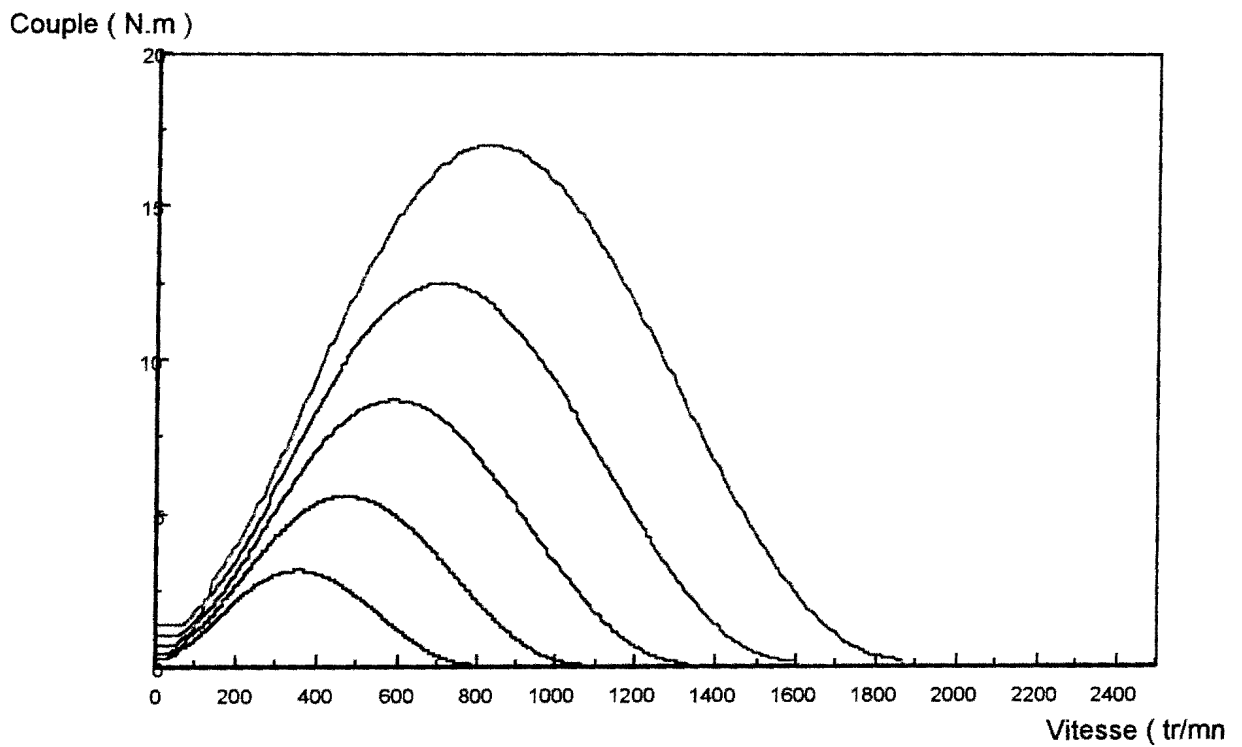


Figure 2. 13: Couple éolien en fonction de la vitesse sur l'axe

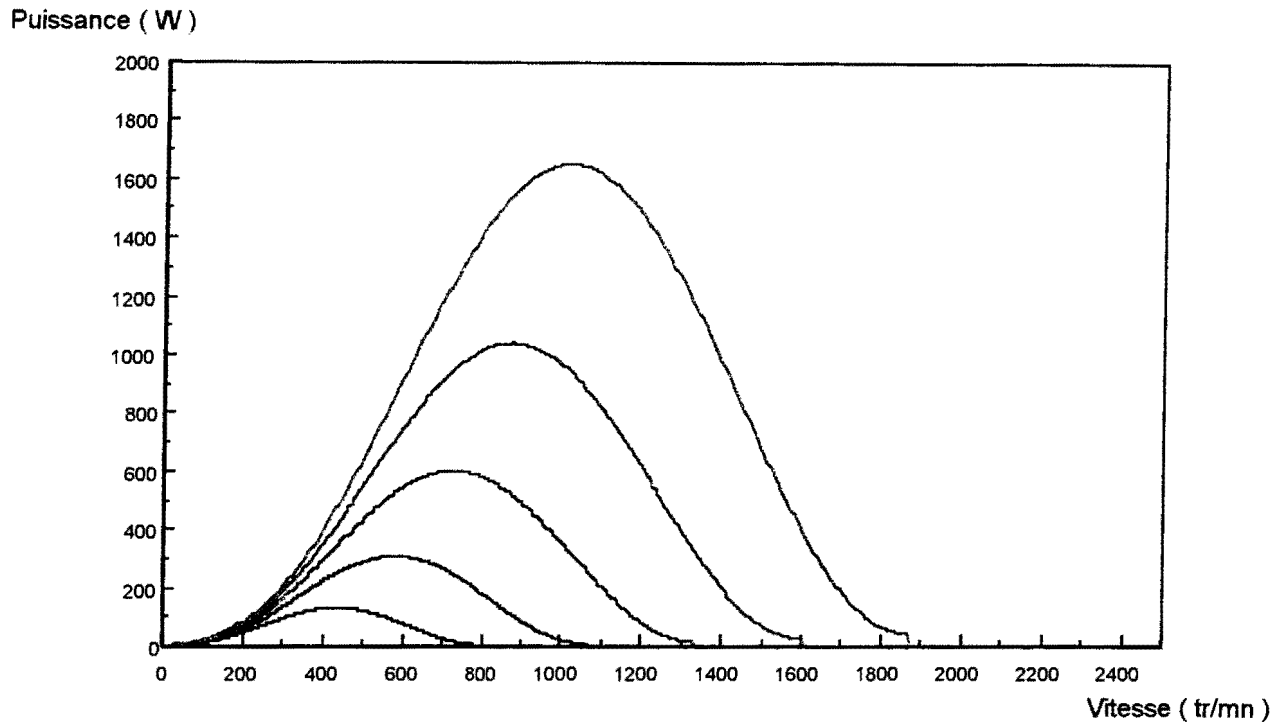


Figure 2. 14: Puissance éolienne en fonction de la vitesse sur l'axe

## B. MODELES STATIQUES DES GENERATRICES

Dans cette étude, nous envisageons de coupler sur l'arbre de l'éolienne les générateurs électriques suivants: générateur de courant continu, alternateur.

La forme générale de la caractéristique de charge est:

$$\Gamma_c = \Gamma_c(\Omega, c) \quad (\text{Eq. 2. 37})$$

où  $c$  est une variable externe, qui est déterminée par le réseau électrique dans lequel débite le générateur.

On considère que le couple de charge  $\Gamma_c$  a deux composantes :

- le couple électromagnétique du générateur,  $\Gamma_{c,em}$  ;
- le couple de pertes mécaniques et de ventilation  $\Gamma_{c,mv}$ .

Donc :

$$\Gamma_c = \Gamma_{c,em}(\Omega, c) + \Gamma_{c,mv}(\Omega) \quad (\text{Eq. 2. 38})$$

où  $\Gamma_{c,mv}$  a une variation croissante avec la vitesse et ne dépasse pas 5 à 10 % de la valeur du couple nominal.

Pour la caractéristique de charge de l'éolienne, on considère que la fonction  $\Gamma_{c,mv}(\Omega)$  a une dépendance linéaire par rapport à la vitesse de rotation :

$$\Gamma_{c,mv}(\Omega) = c_f \Omega \quad (\text{Eq. 2. 39})$$

Dans ce qui suit, le terme  $\Gamma_{c,em}(\Omega, c)$  est expliqué pour chaque type de générateur.

#### GENERATEUR DE COURANT CONTINU

Le schéma de principe est donné dans la figure 2.12. Le couple électromagnétique est donné par la relation classique :

$$\Gamma_{c,em} = Ki = \frac{K}{R+r} E = \frac{K^2}{R+r} \Omega \quad (\text{Eq. 2. 40})$$

où  $K$  est le coefficient de couple,  $r$  la résistance de l'enroulement rotorique et  $R$  la résistance de charge. On peut encore écrire la relation précédente sous la forme :

$$\Gamma_{c,em} = k(c)\Omega \quad (\text{Eq. 2. 41})$$

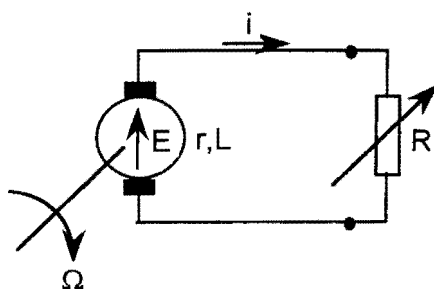


Figure 2. 15: Schéma de principe du générateur de courant continu

Le coefficient  $k$ , qui donne la pente de la caractéristique du couple, dépend de la variable  $c$  que nous avons dénommée génériquement "la variable de charge".

L'allure des deux caractéristiques, de la charge et de l'éolienne, est donnée dans la figure 2.13.

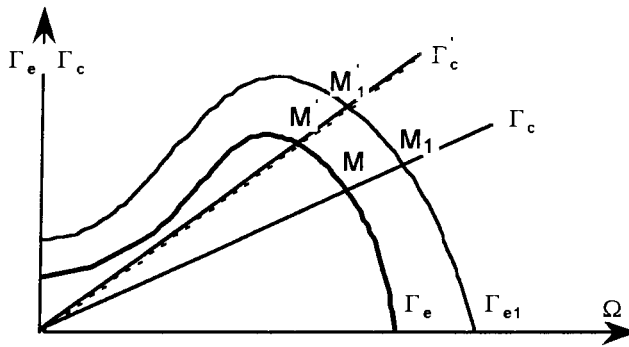


Figure 2.16: Caractéristiques de l'éolienne et de la charge - étude qualitative

Le point de fonctionnement statique  $M$  est modifié par les paramètres d'entrée  $v$  et  $c$ , ce qui entraîne un ajustement des caractéristiques respectives du couple actif et de la charge.

En cas de modification seulement de la vitesse du vent ou seulement de la charge, on obtient respectivement les points  $M_1$  et  $M'$ . En cas de modification simultanée de  $v$  et de  $c$ , on obtient le point  $M_1'$ .

#### ALTERNATEUR A AIMANTS PERMANENTS

Pour les aérogénérateurs de faible puissance il est préférable d'utiliser, à la place de génératrices continues, des alternateurs (plus robustes et sans collecteurs).

On considère la situation classique où l'alternateur est connecté à un pont triphasé qui débite l'énergie sur une résistance (Figure 2.14) :

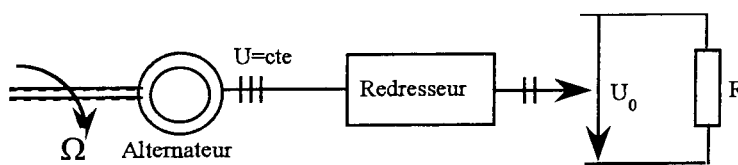


Figure 2.17: Alternateur connecté à un pont triphasé

Le couple électromagnétique de l'alternateur est :

$$\Gamma_{c,em} = \frac{3EI}{\Omega}$$

où  $E$  est la valeur efficace de la force électromotrice du générateur et  $I$  la valeur efficace du courant débité par l'induit. La f.e.m. est donnée par:

$$E = 2,22K_b N\Phi \frac{P}{2\pi} \Omega = K_E \Omega \quad (\text{Eq. 2. 42})$$

$$(K_E = 2,22K_b N\Phi \frac{P}{2\pi})$$

où :

$K_b$  est le facteur de bobinage de l'enroulement,

$N$  le nombre de spires en série sur une phase,

$\Phi$  le flux magnétique produit par les aimants permanents

$p$  le nombre de paires de pôles.

On en déduit le couple:

$$\Gamma_{c,em} = K(c)\Omega \quad (\text{Eq. 2. 43})$$

$$\text{avec } K(c) = 7 \frac{K_E^2}{R}$$

où on considère que la variable  $c$  affecte la résistance de charge  $R$ .

#### MODELE DYNAMIQUE DE L'EOLIENNE ET DE LA CHARGE : EQUATIONS D'ETAT DE L'AEROGENERATEUR

Le système électromécanique peut être représenté selon le schéma suivant où figurent:

- les grandeurs d'entrée: la vitesse du vent  $v(t)$  et la perturbation de charge  $c(t)$ ,

- les grandeurs de sortie qui sont pratiquement toutes les variables dépendantes qui nous intéressent dans l'étude du système :  $\Omega(t)$ ,  $\Gamma_c(t)$  et éventuellement la tension  $U(t)$  aux bornes du générateur et le courant débité  $I(t)$ .

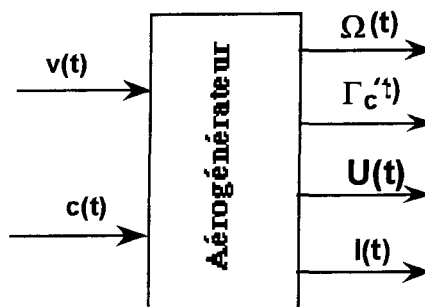


Figure 2. 18: Paramètres d'entrée/sortie de l'aérogénérateur

Les variables  $v(t)$  et  $c(t)$  agissent sur des sous-systèmes qui présentent des propriétés très différentes.

La vitesse du vent  $v(t)$ , est une variable aléatoire qui a une caractéristique spectrale située dans le domaine des basses fréquences. Elle intervient directement sur la turbine caractérisée par une dynamique lente.

La variable  $c(t)$  a les caractéristiques spectrales situées dans une bande plus large, puisqu'elle reflète les modifications brusques de la charge. Ces variations affectent directement le générateur électrique à dynamique rapide.

La turbine éolienne est un dispositif mécanique complexe, dont la dynamique peut être étudiée du point de vue :

- a) de la conversion de l'énergie du vent, dans le cadre de l'ensemble turbine - générateur - charge,
- b) du calcul de la fatigue des éléments mécaniques,
- c) de l'étude des vibrations et sollicitations dynamiques aux rafales de vent.

Comme notre objectif est essentiellement axé sur le a), nous considérons seulement un modèle simple d'ordre 1, qui reflète les propriétés de basse fréquence du système dynamique, avec une seule équation d'état, celle qui correspond à l'accumulation de l'énergie cinétique de l'ensemble turbine - générateur électrique :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = \Gamma_e(\Omega, v) - \Gamma_c(\Omega, c) \quad (\text{Eq. 2. 44})$$

où  $J$  est le moment d'inertie de la turbine éolienne,

$\Gamma_e$  et  $\Gamma_c$  sont respectivement le couple actif (moteur) de l'éolienne et le couple de charge, produit par le générateur électrique.

La variable  $\Gamma_c$  est fournie par le modèle mathématique du sous-système à dynamique rapide (générateur + charge).

Pour le couple  $\Gamma_e$ , on fait l'hypothèse que les modèles de régime stationnaire présentés sont aussi valables pour le fonctionnement en régime dynamique.

## 2.3 - LES MODELES ANALYTIQUES PAR REGRESSION

Il reste que le principal inconvénient des énergies renouvelables réside dans la couverture énergétique non uniforme dans le temps aussi bien pour les énergies photovoltaïque et éolienne. L'incidence sur la conception de tels systèmes est la présence d'un stockage de l'énergie sous forme électrique par batterie dont le coefficient de restitution faible pénalise le rendement global de l'installation.

Il ne suffit donc pas de concevoir, dimensionner une installation; il faut aussi en assurer le suivi, dans un premier temps pour des besoins de maintenance mais aussi pour améliorer les différents modèles de dimensionnement et de caractérisation du site.

Il s'agit ici, à partir de bases de données réelles, sur plusieurs années de fonctionnement de micro centrales solaires:

- de proposer un modèle d'évolution des grandeurs météorologiques,
- de proposer un modèle de consommation, c'est à dire un profil de charge dynamique,

en utilisant des régressions sur les données réelles car certains modèles proposés par des météorologues ou des énergéticiens ont des temps de calcul prohibitifs.

La conception et le dimensionnement d'une installation photovoltaïque s'appuie sur une connaissance des caractéristiques du site d'implantation. En effet ces différentes caractéristiques interviennent sur:

- le dimensionnement des différents éléments constitutifs en rapport avec l'architecture choisie,
- le type d'utilisation (pompage, irrigation,...)
- l'évaluation des performances, etc ...

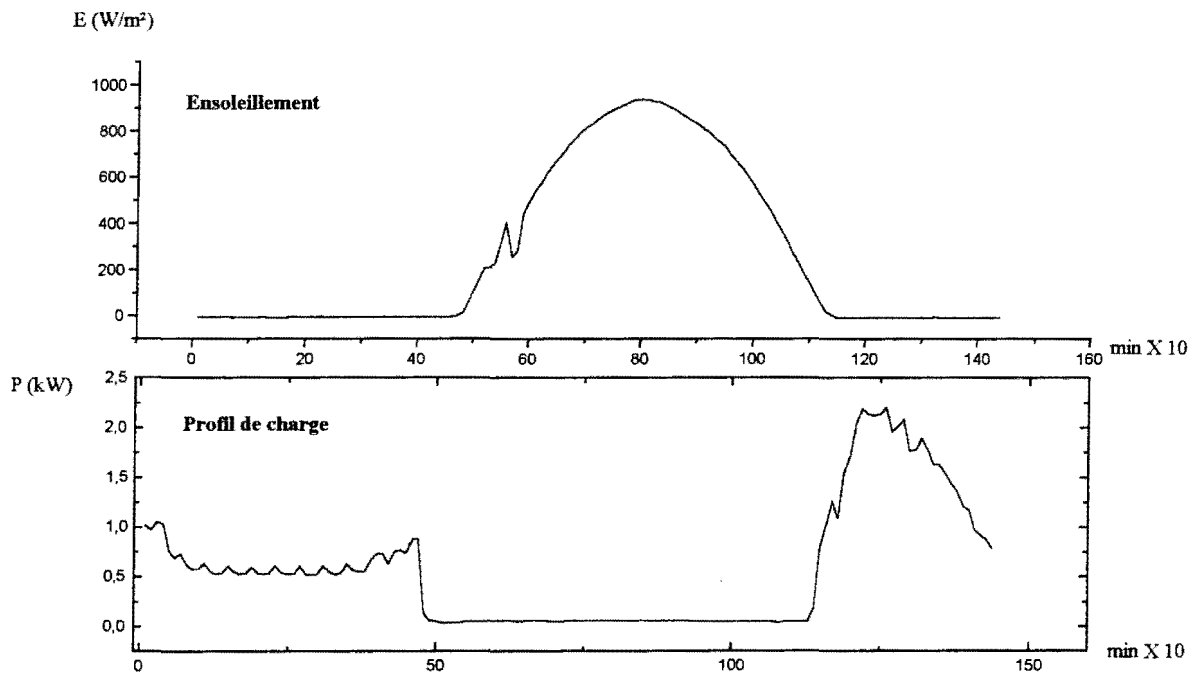
Le dimensionnement ou la simulation d'un système photovoltaïque fait le plus souvent appel à une connaissance la plus fiable possible de la distribution de la puissance solaire incidente.

Pour alléger les inconvénients liés à l'emploi de méthodes certes précises mais qui demandent des moyens de calculs importants, une solution consiste à résumer d'une manière ou d'une autre les données météorologiques relatives à l'ensoleillement.

L'acquisition en différents points de données de mesure et le traitement préalable proposé pour extraire l'ensemble des informations qui entrent en ligne de compte dans le bilan permet de disposer de données concernant ce site.

La base de données ainsi constituée se prête bien à tout autre traitement en vue de caractériser puis de modéliser le site (à partir des données météorologiques), ou de caractériser

le profil de consommation. En effet, on peut en extraire les données d'ensoleillement d'une journée type.



*Figure 2. 19: Ensoleillement et Profil de charge*

Il s'agit donc pour nous, à partir des données d'acquisition, d'extraire une expression analytique qui approche au mieux l'évolution des paramètres à utiliser en nous basant sur différents outils de traitement du signal.



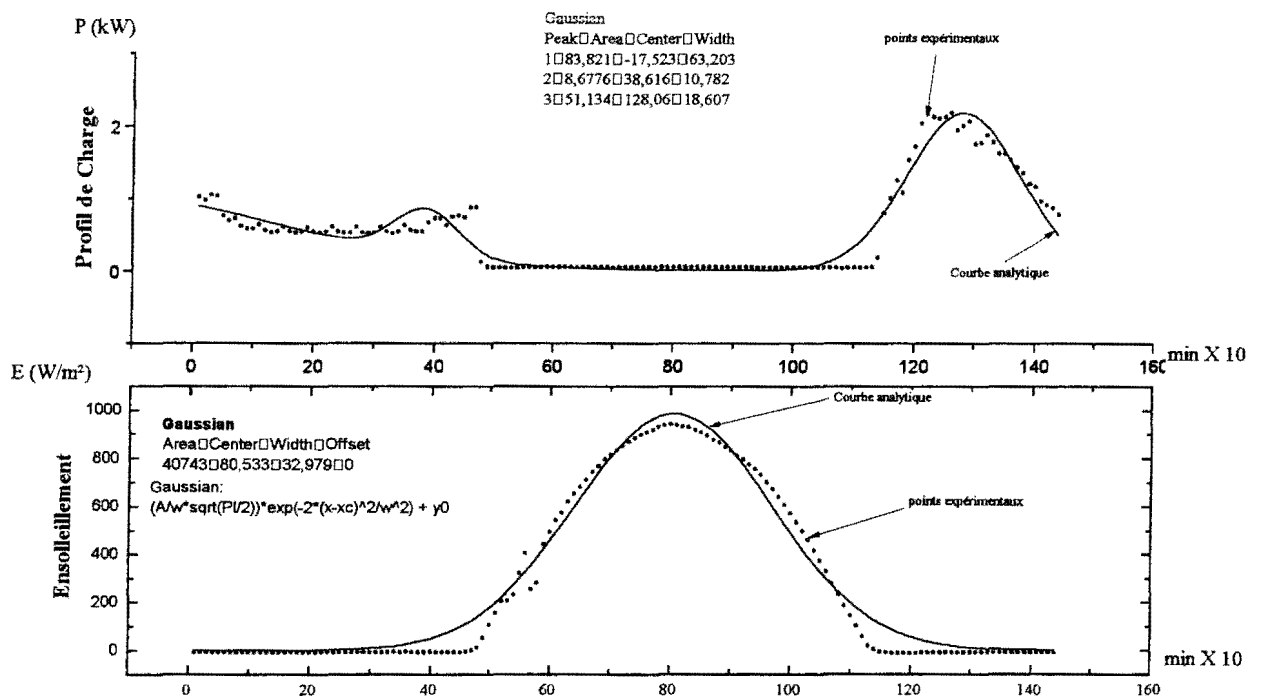


Figure 2. 20: Recherche d'un modèle analytique.

L'utilité d'obtenir un modèle analytique se justifie par le besoin, pour un outil de simulation par exemple, de disposer en entrée des données des différents paramètres météorologiques et du profil de charge.

Les besoins énergétiques constituent un élément important dans l'expression du cahier des charges. Il s'agit des applications (éclairage, production de froid, pompage, chauffage, électrification, etc...). On arrive généralement à bien les définir. Ce sont donc des grandeurs connues.

Dans la pratique, les profils de consommation rencontrés présentent l'allure représentée sur la figure 2.21.

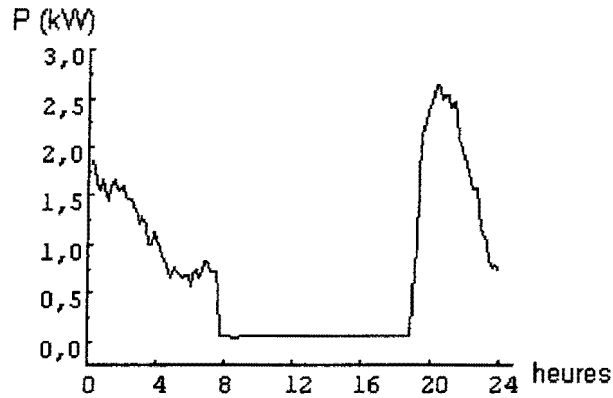


Figure 2. 21: Profil de consommation

Comme le potentiel solaire, les besoins des populations varient également suivant les périodes de l'année. En effet, le profil de consommation est fonction des habitudes des utilisateurs.

Des observations ont montré que les habitudes d'un groupe humain évoluent en fonction:

[45]

- de la tendance à long terme,
- du mouvement cyclique,
- des variations saisonnières,
- des variations accidentelles ou résiduelles.

Ainsi, des études antérieures [7] ont révélé que le profil de consommation d'une communauté présente deux pics (Figure 2.21).

Nos travaux ont permis d'approcher de façon théorique les profils de consommation à  $n$  pics par une somme de  $n$  fonctions gaussiennes.

$$P_u(t) = \sum_{i=1}^n g_i(t) \quad (\text{Eq. 2. 45})$$

où

$P_u(t)$  est le profil de consommation

$g_i(t)$  sont les fonctions gaussiennes. Elles ont chacune pour expression:

$$\frac{A}{\sigma} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \exp \left[ -2 \cdot \frac{(t - t_c)^2}{\sigma^2} \right] \quad (\text{Eq. 2. 46})$$

Une étude similaire à celle de l'ensoleillement global a été menée quant à la température ambiante. La figure 2.22 montre la courbe de régression obtenue.

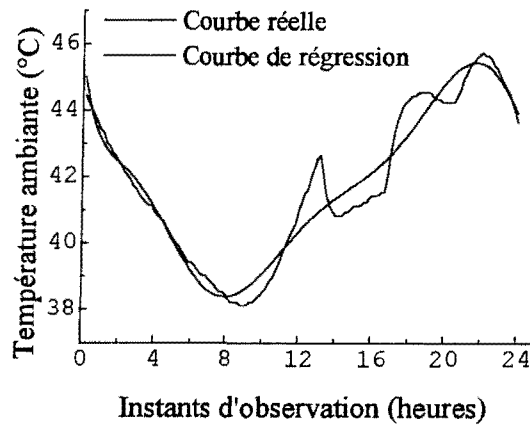


Figure 2. 22: Courbe de régression de la température ambiante

Cette courbe théorique a pour équation:

$$y(t)= 45,58752-4,21586 t + 2,48883 t^2 - 0,80419 t^3 + 0,13385 t^4 \quad (Eq. 2. 47)$$

et permet d'avoir un écart-type de 0,9722.

En conclusion sur cette partie, des outils mathématiques de traitement du signal ont été dégagés afin de pouvoir caractériser l'évolution de certaines grandeurs météorologiques et énergétiques.

L'ensemble de ces traitements permet de proposer une caractérisation du site, en fournissant un ensemble de modèles météorologique et énergétique qui servent d'entrée pour l'outil de simulation dynamique de micro centrale photovoltaïque.

## 2.4 - REALISATION DU LOGICIEL DE DIMENSIONNEMENT ET DE SIMULATION DIM\_SOL

Le schéma de la figure 2.23 présente les fonctionnalités du logiciel.

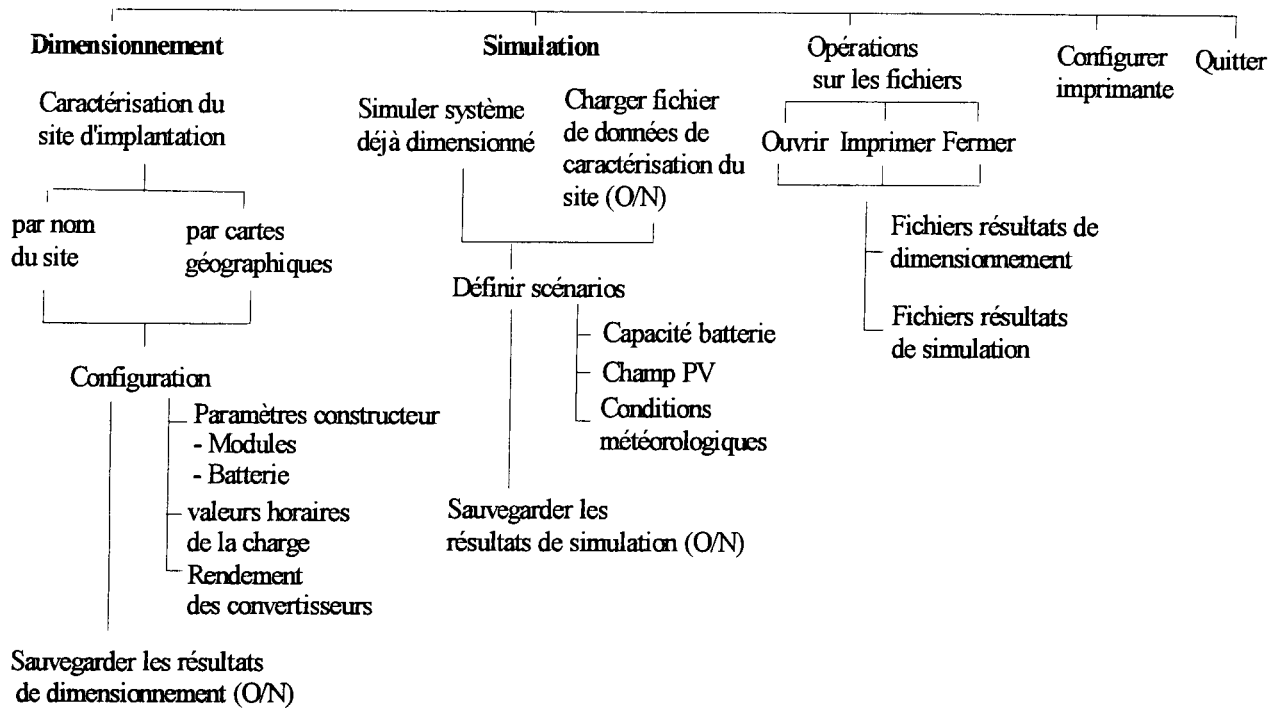


Figure 2. 23: Diagramme Fonctionnel de Dim\_Sol

Le logiciel mis au point vise un double objectif:

\* réaliser un outil logiciel de dimensionnement d'une installation solaire en tenant compte du potentiel énergétique du site choisi et de la consommation électrique mise en jeu. Le module de dimensionnement s'appuie sur des études effectuées sur la répartition énergétique de l'ensoleillement à travers le globe [6], études ayant permis de partitionner les régions en zones énergétiques.

Chaque zone est associée à deux coefficients :

- un coefficient de puissance crête photovoltaïque,
- un coefficient de puissance batterie,

pour l'alimentation en énergie de 1Wh/jour à une charge avec une autonomie de 5 jours.

\* Prévoir le comportement énergétique de l'ensemble de l'installation soumis aux conditions météorologiques du site choisi.

Cette prévision s'appuie sur des scénarios de fonctionnement intégrant les priorités d'alimentation des types de charges. Elle permet de valider les résultats de calcul de

dimensionnement à défaut d'une installation réelle sur le site et favorise une gestion rigoureuse de l'énergie permettant de minimiser les coûts d'installation.

### 2.4.1 *Le dispositif expérimental*

La figure 2.24 montre le dispositif expérimental sur lequel s'appuie notre simulation:

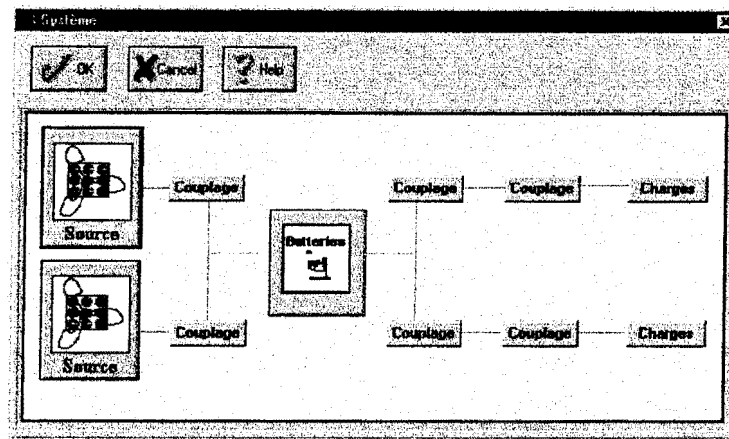


Figure 2. 24: *Le dispositif expérimental*

Un générateur photovoltaïque de moyenne puissance alimente deux types de récepteur:

- ceux dont l'alimentation s'effectue à partir d'un onduleur 220V/2kW et obéissant à des priorités.
- un dispositif fonctionnant à puissance variable qui consomme l'excédent de puissance.

Un réseau de batterie 48V dont le courant sera asservi à une valeur nulle assure une tension de service constante malgré les fluctuations des conditions météorologiques. Elle assure en outre une fonction de couplage, l'excédent d'énergie étant stocké sous forme d'eau ou de glace[46].

### 2.4.2 *Aspect logiciel*

Le logiciel de dimensionnement et de simulation (Figure 2.25) a été développé avec le langage Turbo Pascal dans l'environnement WINDOWS. Il est composé d'un module de dimensionnement et d'un module de simulation.

Il offre à l'utilisateur des tableaux de bord. En exploitant les ressources graphiques de WINDOWS, l'interface utilisateur par le biais de boîtes de dialogue, assure une conduite intuitive et conviviale du processus.



Figure 2. 25: Ecran principal

#### 2.4.2.1 Logiciel de dimensionnement des installations

Le module de dimensionnement peut être décomposé en trois parties:

##### 1) Estimation du potentiel solaire du site

Deux méthodes sont utilisées:

- les coefficients énergétiques graphiques

La figure 2.26 indique la partition du continent africain en zones énergétiques avec le tableau donnant les coefficients correspondant à chaque zone [6]. Cette carte est choisie dans le menu "LIEU\CONTINENT", l'utilisateur pointe alors la zone du site d'installation. Cette action retourne au programme les coefficients de la zone énergétique.

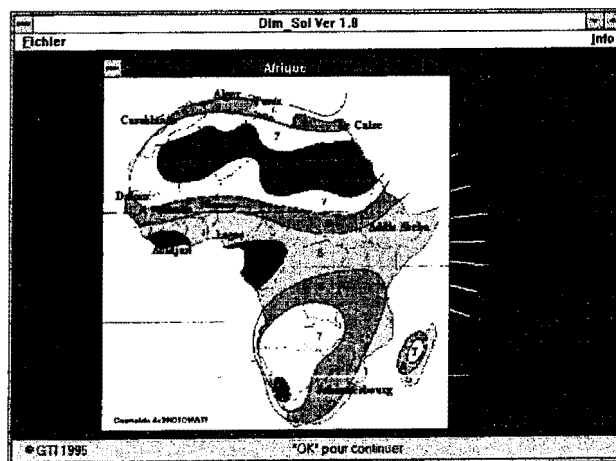


Figure 2. 26: Partitionnement de l'Afrique en zones énergétiques

- les formules empiriques

Des modèles empiriques permettent de caractériser le site d'implantation à travers son potentiel énergétique.

#### Modèle d'Angstrom

Angström (1924) a établi une relation linéaire entre l'irradiation globale quotidienne et la fraction d'insolation mesurées sur le site concernée. Cette relation, valable pour une surface réceptrice horizontale, peut s'écrire sous la forme suivante:

$$E = E_1 \left[ a_1 + (1 - a_1) \cdot S_r \right] \quad (\text{Eq. 2. 48})$$

où on a:

- $a_1 = 0.25$  : constante expérimentale
- $S_r$  : fraction d'ensoleillement
- $E_1$  (Wh/m<sup>2</sup>) : irradiation globale pour une journée de ciel clair
- $E$  (Wh/m<sup>2</sup>) : irradiation globale du jour considéré

#### Modèle de PRESCOTT et RIETVELD

Prescott et Rietveld ont proposé une formule semblable à celle d'Angström. Cependant, la détermination des constantes offre une meilleure précision dans les calculs.

$$G = G_0 \cdot [a + b \cdot S_r] \quad \text{avec:} \quad \begin{cases} a = 0,10 + 0,24 \cdot S_r \\ b = 0,38 + 0,008 \cdot \frac{1}{S_r} \end{cases} \quad (\text{Eq. 2. 49})$$

$$G_0 = I_0' \cdot \left[ \frac{2}{15} \cdot \omega \cdot \sin \varphi \cdot \sin \delta + \frac{24}{\pi} \cdot \sin \omega \cdot \cos \varphi \cdot \cos \delta \right] \quad (\text{Wh/m}^2)$$

$G_0$  représente l'irradiation globale estimée par la formule de DUFFIE et BECKMAN avec:

- $\omega$ : angle horaire
- $\delta$ : déclinaison
- $\varphi$ : latitude du lieu

#### Modèle de Chroscicki

Les travaux de Chroscicki en Suède (1971) ont abouti à l'expression du rayonnement global par ciel clair sur l'unique base de la hauteur du soleil et de la constante solaire.

Ainsi, il propose l'expression suivante:

$$E = 0,95 \cdot \left[ \frac{I_0' \cdot \sin \gamma}{1 + \frac{1}{\sin \gamma}} \right] \quad (\text{Eq. 2. 50})$$

avec  $\gamma$ , la hauteur angulaire du soleil.

### Modèle en sinus

L'évolution de l'irradiation diurne est régie par l'équation suivante:

$$E = E_{\max} \cdot \sin \left( \frac{\pi \cdot t}{\bar{D}_j} \right) \quad (\text{Eq. 2. 51})$$

$t$  : temps en heures  $0 < t < \bar{D}_j$

$\bar{D}_j$  : durée moyenne du jour, en heures, sur la période considérée

$E_{\max}$  : valeur maximale de l'irradiation solaire enregistrée sur la période considérée

### Modèle en sinus surélevé

Des travaux [47] ont abouti à l'établissement de la relation suivante. Elle exprime, comme le modèle en sinus, l'évolution journalière de l'ensoleillement global.

$$E = \frac{1}{2} \cdot E_{\max} \cdot \left[ 1 + \sin \left( \frac{2\pi}{\bar{D}_j} \left( t - \bar{D}_j \right) \right) \right]$$

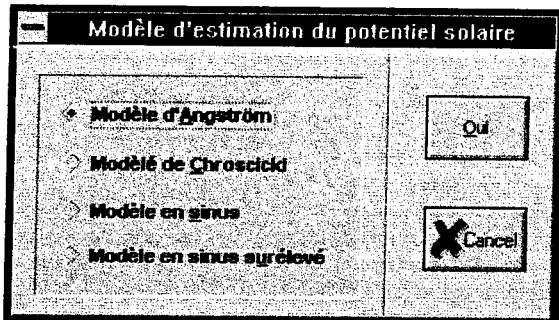
The image shows a software dialog box titled "Site d'implantation". It has a "Nom du site" field with the value "Dakar". Below this are two main sections: "Coordonnées géographiques" and "Données météorologiques".

