

**RÉPUBLIQUE DU SENEGAL**

**UNIVERSITÉ CHEIKH ANTA DIOP  
DE DAKAR**



GM.0008

NUM

**ÉCOLE SUPÉRIEURE POLYTECHNIQUE  
Centre de Thiès**

**DÉPARTEMENT DU GÉNIE MÉCANIQUE**

**Projet de fin d'études**

En vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur de Conception

Titre :

**OPTIMISATION DE LA CONCEPTION D'UNE  
CENTRALE HYBRIDE PV - DIESEL POUR  
L'ÉLECTRIFICATION RURALE :  
Application à la centrale de Dionewar-Niodior**

Auteur : M. **Mouhamadou BA**

Directeur interne : M. **Cheikh WADE**

Codirecteur : M. **Mansour Assani DAHOENON**

**Juillet 2005**



# DÉDICACES

*Je dédie ce travail :*

*A Ma Mère,*

*A Mon Père,*

*Pour leurs sacrifices et leurs inlassables efforts et soutiens qu'ils ne cessent de déployer afin que je réussisse et m'épanouisse ;*

*A Mes Frères et Mes Sœurs,*

*Pour leurs soutiens moral et matériel pour que j'accède à une bonne formation,*

*A Mes Amis*

*De près ou de loin, ils constituent un environnement qui justifie pour moi le sens de vouloir accéder à une étude de qualité,*

# REMERCIEMENTS

*LOUANGES A ALLAH QUI M'A DONNÉ LE COURAGE ET M'A ACCORDÉ  
LA GRACE D'ACCOMPLIR CE STAGE ET DE RÉDIGER CE RAPPORT*

L'achèvement de ce travail est certes le fruit d'un effort personnel, mais aussi de l'appui et des conseils de plusieurs bonnes volontés envers lesquelles je tiens à témoigner toute ma profonde gratitude.

Qu'il me soit permis donc de remercier particulièrement :

- **Monsieur Cheikh WADE**, Conseiller Technique au Ministère des Mines et de l'Energie, pour avoir bien voulu proposer et diriger ce projet ;
- **Monsieur Mansour Assani DAHOUENON**, Codirecteur du projet et Responsable de la composante Electrification rurale du PERACOD-GTZ (Programme pour la Promotion de l'Électrification Rurale et de l'Approvisionnement en Combustible Domestique), pour son soutien constant et sa disponibilité tout au long de cette étude, notamment pour la documentation ;
- **Le PERACOD**, qui a déployé tous les moyens nécessaires pour bien mener cette étude dans les meilleures conditions
- **Monsieur Alassane BA**, responsable des suivis des centrales de la zone du Delta du Saloum
- **Monsieur Paul DEMBA**, professeur à l'ESP pour ses conseils avisés ;
- **Monsieur Ngor SARR**, professeur à l'ESP pour son soutien pédagogique ;
- **Monsieur Gaskel GNING**, professeur à l'ESP pour ses documents;
- **Monsieur Talla N'DIAYE**, professeur à l'ESP;
- **Tous ceux** qui, de près ou de loin, ont contribué à l'accomplissement de ce travail et qui ont fait preuve de parfaite collaboration tout au long de cette étude.

# RÉSUMÉ

Le but de ce projet de fin d'études est d'optimiser la conception des centrales hybrides PV-Diesel destinées à l'électrification rurale.

Le gouvernement du SENEGAL s'est donné l'élan de faire accéder à tout un chacun le minimum de confort et de sécurité économique et social dont l'électricité est la base incontournable.

La centrale pilote a été ainsi réalisée avec la coopération Sénégal-Nippon en 1998 dans les îles de Dionewar et Niodior. Cette aubaine bien accueillie par les populations commence à devenir cauchemar dès lors que la centrale ne remplit pas correctement les objectifs escomptés par les entrepreneurs et les usagers.

Dans le but de bien maîtriser les centrales, la station pilote mérite une étude approfondie des paramètres de conception de ses composants pour révéler les dysfonctionnements, leurs causes et éventuellement des solutions adéquates.

L'étude permettra de synthétiser les différents problèmes de la centrale afin de présenter un plan de diagnostic des composants clés.

L'exploitation des données de surveillance de la centrale nous a permis de mener l'étude énergétique et technologique de la centrale en incluant l'impact de la demande future et de la capacité de production.

Le planning de fonctionnement actuel ne permet pas une exploitation nominale de la centrale. Bien que toutes les charges y compris les appareils non domestiques soient reportées aux plages horaires du groupe d'appoint qui n'atteint même pas 80% de sa puissance nominale. L'étude montre que la centrale ne satisfait pas les demandes sans l'appui d'une planification et pourtant bien dimensionnée au départ dans le plan énergétique.

L'étude révèle aussi que l'une des causes principales de la non production de la centrale en P.V. concerne aussi bien la forte demande énergétique que la partie électronique de puissance, notamment l'onduleur triphasé piloté avec la technologie PWM (MLI). L'approvisionnement et la maintenance ne seront pas oubliés.

L'analyse de l'onduleur impose une protection des semi-conducteurs de puissance qui sont la base même de la technologie adoptée, le filtrage des paramètres électriques, etc.

Il n'en demeure pas moins que des consignes de maintenance auront à être dressées pour augmenter le temps de production et la fiabilité de la centrale.

# Tables de matières

i.	Résumé .....	IV
ii.	Table des matières.....	V
iii.	Liste des Tableaux.....	VII
iv.	Liste des figures.....	VIII
v.	Liste des symboles.....	IX
INTRODUCTION.....		1
I. L'EXISTANT DE LA CENTRALE.....		3
I.1 Le système photovoltaïque.....		4
I.1.a Les modules.....		4
I.1.b Les câbles et MAT.....		5
I.1.c Les batteries d'accumulateurs.....		6
I.1.d Le régulateur de charge.....		8
I.1.e L'onduleur.....		9
I.1.f Le redresseur/chargeur de batteries.....		11
I.1.g L'armoire de contrôle, protection et mesure.....		13
I.1.h Le générateur diesel.....		14
II. DIAGNOSTIC DE FONCTIONNEMENT.....		15
II.1 Le schéma synoptique de la centrale.....		16
II.2 Relevé des dysfonctionnements .....		17
II.2.a Dysfonctionnement de la centrale.....		17
II.2.b Dysfonctionnement du groupe GC 250 kVA.....		18
II.2.c Dysfonctionnement de l'onduleur.....		19
II.2 L'étude énergétique.....		22
II.2.1 L'analyse de la demande.....		22
II.2.1.a Les techniques qualitatives.....		22
II.2.1.b Les techniques causales.....		22
II.2.1.c L'analyse des séries temporelles.....		23
i. La moyenne mobile.....		23
ii. La moyenne mobile pondérée.....		24

iii.	Le lissage exponentiel simple.....	24
iv.	Le lissage exponentiel double.....	24
v.	Le lissage exponentiel triple.....	24
vi.	Modèle du Winter's.....	24
II.2.1.d	Les résultats de l'analyse de la demande.....	28
II.2.2	L'ANALYSE DU DIMENSIONNEMENT	
DE LA CENTRALE.....		28
II.2.2.a	Description du logiciel RETscreen.....	29
II.2.2.b	Les résultats de l'analyse du dimensionnement...	30
III.	ETUDE DE L'ONDULEUR .....	32
III.1	Le régime transitoire.....	34
III.2	Le régime permanent.....	36
IV.	LA TECHNOLOGIE PWM (MLI) .....	41
V.	PROTECTION DES TRANSISTORS BIPOLAIRES (IGBT).....	48
V.1	Comportement à l'enclenchement.....	50
V.2	Comportement au déclenchement .....	52
V.3	Calcul des composants des circuits .....	54
VI.	ETUDE DES FILTRES L-C PASSE-BAS.....	56
VI.1	Le principe des filtres.....	56
VI.2	Calcul des composants.....	58
	CONCLUSION .....	60
	RECOMMANDATIONS.....	61
	Bibliographie et webliographie	
	Annexes	

# *Liste des tableaux*

Tableau II.1 : Relevé des disfonctionnements de la centrale.....	17
Tableau II.2 : Relevé des disfonctionnement du groupe GC 250 kVA.....	18
Tableau II.3 : Relevé des disfonctionnement de l'onduleur.....	19
Tableau II.4 : Les paramètres d'entrée de la méthode de Winter's.....	27
Tableau II.5 : La demande future de la centrale par Winter's.....	28
Tableau II.6 : Les pointes de la puissance de consommation.....	30
Tableau II.7 : Les résultats de l'analyse du dimensionnement.....	32
Tableau IV.1 : Tableau d'alimentation en PWM.....	43

# Liste des figures

Figure I.1 : Schéma synoptique de la centrale.....	16
Figure III.1 : Schéma symbolique de l'onduleur.....	32
Figure III.2 : Schéma de principe de l'onduleur autonome.....	32
Figure III.3 : Symboles du transistor bipolaire IGBT.....	33
Figure III.4 : Tension de sortie de l'onduleur.....	33
Figure III.5 : Schéma de l'onduleur en pont.....	35
Figure III.6 : Le régime transitoire en fonction du facteur de qualité.....	36
Figure III.7 : Tension et courant de sortie en régime permanent.....	37
Figure IV.1 : Structure de la commande PWM.....	41
Figure IV.2 : Sortie en triphasée sous PWM.....	44
Figure V.1 : Schéma de protection des transistors.....	48
Figure V.2 : Comportement sans circuit d'aide à l'enclenchement.....	50
Figure V.3 : Comportement avec circuit d'aide à l'enclenchement.....	50
Figure V.4 : Comportement sans circuit d'aide au déclenchement.....	52
Figure V.5 : Comportement avec circuit d'aide au déclenchement.....	52
Figure VI.1 : Schéma de principe d'un filtre passe-bas .....	56
Figure VI.2 : Schéma normalisé du filtre.....	58

# Liste des symboles et des abréviations

$\alpha$	constante de lissage (sans dimension)
$\alpha_1$	angle de modulation 1 (rad ou degré)
$\alpha_2$	angle de modulation 2 (rad ou degré)
$\beta$	constante de lissage (sans dimension)
$\gamma$	constante de lissage (sans dimension)
$\tau$	constante de temps (s)
$\omega$	pulsation (rad/s)
$\omega_0$	pulsation propre (rad/s)
AC	courant alternatif
$C_c$	capacitance du condensateur de déclenchement (F)
$D_o$	diode du circuit d'aide à l'enclenchement
$D_c$	diode du circuit d'aide au déclenchement
DC	courant continu
DO	diesel oil
E	tension d'entrée de l'onduleur (V)
e	tension d'entrée du filtre (V)
$F'_i$	facteur de saisonnalité (sans dimension)
$G_0$	facteur de tendance de la demande (kWh/mois)
$i(t)$	intensité variable de la charge (A)
$i_c$	intensité du courant du transistor (A)
$i_{cc}$	intensité du condensateur de déclenchement (A)
$I_{ch}$	intensité de charge maximale du transistor (A)
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor (Transistor Bipolaire à Grille Isolée)
$I_{sc}$	courant de court-circuit (A)
L	Inductance de la charge (H)
$L_\sigma$	Inductance de charge du circuit d'aide à l'enclenchement
PERACOD	Programme pour la Promotion de l'Électrification Rurale et de l'Approvisionnement en Combustible Domestique

P.V.	Photovoltaïque
PWM	Pulse Width Modulation
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsions
Q	facteur de qualité (sans dimension)
R	résistance de la charge ( $\Omega$ )
$R_c$	Résistance du circuit d'aide au déclenchement
$R_r$	Résistance du circuit d'aide à l'enclenchement
$R_u$	résistance utile de la charge
$\overline{R}_0$	facteur de la moyenne de la demande (kWh)
s	tension de sortie du filtre (V)
T	période de commutation (s)
Tr	Transistor
TDH	taux de distorsion harmonique (sans dimension)
$t_f$	durée de réaction (s)
$t_c$	durée de dissipation (s)
$u(t)$	tension variable aux bornes de la charge (V)
$u_{CE}$	tension aux bornes du collecteur -émetteur (V)
$V_{AB}$	tension de sortie sur charge triphasée (V)
$V_{ac}$	tension de sortie de l'onduleur en alternatif (V)
$V_{eff}$	valeur de la tension efficace (V)
$V_i$	demande moyenne saisonnière (kWh)
$V_{cc}$	tension d'entrée de l'onduleur en continu, ou sortie des accumulateurs (V)
$V_{oc}$	tension de circuit ouvert (V)
Wc	watt crête (W)

# Introduction

Dans les agglomérations de faibles densité de populations et éloignées (moins de 3 000 habitants et plus de 2 km de distance du réseau), le réseau de distribution de l'énergie électrique n'est pas rentable au profit de la société productrice (SENELEC); ainsi l'alimentation de ces localités est presque toujours inexistante car habituellement on conçoit un réseau de distribution pour une zone de forte densité de populations ou une zone d'activités industrielles. Les sites tels que les îles, sont souvent victimes de leur position géographique (les limites maritimes) et de leurs activités.

Le gouvernement est conscient que l'accès aux services énergétiques à un plus grand nombre de populations est un élément fondamental de toute stratégie de développement et de lutte contre la pauvreté. Ainsi le Document Stratégique de Réduction de la Pauvreté (DSRP) du Sénégal cherche à mieux articuler l'énergie avec les secteurs stratégiques de développement (éducation, santé, sécurité, l'eau, l'industrie).

Un des défis majeurs du Sénégal réside dans l'accroissement de l'offre appropriée de services énergétiques modernes de base qui est l'électricité. D'où la nécessité de recourir à des solutions technologiques diversifiées dont les énergies renouvelables, photovoltaïque particulièrement, pour lesquelles le pays dispose d'un potentiel important.

Dans le cadre de la coopération Sénégal Nippon une centrale pilote a été installée en 1998 à Dionewar-Niodior avec une puissance de 100 kW en PV et 250 kVA en Diesel.

Le projet a vu naître d'autres centrales dans diverses localités de la Zone du Delta du Saloum (Ndjirnda, Bassoul, etc.) mais présente un dysfonctionnement accru qui laisse perplexe les populations sur l'utilité de ces investissements. Depuis mai 2004, seule la source Diesel fonctionne de 19h à 00h et la centrale laisse une durée de 19 heures sans électricité.

Ce contre performance de production interpelle les autorités à mettre un point d'interrogation sur les causes de ces anomalies et l'impact de la demande des populations sur le comportement futur des centrales.

Pour remédier à cette situation, il faut faire un diagnostic complet sur le fonctionnement de la centrale pour établir les recommandations appropriées afin d'accéder à des sources d'énergie qui répondent à la demande des populations et présentent une efficacité et un temps de fonctionnement meilleurs.

Ce rapport porte sur l'analyse des données de performances et de disfonctionnement de la centrale pour faire le diagnostic complet afin de localiser les défaillances et d'apporter des solutions et des recommandations sur les futurs designs des centrales à installer. Il présente aussi les précautions d'approvisionnement et de maintenance qui permettront de réduire les temps d'arrêt de la centrale. Les tendances et progressions de la production permettront de maîtriser la demande énergétique par la méthode Winter's en rapport sur les données de consommation déjà existantes au cours des dernières années.

C'est donc une analyse basée sur les données de fonctionnement et les relevés de disfonctionnement au cours des années passées pour mieux cerner les sollicitations de la centrale ; et une étude sur les différentes technologies utilisées pour la conception des composants d'électronique de puissance.

Le plan de l'étude adopté est le suivant :

- ❖ Diagnostic de l'existant
- ❖ Étude des installations et leur dimensionnement
- ❖ Relevé des courbes de fonctionnement et de performance
- ❖ Analyse des problèmes sur les disfonctionnements
- ❖ Analyse des problèmes sur le design
- ❖ Proposition de solutions sur l'existant et sur les nouvelles conceptions

# CHAPITRE

## I

### L'EXISTANT DE LA CENTRALE

## I. L'EXISTANT DE LA CENTRALE

### Le fonctionnement :

La centrale de Dionewar/Niodior est une émanation du Projet Sénégal-Nippon d'Énergie Solaire (PSNES). Elle est fonctionnelle depuis le mois de Mars 1998. Elle fournit de l'énergie électrique aux villages de Dionewar et de Niodior qui comptent environ 11 mille habitants. Actuellement, la centrale compte 450 abonnés dont 205 à Dionewar et 245 à Niodior.

La centrale se compose de deux sous-systèmes:

- Le sous-système 1 : Solaire

Un générateur PV de 101 kWp (960 modules), des accumulateurs de charge (188 cellules de 2V/2500Ah), un onduleur de 100 kW (indisponible depuis le 14 Mai 2004)

- Le sous-système2:

Un groupe électrogène de 250 kVA, un redresseur de 35 kW

Un sous-système auxiliaire constitué de deux groupes électrogènes d'appui (GA); l'un à Dionewar (30KVA) et l'autre à Niodior (100KVA); a été mis en place pour secourir au besoin les sous-systèmes 1 et 2

L'ensemble des éléments est contrôlé par un Programmable Logic Controller (PLC) de type Sysmac C 200 HX CPU 64 Omron.

Le fonctionnement normal de l'installation est basé d'une part sur l'opération du sous-système 1 de 00h à 19h et du sous système 2 de 19h à 00h. D'autre part le fonctionnement peut changer en cas d'urgence.

- Fonctionnement du sous-système 1:

Il est caractérisé par le fonctionnement permanent de l'onduleur avec toutes les charges en courant alternatif. L'onduleur puise son énergie soit à partir des panneaux solaires ou des accumulateurs. Le tableau de contrôle mesure la tension batterie et, en fonction de celle-ci, effectue les opérations de charge ou de décharge.

- Fonctionnement du sous-système 2:

Il est caractérisé par le fonctionnement du groupe complémentaire de 250KVA entre 19h et 00h en fournissant de l'énergie à toutes les charges et dans la mise en marche du redresseur-chargeur pour l'appoint des batteries.

### Remarque:

En attendant l'arrivée des pièces de rechange pour le dépannage de l'onduleur, le fonctionnement du diesel se fait entre 19h 00 et 00h.

Les composantes sus citées ont des caractéristiques électriques et énergétiques qui seront décrites dans les lignes qui suivent.

## **I.1 LE SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE**

Il est composé de 960 modules P.V. Isofoton : Fotovoltaico I-106, 1000 W/m<sup>2</sup> à 25 °C (IST), homologués conformément aux normes CEI 612 – 15 et par le Ministère Espagnol de l'Industrie et de l'Energie.

Le champ est constitué de 5 sous champs de 192 modules chacun ;

### **I.1.a Les modules :**

Chaque module est constituée de :

6 x 12 cellules en silicium monocristallin carrées (10 x 10 cm<sup>2</sup>) de haute efficacité

106 Wc ± 10 %

Les cellules sont connectées en 2 branches parallèles (36 cellules chacune)

### **Caractéristiques de construction :**

1. Cellule P.V. en Si monocristallin de très haute pureté comme matière de base
2. Finition antiréfléchissante en surface des cellules texturées chimiquement en oxyde pyrrolique de titane (TiO<sub>2</sub>)
3. Connexion redondante multiple pour chaque cellule
4. Circuit laminé entre 2 couches d'EVA (éthylène vinyle acétate) : protection maximale contre l'humidité
5. Face active protégée avec du verre trempé à haute transmittivité et avec traitement antiréfléchissant et faible teneur en fer
6. Face postérieure protégée avec un laminage polymère à plusieurs couches (Tedlar blanc), résistant à l'abrasion, au poinçonnage et aux déchirures
7. Encadrement en profile d'aluminium anodisé
8. 2 boîtes de connexion indépendantes, isolées (IP-5.6), contenant chacune une diode by-pass
9. Prise de terre extérieure

## Caractéristiques électriques

(Mesures réalisées dans les conditions standards de test (STC) : 100 W/m<sup>2</sup>, AM 1.5, 25 °C)

1. Courant de court-circuit :  $I_{sc} = 6.54 \text{ A}$
2. Tension de circuit ouvert :  $V_{oc} = 21.8 \text{ V}$
3. Puissance nominale :  $P_{mp} = 106 \text{ W}$
4. Paramètre de variation de courant de court-circuit en fonction de la température :  
 $a = 6.9 \cdot 10^{-4} / ^\circ\text{C}$
5. Paramètre de variation de la tension de circuit ouvert avec la température :  
 $b = - 2.16 \text{ mV} / ^\circ\text{C}$
6. 2 diodes by-pass pour éviter le phénomène de « point chaud »  
 → illumination hétérogène

### Position

1. Supports entièrement en acier galvanisé à chaud, panneaux de 1m minimum du sol
2. Angle d'inclinaison de 15° Sud (Latitude < 20°)
3. Supports fixés au sol, ensemble (base + support) résiste à des vents jusqu'à 150 km/h
4. Toutes les vis d'assemblage des différentes pièces en acier inoxydable garantissant ainsi une résistance parfaite à la corrosion de toute la structure

### I.1.b Câbles et MAT

1. Câbles prévus en installation plein air, avec double couches d'insolation de caractéristiques suivantes :
2. Adéquats pour être enfouis ou installés sur parois ou murs
3. Résistants à l'humidité
4. Résistants aux rayons U.V.
5. Résistants à l'abrasion
6. Résistants aux agents chimiques
7. Température de fonctionnement : -25° à + 70 °C
8. Non propogateur de flamme
9. Non propogateur d'incendie
10. Tension de service jusqu'à 1000 V

La section sera adaptée suivant les applications. Dans tous les cas  $\Delta U \leq 1 \%$

Structure métallique des panneaux aura une prise de terre dont la résistance  $R < 10 \Omega$

Les câbles provenant des panneaux, entreront de « façon flottante » dans le circuit électrique de l'armoire et comporteront un réseau de protection contre la surtension ayant pour mission de diriger à la terre les éventuelles pics de tension induits par la foudre