Coordonnées géographiques		Données météorologiques	
Longitude	-17.41 °	Temp. max. sur site	35 °C
Latitude	14.71 °	Temp. min. sur site	18 °C
Altitude	200 m	Vitesse du vent	3.75 m/s

At the bottom of the dialog box, there are two buttons: "OK" and "Cancel".

Boîte de dialogue de saisie des données relatives au site d'implantation





Options de modèles d'estimation de la ressource solaire

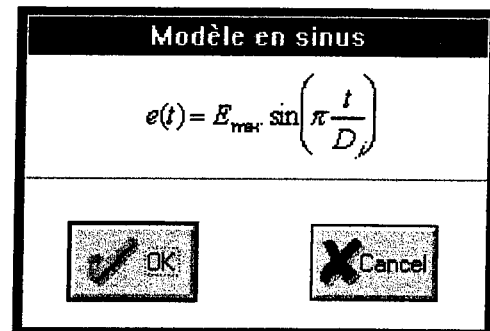
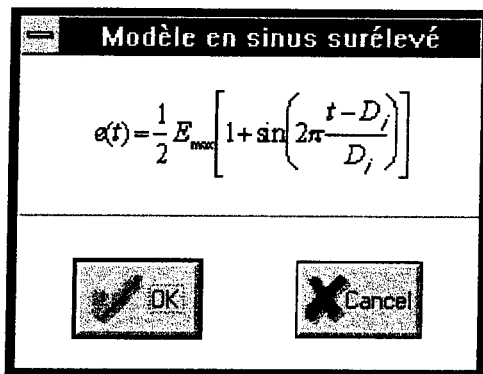
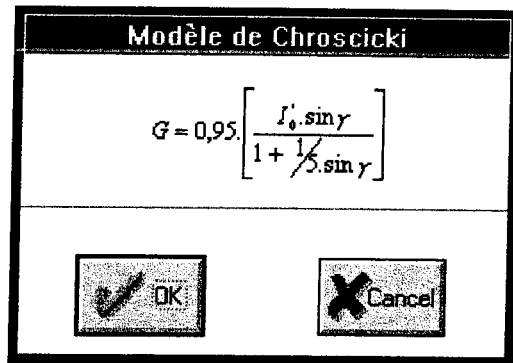


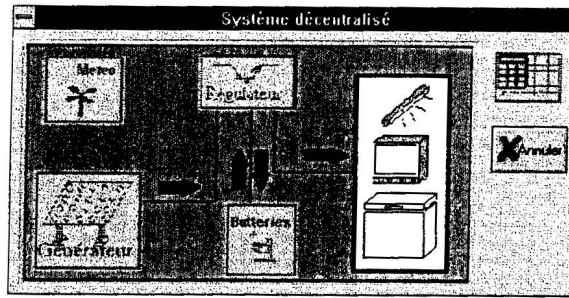
Figure 2. 27: Ecrans d'exploitation des modèles

L'exploitation de ces coefficients indique que pour disposer d'une énergie de 1Wh par jour il faut installer une puissance photovoltaïque de 0,36 Wcrête à Dakar. De plus, il faut 7,44 Wh batterie pour fournir à une charge, une énergie de 1 Wh en permanence pendant 5 jours.

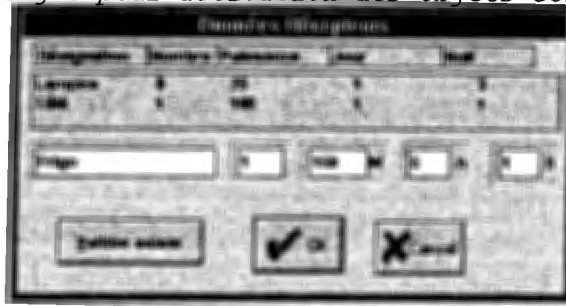
## 2) Détermination des paramètres électriques de l'installation.

L'exploitation de l'écran (Figure 2.28) permet de fixer les paramètres électriques des éléments du système énergétique. Ces paramètres sont indiqués par l'opérateur dans l'ordre suivant :

- récepteurs (désignation, nombre, puissance, durée de fonctionnement par jour)
- batteries (tension, autonomie souhaitée),
- le rendement du régulateur qui assure la protection des batteries,
- les caractéristiques des modules (tension, puissance crête).



Boîte de dialogue pour activation des objets constituant un système



Saisie données récepteurs

Figure 2. 28: Ecrans de saisie des données

L'ensemble de ces paramètres a une valeur par défaut permettant à un non initié d'exploiter malgré tout l'outil de dimensionnement. Les paramètres par défaut prennent en compte la zone sahélienne de Dakar.

### 3) Calcul de la puissance crête du générateur - Détermination du nombre de modules - Association.

Les paramètres électriques ci-dessus indiqués sont transmis au logiciel pour le calcul du générateur (puissance crête et nombre de modules).

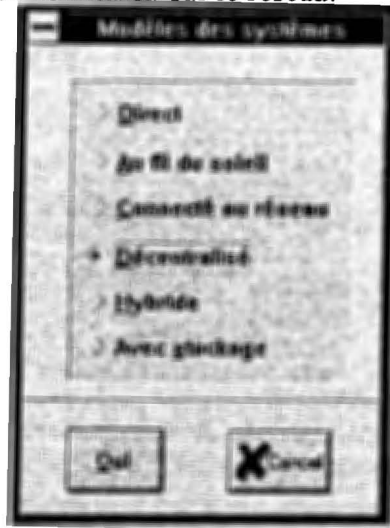
Cette partie fait intervenir des équations de calcul de puissances intégrant les coefficients énergétiques de la région choisie et la puissance crête par module.

En fonction de la tension par module et la tension de la batterie, le type d'association série parallèle et parallèle - parallèle optimal des modules est proposé pour atteindre la puissance désirée.

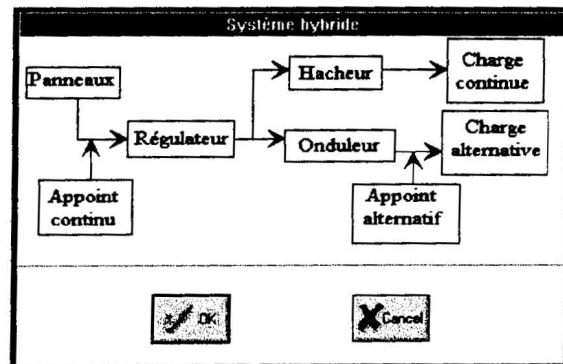
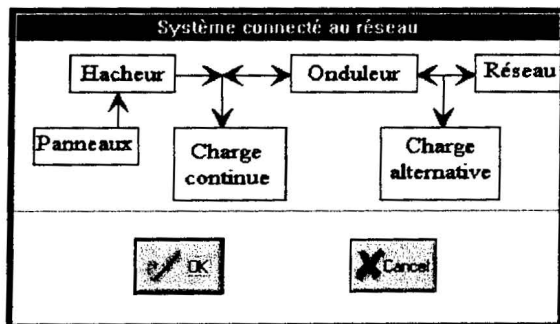
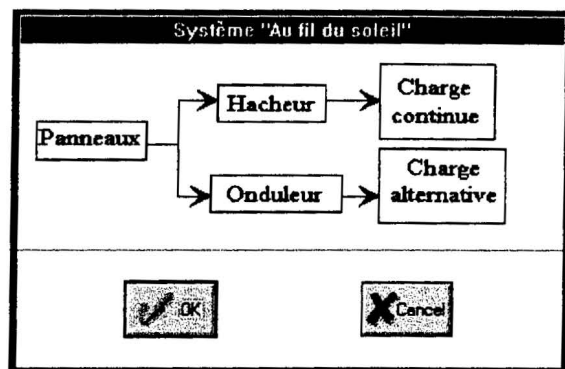
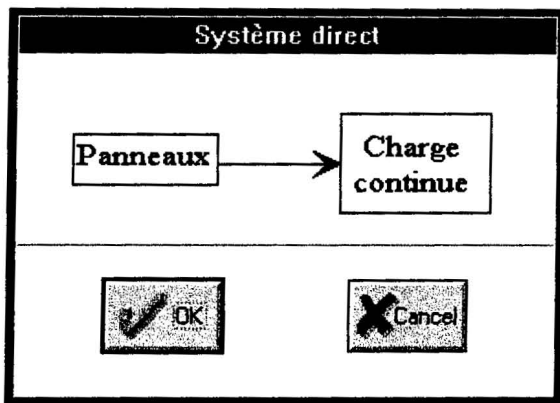
De plus différents modes de couplage du générateur avec les charges sont proposés:

- couplage direct,
- couplage au fil du soleil,
- couplage par batterie de stockage,

- couplage avec appoint hybride,
- couplage avec connexion sur le réseau.



Options de systèmes de couplage



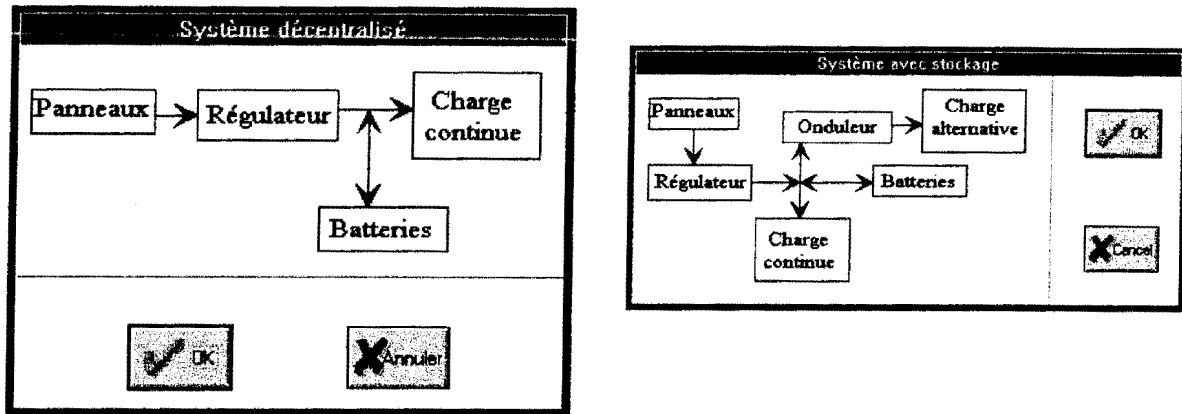


Figure 2. 29: Ecrans d'exploitation des modes de couplage

Pour faciliter le choix de l'opérateur un couplage par défaut est sélectionné tenant compte des spécificités des récepteurs.

Le calcul de dimensionnement fait intervenir d'autres paramètres pouvant influencer le comportement du système (température, taux d'auto décharge des batteries, angle d'inclinaison des panneaux..).

Un outil de dimensionnement efficace prenant en compte à la fois, le site, les consommateurs électriques, la gestion rigoureuse de l'énergie produite ne peut que favoriser la réduction des coûts.

Les résultats de calcul de dimensionnement sont passés comme argument au module de Simulation. La simulation du fonctionnement de la micro centrale dont les éléments viennent d'être dimensionnés, permet de prévoir son comportement sur le site situé dans la zone énergétique 6 du continent africain.

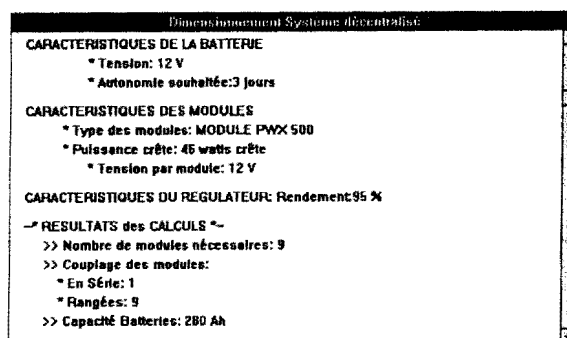


Figure 2. 30: Rapport de dimensionnement

La figure 2.31 montre un graphe de modélisation des objets relatifs à un système avec ses interactions. Ce type de représentation s'avère utile pour des développements ultérieurs notamment en ce qui concerne la réutilisabilité et la maintenabilité du logiciel. [48]

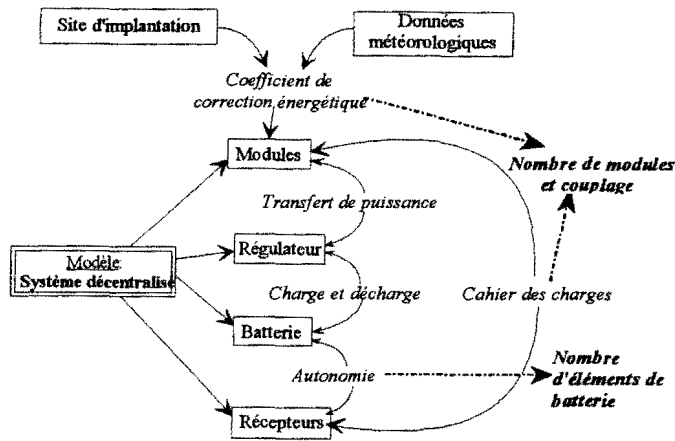
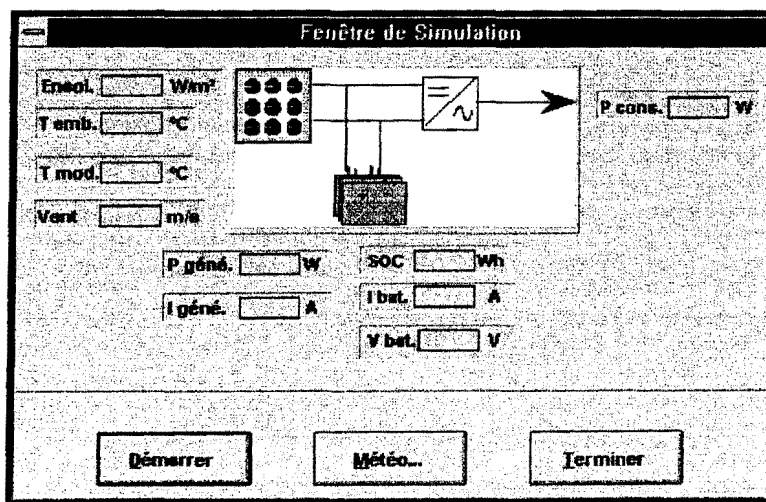


Figure 2. 31: Graphe d'interactions entre objets

#### 2.4.2.2. Logiciel de simulation

La simulation permet de valider les résultats du dimensionnement avant l'installation sur site.



Interface avec la procédure de simulation

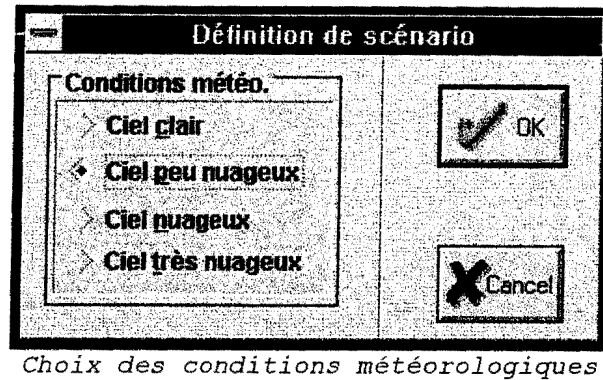


Figure 2. 32: Ecrans de simulation

Diverses études menées au LER dans le domaine de la simulation ont permis de connaître le comportement d'un prototype de micro centrale énergétique aérosolaire. Elles sont basées sur des scénarios de fonctionnement suivant les fluctuations des conditions météorologiques, des modèles mathématiques des équipements mais aussi sur des informations issues de campagnes de mesures enregistrées dans des bases de données.

L'originalité du présent travail repose sur l'objectif de valider les résultats du dimensionnement. De plus elle consiste en une étude comparative de différents modes de couplage pouvant être réalisés entre le générateur et les récepteurs. Cette étude permet d'aboutir à un choix du mode de couplage optimal à réaliser suivant la spécificité des récepteurs. Lorsque les résultats de la simulation introduisent un écart supérieur à 5% dans les consommations énergétiques, une correction est apportée sur les résultats du dimensionnement.

L'étude du comportement du système fait intervenir une simulation numérique des données météorologiques. Ce comportement est fonction d'aléas et de fonctions de transfert des équipements.

L'approche que nous proposons privilégie les aléas météorologiques. En effet, nous avons défini quatre (4) scénarios qui permettent de faire varier de façon relativement simple la clarté du ciel. Il s'agit des conditions de:

- ciel clair,
- ciel peu nuageux,
- ciel nuageux,
- ciel très nuageux.

La clarté du ciel influe directement sur l'irradiation globale. Celle-ci est simulée par le modèle mathématique suivant:

$$(1 - \xi) \frac{1}{2} E_{\max} \left[ 1 + \sin \left( 2\pi \frac{t - D_j}{D_j} \right) \right] \quad (\text{Eq. 2. 52})$$

- $E_{\max}$  : valeur maximale de l'irradiation globale
- $D_j$  : durée du jour
- $t$  : instant d'observation
- $\xi$  : nébulosité

Les profils d'ensoleillement représentant les divers scénarios de fonctionnement sont représentés sur la figure 2.33.

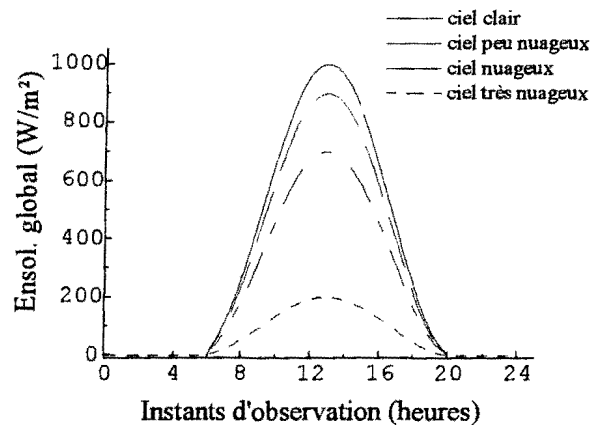


Figure 2. 33: Divers profils d'ensoleillement

Outre l'irradiation globale, les grandeurs auxquelles s'appliquent la simulation logicielle sont celles qui déterminent sans équivoque le fonctionnement du système. Ces grandeurs sont d'ordre:

- \* météorologiques:
  - la température ambiante,
  - la vitesse du vent;
- \* et électriques:
  - puissance générateur (ou tension et courant du générateur),
  - puissance en sortie du régulateur,
  - courant d'entrée onduleur,
  - puissance utilisation,

- capacité batterie,
- tension batterie
- courant batterie
- ...

L'analyse organique du module de simulation a conduit à la démarche suivante:

- 1- Indiquer les conditions météorologiques,
- 2- Démarrer la simulation sur 144 points (6 points/heure sur une journée).

La simulation du fonctionnement des installations sur 144 points permet de mieux approcher les phénomènes transitoires [49]. Les courbes sont mieux tracées; ce qui permet à l'utilisateur d'interpréter correctement les phénomènes observés.

Une option de sauvegarde des résultats de simulation permet à l'utilisateur de tracer en différé, grâce à un tableur par exemple, des graphes. L'évolution des diverses grandeurs énergétiques et météorologiques contribuera à la conclusion sur la fiabilité du système.

## **2.5 CONCLUSION**

La réalisation d'un outil de dimensionnement de systèmes énergétiques solaires était incontournable dans la mesure où les données sur site sont toujours difficile à acquérir, compte tenu de l'éloignement. Il fallait donc partir de l'expérience acquise sur le terrain et de l'apport de l'informatique pour mettre en place les outils mathématiques adéquats en y intégrant la convivialité et la facilité de la conduite de l'outil proposé. Avec les méthodes de simulation, les résultats de dimensionnement des installations sont testés à défaut de se mettre dans les conditions réelles sur sites.

Nous pensons que cette étude constitue un outil de travail important pour nos institutions qui trouvent en l'énergie solaire photovoltaïque le seul moyen de résoudre les problèmes énergétiques des zones rurales isolées malgré leur coût encore relativement élevé.



## LISTE DES SYMBOLES

$T_a$  : température ambiante  
 $T_{amax}$  : température ambiante maximale du jour  
 $T_{amin}$  : température ambiante minimale du jour  
 $t$  : instant des observations  
 $I, V$  : courant et tension de sortie du module  
 $I_{pm}, V_{pm}$  : courant et tension à puissance maximale  
 $V_{co}$  : tension de circuit ouvert  
 $I_{cc}$  : courant de court-circuit  
 $T_c$  : température des cellules  
 $G$  : irradiation globale  
 $G_{ref}$  : irradiation de référence  
 $R_s$  : résistance série d'un module  
 $\alpha$  : coefficient de température pour le courant  
 $\beta$  : coefficient de température pour la tension  
 $v$  : est la vitesse du vent  
 $\epsilon_G = 0.0138, \epsilon_{T_a} = 0.031, \epsilon_v = 0.042$  : constantes expérimentales  
 $E$  : consommation énergétique journalière  
 $K$  : rapport de la pointe de charge à la demande la plus basse  
 $D_m$  : amplitude d'une consommation sinusoïdale  
 $\eta$  : rendement énergétique  
 $\eta_{10}$  : rendement d'un onduleur à 10% de la puissance nominale  
 $\eta_{100}$  : rendement d'un onduleur à 100% de la puissance nominale  
 $P_n$  : puissance nominale d'un onduleur  
EDC : état de charge de la batterie  
 $D_S$  : taux d'auto-décharge de la batterie  
 $K_I$  : rendement de charge- décharge de la batterie  
 $R_B$  : résistance interne de la batterie  
 $V_B$  : tension aux bornes de la batterie  
 $I_B$  : est le courant dans la batterie  
 $i_0$  : courant d'échange  
 $A$  : surface d'électrode  
 $k^*$  : constante intrinsèque de vitesse (ou de transfert de charge)  
 $E_{sc}$  : potentiel constant  
 $K_c$  : coefficient de polarisation par unité de densité de courant de matière active  
 $I_{ma}$  : densité de courant de matière active  
 $Q_c$  est la quantité totale de la matière active disponible à la cathode  
 $Q_a$  est la quantité totale de la matière active disponible à l'anode  
 $dt$  : intervalle de temps  
 $\delta W$  : variation élémentaire d'énergie dans une batterie  
 $\delta S$  : variation élémentaire de l'état de charge d'une batterie  
 $P_{gen}$  : puissance en sortie d'u générateur d'appoint  
 $P_v$  : puissance du vent  
 $\Gamma_v$  : couple généré par le vent  
 $P_p$  : perte en puissance

$\Gamma_p$  : perte en couple  
 $P_e$  : puissance d'une éolienne  
 $\Gamma_e$  : couple d'une éolienne  
 $Cr$  : coefficient de couple  
 $\lambda$  : vitesse relative de l'éolienne par rapport au vent  
 $\Gamma_c$  : couple de charge  
 $\Gamma_{c,em}$  : couple électromagnétique du générateur  
 $\Gamma_{c,mv}$  : couple de pertes mécaniques et de ventilation  
 $r$  : résistance de l'enroulement rotorique  
 $R$  : résistance de charge  
 $K_b$  : facteur de bobinage de l'enroulement  
 $N$  : nombre de spires en série sur une phase de l'aéromoteur  
 $\Phi$  : flux magnétique produit par les aimants permanents  
 $p$  : nombre de paires de pôles dans aéromoteur  
 $J$  : moment d'inertie de la turbine éolienne  
 $Pu(t)$  : profil de consommation  
 $gi(t)$ : fonction de Gauss  
 $a_1 = 0.25$  : constante expérimentale  
 $s_r$  : fraction d'ensoleillement  
 $E_1$  : irradiation globale pour une journée de ciel clair  
 $\omega$  : angle horaire  
 $\delta$  : déclinaison  
 $\varphi$  : latitude du lieu  
 $\bar{D}_j$  : durée moyenne du jour sur la période considérée  
 $D_j$  : durée du jour  
 $E_{max}$  : valeur maximale de l'irradiation solaire enregistrée sur la période considérée  
 $\xi$  : nébulosité

## **CHAPITRE 3**

# **REALISATION MATERIELLE ET LOGICIELLE D'UN PROTOTYPE DE MICROCENTRALE PHOTOVOLTAIQUE HYBRIDE**

## **3.1 - INTRODUCTION**

Cette réalisation fait suite aux différentes simulations du fonctionnement de la microcentrale [50], [51]. Les travaux effectués au laboratoire ayant conduit à la maîtrise du potentiel énergétique du site d'installation, à l'optimisation du fonctionnement des générateurs ainsi qu'au transfert optimal de l'énergie disponible à la charge, nous avons entrepris la mise en place d'un prototype de laboratoire.

Les objectifs visés sont:

- d'une part la production d'électricité et l'exhaure de l'eau dans un village isolé du Sahel,
- d'autre part l'économie d'énergie en zone urbaine.

L'utilisation combinée de l'informatique industrielle temps réel, et de l'électronique de puissance favorise le développement d'un système énergétique de grande fiabilité.

La multiplicité des sources et des récepteurs, impose la décomposition en tâches élémentaires de la structure de commande.

## **3.2 - GESTION MULTITACHE ET STRUCTURE MULTIPROCESSEURS**

### **3.2.1 Cahier des charges**

Les figures 3.1 et 3.2 montrent les schémas synoptiques retenus pour le prototype de laboratoire de la microcentrale énergétique.

La partie "PUISSANCE" est composée:

- d'un générateur photovoltaïque de 400W,
- d'un aérogénérateur de 1,2kW.

La tension de service imposée par les batteries de couplage est égale à 48 volts.

Un onduleur 48 volts/220 volts fournit l'alimentation électrique aux récepteurs à puissance fixe.

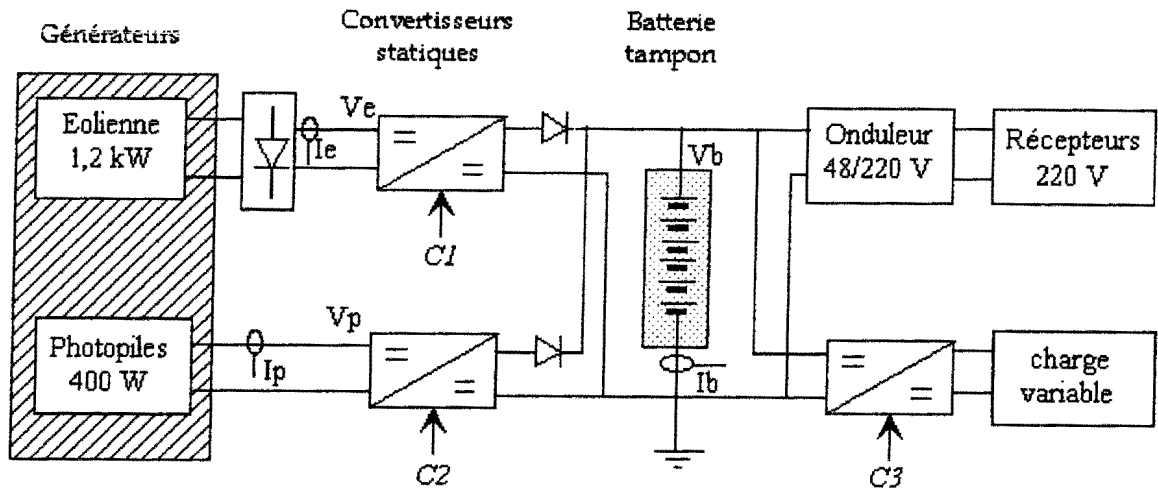


Figure 3.1: Synoptique de puissance

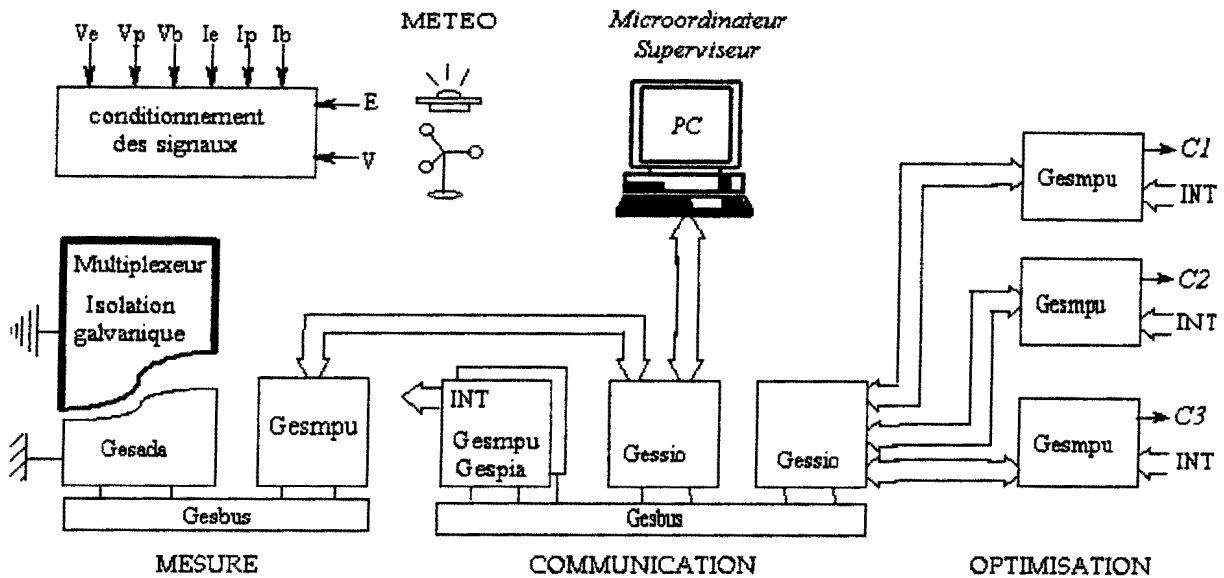


Figure 3.2: Synoptique de commande

Le transfert de toute l'énergie excédentaire fournie par les générateurs à la charge, fonctionnant à puissance variable, se fait via un convertisseur statique selon une loi de commande appliquée sur son degré de liberté.

La partie "COMMANDE":

- permet l'acquisition des différents paramètres électriques des générateurs et des batteries ainsi que les grandeurs météorologiques telles que l'ensoleillement, la vitesse du vent, etc....

- génère la commande des convertisseurs statiques,
- assure les échanges d'informations entre les tâches,
- contrôle le fonctionnement de la microcentrale et effectue le bilan de puissance à partir d'un microordinateur superviseur.

### **3.2.2 Gestion des tâches**

Les systèmes multitâches permettent à plusieurs programmes indépendants d'être exécutés simultanément. Chaque tâche peut accéder à n'importe quelle ressource du système en utilisant la requête appropriée [51], [52]. Le noyau du système est chargé de la gestion des tâches en tenant compte de leur priorité.

#### *Spécifications des tâches*

Le logiciel de pilotage d'un système temps réel doit être décomposé en tâches, définies comme étant des fragments de programme ou des procédures.

D'une manière générale, une tâche passe au cours du temps par quatre états. Elle peut être active, prête, en attente ou suspendue.

- Une tâche est active quand elle est en cours d'exécution,
- une tâche est prête si elle est susceptible d'être exécutée,
- une tâche est en attente si elle ne peut pas être exécutée,
- une tâche est suspendue si elle ne doit pas être exécutée.

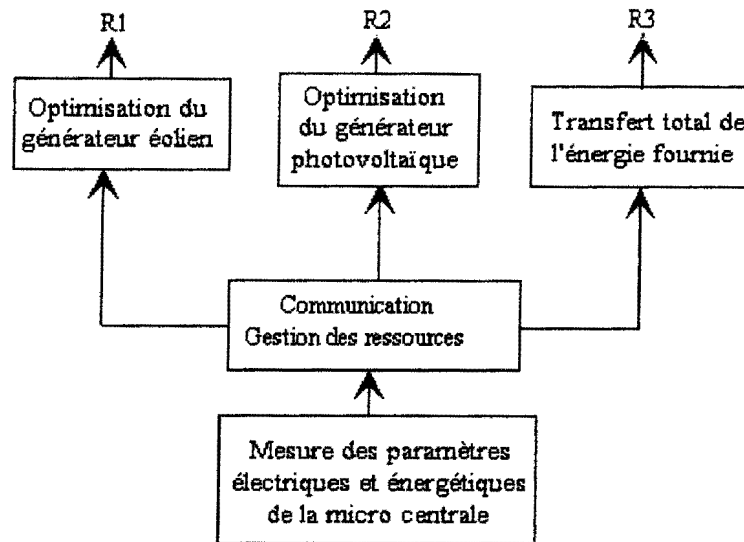


Figure 3. 3: Synoptique des tâches

- *Tâche 1*: Optimisation du fonctionnement du générateur photovoltaïque par asservissement de la tension du générateur à sa valeur optimale ou par recherche extrême de la puissance.
- *Tâche 2*: Optimisation du fonctionnement du générateur éolien basée sur un modèle du système ou par recherche extrême.
- *Tâche 3*: Transfert de toute la puissance fournie par les générateurs par asservissement de la valeur du courant de la batterie à une consigne nulle.
- *Tâche 4*: Surveillance du fonctionnement de la microcentrale.

Les tâches ainsi définies ont des ressources propres disponibles au niveau du module de mesure.

L'exécution de ces tâches nécessite la définition d'un module de communication pour la gestion des ressources du système.

Le déroulement de chacune des tâches identifiées précédemment est confié à un processeur associé à sa ressource de gestion propre. C'est ainsi que quatre processeurs spécialisés travaillent en parallèle et remplissent des fonctions spécifiques.

- Le processeur de mesure acquiert les paramètres électriques et météorologiques de la microcentrale suivant une période d'échantillonnage  $T_e$  ajustable par logiciel. Dans notre application,  $T_e$  est fixée à 10 secondes. Chaque 10 secondes, le processeur de mesure acquiert les paramètres et envoie une interruption au processeur de communication pour une demande de transfert et de mémorisation.

Les paramètres répertoriés sont:

- tension, courant photopiles,
- tension, courant aérogénérateurs,
- éclairement reçu au sol,
- vitesse du vent,
- tension, courant batteries.

- Le processeur de communication récupère et mémorise les données en provenance du processeur de mesure. Il attend une interruption en provenance d'un processeur spécialisé pour lui envoyer ses informations propres. Les interruptions peuvent arriver simultanément ou dans un ordre quelconque. Dans tous les cas, il procède d'abord à l'identification de la provenance de l'interruption puis décode le type d'interruption.

- Le processeur d'optimisation assure le fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque en envoyant une commande au convertisseur statique, adaptateur d'impédance. La tâche exécutée par ce processeur est identique à celle du processeur d'optimisation de l'aérogénérateur.

- Le processeur de transfert d'énergie assure par une commande appropriée appliquée au convertisseur statique correspondant, l'alimentation en temps réel de la charge variable.

L'ensemble des processeurs spécialisés utilisés dans l'exécution des différentes tâches définit la structure multiprocesseurs [53].

Cette structure multiprocesseurs est basée sur 2 protocoles:

- le protocole d'interruption,
- le protocole de communication.



Le protocole d'interruption géré par le processeur de communication active les échanges d'informations entre processeurs. Les interruptions sont de types matériels. Elles suspendent le processus en cours pour permettre l'exécution d'une tâche en attente.

Le protocole de communication entre processeurs est composé de deux modules:

- un module de transmission qui constitue l'une des sous-tâches des processeurs de mesure et de communication,
- un module de réception; sous-tâche des processeurs de communication, d'optimisation et de transfert.

### **3.2.2 Structure multiprocesseurs**

Pour faire communiquer deux unités informatiques entre elles, deux types de liaison sont habituellement utilisées: les liaisons parallèles où plusieurs informations binaires circulent parallèlement sur autant de fils, et les liaisons séries où seul un fil de transmission est utilisé.

#### **A. Structure parallèle**

La structure parallèle multiprocesseurs repose sur les liaisons parallèles. Ces liaisons conviennent en général, pour les liaisons de courte distance (< 10 m).

Utilisée dans les systèmes temps réel, la structure parallèle s'articule autour du bus *VME (Versa Module Eurocard)* dont les principales caractéristiques sont :

- systèmes mono et multiprocesseurs,
- systèmes à 8, 16 et 32 bits,
- transfert de données > 20 Moctets par seconde,
- protocole de transfert asynchrone non multiplexé,
- lignes hiérarchisées de demande de transfert,
- systèmes avec gestion d'interruptions.

Son format double Europe (233,3mm x 160mm) et ses connecteurs de 96 broches lui confèrent des caractéristiques intéressantes pour des applications industrielles [54].

Il existe d'autres bus, parmi lesquels le bus *G64* destiné aux applications monoprocesseur. Généralisé par *GESPAC*, sa vocation était de réaliser des cartes standards au format Europe (100mm\*160mm) construites à partir de bus utilisant des connecteurs standards type *DIN* à 64 broches. Avec le développement des applications multiprocesseurs *Gespac* a mis sur le marché des cartes au format *G96*.

La structure multiprocesseurs parallèle présente l'avantage d'être rapide, mais de mise en oeuvre relativement complexe.

## **B. Structure série**

Elle est bien adaptée lorsque l'échange d'informations s'effectue sur des distances éloignées, ne serait ce que pour les économies de lignes.

Les échanges de type série se classent en deux catégories:

- asynchrone: lorsque la durée entre deux caractères transmis peut être quelconque; chaque mot d'un octet est accompagné de bits marquant son départ et sa fin,
- synchrone: lorsque les caractères transmis par bloc sont rythmés constamment par une horloge pour les isoler les uns des autres.

La vitesse de transmission permet de connaître le temps séparant deux impulsions sur la ligne série. Ces impulsions peuvent être à deux niveaux électriques -12 volts et +12 volts correspondant à un "1" logique et un "0" logique. Bien que lent, le mode asynchrone est plus simple à mettre en oeuvre et présente une grande fiabilité.

La liaison série offre des moyens efficaces pour assurer une liaison fiable en exploitant les méthodes de contrôle disponibles parmi lesquelles:

- le protocole d'échange Xon/Xoff correspondant à l'envoi de deux codes de synchronisation (DC1 (\$11)), DC2 (\$13)),
- le protocole de synchronisation par des lignes spécialisées (RTS, CTS etc...),

- le mode de contrôle par test d'état du périphérique.

La possibilité de détecter les erreurs lors des échanges de données constitue un atout majeur dans l'utilisation des liaisons séries RS 232 et justifie notre choix (Figure 3.4).

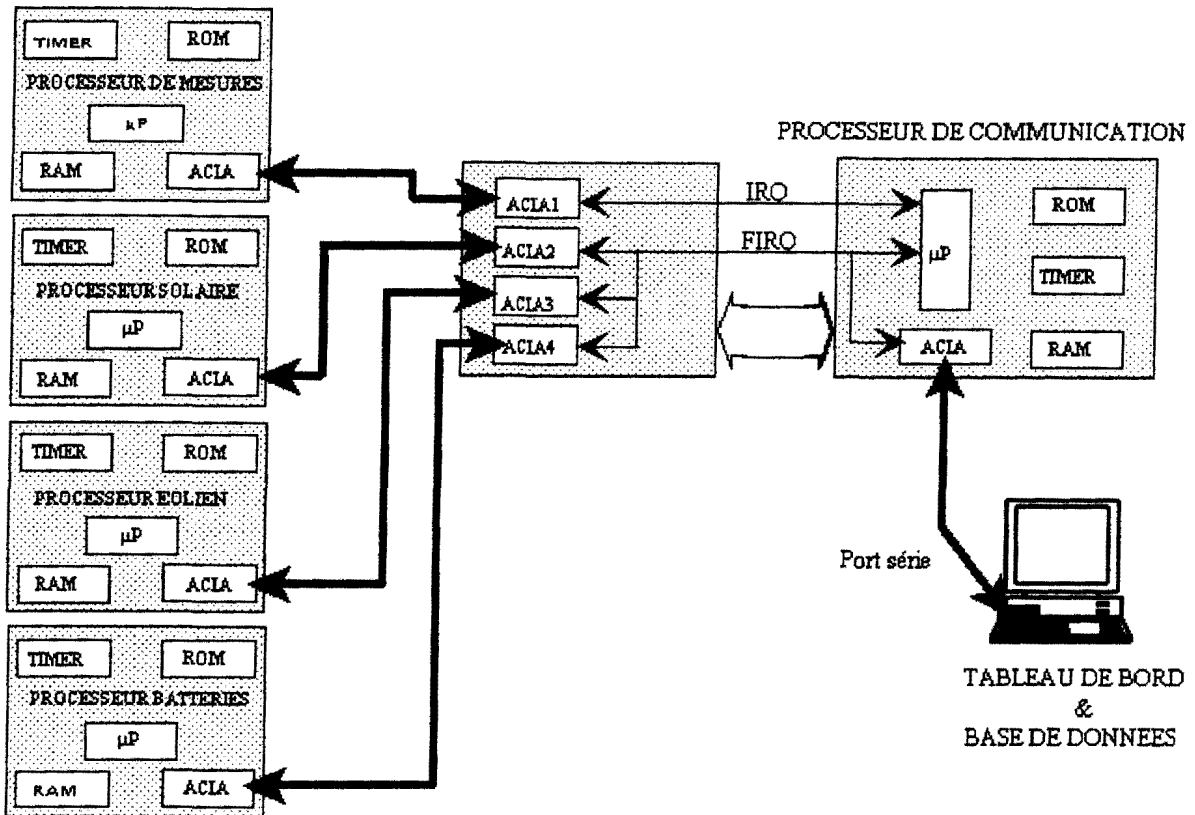


Figure 3. 4: Structure multiprocesseurs

En effet, le prototype en cours de développement au laboratoire est prévu pour être installé en zone isolée avec un poste de commande susceptible d'être éloigné. Cette option se justifie d'autant plus que la densité des données à échanger entre les divers composants de la microcentrale est relativement faible.

Il ressort de cette description que la structure ainsi retenue comporte plusieurs modules organisés chacun en une tâche. L'exécution de ces tâches multiples pose le problème de leur évolution simultanée.

Le fonctionnement normal de la structure multiprocesseurs exige une spécification rigoureuse des interruptions afin d'éviter les conflits.

### 3.2.3 - MODELISATION DU PROTOCOLE DE COMMUNICATION

Le choix des "Réseaux de Pétri" se justifie par;

- une spécification claire des tâches,
- une bonne validation du système,
- des procédures d'implémentation.

Le domaine d'application des Réseaux de Pétri est très vaste. Il sont très indiqués pour les protocoles de communication et la gestion de système en fonctionnement sur interruptions.

Depuis les travaux de *PETRI* en Allemagne, les réseaux se sont répandus dans le monde scientifique au niveau international. L'outil analytique est basé sur des concepts de "réceptivité", de "transition" de "place" et de "marquage" [55].

Un Réseau de Pétri est un graphe qui comporte deux types de noeuds, les places et les transitions symbolisées respectivement par un cercle et un tiret.

Pour modéliser l'évolution d'un système au cours du temps on est amené à compléter le réseau de Pétri par un marquage  $M$  qui consiste à déposer un nombre de jetons  $m(p_i)$  dans chaque place du réseau.

La méthode de modélisation la plus simple d'un système multitâches consiste à associer les transitions et les places à des actions.

L'application des Réseaux de Pétri à notre système revient à faire correspondre les places et les transitions aux différentes fonctions exécutées par les processeurs (mesure, communication, optimisation, etc ...) et les jetons aux paramètres électriques et météorologiques de la microcentrale (Figure 3.5) [56].

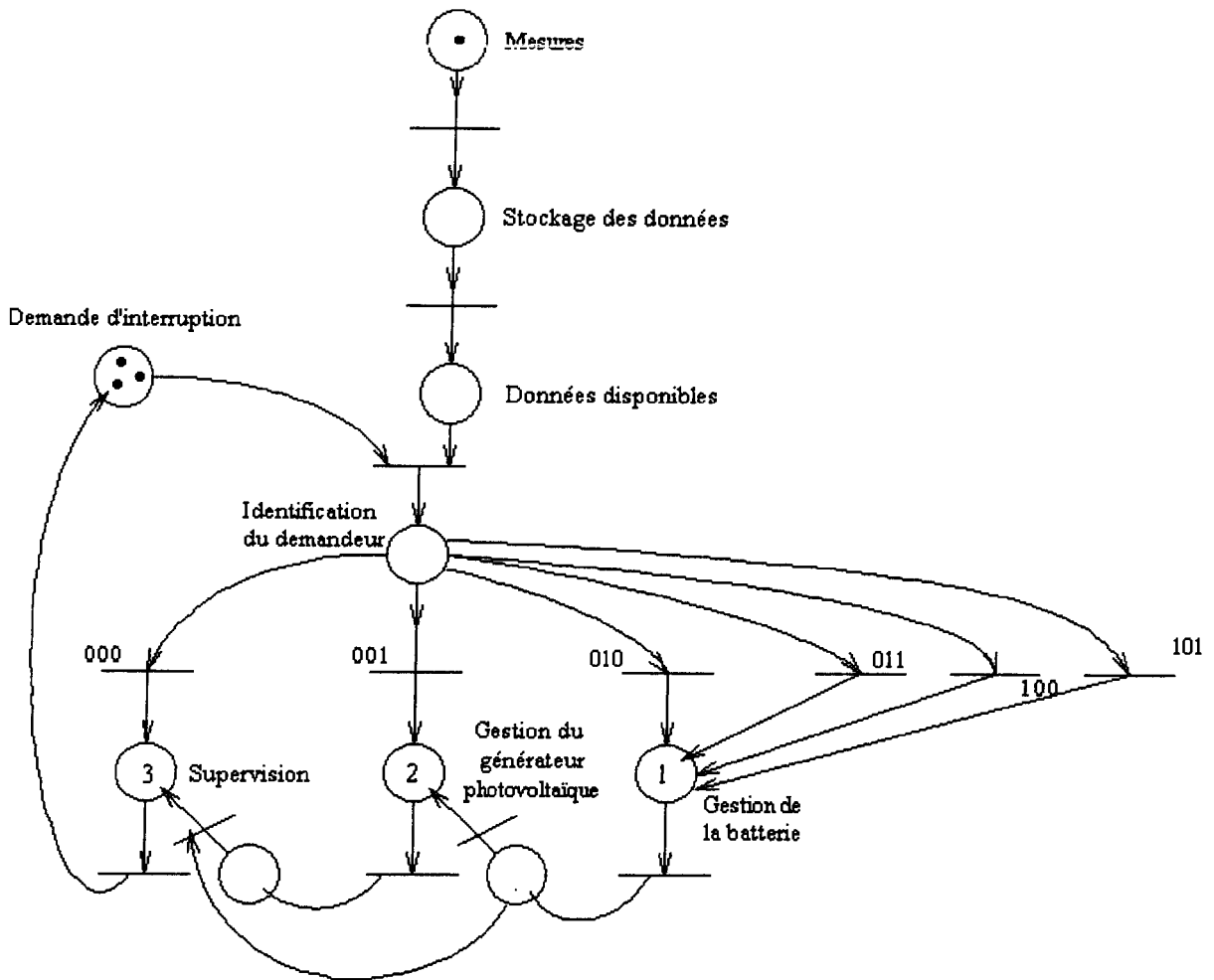


Figure 3. 5: Réseaux de Pétri

### 3.3 - REALISATION MATERIELLE DE LA STRUCTURE MULTIPROCESSEURS

#### 3.3.1 - Chaîne d'acquisition

La mesure des paramètres de la microcentrale par un système informatique nécessite la mise en oeuvre d'un dispositif d'acquisition de données exploitables par traitement direct ou différé.

Les grandeurs à étudier peuvent correspondre à des puissances élevées qui risquent d'endommager ou de perturber l'installation [57].

Une isolation galvanique et une adaptation des signaux sont donc des priorités.

La chaîne d'acquisition entièrement réalisée (Figure 3.6) assure toutes les transformations et adaptations compatibles à l'environnement du système informatique.

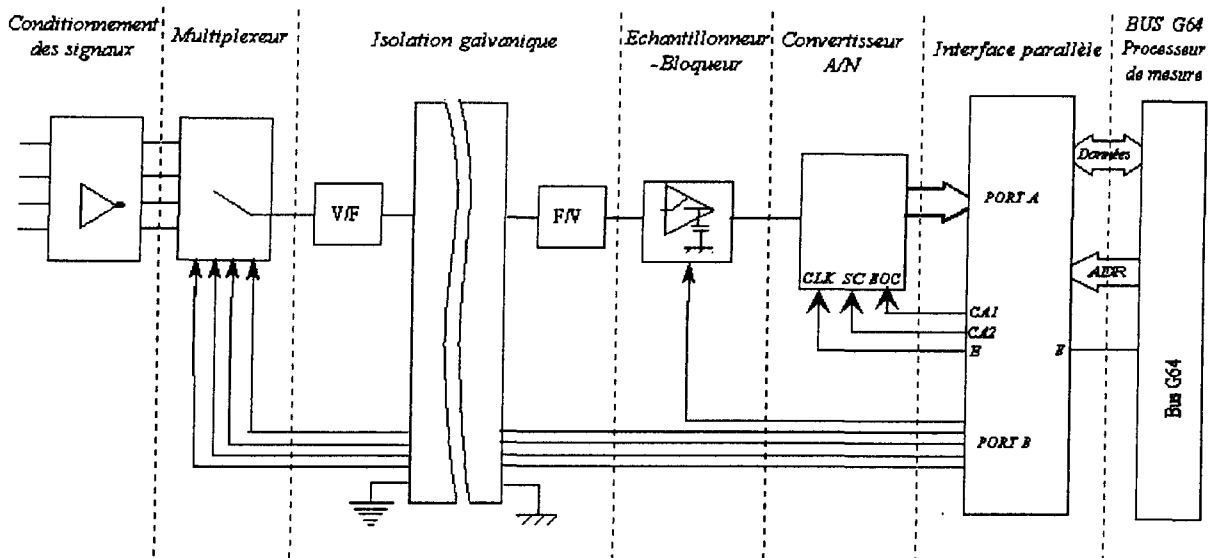


Figure 3. 6: Synoptique de la chaîne d'acquisition

### A. Conditionnement des signaux

C'est un ensemble de circuits électroniques assurant un pré traitement des paramètres de la microcentrale pour les adapter à l'étage suivant. Il est réalisé avec des amplificateurs opérationnels montés en différentiel et en suiveur pour:

- la mise à niveau (amplification, atténuation),
- l'adaptation d'impédance,
- le filtrage des bruits (afin d'éliminer les parasites et les fréquences indésirables).

### B. Multiplexeur de voies

La chaîne d'acquisition est utilisée pour la mesure de plusieurs paramètres physiques. Le multiplexeur permet de commuter successivement les entrées sur une seule sortie suivant la commande numérique reçue.

Nous avons utilisé l'*AD7506* d'*ANALOG DEVICES* comme multiplexeur analogique. Il se caractérise par ses 16 voies d'entrée et sa rapidité de commutation est de l'ordre de la micro-seconde

### **C. Isolation galvanique**

Elle est réalisée par une double conversion, tension/fréquence (V/F)- fréquence/tension (F/V) et une isolation par un seul optocoupleur. La double conversion est obtenue par les convertisseurs V/F *AD537* et F/V *451L* d'*ANALOG DEVICES*.

### **D. Echantillonneur/Bloqueur**

Il a pour rôle de fournir un signal discret en prélevant l'amplitude du signal à intervalle de temps régulier  $T_e$ , appelé période d'échantillonnage. On obtient ainsi un signal échantillonné en fonction du temps.

L'échantillonneur/bloqueur utilisé est le *SHM-LM2* de *DATEL* [58] La mémorisation de la valeur échantillonnée est obtenue par une capacité de l'ordre de  $2,21\mu\text{F}$ , qui est un bon compromis entre le temps d'acquisition  $T_a$  et le taux de décharge durant  $T_e$ .

### **E. Conversion analogique-numérique**

Elle a pour but de traduire le signal échantillonné analogique en un signal numérique exploitable par le microprocesseur.

Le convertisseur analogique numérique (*ADC847* de *DATEL*) fonctionne par approximations successives. C'est un convertisseur 8 bits avec un temps de conversion typique de l'ordre de  $9\mu\text{s}$  pour une fréquence d'horloge de 1MHz.

La réalisation pratique de la chaîne d'acquisition (figures 3.7 et 3.8) permet de mesurer des gammes de tension qui varient entre quelques millivolts et des dizaines de volts. Cette plage est fixée par le choix des gains dans l'étage de conditionnement des signaux.

Les grandeurs analogiques sont converties par l'ADC 847 avec une précision de 1/4 LSB. L'acquisition de ces données numériques par le microprocesseur s'effectue par l'intermédiaire d'un circuit d'interface parallèle (PIA 6821). Ce dernier est aussi utilisé par le microprocesseur pour envoyer:

- des commandes au multiplexeur pour la sélection des voies,
- à l'échantillonneur/bloqueur pour fixer le temps échantillonnage  $T_e$ ,
- et enfin à l'ADC pour la synchronisation des échanges.

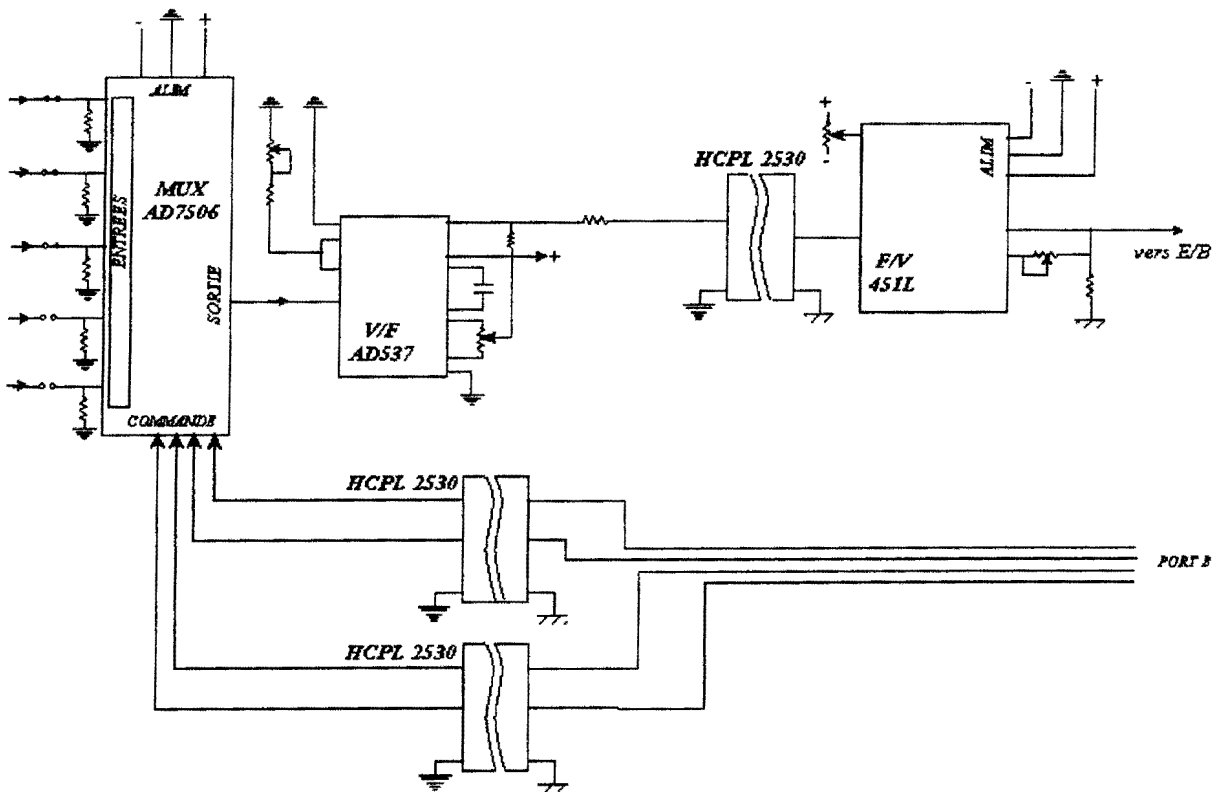


Figure 3. 7: Multiplexage et isolation galvanique



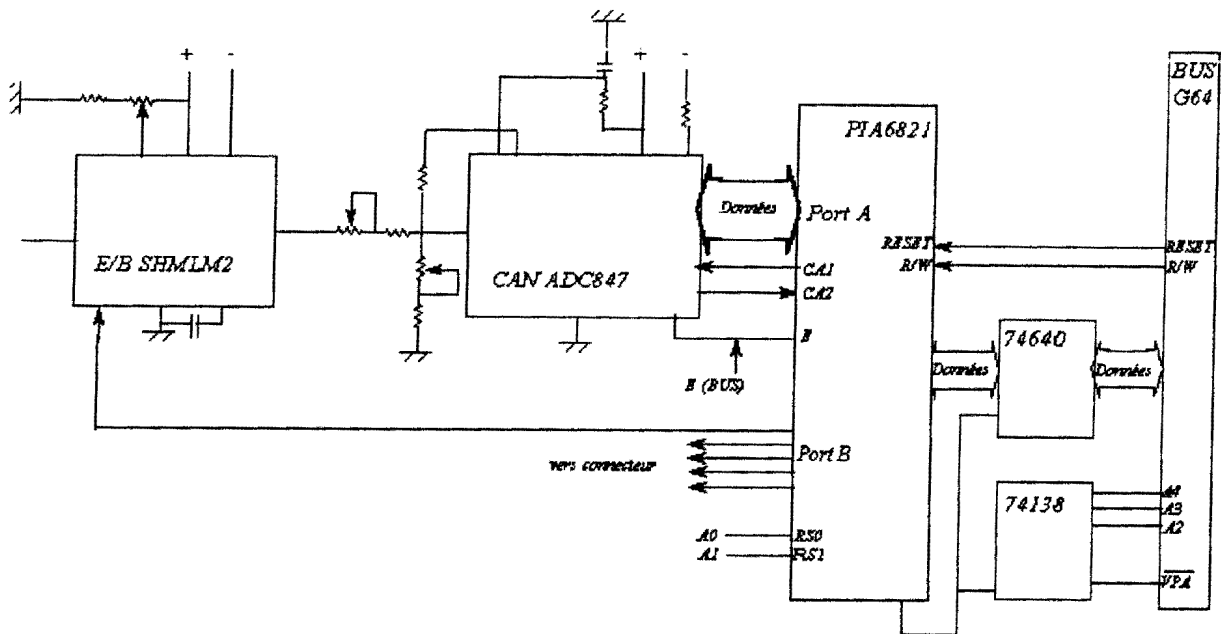


Figure 3. 8: Chaîne de conversion analogique numérique

### 3.3.2 - La commande numérique

#### A. Le processeur spécialisé "standard"

La carte processeur spécialisé *GESMPU-2A* de la firme *GESPAC* (Figure 3.9) a été retenue pour piloter les différentes tâches de la structure.

Pour des raisons de standardisation et d'interchangeabilité, nous avons adopté une configuration matérielle identique pour les processeurs spécialisés.

La carte *GESMPU-2A* est architecturée autour du microprocesseur 8 bits 6809 de Motorola. Il est fabriqué en technologie MOS et se présente sous la forme d'un boîtier DIL, 40 broches et mono-tension. Son fonctionnement est rythmé par une horloge interne (500 Hz à 2kHz). Il se présente comme un produit dont l'architecture interne, les modes d'adressage et le jeu d'instructions en font un processeur orienté logiciel.

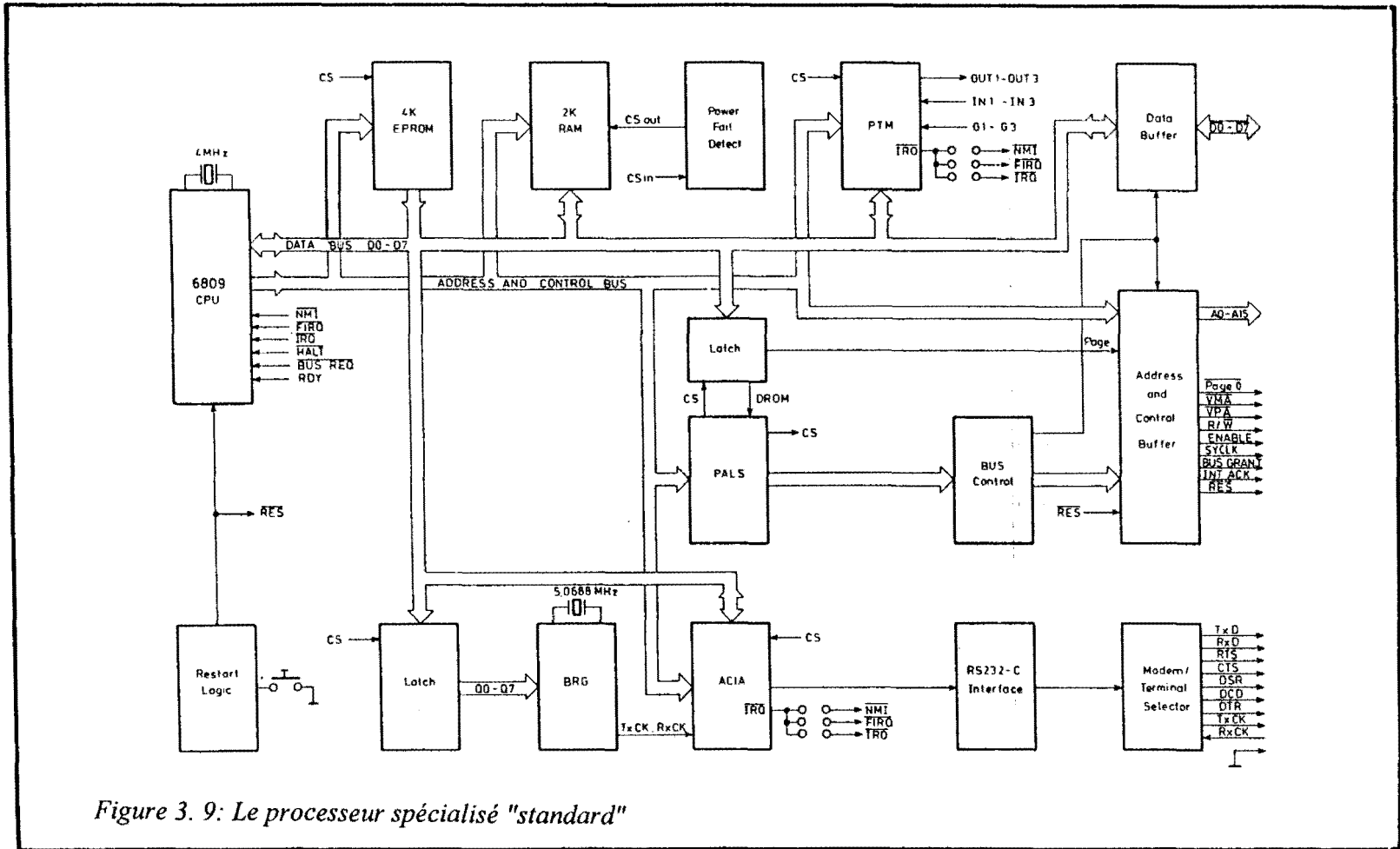


Figure 3. 9: Le processeur spécialisé "standard"

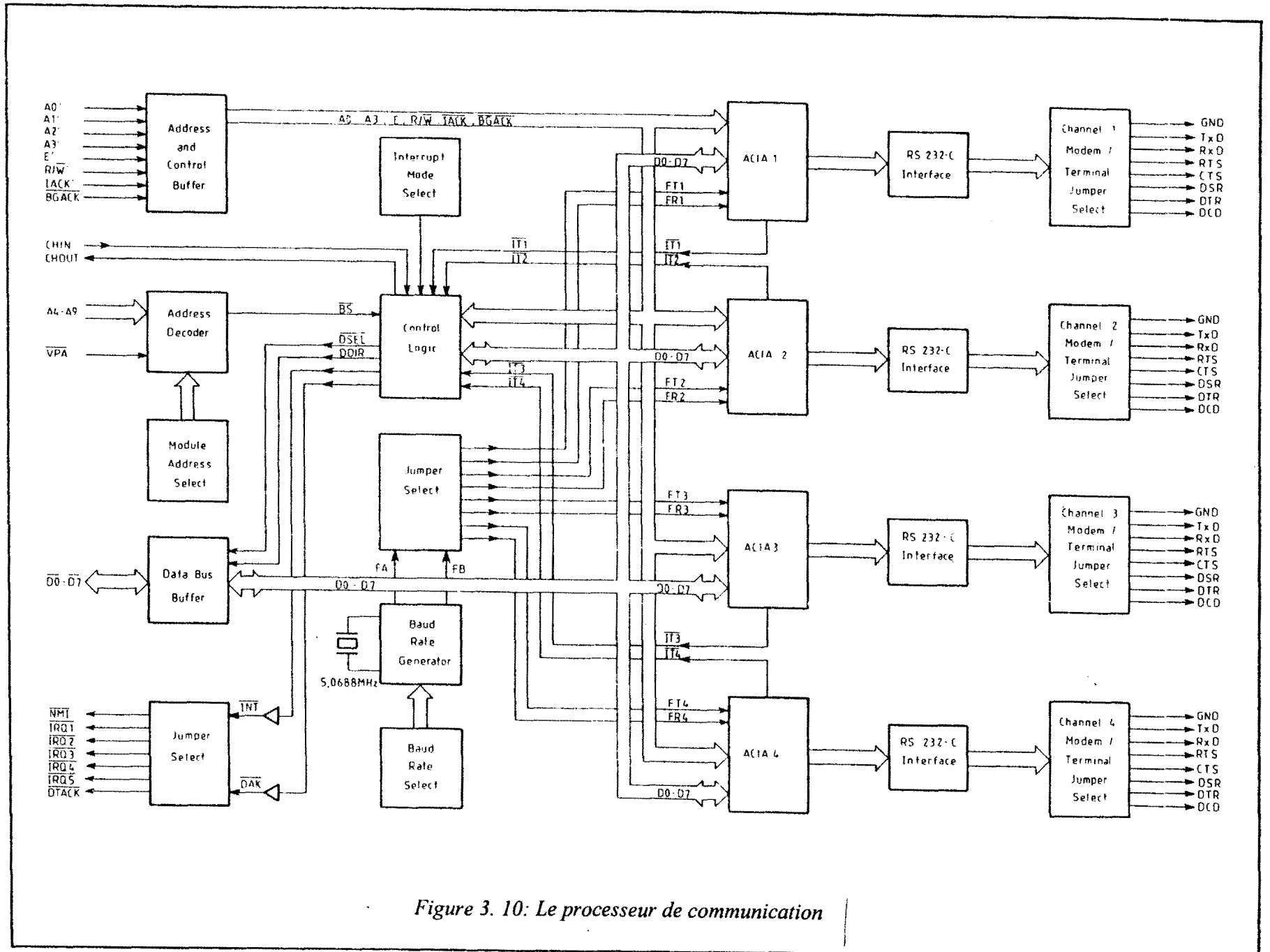


Figure 3. 10: Le processeur de communication

## **B. Le processeur de mesure**

L'acquisition des données par le processeur de mesure se fait suivant une période de 10 secondes. Chaque dix (10) secondes il reçoit une interruption déclenchée par un temporisateur programmable.

Après sa reconnaissance, le microprocesseur acquitte le temporisateur et positionne un jeton dans une case mémoire. Il vient tirer le jeton et effectue la mesure des paramètres qu'il mémorise. A la fin de chaque série de mesures, le processeur envoie une interruption vers le processeur de communication pour un transfert des données déjà mémorisées.

## **C. Le processeur de communication**

L'objectif visé avec ce processeur est:

- d'assurer une liaison série pour l'échange de données entre les différents processeurs,
- de gérer toutes les interruptions en provenance des autres processeurs de la structure pour la demande de transfert des informations.

Pour ce faire, une carte série asynchrone *GESSIO-2* complète sa configuration (Figure 3.10). Elle permet au processeur de communication de pouvoir gérer jusqu'à 4 lignes supplémentaires.

## **D. Processeur d'optimisation**

L'optimisation de puissance consiste à faire fonctionner le générateur à son point optimal quelques soient les variations météorologiques. Ce processeur utilise les paramètres courant et tension pour en déduire la puissance, puis il agit sur la commande de l'adaptateur d'impédance associé. Le processeur d'optimisation reçoit ces paramètres par la liaison série RS-232 après une demande d'interruption. Il élabore alors la commande numérique du convertisseur statique du générateur, signal à rapport cyclique variable réalisé à partir d'un temporisateur programmable *MC6840*.

Une autre sortie de ce temporisateur demande une interruption au processeur de communication pour l'envoi des paramètres d'optimisation. Afin d'élaborer la commande du convertisseur, nous avons utilisé deux compteurs montés en cascade:

- le premier est programmé en astable,
- le second est synchronisé sur l'astable et programmé en mode monostable, permet de faire varier le rapport cyclique par une simple écriture dans un registre de mots modulant la largeur des impulsions.

### **E. Processeur de transfert d'énergie**

Son rôle est de transférer la totalité de la puissance du générateur en assurant à tout instant une valeur de courant nulle dans les batteries afin de garantir le fonctionnement en tampon de celles-ci.

Ce processeur reçoit du processeur de communication, les paramètres nécessaires pour accomplir sa tâche par une liaison série RS 232.

Le processeur de transfert gère le signal de commande du convertisseur statique de couplage des batteries à la charge variable en élaborant un rapport cyclique modulé par le logiciel associé.

### **F. Le microordinateur superviseur**

Il est optionnel. Connecté, il assure une conduite conviviale de l'ensemble des opérations sur la station notamment :

- l'affichage sur un tableau de bord de tous les paramètres en provenance du processus temps réel,
- la visualisation de graphes (évolution en temps réel),
- l'enrichissement d'un historique (base de données),
- la réalisation de commandes.

### 3.4 - REALISATION LOGICIELLE DE LA STRUCTURE MULTIPROCESSEURS

#### 3.4.1 - Procédure de mesure

La tâche principale associée au processeur de mesure est l'acquisition des paramètres de la microcentrale dont l'organigramme est représenté par la figure 3.11.

Ce programme, qui s'exécute en 80ms comprend 5 modules:

- initialisation des périphériques (PIA - ACIA - TIMER),
- sélection de la voie de mesure par le multiplexeur,
- échantillonnage et conversion analogique-numérique,
- mémorisation,
- transfert.

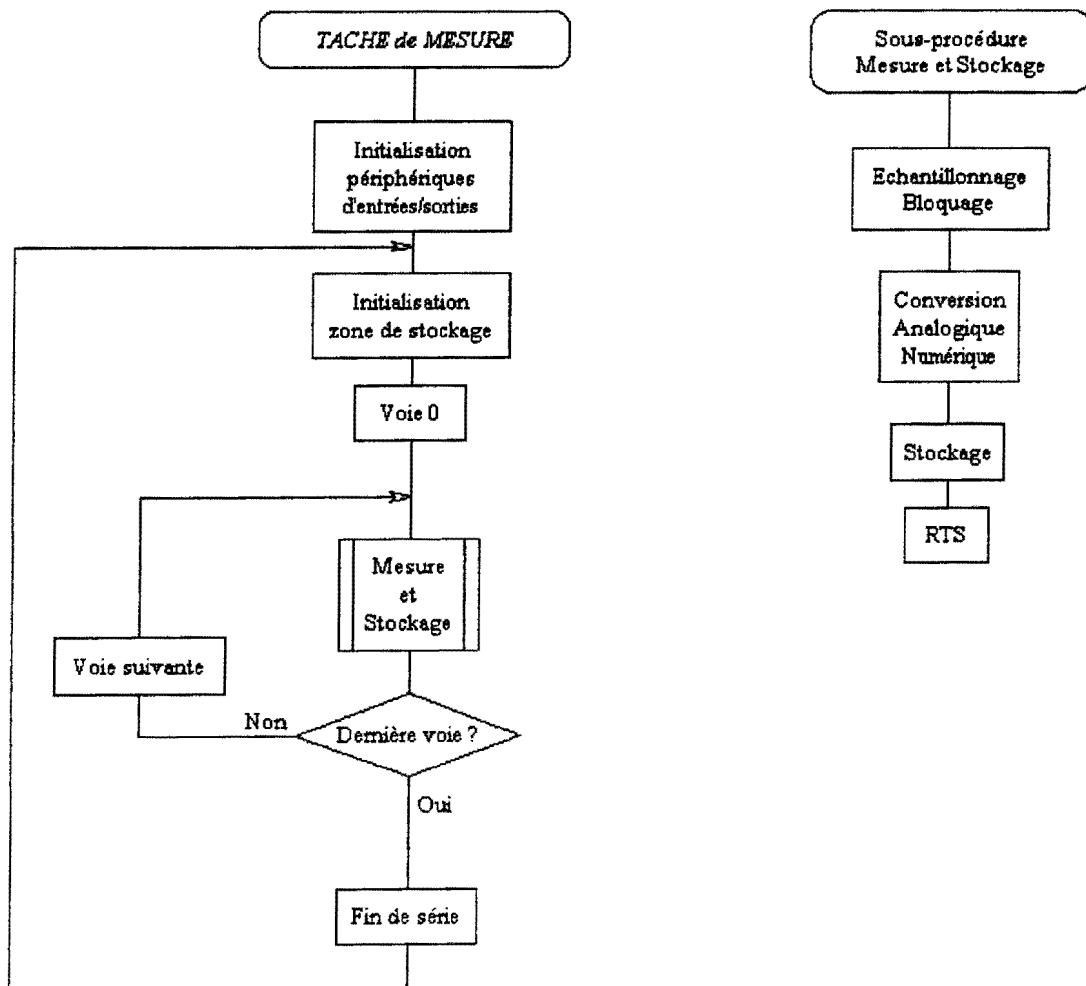


Figure 3. 11: Organigramme de la procédure de mesure

### 3.4.2 - Procédure de communication

Le processeur de communication est au centre du dialogue avec tous les autres processeurs spécialisés ainsi qu'avec le microordinateur.

Il comporte 3 modules principaux (Figure 3.12):

- un module de reconnaissance et d'acquiescement des interruptions. Les interruptions reconnues peuvent être exécutées immédiatement ou différées, en fonction de leur niveau de priorité,
- un module d'émission de données stockées en mémoire,
- un module de réception et mémorisation de données.