### I.1.c Batteries d'accumulateurs

Batteries employées : plomb/acide de type stationnaire à plaques positives tubulaires

Les accumulateurs ont les caractéristiques suivantes :

1. plaques positives tubulaires, constituées par une série de tubes de polyester, résistant à l'acide et de forte porosité, qui servent de support à une importante quantité d'oxyde de plomb d'élaboration soignée
2. Plaques négatives plombées, formées d'une grille en alliage de plomb, support efficace à la matière active de par sa conception propre. La matière active employée réduit considérablement la perte de capacité et récupère facilement sa porosité après la recharge
3. Séparateurs en plastique microporeux inaltérable par l'action de l'acide sulfurique. Sa forte porosité permet une diffusion facile et rapide de l'électrolyte. D'autre part, ils garantissent un isolement parfait entre les plaques avec un minimum de résistance interne
4. Récipient en SAN, matériel plastique transparent de haute résistance. De plus, le fait d'être transparent permet une vérification rapide de l'état des plaques et du niveau de l'électrolyte, qui est indiqué à l'extérieur du récipient, facilitant ainsi l'entretien
5. Bornes de connexion qui supportent les plus sévères décharges et permettent une connexion facile et durable
6. Bouchons de recombinaison des gaz qui réduisent fortement la perte d'eau de l'électrolyte en recombinaison des gaz produits lors de la charge et les renvoyant à l'intérieur de l'élément. De cette façon on diminue l'entretien (fréquence typique d'entretien : 1 an ou plus). Les bouchons de recombinaison de gaz servent en même temps pour minimiser la sortie de particules acides à l'extérieur
7. Plaques en plomb avec faible concentration d'antimoine (Sb)
8. Taux d'autodécharge interne (pour un mois) inférieur à 3 % de la capacité nominale à 25 °C

9. Ils admettent des décharges profondes, sans destruction des éléments ou modification de sa capacité de charge

Les batteries fonctionnent dans les conditions d'ambiances suivantes :

1. Température ambiante :  $-20\text{ °C}$  à  $+60\text{ °C}$
2. Humidité relative maximale : 90 %

La durée de vie (en années) des batteries en plomb est fortement dépendante des paramètres suivants :

1. Cycles de charge / décharge annuels
2. Importance de la décharge maximale tolérée
3. Valeur du courant de décharge
4. Contrôle en cas de surcharge
5. Variation de la température du site

Pour cette application spécifique, les conditions de fonctionnement des batteries seront fondamentalement douces

1. La régulation de charge des batteries empêche :
  - ❖ la décharge de celles-ci en dessous d'un seuil critique
  - ❖ la surcharge lorsqu'elles se trouvent à 100 % de leur capacité
2. La capacité de la batterie a été choisie pour une décharge journalière de 15 % de la capacité nominale (consommation d'énergie prévue pour la nuit de 00h à la levée du soleil). Ce fait se répercute de manière directe sur la durée de vie des batteries en assurant une durée de fonctionnement de l'accumulateur supérieure aux 2 000 cycles demandés
3. Il y a un générateur diesel d'appui pour éviter les décharges excessives de la batterie en cas de bas rayonnement solaire, de consommation plus haute que prévue ou des défaillances de quelques éléments de la centrale ; par conséquent, il est très peu probable d'avoir de longues périodes avec la batterie déchargée, cause principale de son endommagement.

### I.1.d Régulateur de charge

Pour protéger les batteries contre d'éventuelles décharges profondes ou surcharges, on utilisera un régulateur de charge du type « régulateur série »

Ce système de régulation autorise un contrôle et une gestion intelligente de l'installation P.V. C'est un régulateur avec contacteurs dans les circuits de charge. Le régulateur remplit deux fonctions distinctes, à savoir :

1. Gestion de la charge et de la décharge des batteries
2. Mesure des conditions de charge / décharge  
Le régulateur incorpore les dispositifs suivants :
3. Régulateur de charge et décharge avec indication lumineuse de l'état de fonctionnement (5 étapes)
4. Démarrage du générateur d'appui en cas de faible tension des batteries
5. Protection des batterie par déconnexion en cas de faible tension des batteries, de la sortie, avec indication LED
6. Le délestage des 4 départs AC, en cas de faible tension des batteries sera programmé de façon indépendante
7. Dispositif de protection pour les circuits de charge
8. compensation en température des seuils de tension de fin de charge et d'activation
9. Circuit de contrôle avec les composants nécessaires pour la métrologie du système
10. Protection contre les tensions induites par la foudre
11. Protection contre les surcharges et courts-circuits

Les caractéristiques électriques du régulateur sont les suivantes :

1. Tension nominale de travail = 384 V
2. Intensité de charge maximale = 240 A

## **I.1.e L'onduleur**

L'onduleur triphasé est composé des éléments suivants :

### **Partie puissance :**

1. Filtre d'entrée en courant continu (CC), avec des condensateurs électrolytiques d'une durée de vie de 100 000 heures dans les conditions de travail prévues. La tension nominale de ces condensateurs est 1.5 fois supérieure à la tension de travail maximale
2. Circuit de puissance avec des semi-conducteurs en IGBT, auto protégés contre les sur courants excessifs avec des origines externes ou internes, y compris la faille des circuits de contrôle. Les semi-conducteurs sont équipés de dissipateurs en aluminium avec thermostat d'alarme
3. Transformateur de puissance type HF capable de conduire la puissance maximale prévue
4. Filtre L-C de sortie « passe-bas » pour l'élimination de la distorsion produite par la configuration PWM
5. Contacteur de connexion CC, pour protéger l'onduleur et l'isoler en cas de défaillances
6. Contacteur de connexion de la tension AC de sortie
7. Fusibles extra rapides de protection des semi-conducteurs pour éviter leur destruction en cas de faille du reste des protections

### **Partie contrôle**

1. Oscillateur synchronisé pour donner la fonction de travail de l'onduleur
2. Circuit de régulation du voltage de sortie et modulation PWM, qui stabilise la tension de sortie quand il y a des variations de la tension des batteries ou du courant de sortie. De cette façon, on tient la forme de l'onde alternative et la distorsion harmonique au dessus de la limite
3. Circuit de surveillance de l'état des fusibles, thermostat, tension CC d'alimentation, « drivers » des semi-conducteurs de puissance, etc. il permet le démarrage progressif

de l'onduleur avec tension en pente, et aussi sa déconnexion en cas de haute température

4. Circuit « drivers » auto protégé pour les semi-conducteurs, avec retard maximal d'activation de 4 microsecondes. On peut faire un court-circuit de chaque semi-conducteur sans endommager les composantes de puissance ni les fusibles de protection. Ce circuit est la meilleure protection de l'onduleur et agit seulement quand on détecte des sur courants dans la partie de puissance

### Partie mesures et alarmes

1. Voltmètre et ampèremètre d'entrée
2. Voltmètre, ampèremètre et fréquencemètre de sortie
3. Tableau d'indicateurs des alarmes les plus importantes

### Caractéristiques électriques

1. Puissance nominale : 100 kW
2. Facteur de puissance de 0,87
3. Rendement en pleine charge > 85 %
4. Tension d'entrée : 340 – 480  $V_{cc}$
5. Tension maximale circuit ouvert 570  $V_{cc}$
6. Tension de sortie : 400 – 240  $V_{ac}$
7. Fréquence de sortie : 50 Hz  $\pm$  1 %
8. (Régime statique pour variation maximale de la tension d'entrée et variation de charge du 0 au 100 %)
9. Régulation dynamique tension de sortie :  $\pm$  5 %
10. (Régime dynamique, coups de connexion du 50 %)
11. Temps de récupération : 20 ms
12. Capacité de surcharge (5 secondes) : 100 %
13. Distorsion harmonique : < 6 %
14. Consommation à vide : < 1 %

### **I.1.f Le redresseur / chargeur de batteries**

Il s'agit d'un redresseur à thyristors qui travaille en accord avec le principe du contrôle de phase. Avec cela on peut :

1. Contrôler la tension de sortie pour charger les batteries de façon à ce qu'elles puissent utiliser le maximum d'énergie
2. Limiter l'intensité donnée aux batteries pendant la charge, pour la protéger et pour protéger en même temps le régulateur

La charge peut se faire en trois (3) états différents : flottaison, profonde et automatique

On fait la sélection de l'état de décharge avec un commutateur. A l'état de décharge automatique, le changement entre charge profonde et flottaison se fait automatiquement d'après le signal provenant des senseurs de courant

Les éléments principaux qu'impose le redresseur sont :

#### **Partie puissance**

1. Interrupteur automatique d'entrée pour faire la connexion du redresseur au générateur diesel, avec des protections magnétothermiques dans chaque ligne
2. Contacteur d'entrée, fermé pendant que le redresseur marche ; il s'ouvre de façon automatique en cas de défaillance du redresseur
3. Transformateur de puissance, dimensionné pour considérer le facteur de forme du courant de phase et pour qu'il soit possible de donner la tension maximale à la sortie avec la tension alternative d'entrée 10 % en dessous de sa valeur nominale
4. Fusibles rapides d'entrée au redresseur pour protéger les thyristors avec micro interrupteur pour signaler la fusion
5. Pont redresseur triphasé avec 6 thyristors, ce qui permet d'obtenir une tension de vide très petite dans le courant de sortie
6. Filtre L-C de sortie, pour obtenir une tension de sortie presque parfaitement contrôlée

## Partie contrôles

1. Circuit de déclenchement des thyristors
2. Circuit de régulation et de stabilisation de la tension de sortie. Il permet le démarrage progressif de l'onduleur avec une montée en pente de la tension de sortie, afin de limiter le courant d'entrée au moment du démarrage
3. Circuit de commutation automatique / manuelle entre les étapes charge profonde et flottaison

## Partie mesures et alarmes

1. Voltmètre et ampèremètre d'entrée
2. Voltmètre et ampèremètre de sortie
3. Panneau synoptique de signalisation d'alarme

## Caractéristiques électriques

1. Tension d'entrée : 400 / 240 V<sub>ac</sub> (3 fils)
2. Fréquence de la tension d'entrée 50 Hz
3. Tension nominale de sortie : 384 V<sub>cc</sub>
4. Stabilité de tension :  $\pm 1 \%$
5. (Avec des variations de la tension d'entrée de 10 % et variation de charge du 0 % au 100 %)
6. Courant nominal : 90 A
7. Surcharge admissible : 110 % / 1 heure
8. Tension de vide moyenne nominale :  $< 2 \%$

## I.1.g L'armoire de contrôle, protection et mesure

Cette armoire comprend les éléments suivants :

### Métrologie

1. Sonde d'humidité relative et température ambiante, avec sortie en tension
2. Anémomètre et girouette avec support ; sortie 4 – 20 mA
3. Cellule de référence pour la mesure de la radiation solaire
4. Protection des rayons de soleil avec ventilation naturelle pour les ondes de température et d'humidité
5. Module d'alimentation externe
6. Transducteur de sortie des batteries ; sortie 4 – 20 mA
7. Transducteur courant charge / décharge des batteries, avec sortie 4 – 20 mA ou bipolaire
8. Transducteur de tension de sortie onduleur (un dans chaque phase) ; sortie 4 – 20 mA
9. Transducteur de courant de sortie onduleur (un dans chaque phase) ; sortie 4 – 20 mA
10. Transducteur de tension de sortie générateur (un dans chaque phase) ; sortie 4 – 20 mA
11. Transducteur de courant de sortie générateur (un dans chaque phase) ; sortie 4 – 20 mA
12. Compteur énergie fournie par l'onduleur (kWh)

### Protection et contrôle

Éléments de sectionnement automatique et manuel pour isoler tous les éléments de la centrale en cas de défaillance ou émergence (ces éléments peuvent aussi être installés à côté des éléments de la centrale qu'ils sectionnent)

### I.1.h Le générateur diesel

Il est composé de :

1. D'un G.E. de 30 kVA, équipé d'un moteur PERKINS type 4236, refroidi par eau, 49 CV, 4 cylindres en ligne, (98.4 mm d'alésage et 127 mm de course)
2. Le moteur entraîne à 1 500 tr/mn un alternateur MECC ALTE, sans balais, 30 kVA de service continu, 380 / 220 V, 50 Hz. Il est équipé aussi de régulation électronique et avec isolation classe H tropicalisé
3. Tableau automatique de mesure et de contrôle :
  - a. Ampèremètre
  - b. Voltmètre
  - c. Fréquencemètre
  - d. Compteur horaire
  - e. Unité électronique pour démarrage et arrêt manuel et automatique (électrique) par commande extérieure (3 essais de démarrage)
  - f. Prévention d'avaries (signalisation optique et alarme acoustique) en cas de :
    - i. Démarrage non réussi
    - ii. Manque de pression huile
    - iii. Température excessive de l'eau
    - iv. Courroie cassée
    - v. Survitesse
    - vi. Protection de la sortie AC contre surcharge
4. Moteur et alternateur sur châssis commun (skid) en acier, avec réservoir de combustible pour 24 heures de fonctionnement. Jeux de liaison, vannes et pompe pour le remplissage du réservoir d'après le grand réservoir déjà existant
5. Batteries (Pb) pour le démarrage avec redresseur-chargeur pour maintenir sa charge même en cas de long temps sans démarrage du générateur
6. Consommation de combustible 11 l / h en pleine puissance
7. Température des gaz d'échappement : 620 °C
8. Compression ratio : 16 : 1
9. Débit d'air de combustion : 2.5 m<sup>3</sup> / mn

Un groupe GC CUMMINS de 250 kVA constitue la source d'appoint.

Pour plus de renseignements sur les caractéristiques voir les fiches techniques en Annexe 1.

# CHAPITRE

## II

# DIAGNOSTIC DE FONCTIONNEMENT

## II. DIAGNOSTIC DU FONCTIONNEMENT

Les caractéristiques de ces éléments sont décrites pour mieux cerner les fonctionnalités de la centrale.

Le schéma synoptique (figure I.1) permet de mieux comprendre l'interconnexion des toutes les composantes et les critères d'antériorités de fonctionnement. Le schéma explique les relations entre chaque élément et les parties de contrôle et de mesure des paramètres météorologiques et des paramètres électriques d'entrée et de sortie.

Après la description des composantes de la centrale et la définition du schéma synoptiques, le diagnostic de fonctionnement de la centrale nous permet de souligner les défaillances de production sur les domaines énergétiques et techniques.

Cette étude va nous permettre de voir les causes principales des pannes et arrêts de la centrale. Ainsi, les bulletins de fonctionnement de chaque composante vont permettre de dresser les tableaux de disfonctionnement suivants.

### II.1 LE SCHEMA SYNOPTIQUE DE LA CENTRALE

Voir figure I.1

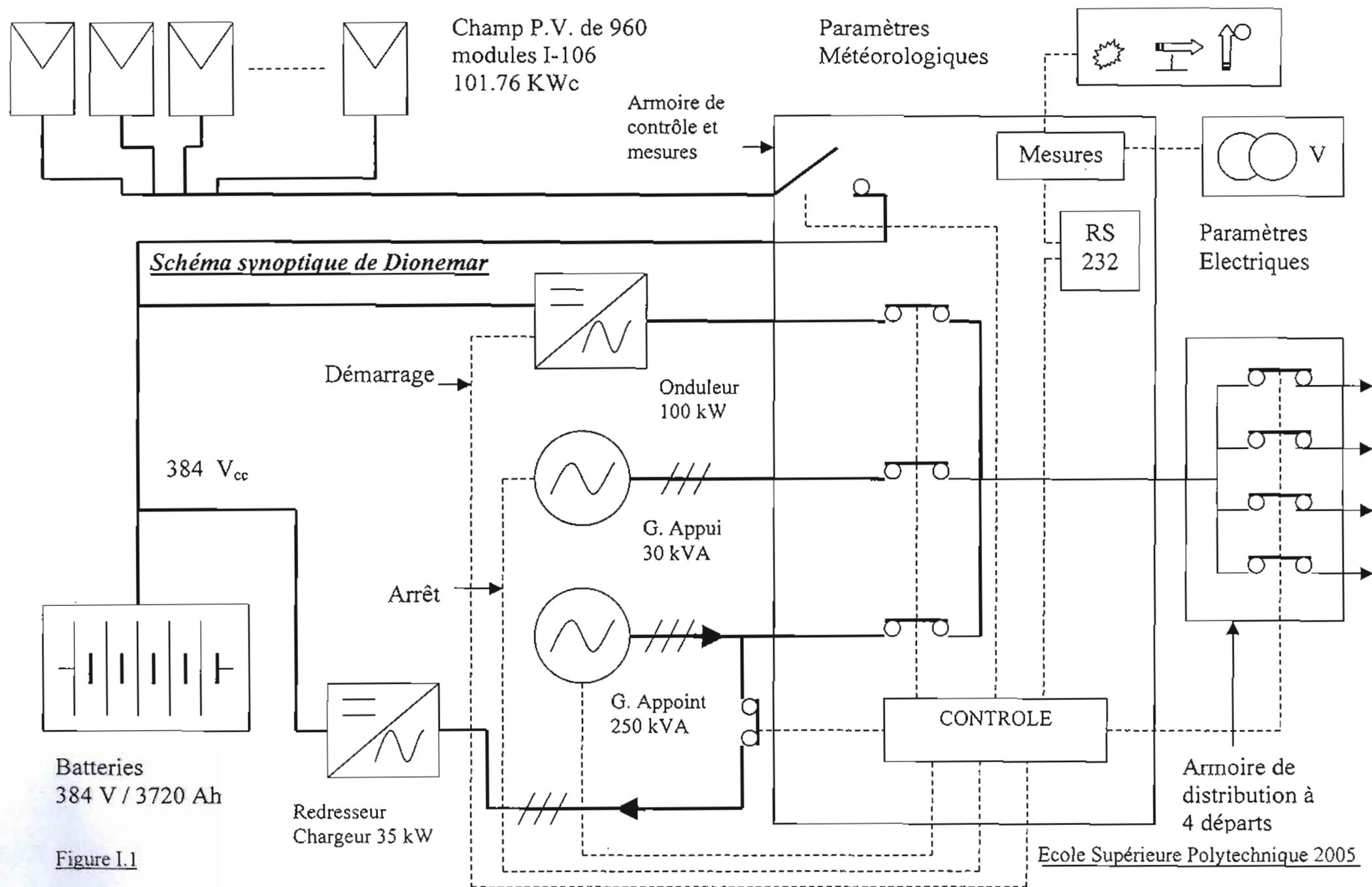


Figure I.1

## II.2 RELEVÉ DES DISFONCTIONNEMENTS

### II.2.a Disfonctionnement de la centrale

Tableau II.1 :

SYSTÈME	REMARQUES ET CONSTATS	CONSÉQUENCES	DURÉE	FRÉQUENCES	REMÈDES
CENTRALE (le 13 / 04 / 99)	Arrêt de la centrale à cause des tensions simples de sortie très faibles 184 à 190 V du groupe GC	Arrêt de la centrale: pas d'alimentation	9 heures	1 fois entre 28 et 05 de chaque mois	<b>Bien contrôler les filtres et la protection des semi-conducteurs</b>
	Arrêt de la centrale à cause de court-circuit et blocage des cartes PCE 1032 et PCE 1253	pas d'alimentation durant le jour	4 Heures	1 fois par mois	Acquérir un appareil d'auto test des cartes et bien gérer les stocks
CENTRALE (le 30 / 04 / 99)	Arrêt de la centrale à cause de la mise en place du transformateur et des parafoudres sur la ligne MT à Niodior	Pas d'alimentation	2 heures 05 mn	Pas fréquent	RAS
EP Dionewar	Arrêt de l'EP; Délestage de l' EP Dion à cause d'insuffisance de combustible	Eclairage public de Dionewar paralysé	une nuit	Chaque semaine	Prendre au sérieux l'approvisionnement en diesel oil
CENTRALE (le 01 / 05 / 99)	Arrêt total de la centrale. Le LED de la carte PCE 11032 Protection contre les courts-circuits s'allume et blocage de la carte 1253 Arrêt par CC.	Arrêt du système PV. Reset de la carte PCE 1253 et mise à niveau. Démarrage en mode manuel	3 heures 20mn	2 fois par an	Définir un plan de maintenance de l'appareillage de protection et de contrôle
CENTRALE	Arrêt des groupes GC et GA. Stock de carburant épuisé	Arrêt de la centrale à cause de combustible insuffisant	1 à 2 jours	1 fois par 2 semaines	Prendre au sérieux l'approvisionnement en diesel oil
Sous Champ PV	Délestage de certains sous champ à cause de fréquence de commutation rapprochée	tension des batteries entre 387,6 et 411 V	7 heures	Rarement	Contrôler le calibre et le fonctionnement des filtres de sortie

## II.2.b Disfonctionnement du Groupe GC 250 kVA

Tableau II.2 :