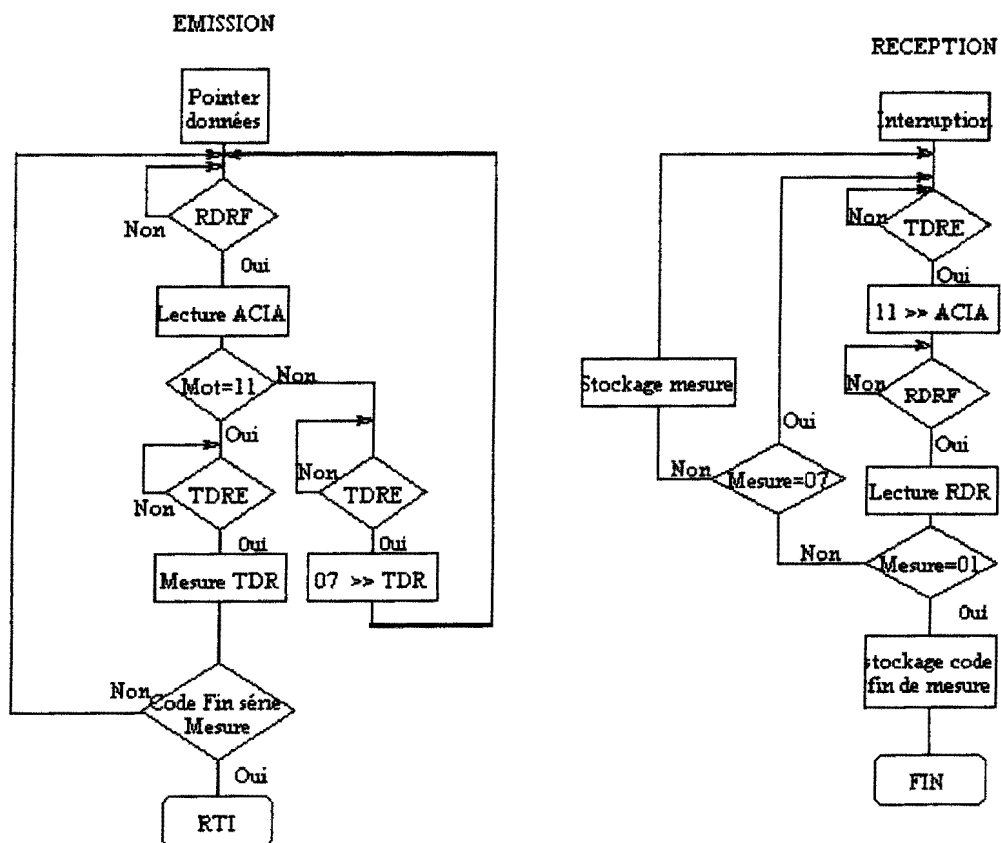


Figure 3. 12: Organigramme de la procédure de communication

### 3.4.3 - Procédure d'optimisation

Des études [26], [59] ont montré que, pour faire fonctionner un générateur photovoltaïque ou éolien à sa puissance maximale, il faut chercher le rapport cyclique correspondant à cette puissance quelques soient les perturbations (ensoleillement, vent, température, vieillissement). Pour un éclairement donné, la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque est maximale lorsqu'il fonctionne à sa tension optimale  $V_{opt}$ . Il faut donc adopter une stratégie de commande qui asservisse la tension du générateur à  $V_{opt}$ .

En première approximation, quelque soit l'éclairement, on considère une plage de tension comprise entre  $V_{min}$  et  $V_{max}$  symétrique par rapport à  $V_{opt}$ , contenant les maxima de puissance. Cette stratégie de commande par fourchette de tension (Figure 3.13) présente l'avantage d'être simple, facile à mettre en oeuvre et donne des résultats satisfaisants. L'optimisation est d'autant plus précise que la fourchette est petite.

A tout moment, le rapport cyclique ( $R_f$ ) délivré ramène la tension du générateur  $V_g$  dans la fourchette.

- lorsque  $V_g < V_{min}$ , le rapport cyclique est décrétementé, ce qui a pour effet d'augmenter la tension du générateur pour l'amener dans la fourchette d'optimisation.
- lorsque  $V_g > V_{max}$ , le rapport cyclique est incrémenté pour diminuer la tension. Le résultat est un repositionnement de la tension  $V_g$  dans la fourchette.

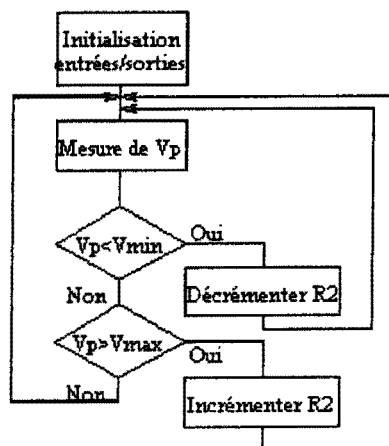


Figure 3. 13: Optimisation du générateur photovoltaïque



### 3.3.4 - Procédure de transfert d'énergie

Le transfert d'énergie d'un générateur à sa charge est maximal lorsque toute la puissance produite par le générateur est entièrement consommée par celle-ci.

Si on considère le fonctionnement de l'ensemble générateur - batterie - charge (Figure 3.14), ce type de transfert dépend essentiellement de la valeur du courant  $I_b$  qui traverse la batterie.

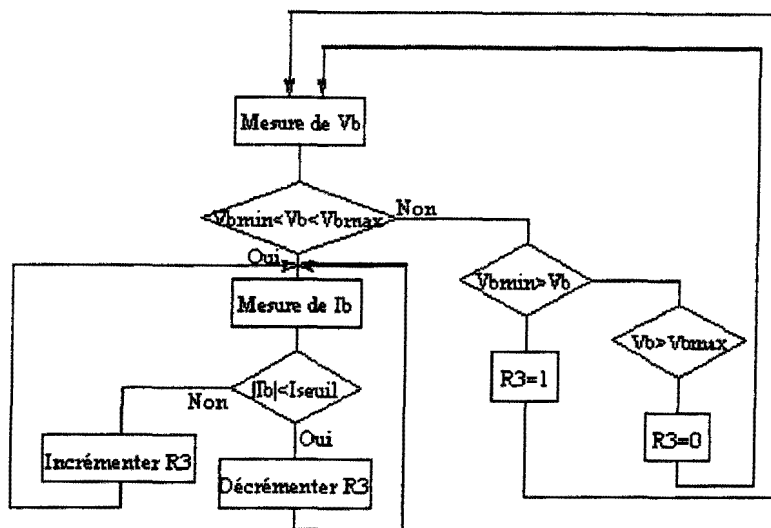


Figure 3. 14: Configuration du transfert d'énergie

- si  $I_g - I_{ch} > 0$  le générateur charge la batterie en même temps qu'il sert de source au récepteur,
- si  $I_g - I_{ch} < 0$  la batterie est en appoint tant que sa capacité le lui permet,
- lorsque  $I_g - I_{ch} = I_{seuil}$  (courant résiduel), la charge de la batterie est achevée. Il faut évacuer l'excédent d'énergie à la charge; c'est le fonctionnement tampon. L'idéal est d'obtenir  $I_{seuil}=0$ .

Le contrôle de l'état de charge de la batterie est effectué par la mesure de sa tension. Pour des batteries 48 volts, la tension est maintenue dans la fourchette 48V +/- 5 %.

Lorsque la tension batterie atteint la valeur maximale, on incrémente le rapport cyclique  $R_2$  pour augmenter le courant dans la charge. Cet appel de puissance entraîne une diminution progressive du courant dans la batterie jusqu'à son annulation complète. A ce moment, la quantité d'énergie fournie par le générateur est égale à celle reçue par la charge.

### 3.4.5 - Supervision

Le système de supervision est optionnelle et indépendante vis à vis du dispositif de puissance dont la vocation est de produire de l'énergie (Figure 3.15).

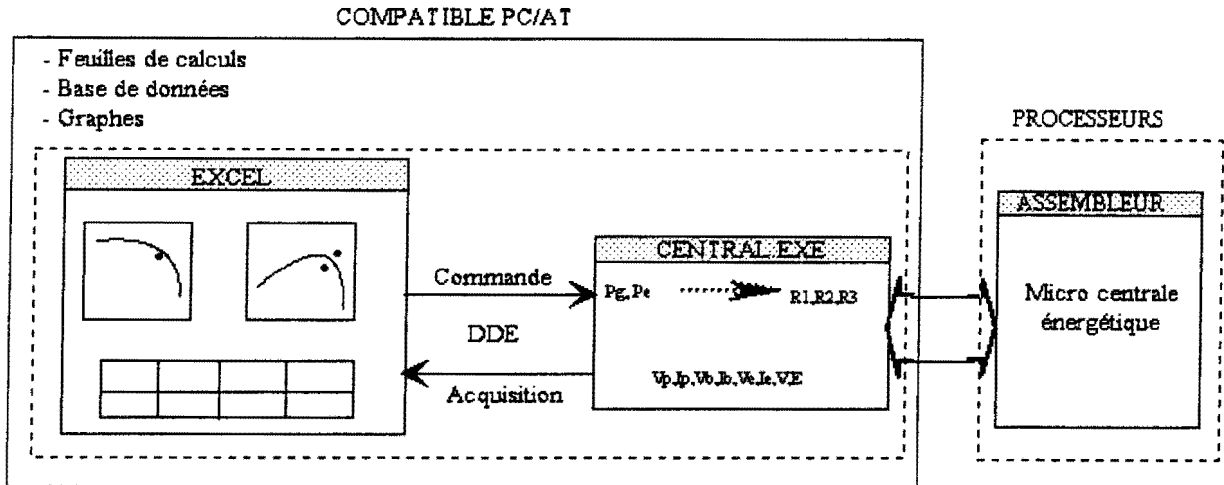


Figure 3.15: Principe de la supervision

#### A. Contraintes techniques

La manipulation de puissance est un processus temps réel muni de sa commande qui supporte les contraintes temps réel les plus sévères. Elle permet des échanges d'informations en moyenne toutes les deux millisecondes (entre 1 et 10 millisecondes).

Le système de supervision développé sous l'environnement graphique Windows, n'a pas de contraintes temps réel au niveau de la conduite du processus. Mais simplement des contraintes de vitesse d'affichage vis à vis de l'utilisateur. On peut parler à ce niveau de "temps réel humain". [60]

Ce "temps réel humain" peut se définir en fonction de la vitesse de défilement des images au cinéma qui est de 24 images par seconde. L'affichage des informations sur le graphe peut se ramener à une vitesse de 4 images par seconde ce qui permet d'avoir un temps de réaction compatible avec une perception humaine de la mise à jour.

La séparation du processus industriel et de l'interface utilisateur graphique crée la nécessité de définir un dialogue entre les deux. Ce dialogue sera défini en respectant les normes de communication existantes, dans le cas présent la norme RS232 sur l'interface série. Le dialogue servira de support à un échange d'informations, notamment les paramètres de conduite du dispositif de puissance.

Dans les informations échangées, on distingue les informations envoyées et les informations reçues.

Les informations envoyées sont les suivantes:

- rapports cycliques 4 octets.
- des puissances calculées 4 octets
- des informations complémentaires 2 octets.

Le nombre d'octets à envoyer est donc de 10.

Les informations reçues sont les suivantes:

- la tension  $V_g$  1 octet.
- le courant  $I_g$  1 octet.
- la tension  $U_b$  1 octet.
- le courant  $I_b$  1 octet.
- la tension  $V_e$  1 octet.
- le courant  $I_e$  1 octet.
- la vitesse de rotation l'aérogénérateur 1 octet.
- la vitesse du vent 1 octet.
- la température 1 octet.
- l'ensoleillement 1 octet.

Le nombre d'octets à recevoir est de 10.

## **B. Architecture logicielle de la supervision**

### *L'apport de WINDOWS*

Le succès de Windows dans le secteur de la bureautique n'est plus à démontrer. En revanche, le monde industriel commence à s'y intéresser. Son ergonomie, mais surtout son aptitude à faire communiquer des applications répondent aux exigences actuelles de l'industrie et du même coup accélèrent sa pénétration dans ce secteur.

En pratiquant Windows on retient d'abord son aspect ergonomique, sa convivialité. Dans l'industrie, l'opérateur qui conduit un procédé industriel et pour qui la connaissance d'un système d'exploitation comme MS-DOS est généralement fastidieuse, adopte aussitôt le pilotage de ses machines à partir d'un outil aussi intuitif.

La présentation graphique, si elle n'en reste pas moins une de ses qualités, masque les vraies richesses de Windows pour l'utilisateur industriel parmi lesquelles:

- l'indépendance du matériel,
- l'espace mémoire supporté,
- l'exécution d'applications multiples,
- la communication "DDE" .
- les liens "OLE"

Avant Windows, le développeur de logiciels devait prévoir au sein de ses programmes les "routines" nécessaires afin qu'ils s'adaptent à la diversité du matériel qu'il souhaitait supporter. Ainsi, pour chaque carte graphique ou imprimante présente sur le marché, le concepteur devait mettre à jour son produit pour qu'il suive les évolutions de ces matériels. L'utilisateur devait s'assurer de l'adéquation entre son logiciel et son matériel.

Windows constitue un changement sur ce plan, puisqu'il introduit la notion d'indépendance des logiciels par rapport au matériel.

Dans le domaine de la conduite de processus industriels, cet avantage s'applique à trois éléments importants des systèmes:

- l'affichage,

- le dispositif d'entrée,
- l'interface série.

La figure 3.17 présente le synoptique résumant les fonctions dévolues au superviseur tel que nous l'avons implémenté. Deux types d'exploitation y sont réalisées:

- Exploitation en temps réel:

- acquisition (liaison PROCESS- "CENTRAL" par RS232)
- Tableau de bord (liaison "CENTRAL"-EXCEL par DDE)
- gestion de la sécurité (liaison "CENTRAL"-PROCESS par RS232)
- délestage

- Exploitation en différée:

- Base de donnée du fichier historique sous EXCEL
- choix et paramétrage du port de communication
- Lanceur de macro de calcul de fiabilité.

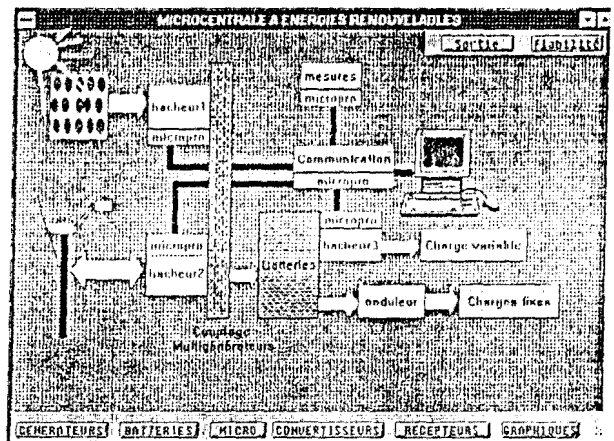
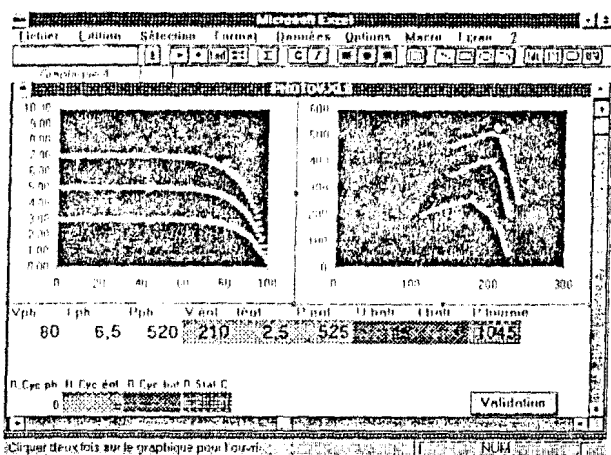


Figure 3. 16: Supervision sous Excel

Les communications inter-applications sont gérées par le protocole de communication "DDE" (Data Dynamic Exchange) de Windows. DDE est capable de créer des liens par une procédure automatique ne nécessitant pas une intervention de l'opérateur.

C'est un protocole client-serveur défini par Windows pour faire communiquer deux applications. Un serveur est une application qui peut fournir des données ou des services, par exemple un logiciel de communication connecté à une base de données lui envoyant régulièrement des mises à jour, ou encore une application connectée à un processus temps réel, ici "CENTRAL".

Un client est une application qui souhaite obtenir des données sur un ou plusieurs sujets pour les traiter ou les afficher. Il peut être un tableur, un logiciel de traitement de texte ou d'affichage graphique.

DDE définit un protocole entre le client et le serveur. Par exemple, EXCEL peut être client DDE: On indique, dans des cases de ce tableur, que des informations en provenance d'un serveur vont y être rangées, s'afficher automatiquement dans les cases désignées et rafraîchies régulièrement.

Ce protocole logiciel définit complètement les échanges entre le client et le serveur à travers ses neuf messages. Il s'apparente au protocole matériel RS232.

#### *La base de données temps réel:*

Les applicatifs standards préfèrent généralement traiter des données qui ont été préalablement transcodées, mises à l'échelle, filtrées. Cette tâche est intégrée au sein d'un applicatif d'acquisition spécifique. Après transfert par DDE des données, la base de données temps réel a pour mission l'archivage des données et la visualisation en temps réel de l'évolution des graphes.

## B. Applicatifs spécifiques

Le cahier des charges de la supervision d'un processus industriel fait l'objet de nombreuses limitations pour un développeur désireux d'utiliser un logiciel standard. Ce logiciel devra, à lui seul, résoudre la totalité des fonctionnalités requises.

L'utilisateur confronté à l'évolution de son processus est dans une situation difficile si le produit choisi antérieurement s'avère incapable de s'adapter aux exigences nouvelles de son application.

Dans les deux cas, l'idéal consisterait à pouvoir construire son application à partir d'éléments modulaires qui pourraient s'ajouter ou s'échanger. (Figure 3.17)

Dans ce travail nous avons réalisé l'application "CENTRAL" dont le rôle principal est de dialoguer avec le processus temps réel à travers une liaison RS232, de calibrer les informations et de les véhiculer vers des applicatifs standards Windows par liaison DDE.

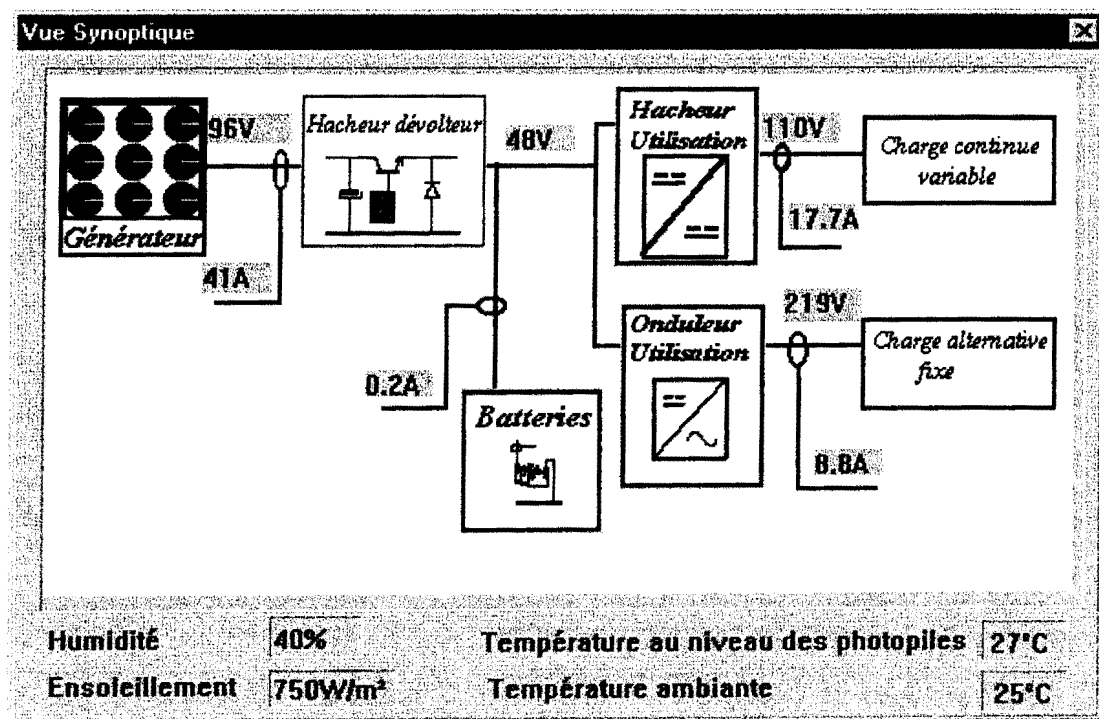


Figure 3. 17: Vue synoptique de l'application spécifique de supervision

### 3.5 - CONCLUSION

La microcentrale ainsi réalisée est un prototype de laboratoire. L'utilisation des techniques de pointe et sa conception modulaire en accroissent la fiabilité et permettent une extension aisée. Chaque module a son autonomie de fonctionnement. En cas d'anomalie, le fonctionnement global de la microcentrale n'est que partiellement perturbé.

La spécification des tâches par les réseaux de Pétri et une programmation structurée, ont permis d'optimiser l'exécution des différents programmes.

A l'aide d'algorithmes appropriés, les commandes élaborées par les processeurs à partir des paramètres mesurés, sont appliquées aux convertisseurs statiques. Cette stratégie de commande autorise un fonctionnement optimal des dispositifs.

D'autre part, l'un des principaux buts visés en mettant en oeuvre une supervision sous Windows, était de procurer un accès visuel à toutes les applications à la fois. Dans cet environnement multitâches, nous avons donné à l'utilisateur la possibilité d'être en "conversation" avec toutes les applications. Au delà de cette possibilité, certaines applications utilisent le plein écran, alors que d'autres attendent en "background".

Lorsque notre application va générer un volume important de données statistiques, l'utilisation d'une base de données telle que SQL-Windows (*Gupta Technologies*) ou *Superbase (Micro-Applications)*, peut assurer en complément la connectivité vers le niveau des "mainframes" (gros système) car les applications de communication avec les grands systèmes sont assez nombreuses sous Windows.

Un produit tel que Dynacom (*Altitude Technologies*) résoudra la mise en relation de notre système avec un calculateur central connecté en X25 ou autre standard répandu. Les applications Windows supportant le protocole DDE sont nombreuses. Si la bureautique a adopté Windows pour l'esthétique et le confort qu'il apporte, l'industrie commence à l'adopter pour la puissance des concepts qu'il intègre.

La modularité offerte par le développement permet une ouverture réelle de la supervision vers l'intégration de nouvelles fonctionnalités: accès aux réseaux, systèmes experts, ....



## Liste des symboles

$T_e$  : période d'échantillonnage

$T_a$  : temps d'acquisition

$M$  : marquage dans le réseau de Petri

$m(p_i)$  : nombres de jetons utilisés dans le réseau de Petri

$I_g$  : courant de sortie du générateur photovoltaïque

$V_g$  : tension de sortie du générateur photovoltaïque

$V_{opt}$  : tension optimale du générateur

$V_{min}$  : limite inférieure de la plage de tension contenant les maxima de puissance (générateur photovoltaïque)

$V_{max}$  : limite supérieure de la plage de tension contenant les maxima de puissance (générateur photovoltaïque)

$R_i$  : commande de l'adaptation d'impédance

$I_b$  : courant dans la batterie d'accumulateurs

$U_b$  : tension aux bornes de la batterie d'accumulateurs

$I_{ch}$  : courant dans la charge

$I_g$  : courant de sortie de l'éolienne

$V_g$  : tension de sortie de l'éolienne

## **CHAPITRE 4**

**SURETE DE FONCTIONNEMENT**

**ET**

**MAINTENANCE**

**D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE HYBRIDE**

## 4.1 - INTRODUCTION

Pour définir un niveau de fiabilité ou contrôler si la mission assignée à l'équipement a été atteinte, il est nécessaire de disposer d'outils permettant de maîtriser les paramètres qui entrent dans la fonction de fiabilité: taux de défaillances, taux de réparation, durée de vie des constituants, moyenne des temps de maintenance, ... etc.

La modélisation mathématique dans ce domaine permet de quantifier ces paramètres. Ces facteurs, pris en compte aux différentes étapes de la vie d'un dispositif, concourent à la maîtrise de sa fiabilité. [61]

Ces analyses s'opèrent en deux phases:

- une première phase qui correspond à la partie conception et développement. C'est la phase prévisionnelle où l'utilisation des modèles mathématiques et d'informations tirées de banques de données vont permettre de concevoir pour un niveau de fiabilité spécifié.
- la seconde phase est relative à la vie opérationnelle. C'est durant cette phase que s'effectue la mesure de la fiabilité au niveau de l'utilisation, ainsi que la prise en compte d'informations permettant des actions de maintenance (correctives, préventives).

Pour faire ces analyses, il convient de rappeler un certain nombre d'outils mathématiques utilisés en sûreté de fonctionnement (*SDF*).

## 4.2 - RAPPELS SUR LES MATHÉMATIQUES UTILISÉES EN SÛRETÉ DE FONCTIONNEMENT

### 4.2.1 - Relations fondamentales en sûreté de fonctionnement

#### A. Défaillance instantanée et lois de fiabilité

Par hypothèse on pose:

$$\lambda(t)dt = \frac{F(t+dt) - F(t)}{R(t)} \quad (\text{Eq. 4. 1})$$

et :

$$\lambda(t)dt = \frac{dF(t)}{1 - F(t)} \quad (\text{Eq. 4. 2})$$

$F(t)$  et  $R(t)$  sont respectivement la fonction cumulée de défaillance et la fonction fiabilité, que l'on cherche à connaître à partir de  $\lambda(t)$ . Pour cela, on intègre les deux membres de l'expression précédente, avec comme condition initiale  $F_{(t=0)} = 0$  on obtient:

$$e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} = 1 - F(t) \quad (\text{Eq. 4. 3})$$

d'où :

$$\begin{aligned} R(t) &= e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \\ F(t) &= 1 - e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \\ f(t) &= \lambda(t) e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 4. 4})$$

On a ici les expressions les plus générales liant les lois de fiabilité et le taux instantané de défaillance. [62]

### B. MTBF (Moyenne des Temps de Bon Fonctionnement)

C'est un indicateur de fiabilité. Elle est liée aux lois de fiabilité par le taux de défaillance. La *MTBF* est l'espérance mathématique des défaillances.

$$MTBF = \int_{-\infty}^{+\infty} t \cdot f(t) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} R(t) dt \quad (\text{Eq. 4. 5})$$

### C. Cas d'un taux de défaillance $\lambda(t)$ constant, loi exponentielle

Les composants électroniques dans leur période de maturité ont généralement un taux de défaillance constant.

On en déduit le calcul de fiabilité d'un composant à tout moment de sa vie, ainsi que la *MTBF*.

- *Exemple*

$$\text{si } \lambda = 2 \cdot 10^{-6} \frac{\text{déf}}{h} \text{ et } t = 500h:$$

$$R_{(t=500)} = e^{-2 \cdot 10^{-6} \cdot 500} = 0,999$$

Sa *MTBF*:

$$E(t) = \int_0^t e^{-\lambda t} = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{2 \cdot 10^{-6}} = 5 \cdot 10^5 h$$

Dans la mesure où l'on connaît  $\lambda$ , le calcul de la fonction fiabilité est aisé. Mais il n'en est pas de même pour la moyenne des temps de bon fonctionnement.

D'autre part, il est rare que l'on ait un modèle simple représentant le taux de défaillance. Il est alors conseillé de trouver directement la fonction fiabilité en essayant plusieurs modèles. La section qui suit présente l'essentiel des modèles mathématiques utilisés en *SDF*.

## 4.3 - MODELES MATHEMATIQUES

Les principaux modèles utilisés en *SDF* sont présentés sur le tableau 4.1. [63]

Ces modèles utilisent deux types de lois de distribution qu'il convient de manipuler selon le domaine d'application.

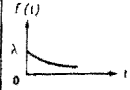
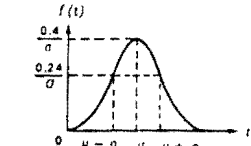
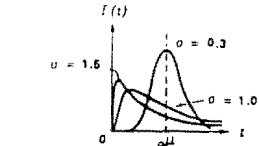
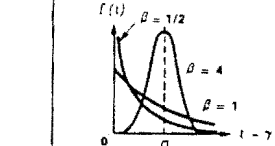
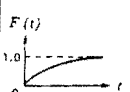
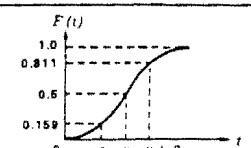
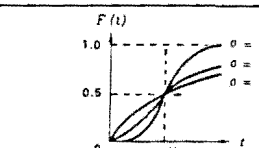
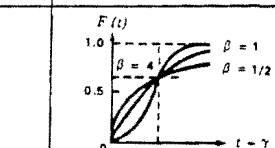
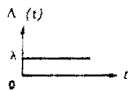
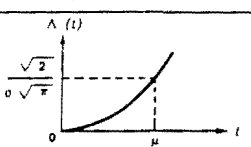
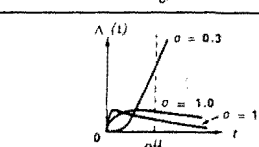
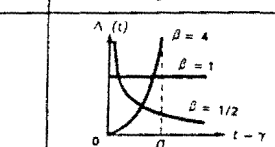
### 4.3.1 - Lois discrètes

Elles s'appliquent à l'étude des phénomènes rares, tels que accidents, pannes, défauts de fabrication...

Elles postulent que la probabilité pour qu'un événement se produise est d'autant plus vraie que la population concernée est grande et le nombre d'événements est petit.

Parmi les lois discrètes citons les lois de Poisson et Binomiale qui trouvent leurs applications dans les essais.

Tableau 4. 1: Tableau des principaux modèles utilisés en SDF

Loi aléatoire	Application à la fiabilité	Loi exponentielle	Loi normale	Loi log-normale	Loi de Weibull
Densité de probabilité $f(t)$	Densité de défaillance $U(t)$	$\lambda \exp [-\lambda t]$	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{t-\mu}{\sigma} \right)^2 \right]$	$\frac{1}{\sigma t\sqrt{2\pi}} \left[ -\frac{1}{2} (\log t - \mu)^2 / \sigma^2 \right]$	$\frac{\beta(t-\gamma)^{\beta-1}}{\sigma^\beta} \exp \left[ -\left( \frac{t-\gamma}{\sigma} \right)^\beta \right]$
Fonction de répartition $F(t)$	Défiabilité $R(t)$	$1 - e^{-\lambda t}$	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp \left[ -(t-\mu)^2 / 2\sigma^2 \right] dt$	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t \frac{1}{t} \exp \left[ -\frac{1}{2} (\log t - \mu)^2 / \sigma^2 \right] dt$	$1 - \exp \left[ -\left( \frac{t-\gamma}{\sigma} \right)^\beta \right]$
-	Taux de défaillance $\Lambda(t)$	$\lambda$	$\frac{U(t)}{R(t)}$	$\frac{U(t)}{R(t)}$	$\frac{\beta(t-\gamma)^{\beta-1}}{\sigma^\beta}$
Moyenne	MTTF	$1/\lambda$	$\mu$	$\exp \left[ \left( \mu + \frac{1}{2} \sigma^2 \right) \right]$	$\gamma + \sigma \Gamma \left( \frac{1+\beta}{\beta} \right)$
$f(t) = U(t)$					
$F(t) = \bar{R}(t)$					
$\Lambda(t)$					

### 4.3.2 - Lois continues

#### Loi de Weibull

C'est un modèle bien adapté à l'étude statistique [64] des défaillances. L'étude par la loi de *Weibull* des dispositifs permet:

- de trouver la loi des durées de vie,
- l'expression du taux de défaillance.

Ainsi, la fonction fiabilité permet de définir les périodes de maintenance avant que le dispositif ne tombe en panne. Notons toutefois, que cette méthode n'est applicable que si l'on est en possession de données statistiques importantes sur un dispositif déjà opérationnel. Les formules associées sont données dans le tableau.

#### Loi exponentielle

C'est aussi une loi continue et une des seules qui permette de réaliser facilement des calculs. Par hypothèse, elle s'applique pendant la période à taux de défaillance constant. La fiabilité est la probabilité de survie et donc le zéro de défaillance:

La densité de probabilité est:

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t} \quad \lambda > 0 \quad t > 0 \quad (\text{Eq. 4. 6})$$

où  $\lambda$  est une constante et  $t$  le temps.

La fonction de répartition est:

$$F(t) = 1 - \lambda \cdot e^{-\lambda t}$$
$$\text{moyenne} = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{Eq. 4. 7})$$
$$\text{variance} = \frac{1}{\lambda^2}$$

Les formules et allures associées sont aussi données dans le tableau 4.1.

La loi exponentielle est très utilisée pour caractériser la période durant laquelle le taux de défaillance est constant; elle décrit alors l'intervalle de temps entre deux défaillances.

#### Lois normale et log-normale

Les formules associées à ces lois figurent dans le tableau 4.1. La loi normale ou distribution de *Laplace-Gauss* s'applique dans le cas où les durées de vie des dispositifs sont aléatoires et

varient autour d'une valeur centrale. Les causes de défaillances sont essentiellement dues à l'usure. Elle trouve plutôt son terrain d'application dans les systèmes mécaniques.

La loi *log-normale* est utilisée lorsque le logarithme de la durée de vie du dispositif suit une distribution normale. Elle est de ce fait utilisée dans la technique des essais accélérés.

## 4.4 - OUTILS DE LA SURETE DE FONCTIONNEMENT

Afin d'aider l'analyste à réaliser un modèle de sûreté de fonctionnement, des méthodes ont été mises au point. Les principales sont:

- l'Analyse Préliminaire des Dangers (*APD*), [65]
- l'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (*AMDE*), [66]
- la Méthode du Diagramme de Succès (*MDS*), [67]
- la Méthode de la Table de Vérité (*MTV*),
- la Méthode de l'Arbre des Causes (*MAC*), [68]
- la Méthode des Combinaisons de Pannes Résumées (*MCPR*), [69]
- la Méthode de l'Arbre des Conséquences (*MACQ*), [70]
- la Méthode du Diagramme Causes-Conséquences (*MDCC*),
- la Méthode de l'Espace des Etats (*MEE*). [71]

## 4.5 - RESULTATS SUR LA FIABILITE DES SYSTEMES

En termes de fiabilité, un système est une combinaison d'organes agencés en série ou en parallèle.

### 4.5.1 Système série

$n$  éléments sont en série, lorsqu'il suffit qu'un seul d'entre eux soit en panne pour rendre tout le système défaillant (Figure 4.1). On démontre que la loi de fiabilité équivalente au système série s'écrit:

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (\text{Eq. 4. 8})$$



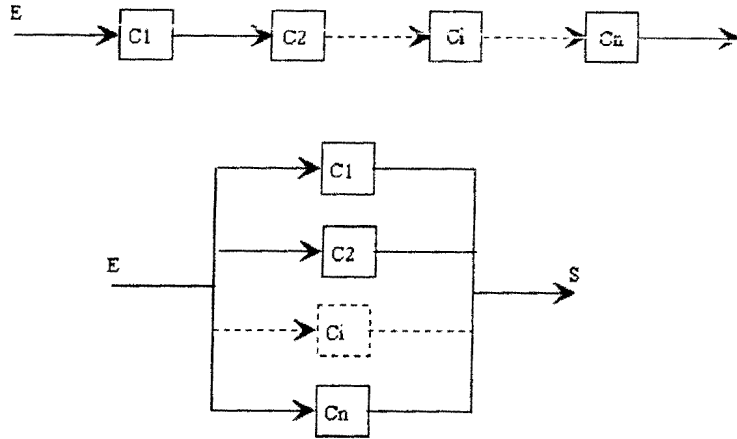


Figure 4. 1: Diagrammes série et parallèle

#### 4.5.2 Systèmes parallèles simples

n éléments sont en parallèle, lorsqu'il suffit qu'un seul d'entre eux fonctionne pour que tout le système fonctionne (Figure 4.1). On démontre que la loi de fiabilité équivalente au système parallèle simple s'écrit:

$$R_p(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)) \quad (\text{Eq. 4. 9})$$

#### 4.5.3 Systèmes parallèles particuliers

Il existe deux autres types de systèmes parallèles (les systèmes à redondances passives et les systèmes à redondances actives partielles), dans lesquels un ou plusieurs éléments sont en fonctionnement alors que les autres sont déconnectés du système. Ce type de système nécessite un élément de commutation dont le rôle est de déconnecter du système l'élément défaillant pour le remplacer par un élément sain.

L'introduction des redondances augmente l'investissement (puisqu'on achète de nouveaux éléments). Il faut donc agir sur les tronçons dont les *MTBF* sont critiques.

L'étude de notre application consiste essentiellement à proposer des méthodes de quantification de la fiabilité de notre dispositif, à identifier les tronçons les plus sensibles et à proposer les solutions visant à augmenter efficacement la *MTBF*.

Système	Diagramme	Fiabilité du système	
		Formule générale	Composants identiques et $\lambda$ constant
Composants en série	<p>Diagramme série</p>	$R = \prod_{i=1}^n r_i$	$R = e^{-n\lambda t} \quad \text{MTBF} = \frac{1}{n\lambda}$
Composants en parallèle ; redondance active	<p>Diagramme parallèle</p>	$R = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - r_i)$	$R = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^n \quad \text{MTBF} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda}}{n}$
Composants en série- parallèle ; redondance active	<p>Diagramme série-parallèle</p> <p>p branches ; <math>n_i</math> composants par branche</p>	$R = 1 - \prod_{i=1}^p (1 - \prod_{j=1}^{n_i} r_{ij})$	<p>p branches ; n composants par branche</p> $R = 1 - (1 - e^{-n\lambda t})^p$
Composants en parallèle- série ; redondance active	<p>Diagramme parallèle-série</p> <p>n étages ; <math>p_i</math> composants par étage</p>	$R = \prod_{i=1}^n \left[ 1 - \prod_{j=1}^{p_i} (1 - r_{ij}) \right]$	<p>n étages ; p branches per étage</p> $R = \left[ 1 - (1 - e^{-\lambda t})^p \right]^n$

Figure 4. 2: Fiabilité de configurations de base

## 4.6 - APPLICATION A LA MICROCENTRALE

### 4.6.1 Le système de Puissance

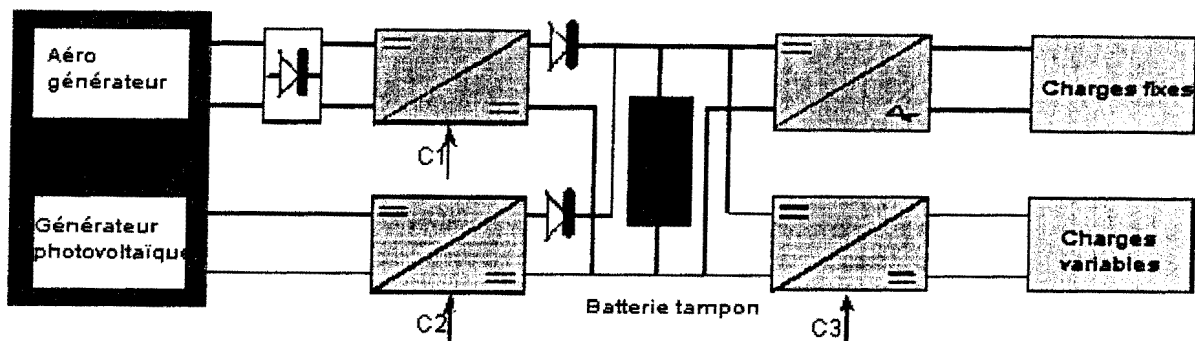


Figure 4. 3: Synoptique de la puissance

### 4.6.2 Le système de Commande

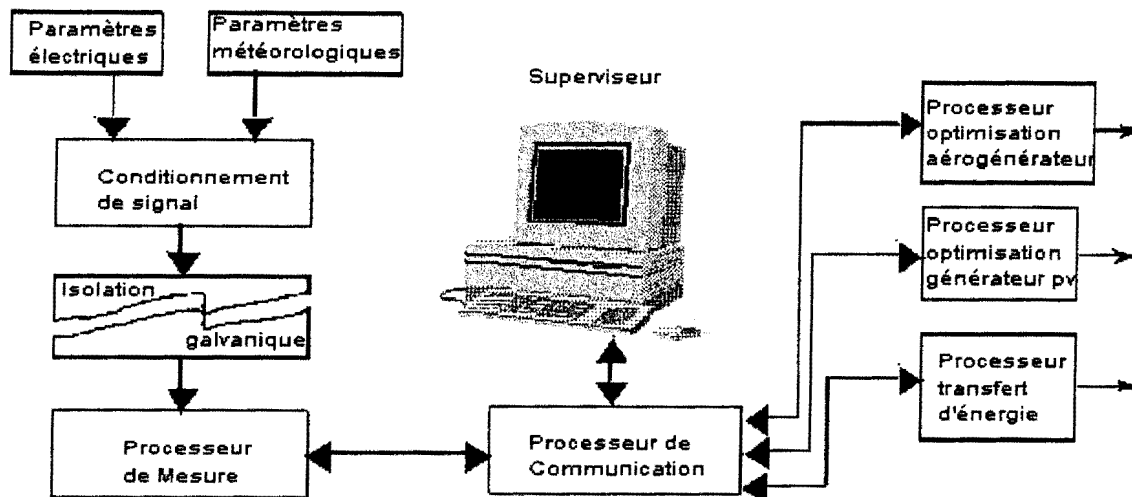


Figure 4. 4: Synoptique de la commande

2 cas ont été envisagés dans l'étude:

- 1) système multiprocesseur [72] décomposé en tâches exécutées chacune par un microprocesseur,
- 2) on cherche aussi à évaluer le gain de fiabilité si l'on souhaite faire évoluer la commande vers un noyau temps réel utilisant un microprocesseur unique multitâches. [73]

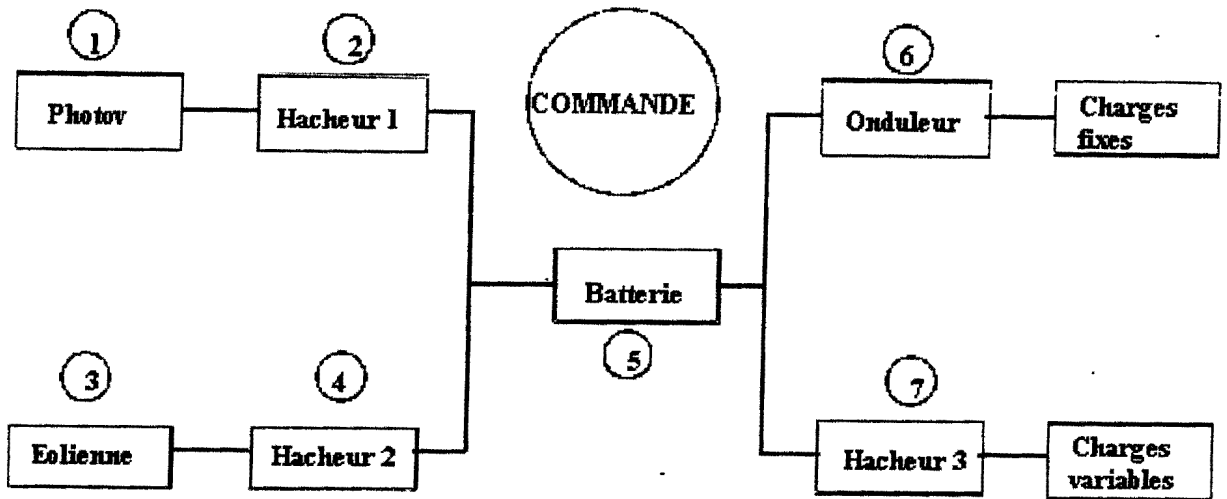


Figure 4. 5: Agencement du sous-système de puissance

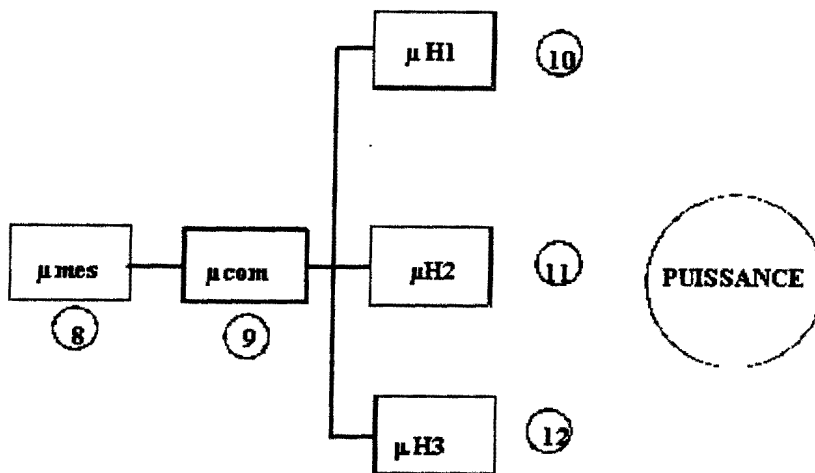


Figure 4. 6: Agencement du sous-système de commande

#### 4.6.3 Banques de données de fiabilité

L'étude théorique de fiabilité offre un intérêt dans la mesure où l'on est en présence de données spécifiques. Dans l'hypothèse où nous n'avons pas de données sur le système, nous nous référons, soit aux données des constructeurs (processeurs spécialisés...), soit à une banque de données internationale sur du matériel analogue. Il convient d'être prudent dans le maniement de ces données, qui ne peuvent que servir de support dans les calculs de notre fiabilité prévisionnelle.

Il existe des tables internationales concernant les composants électroniques [74] et les éléments mécaniques. Parmi ces tables, nous pouvons citer:

- En France:
  - *CNET (NPRD 1,2,3)*
  - *EDF*
- Aux Etats-Unis:
  - *Rome Air Development Center (RADC)*
  - *NASA, NAVY (FARADA)*
  - *AVCO Corporation*

Ces tables indiquent :

- la dénomination du matériel ou du composant,
- la *MTBF*,
- le taux de défaillance moyen avec l'hypothèse  $\lambda(t)$  constant,
- le patrimoine statistique,
- un coefficient du taux de défaillance selon l'environnement d'utilisation.

Les données utilisées dans les calculs qui suivent proviennent de sources différentes.

On distingue:

- Les renseignements récupérés d'un extrait de la banque de données *AVCO* qui nous permet le calcul de fiabilité d'assemblage électromécanique tel qu'une éolienne.
- Les renseignements récupérés chez les constructeurs qui tiennent à jour les données de fiabilité nous permet d'estimer les taux de défaillance d'éléments tels que: processeurs spécialisés, cartes électroniques de commande, etc. ...
- Les données que nous avons estimé compte tenu de notre expérience propre dans l'environnement particulier de développement nous permettant de fournir les taux concernant la défaillance du vent, du soleil, etc...

D'autres données ont pu difficilement et ponctuellement être collectées à l'*AFNOR*, *ASTE*, *EDF*, *AEROSPATIALE*. Au cours de notre étude, nous avons pu nous rendre compte de l'inaccessibilité et de la confidentialité autour des données relatives à la sûreté de fonctionnement dans les grandes entreprises.

<b>Elément</b>	<b>Fonction</b>	<b>Modes de défaillance</b>	<b>Causes de défaillance</b>	<b>Effets sur le système</b>
1	Convertir l'énergie solaire en énergie électrique	<ul style="list-style-type: none"> <li>- absence de soleil</li> <li>- vieillissement des cellules</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- la nuit</li> <li>- dégradation normale</li> </ul>	manque d'énergie pendant la journée
2	Hacheur; Optimise le transfert de l'énergie solaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>- défaillance des commutateurs statiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- surtension</li> <li>- surintensité</li> <li>- échauffement etc..</li> </ul>	manque d'énergie pendant la journée
3	Eolienne; Convertir l'énergie éolienne en énergie électrique	<ul style="list-style-type: none"> <li>- blocage des pales</li> <li>- emballement</li> <li>- manque de vent</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- mécanisme</li> <li>- trop de vent</li> <li>- selon les saisons</li> </ul>	manque d'énergie
4	Hacheur; Optimise le transfert de l'énergie éolienne	<ul style="list-style-type: none"> <li>- défaillance de l'alternateur</li> <li>- défaillance des commutateurs statiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- défaillance électrique</li> <li>- surtension</li> <li>- surintensité</li> <li>- échauffement, etc..</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- manque d'énergie la journée mais surtout la nuit</li> <li>- discontinuité de fourniture d'énergie</li> </ul>

5	Batterie: élément de couplage et de stockage minimum	<ul style="list-style-type: none"> <li>- absence de tension</li> <li>- vieillissement</li> <li>- ne tient pas la charge</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- éléments défectueux</li> <li>- dégradation normale</li> <li>- suite à une surcharge</li> </ul>	arrêt du système
6	Onduleur: alimentation des charges fonctionnant à tension fixe	<ul style="list-style-type: none"> <li>- défaillance des commutateurs statiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- surtension</li> <li>- surintensité</li> <li>- échauffement etc..</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- charges fixes non alimentées</li> <li>- augmentation de la puissance délivrée aux charges variables</li> </ul>
7	Hacheur; Gestion du transfert d'énergie vers les charges	<ul style="list-style-type: none"> <li>- défaillance des commutateurs statiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- surtension</li> <li>- surintensité</li> <li>- échauffement etc..</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- perte du contrôle de charge et décharge de la batterie</li> <li>- charges non alimentées</li> </ul>
8	Processeur de mesure	<ul style="list-style-type: none"> <li>- défaillance électrique</li> <li>- défaillance des composants électroniques</li> <li>- défaillance de transmission</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- alimentation</li> </ul>	arrêt total de la commande



9	Processeur de communication	<ul style="list-style-type: none"> <li>- défaillance électrique</li> <li>- défaillance des composants électroniques</li> <li>- défaillance de transmission</li> </ul>	- alimentation	arrêt total de la commande
10	Processeur d'optimisation du générateur photovoltaïque	<ul style="list-style-type: none"> <li>- défaillance électrique</li> <li>- défaillance des composants électroniques</li> <li>- défaillance de transmission</li> </ul>	- alimentation	seule la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque est indisponible
11	Processeur d'optimisation de l'éolienne	<ul style="list-style-type: none"> <li>- défaillance électrique</li> <li>- défaillance des composants électroniques</li> <li>- défaillance de transmission</li> </ul>	- alimentation	seule la puissance délivrée par l'éolienne est indisponible
12	Processeur d'optimisation du transfert d'énergie	<ul style="list-style-type: none"> <li>- défaillance électrique</li> <li>- défaillance des composants électroniques</li> <li>- défaillance de transmission</li> </ul>	- alimentation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- perte du contrôle de charge et de décharge de la batterie</li> <li>- charges non alimentées</li> </ul>

*Tableau 4. 2: Etude qualitative par AMDE*

#### 4.6.4 Etude qualitative

L'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE) est la méthode la plus utilisée dans le milieu industriel [75]. C'est une méthode inductive qui permet une analyse systématique et complète des modes de défaillance des composants, de leurs causes, et de leurs effets sur le système. On évalue ainsi l'importance des modes de défaillance sur la sûreté de fonctionnement. Les résultats de l'analyse sont présentés sous forme de tableaux. Ces tableaux (4.2) intègrent nos hypothèses et offrent une vue synthétique des problèmes.

#### 4.6.5 Etude quantitative

##### A. Méthode du diagramme de succès (MDS)

La Méthode du Diagramme de Succès conduit à une modélisation du fonctionnement d'un système.

Les blocs qui représentent des composants dont la défaillance ou la panne entraîne la défaillance du système sont placés en série.

Les blocs qui représentent des composants dont la défaillance ou la panne ne provoque la défaillance du système qu'en combinaison avec d'autres blocs, sont disposés en parallèle.

Le diagramme de succès est donc relatif à une fonction donnée du système. C'est un graphe admettant une entrée et une sortie traduisant les relations entre les différents composants.

Les diagrammes de succès obtenus permettent les calculs de la fiabilité du système.

*1er cas:*

Le bloc diagramme de fiabilité associé à ce cas est présenté à la figure 4.7.

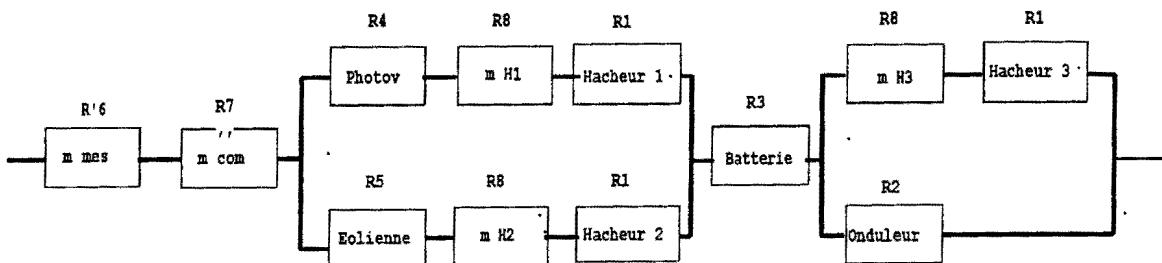


Figure 4. 7: Bloc diagramme multiprocesseur

Fonction de fiabilité:

$$\begin{aligned}
 R &= R3.R6.R7.(R1^2.R5.R8 + R1.R2.R5.R8 - \\
 &R1^2.R2.R5.R8 + R1^2.R4.R8^2 \\
 &+ R1.R2.R4.R8 - R1^2.R2.R4.R8 - \\
 &R1^3.R4.R5.R8^3 - R1^2.R5.R2.R4.R8^2 \\
 &+ R1^3.R2.R5.R4.R8^3) \\
 &= 0,90
 \end{aligned}
 \tag{Eq. 4. 10}$$

Enjeu financier : 377 Kff

2ème cas:

Le bloc diagramme de fiabilité associé à ce cas est présenté à la figure 4.8.

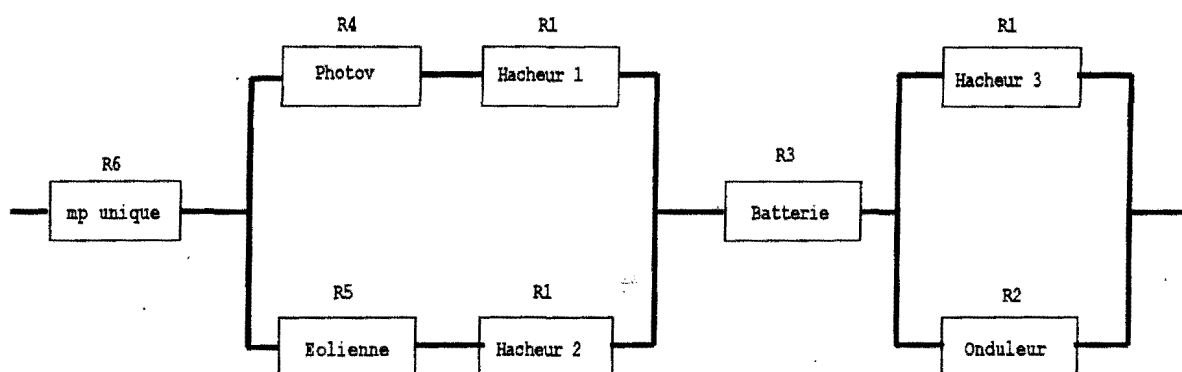


Figure 4. 8: Bloc diagramme monoprocasseur à noyau temps réel

Fonction de fiabilité:

$$\begin{aligned}
 R &= R1.R3^2.R4.R6 + R1R3^2.R5.R6 - \\
 &R1^2.R3^2.R4.R5.R6 + R1^2R3.R4.R6 \\
 &+ R1^2R3.R5.R6 - R1^3.R3.R4.R5.R6 - \\
 &R1^2R3^2.R4.R6 - R1^2.R3^2.R5.R6 \\
 &+ R1^3.R3^2.R4.R5.R6 \\
 &= 0,93
 \end{aligned}
 \tag{Eq. 4. 11}$$

Enjeu financier : 369 Kff

## **B. Méthode de l'Arbre des Causes**

La méthode de l'arbre des causes (*MAC*) est la méthode la plus couramment utilisée dans les analyses quantitatives de fiabilité. Elle a pour objectif le recensement de toutes les causes, de tous les défauts et leurs combinaisons entraînant l'apparition d'un événement indésirable. Elle permet donc d'identifier les points faibles de la conception et constitue un moyen de représentation de la logique des défaillances.

Contrairement à l'analyse des modes de défaillance, l'arbre de défaillance est une méthode déductive qui permet de savoir comment un système peut devenir indisponible. On représente les différents événements et leurs liaisons par des portes logiques (fonction *ET* ou fonction *OU* selon que la défaillance du matériel se produit lorsque les événements se réalisent ensemble ou séparément).

L'utilisation de l'arbre de défaillance pour évaluer la probabilité de l'événement redouté repose sur les règles classiques de calcul des probabilités composées à événements indépendants.

Deux arbres de défaillance sont présentés dans la suite du document. Le premier adoptant une commande multiprocesseurs, le second, en comparaison utilisant une commande centralisée à partir d'un noyau multitâches.

L'analyse qualitative étant achevée, nous quantifions maintenant les arbres de défaillance.

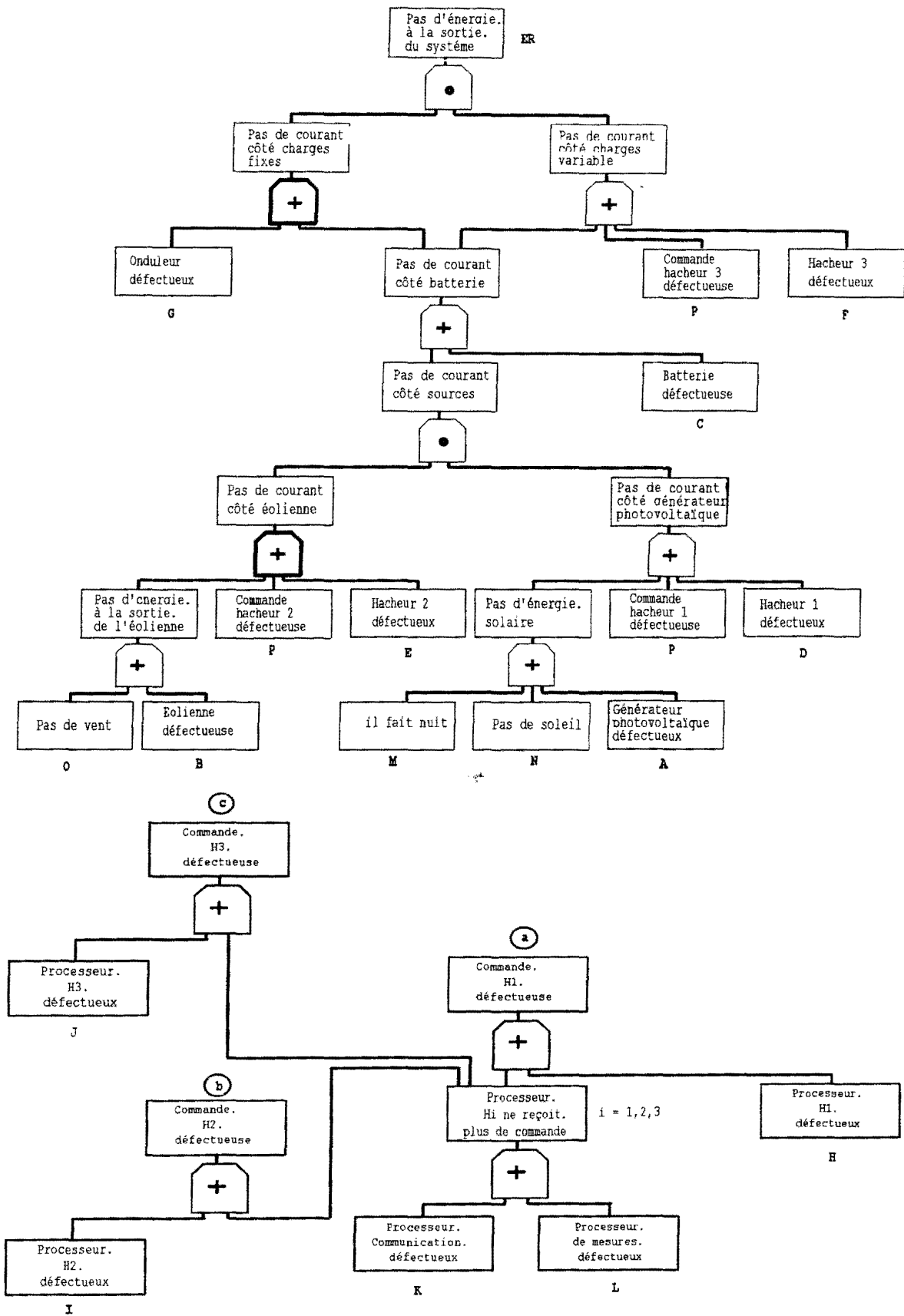


Figure 4. 9: Analyse quantitative par Arbre des causes

Eléments	Références	$\lambda$ (h <sup>-1</sup> )
Générateur photovoltaïque	A	1,6.10 <sup>-5</sup>
Eolienne	B	3,4.10 <sup>-4</sup>
Batterie	C	5.10 <sup>-5</sup>
Hacheur 1	D	3.10 <sup>-5</sup>
Hacheur 2	E	3.10 <sup>-5</sup>
Hacheur 3	F	3.10 <sup>-5</sup>
Onduleur	G	3.10 <sup>-5</sup>
Processeur PV	H	1.10 <sup>-5</sup>
Processeur EOLIEN	I	1.10 <sup>-5</sup>
Processeur BATTERIE	J	1.10 <sup>-5</sup>
Processeur COMM	K	1.10 <sup>-5</sup>
Processeur MESURES	L	1.10 <sup>-5</sup>
Processeur multitâches	P	1.10 <sup>-5</sup>
Vent (3 mois/ année)	O	0,25
Soleil (5mn/jour)	N	0,83.10 <sup>-2</sup>
Nuit (14 heures/24)	M	0,58

Tableau 4.3: Taux de défaillances de quelques systèmes énergétiques

L'équation booléenne du cas n°1 peut s'écrire de proche en proche, de la façon suivante:

$$\begin{aligned}
 ER &= XY + C + GJ + GK + GL + GF \\
 X &= O + B + I + K + L + E \\
 Y &= M + N + A + H + K + L + D \\
 ER &= C + K + L + OM + ON + OA + OH + OD \\
 &\quad + BM + BN + BA + BH + BD \\
 &\quad + IM + IN + IA + IH + ID \\
 &\quad + GJ + GF \\
 &\quad + EM + EN + EA + EH + EK + EL + ED
 \end{aligned}
 \tag{Eq. 4. 12}$$

L'expression booléenne sous forme d'une "somme" (+) et de "produits" (·) booléens permet d'établir la liste des chemins. Ces chemins sont aussi appelés "coupes". Connaissant les

probabilités d'apparition de chaque élément nous pouvons déterminer la probabilité d'apparition de l'événement redouté ( $ER$ ).

*Application numérique:* On trouve  $ER = 11,6.10^{-2}$

La fiabilité de fonctionnement est donc de 0,884 pour 1000 heures de fonctionnement.

L'équation booléenne du cas n°2 s'écrit:

$$X = O+B+P+E$$

$$Y = M+N+A+P+D$$

$$ER = C + P + OM+ON+OA+OD + BM+BN+BA+BD + GP+GF + EM+EN+EA+ED \quad (Eq. 4. 13)$$

*Application numérique:* On trouve  $ER = 11,2.10^{-2}$

La fiabilité de fonctionnement est donc de 0,888 pour 1000 heures de fonctionnement.

Il convient de mentionner les limites de cette méthode lorsque les dispositifs sont formés de systèmes élémentaires complexes en interaction. Dans ce cas, la méthode utilisée en complément ou en remplacement est souvent celle de l'espace d'états quand le système est réparable.

### C. Méthode de l'Espace d'Etats

L'état ( $i$ ) dans lequel se trouve le système à un instant  $t$  ne dépend que des états ( $i-1$ ) ou ( $i+1$ ).

Le passage d'un état à l'autre se réalise suivant une loi exponentielle à taux de défaillance

( $\lambda$ ) =  $1/MTBF$  et à taux de réparation ( $\mu$ ) =  $1/MTTR$  constants.

Cette méthode résulte d'une théorie mathématique dont les grandes lignes seront présentées.

On modélise le processus de la figure 4.3 comme 3 systèmes "série" (Figure 4.12). La panne de l'un des 3 systèmes provoque l'arrêt ou une indisponibilité du système. [76]

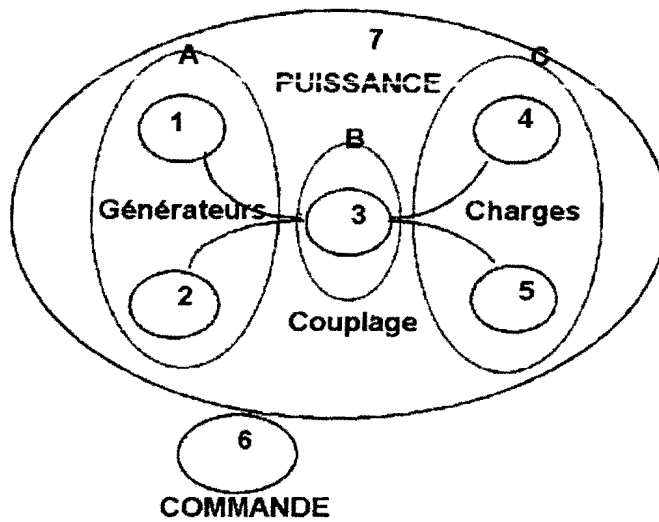


Figure 4. 10: Modèle d'étude du processus

Etat 0: les systèmes A, B et C fonctionnent.

Etat 1: le sous système A est en panne

Etat 2: le sous système B est en panne

Etat 3: le sous système C est en panne

Etat 4: les sous systèmes A et B sont en panne

Etat 5: les sous systèmes A et C sont en panne

Etat 6: les sous systèmes B et C sont en panne

Etat 7: les systèmes A, B et C sont en panne

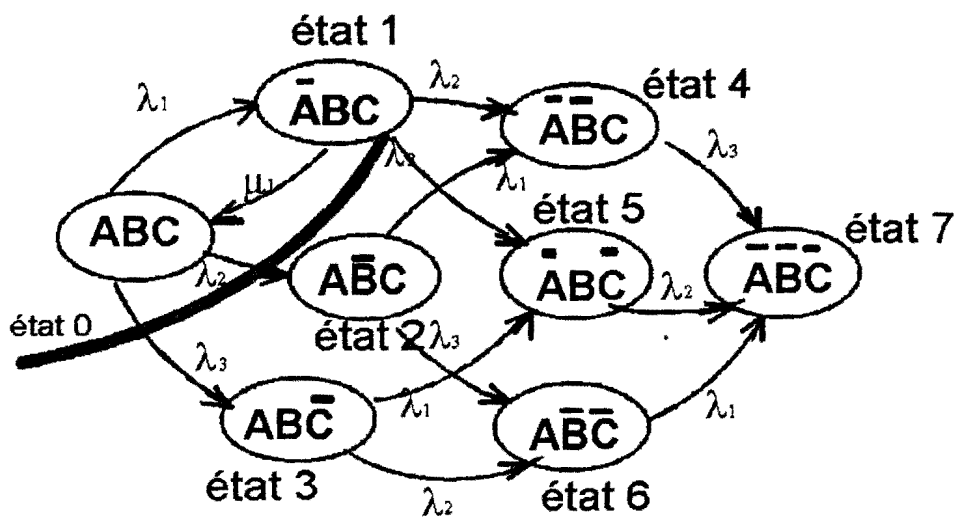


Figure 4. 11: Chaîne de Markov



*Remarque:* la probabilité pour que 2 sous systèmes ou 3 tombent en panne simultanément est négligée. Cette probabilité étant jugée très faible, il n'est pas souhaitable de la prendre en compte pour ne pas compliquer les calculs.

### Matrice d'états M associée au graphe

$$\begin{pmatrix} -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) & \mu_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_1 & -(\lambda_2 + \lambda_3 + \mu_1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_2 & 0 & -(\lambda_1 + \lambda_3) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_3 & 0 & 0 & -(\lambda_1 + \lambda_2) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \lambda_1 & 0 & -\lambda_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_3 & 0 & \lambda_1 & 0 & -\lambda_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 & \lambda_2 & 0 & 0 & -\lambda_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_3 & \lambda_2 & \lambda_1 & 0 \end{pmatrix}$$

$[P'] = [M] [P]$  avec:

$$P' = \begin{bmatrix} P'_0 \\ P'_1 \\ P'_2 \\ P'_3 \\ P'_4 \\ P'_5 \\ P'_6 \\ P'_7 \end{bmatrix} \quad P = \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \\ P_7 \end{bmatrix}$$

On peut donc écrire :

$$P'_0 = (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)P_0 + \mu_1 P_1$$

$$P'_1 = \lambda_1 P_0 - (\lambda_2 + \lambda_3 + \mu_1)P_1$$

$$P'_2 = \lambda_2 P_0 - (\lambda_1 + \lambda_3)P_2$$

$$P'_3 = \lambda_3 P_0 - (\lambda_1 + \lambda_2)P_3$$

$$P'_4 = \lambda_2 P_1 + \lambda_1 P_2 - \lambda_3 P_4$$

$$P'_5 = \lambda_3 P_1 + \lambda_1 P_3 - \lambda_2 P_5$$

$$P'_6 = \lambda_3 P_2 + \lambda_2 P_3 - \lambda_1 P_6$$

$$P'_7 = \lambda_3 P_4 + \lambda_2 P_5 + \lambda_1 P_6$$

avec, comme conditions initiales :  $\sum P_i = 1 \quad P_0(0) = 1$

La fiabilité globale avec les hypothèses utilisées est donc égale à  $P_0 + P_7$ .

Dans le cadre d'études de fiabilité d'ensembles complexes, on est amené à résoudre des équations différentielles et à utiliser la transformée de *Laplace*. La technique est de passer d'un espace temporel à l'espace de *Laplace* où les équations sont plus aisées à résoudre. On obtient alors pour notre système:

$$\begin{aligned}
1 - sP_0 &= (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)P_0 + \mu_1 P_1 \\
sP_1 &= \lambda_1 P_0 - (\lambda_2 + \lambda_3 + \mu_1)P_1 \\
sP_2 &= \lambda_2 P_0 - (\lambda_1 + \lambda_2)P_2 \\
sP_3 &= \lambda_3 P_0 - (\lambda_1 + \lambda_2)P_3 \\
sP_4 &= \lambda_2 P_1 + \lambda_1 P_2 - \lambda_3 P_4 \\
sP_5 &= \lambda_3 P_1 + \lambda_1 P_3 - \lambda_2 P_5 \\
sP_6 &= \lambda_3 P_2 + \lambda_2 P_3 - \lambda_1 P_6 \\
sP_7 &= \lambda_3 P_4 + \lambda_2 P_5 + \lambda_1 P_6
\end{aligned}$$

En arrangeant les termes, et en tenant compte des conditions initiales, on a :

$$\begin{pmatrix}
s + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 & -\mu_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\lambda_1 & -(s + \lambda_2 + \lambda_3 + \mu_1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\lambda_2 & 0 & -(s + \lambda_1 + \lambda_2) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\lambda_3 & 0 & 0 & s + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & \lambda_2 & \lambda_1 & 0 & s + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 & 0 & 0 & 0 \\
0 & \lambda_3 & 0 & \lambda_1 & 0 & -(s\lambda) & 0 & 0 \\
0 & 0 & \lambda_3 & \lambda_2 & 0 & 0 & -(s + \lambda_1) & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_3 & \lambda_2 & \lambda_1 & -s
\end{pmatrix}$$

Ce système d'équations peut se résoudre de différentes façons. La solution retenue est la méthode de *Cramer*, elle se prête à l'informatisation et dans le cas où l'on a davantage d'éléments, son intérêt devient plus grand.

*Application numérique* : On trouve  $P_0 + P_1 = 0,842$

La fiabilité de fonctionnement est donc de 0,842 pour  $t=1000$  heures de fonctionnement.

## 4.7 - CONCLUSION SUR LES METHODES

Les tronçons sur lesquels il est préférable d'agir, sont les tronçons qui sont placés le plus en haut à gauche de la matrice.

On obtient donc le classement global :

Les tronçons classés 1 et 2 (éventuellement 3 sont les tronçons prioritaires pour les redondances (ici n6 et n3).

*Remarque:*

Nous avons vu que le *MTTF* d'un tronçon augmente de manière arithmétique lorsque n augmente de manière géométrique.

Il est donc parfaitement inutile d'augmenter les multiplicités de manière démesurée. (augmenter n de 1 ou 2 suffit)

## LISTE DES SYMBOLES

$t$  : variable temps

$\lambda, \mu$  : taux de défaillance et de réparation

$\lambda(t)dt$  : taux de défaillance instantanée

$F(t)$  : fonction cumulée de défaillance

$dF(t)$  : fonction de la fonction cumulée de défaillance

$R(t)$  : fonction fiabilité

$R_i(t)$  : fonction fiabilité d'un équipement i

$f(t)$  : loi de fiabilité

$R_s(t)$  : fonction de fiabilité équivalente au système série

$R_p(t)$  : fonction de fiabilité équivalente au système parallèle

## **CHAPITRE 5**

# **VALIDATION SUR SITE: LES MICROCENTRALES DE NDIEBEL ET DE DIAOULE**

## ETUDE DE CAS

### 5.1 - INTRODUCTION

Dans le cadre des activités du Projet Sénégal-Allemand d'Energie solaire, deux centrales photovoltaïques ont été réalisées [77]. L'une de 21,5kWc à Diaoulé dans la région de Fatick, et l'autre de 19,8kWc dans la région de Kaolack. Nous nous sommes intéressés dans le cadre de ce travail à valider nos projections théoriques sur ces centrales.

### 5.2 - CONCEPTION TECHNIQUE

#### 5.2.1 - Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque de Diaoulé, d'une puissance crête de 21,8kW, est constitué de 560 modules de 38,4W en silicium polycristallin de type AEG PQ 10/40 répartis sur 20 travées de 28 modules chacune. Les 28 modules étant branchés en série de 14 avec un point milieu donnant ainsi par rapport à ce point milieu une tension de circuit ouvert de 315V ce qui correspond à une tension optimale du système de 260V (Figure 5.1). Ces dispositions de branchement ont été prises pour deux raisons :

- a) pour des raisons de sécurité des personnes,
- b) pour des raisons de tenue en tension des modules.

Selon la spécification 502 de la Joint Research Center - Ispra, les modules photovoltaïques subissent un test de tenue en tension de l'isolation pour une tension égale à  $1000V + 2U$ , U étant la tension maximale du système. Ainsi les modules étant testés pour une tension de 1500V, la tension maximale ne doit normalement pas excéder la valeur de 250V.

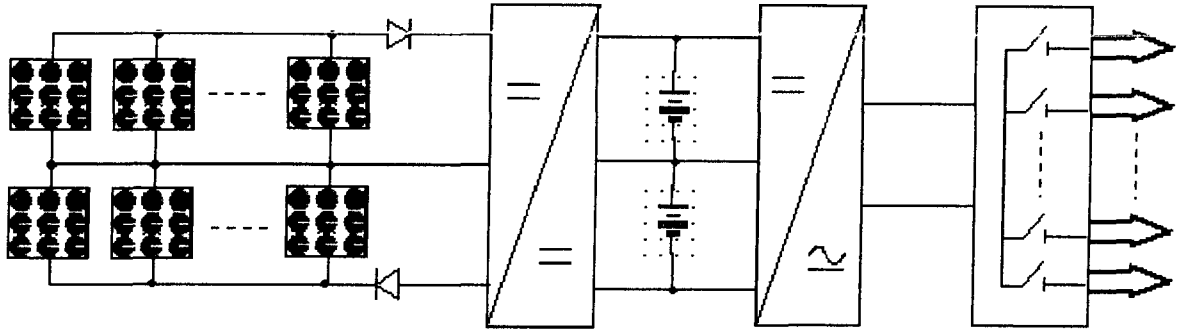


Figure 5. 1: Synoptique de la centrale de Diaoulé

Le générateur de Ndiébel est lui d'une puissance crête de 20kW. Il est constitué de 400 modules de 50W en silicium polycristallin de type AEG PQ 40/50. Répartis sur 20 travées, ces modules sont branchés par travée en deux lots de 10 modules en série, les deux lots branchés en parallèle (Figure 5.2) présentant ainsi à la sortie une tension de circuit ouvert de 228V soit une tension optimale de 189V pour un courant au point de puissance maximale de 5,52A.