SYSTÈME	REMARQUES ET CONSTATS	CONSÉQUENCES	DURÉE	FRÉQUENCES	REMÈDES
GC 250 kVA	Problème de Diesel Oil (D.O.). La disponibilité du carburant est une casse tête par défaut du moyen de transport. L'approvisionnement n'est pas bien organisé.	Arrêt des Groupes GC et GA	1 à 2 jours	1 à 2 jours par semaine	Diminuer le temps de fonctionnement du GC 250 kVA est impossible, d'où exigence d'un bon planning d'approvisionnement en diesel oil
Diesel Oil (DO)	Beaucoup de saletés du DO lors de son déportage des stations jusqu'à la centrale. Le type de transfert et la qualité des contenus sont trop artisanaux.	Changement total des filtres de DO des groupes GC et GA et arrêts.	1 heure	2 à 3 fois par mois à la place de 1 fois par 3 à 4 mois pour chaque groupe	Choisir un dispositif d'approvisionnement du DO par des gros porteurs pour limiter de transvaser beaucoup le DO, peut être sous traiter
Radiateur	Alimentation en eau distillée pour le radiateur se trouve dans un niveau très bas	Arrêt du groupe GC 250 kVA	30 mn	1 fois par semaine	Définir un planning hebdomadaire de maintenance et d'intervention au niveau des appareils consommant Eau, DO et Huile
GC 250 kVA	Arrêt de GC 250 kVA et mise en marche de GA 30 kVA. Niveau d'huile insuffisant	Baisse de la tension simple de sofie GC avec 203 V. Eclairage de la salle de commande "OFF". Délestage de Dion1 puis Dion2 et Niodior en "OFF"	12 heures	2 à 3 fois par semaine	Définir un planning hebdomadaire de maintenance et d'intervention au niveau des appareils consommant Eau, DO et Huile
GC 250 kVA et GC 30 kVA	Arrêt des groupes GC et GA. Stock de carburant épuisé	Journées sans électricité	2 jours	1 fois par semaine	Etablir un planning d'approvisionnement en DO et réparation du réservoir pour mieux stocker
Huile	Arrêt de GC et GA. Niveau d'huile insuffisant et stock épuisé	Période de la journée sans électricité	1 journée	1 fois par 2 semaines	Etablir un planning d'approvisionnement en Huile et installation d'un réservoir pour mieux stocker l'huile

### II.1.c Disfonctionnements de l'onduleur

Tableau II.3 :

SYSTÈME	REMARQUES ET CONSTATS	CONSÉQUENCES	DURÉE	FRÉQUENCES	REMÈDES
ONDULEUR	Véritable problème de la centrale c'est l'onduleur. La <b>protection</b> des transistors IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) s'impose. Les pannes constituent 90 % de la non disponibilité du PV	Arrêt total du système Photovoltaïque (P.V.)	Jusqu'à réparation de la panne (des jours, semaines voir des mois)	90 % des pannes de l'onduleur liés à la défaillance des IGBT	Bien définir les dispositifs de protection
	<b>Onduleur non disponible du 29 mars 1999 au 13 avril 1999 à cause des contacteurs IGBT non protégés. Actuellement non disponible depuis le 14 mai 2004</b>	Fonctionnement de GA pendant le jour	16 jours	Fréquent	Etudier le schéma d'installation de l'onduleur pour vérifier les protections et les filtres
Systèmes de protection	Temps de réponse très lent. Les appareils protégés se détériorent sans que les systèmes de protection n'agissent.	Arrêt total du système Photovoltaïque (P.V.)		Chaque panne de l'onduleur liée à la défaillance des IGBT	Une très grande rapidité à l'agissement s'impose pour les systèmes de protection
Cartes de commande	Les cartes sont obligées d'être analysées élément par élément pour pouvoir repérer la panne et les réparer, ce qui demande énormément de temps (des semaines). Ensuite les cartes sont fonctionnelles qu'après un reset, d'où une autre programmation de mise à niveau.	Arrêt total du système Photovoltaïque (P.V.)	Jusqu'à réparation ou changement de la carte (des jours, semaines voir des mois)	Chaque panne de carte: 2 à 3 fois par mois	Acquérir un appareil d'autotest des cartes pour faciliter le repérage des pannes. Système stockage des données et programmes pour faciliter la remise en fonctionnement des cartes sans reset.

Filtres amont et aval du transformateur de l'onduleur	La désignation des capacités de ces éléments ne sont pas compatibles pour un fonctionnement des filtres; Parfois une autre caractéristique peut fonctionner quelques semaines avant de sauter.	Arrêt total du système Photovoltaïque (P.V.)		2 à 3 fois par ans	Bien dimensionner les condensateurs et bien définir leurs caractéristiques et les conditions de fonctionnement surtout dans un tel milieu. Disposer des cartes interchangeables pour toutes les centrales pour réduire les coûts de stockage
IGBT	Les IGBT sautent à chaque fois qu'il y a surintensité interne ou externe, et chaque fois qu'une carte imprime un défaut	Arrêt total du système Photovoltaïque (P.V.)	Jusqu'à réparation de la panne (des jours, semaines voir des mois)	presque chaque mois de fonctionnement de l'onduleur	Vérifier le système de protection des interrupteurs IGBT et bien les dimensionner
Fusibles	Changement des fusibles à couteau gG 200A To 500 V altern	Commutateur paralysé et prolongement du temps de fonctionnement du PV avec délestage de Niodior	2 heures	Très rarement	Détenir un stock minimum pour palier les démarches d'acquisition chez les fournisseurs
Condensateurs	Arrêt total de la centrale. Mise en place de 6 nouveaux condensateurs CPO au niveau de la sortie du filtre onduleur	Reset de la carte EO - OO 30A. Changement de la carte PCE - 1035 (Réglage des paramètres du redresseur)	3 heures 29 mn	1 fois par 6 mois	Calculer le calibre des condensateurs et bien définir leurs caractéristiques de fonctionnement



## Synthèse :

Après avoir présenté les tableaux de synthèses des différentes parties de la centrale, la remarque est à voir que la centrale s'arrête fréquemment au cours de son fonctionnement. Les principaux points saillants sont :

- ❖ La rupture de stock en diesel Oil : le DO est l'élément fondamental pour le bon fonctionnement de la centrale, il alimente les groupes d'appoint et d'appui qui permettent de vaincre les pointes de charges et une utilisation en cas d'urgences. Actuellement la centrale ne fonctionne qu'avec le GC 250 kVA (19h à 00h), cela implique la rupture du stock impose automatiquement l'arrêt de la centrale ou des délestages intensifs jusqu'au prochain approvisionnement.
- ❖ La centrale ne peut pas satisfaire les demandes d'autant plus que la pointe de charge est actuellement à 162 kW. Cette puissance est largement supérieure à la puissance de l'onduleur (100 kW) et explique la nécessité de définir impérativement des plannings de fonctionnement de certains appareils, tels que les moulins, pour essayer de transférer la pointe de charge à la période de fonctionnement du groupe GC 250 kVA.
- ❖ La non disponibilité de l'onduleur est très fréquente. Les semi-conducteurs de puissance sont les causes à 90 % près des pannes de l'onduleur. Cela explique la nécessité de bien fouiller les protections des départs, leur sélectivité et la protection des semi-conducteurs de puissances.
- ❖ On assiste parfois à des commutations rapprochées ; cela explique la nécessité de bien contrôler les fonctionnements des filtres de sortie. La sensibilité de ces derniers sur les variations importantes de la tension peut influencer la qualité de l'ondulation.

## II.2 L'ETUDE ENERGETIQUE

L'étude énergétique nous permet de voir les potentiels de la centrale de bien satisfaire les demandes et dans quelles conditions ; de voir l'impact de l'évolution de la demande sur le comportement futur de la centrale.

La centrale fonctionne dans des conditions non optimales par rapport aux charges, à la défaillance des éléments et un approvisionnement imparfait en DO. Cela explique la nécessité d'analyser le domaine énergétique pour donner un jugement sur la centrale et définir certaines recommandations.

### II.2.1 L'ANALYSE DE LA DEMANDE

La planification ou l'estimation de la demande est un processus par lequel on détermine le potentiel du marché et les requis pour satisfaire les objectifs de production de la centrale.

La détermination du potentiel du marché se fait par l'évaluation des tendances et croissances de la demande ; c'est un processus d'anticipation des changements.

Il y a trois (3) techniques de prévision à savoir :

#### II.2.1.a Les techniques qualitatives :

Elles sont utilisées dans le cas d'une non disponibilité de données (historiques). C'est le cas de l'introduction d'un nouveau produit dans un marché. Elles sont basées sur des jugements humains. Elles comprennent quatre (4) principales méthodes :

1. Méthode DELPHI
2. Les études de marché
3. Les opinions des gestionnaires et des vendeurs
4. L'analogie avec des situations passées

#### II.2.1.b Les techniques causales :

Elles sont utilisées dans le cas où l'on dispose d'une quantité énorme de données et quand ces données présentent des relations explicites de cause à effet entre les facteurs à prévoir ou estimer. Les principales méthodes sont :

- Le modèle économétrique
- L'intention d'abonnement et les enquêtes du marché
- Le modèle Input-Output
- Les indicateurs dominants
- Les cycles de vie
- Les méthodes de régression
  1. La régression linéaire
  2. La régression exponentielle
  3. La régression logarithmique
  4. La régression puissance

Chaque relation de régression doit être vérifiée par un Test de signification pour voir si la relation mathématique trouvée entre les variables (X et Y) est significative pour les données statistiques disponibles. Il y a trois (3) principaux tests :

1. Le coefficient de corrélation
2. Le test de Fichier (Test-F)
3. Le test du Student (Test-t)

### II.2.1.c L'analyse des séries temporelles (chronologiques)

C'est une technique quantitative basée sur la statistique. Elle est utilisée dans le cas où l'on dispose des données sur plusieurs années (saisons) passées et quand ces données présentent des tendances et des relations évidentes et stables (consommation électrique dans une localité, vente d'un produit donné ; par exemples).

Les principales méthodes utilisées sont :

#### i. La moyenne mobile :

Elle consiste à utiliser la moyenne des données réelles d'un nombre déterminé de périodes précédentes comme le nombre de périodes antérieures choisi demeure le même ; cependant, la période la plus ancienne cède sa place à la période la plus récente afin de conserver les périodes récentes dont les données réelles sont disponibles.

**ii. La moyenne mobile pondérée :**

Cette méthode consiste à employer certaines (N) données du passé aux quelles on attribue un poids fonction du pouvoir prévisionnel de la période ; la somme des poids relatifs des périodes est égale à 1.

**iii. Le lissage exponentiel simple :****Hypothèses de base :**

Demande constante avec variation aléatoire autour de la moyenne. C'est une moyenne mobile pondérée exponentielle

**Idée de base :**

Chaque prévision est corrigée à chaque fois qu'il y a une différence entre la prévision (P) et la demande réelle (R)

**iv. Le lissage exponentiel double :**

Ici on prend compte la tendance de la demande.

**v. Le lissage exponentiel triple :****vi. Modèle du Winter's :**

C'est un lissage exponentiel qui prend en compte les fluctuations saisonnières de la demande.

Notre choix portera sur le modèle du Winter's car on a une demande qui varie suivant des périodes et une capacité de production saisonnière. Cette méthode va nous permettre d'avoir un regard sur le comportement réel de la centrale suivants les charges actuelles, de suivre l'évolution de la consommation en énergie PV et Diesel par rapport à la demande.

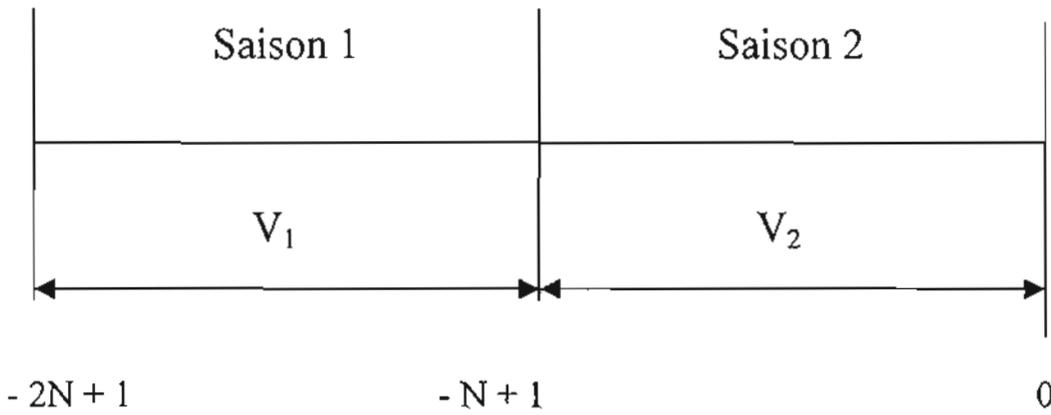
**METHODE DU WINTER'S**

**PROCEDURE : algorithme**

**Calculer les valeurs initiales**

**a) Demandes moyennes saisonnières :  $V_i$**

N : nombre de périodes dans une saison (12 mois / an ; 52 semaines / an ; 7 jours / semaine)



$$\left\{ \begin{array}{l} V_1 = \frac{1}{N} \sum_{-2N+1}^{-N} R_t \quad (2.1) \\ V_2 = \frac{1}{N} \sum_{-N+1}^0 R_t \quad (2.2) \end{array} \right.$$

**b) Le facteur de tendance de la demande**

$$G_0 = \frac{V_2 - V_1}{N} \quad (2.3)$$

**c) Le facteur de la moyenne de la demande**

$$\overline{R}_0 = V_2 + G_0 \left( \frac{N-1}{2} \right) \quad (2.4)$$

**d) Le facteur de la saisonnalité**

$$F'_i = \frac{R_i}{V_i - \left( \frac{N-1}{2} - j \right) \cdot G_0} \quad (2.5)$$

$j = j$ -ième période de la saison  $i$  avec  $j = 1, 2, \dots, N$  ;

Où  $V_i$  = demande moyenne de la saison  $i$ .

e) La moyenne des  $F_t$  des deux dernières périodes

$$\overline{F}_t = \frac{F'_t + F'_{t-N}}{2} \quad (2.6)$$

Généralement on a :  $\sum_0^{-N+1} \overline{F}_t \neq N$

f) La valeur de  $F_t$ 

$$F_t = \frac{N \cdot \overline{F}_t}{\sum_0^{-N+1} F_t} \quad (2.7)$$

Pour la valeur normalisée de  $F_t$ , on a :  $\sum_0^{-N+1} F_t = N$

2. Mettre :  $t = 1$ 3. A la fin de la période  $t$ , la vraie demande  $R_t$  est enregistrée.

## 4. Calculer :

$$a) \quad \overline{R}_t = \alpha \cdot \frac{R_t}{F_{t-N}} + (1 - \alpha) \cdot (G_{t-1} + \overline{R}_{t-1}) \quad (2.8)$$

$$b) \quad G_t = \gamma \cdot (\overline{R}_t - \overline{R}_{t-1}) + (1 - \gamma) \cdot G_{t-1} \quad (2.9)$$

$$c) \quad F_t = \beta \cdot \left( \frac{R_t}{\overline{R}_t} \right) + (1 - \beta) \cdot F_{t-T-N} \quad (2.10)$$

Avec  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  des constantes de lissages.

$$5. \text{ La prévision } P_{t+T} : \quad P_{t+T} = (\overline{R}_t + T \cdot G_t) F_{t+T-N} \quad (2.11)$$

Formule générale pour  $T$  périodes dans le futur.

6. Mettre :  $t = t + 1$  et aller à l'étape 3

L'algorithme nous permet d'établir les données d'entrée du programme de Winter's pour l'analyse de la demande pour chacune des deux sources (PV et Diesel) avec  $N = 12$  mois.

Données calculées	Système Diesel	Système Photovoltaïque
$V_1$	15 058,08 kWh	6 553,75 kWh
$V_2$	16 846,92 kWh	7 452,92 kWh
$G_0$	149,069	74,931
$\overline{R_0}$	17 666,80 kWh	7 865,03 kWh
$F'_i$ (max)	1,295	1,374
$F_t$ (max)	1,0615	1,21063
$\overline{R_t}$ (max)	19 681,89 kWh	8 478,5 kWh
$G_t$ (max)	156,85	74,931
$\alpha$	0,3	0,3
$\beta$	0,01	0,01
$\gamma$	0,005	0,05

Tableau II.4 : Les paramètres d'entrée de la méthode de Winter's.

Les paramètres de considération sont établis dans l' Annexe 2

### II.2.1.d Les résultats de l'analyse de la demande

Période estimée et l'année	Demande moyenne mensuelle	
	Solaire PV	Diesel
An1 (2005)	7 296,04 kWh	18 852,65 kWh
An2 (2006)	8 165,34 kWh	20 181,98 kWh
An3 (2007)	8 717,98 kWh	21 877,72 kWh
An4 (2008)	9 270,63 kWh	23 593,45 kWh
An5 (2009)	9 823,27 kWh	25 309,18 kWh

**Tableau II.5 :** La demande future de la centrale par Winter's (Voir Annexe 2)

Ce tableau permet de visualiser le comportement de la demande en PV et en Diesel pour analyser les situations de la production dans le futur.

## II.2.2 L'ANALYSE DU DIMENSIONNEMENT DE LA CENTRALE

Le dimensionnement est un aspect fondamental de la conception des composantes de la centrale. C'est l'ensemble des opérations nécessaires, une fois connue la consommation, pour déterminer les caractéristiques techniques des appareils. Les deux paramètres importants sont la consommation et la détermination du rayonnement incident sur le site.

Pour ce faire, on utilise un logiciel qui incorpore un programme de dimensionnement et une base de donnée à 1/100 de degré près en latitude et en longitude pour les données météorologiques de n'importe quel site du globe. Cette base de donnée intègre les programmes de la NASA sur la moyenne des dix dernières années du site considéré.

Les données de consommation seront définies dans les conditions des rapports de production sur consommation les plus défavorables : méthode de la « *pire période* ».

Dans ce cas, on considère seulement les valeurs journalières correspondantes. (Annexe 2).

### II.2.2.a Description du logiciel RETScreen et ses applications

Le *logiciel d'analyse de projets d'énergies propres RETScreen International* est un outil de sensibilisation sur les énergies, d'aide à la décision et de renforcement de compétences, innovateur et unique, qui a été développé par le gouvernement canadien pour surmonter cette importante barrière au déploiement des énergies propres. L'élément central de l'outil consiste en un logiciel d'analyse de projet standardisé et intégré, qui peut être utilisé à travers le monde pour évaluer la production énergétique, le coût du cycle de vie et la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) pour des technologies d'efficacité énergétique et d'énergie renouvelable variées par comparaison à des projets d'énergies conventionnels. En plus du logiciel, l'outil comprend des bases de données de produits, de coûts et météorologiques, un manuel en ligne, un cours de niveau collégial/universitaire basé sur des études de cas et un manuel d'ingénierie, et une place d'affaires électronique. Tous ces outils sont offerts gratuitement en français et en anglais sur ce site Web. Pour ceux ayant un accès limité à Internet, tous ces outils sont aussi disponibles sur CD-ROM.

De nombreuses opportunités pour implanter commercialement des projets rentables d'énergies propres à travers le Canada et autour du monde sont actuellement manquées parce que plusieurs décideurs ne les considèrent toujours pas sur une base routinière. Les planificateurs régionaux et nationaux, les ingénieurs industriels, les architectes de bâtiments commercial et institutionnel, les planificateurs énergétiques de communautés ou d'utilités publiques, par exemple, manquent trop souvent d'apprécier les bénéfices des technologies d'efficacité énergétique et d'énergie renouvelable à l'étape importante et critique de la planification initiale, même lorsque ces technologies ont prouvé qu'elles étaient rentables et fiables dans des situations similaires. Si ces technologies d'énergies propres ne sont pas considérées et mises sur la table dès le début dans le processus décisionnel, il est pratiquement impossible qu'elles soient considérées dans le programme de développement ou les autres étapes d'implantation du projet. Ces opportunités ainsi manquées résultent en des projets perdus qui auraient autrement aidé les pays à rencontrer leurs besoins énergétiques locaux d'une manière durable, tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre, économisant de l'argent et en augmentant le niveau de sécurité et d'autonomie énergétique des populations.

Les données d'entrée, sont définies comme étant les paramètres de production et de consommation les plus défavorables suivant les instants de chaque période.

L'analyse de la consommation journalière révèle que les mois de Août, Septembre, Octobre, Novembre, Décembre et Janvier présente les plus grands rapports défavorables de la consommation sur la production. Une analyse plus fine sur les pics de consommation quotidienne donne les valeurs suivantes pour le mois de Décembre qui présente la période la plus défavorable de la production pour une consommation importante: (Annexe 2)

Période estimée et l'année	Pics de consommation journalière	
	Solaire PV (à 05h)	Diesel (à 20h)
Décembre An1 (2005)	49,69 kW	114,68 kW
Décembre An2 (2006)	53,34 kW	123,04 kW
Décembre An3 (2007)	56,94 kW	131,41 kW
Décembre An4 (2008)	60,57 kW	139,775 kW
Décembre An5 (2009)	64,19 kW	148,14 kW

Tableau II.6 : Les pointes de la puissance de consommation. (Annexe 3)

Ce tableau nous permet de visualiser les pics de puissances du système photovoltaïque suivant les périodes les plus défavorables du rapport production sur consommation. Ces données nous permettent aussi d'analyser le dimensionnement de la centrale dans les conditions de fonctionnement les plus défavorables.

### **II.2.2.b Les résultats de l'analyse du dimensionnement de la centrale**

Après le dimensionnement, le tableau suivant est établi pour situer les caractéristiques exigées et les paramètres actuels de la centrale.