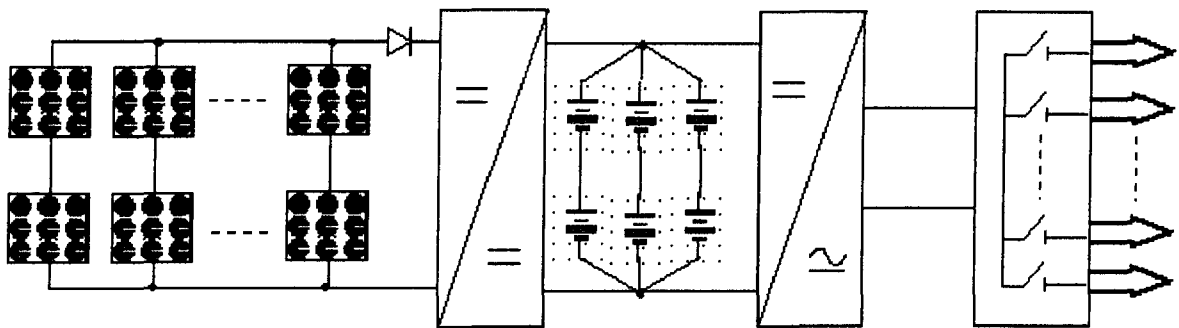


Figure 5. 2: Synoptique de la centrale de Ndiébel

### 5.2.2 - Le stockage

Le stockage chimique est constitué, aussi bien à Diaoulé qu'à Ndiébel, d'éléments 6 OCSM 690 B - 2V de la firme Hagen. A Diaoulé, 150 éléments sont montés en série avec un point milieu (Figure 5.1) d'où une tension de 150V de part et d'autre de ce point milieu.

A Ndiébel, 150 éléments sont branchés en série de 50, formant ainsi trois lots de cinquante éléments branchés en parallèle (Figure 5.2). Aussi disposons-nous, à Diaoulé, d'un stockage

chimique d'une capacité de 690Ah pour une tension nominale de 300V et, à Ndiébel, d'une capacité de 2070Ah pour une tension nominale de 100V.

Les batteries sont équipées d'un dispositif de conditionnement de l'électrolyte par air conditionné alimenté par un compresseur raccordé au réseau 220V et déclenché par un relais de surtension. Au relais de surtension est adjoint deux relais temporisés permettant de contrôler la durée de fonctionnement.

### ***5.2.3 - Régulateur de charge***

Les batteries d'accumulateurs alimentées par des générateurs photovoltaïques, sont chargées selon la caractéristique IU c'est-à-dire, dans une première phase à courant constant jusqu'à l'atteinte d'une tension  $U_f$  appelée tension de fin de charge, et dans une deuxième phase à tension constante.

Les régulateurs de charge qui équipent les centrales de Diaoulé et de Ndiébel ont pour but essentiel de contrôler la charge de batteries. Ces régulateurs de charge sont des convertisseurs de courant continu munis d'un suiveur de puissance maximale (MPPT: Maximal Power Point Tracking) et permettent ainsi d'adapter l'impédance de la charge à celle des générateurs solaires. l'atteinte de la tension de fin de charge fixée à 2,4V par cellule, ils limitent le courant de charge évitant ainsi un "gassing" pouvant générer des pertes d'eau. Il est en outre possible de commuter les régulateurs en mode de fonctionnement à une tension d'entrée constante qui peut être fixée manuellement. A Diaoulé, le régulateur de charge est constitué de 2 modules contrôlant la charge de part et d'autre du point milieu des batteries.

A Ndiébel, le régulateur est constitué de 2 modules fonctionnant en mode "maître-esclave". Le premier module assure la fonction de "maître" et synchronise le fonctionnement du module 2 (esclave). Le module 1 assure la poursuite du point de puissance maximale, la scrutation de la tension des batteries, et enfin limite le courant de charge dès l'atteinte de  $U_f$ .

Spécifications techniques	Diaoulé	Ndiébel
Puissance	30kW	20kW
Tension d'entrée	280V	180V
Tension de sortie	135...180V	100V
Tension de fin de charge	180V	120V

Afin d'éviter une décharge trop profonde des batteries, 6 relais de sous-tension permettent de déconnecter en fonction d'une priorité préfixée 6 circuits de décharge dès l'atteinte d'une tension de 1,8V par cellule. La fourniture est reprise automatiquement quand la tension par cellule remonte à 2V.

#### 5.2.4 - Onduleurs

Fonctionnant aussi bien à Diaoulé qu'à Ndiébel en mode "maître/esclave", les onduleurs sont constitués de 3 modules. Le premier module assurant la fonction de maître, synchronise les deux autres modules. Il faut noter que le caractère modulaire de ces onduleurs leur confère une redondance de fiabilité en ceci que la défektivité d'un des modules n'entraîne en aucun cas une défaillance de fonctionnement des deux modules restants. Si l'onduleur de Diaoulé est conçu sans transformateur pour des raisons liées au rendement énergétique (possibilités d'un rendement de 96%) celui de Ndiébel est muni de transformateurs assurant ainsi une bonne isolation galvanique de cet appareil.

#### Spécifications techniques

	Diaoulé	Ndiébel
Puissance	20kVA 3x6,6kVA	15kVA 3x5kVA
Tension d'entrée	± 135-200V DC	100V DC
Tension de sortie	220V AC	220V AC
Fréquence de l'onde de sortie	50Hz	50Hz
Forme de l'onde de sortie	sinusoïdale	sinusoïdale
Rendement dans la plage (0,1-1) P	90 % ... 96 %	90% ... 94%

## *Protections*

1. Protections contre la sous tension	pour U < 270V	pour U < 90V
2 Protections contre les courts circuits	limitation du	

### **5.2.5 - Unité de distribution**

Une armoire de distribution en aval de l'onduleur contient les organes de protection et de distribution. Elle comporte:

- 4 circuits de distribution assurant l'alimentation des abonnés (4 zones délimitées géographiquement et englobant tous les abonnés du village),
- 1 circuit de commande à base d'interrupteur horaire,
- et 1 circuit d'alimentation des besoins propres de la centrale.

Cette armoire comporte en outre un jeu de barres de connexion des 20 travées du champ photovoltaïque.

### **5.2.6 - Réseau de distribution**

Le réseau de distribution, aussi bien à Diaoulé qu'à Ndiébel est éclaté en 6 circuits d'une longueur cumulée de près de 7km.

Les câbles sont du type pré-assemblés de cinq fils (3x35 + 1x16 + 1x54,6). Deux phases 2x35 desservent les abonnés de chaque zone, le 1x16 et le 3x35 assurent l'éclairage publique.



Ce réseau dessert des abonnés dont les besoins énergétiques couvrent l'alimentation des lampes à incandescence de 25 ou 40W, des réfrigérateurs (6 à Diaoulé et 8 à Ndiébel) et d'appareils de reproduction du son (RK7) et de l'image (TV). L'éclairage public est constitué de lampes à vapeur de sodium basse pression de 18W (15 à Diaoulé et 15 à Ndiébel).

### **5.2.7 - Mesures**

Afin d'assurer un suivi technique convenable des centrales, des unités d'acquisition de données MODAS y ont été installées, munies d'une mémoire RAM enfichable. Elles proposent la mesure des grandeurs suivantes:

#### **5.2.7.1 - Grandeurs météorologiques**

- a) rayonnement global à l'aide d'un solarimètre,
- b) rayonnement diffus à l'aide d'un pyranomètre,
- c) vitesse du vent à l'aide d'un anémomètre,
- d) humidité relative à l'aide d'un hygromètre,
- e) température ambiante à l'aide d'un Pt-100 intégré,
- f) température des cellules photovoltaïques à l'aide d'un Pt-100 intégré à un module du champ photovoltaïque.

#### **5.2.7.2 - Grandeurs électriques**

La mesure des grandeurs électriques par les unités d'acquisition de données est possible grâce au dispositif de mesures, intégré dans l'armoire du régulateur et de l'onduleur, pouvant acquérir à ses bornes des signaux de 0 à 10V.

Ainsi, il est possible au Modas de mesurer et de mémoriser:

- a) la puissance débitée par le générateur solaire,
- b) le courant à la sortie du régulateur de charge,
- c) la tension de la batterie,
- d) la puissance de sortie de l'onduleur.

Les données emmagasinées dans la RAM sont ensuite transférées par le biais d'une interface à l'ordinateur et traitées à Dakar.

## **5.2.8 - Protection**

### **5.2.8.1 - Protection des personnes**

La difficulté de conférer aux modules photovoltaïques une classe de matériel électrique donnée rend compliqué le choix la protection adéquate contre les contacts indirects. Ceci oblige à adopter les deux mesures suivantes supposées fiables:

- a) utilisation de tension en dessous de la tension limite conventionnelle,
- b) utilisation de barrières s'opposant à tout contact avec les parties actives.

Dans le cas de Diaoulé et de Ndiébel, la tension du système étant supérieure à la tension limite conventionnelle, seule la deuxième mesure a été prise et évite tout contact des personnes non spécialisées avec les générateurs solaires.

### **5.2.8.2 - Protection contre les surintensités**

#### *Circuit courant alternatif*

Les dispositifs classiques de protection contre les surintensités y sont installés:

- coupe-circuit à fusible,
- disjoncteurs.

#### *Circuit courant continu*

La protection du circuit à courant continu consiste en la protection du circuit de charge et du circuit d'utilisation.

S'il est vrai que les risques de surcharge sont pratiquement inexistantes dans le circuit de charge (circuit du générateur solaire), il n'en demeure pas moins vrai que les risques de surintensité dus

aux courts-circuits et à un défaut d'isolation sont prévisibles. Ainsi, faudrait-il prendre des dispositions évitant la défectuosité d'autres éléments du système. Le courant de court-circuit du générateur solaire étant peu différent de son courant nominal, la protection contre les courts-circuits est souvent difficile à assurer. Les seuls dispositifs pouvant être utilisés sont les coupe-circuits à fusibles. A Diaoulé, cette protection est assurée par les coupe-circuits sectionnables permettant en outre d'isoler, si nécessaire, le générateur des autres équipements.

Outre le circuit du générateur, celui de la batterie doit être aussi protégé. Cette protection doit être faite avec prudence afin d'éviter qu'en cas de rupture des fusibles, les autres équipements ne soient pas directement connectés au générateur solaire. A Diaoulé, l'option de protection en "V" a été adoptée et permet une protection double, celle du circuit de la charge et celle du circuit d'utilisation.

### **5.2.8.3 - Protection contre la foudre**

La protection des installations photovoltaïques contre les surtensions atmosphériques nécessite la prise de mesures complexes:

- a) mesures liées à la protection du générateur solaire (protection externe),
- b) mesures liées à la protection des équipements non exposés : systèmes de commandes, de régulation et de stockage (protection interne),
- c) mesures liées au câblage du générateur solaire et au câblage reliant le générateur solaire aux autres équipements.

La première mesure consiste à installer dans le champ du générateur solaire, des parafoudres permettant de capter la décharge atmosphérique et de l'écouler vers le système de "terre".

La deuxième mesure consiste à protéger les équipements contre les surtensions d'origine atmosphérique à l'aide de dispositifs adéquats: varistors, diodes suppressor, etc.

Enfin la troisième mesure liée au câblage consiste en une conception de câble et de branchement limitant le plus possible les risques d'induction de tension pouvant atteindre 100kV et provoquant la destruction des modules.

### **5.3 - Fiabilité**

La fiabilité du système sera défini par l'évaluation des taux de défaillance au cours du fonctionnement des centrales.

La centrale de Diaoulé fonctionne depuis Juin 1989. Hormis les défauts intermittents liés à la mise en service et à la conception des onduleurs, la centrale a pu fonctionner jusqu'en Novembre 1990, date à laquelle une panne survint. Depuis cette date, la centrale fonctionne de façon satisfaisante.

Quant à la centrale de Ndiébel mise en service Septembre 1990, elle a connu des perturbations de fourniture, perturbations qui se manifestaient par des coupures à l'atteinte d'une puissance appelée de 7kW. Ceci étant lié à un mauvais fonctionnement du dispositif électronique de protection de sous-tension. Il a été remédié à cette perturbation en Décembre 1990. La centrale, depuis cette date, n'a connu aucune interruption de service.

Il est à noter en outre la défektivité d'un élément du stockage chimique à Diaoulé, défektivité encore peu explicable. De plus, 3 modules ont connu une défektivité liée à un défaut d'isolation.

Somme toute, le rapport des heures totales de service et des heures d'interruption de fourniture des deux centrales, est assez satisfaisant et dénote d'une bonne fiabilité pour la période considérée. Mais il serait judicieux de noter que les éléments les moins fiables du système furent les onduleurs, notamment celui de Diaoulé, et que des mesures ont été prises afin de pallier à ce manque.

### **5.4 - Performances et bilan énergétique**

La planification d'équipements de production d'énergie électrique nécessite des hypothèses de base qui sont des prévisions à plus ou moins long terme [78]. Ces hypothèses constituent dans l'évaluation du bilan énergétique d'exploitation des éléments de référence. Ces

hypothèses dans le cas des équipements photovoltaïques concernent aussi bien la disponibilité énergétique (l'irradiation), que la consommation, c'est-à-dire la demande d'énergie, la demande et l'offre étant soumises à un certain nombre "d'incertitudes probabilisables" communément appelées aléas.

Effectuer un bilan énergétique au cours de l'exploitation d'équipements photovoltaïques consiste:

- a) à analyser
  - la disponibilité énergétique (irradiation),
  - la production d'énergie,
  - la consommation énergétique;
- b) à comparer ces paramètres non seulement, aux hypothèses de base, mais aussi à analyser le degré d'adaptation de l'offre à la demande énergétique.

Dans le cas de Diaoulé, les besoins énergétiques estimés s'élèvent à 70,7kWh dont 42,6 pour l'utilisation domestique. Le dimensionnement du générateur effectué sur la base d'une irradiation journalière moyenne de 5,5kWh/m<sup>2</sup>/j.

Pour Ndiébel, les besoins énergétiques ont été estimés globalement à 60kWh/j, dont 36,2 pour les applications domestiques (Tableau 5.1).

Les mesures effectuées sur une année (de Janvier à Décembre 1995) démontrent qu'à Diaoulé, la consommation par jour s'élève en moyenne à 42kWh/j sur toute l'année, soit une consommation mensuelle moyenne de 1200kWh, exceptés les mois de Mars et d'Avril pendant lesquels la consommation atteint 1512kWh (49kWh/j), voire 1702kWh (57kWh/j), (Tableau 5.2, Figures 5.4 et 5.5).

UTILISATEURS	DIAOULE	NDIEBEL
<b>Institutions publiques</b>		
- Poste de santé		
- Services publiques	12,3kWh/j	10,45kWh/j
- Eclairage publique		
<b>Activités commerciales et professionnelles</b>		
- Boutiques		
- Pharmacie	15,8kWh/j	13,43kWh/j
- Moulin à mil		
- etc...		
<b>Utilisation domestique</b>		
- Lampes		
- Télévisions	42,6kWh/j	36,2kWh/j
- Réfrigérateurs		
- Ventilateurs		
<b>TOTAL / JOUR</b>	<b>70,7kWh/j</b>	<b>60kWh/j</b>

*Tableau 5.1: ESTIMATION DES BESOINS ENERGETIQUES*

Mois	irrad Wh/m <sup>2</sup> /j	Evirt. kWh	Egen kWh	Econs. KWh
<i>Janvier</i>	4992	3011	2188	1363
<i>Février</i>	5896	3212	2119	1296
<i>Mars</i>	5904	3561	2400	1512
<i>Avril</i>	6300	3677	2635	1702
<i>Mai</i>	6354	3832	2202	1337
<i>Juin</i>	5659	3303	2047	1192
<i>Juillet</i>	5364	3235	2064	1215
<i>Août</i>	5536	3339	2116	1263
<i>Septembre</i>	5879	3431	1931	1113
<i>Octobre</i>	5472	3300	2092	1225
<i>Novembre</i>	6202	3620	1927	1114
<i>Décembre</i>	5672	3421	2192	1386

*Tableau 5.2: BILAN ENERGETIQUE DE DIAOULE 1995*

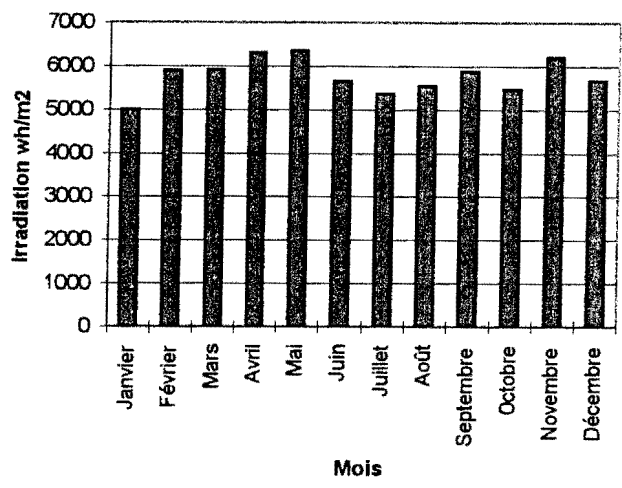


Figure 5. 3: Variation annuelle de l'irradiation

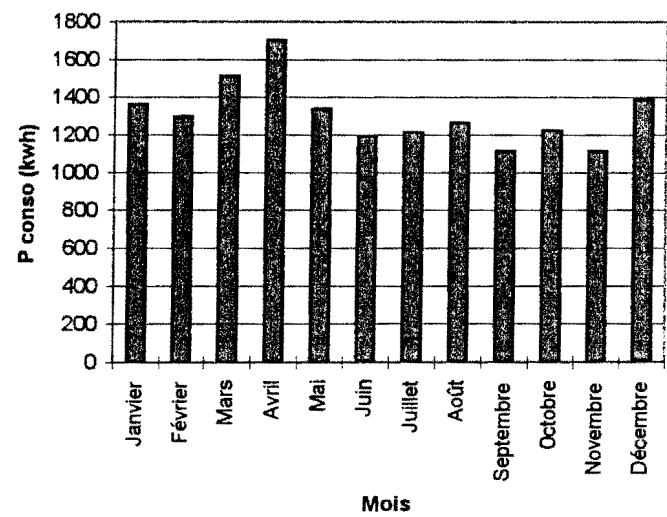
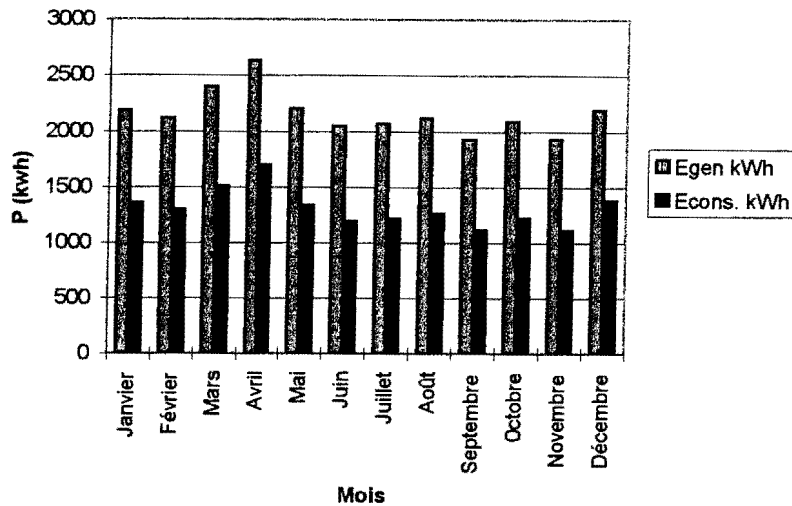


Figure 5. 4: Variation annuelle de la consommation



*Figure 5. 5: Variation annuelle Production/Consommation*

A Ndiébel, elle s'élève en moyenne à 58kWh/j . (Figure 5.6)

La disponibilité énergétique (irradiation) s'élève en moyenne à 5,5kWh/m<sup>2</sup>/j (Figure 5.7).

La production à Diaoulé s'élève quant à elle en moyenne à 70kWh/j avec des valeurs de 77 à 86 pour les mois de Mars et d'Avril (Figures 5.8 et 5.9). A Ndiébel, elle est en moyenne égale à 89kWh (Figure 5.10).

Cette première analyse dénote:

- que les conditions atmosphériques ont été au cours de ces premières années d'exploitation (irradiation en moyenne = 5,5kWh/m<sup>2</sup>/j) égale à celle retenue dans les hypothèses de base (Figures 5.6 et 5.7).
- que la production à Diaoulé, en dépit de la satisfaction des hypothèses de base liées aux conditions météorologiques, est en deçà des valeurs estimées au moment de la conception (70kWh/j au lieu de 100kWh/j), surtout qu'au cours de l'exploitation des productions supérieures ont été possibles.



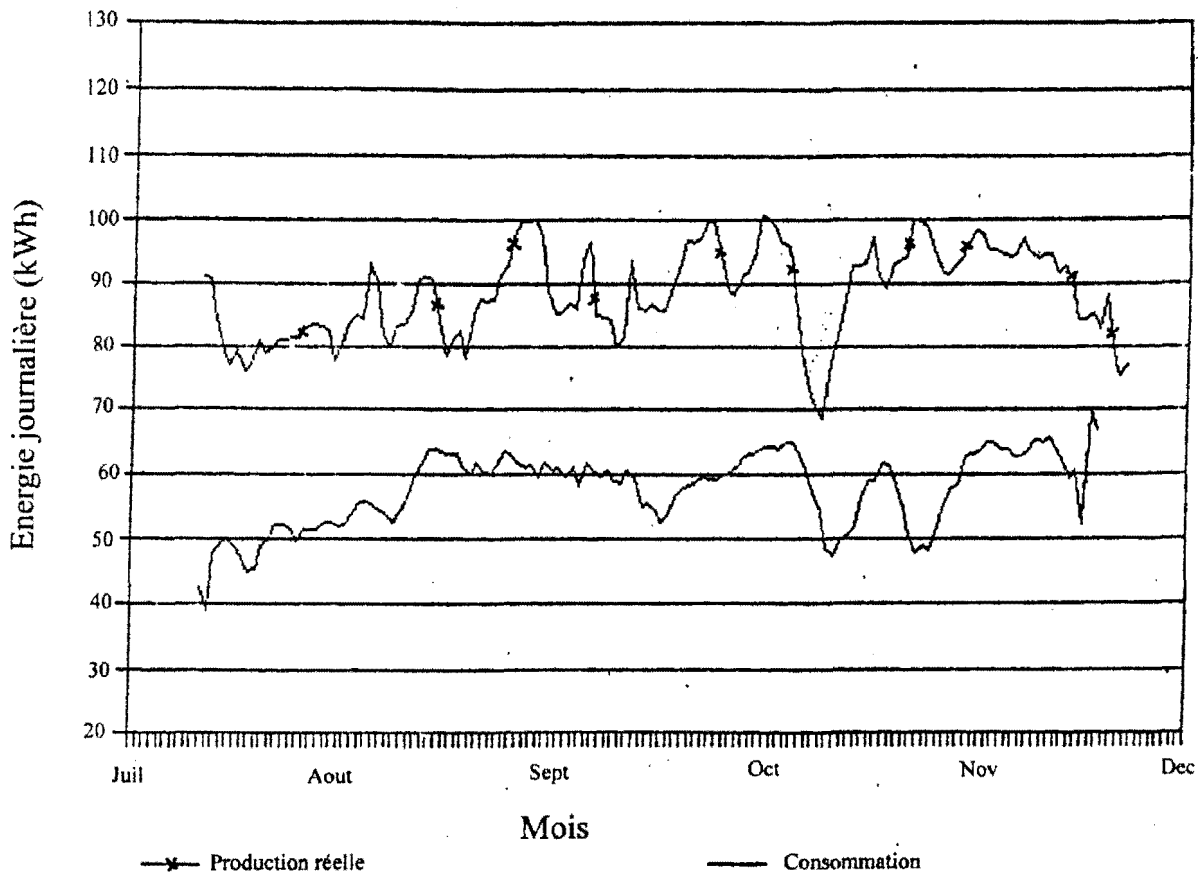


Figure 5. 6: Production sur consommation Ndiébel - Juillet/Novembre 1995

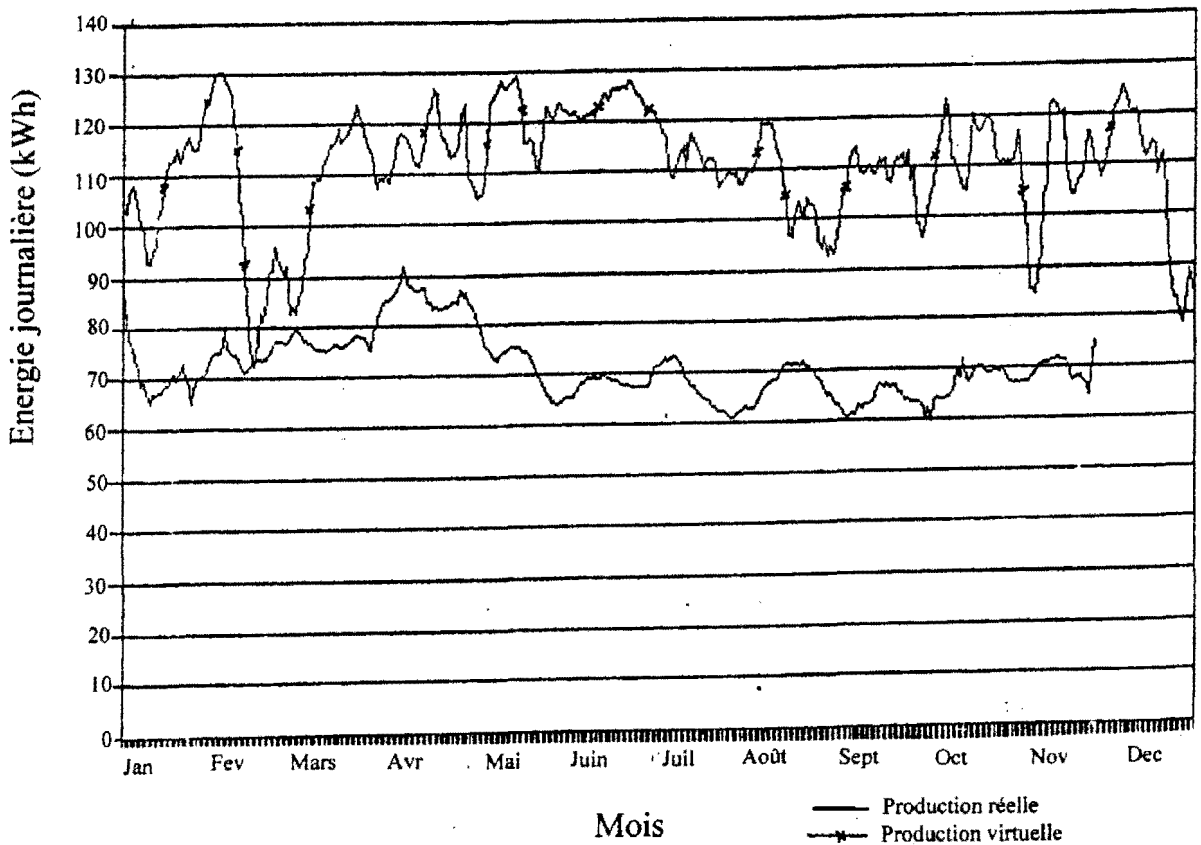


Figure 5. 8: Production sur consommation Diaoulé - 1995

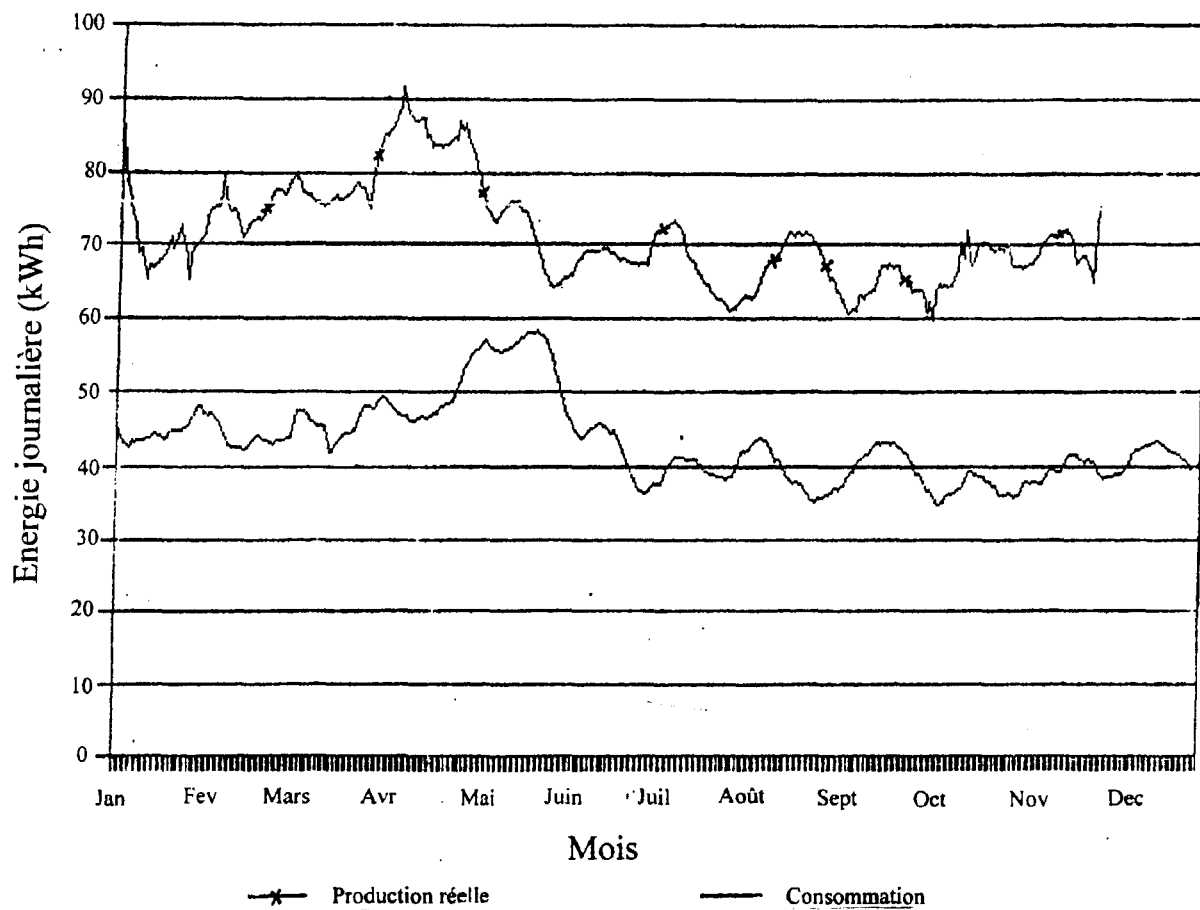


Figure 5.9: Production Diaoulé - 1995

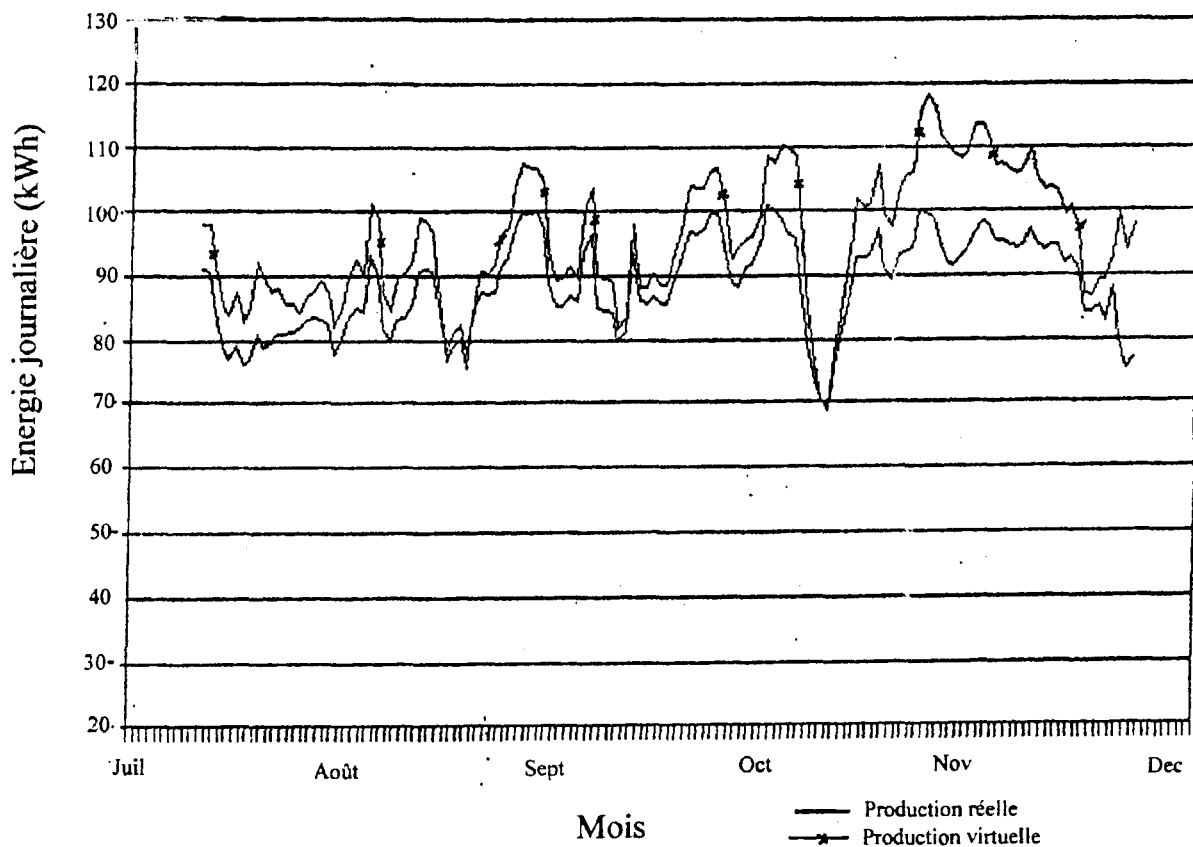


Figure 5.10: Production Ndiébel - 1995

- qu'à Ndiébel, la production avec une moyenne de 89kWh/j est celle prévue dans les hypothèses de base (environ 90kWh/j).

Si à Diaoulé la consommation est en deçà des prévisions 40kWh/j moyenne au lieu de 70kWh/j estimée, à Ndiébel par contre elle correspond aux prévisions 58kWh/j en moyenne pour 60kWh/j estimée.

Il est à noter qu'à Diaoulé, la faiblesse de la consommation est liée non seulement à une réticence à la consommation d'une grande partie des abonnés, mais aussi à la consommation pratiquement inexistantes des institutions publiques et des institutions commerciales et professionnelles prévues dans les hypothèses de base (le moulin à mil n'est pas encore installé, le nombre de boutiques n'a pas beaucoup évolué).

Quant aux courbes de charge, elles accusent pour les deux centrales une petite pointe les matins et une autre plus accentuée les soirs, atteignant en moyenne 6kW à Diaoulé et 7kW à Ndiébel (Figure 5.11) et (Figure 5.12).

Le fait que la production actuelle du générateur de Diaoulé soit en deçà de sa capacité, est lié à la consommation donc à la profondeur de décharge des batteries. Les batteries ont été dimensionnées pour un taux de décharge moyen de 33%, ce qui correspond à 230 Ampères-heures fournis par jour. Compte tenu de la consommation actuelle qui n'est que de 133 Ah/jour, les recharges des batteries succédant à ces décharges s'effectuant plus tôt dans la journée, le courant débité par le générateur étant par conséquent limité plus tôt par le régulateur de charge.

Quelques remarques découlent de l'exploitation de ces centrales:

La première est que les performances des équipements photovoltaïques, voire du générateur, ne dépendent pas que des conditions météorologiques (irradiation, température, etc... ) mais aussi du profil de l'utilisation, donc de la charge. La deuxième est que l'estimation des besoins énergétiques notamment ceux devant être satisfaits par des équipements photovoltaïques est assez complexe, la croissance de la consommation d'électricité dépendant d'un certain nombre de facteurs difficiles à appréhender.

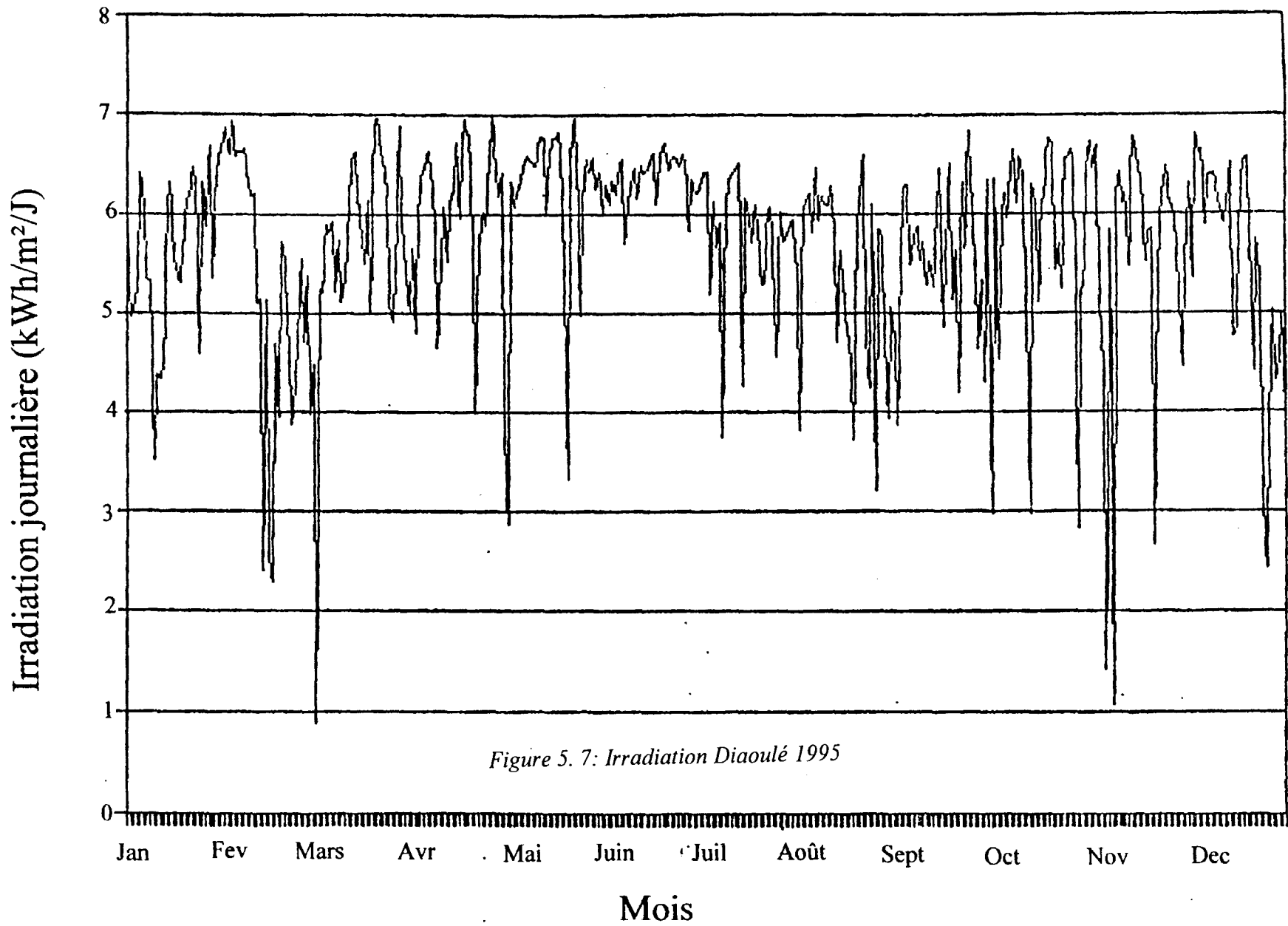


Figure 5. 7: Irradiation Diaoulé 1995

Figure 5. 11: Courbe de charge Diaoulé

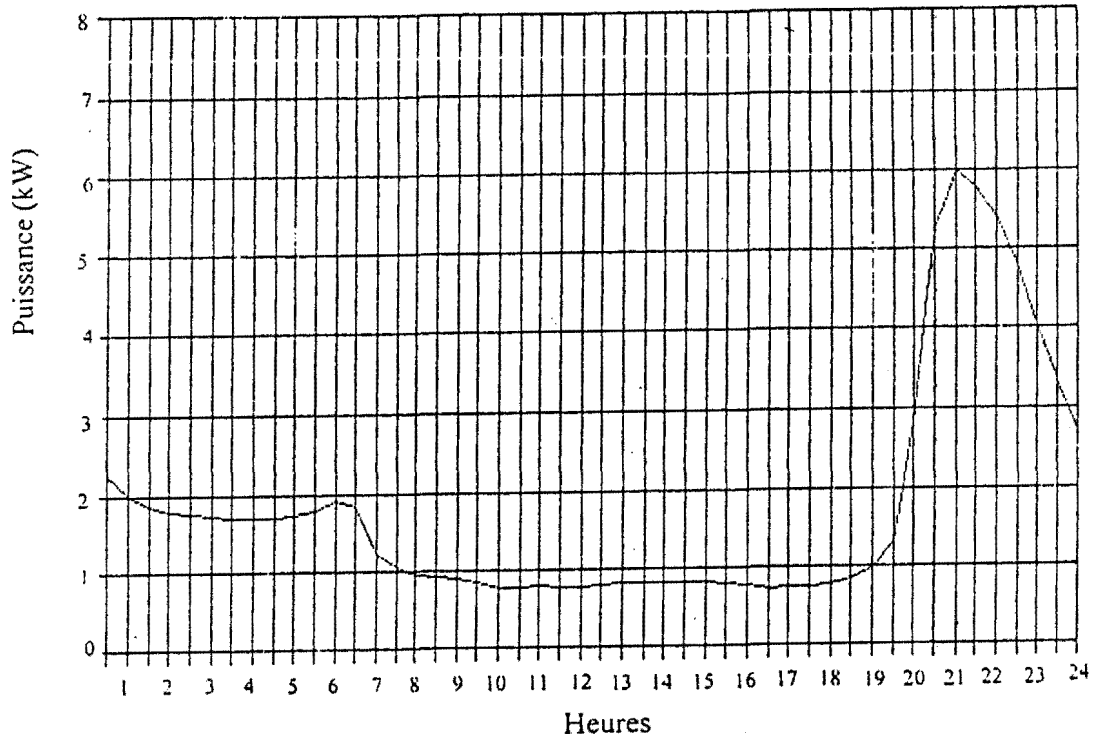
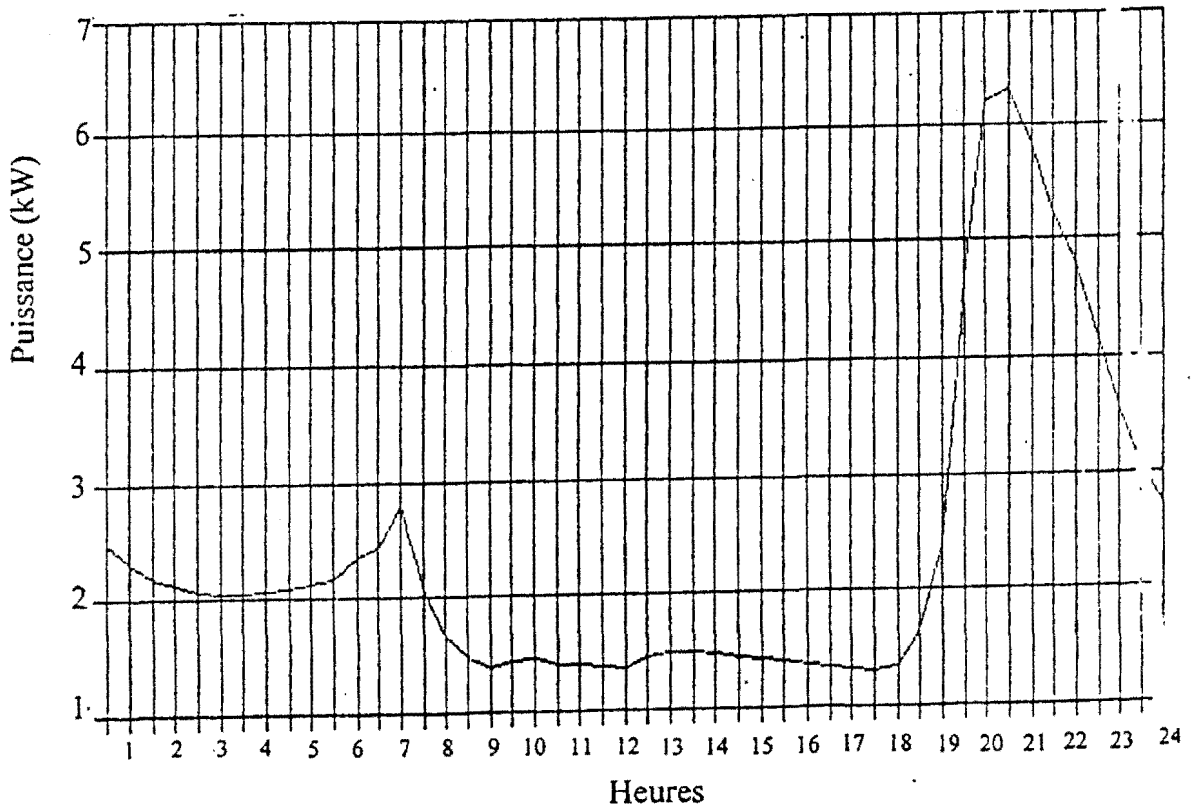


Figure 5. 12: Courbe de charge Ndiébel

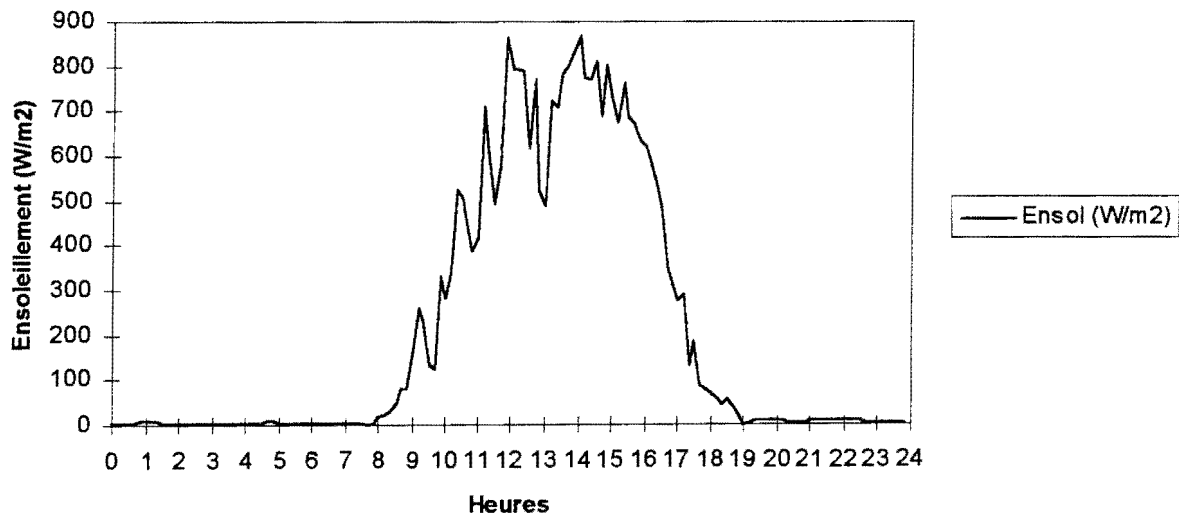


Dans le cadre des résultats expérimentaux de ce travail, nous présentons l'analyse des paramètres énergétiques (électriques et météorologiques) sur une journée type de la micro centrale de Ndiébel.

### *Ensoleillement*

On peut observer sur cette courbe (Figure 5.13) les heures de lever et de coucher du soleil. Le zénith est observé généralement à mi parcours de la journée. Cette caractéristique permet aussi d'évaluer, à partir de seuils variables, la durée du jour entrant en compte dans les modèles de caractérisation du site. La moyenne de cette durée ( $D_j$ ) est de 10 heures.

Les discontinuités relevées sont assimilables à des passages nuageux. Ceci se manifeste physiquement par une augmentation temporelle et spatiale de la nébulosité.



*Figure 5. 13: Evolution journalière de l'ensoleillement*

### *Température ambiante*

La température ambiante évolue avec l'ensoleillement pondérée d'une certaine inertie. Celle-ci dépend de l'atmosphère, de l'altitude, du vent et de la localisation du site considéré. (Figure 5.14) Un ciel couvert sur une longue durée a des effets sur la température. On observe la température minimale vers 10 heures et la température maximale vers 18 heures; l'évolution globale ayant une allure sinusoïdale.

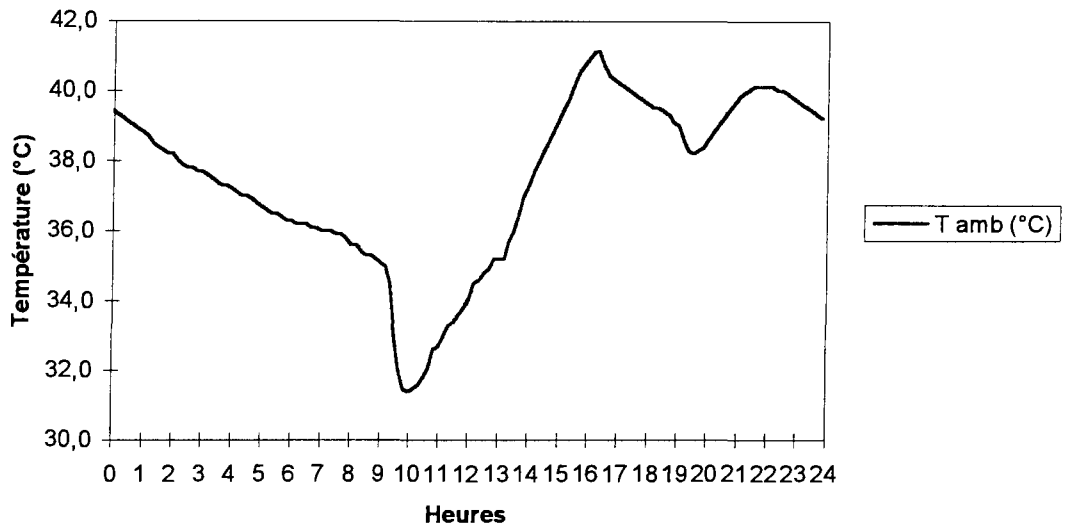


Figure 5. 14: Evolution de la température ambiante

#### Température des modules

Elle est homothétique à la température ambiante. La différence est constituée par un offset entre les deux températures. L'effet joule au niveau des jonctions du semi-conducteur constituant le module participe à cette hausse de température. (Figure 5.15)

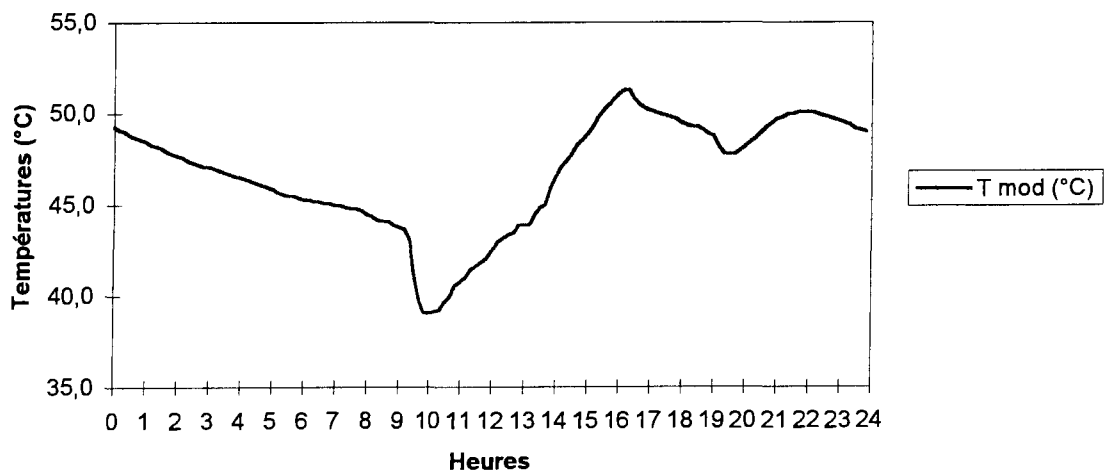
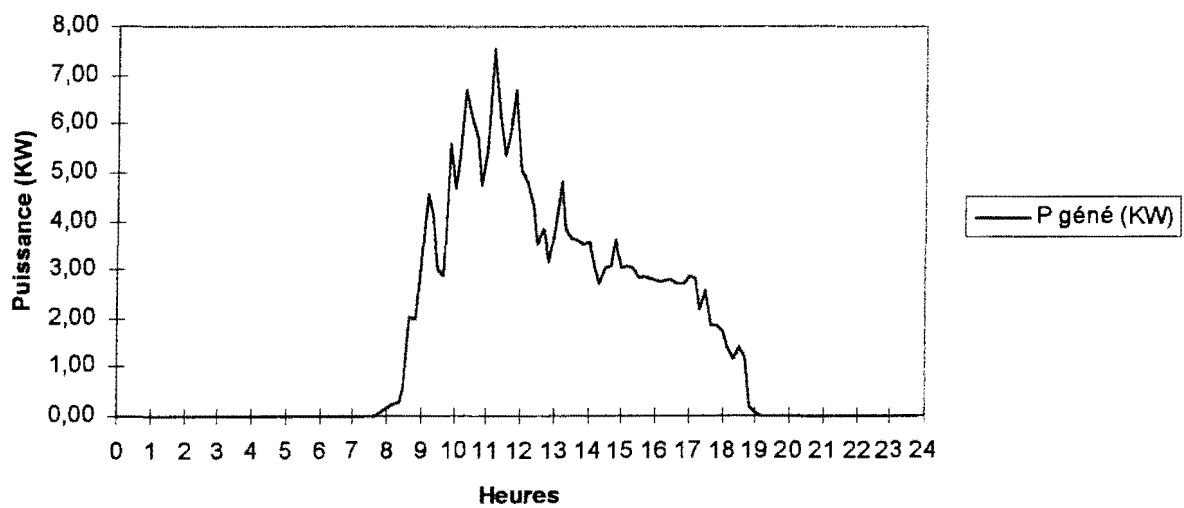


Figure 5. 15: Evolution de la température des modules

### *Grandeurs générateur: courant et puissance*

On peut noter une proportionnalité entre le courant et la puissance en sortie du générateur photovoltaïque.(Figures 5.16 et 5.17)

L'évolution de ces grandeurs dépend uniquement du mode de contrôle adopté. Dans le cas présent, une régulation se fait autour de la tension nominale des batteries. Celle-ci évoluant peu (4% maximum), le courant et la puissance sont fortement corrélés.



*Figure 5. 16: Evolution de la puissance de sortie du générateur*



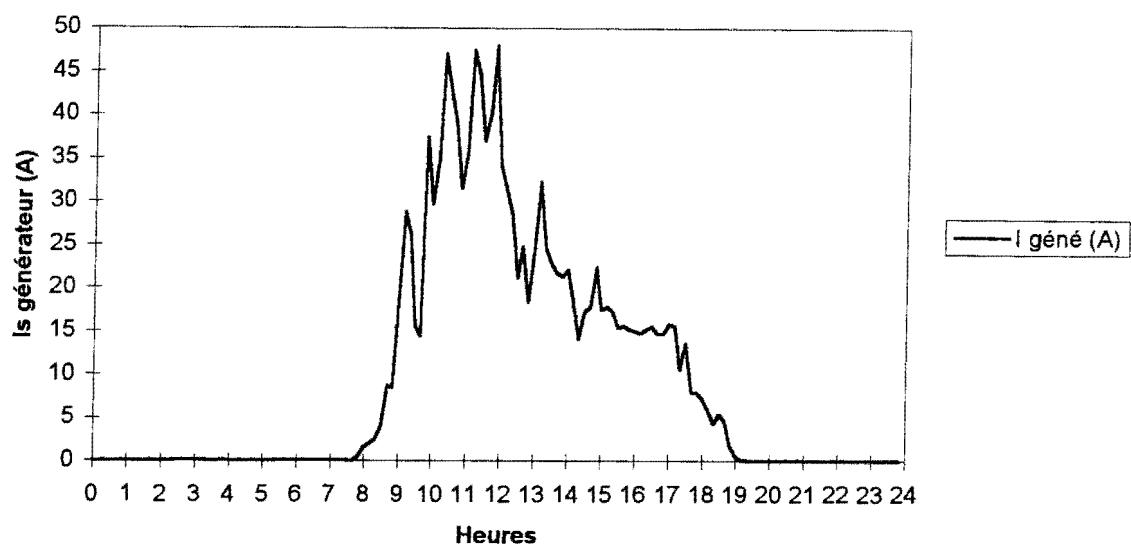


Figure 5. 17: Evolution du courant de sortie du générateur

#### *Profil de consommation*

Il présente deux extréma: 7 heures le matin au réveil; 21 heures le soir au coucher. (Figure 5.19)  
 Ces deux extréma sont liés aux activités domestiques et/ou éducationnelles. La proportionnalité qui existe entre le profil de charge et le courant à la sortie de l'onduleur permet de conclure à priori sur l'adéquation des charges à modèles résistifs utilisés dans la micro centrale (lampes, téléviseur, ... etc.). (Figures 5.18 et 5.20)

De 8 heures à 19 heures, il n'y a presque pas de consommation. Ce constat est lié aux utilisateurs qui vaquent dans la journée à des occupations ne nécessitant guère de l'énergie électrique.

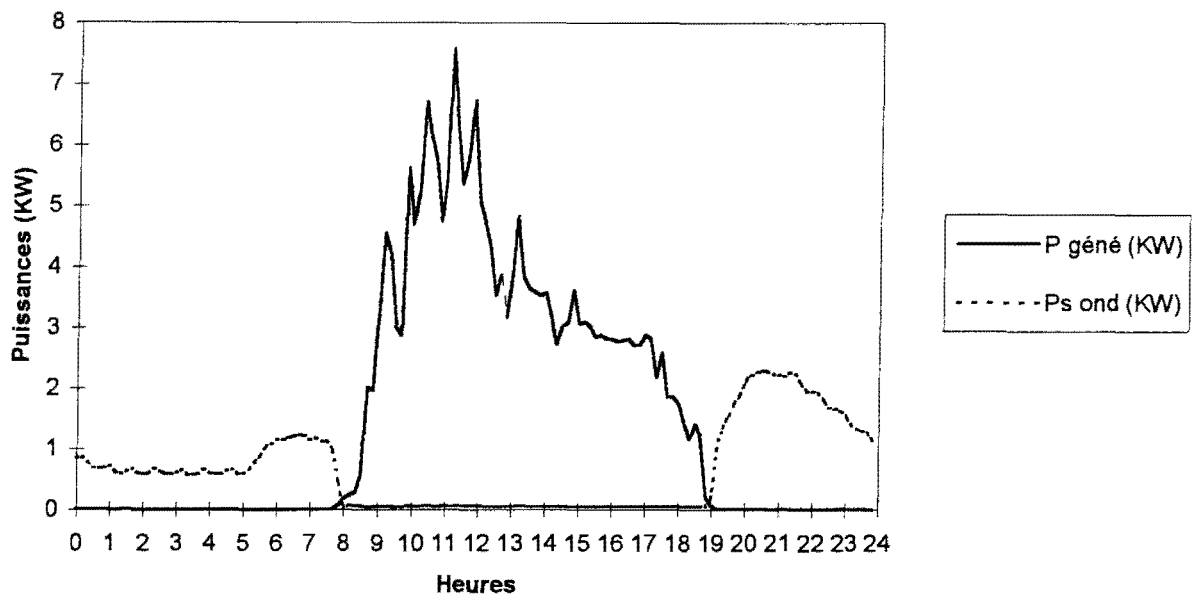


Figure 5. 18: Puissances fournie et consommée

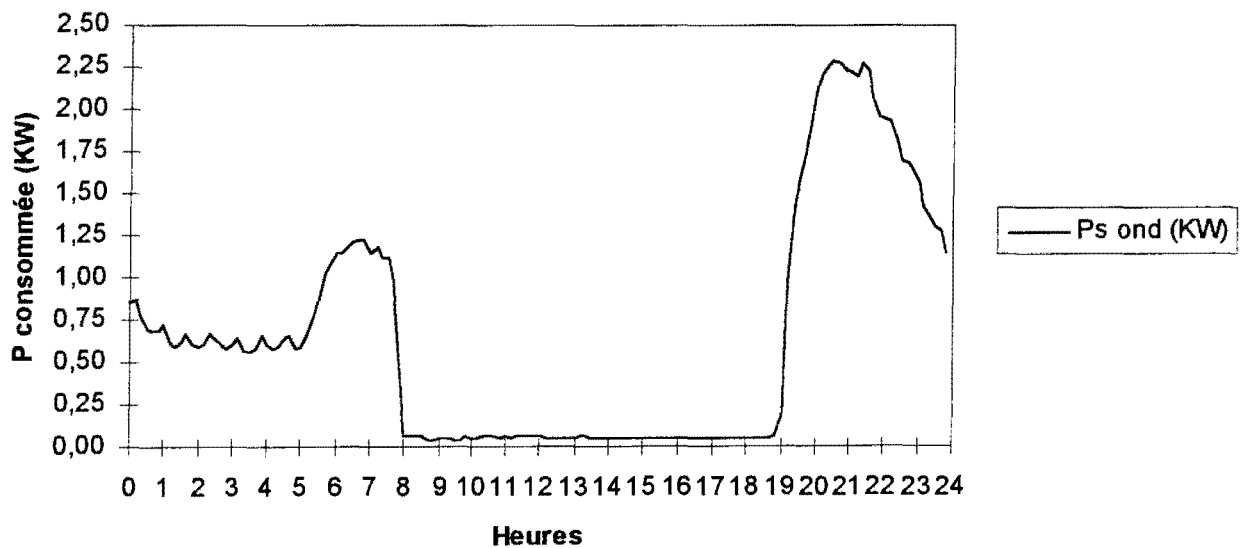


Figure 5. 19: Profil de charge journalier

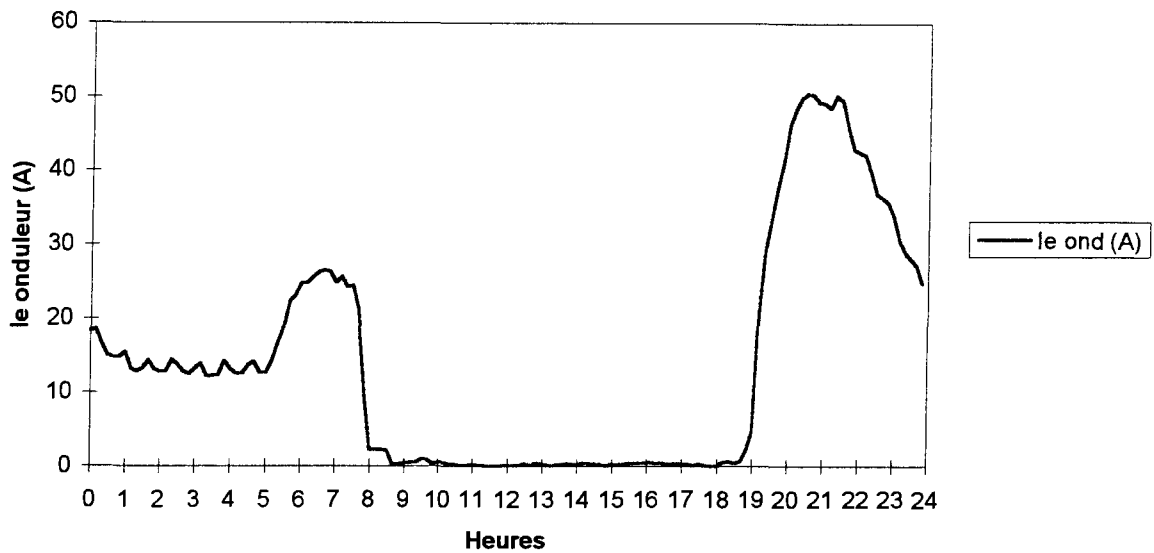


Figure 5. 20: Evolution du courant d'entrée de l'onduleur

#### *Fonctionnement de la batterie*

On constate que la tension aux bornes de la batterie évolue peu autour de la valeur nominale  $\pm 2\%$ . Cependant, une observation plus fine montre que de 7 heures à 19 heures la batterie est en charge (récepteur d'énergie) du fait de la quasi inexistence de consommation et de l'apport énergétique diurne du générateur. La batterie est sollicitée dès la tombée de la nuit où elle débite (mode générateur), la constante de temps de la décharge étant fonction du courant appelé par la charge. (Figures 5.21 et 5.22)

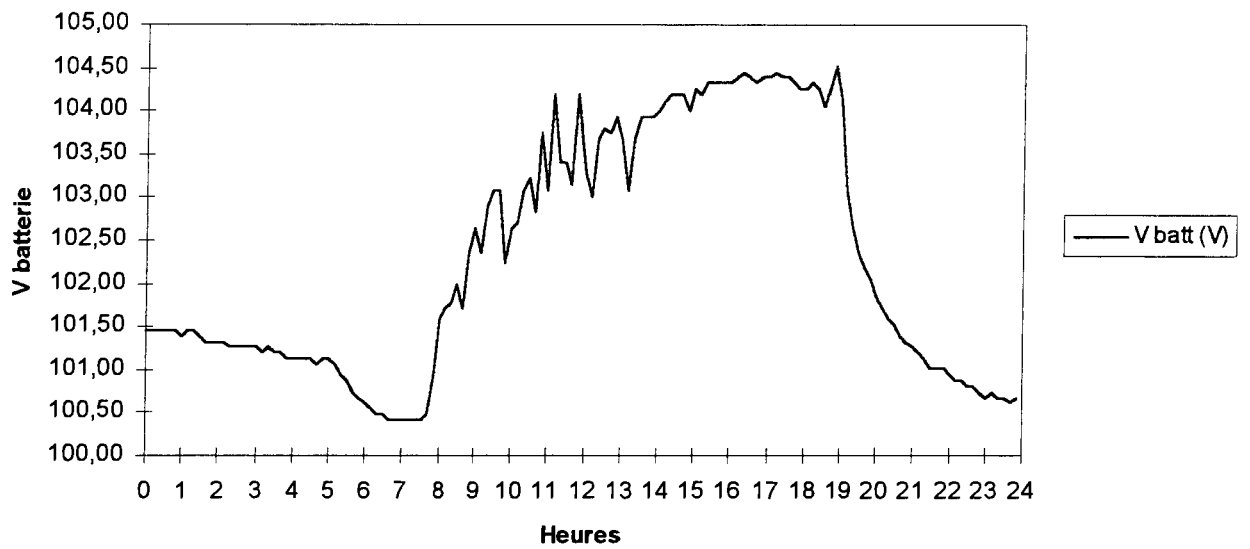


Figure 5. 21: Evolution de la tension aux bornes des batteries

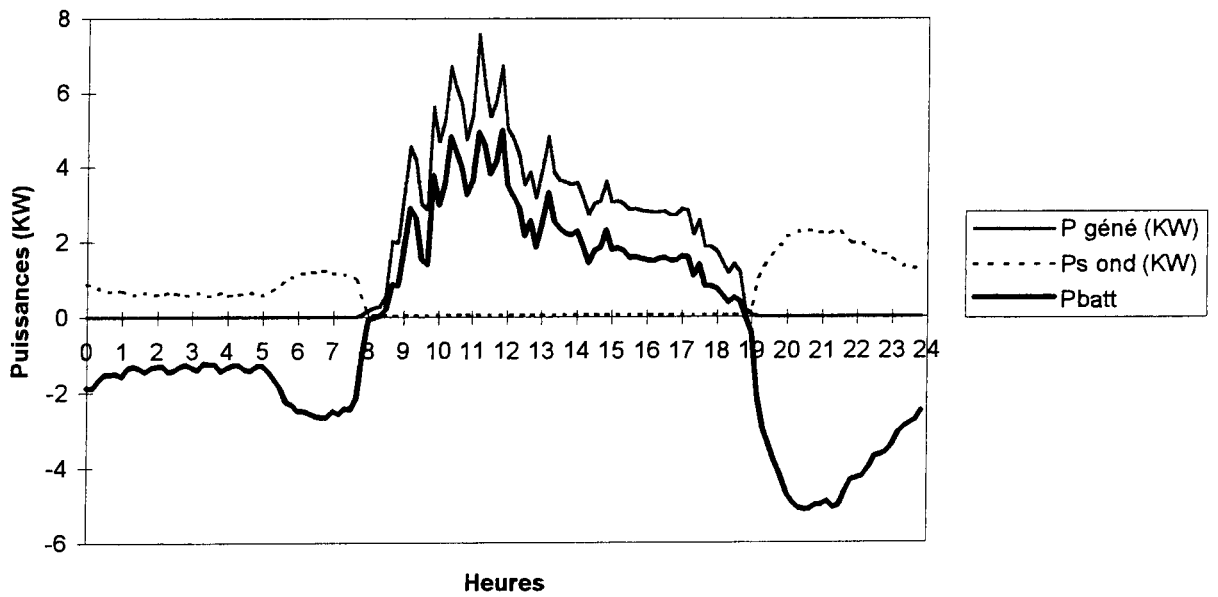


Figure 5. 22: Bilan PV - Batteries - Charge

## 5.5 - ETUDE ET REALISATION D'UN LOGICIEL D'ANALYSE DES PERFORMANCES D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE

### 5.5.1 - Introduction.

Il est nécessaire de suivre les performances d'un système [79], [80] pour des besoins de planification énergétique mais aussi pour affiner les modèles de dimensionnement des équipements en fonction des besoins énergétiques.

Pour ce faire, il est indispensable de disposer d'un outil performant pour le traitement des données brutes. Cet outil devra proposer un ensemble de traitements en vue de fournir les supports de base nécessaires au suivi des performances des installations.

### 5.5.2 - Cahier des charges.

#### 5.5.2.1 - Le système photovoltaïque.

Dans le cadre de ses activités au Sénégal, le PSAESP a implanté un certain nombre de micro-centrales énergétiques parmi lesquelles nous pouvons citer celles de Diaoulé, Ndiébel, Fatick, Mbassis. Une architecture type [7] de ces différentes stations est représentée à la figure 5.23.

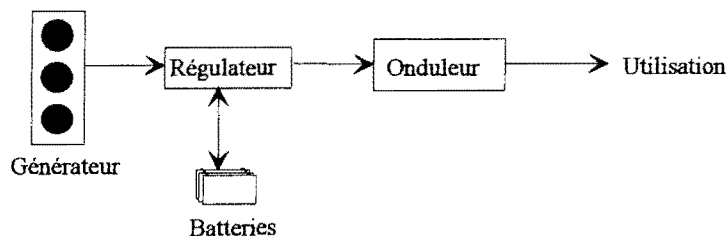


Figure 5. 23: Architecture d'un système photovoltaïque décentralisé type.

### **5.5.2.2 - Le système d'acquisition.**

Les sites sont équipés d'un système d'acquisition de données mobile: le MODAS (Mobile Data Acquisition System) [81]. C'est un système d'acquisition autonome capable de fonctionner dans les conditions les plus sévères imposées par l'environnement avec un maximum de sécurité pour les données.

L'unité d'acquisition stocke les données à intervalles de temps réguliers, programmables dans des cartouches-mémoire enfichables. Sur site, le MODAS est paramétré pour enregistrer aussi bien les données météorologiques que les grandeurs électriques.

Un lecteur de cartouches permet en différé la lecture des données et leur archivage sur support magnétique à partir d'un micro-ordinateur. La communication entre le lecteur de cartouche et l'ordinateur se fait à l'aide d'une interface série (RS 232C V24) ou parallèle (IEEE 488).

Une fois les données (ASCII) lues et stockées, la procédure de traitement de ces données peut être:

- manuelle à partir d'un outil de traitement grand public du type tableur, ce qui est long et fastidieux vu la quantité des données à traiter,
- automatisée, ce qui est l'objectif de cette étude.

### **5.5.2.3 - Grandeurs mesurées.**

Elles sont:

\* météorologiques:

- le rayonnement global dans le plan des modules ( $15^\circ$ ),
- le rayonnement diffus sur le plan horizontal,
- la température ambiante,
- l'humidité relative,
- la vitesse du vent

\* et électriques:

- puissance générateur (ou tension et courant du générateur),
- courant de sortie régulateur,
- courant d'entrée onduleur,
- puissance de sortie onduleur,

- tension batterie

#### **5.5.2.4 - Objectifs**

Le logiciel à concevoir devra, sur la base des données d'acquisition et de paramètres à calculer, proposer différents modèle de bilan:

- le bilan d'énergie irradiée,
- le bilan énergétique du système,
- les rendements des sous systèmes et des différents composants,
- les paramètres de performance.

L'ensemble de ces bilans seront présentés sous forme de tableaux et de graphiques [82].

### **5.5.3 - Développement logiciel**

#### **5.5.3.1- Généralités**

Un ensemble logiciel développé dans un environnement MS-DOS et constitué de deux programmes complémentaires permet d'exploiter les ressources du MODAS: le DATRA pour la lecture des données contenues dans une cartouche produit des fichiers archives contenant les résultats de mesure, et le DAILYVAL [83] pour une exploitation sommaire des fichiers produit par le DATRA.

Le logiciel **ADOPHE**, développé dans l'environnement Windows vient s'insérer dans cette structure logicielle et fournir un environnement de travail complet. Il est non seulement en mesure de lire la cartouche mais aussi d'exploiter les fichiers archives produit par le DATRA, fichiers qui contiennent les données de base du traitement.

**ADOPHE** a été développé en **Turbo Pascal** pour **Windows**.

Ce langage a été retenu pour sa simplicité de mise en oeuvre mais aussi et surtout pour la maintenabilité du code source des programmes.

En effet, l'environnement Windows devient un standard dans le monde de la micro-informatique et les applications qui y sont développées répondent à certaines normes qui en rendent la conduite intuitive. [84]

### 5.5.3.2 - Résultats de l'analyse

Une analyse conceptuelle préliminaire a permis de dégager les différentes fonctions que doit remplir le logiciel. La connaissance précise des différentes fonctions a conduit à une organisation des traitements en modules fonctionnels, lors du développement, présentés par la figure 5.24 suivante:

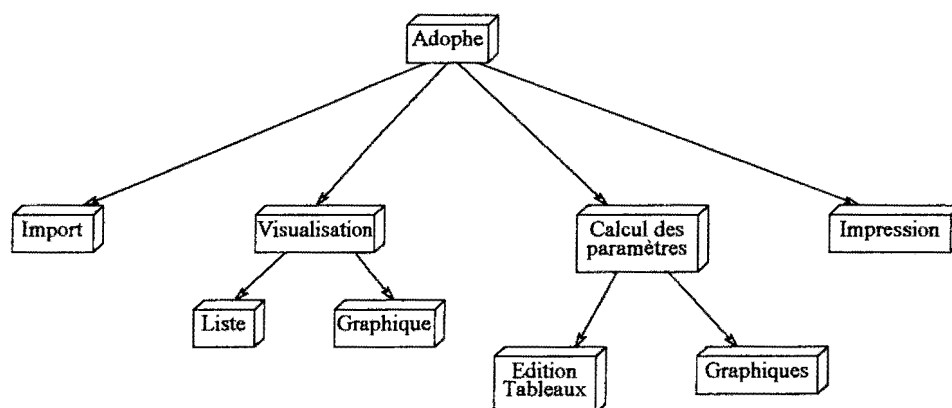


Figure 5. 24: Les modules fonctionnels.

- Le module **Import** assure entre autre la fonction lecture des données à partir de la cartouche et le stockage de ces données dans un fichier archive.
- Le module **Visualisation**, après formatage des données permet de présenter les différentes données telles que issues de l'acquisition. Cette visualisation peut se faire:
  - sous la forme d'une liste des différentes valeurs d'acquisition,
  - ou sous la forme d'un graphique.
- Le module **Impression** est la fonction d'archivage sur papier des différents résultats (tableaux et/ou graphiques) des différents traitements.
- Le module **Calcul des paramètres** est le module de traitement spécifique de Adophe. Il implémente les différents traitements imposés par le cahier des charges. Il a donc à sa charge le calcul des différents paramètres dans les tableaux de bilan énergétique, rendements et paramètres de performances.