	An 1 (2005)	An 2 (2006)	An 3 (2007)	An 4 (2008)	An 5 (2009)
Puissance de l'onduleur suggérée	49,69 kW (AC)	53,32 kW (AC)	56,94 kW (AC)	60,57 kW (AC)	64,19 kW (AC)
Nbre de jours d'autonomie	1 j	1 j	1 j	1 j	1 j
Cap nominale de la batterie suggérée	3184 Ah	3416 Ah	3648 Ah	3881 Ah	4113 Ah
Type de module	Si-mono	Si-mono	Si-mono	Si-mono	Si-mono
Puiss nominale du champ PV	88,5 kWp	94,95 kWp	101,41 kWp	107,86 kWp	114,32 kWp
Puissance génératrice suggérée	156,9 kW	156,9 kW	156,9 kW	156,9 kW	156,9 kW
Consommation spécifique	0,26 L/ kWh	0,26 L/ kWh	0,26 L/ kWh	0,26 L/ kWh	0,26 L/ kWh
Rendement au m <sup>2</sup> par an	210 kWh /m <sup>2</sup>	211,3kWh /m <sup>2</sup>	212,5 kWh /m <sup>2</sup>	213,5 kWh /m <sup>2</sup>	214,5 kWh /m <sup>2</sup>
Rend global du système PV	10,7 %	10,7 %	10,8 %	10,8 %	10,9 %
Energie du PV par an	167,610 MWh	168,628 MWh	169,563 MWh	170,433 MWh	171,324 MWh

Tableau II.7 : Résultats de l'analyse du dimensionnement (Annex 4)

On remarque que les caractéristiques actuelles de la centrale permettent de répondre aux charges les plus critiques dans les conditions de fonctionnement définies initiales. Ceci oriente le planning de fonctionnement vers une augmentation des heures de fonctionnement du groupe d'appoint GC 250 kVA. Le système fonctionnait de 19h à 00h ; ainsi on pourra adopter 19h 01h à la fin de 2006 et de 18h à 01h à la fin de 2010. Cet aménagement permettrait de réduire les capacités des accumulateurs pour couvrir les autonomies de 18 heures en 2007 et de 17 heures en 2010. Cet aménagement ne peut être réalisé que si les équipements fonctionnent correctement. Ceci va nous permettre de mener une étude technique fine des composantes pour apporter de éléments de réponse. Ce tableau montre aussi l'importance à accorder à l'évolution de la production du PV sur le Diesel car les productions en PV et Diesel augmentent mais le rapport de la consommation du PV sur le Diesel augmente aussi. Si le prix du DO continue d'augmenter, il arrivera un moment où les centrales hybrides seront remises en cause par le coût du kWh du diesel qui sera largement supérieur au coût du kWh du PV qui est relativement constant.

# CHAPITRE

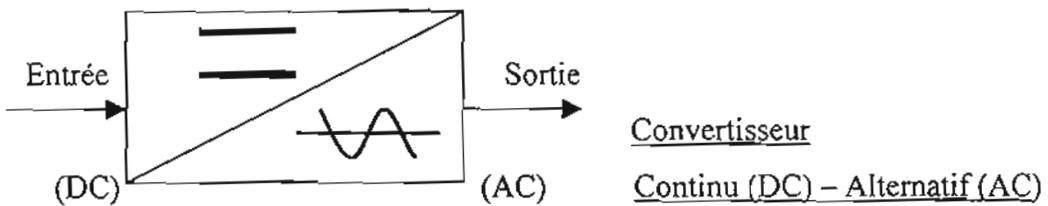
## III

### ETUDE DE L'ONDULEUR

### III. ETUDE DE L'ONDULEUR

L'onduleur est l'élément fondamental sur la chaîne de transformation de l'énergie photovoltaïque. Un onduleur est un convertisseur statique continu-alternatif permettant de fabriquer une source de tension alternative à partir d'une source de tension continue.

Sa défaillance caractérise la non disponibilité de l'énergie PV et donc un manque à gagner énorme. Ceci explique la nécessité d'une étude approfondie pour souligner les défauts et apporter des solutions qui permettront un fonctionnement efficace de l'onduleur.



La figure III.1 : Schéma symbolique de l'onduleur.

Nous allons traiter le principe de l'onduleur autonome qui concerne notre sujet, ce dernier fixe lui-même la fréquence et la valeur efficace de sa tension de sortie.

#### Principe général de fonctionnement

Pour réaliser un onduleur autonome, il suffit de disposer d'un interrupteur inverseur K. Pendant certaines séquences, l'onduleur doit pouvoir renvoyer de l'énergie à la source de tension. C'est pourquoi les interrupteurs sont bidirectionnels en courant.

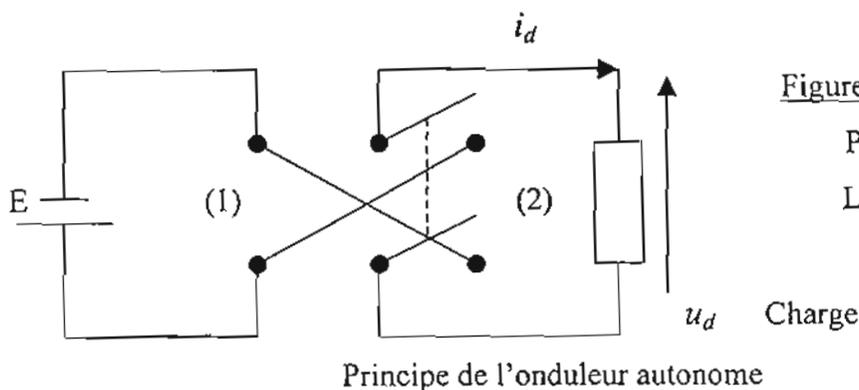
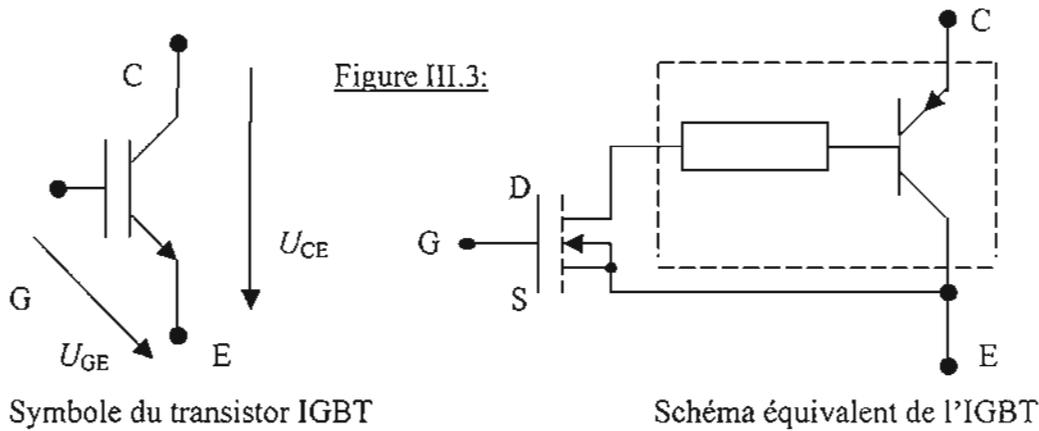


Figure III.2 :  
Principe de  
L'onduleur autonome

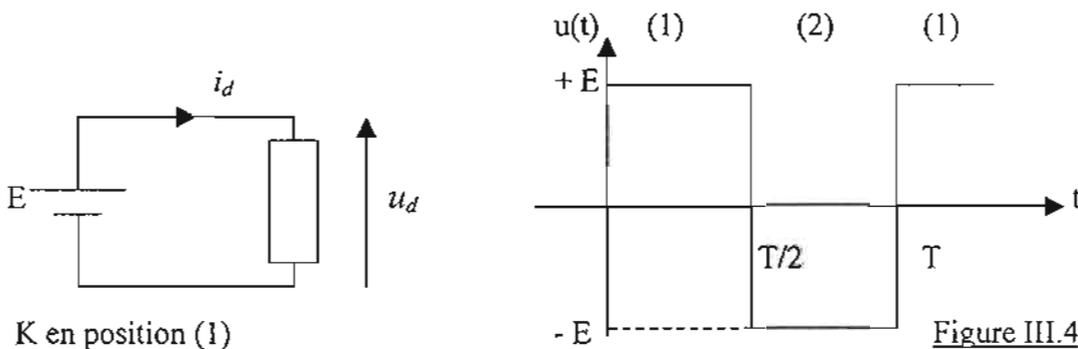
L'interrupteur électronique employé est l'IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor : Transistor Bipolaire à Grille Isolée) : un transistor de puissance. Il allie la facilité de commander les MOS (Métal Oxyde Semi-conducteur). Sa rapidité autorise des fréquences de modulation élevées, des dizaines de kHz.



Lorsque K est en position (1) on aura le montage suivant, soit :  $u_d(t) = E$

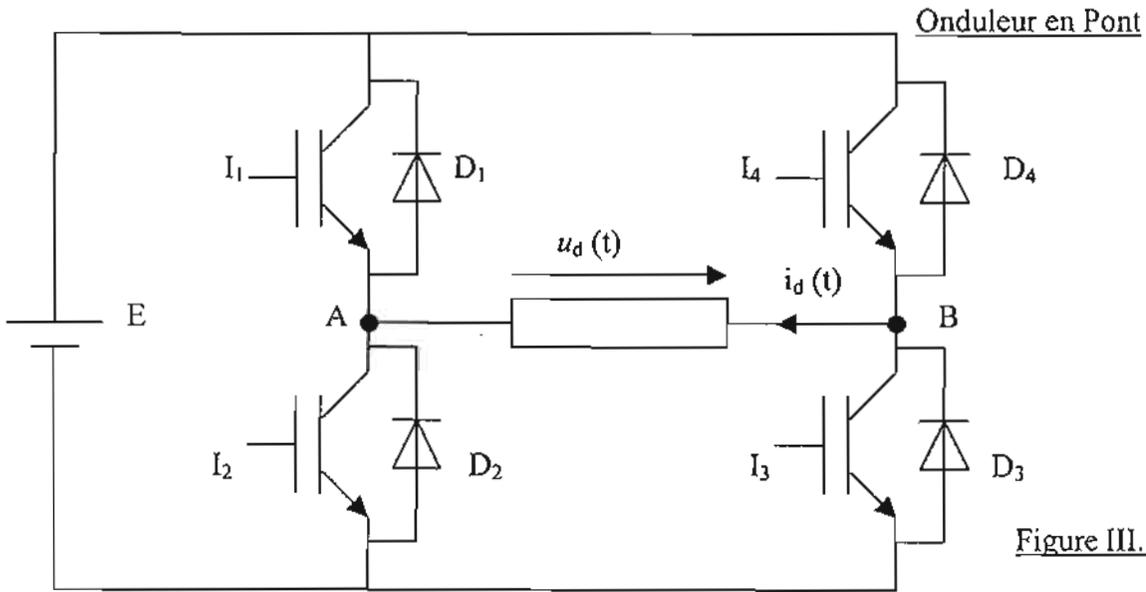
Lorsque K est en position (2) on obtient :  $u_d(t) = - E$

Ainsi nous obtiendrons la forme de  $u_d(t)$  sur une période complète de fonctionnement.



Pour réaliser un onduleur triphasé, on peut regrouper trois (3) onduleurs monophasés. Il suffit de décaler d'un tiers de période ( $T/3$ ) les commandes des trois phases.

Pour faciliter notre étude, on va considérer un onduleur monophasé sur montage en pont complet qui est le principe de notre onduleur installé sur le site.



Hypothèse:

- ❖ Les trois branches de l'onduleur triphasé seront déterminées de la même façon qu'un onduleur autonome, seules les commandes des trois branches seront décalées de T/3
- ❖ On considère que la charge est RL (résistance et inductance) en série.

D'après les relevés des facteurs de fonctionnement de la centrale, on a un facteur de puissance (cosφ) compris entre 0,83 et 0,89 sans dispositif d'amélioration. Cela suppose que la capacitance est négligeable devant R et L en série.

**L'étude**

D'où on a à tout instant :

$$u_d(t) = Ri_d(t) + L \frac{di_d}{dt} \tag{3.1}$$

On a la commande des interrupteurs comme suit :

Pour  $0 < t < \frac{T}{2}$ , les interrupteurs I<sub>2</sub> et I<sub>4</sub> sont commandés à la fermeture ; par application d'une tension Base-Emetteur permettant de saturer le transistor.

Pour  $\frac{T}{2} < t < T$ , les interrupteurs I<sub>1</sub> et I<sub>3</sub> sont commandés à la fermeture de la même façon.

**III.1 LE RÉGIME TRANSITOIRE:**

- Pour  $0 < t < \frac{T}{2}$ , les interrupteurs I<sub>2</sub> et I<sub>4</sub> sont commandés à la fermeture et ils conduisent ; I<sub>1</sub> et I<sub>3</sub> sont ouverts.

$$u_{d1}(t) = Ri_{d1}(t) + L \frac{di_{d1}}{dt} = +E \tag{3.2}$$

L'indice « 1 » correspond à la première demi période et « 2 » à la deuxième.

La solution de cette équation est la somme du régime transitoire et du régime permanent et

s'écrit :

$$i_{d1}(t) = K \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{E}{R} = K \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{u_{d1}(t)}{R} \quad (3.3)$$

Avec  $\tau$  la constante de temps du circuit :  $\tau = \frac{L}{R}$

A  $t = 0$ , on a :  $i_{d10} = K + \frac{E}{R}$ , soit  $K = i_{d10} - \frac{E}{R}$  et en le remplaçant dans l'équation de  $i_{d1}(t)$  :

$$i_{d1}(t) = \left( i_{d10} - \frac{E}{R} \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{E}{R} \quad (3.4)$$

$i_{d10}$  étant le courant à  $t = 0$ . Le courant  $i_{d1}(t)$  tend vers la valeur asymptotique finale  $\frac{E}{R}$  de

façon exponentielle (symétrie du premier ordre).

Pour la première demi période, nous avons considéré les conditions initiales nulles, soit :

$$i_{d10} = i_{d1}(0) = 0, \text{ donc : } i_{d1}(t) = \frac{E}{R} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (3.5)$$

• A  $t = \frac{T}{2}$ , les interrupteurs  $I_1$  et  $I_3$  sont commandés à la fermeture. Ils ne peuvent pas

conduire car le courant est positif à  $t = \frac{T}{2}$ , soit :

$$i_{d1}\left(\frac{T}{2}\right) = \frac{E}{R} \left( 1 - e^{-\frac{T}{2\tau}} \right) \quad (3.6)$$

Ce sont les diodes  $D_1$  et  $D_3$  qui conduisent.  $I_2$  et  $I_4$  sont ouverts.

Tant que le courant dans la charge est positif, on a :

$$u_{d2}(t) = R i_{d2}(t) + L \frac{di_{d2}}{dt} = -E \quad (3.7)$$

De même que précédemment, la solution de cette équation s'écrit :

$$i_{d2}(t) = \left( i_{d20} + \frac{E}{R} \right) e^{-\frac{t - \frac{T}{2}}{\tau}} - \frac{E}{R} \quad (3.8)$$

$i_{d20}$  étant le courant à  $t = \frac{T}{2}$ , soit :

$$i_{d20} = i_{d1}\left(\frac{T}{2}\right) = \frac{E}{R} \left( 1 - e^{-\frac{T}{2\tau}} \right) \quad (3.9)$$

Le courant  $i_{d2}(t)$  tend vers une valeur asymptotique finale  $-\frac{E}{R}$  de façon exponentielle.

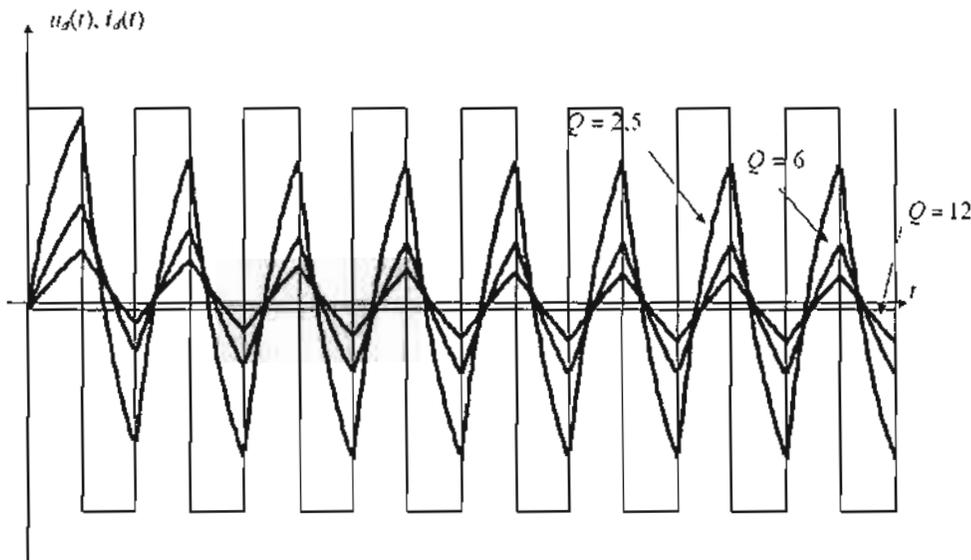
Il s'annulera pour un temps  $t_{10} < T$  du fait que  $i_{d20} > 0$ .

Pour  $t_{10} < T$ , les interrupteurs  $I_1$  et  $I_3$  entrent en conduction alors que les diodes  $D_1$  et  $D_3$  se bloquent.

- A  $t = T, \dots$

La figure III.6 décrit le régime transitoire du courant pour une charge  $RL$  pour trois facteurs de qualité différents. Plus  $Q$  augmente, plus le régime permanent est long à s'établir car, pour une période  $T$  de fonctionnement donnée, la constante de temps du circuit  $RL\tau = \frac{L}{R}$  augmente.

Figure III.6:



### III.2 LE RÉGIME PERMANENT

Partant de conditions initiales nulles, on a vu qu'au bout d'un temps dépendant du facteur de

qualité  $Q = \frac{L\omega}{R}$  figure ci-dessus, on atteindra un régime de fonctionnement permanent.

En régime permanent, le courant « oscille » entre  $+I_{dM}$  et  $-I_{dM}$  comme le montre la figure ci-dessous.

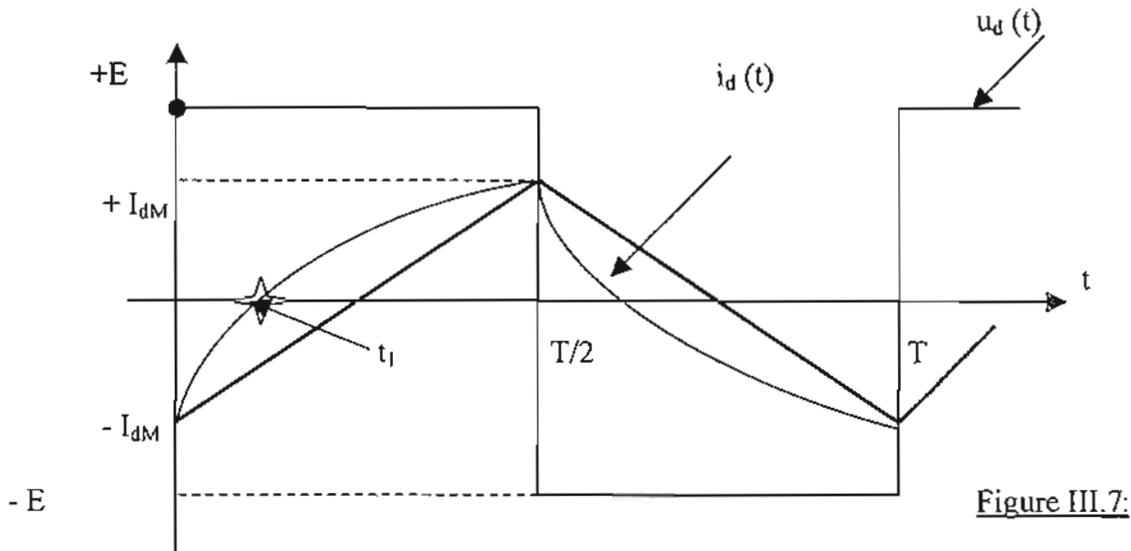


Figure III.7:

Nous allons à présent calculer les caractéristiques propres au régime permanent.

### Remarque préliminaire :

En régime permanent,  $i_d(t)$  est forcément périodique de période  $T$  car l'équation différentielle

$$u_d(t) = Ri_d(t) + L \frac{di_d}{dt} \text{ est linéaire (} R \text{ et } L \text{ sont indépendants du courant } i_d(t)\text{).}$$

La charge étant inductive, le courant  $i_d(t)$  sera en retard sur la tension  $u_d(t)$ , ce retard étant compris entre  $t = 0$  (charge  $R$  pure) et  $t = T/4$  (charge  $L$  pure). Donc en régime permanent le courant  $i_d(t)$  passera d'une valeur négative à une valeur positive à  $t = t_1$  avec  $0 < t_1 < T/4$ .

Ce courant, par raison de symétrie du fonctionnement du montage, passera d'une valeur positive à une valeur négative à  $t = \frac{T}{2} + t_1$ .

Dans les deux cas, le courant « suit » l'allure de la tension  $u_d(t)$  avec un retard  $t_1$ .

### Expressions de $i_d(t)$ et $u_d(t)$

Au cours d'une période de fonctionnement, on distingue quatre séquences.

Pour  $0 < t < t_1$ ,  $I_1$  et  $I_3$  sont ouverts.  $I_2$  et  $I_4$  sont commandés à la fermeture. Le courant  $i_d(t)$  étant négatif à  $t = 0$  et égal à  $(-I_{dM})$ , ils ne peuvent conduire. Ce sont donc les diodes  $D_2$  et  $D_4$  qui conduisent le courant  $i_d(t)$ .

$$\text{On a : } u_d(t) = E = Ri_d(t) + L \frac{di_d}{dt} \quad (3.10)$$

$$\text{D'où : } i_d(t) = \left( -I_{dM} - \frac{E}{R} \right) e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{E}{R} \quad (3.11)$$

Avec  $\tau = \frac{L}{R}$  et à  $t = t_1$ ,  $i_d(t)$  s'annule.

Pour  $t_1 < t < \frac{T}{2}$ ,  $I_2$  et  $I_4$  se mettent à conduire tandis que  $D_2$  et  $D_4$  se bloquent. Les équations donnant  $i_d(t)$  et  $u_d(t)$  restent les mêmes que précédemment.