### 5.5.3.3 - Equations de modélisation paramétrique.

Pour l'édition des différents tableaux et graphiques, le logiciel Adophe doit définir différents paramètres [85]. Ces paramètres sont calculés d'après les équations caractéristiques du tableau 5.3.

Puissance totale du générateur	Ppv	
Energie débitée pendant une période de référence	Epv	$E_{pv} = \sum_r P_{pv} * t_i$
Puissance de sortie du régulateur	Psr	$P_{sr} = U_{Batt} \cdot I_{sr}$
Energie de sortie régulateur	Esr	$E_{sr} = \sum_r P_{sp} \cdot t_i$
Puissance d'entrée onduleur	Peo	$P_{eo} = U_{Batt} \cdot I_{eo}$
Energie d'entrée onduleur	Eeo	$E_{eo} = \sum_r P_{eo} \cdot t_i$
Energie utile consommée	Evt	$E_{vt} = \sum_r P_{S_i} \cdot t_i$
Facteur de production du champ photovoltaïque	Ya	$Y_a = \frac{\sum_r P_{pv}}{P_{nom}}$
Facteur d'utilisation du système	Yf	$Y_f = \frac{\sum_r Evt}{P_{nom}}$
Facteur de production de référence	Yr	$Y_r = \frac{\sum_r P_{pv}}{R_{Gl,ref}}$
Ratio de performance	Pr	$P_r = \frac{Y_f}{Y_r}$
Perte de conversion du générateur	Lc	$L_c = Y_r - Y_a$
Perte système	Ls	$L_s = Y_a - Y_f$
Rendement du générateur sur une période de référence	$\eta_{pv,r}$	$\eta_{pv,r} = \frac{\sum_r P_g}{\sum_r G}$
Rendement système	$\eta_{s,r}$	$\eta_{s,r} = \frac{E_{vt,r}}{\sum_r G}$
Rendement sous-système (régulateur, batterie, onduleur)	$\eta_{ss}$	$\eta_{ss} = \frac{\eta_{ss}}{\eta_{pv,r}}$

Tableau 5.3: Calcul des différents paramètres.

#### 5.5.3.4 - Présentation logicielle

Suite à l'analyse conceptuelle préalable, la réalisation logicielle de Adophe aboutit à un puissant logiciel d'utilisation simple et conviviale, entièrement intuitive. De plus, l'utilisateur retrouve dans un même environnement, l'ensemble des fonctions dont il a besoin pour l'archivage des données d'acquisition et le traitement de ces données.

Pour une session de travail, il précise le site concerné. La figure 5.25 présente la boîte de dialogue qui lui permet de déterminer et valider son choix.

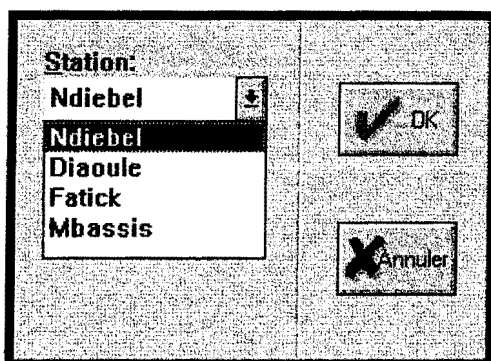


Figure 5. 25: Choix du Site.

L'ensemble des traitements possibles sont alors accessibles. De ce fait, on peut visualiser les données d'acquisition issues des fichiers archives. Une boîte de dialogue permet de saisir la date des données à visualiser.

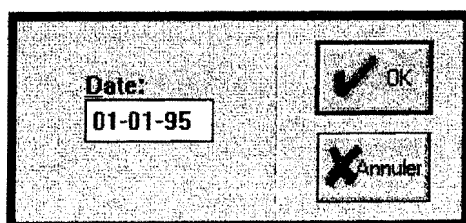
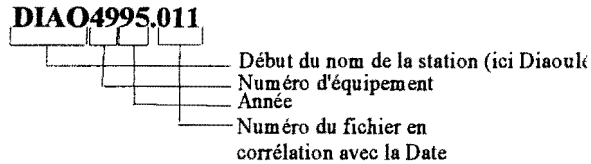


Figure 5. 26: Sélection d'une date.

La connaissance de la date est une donnée nécessaire pour le retrouver les données. En effet, les fichiers archives sont stockés selon un format qui est en corrélation avec la date comme le montre la figure 5.27.



*Figure 5. 27: Codage du nom du fichier archive*

Adophe retrouve dans la structure des fichiers archives, le fichier contenant les données de cette date, puis affiche l'ensemble des informations dans une nouvelle boîte de dialogue.

Cette boîte de dialogue propose dans une liste déroulante, l'ensemble des données pour la journée concernée suivant le pas programmé en phase d'acquisition. La liste peut être parcourue à l'aide des barres de défilement.

Comme il est possible de visualiser les données numériques, l'utilisateur peut souhaiter obtenir les mêmes informations sous une forme graphique. Etant donné le nombre relativement important des voies, un graphique qui comporte d'emblée les courbes issues de toutes les voies serait inexploitable. Pour cela, une boîte de dialogue permet à l'utilisateur de cocher les voies à afficher sur le graphique.

Station: NDIEBEL  
Date: 01-01-95

Heures	Ch1:	Ch2:	Ch3:	Ch4:	Ch5:	Ch6:	Ch7:	Ch8:
00:00	0.02	-0.10	132.99	41.40	4.16	-34.60	-43.65	1.86
00:10	0.02	-0.10	132.99	40.30	4.16	-34.50	-43.45	1.81
00:20	0.02	-0.10	132.99	36.50	4.16	-34.40	-43.35	1.64
00:30	0.02	-0.10	132.99	34.50	4.16	-34.20	-43.15	1.56
00:40	0.02	-0.10	132.99	36.90	4.16	-34.10	-42.95	1.66
00:50	0.01	-0.10	132.99	33.40	4.16	-34.00	-42.85	1.51
01:00	0.01	-0.10	132.99	32.00	4.16	-33.90	-42.65	1.45
01:10	0.01	-0.10	132.99	35.30	4.16	-33.80	-42.45	1.59
01:20	0.02	0.00	132.99	36.70	4.16	-33.60	-42.35	1.66
01:30	0.02	0.10	132.99	34.30	4.16	-33.50	-42.15	1.57
01:40	0.01	-0.10	132.99	34.60	4.16	-33.39	-41.94	1.55




Date:   

Figure 5. 28: Boîte de dialogue de visualisation des données d'acquisition.

Selectionner les voies à afficher:

<input checked="" type="checkbox"/> PUISSANCE GENERATEUR SOLAIRE	<input type="checkbox"/> TEMPERATURE MODULE
<input checked="" type="checkbox"/> COURANT DE SORTIE REGULATEUR	<input type="checkbox"/> PUISSANCE DE SORTIE ONDULEUR
<input type="checkbox"/> TENSION BATTERIE	
<input type="checkbox"/> COURANT D'ENTREE ONDULEUR	
<input type="checkbox"/> ENSOLEILLEMENT GLOBAL	
<input type="checkbox"/> TEMPERATURE AMBIANTE	



 

Figure 5. 29: Sélection des voies pour une visualisation graphique.

Le graphique correspondant est alors dessiné dans une fenêtre. Les courbes de chacune des voies sont identifiées par des couleurs différentes et, une légende de ces couleurs est proposée au bas du graphique.

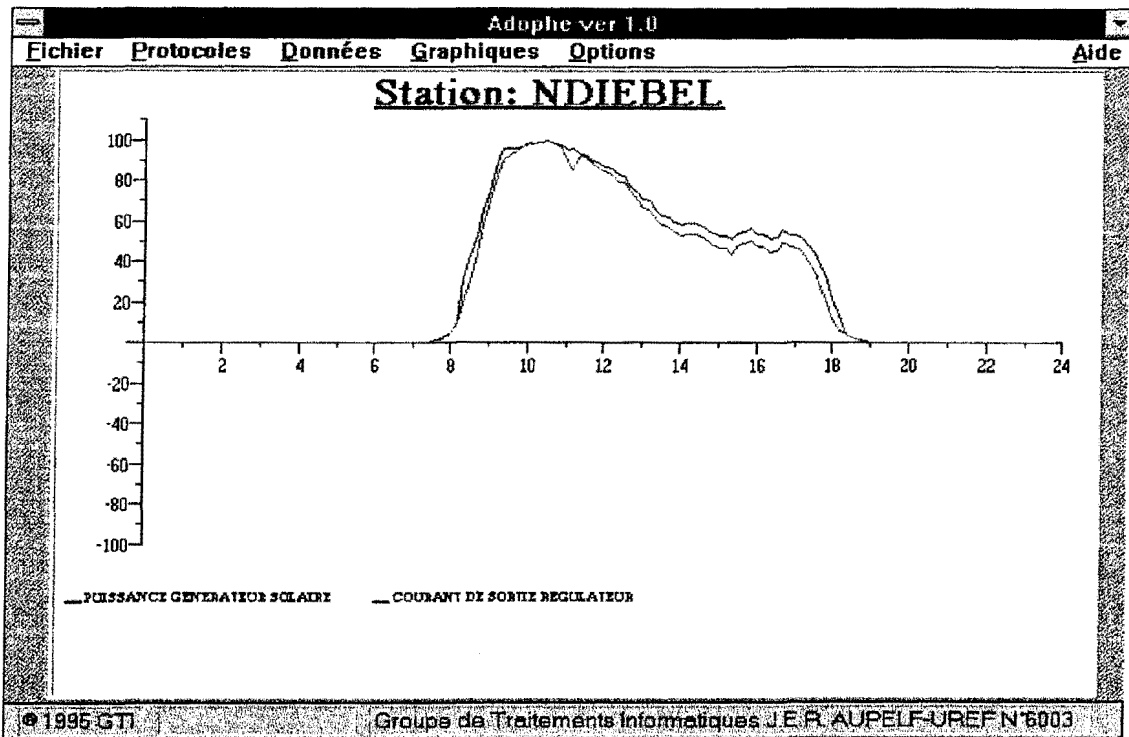


Figure 5. 30: Visualisation graphique des données d'acquisition.

Toutes ces opérations sont des opérations classiques de tous programmes permettant de faire du traitement de données.

La spécificité de notre application réside dans l'automatisation des tâches de calcul et d'édition des différents bilans. Les équations mises en œuvre sont celles du tableau 5.3.

L'utilisateur a le choix entre différents protocoles programmés comme le montre la figure 5.31.

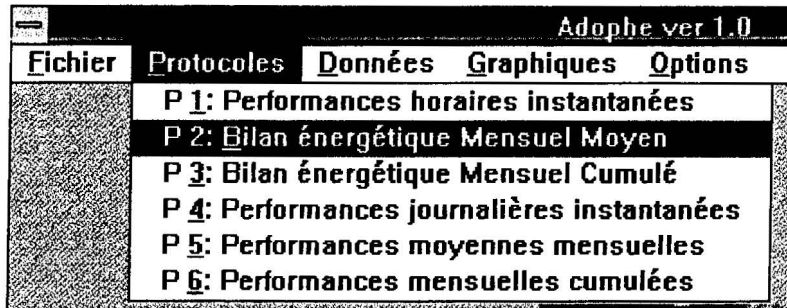


Figure 5. 31: Les protocoles programmés.

Chacun de ces protocoles correspond à un bilan imposé par le cahier des charges. Pour le protocole **P2** par exemple, qui est un bilan énergétique mensuel moyen, l'utilisateur doit préciser le début du traitement ainsi que la période de référence.

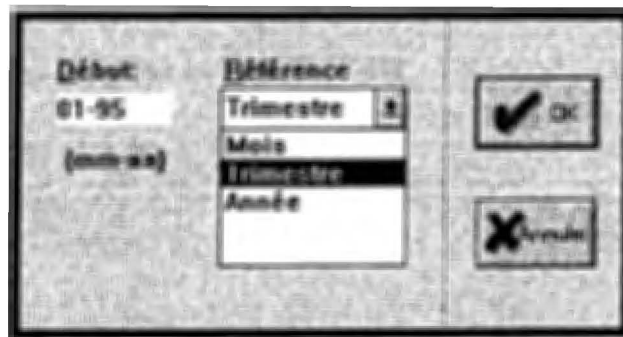


Figure 5. 32: Date de début et période de référence du traitement.

L'application effectue alors l'opération demandée sur la base des données existantes et présente les résultats sous la forme d'une liste dans une boîte de dialogue. Une exploitation graphique de ces données est également possible selon le protocole choisi sous forme de courbes ou sous forme d'histogrammes.

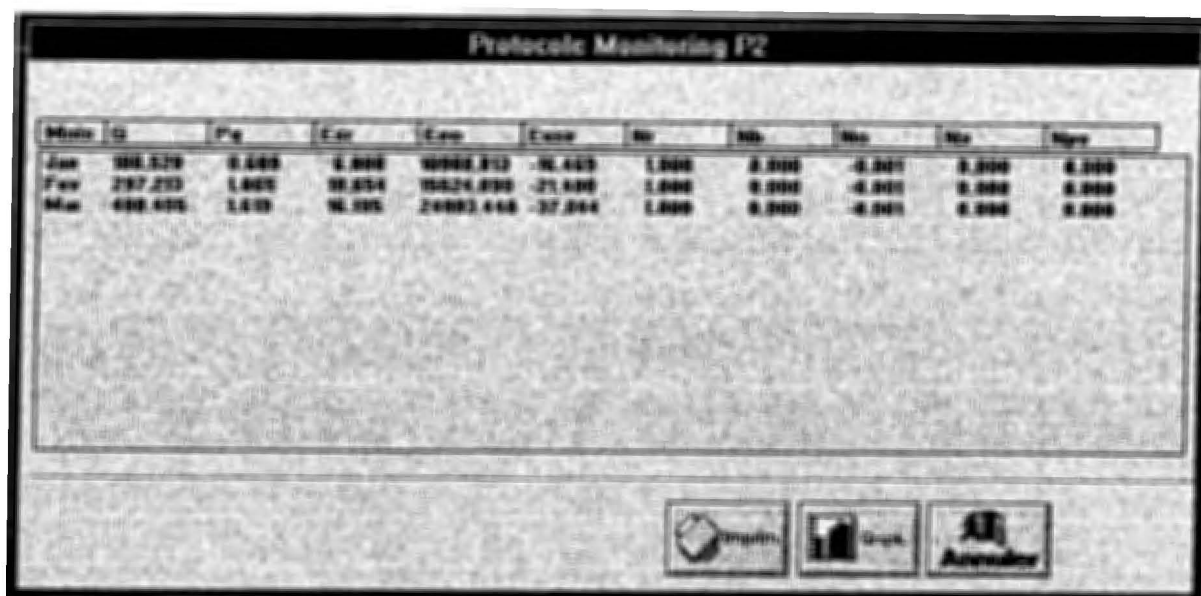


Figure 5. 33: Bilan énergétique mensuel moyen

#### 5.5.4 - Perspectives.

Le logiciel Adophe permet actuellement de produire à partir des données d'acquisition brutes, différents bilans sous la forme d'un ensemble de tableaux mais aussi avec des graphiques.

Cependant, il reste à proposer un module de correction des données pour permettre le traitement préliminaire de la base des données. Ce traitement consistera à supprimer d'éventuelles informations non significatives à l'aide d'algorithmes de traitement du signal spécifiques. Cela permettrait, une fois la base de données pré-traitée d'obtenir un bilan avec des résultats directement exploitables.

Dans la version présentée, l'application est très peu ouverte au monde extérieur. Or, l'intérêt même de l'environnement Windows est la possibilité d'échanger des données entre les applications. De ce fait, certaines techniques de programmation gagneraient à être implémentées pour en faire un outil de travail complet. Notamment les liens DDE<sup>1</sup> ou OLE<sup>2</sup> permettraient le

<sup>1</sup>DDE (Dynamic Data Exchange) est une forme de communication entre application.

<sup>2</sup>OLE (Object Linking and Embedding) est une liaison et imbrication d'objet.

dialogue de **Adophe** avec d'autres applications du type grand public comme Microsoft Excel ou Microsoft Word.

Enfin, dans son principe, Adophe doit évoluer vers un logiciel, lui, plus général, permettant d'assurer le suivi des performances de toute installation énergétique à partir de modèles génériques déterminés par l'analyse des données accessibles (météo, besoins énergétiques...).

## 5.6 - CONCLUSION

Le but principal de la réalisation des centrales de Diaoulé et de Ndiébel est expérimental. Il s'agissait d'adapter aux conditions sahéliennes des équipements de production allemande. Les premières années d'exploitation démontrent clairement que :

- ces équipements sont assez fiables à part quelques manques liés aux onduleurs
- la fiabilité des équipements photovoltaïques complets dépend de la qualité et de la bonne adaptation de chacun des maillons constituant le système
- la conception de cette source d'énergie devrait être faite avec prudence afin d'éviter soit un surdimensionnement coûteux, soit des ruptures d'approvisionnement en électricité.

S'il est vrai que les équipements de Diaoulé et de Ndiébel fonctionnent actuellement de façon satisfaisante, il n'en demeure pas moins vrai qu'un suivi technique rigoureux est nécessaire en vue d'assurer la pérennité de ces équipements.

Le logiciel Adophe dans sa version 1.0 remplit bien toutes les exigences en matière de traitements et d'éditations par rapport aux objectifs fixés. Les traitements proposés ont été appliqués sur les données d'acquisitions de plusieurs sites du PSAESP mais peuvent être utilisés dans un cadre beaucoup plus global de suivi des performances de centrales énergétiques.

Nous espérons qu'avec les améliorations proposées en terme de perspectives et pour lesquelles des travaux sont déjà en cours [86] , le logiciel Adophe deviendra très vite un outil générique de planification énergétique.



## Liste des symboles

- $U_j$  : tension de fin de charge des batteries d'accumulateurs  
 $P_{pv}$  : puissance totale du générateur  
 $E_{pv}$  : énergie débitée pendant une période de référence  
 $P_{sr}$  : puissance de sortie du régulateur  
 $E_{sr}$  : énergie de sortie régulateur  
 $P_{eo}$  : puissance d'entrée onduleur  
 $E_{eo}$  : énergie d'entrée onduleur  
 $E_{vt}$  : énergie utile consommée  
 $Y_a$  : facteur de production du champ photovoltaïque  
 $Y_f$  : facteur d'utilisation du système  
 $Y_r$  : facteur de production de référence  
 $Pr$  : ratio de performance  
 $L_c$  : perte de conversion du générateur  
 $L_s$  : perte système  
 $\eta_{pv,r}$  : rendement du générateur sur une période de référence  
 $\eta_{s,r}$  : rendement système  
 $\eta_{ss}$  : rendement de sous-système (régulateur, batterie, onduleur)

## CONCLUSION GENERALE

Nous avons vu précédemment que la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire avait connu depuis un peu plus d'une décennie, un spectaculaire développement non seulement en terme de puissance installée mais aussi en terme de diversité des services rendus.

Si l'on considère dans cette gamme, les applications dites énergétiques qui mettent en jeu des puissances de quelques dizaines de Watts à plusieurs kW, leur développement bien que de très répandu maintenant nécessite encore la levée d'un grand nombre d'incertitudes tant au niveau du dimensionnement, de la gestion que du fonctionnement réel des installations. En effet, si la plupart des systèmes réalisés ont donné satisfaction, les quelques analyses sommaires de fonctionnement réalisées, ont mis à jour un certain nombre de problèmes et la plupart du temps un net surdimensionnement des installations.

Pour améliorer la connaissance des systèmes photovoltaïques, plusieurs voies sont possibles. L'expérimentation en vraie grandeur peut apporter les réponses aux questions posées, mais cette solution est longue et coûteuse à mettre en oeuvre, et ne permet pas de généraliser les résultats. L'autre voie, que nous avons choisie, fait appel à la simulation sur ordinateur qui permet de traiter un grand nombre de cas. La validation des outils de simulation développés est nécessaire pour accréditer les résultats obtenus.

L'objet de cette thèse était de développer des méthodes d'analyse des systèmes photovoltaïques permettant d'accéder à une meilleure connaissance du fonctionnement des installations, et de fournir des éléments indispensables à la conception d'une méthode de dimensionnement de systèmes photovoltaïques plus précise que celles développées à ce jour. Pour atteindre ce but, nous avons retenu un schéma classique en matière d'analyse de systèmes, qui se singularisent par des modèles originaux, d'une part pour traiter les ressources climatiques, d'autre part pour caractériser de manière automatique les composants.

Dans un premier temps, nous avons analysé le fonctionnement de chaque organe des systèmes photovoltaïques, puis celui d'un système complet à l'aide de la représentation graphique de leur équation caractéristique.

Dans un second temps, à partir de l'étude théorique des différents phénomènes mis en jeu dans tous les composants du système, nous avons défini pour chacun d'entre eux un modèle mathématique capable de simuler leur comportement dans les conditions réelles de fonctionnement.

Ensuite, nous avons présenté l'informatisation de l'ensemble des modèles développés au travers d'un logiciel de dimensionnement et de simulation du fonctionnement d'un système, permettant, à la fois, la prédiction du fonctionnement ainsi que le suivi d'un système réel en régime dynamique.

Avant de valider l'ensemble du logiciel à partir d'expérimentation in situ, menées d'une part sur un prototype de laboratoire et d'autre part sur le terrain, les composants du système (modules, accumulateurs...) ainsi que le comportement de consommations énergétiques d'une communauté rurale ont été étudiés.

Enfin, deux exemples d'applications du logiciel sont développés.

- la prédiction du fonctionnement et des performances d'un système appliqué à l'analyse du dimensionnement. Cette phase conduit à l'ébauche d'une méthode performante de dimensionnement prenant en compte tous les paramètres sensibles du système.
- le suivi dynamique d'une installation réelle qui permet le diagnostic du système et l'analyse de ses performances.

En conclusion, nous rappelons l'ensemble des points primordiaux pour l'analyse des systèmes photovoltaïques, et indiquons les perspectives dans lesquelles de nouveaux axes de recherches pourraient être porteurs.

Notamment:

- l'utilisation de l'Intelligence Artificielle et des Systèmes Experts dans la maintenance des équipements,
- l'utilisation des outils télématiques, pour mettre en oeuvre, dans un environnement de réseau global, la supervision du fonctionnement des installations,
- de nouvelles approches utilisant une modélisation "objet" ou "génétique" pour une analyse encore plus fine et générique des systèmes énergétiques en général.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] - G. W. KINGSTON, I. F. GARNER; *"Amorphous Silicon (a-Si) PV power systems for commercial buildings"*; 9th Photovoltaic Solar Energy Conference Proceeding p795-800 - Freiburg Germany, September (1989).
- [2] - F. JUSTER; *"Les cellules solaires"* Editions Techniques et Scientifiques Françaises (1981).
- [3] - R. BERNAND, G. MENGUY, M. SCHWARTZ; *"Le rayonnement solaire, conversion thermique et applications"*. Technique et Documentation (1979).
- [4] - E. VASSY; *"Physique de l'atmosphère"*. Tome III (1966).
- [5] - ORGANISATION MONDIALE DE LA METEOROLOGIE; *"Aspects météorologiques de l'utilisation du rayonnement Solaire comme source d'énergie"*. NOTE TECHNIQUE N°172 OMM, N°557 (1987).
- [6] - *"Photowatt Solar Force"*. Guide (1987).
- [7] - C. LISHOU, M. ASSANI, J. RAHARIJAONA, L. PROTIN; *"Photovoltaic System for Rural and Remote Area Applications: Operational results of a 20kW PV installation in a Sahel village of Sénégal"*; 12th Photovoltaic Solar Energy Conference N°51P12 - Amsterdam Holland, Avril (1994).
- [8] - B. GRABOWSKI; *"Les fonctions de l'électronique"*. Tome 1 - DUNOD BORDAS (1974).
- [9] - B. V. TOORN; *"Renewable energy, a global view"* National Solar Energy Conference, Noordwijkerhout, The Netherlands, October (1987).
- [10] - P. CHARTIER; *"Le stockage électrochimique de l'électricité et son application au stockage de l'électricité photovoltaïque solaire"*. 3ème séminaire sur l'énergie solaire. Trieste (1982).
- [11] - T. S. DAVIES & al; *"The application of energy storage in wind energy conversion"*; International Conference on Energy options, GBR (1987).
- [12] - H. G. GEYER & al; *"Wind/Solar electricity generation for stand alone systems with battery and hydrogen storage"*. International Conference on Energy options, GBR (1987).
- [13] - F. DALIBARD; *"L'accumulateur au plomb dans l'industrie photovoltaïque solaire"*. 2ème séminaire sur l'énergie solaire - Trieste (1980).
- [14] - M. BROUSSLY; *"Stockage électrochimique pour le véhicule électrique"*. Journée d'études Stockage de l'énergie électrique, SEE. CNAM-Paris (1996).
- [15] - P. A. NDIAYE; *"Etude et modélisation du potentiel éolien sur le site de Dakar. Application à la conception d'aérogénérateurs optimisés pour ce site"*. Thèse Docteur-Ingénieur, ENSUT Dakar (1988).
- [16] - BENYAHIA; *"Economic viability of photovoltaic systems as an alternative to diesel power plants"*. Photovoltaic Solar Conference, Freiburg Germany (1988).
- [17] - D. G. S. CHUAN; *"Development of photovoltaic solar systems for urban applications"*. Regional Seminar and Wordkhop on Solar Energy Applications in the tropics, Singapour-UNESCO, (30-31 Octobre ler Novembre 1980).
- [18] - M. ADJ; *"Etude et réalisation d'un prototype de réfrigérateur solaire à réserve de froid destiné à la conservation des vaccins"*. Thèse Docteur-Ingénieur, ENSUT Dakar – Novembre (1987).

- [19] - B. KEITA, M. CADENE, G.W. COHEN-SOLAL, P. CHARTIER; *"Une station de pompage alimentée par générateur photovoltaïque au Sahel"*. 3<sup>ème</sup> séminaire sur l'énergie solaire - Trieste (1982).
- [20] - Y. LAMBERT; *"Le générateur Solaire-Eolien du centre expérimental rural d'énergie à Niaga-Wolof Sénégal"*. AFME - Revue internationale d'héliotechnique p 18-24 2<sup>ème</sup> semestre (1983).
- [21] - D. Le GOURIERES; *"Energie éolienne. Théorie, conception et calcul pratique des installations"*; Editions Eyrolles (1980).
- [22] - C. NICHITA; *"Etude et développement de structures et lois de commande numériques pour la réalisation d'un simulateur de turbine éolienne de 3kW"*. Thèse de Doctorat – Université du Havre - (1995).
- [23] - M. BORDIER, E. NOGARET; *"Gestion et dimensionnement des systèmes de production utilisant les ENR dans les réseaux électriques isolés"*. Ecole des Mines Paris - Centre d'Energétique - (1989).
- [24] - F. VALETTE; *"Simulation et Optimisation des systèmes énergétiques"*. Thèse de Doctorat - INSA Toulouse - (1986).
- [25] - C. KRAIF, S. BILLO, P. ROUAN, L. PROTIN; *"Real time control of the power provided by aerogenerators from a single specialized processor"*. IFAC Symposium on Microcomputer Application in Process Control, Proceeding Vol 1, pA428-A4-33 - Istambul July (1986).
- [26] - C. LISHOU , C. KRAIF , G. SOW , L. PROTIN; *"The optimisation of the photovoltaic generator working and energy transfer management, from two specializedprocessors"*. 8th EP.S.E.C Proceeding Vol 1, p386-390 - Florence, Italy Mai (1988).
- [27] - J. M. ROLLAND & al; *"A photovoltaic generator powering an underwater centrifugal pump coupled to a synchronous motor using a current inverter"*. International Congres on electrical machines, ICEM'86 (1986).
- [28] - B. DAKYO; *"Etude et réalisation de dispositifs à commande numérique pour l'alimentation d'une machine synchrone à aimants permanents par générateur photovoltaïque. Stratégies de commande pour le pompage au fil du Soleil"*- Thèse de Doctorat, Université du Havre (1988).
- [29] - C.LISHOU, G. SOW, P. ROUAN et L. PROTIN; *"Contrôle par un processeur spécialisé de la puissance fournie par un générateur photovoltaïque. Algorithme de recherche de puissance extrémale"*. Séminaire RAIST Proceeding p57-62 - KUMASSI (1986).
- [30] - C. LISHOU; *"Optimisation en temps réel du fonctionnement du générateur Photovoltaïque d'une microcentrale énergétique et gestion du transfert d'énergie par processeurs spécialisés"*. Thèse Docteur Ingénieur, ENSUT Dakar (1987).
- [31] - Th. WILDI; *"Electrotechnique"*. Les Presses de l'Université LAVAL QUEBEC Canada (1978).
- [32] - B . DAKYO & al; *"Photovoltaic systems with inverter fed permanent magnets synchronous machine"*; International Conference on Electric Drivers, ICED '88 (1988).
- [33] - JM. ROLLAND, S.ASTIER, L. PROTIN, C. MASSELOT, M. LAJOIE-MAZENC; *"Modélisation analytique d'un système de pompage photovoltaïque utilisant une machine synchrone à commutation naturelle: fonctionnement optimal et critères de constitution"*. Revue de Physique Appliquée, N°23, (1989).

- [34] - F. LASNIER, T.G. ANG; "*Computer package for Photovoltaic System Sizing, Design and Financial Evaluation*"; Asian Institute of Technology, Bangkok (1986).
- [35] - Y. J.WANG; "*The sizing of Stand alone Photovoltaic Systems*". Asian Institute of Technology reseach study, Bangkok (1987).
- [36] - WRDC "World Radiation Data Center" <http://wrdc-mgo.nrel.gov> (1997).
- [37] - S. CHUNGAIBULPATANA; "*Model for optimizing the solar plant storage tank volume in Thailand*"; Asian Institute of Technology Thèse N°ET-81-9, Bangkok (1981).
- [38] - H. S. RAUSCHENBACH; "*Solar Cell Array Design Handbook*". Collections Van Nostrand-Reinhold , New York (1980).
- [39] - A. LAUGIER - J.A. ROGER; "*Les photopiles solaires*" Tech&doc (1981).
- 40] - A. LOUCHE, G. NOTTON, P. POGGI, G. PERI; "*Global Approach for an Optimal Grid Connected PV System Sizing*". 12th Photovoltaic Solar Energy Conference, p.1638-1641 Amsterdam Holland, (1994).
- [41] - T. G. ANG; "*Analysis of a compression refrigeration supplied by photovoltaic power*"; Asian Institute of Technology Thèse N°ET-84-10, Bangkok (1984).
- [42] - USDOE; "*Handbook for battery energy storage for PV Power systems*". US Departement of Energy, Washington DC (1979).
- [43] - C.M. SHEPHERD; "*Design of Primary and Secondary Cells*". Solar Energy, Vol 4, p97-107 (1986)
- [44] - T. TOUMIYA, T. MATSUO; "*Study on modelling and its parameter estimation of a multibladed windmill*"; International Journal of Energy Research, Vol.15 p.437-449, (1990).
- [45] - B. GRAIS; "*Méthodes statistiques*" Editions Dunod (1988)
- [46] - NG. DIEYE; "*Contribution à la réalisation d'une microcentrale multigénérateurs éoliens et photovoltaïques: Simulation du fonctionnement et gestion en temps réel de l'énergie par calculateurs dans un environnement multiprocesseurs*". Thèse Docteur Ingénieur, ENSUT Dakar (1990).
- [47] - C. LISHOU, NG. DIEYE, P. ROUAN, L. PROTIN; "*Software simulation of Renewable Energy Power Plant on the Site of Dakar*". ISES Solar World Congrès, p245-250 - Harare Zimbabwe, Septembre (1995).
- [48] - G. MASINI, A. NAPOLI, D. COLNET, D. LEONARD, K. TOMBRE; "*Les langages à objets*". InterEditions, (1990).
- [49] - B. MAMPASSI, R. ADJAKOU, C. LISHOU, L. PROTIN; "*Discrete Simulation of a Renewable Energy System: Application to the Daily consumption Optimization*". 14th IASTED MSO'96 p140-145 - Goald Coast, Australie Mai (1996).
- [50] - NG. DIEYE, C. LISHOU, G. SOW, L. PROTIN; "*Real time simulation of an energy microstation on microcomputer*"; Pergamon Press Vol 3, p2020-2024 - ISES Solar World Congress, Kobe Japan September (1989).
- [51] - R.M. FAYE; "*Contribution au développement matériel et logiciel d'une structure multiprocesseur de gestion pour une microcentrale énergétique*". Mémoire d'Ingénieur, ENSUT Dakar (1989).
- [52] - Revue Microprocesseurs et Systèmes; "*Environnement multiprocesseur sous OS-9/68k temps réel*" N°18 Février (1987).

- [53] - NG. DIEYE, C. LISHOU, G. SOW, L. PROTIN; *"Multiprocessor control of a renewable energy micropower station"*; Proceeding Vol 2, p15.9.1-15.9.6 - INTELEC 89, Florence Italie (1989).
- [54] - L. HANNEBICQUE, P. JAULENT; *"Le Systeme OS-9"*. Editests, Février 1987.
- [55] - R. DAVID, H. ALLA *"Du Grafset aux Réseaux de Pétri"*. Hermes, Paris(1989).
- [56] - C. LISHOU, P. ROUAN, B. DAKYO, L. PROTIN; *"Application of PETRI nets to the modelling of a wind solar power plant control system"* Proceeding Vol 1 - p186-190 - INTELEC 93, Paris (1993).
- [57] - M. VILLAIN; *"Contribution au développement des stations solaires et météorologiques au Sénégal : Centrale de mesures et suiveur solaire commandés par microordinateur"*. Thèse Docteur-Ingénieur ,Toulouse (1981).
- [58] - SILICONIX ANALOG SWITCH DATA BOOK; Juin (1976).
- [59] - S. BILLO; *"Contribution à l'optimisation, en temps réel du fonctionnement de deux aérogénérateurs"*. Thèse Docteur-Ingénieur, ENSUT Dakar (1989).
- [60] - C.LISHOU-P. ROUAN-NG. DIEYE -L. PROTIN; *"Graphical Supervision of a wind/solar micro power station using a Mac microcomputer"* - 2nd International Conf on new energy systems Proceeding p151-159 - Istambul - (Turquie) -Août (1995)
- [61] - A. KAUFMANN - D. GROUCHKO - R. CRUON; *"Modèles mathématiques pour l'étude de la fiabilité des systèmes"* - Masson , (1975)
- [62] - A. VILLEMEUR; *"Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels"* – Eyrolles, (1988)
- [63] - H. NUSSBAUMER; *Informatique Industrielle IV Sécurité sûreté, fiabilité"* - Presses Polytechniques Romandes, (1987)
- [64] - D. BOITEL - C. HAZARD; *"Guide de la maintenance"* - Nathan, (1987)
- [65] - UIC; *"Les cahiers de sécurité: les différentes méthodes d'analyse de sécurité dans la conception d'une installation chimique, première méthode: l'analyse préliminaire des risque"*; Mars (1980)
- [66] - CEI; *"Techniques d'analyse de la fiabilité des systèmes. Procédures d'analyse des modes de défaillance et de leurs effets"*; Publication 812, (1985)
- [67] - A. PAGES - M.GONDRAN; *"Fiabilité des systèmes"*; Eyrolles, Paris, (1980)
- [68] - W. E. VESELY; *"Comment on the time dependent methodology for fault tree evaluation"*; Nuclear Engineering and design, vol.22 p.170-172; (1972)
- [69] - C. LIEVENS; *"Sécurité des systèmes"*; Cepadues Editions, Toulouse; (1976)
- [70] - K. TERPSTRA; *"Phased mission analysis of maintained systems. Study in reliability and risk analysis"*; Thèse Fondation de la Recherche Energétique Hollandaise; Déc. 1984
- [71] - R. PYKE; *"Markov renewal processes with finitely many states"*; Annales de mathématiques stat. vol.32, N°4, p. 1243-1259; (1971)
- [72] - L. V. D. HOVEN; *"The microcomputer's first truly distributed real time multiprocessor system"*; Journal A, Vol.26, N°1, Janvier (1985)
- [73] - J. DRUGET & al; *"Informatique industrielle: Etude de cas dans un environnement de production"* Dunod 1989
- [74] - RDF 93; *"Recueil de données de fiabilité des composants électroniques"* CENT 1993

- [75] - C. MARCOVICI - J.C. LIGERON; *"Utilisation des techniques de fiabilité en mécanique"* Tech&Doc Lavoisier (1984)
- [76] P. LYONNET; *"La maintenance: Mathématiques et méthodes"* Tech&Doc Lavoisier (1988)
- [77] M. ASSANI DAHOUEON; *"Les centrales solaires villageoises"* Rapport Séminaire GTZ Décembre (1991)
- [78] D.R. CLARK - S.A. KLEIN - W.A. BECKMAN; *"A method for estimating the performance of photovoltaic systems"* Solar Energy V33 p551 (1985)
- [79] T.A. REDDY - J.M. GORDON - I.P.D. de SILVA; *"Mira: A one repetitive day method for predicting the long term performance of solar energy systems"* Solar Energy V39 p123 (1988)
- [80] H. SUEHRCKE; *"A performance prediction method for solar energy systems"* Solar Energy V48 p169 (1992)
- [81] NES; *"Modas 12 Data logger manual"* NES (New Energy System), (1988)
- [82] JRC; *"Analysis an Presentation of Monitoring Data"* - Guidelines for the Assessment of Photovoltaic Plants Document B: -JRC, Ispra, June (1990)
- [83] ANDREAS WAGNER; *"Manuel logiciel DATRA DAILYVAL version 7"* GTZ Nov. (1989)
- [84] JEAN-PIERRE LOVINFOSSE; *Maîtriser OLE 2.0 sous Windows "Au cœur de Windows"* Collection Marabout, (1994)
- [85] JRC; *"Photovoltaic System Monitoring"* - Guidelines for the Assessment of Photovoltaic Plants Document A: - JRC, Ispra, June (1991)
- [86] M. PADONOU - C. LISHOU, N. DIEYE - L. PROTIN; *"Real time control of renewable energy micro power station by networked micro controllers"* N°P4A35 -14th EPSEC Barcelone, Juillet (1997)