Pour  $\frac{T}{2} < t < t_1 + \frac{T}{2}$ ,  $I_2$  et  $I_4$  sont condamnés à l'ouverture et se bloquent.  $I_1$  et  $I_3$  sont commandés à la fermeture. Le courant  $i_d(t)$  étant positif à  $t = \frac{T}{2}$  et égal à  $(+I_{dM})$  par raison de symétrie,  $I_1$  et  $I_3$  ne peuvent pas conduire. Ce sont donc les diodes  $D_1$  et  $D_3$  qui conduisent le courant  $i_d(t)$ .

$$\text{On a : } u_d(t) = -E = Ri_d(t) + L \frac{di_d}{dt} \quad (3.12)$$

$$\text{D'où : } i_d(t) = \left( I_{dM} + \frac{E}{R} \right) e^{-\frac{t - \frac{T}{2}}{\tau}} - \frac{E}{R} \quad (3.13)$$

A  $t = \frac{T}{2} + t_1$ ,  $i_d(t)$  s'annule.

Pour  $\frac{T}{2} + t_1 < t < T$ ,  $I_1$  et  $I_3$  conduisent.  $D_1$  et  $D_3$  sont bloquées. Les équations donnant  $u_d(t)$  et  $i_d(t)$  restent les mêmes que précédemment.

### Calcul de $I_{dM}$ :

Pour  $0 < t < \frac{T}{2}$ , l'équation différentielle permettant de donner l'allure de  $i_d(t)$  s'écrit :

$$E = Ri_{d1}(t) + L \frac{di_{d1}}{dt}$$

$$\rightarrow i_{d1}(t) = \left( -I_{dM} - \frac{E}{R} \right) e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{E}{R} \quad (3.14)$$

L'indice « 1 » correspond à l'intervalle  $0 < t < \frac{T}{2}$

Pour  $\frac{T}{2} < t < T$ , on a :

$$-E = Ri_{d2}(t) + L \frac{di_{d2}}{dt}$$

$$\rightarrow i_d(t) = \left( I_{dM} + \frac{E}{R} \right) e^{-\frac{t-T}{\tau}} - \frac{E}{R} \tag{3.15}$$

En régime permanent, le courant  $i_d(t)$  étant périodique de période  $T$ , on écrit :

$$i_{d1}(0) = -I_M = i_{d2}(T) = -\frac{E}{R} + \left( I_{dM} + \frac{E}{R} \right) e^{-\frac{T}{2\tau}} \tag{3.16}$$

$$i_{d1}\left(\frac{T}{2}\right) = I_M = i_{d2}\left(\frac{T}{2}\right) = \frac{E}{R} + \left( -I_{dM} - \frac{E}{R} \right) e^{-\frac{T}{2\tau}} \tag{3.17}$$

L'une ou l'autre des équations (3.16) ou (3.17) permet d'obtenir  $I_{dM}$ .

Prenons l'équation (1), elle donne :

$$-I_{dM} = \frac{E}{R} \left( 1 + e^{-\frac{T}{2\tau}} \right) + I_{dM} e^{-\frac{T}{2\tau}} \tag{3.18}$$

$$\rightarrow I_{dM} \left( 1 + e^{-\frac{T}{2\tau}} \right) = \frac{E}{R} \left( 1 - e^{-\frac{T}{2\tau}} \right) \tag{3.19}$$

soit : 
$$I_{dM} = \frac{E}{R} \frac{1 - e^{-\frac{T}{2\tau}}}{1 + e^{-\frac{T}{2\tau}}} = \frac{E}{R} th\left(\frac{T}{4\tau}\right)$$

$$\rightarrow I_{dM} = \frac{E}{R} th\left(\frac{T}{4\tau}\right) \tag{3.20}$$

Calcul de  $t_1$  :

A  $t = t_1$ ,  $i_{d1}(t) = 0$ , soit : 
$$i_{d1}(t_1) = \left( -I_{dM} - \frac{E}{R} \right) e^{-\frac{t_1}{\tau}} + \frac{E}{R} = 0 \tag{3.21}$$

d'où : 
$$t_1 = -\tau \ln \frac{\frac{E}{R}}{I_{dM} + \frac{E}{R}} = -\tau \ln \frac{1}{1 + th\left(\frac{T}{4\tau}\right)} = \tau \ln \left( 1 + th\left(\frac{T}{4\tau}\right) \right) \tag{3.22}$$

$$\boxed{t_1 = \tau \ln \left( 1 + th\left(\frac{T}{4\tau}\right) \right)} \tag{3.23}$$

### Calcul de la résistance et de l'inductance équivalentes du réseau :

On considère la période du 15 Avril au 15 Mai 2004, période pendant laquelle l'onduleur a subi les causes de sa dégradation. On considère que la centrale subit les pires anomalies de son fonctionnement pendant cette période. (Annexe 3)

On considère que la charge est RL (résistance et inductance) en série.

Les relevés de saison 15 avril – 15 mai donne les caractéristiques électriques suivantes :

$U = 410 \text{ V}$ ,  $V = 238 \text{ V}$  et  $I = 217,5 \text{ A}$  pour le fonctionnement de 19h à 00h du GC 250 kVA, avec un  $\cos\varphi = 0,80$

$U = 403 \text{ V}$ ,  $V = 233 \text{ V}$  et  $I = 98,3 \text{ A}$  pour le fonctionnement de 00h à 19h du solaire P.V., avec un  $\cos\varphi = 0,86$

RQ : on relève les valeurs maximales instantanées sur les lignes.

La puissance maximale enregistrée dans cette période est de 134,6 kW à 20h00.

$$\text{On a : } P = 3RI^2 = \sqrt{3}UI \cos\varphi \rightarrow R = \frac{P}{3I^2} \quad (3.24)$$

$$Q = 3L\omega I^2 = \sqrt{3}UI \sin\varphi \rightarrow L = \frac{P \cdot \tan\varphi}{3 * 2\pi f \cdot I^2} \quad (3.25)$$

A.N :

$$R = \frac{134600}{3 * 217,5^2} = 0,94843 \text{ k}\Omega = 948,43 \Omega \rightarrow \boxed{R = 948,43 \Omega}$$

$$L = \frac{134600 * \tan(\cos^{-1} 0,83)}{3 * 2\pi * 50 * 217,5^2} = 0,002029 \text{ kH} \rightarrow \boxed{L = 2,029 \text{ H}}$$

On obtient ainsi une constante de temps :  $\tau = \frac{L}{R} = 2,139 \text{ ms}$

On a une fréquence de sortie de 50 Hz  $\pm 1$ , d'où on aura :

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 20 \text{ ms sur } 2\pi.$$

$$\boxed{\tau = 2,139 \text{ ms}} \quad \text{et} \quad \boxed{T = 20 \text{ ms}}$$

D'où on obtient :  $t_1 = 2,139 \ln\left(1 + th\left(\frac{20}{4 * 2,139}\right)\right) = 1,468 \text{ ms}$

$$\boxed{t_1 = 1,468 \text{ ms}}$$



# CHAPITRE

## IV

### LA TECHNOLOGIE PWM (MLI)

## IV. LA TECHNOLOGIE PWM (Pulse Width Modulation) ou MLI (Modulation de Largeur d'Impulsions)

Cette technologie est actuellement la plus utilisée par les constructeurs. Elle présente l'avantage de commander les semis-conducteurs sur des hautes fréquences qui peuvent atteindre des dizaines de kHz.

Notre onduleur est construit avec une modulation de largeur d'impulsions. Cette modulation impose certains critères de protection et de surveillance pour un meilleur fonctionnement.

La structure de puissance reste la même. La commande comprend toujours deux alternances principales, mais on introduit une modulation à l'intérieur de chaque alternance.

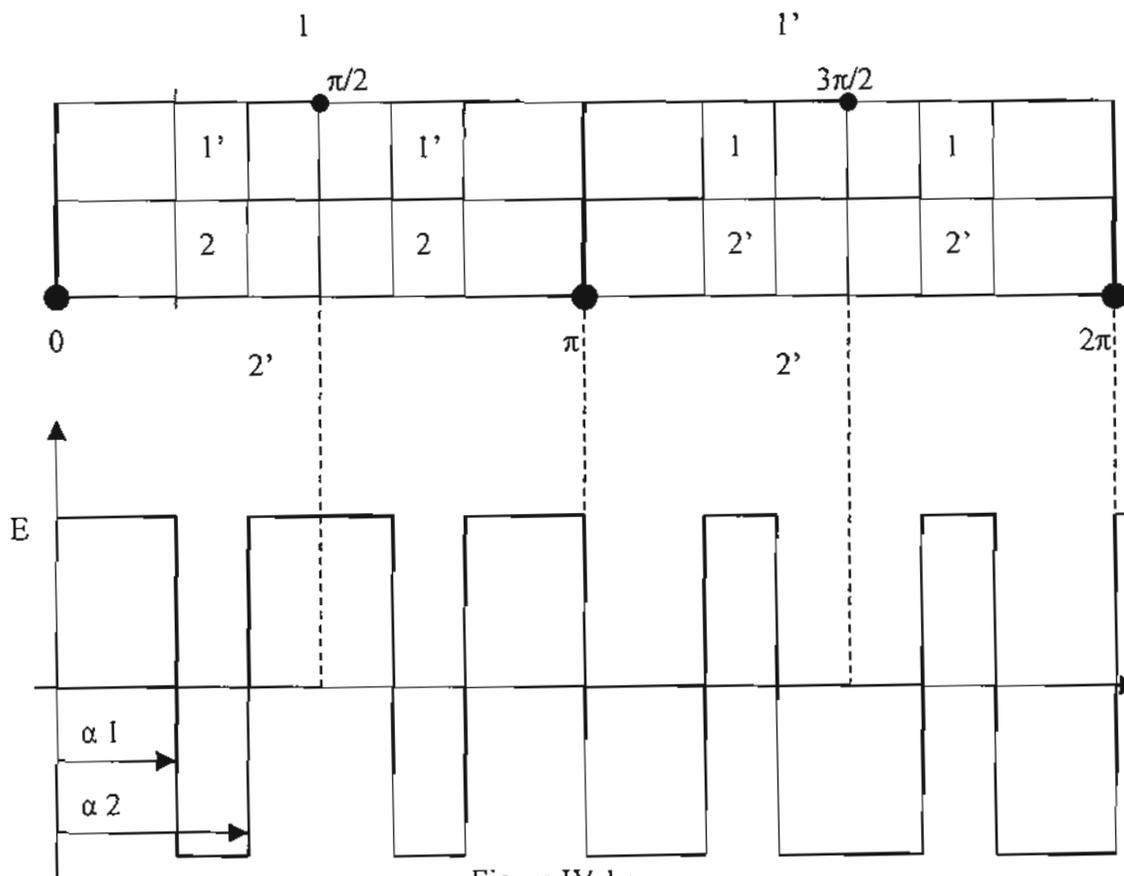


Figure IV.1 :

A l'intérieur de l'alternance positive (1 et 2' fermés), on fait conduire 1' et 2 à des moments et pendant des durées calculées.

A l'intérieur de l'alternance négative (2 et 1' fermés), on fait conduire 1 et 2' à des moments et pendant des durées calculées.

Analyse de  $V_{AB}(t)$  : Série de Fourier

$$V_{AB}(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_1^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (4.1)$$

$$\text{avec } a_n = \frac{2}{T} \int_0^T V_{AB}(t) \cdot \cos n\omega t \cdot dt \quad \text{et} \quad b_n = \frac{2}{T} \int_0^T V_{AB}(t) \cdot \sin n\omega t \cdot dt$$

$a_0 = 0$  et quel que soit  $n \geq 1$ ,  $a_n = 0$  ; car on a une fonction impaire

Et posons :  $\alpha = \omega t$  et  $T = 2\pi$

On a une symétrie par rapport à  $\pi$ , donc

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} V_{AB}(\alpha) \cdot \sin n\alpha \cdot d\alpha = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} V_{AB}(\alpha) \cdot \sin n\alpha \cdot d\alpha$$

$$b_n = \frac{2E}{n\pi} \left[ -\cos n\alpha \Big|_0^{\alpha_1} + [\cos n\alpha]_{\alpha_1}^{\alpha_2} + [-\cos n\alpha]_{\alpha_2}^{\pi-\alpha_2} + [\cos n\alpha]_{\pi-\alpha_2}^{\pi-\alpha_1} + [-\cos n\alpha]_{\pi-\alpha_1}^{\pi} \right]$$

$$b_n = \frac{2E}{n\pi} \left[ 1 - 2\cos n\alpha_1 + 2\cos n\alpha_2 + 2\cos n(\pi - \alpha_1) - 2\cos n(\pi - \alpha_2) - \cos n\pi \right]$$

Pour  $n$  pair :  $b_n = 0$  ; d'où les harmoniques de rang paire sont éliminées

$$\text{Pour } n \text{ impair : } b_n = \frac{4E}{n\pi} \left[ 1 - 2\cos n\alpha_1 + 2\cos n\alpha_2 \right] \quad (4.2)$$

L'introduction des angles  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  permet d'éliminer des harmoniques non désirées.

La paire (5 ; 7) est la plus souvent visée.

D'où existe-il ( $\alpha_1$  et  $\alpha_2$ ) tel que :  $b_5 = 0$  et  $b_7 = 0$  ?

$$\Rightarrow \begin{cases} 1 - 2\cos 5\alpha_1 + 2\cos 5\alpha_2 = 0 & (4.3) \\ 1 - 2\cos 7\alpha_1 + 2\cos 7\alpha_2 = 0 & (4.4) \end{cases}$$

Initialisation :

1	$\alpha_1 = 0^\circ$	$\alpha_2 = 12^\circ$
	$\alpha_2 = 12^\circ$	$\alpha_1 = 7.54^\circ$
2	$\alpha_1 = 7.54^\circ$	$\alpha_2 = 14.62^\circ$
	$\alpha_2 = 14.62^\circ$	$\alpha_1 = 10.48^\circ$
3	$\alpha_1 = 10.48^\circ$	$\alpha_2 = 16.75^\circ$
	$\alpha_2 = 16.75^\circ$	$\alpha_1 = 12.50^\circ$
4	$\alpha_1 = 12.50^\circ$	$\alpha_2 = 18.44^\circ$
	$\alpha_2 = 18.44^\circ$	$\alpha_1 = 13.92^\circ$
5	$\alpha_1 = 13.92^\circ$	$\alpha_2 = 19.74^\circ$
	$\alpha_2 = 19.74^\circ$	$\alpha_1 = 14.89^\circ$
6	$\alpha_1 = 14.89^\circ$	$\alpha_2 = 20.68^\circ$
	$\alpha_2 = 20.68^\circ$	$\alpha_1 = 15.5^\circ$
7	$\alpha_1 = 15.5^\circ$	$\alpha_2 = 21.29^\circ$
	$\alpha_2 = 21.29^\circ$	$\alpha_1 = 15.85^\circ$
8	$\alpha_1 = 15.85^\circ$	$\alpha_2 = 21.65^\circ$
	$\alpha_2 = 21.65^\circ$	$\alpha_1 = 16.04^\circ$
9	$\alpha_1 = 16.04^\circ$	$\alpha_2 = 21.85^\circ$
	$\alpha_2 = 21.85^\circ$	$\alpha_1 = 16.14^\circ$
10	$\alpha_1 = 16.14^\circ$	$\alpha_2 = 21.96^\circ$
	$\alpha_2 = 21.96^\circ$	$\alpha_1 = 16.19^\circ$

Tableau IV.1 Tableau des angles d'alimentation en PWM

On aura ainsi :  $\alpha_1 = 16^\circ \approx \frac{\pi}{12}$  (4.5)

et  $\alpha_2 = 22^\circ \approx \frac{\pi}{8}$  (4.6)

Appliquons la technologie PWM (MLI) de notre onduleur par la considération des trois branches constituant notre triphasé.

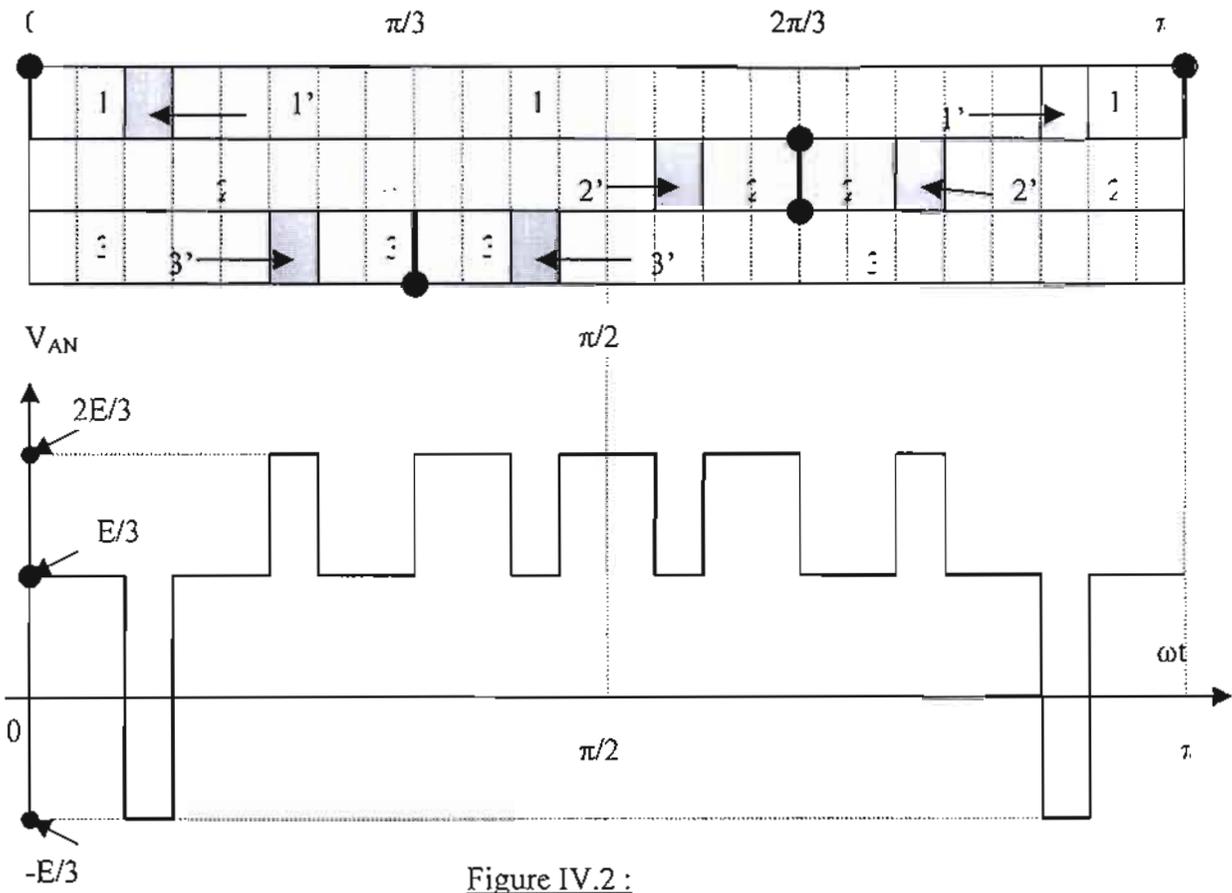


Figure IV.2 :

Tableau IV.1 :

$\alpha$	$0 < \alpha < \pi/12$	$\pi/12 < \alpha < \pi/8$	$\pi/8 < \alpha < 5\pi/24$	$5\pi/24 < \alpha < \pi/4$	$\pi/4 < \alpha < \pi/3$
$V_{AB}$	$E / 3$	$- E / 3$	$E / 3$	$2E / 3$	$E / 3$
$\alpha$	$\pi/3 < \alpha < 5\pi/12$	$5\pi/12 < \alpha < 11\pi/24$	$11\pi/24 < \alpha < 13\pi/24$	$13\pi/24 < \alpha < 7\pi/12$	$7\pi/12 < \alpha < 2\pi/3$
$V_{AB}$	$2E / 3$	$E / 3$	$2E / 3$	$E / 3$	$2E / 3$
$\alpha$	$2\pi/3 < \alpha < 9\pi/12$	$9\pi/12 < \alpha < 19\pi/24$	$19\pi/24 < \alpha < 7\pi/8$	$7\pi/8 < \alpha < 11\pi/12$	$11\pi/12 < \alpha < \pi$
$V_{AB}$	$E / 3$	$2E / 3$	$E / 3$	$- E / 3$	$E / 3$

On a une symétrie de la courbe  $V_{AN}$  par rapport à  $\pi/2$ , d'où on peut étudier  $b_n$  sur  $[0, \pi/2]$ .

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} V_{AN}(\alpha) \cdot \sin n\alpha \cdot d\alpha = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} V_{AN}(\alpha) \cdot \sin n\alpha \cdot d\alpha$$

$$b_n = \frac{4E}{3n\pi} \left[ \begin{aligned} & \left[ -\cos n\alpha \right]_0^{\frac{\pi}{12}} + \left[ \cos n\alpha \right]_{\frac{\pi}{12}}^{\frac{\pi}{8}} + \left[ -\cos n\alpha \right]_{\frac{\pi}{8}}^{\frac{5\pi}{24}} + \left[ -\cos n\alpha \right]_{\frac{5\pi}{24}}^{\frac{\pi}{4}} + \\ & \left[ -\cos n\alpha \right]_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{5\pi}{3}} + \left[ -2\cos n\alpha \right]_{\frac{5\pi}{3}}^{\frac{11\pi}{12}} + \left[ -\cos n\alpha \right]_{\frac{11\pi}{12}}^{\frac{2\pi}{3}} + \left[ -2\cos n\alpha \right]_{\frac{2\pi}{3}}^{\frac{11\pi}{24}} \right] \end{aligned} \right]$$

On a pour n pair,  $b_n = 0$  ;

Pour n impair on obtient ainsi :

(4.7)

$$b_n = \frac{4E}{3n\pi} \left[ 1 - 2\cos \frac{n\pi}{12} + 2\cos \frac{n\pi}{8} + \cos \frac{5n\pi}{24} - \cos \frac{n\pi}{4} + \cos \frac{n\pi}{3} - \cos \frac{5n\pi}{12} + \cos \frac{11n\pi}{24} - 2\cos \frac{n\pi}{2} \right]$$

$$b_1 = 1,37386 \frac{4E}{3\pi} = 58,31\% E \quad ; \text{ c'est le fondamental} \tag{4.8}$$

$$b_3 = 0 \tag{4.9}$$

$$b_5 = -0,4245 \frac{4E}{15\pi} = -3,6\% E \quad \rightarrow \quad \frac{b_1}{b_5} = -16,2 \tag{4.10}$$

$$b_7 = -0,4952 \frac{4E}{21\pi} = -3\% E \quad \rightarrow \quad \frac{b_1}{b_7} = -19,43 \tag{4.11}$$

**Calcul des valeurs efficaces de  $V_{AN}$  :**

La valeur efficace de  $V_{AN}$  :

$$\text{On a : } V_{eff,AN}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T V_{AN}^2(t).dt$$

La fonction  $V_{AN}(t)$  est impaire et symétrique par rapport à  $\pi/2$ , donc on pourra calculer la valeur efficace de  $V_{AN}$  dans l'intervalle  $[0, \pi/2]$ .

$$V_{eff,AN}^2 = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} V_{AN}^2(\alpha).d\alpha$$

$$V_{eff,AN}^2 = \frac{2}{\pi} \left[ \frac{E^2 \pi}{9 \cdot 12} + \frac{E^2 \pi}{9 \cdot 24} + \frac{E^2 \pi}{9 \cdot 12} + \frac{4E^2 \pi}{9 \cdot 24} + \frac{E^2 \pi}{9 \cdot 12} + \frac{4E^2 \pi}{9 \cdot 12} + \frac{E^2 \pi}{9 \cdot 24} + \frac{4E^2 \pi}{9 \cdot 24} \right]$$

$$V_{eff,AN}^2 = \frac{7E^2}{36} \quad \text{d'où : } \boxed{V_{eff,AN} = E \sqrt{\frac{7}{36}}} \tag{4.12}$$

La valeur efficace de  $V_{AN1}$  :

$$\text{On a : } V_{eff.AN1}^2 = \frac{a_1^2}{2} + \frac{b_1^2}{2} \quad (4.13)$$

On a :  $a_0 = 0$  et quel que soit  $n \geq 1$ ,  $a_n = 0$  ; car on a une fonction impaire (voir précédent).

$$V_{eff.AN1}^2 = \frac{b_1^2}{2} = \left[ 1,37386 \frac{4E}{3\pi} \right]^2 * \frac{1}{2} \rightarrow \boxed{V_{eff.AN1} = 1,37386 \frac{2\sqrt{2}}{3\pi} E} \quad (4.14)$$

Calcul du taux de distorsion harmonique (TDH) :

$$\text{On a : } TDH = \sqrt{\frac{V_{eff.AN}^2 - V_{eff.AN1}^2}{V_{eff.AN}^2}}$$

$$TDH = \sqrt{\frac{\frac{7E^2}{36} - (1,37386)^2 \frac{8E^2}{9\pi^2}}{\frac{7E^2}{36}}} = \sqrt{\frac{7\pi^2 - 32 * (1,37386)^2}{7\pi^2}} \quad (4.15)$$

$$\rightarrow \boxed{TDH = 35,46\%} \quad (4.16)$$

### Conclusion :

On a un TDH très important pour une technologie PWM, d'où l'importance de l'utilisation d'une modulation à largeur d'impulsions repose sur l'installation et le contrôle des filtres.

Si les semi conducteurs (IGBT) sautent à chaque alimentation de l'onduleur, c'est parce que les filtres n'existent pas ou ne fonctionnent pas. Sur site, on voit bien la présence des filtres, ce qui indique que les filtres ne sont plus opérationnels en cas de surtension.

Ce fait conduit à deux problèmes :

1. TDH très grand impose une très grande surveillance sur la fonctionnalité des filtres
2. On a un temps de réaction des semi-conducteurs (IGBT) de  $t_1 = 1,4628\text{ms}$ , ce qui nécessite une très grande protection des semi-conducteurs pour une surtension ne dépassant pas la demi période, c'est-à-dire pour  $T/2 = 10\text{ms}$ .

On a une tension effective des semi conducteurs sous base émetteur, le fondamental :

$$V_{eff. AN1} = 158,32V \quad (4.17)$$

La valeur maximale que peuvent supporter les semi-conducteurs est une tension normale de :

$$V_{AN} = E = 384V \quad (4.18)$$

Cette valeur justifie l'importance des filtres et des protections.

# CHAPITRE

## V

# PROTECTION DES TRANSISTORS BIPOLAIRES (IGBT)

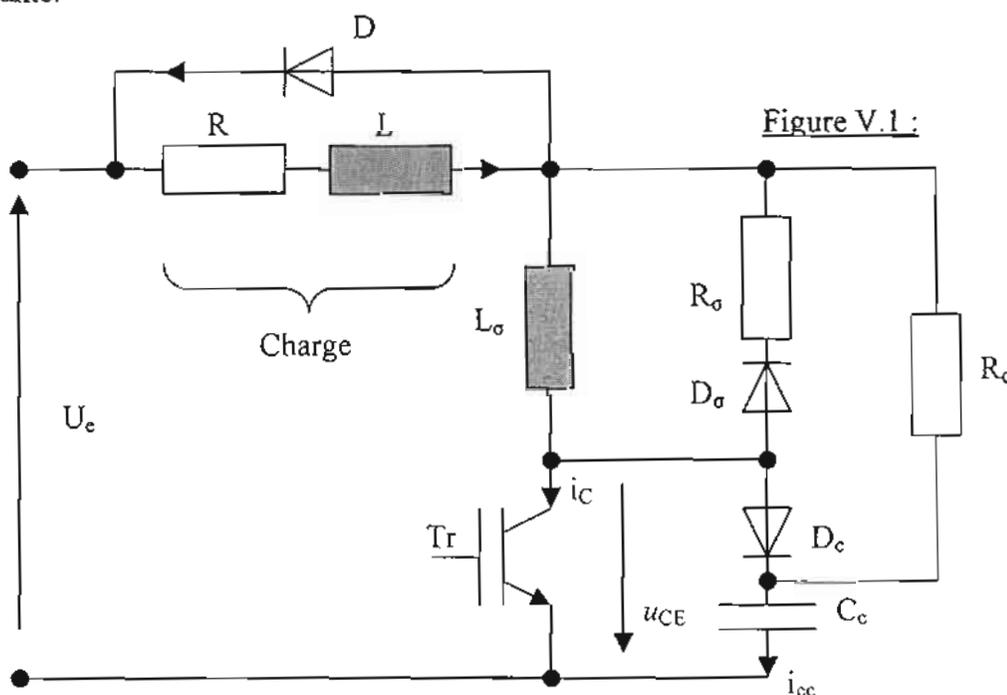
## V. PROTECTION DES TRANSISTORS BIPOLAIRES (IGBT)

Les semi-conducteurs sont les principaux éléments qui caractérisent le fonctionnement d'un onduleur. Ils subissent des commutations sous de grandes fréquences : des dizaines de kHz. Ces commutations se déroulent sous des tensions et des courants bien déterminés. Ces données électriques définissent les paramètres que doivent remplir les semi-conducteurs. Sous des courants et des tensions qui les traversent, les IGBT dégagent une quantité énorme de chaleur qui mérite d'être réduite très largement. Par ailleurs, les paramètres électriques de fonctionnement varient sous des plages bien déterminées. Cela explique l'importance de considérer les sensibilités de ces semi-conducteurs par rapport aux données électriques de fonctionnement.

Ainsi, une étude sur le comportement de ces semi-conducteurs est jugée indispensable pour mieux cerner les éléments caractérisant leurs défaillances. Cela nous permettra de proposer des solutions à apporter pour une meilleure protection des semi-conducteurs suivant les conditions de fonctionnement décrite au niveau de la centrale.

Principe de la protection :

Les transistors bipolaires à commutation de puissance sont protégés par un circuit discret appelé *circuit d'aide à la commutation*. Le schéma de notre circuit est représenté à la figure suivante.



De cette figure on peut distinguer un circuit d'aide à l'enclenchement et un circuit d'aide au déclenchement.

1. Le circuit d'aide à l'enclenchement d'un transistor bipolaire sur charge ohmique et inductive est composé de :  $L_{\sigma}$ ,  $D_{\sigma}$  et  $R_{\sigma}$ .
2. Le circuit d'aide au déclenchement d'un transistor bipolaire sur charge ohmique et inductive est composé de :  $C_c$ ,  $D_c$  et  $R_c$ .

Le rôle du circuit d'aide à la commutation est double afin de garantir la protection du transistor bipolaire (IGBT) :

- ❖ Diminuer les pertes pendant la commutation,
- ❖ Modifier le diagramme de fonctionnement pour mieux l'inscrire dans l'aire de sécurité.

La bobine d'induction  $L_{\sigma}$  est l'élément principal du réseau pour l'aide à l'*enclenchement* ; elle est de faible valeur (quelques  $\mu\text{H}$  à quelques dizaines de  $\mu\text{H}$ ). Son inductance limite le  $di_c/dt$ . Ainsi, la tension  $U_{CE}$  tombe rapidement à  $U_{CEsat}$  (saturation) avant que le courant  $i_c$  ait le temps de croître fortement. L'énergie magnétique emmagasinée dans l'inductance  $L_{\sigma}$  sera dissipée dans la résistance  $R_{\sigma}$  à travers la diode  $D_{\sigma}$ , lors du blocage du transistor c'est-à-dire quand il ne conduit pas. Ce phénomène est accompagné d'une légère surtension égale à  $R_{\sigma} \cdot i_c$ , entre collecteur et émetteur du transistor.

Le condensateur  $C_c$  est l'élément principal du réseau d'aide au *déclenchement*. La diode  $D_c$  et la résistance  $R_c$  évitent la décharge brutale du condensateur  $C_c$  au moment de l'enclenchement du transistor bipolaire  $Tr$ . Le courant dans le transistor décroît rapidement alors que la croissance de la tension est ralentie par la présence du condensateur  $C_c$ . L'énergie électrostatique emmagasinée dans ce condensateur sera dissipée dans la résistance  $R_c$ , lors de l'enclenchement du transistor  $Tr$ . Ce phénomène est accompagné d'une surintensité transitoire égale à  $U_c/R_c$  dont il convient de tenir compte lors du dimensionnement du circuit.

### V.1 COMPORTEMENT A L'ENCLENCHEMENT

Les figures qui suivent présentent les le comportement des semi-conducteurs suivant les conditions de fonctionnement avec ou sans circuit d'aide au déclenchement. Cela permet de mieux comprendre les éléments cibles pour bien mener la protection.

On obtient ainsi l'évolution des tension et courant entre les points les plus sensibles.

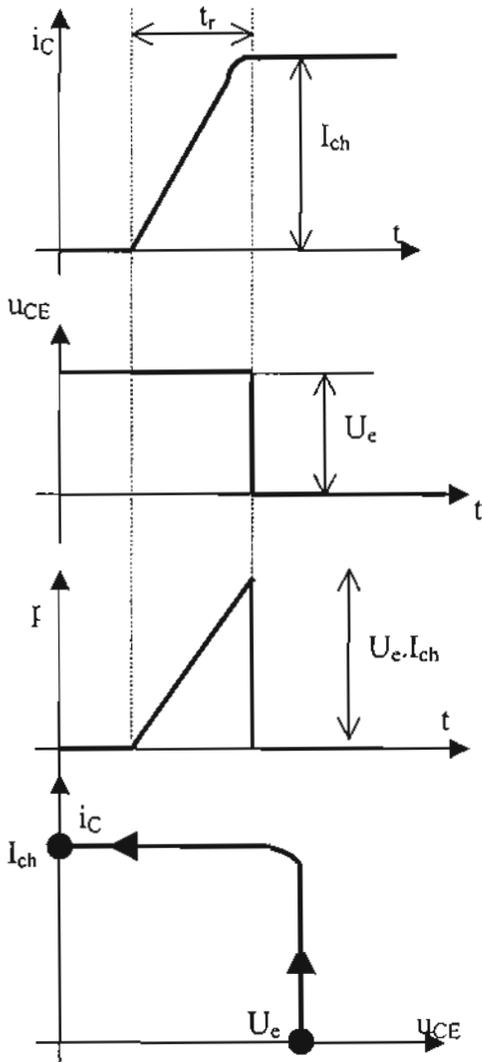


Figure V.2:

Comportement sans circuit d'aide

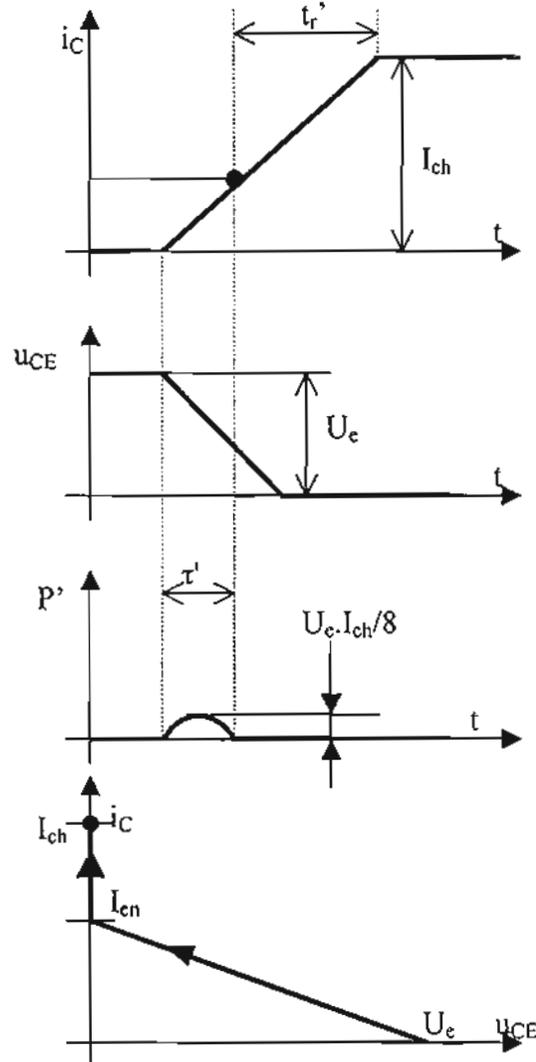


Figure V.3:

Comportement avec circuit d'aide

Hypothèses :

Les diodes D, D<sub>c</sub> et D<sub>σ</sub> sont supposées idéales.

**Sans aide :**

Pour faciliter les calculs, on a choisi la représentation linéaire (approximation par une droite) des phénomènes transitoires dans le transistor bipolaire. En outre, la période d'enclenchement

et de déclenchement  $T_p$  du transistor est inférieure à la constante de temps  $\tau$  ( $L/R$ ) de la charge. De cette manière le courant de charge  $I_{ch}$  peut être considéré comme constant.

L'expression de l'énergie dissipée dans le transistor bipolaire lors de chaque enclenchement est donnée par :

$$W_{en} = \int_0^{t_r} U_e I_{ch} \frac{t}{t_r} dt = \frac{U_e I_{ch}}{2} t_r \quad (5.1)$$

En réalité, la tension  $u_{CE}$  ne descend pas brusquement et il est prudent d'introduire un facteur de sécurité de 2 qui donne une valeur approchée par excès :

$$W_{en} = U_e I_{ch} t_r \quad (5.2)$$

La puissance dissipée dans le transistor bipolaire, due à l'enclenchement est proportionnelle à la fréquence de commutation du transistor :

$$P_e = U_e I_{ch} t_r f_p \quad (5.3)$$

L'allure de la puissance instantanée est représentée à la figure V.2 :

$$p(t) = i_c(t) \cdot u_{CE}(t), \text{ sa valeur maximale est : } \boxed{P_{\max} = U_e I_{ch}} \quad (5.4)$$

#### Avec aide :

La figure montre que la tension  $u_{CE}$  s'annule dans un laps de temps  $\tau'$  fini à cause de la chute de tension  $L_\sigma di_c/dt$ . La résistance  $R_\sigma$  sert à dissiper, lors du blocage du transistor, l'énergie emmagasinée dans l'inductance  $L_\sigma$  à travers la diode  $D_\sigma$ . La croissance du courant est ralentie à cause de l'inductance  $L_\sigma$  et on a :  $t_r' > t_r$ .

Le calcul de l'énergie dissipée dans le transistor d'après l'allure du courant  $i_c$  et de la tension  $u_{CE}$  donne :

$$W_{en}' = \int_0^{t_r'} U_e \left(1 - \frac{t}{\tau'}\right) I_{ch} \frac{t}{t_r'} dt = U_e I_{ch} \left(\frac{t_r'^2}{2t_r'} - \frac{t_r'^3}{3t_r'^2}\right) = \frac{U_e I_{ch}}{6} t_r'^2 \quad (5.5)$$

$L_\sigma$  sera dimensionné pour avoir :  $t_r' \cong 2t_r$ , on obtient ainsi :  $\tau' \cong t_r$ .

La puissance dissipée devient alors :  $W_{en}' = \frac{U_e I_{ch}}{12} t_r$  (5.6)

On constate une diminution par un facteur de 6, voir plus de la dissipation lors de l'enclenchement par rapport au cas sans circuit d'aide à l'enclenchement.

L'allure de la puissance instantanée est représentée à la figure V.3 :

$$p'(t) = i_c(t).u_{CE}(t), \text{ sa valeur maximale est : } p'_{\max} = \frac{U_e \cdot J_{ch}}{8} \quad (5.7)$$

On remarque une diminution par un facteur de 8, de la valeur maximale de la puissance instantanée dissipée dans le transistor par rapport au cas sans circuit d'aide à l'enclenchement.

### V.2 COMPORTEMENT AU DÉCLENCHEMENT :

Les figures qui suivent présentent les le comportement des semi-conducteurs suivant les conditions de fonctionnement avec ou sans circuit d'aide au déclenchement. Cela permet de mieux comprendre les éléments cibles pour bien mener la protection.

On obtient ainsi l'évolution des tension et courant entre les points les plus sensibles.

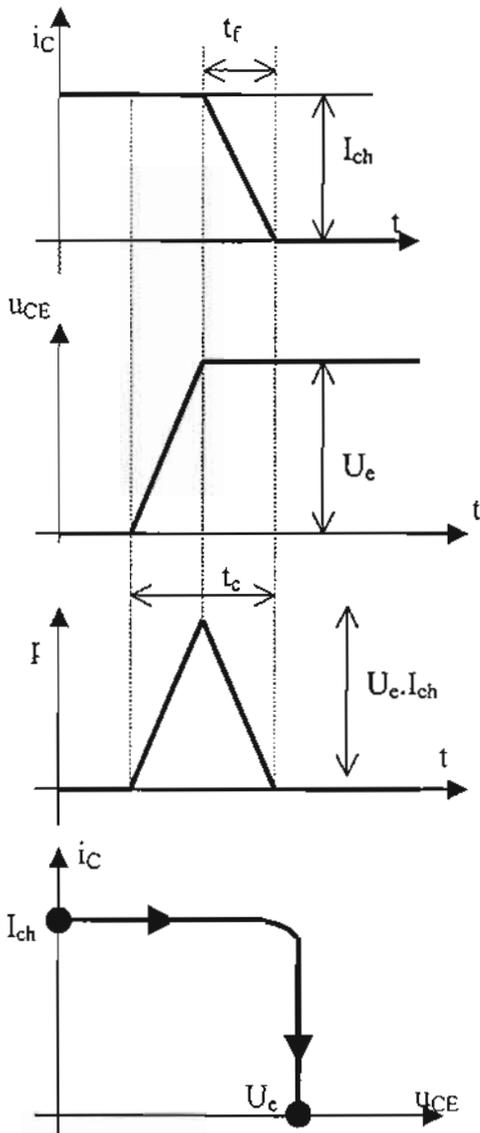


Figure V.4:

Comportement sans circuit d'aide

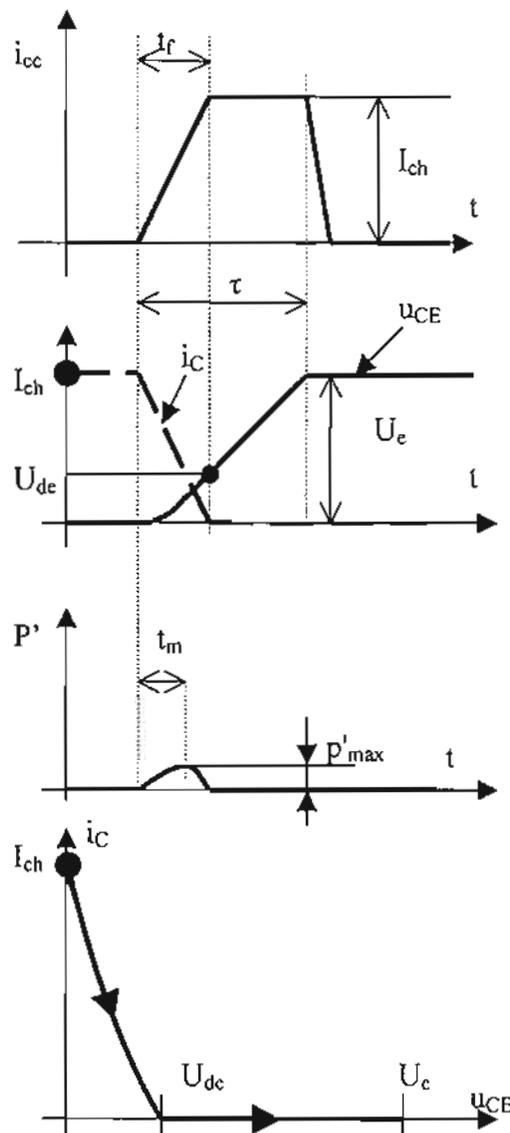


Figure V.5:

Comportement avec circuit d'aide

**Sans aide :**

On peut évaluer l'énergie dissipée dans le transistor bipolaire lors de chaque déclenchement, en supposant :  $t_c \cong 2t_f$

$$W_{de} = \int_0^{i_c} i_C \cdot u_{CE} dt = U_e \cdot I_{ch} \cdot t_f \quad (5.8)$$

La puissance dissipée dans le transistor T due au déclenchement devient :

$$P_{de} = U_e I_{ch} t_f f_p \quad (5.9)$$

L'allure de la puissance instantanée est représentée à la figure V.4 :

$p(t) = i_C(t) \cdot u_{CE}(t)$ , sa valeur maximale est :

$$p_{\max} = U_e I_{ch} \quad (5.10)$$

**Avec aide :**

Le condensateur  $C_c$  sert à retarder la montée de la tension  $u_{CE}$  en se chargeant à travers la diode  $D_c$ . La résistance  $R_c$  limite le courant de décharge du condensateur  $C_c$  à travers le transistor  $Tr$  lors de la mise en conduction de ce dernier. La diode  $D$  permet le passage du courant de charge pendant la durée de blocage du transistor et impose une tension nulle aux bornes de la charge.

En considérant une diminution linéaire du courant de collecteur  $i_C$ , on a :

$$i_C = I_{ch} \left( 1 - \frac{t}{t_f} \right) \quad (5.11)$$

En supposant  $I_{ch}$  constant, la relation  $I_{ch} = i_C + i_{cc}$  permet d'écrire :

$$i_{cc} = I_{ch} \frac{t}{t_f} \quad (5.12)$$

Cette relation montre que le courant dans le condensateur  $C_c$  augmente linéairement en fonction du temps. Ainsi, la tension  $u_{CE}$  (égale à la tension à la tension aux bornes du condensateur  $C_c$ ) devient :

$$u_{CE} = \frac{1}{C_c} \int_0^t i_{cc} dt = U_{dc} \left( \frac{t}{t_f} \right)^2 \quad (5.13)$$

Valable pour  $0 < t \leq t_f$ , avec  $U_{dc} = \frac{I_{ch} t_f}{2C_c}$  (5.14)

L'énergie dissipée durant le temps  $t_f$  dans le transistor  $Tr$  lors du déclenchement avec le circuit d'aide est alors donnée par :

$$W'_{de} = \int_0^{t_f} I_{ch} \left(1 - \frac{t}{t_f}\right) U_{de} \left(\frac{t}{t_f}\right)^2 dt = U_{de} I_{ch} \left(\frac{t_f}{3} - \frac{t_f}{4}\right) = \frac{U_{de} I_{ch} t_f}{12} \quad (5.15)$$

où  $U_{de}$ , appelée tension de blocage, représente la tension  $u_{CE}$  à l'instant de l'annulation du courant  $i_C$ .

La tension de blocage étant généralement inférieure à  $U_c$ , l'énergie dissipée dans le transistor lors du déclenchement sera 12 fois inférieure à celle dissipée sans le circuit d'aide au déclenchement.

La puissance instantanée est donnée par :

$$p'(t) = i_C \cdot u_{CE} = U_{de} I_{ch} \left[ \left(\frac{t}{t_f}\right)^2 - \left(\frac{t}{t_f}\right)^3 \right] \quad (5.16)$$

Le maximum de cette puissance instantanée s'obtient en annulant la fonction  $dp'/dt$ , à savoir :

$$\frac{dp'(t)}{dt} = U_{de} I_{ch} \left[ 2 \frac{t}{t_f^2} - 3 \frac{t^2}{t_f^3} \right] = 0 \quad (5.17)$$

Cette équation possède la solution :  $t_m = \frac{2}{3} t_f$  (5.18)

Par conséquent, la valeur maximale de la puissance instantanée devient :

$$p'_{\max} = \frac{4}{27} U_{de} I_{ch} \quad (5.19)$$

### V.3 CALCUL DES COMPOSANTS DES CIRCUITS:

On a les puissances consommées par chaque composant du circuit ;

$$\text{On a : } W = \frac{1}{2} CE^2 \quad , \quad W = \frac{1}{2} LI^2 \quad \text{et} \quad P = RI^2 \quad (5.20)$$

Les protections absorbent donc les énergies non transférées dans les transistors bipolaires.

Le circuit d'enclenchement donne :

$$W_{en} = \frac{5}{12} U_e I_{ch} t_r \quad \text{et} \quad p_{\max} = \frac{7}{8} U_e I_{ch} \quad (5.21)$$

Le circuit de déclenchement donne :

$$W_{de} = I_{ch} t_f \left( U_e - \frac{U_{de}}{12} \right) \quad \text{et} \quad p_{\max} = I_{ch} \left( U_e - \frac{4U_{de}}{27} \right) \quad (5.22)$$

avec  $U_{dc} = \frac{t_f}{\tau} U_e$ , on obtient :

$$W_{dc} = U_e I_{ch} t_f \left( 1 - \frac{t_f}{12\tau} \right) \quad (5.23)$$

$$\text{et } P_{\max} = U_e I_{ch} \left( 1 - \frac{4t_f}{27\tau} \right) \quad (5.24)$$

on obtient ainsi :

$$L_\sigma = \frac{5}{6} \frac{U_e}{I_{ch}} t_r \quad \text{et} \quad R_\sigma = \frac{7}{8} \frac{U_e}{I_{ch}} \quad (5.25)$$

$$C_c = \frac{I_{ch}}{U_e} t_f \left( 2 - \frac{t_f}{6} \right) \quad \text{et} \quad R_c = \frac{U_e}{I_{ch}} \left( 1 - \frac{4t_f}{27\tau} \right) \quad (5.26)$$

$$\text{A.N : avec : } t_l = t_r = 1,468 \text{ ms} \quad \tau = 2,139 \text{ ms}$$

$$U = 384 \text{ V, } I = 98,3 \text{ A}$$

$$t_f = \tau - t_r = 0,671 \text{ ms}$$

$$L_\sigma = 4,779 \text{ mH}$$

$$R_\sigma = 3,418 \Omega$$

$$C_c = 343,5 \mu\text{F}$$

$$R_c = 3,725 \Omega$$

### Conclusion :

L'usage des circuits d'aide à la commutation est surtout recommandé pour protéger les transistors de tension élevée. Cette protection augmente la fiabilité de l'équipement.

# CHAPITRE

## VI

### ETUDE DES FILTRES L-C PASSE-BAS

## VI. ETUDE DES FILTRES L-C PASSE-BAS

L'étude du filtre nous permet de mieux voir le comportement de la tension de sortie par rapport à la bande passante. On va proposer un type de filtre qui nous permettra d'avoir une bande passante aplatie pour sortir une tension à peu près stable.

### VI.1 Le principe des filtres

On considère le filtre représenté à la figure VI.1.

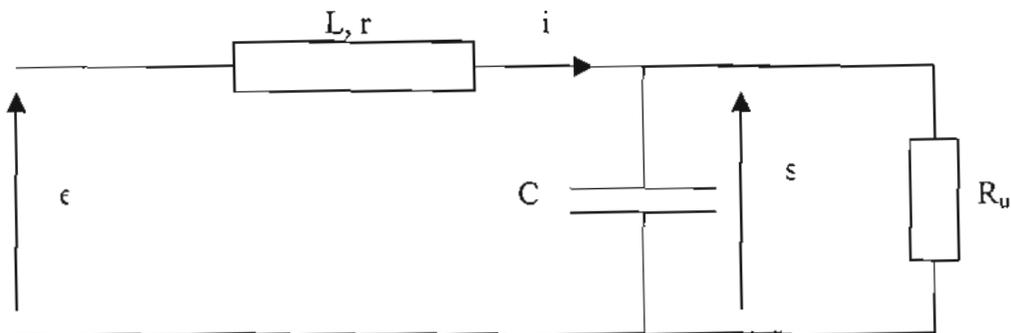


Figure VI.1: Schéma de principe d'un filtre passe-bas

C'est un filtre passe-bas car le self série s'oppose au passage des fréquences élevées qui sont de plus court-circuitées par le condensateur C.

On peut écrire :

$$e = r.i + L \frac{di}{dt} + s \quad (6.1)$$

$$\text{avec } i = C \frac{ds}{dt} \quad \text{donc : } \boxed{e = LC \frac{d^2s}{dt^2} + rC \frac{ds}{dt} + s} \quad (6.2)$$

Sa fonction de transfert s'écrit sous la transformée de Laplace (considérant les conditions initiales nulles) par :

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\frac{1}{Cp}}{Lp + r + \frac{1}{Cp}} = \frac{1}{LCp^2 + rCp + 1} \quad (6.3)$$

Identifions de la valeur de  $\omega_n$  :

$$\text{on a : } \omega = \frac{1}{1 - LC \omega^2 + jrC \omega} \quad (6.4)$$

En remplaçant les lettres par leurs valeurs, les coefficients numériques risquent d'être très grands ou au contraire très petits. Utilisons alors le fait que ce circuit est constitué par une self et un condensateur qui définissent une fréquence particulière :

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{Pulsation propre} \quad (6.5)$$

Introduisons le rapport  $\Omega$  entre une pulsation  $\omega$  et cette valeur particulière  $\omega_0$  :

$$\Omega = \frac{\omega}{\omega_0} \quad (6.6)$$

La fonction de transfert s'écrit :

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 - LC \omega_0^2 \frac{\omega^2}{\omega_0^2} + jrC \omega_0 \frac{\omega}{\omega_0}} \quad (6.7)$$

On définit le coefficient de qualité :

$$Q = \frac{L\omega_0}{r} = \frac{1}{rC\omega_0} \quad (6.8)$$

L'expression s'écrit alors :

$$H(j\Omega) = \frac{1}{1 - \Omega^2 + j\frac{\Omega}{Q}} \quad \text{ou encore : } H(p) = \frac{1}{p^2 + \frac{1}{Q}p + 1} \quad (6.9)$$

On remarque que tous les coefficients sont positifs, ce filtre est en effet évidemment stable.

Cette fonction de transfert est celle de tous les filtres ayant cette structure. C'est la **fonction de transfert normalisée** du filtre. Pour revenir à la fonction de transfert numérique, il suffit d'introduire le Q et la fréquence normalisée.

La normalisation peut porter également sur la valeur des composants eux-mêmes. C'est la normalisation des impédances.

Il faut d'abord définir une unité  $R_0$  de résistance, par exemple la résistance  $r$  elle-même ; l'unité de self  $L_0$  est alors la self qui, à la fréquence de normalisation choisie, a pour module d'impédance :

$$L_0 \omega_0 = r_0, \quad \text{c'est à dire} \quad L_0 = \frac{r_0}{\omega_0} \quad (6.10)$$

De même, l'unité de capacité  $C_0$  est celle dont l'impédance à la fréquence de normalisation est  $R_0$ .

$$\frac{1}{C_0 \omega_0} = r_0, \text{ c'est à dire } \boxed{C_0 = \frac{1}{r_0 \omega_0}} \quad (6.11)$$

Pour le montage considéré à partir de la définition du coefficient de qualité  $Q$  :

$$L = \frac{rQ}{\omega_0} \quad (6.12)$$

Mais  $r = r_0$  par définition et  $L_0 = \frac{r_0}{Q}$  ; soit  $\frac{L}{L_0} = Q$  , d'où :

La self a comme valeur normalisée  $Q$ .

$$\text{De même, } C = \frac{1}{rQ \omega_0} = \frac{1}{Q} C_0 ; 1 \quad (6.13)$$

Le condensateur a comme valeur normalisée :  $\frac{1}{Q}$ .

La forme normalisée du filtre est alors représentée à la figure ci-dessous :

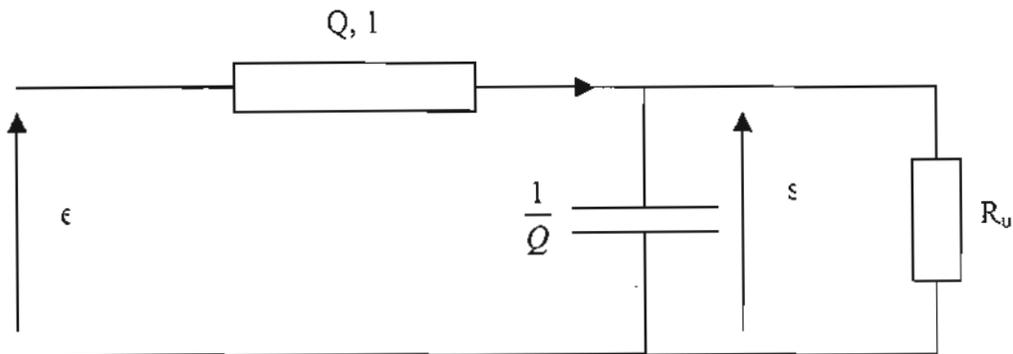


Figure VI.2 : Schéma normalisé du filtre

## VI.2 Calcul des composants

Pour un filtrage correct de sortie passe-bas, la pulsation propre doit être largement supérieure à la pulsation de sortie. L'indice de modulation  $m \gg 1$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \gg 2\pi f \quad (6.14)$$

Avec  $f$  la fréquence de sortie :  $f = 50 \text{ Hz} \pm 1\%$

Pour plus de forme sinusoïdale on prend en générale (et dans beaucoup de cas) le rapport pour  $m = 10$  ( $m = f_0 / f$ )

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 10 \times 2\pi f \quad (6.15)$$

On a une puissance utile maximale sur une ligne entre phase de :

$$P_u = \frac{134.6 \text{ kW}}{3} = 44,867 \text{ kW}$$

Par ailleurs, on a :  $P_u = \frac{U^2}{R_u}$  d'où : (6.16)

$$R_u = \frac{U^2}{P_u} = \frac{384^2}{44,867 \cdot 10^3} = 3,286 \Omega$$

La résistance utile du filtre sera de :  $R_u = 3,286 \Omega$

Le filtre est stable pour  $Q \geq \frac{\sqrt{2}}{2}$

D'où on a à la résonance :

$$\frac{R_u}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} = Q = \frac{\sqrt{2}}{2} \quad (6.17)$$

Les équations (6.16) et (6.17) constituent un système d'équations avec  $L$  et  $C$  comme inconnues.

En résolvant le système on trouve :

$$C = \frac{\sqrt{2}}{20 \pi f R_u} \quad L = \frac{R_u}{20 \pi \sqrt{2} f}$$

AN :  $L = 0,74 \text{ mH}$  et  $C = 137 \mu\text{F}$

Ces résultats donnent une idée sur le comportement des composantes des filtres LC passe-bas de notre onduleur.



# CHAPITRE

## VII

### CONCLUSION ET RECOMMAN- DATIONS

## CONCLUSION

L'étude sur l'optimisation de la conception de la centrale hybride de Dionewar-Niodior a débuté par un diagnostic de l'existant et le relevé des conditions de fonctionnement sur site. Les résultats obtenus sur les caractéristiques énergétiques et techniques du fonctionnement de la centrale ont témoigné de l'état de disfonctionnement des installations.

Afin de remédier à ces problèmes, une étude approfondie des différentes composantes a été effectuée sur les domaines énergétique et technique.

L'étude a porté d'abord sur l'analyse de la consommation actuelle et l'impact de celle-ci sur le comportement de la centrale dans le futur et la capacité de l'installation actuelle à remplir ces charges.

Partant des données statistiques, on a utilisé la technique du Winter's pour révéler qu'avec le planning de fonctionnement des usages non domestiques (moulins, ...) en les faisant fonctionner dans les horaires de production du groupe électrogène GC 250 kVA ; les charges n'auront aucun impact sur les installations actuelles. Ces dernières seront capables de satisfaire la demande dans les conditions les plus défavorables d'ici 5 ans en révisant le planning au moment opportun.

L'étude a concerné aussi les équipements techniques de la transformation de l'énergie produite. (voir schéma synoptique de la centrale). Le redresseur chargeur a été en très bon état, les panneaux et les accumulateurs débitaient correctement, les paramétrages électriques et l'armoire de contrôle n'ont présenté aucun signe de disfonctionnement.

Seul l'onduleur et le groupe GC 250 kVA ont été les principales causes de l'arrêt de la centrale. Les groupes ont souffert d'un approvisionnement correct et régulier en diesel oil, une maintenance régulière ; tandis que l'onduleur a présenté des faiblesses sur la protection des semi-conducteurs et l'état des filtres de sortie. La technologie utilisée (PWM) est liée à un TDH très élevé.

Ce paramètre a imposé une protection vigilante et permanente des IGBT et le filtrage de la tension de sortie. Une proposition sur la protection des semi-conducteurs et un schéma de filtre normalisé ont été dressés sur ce rapport pour assurer un bon fonctionnement de la chaîne de production dont l'onduleur a été une composante essentielle pour la transformation de l'énergie.

Cette étude qui s'est voulue avant projet mérite d'être approfondie sur certains points avant la phase d'intervention : l'étude économétrique et la sélectivité des appareils de protection.

Cela s'est expliquée d'une part par le temps et d'autre part par la difficulté de l'obtention des données et une statistique continue.

Ainsi on a pu dimensionner les protections des semi-conducteurs et donner les caractéristiques des filtres de sortie.

Cette étude a révélé le sérieux que méritent les protections et les filtres pour un bon fonctionnement de la centrale et cela pour une disponibilité et efficacité meilleures.

## RECOMMANDATIONS

Pour un fonctionnement durable et une bonne efficacité de la centrale, quelques recommandations ont été dressées :

1. Définir un planning d'entretien des appareils de protection de la centrale
2. Etablir un plan d'approvisionnement correct en diesel oil avec une très bonne gestion
3. Réparer le grand réservoir pour un meilleur stockage du diesel oil
4. Limiter la transvase du diesel oil pour minimiser les impuretés qui réduisent la durée de fonctionnement des filtres D.O des groupes
5. Installer un service central de contrôle et de suivi des appareils des centrales de la zone du delta du Saloum pour superviser l'approvisionnement dans le but d'harmoniser les types d'appareils des équipements
6. Acquérir un seul modèle d'automate pour un plus grand nombre de centrales afin de minimiser les coûts de stockage et permettre une interchangeabilité des cartes
7. Acquérir un appareil d'auto test pour les cartes de commande des automates pour faciliter le diagnostic des cartes et bien gérer leurs stocks
8. Relever et stocker rigoureusement les données d'exploitation et météorologiques de la centrale pour faciliter les analyses
9. Equiper la centrale d'outillages nécessaires aux contrôle et intervention au niveau des protections et de l'automate
10. Mener une étude fine sur la sélectivité des appareils de protection
11. Sensibiliser les populations sur la nécessité de respecter les horaires de fonctionnement des usages non domestiques (moulins, postes de soudages, etc.)
12. Mener une étude économétrique pour évaluer le facteur d'utilisation du PV par rapport au diesel compte tenues des inflations du coût du DO

# Annexe 1

## LES FICHES TECHNIQUES

### A. Les modules : Fiche technique n° 1

#### Données générales

1. Puissance nominale du générateur à  $100 \text{ W/m}^2$ ,  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  :  $101.760 \text{ Wc}$
2. Tension nominale :  $384 \text{ V}$
3. Nombre de modules en séries : 32
4. Nombre de séries de modules en parallèles : 30

#### Modules

1. Marque : ISIFOTON
2. Origine : Espagne
3. Type : I – 106
4. Nombre de cellule en série : 36
5. Nombre de séries de cellules en parallèles : 2
6. Puissance crête à :
  - a.  $25 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 106 \text{ Wc}$
  - b.  $45 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 96 \text{ Wc}$
  - c.  $60 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 89 \text{ Wc}$
7. Puissance crête nominale garantie ( $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $1\,000 \text{ W/m}^2$ , AM 1.5) :  $106 \text{ Wc} \pm 10 \%$
8. Tension circuit ouvert :  $21.6 \text{ V}$
9. Courant court-circuit :  $6.54 \text{ A}$
10. Tension nominale :  $17.4 \text{ V}$
11. Courant nominal :  $6.1 \text{ A}$
12. N.O.C.T. (Nominal Operating Cell Temperature) :  $47 \text{ }^\circ\text{C}$
13. Rendement module :  $12.75 \%$
14. Température de fonctionnement :
  - a. Minimale :  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$
  - b. Maximale :  $+60 \text{ }^\circ\text{C}$
15. Comportement des conditions extrêmes d'environnement : humidité, vent, ...  
 $\rightarrow$  Conforme aux normes ISPRA 503

16. Détail et fréquence de la maintenance : nettoyage si c'est nécessaire
17. Dimensions :
  - a. Longueur : 1310 mm
  - b. Largeur : 851 mm
  - c. Épaisseur : 34 mm
18. Poids : 11 kg
19. Type d'encapsulation : Verre – EVA – Tedlar
20. Nature du cadre : Aluminium anodisé
21. Type de verre : trempé et à faible teneur en fer
22. Nature de la structure de fixation : acier galvanisé
23. Nombre et position des boites de connexion : 2 boites (+ et -)  
(Préférence une seule boite)
24. Type de diode : 2 diodes silicium by-pass
25. Caractéristiques de la diode : 6 A 60
26. Laboratoire de teste et essai : IER (Institut des Energies Renouvelables ; Espagne)
27. Garantie : 10 ans (1 000 W / m<sup>2</sup>, 25 °C, AM 1.5)

## **B. Les batteries d'accumulateurs: Fiche technique n°2**

1. Marque : HOPPECKE
2. Origine : Allemagne
3. Type : 20 OPz S 2500
4. Tension nominale : 2V / élément
5. Poids d'une batterie remplie d'électrolyte : 202.7 kg / élément
6. Nombre de batteries en série : 192 (184 actuellement)
7. Nombre de séries de batteries en parallèle : 1
8. Capacité nominale (Ah) :
  - a. C<sub>10</sub> à 35 °C : 2750 Ah
  - b. C<sub>20</sub> à 35 °C : 3120 Ah
9. Courant nominal C<sub>10</sub> : 250 A (25 °C)
10. Densité de l'électrolyte : 1.24 kg / l
11. Température idéale de fonctionnement : 0 – 45 °C
12. Décharge profonde : jusqu'à 100 %

13. Tension de décharge : 1.85 V
14. Intervalle d'entretien : 12 mois
15. Autodécharge : 3 % par mois (25 °C)
16. Nature du bac : plastique transparent de haute résistance
17. Pureté du plomb, taux d'antimoine : < 3 %
18. Quantité d'électrolyte : 64 kg / élément
19. Dimensions
  1. Longueur : 487 mm
  2. Largeur : 212 mm
  3. Hauteur : 920 mm
20. Durée de garantie : 1 an
21. Norme de fabrication : DIN 40736

### C. Le régulateur de charge : Fiche technique n°3

1. Marque : ENERTON
2. Origine : Espagne
3. Type : 100 – 5

### Spécifications techniques

1. Puissance : 100 Wc
2. Tension d'entrée (max et min) : 300 – 750 V
3. Tension de sortie : 384 V
4. Tension de fin de charge (réglable) : 460 V
5. Tension de fin de décharge (réglable) : 340 V
6. Courant maximal P.V. admissible : 240 A
7. Consommation propre en fonctionnement normal : 2 500 W
8. Mode de régulation (coupure, shunt, hachage) : coupure
9. Indicateur d'état :
  - a. Sous champ P.V. débranché
  - b. Fusible de contrôle fondu
  - c. Haute tension batterie
  - d. Basse tension batterie

**10. Instruments (indicateurs analogues) :**

- a. Courant dans chaque sous branche
- b. Tension de batterie
- c. Tension dans chaque sous champ

11. Rendement de charge (0.1 – 1) de la puissance nominale : 97 – 99 %

12. Rendement de décharge (0.1 – 1) de la puissance nominale : 99 %

13. Température minimale et maximale de fonctionnement : 0 – 60 °C

**Protection**

1. Contre les surintensités : par fusibles dans chaque sous champ P.V.
2. Contre les surintensités transitoires : par varistors
3. Autres

**D. L'onduleur : Fiche technique n°4**

1. Marque : ENERTON
2. Origine : Espagne
3. Type : DGT
4. Technologie des circuits de puissance : IGBT

**Spécifications techniques****• Entrée tension continue**

1. Puissance : 100 kWc
2. Nombre d'éléments modulaires : 1
3. Plage de tensions d'entrée : 340 – 460 V<sub>cc</sub>
4. Mode de fonctionnement : PWM

- **Sortie tension alternative**

1. Plage de tension de sortie :  $400 / 240 V_{ac} \pm 1 \%$
2. Forme de la tension de sortie : sinusoïdale
3. Fréquence à la sortie :  $50 \text{ Hz} \pm 1 \%$
4. Facteur de distorsion :  $3 \%$   $P_{nom}$
5. Compensation puissance réactive : NON, il peut travailler avec des charges de n'importe quel facteur de puissance
6. Consommation à vide :  $< 1 \%$
7. Indicateurs d'état :
  - a. Fausse de charge
  - b. Fausse de l'onduleur
  - c. Fusible fondu
  - d. Fausse sortie AC
  - e. Fréquence hors plage
  - f. Protection de sur courant de sortie
8. Comportement en court-circuit : protégé par interrupteur magnétothermique
9. Température de fonctionnement (min, max) :  $0 - 60 \text{ }^\circ\text{C}$
10. Instrument à l'aide d'indicateurs analogiques :
  - a. Voltmètre et ampèremètre d'entrée
  - b. Voltmètre et ampèremètre de sortie
  - c. Fréquencemètre
11. Dispositif de démarrage adouci : OUI

**Protection :**

1. Protection contre les décharges atmosphériques : Par varistors
  - a. Protection des semi-conducteurs
  - b. Protection contre les sur températures
  - c. Déconnexion en cas de basse tension d'entrée
2. Autres

# Annexe 2

**DEMANDE FUTURE DU DIESEL**

$\alpha = 0,3$

$\beta = 0,01$

$\gamma = 0,005$

On a :

$$V_1 = \frac{1}{N} \sum_{-2N+1}^{-N} R_i \quad \text{d'où:} \quad V1 = 15\,058,08 \quad \text{kWh}$$

$$V_2 = \frac{1}{N} \sum_{-N+1}^0 R_i \quad \text{d'où} \quad V2 = 16\,846,92 \quad \text{kWh}$$

Calcul de  $G_0$  avec :

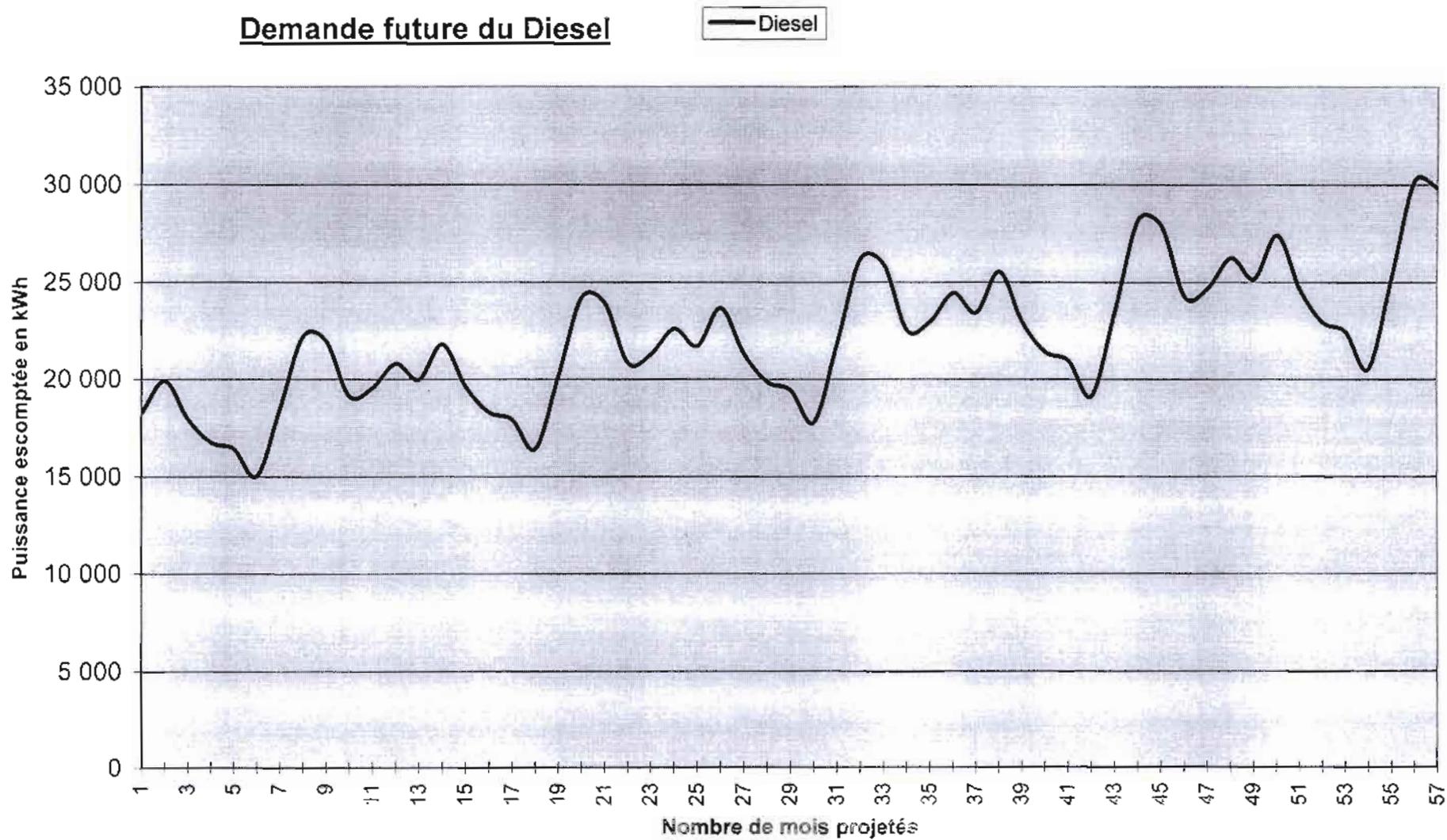
$$G_0 = \frac{V_2 - V_1}{N} \quad G_0 = 149,069$$

Période	N° de Période	Saison	Consommation (kWh)	t	Ft	Ft''	Ft	Rt	Gt	T	Pt
Janvier	1	An 1 Année 2003	14 261	-23	0,991223434						
Février	2		14 685	-22	1,010226764						
Mars	3		15 320	-21	1,043212296						
Avril	4		15 003	-20	1,011360078						
Mai	5		16 093	-19	1,074044635						
Juin	6		13 916	-18	0,919602936						
Juillet	7		13 374	-17	0,875165128						
Août	8		11 682	-16	0,757059426						
Septembre	9		11 371	-15	0,729854089						
Octobre	10		15 837	-14	1,006872966						
Novembre	11		20 568	-13	1,295380084						
Décembre	12		18 587	-12	1,159727942						

Janvier	1	An 2 Année 2004	17 284	-11	1,201339726	15 773	0,901255672				
Février	2		17 295	-10	1,189776771	15 990	0,91368383				
Mars	3		18 461	-9	1,257098055	16 891	0,965139257				
Avril	4		17 198	-8	1,159326176	16 101	0,919997905				
Mai	5		18 796	-7	1,254442488	17 445	0,996795345				
Juin	6		17 259	-6	1,140516462	15 588	0,890684596				
Juillet	7		15 494	-5	1,013893263	14 434	0,824772508				
Août	8		16 404	-4	1,063071634	14 043	0,802430395				
Septembre	9		14 151	-3	0,908289967	12 761	0,729175694				
Octobre	10		15 312	-2	0,973484908	15 575	0,889941764				
Novembre	11		16 586	-1	1,044592283	18 577	1,061507474				
Décembre	12		17 923	0	1,118297945	18 255	1,043108087				
		Maximum			1,295380084	18 577	1,061507474				
					TOTAL	210 007	12				
				0				17 866,80	149,07		
Janvier	1	An 3 Année 2005	18 545	1				18 644,16	153,21		
Février	2		18 948	2				19 379,57	156,12		
Mars	3		19 325	3				19 681,89	156,85		
Avril	4									1	18 251,60
Mai	5									2	19 931,52
Juin	8									3	17 949,47
Juillet	7									4	16 750,55
Août	8									5	16 422,88
Septembre	9									6	15 037,79
Octobre	10									7	18 492,86
Novembre	11									8	22 224,48
Décembre	12							Moyenne	18 562,65	9	22 002,87

Janvier	1	An 4 Année 2006						10	19 152,06	
Février	2								11	19 559,48
Mars	3								12	20 812,38
Avril	4								13	19 983,25
Mai	5								14	21 807,72
Juin	6								15	19 625,95
Juillet	7								16	18 302,97
Août	8								17	17 933,03
Septembre	9								18	18 410,27
Octobre	10								19	20 167,94
Novembre	11								20	24 222,48
Décembre	12					Moyenne	20 161,98		21	23 966,24
Janvier	1	An 5 Année 2007						22	20 848,43	
Février	2								23	21 279,24
Mars	3								24	22 629,00
Avril	4								25	21 714,90
Mai	5								26	23 693,92
Juin	6								27	21 302,43
Juillet	7								28	19 855,38
Août	8								29	19 443,39
Septembre	9								30	17 782,75
Octobre	10								31	21 843,02
Novembre	11								32	26 220,49
Décembre	12					Moyenne	21 877,72		33	25 929,62

Janvier	1	An 6 Année 2008						34	22 544,81	
Février	2								35	22 999,01
Mars	3								36	24 445,62
Avril	4								37	23 446,56
Mai	5								38	25 560,12
Juin	6								39	22 978,91
Juillet	7								40	21 407,80
Août	8								41	20 953,75
Septembre	9								42	19 155,23
Octobre	10								43	23 518,10
Novembre	11								44	28 218,49
Décembre	12					Moyenne	23 593,45		45	27 892,99
Janvier	1	An 7 Année 2009						46	24 241,18	
Février	2								47	24 718,78
Mars	3								48	26 262,24
Avril	4								49	25 178,21
Mai	5								50	27 436,33
Juin	6								51	24 655,38
Juillet	7								52	22 960,21
Août	8								53	22 484,11
Septembre	9								54	20 527,71
Octobre	10								55	25 193,18
Novembre	11								56	30 216,50
Décembre	12					Moyenne	25 309,18		57	29 856,36



DEMANDE FUTURE DU SOLAIRE PV

$\alpha = 0,3$

$\beta = 0,01$

$\gamma = 0,05$

On a

$$V_1 = \frac{1}{N} \sum_{-2N+1}^{-N} R_t \quad \text{d'où:} \quad V_1 = 6\,553,75 \quad \text{kWh}$$

$$V_2 = \frac{1}{N} \sum_{-N+1}^0 R_t \quad \text{d'où:} \quad V_2 = 7\,452,92 \quad \text{kWh}$$

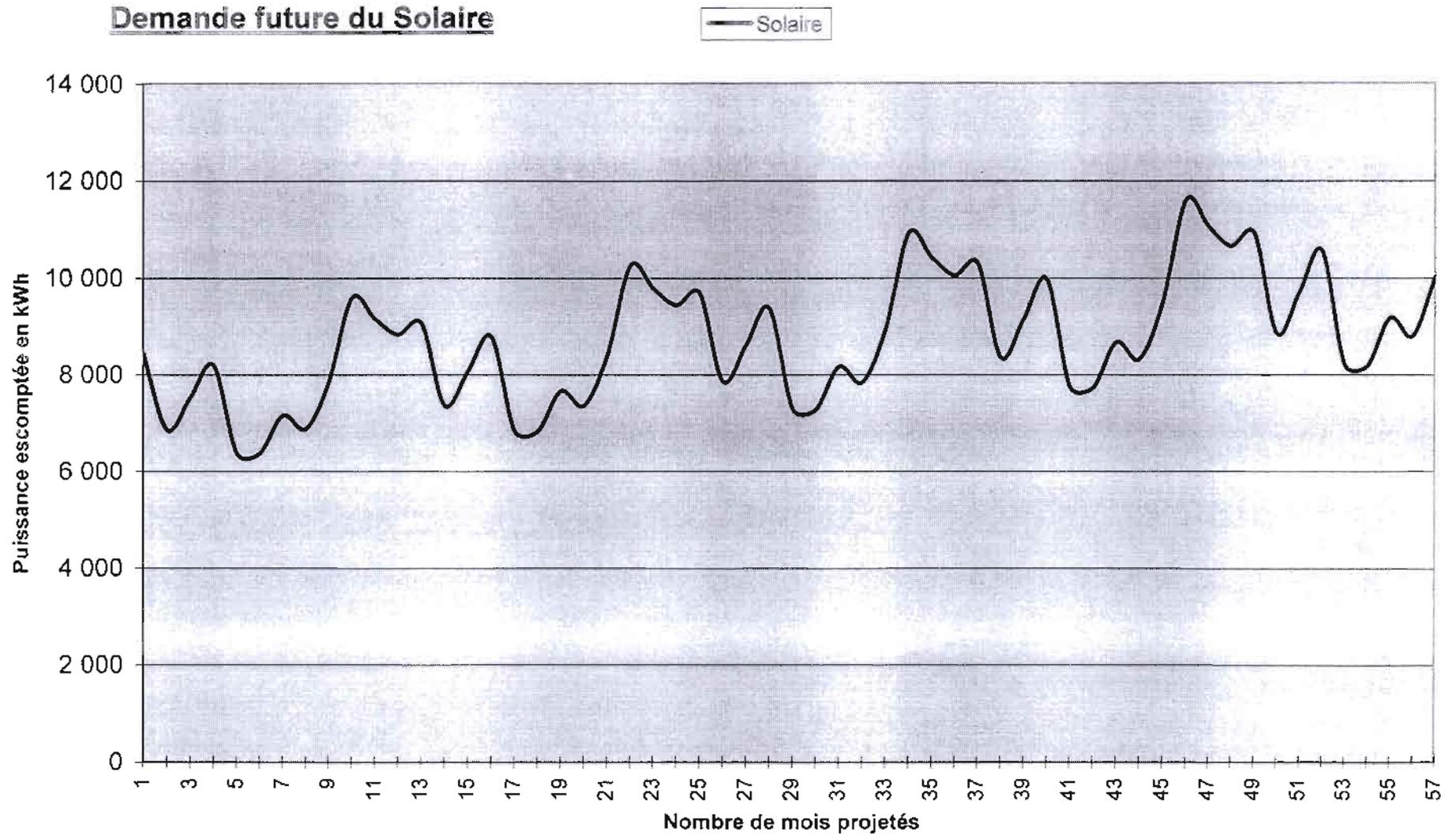
Calcul de  $G_0$ ; avec :

$$G_0 = \frac{V_2 - V_1}{N} \quad G_0 = 74,931$$

Période	N° de Période	Saison	Consommation (kWh)	t	Ft	Ft''	Ft	Rt	Gt	T	Pt
Janvier	1	An 1 Année 2003	8 412	-23	1,353159403						
Février	2		7 995	-22	1,270763542						
Mars	3		7 584	-21	1,191249656						
Avril	4		7 854	-20	1,219308828						
Mai	5		6 012	-19	0,922611619						
Juin	6		6 822	-18	1,035013986						
Juillet	7		7 515	-17	1,127338073						
Août	8		5 580	-16	0,827760980						
Septembre	9		5 062	-15	0,742663563						
Octobre	10		5 873	-14	0,852278808						
Novembre	11		4 305	-13	0,618013429						
Décembre	12		5 631	-12	0,799767230						

Janvier	1	An 2 Année 2004	8 545	-11	1,374553863	8 479	1,210837792					
Février	2		8 102	-10	1,287770634	8 049	1,149238458					
Mars	3		7 860	-9	1,234602106	7 722	1,102617801					
Avril	4		7 904	-8	1,227071171	7 879	1,125035697					
Mai	5		6 702	-7	1,028500179	6 357	0,907710614					
Juin	6		7 041	-6	1,068240029	6 932	0,98974298					
Juillet	7		7 503	-5	1,125537933	7 509	1,072203713					
Août	8		6 032	-4	0,894812587	5 806	0,629033793					
Septembre	9		6 452	-3	0,946595280	5 757	0,622037125					
Octobre	10		6 996	-2	1,015246474	6 435	0,918776773					
Novembre	11		7 986	-1	1,146447210	8 146	0,877510709					
Décembre	12		8 312	0	1,180547898	8 972	0,995454545					
	Max			1,374553863	8 479	1,210837792						
				TOTAL	84 040	12						
				0				7 865,03	74,93			
Janvier	1	An 3 Année 2005	7 852	1				7 503,73	53,12			
Février	2		8 512	2				7 511,79	50,87			
Mars	3		7 985	3				7 466,41	46,05			
Avril	4									1	8 451,79	
Mai	5									2	6 860,85	
Juin	6									3	7 526,57	
Juillet	7									4	8 203,03	
Août	8									5	6 380,81	
Septembre	9									6	6 364,82	
Octobre	10									7	7 156,16	
Novembre	11									8	8 875,16	
Décembre	12						Moyenne	7 296,04		9	7 845,07	
Janvier	1	An 4 Année 2006								10	9 596,66	
Février	2										11	9 162,88
Mars	3										12	8 841,95
Avril	4										13	9 073,54
Mai	5										14	7 362,59
Juin	6										15	8 073,55
Juillet	7										16	6 795,58
Août	8										17	6 838,97
Septembre	9										18	6 819,11
Octobre	10										19	7 663,91
Novembre	11										20	7 360,11
Décembre	12						Moyenne	8 155,34			21	8 395,21

Janvier	1	An 5 Année 2007						22	10 265,72	
Février	2								23	9 798,00
Mars	3								24	9 451,31
Avril	4								25	9 695,28
Mai	5								26	7 664,23
Juin	6								27	8 620,53
Juillet	7								28	9 388,13
Août	8								29	7 297,13
Septembre	9								30	7 273,40
Octobre	10								31	8 171,67
Novembre	11								32	7 845,06
Décembre	12					Moyenne	8 717,98		33	8 945,34
Janvier	1	An 6 Année 2008						34	10 934,77	
Février	2								35	10 433,12
Mars	3								36	10 060,67
Avril	4								37	10 317,03
Mai	5								38	8 365,87
Juin	6								39	9 167,50
Juillet	7								40	9 980,67
Août	8								41	7 755,29
Septembre	9								42	7 727,70
Octobre	10								43	8 679,43
Novembre	11								44	8 330,01
Décembre	12					Moyenne	9 270,63		45	9 495,47
Janvier	1	An 7 Année 2009						46	11 603,82	
Février	2								47	11 068,24
Mars	3								48	10 670,02
Avril	4								49	10 938,77
Mai	5								50	8 867,51
Juin	6								51	9 714,48
Juillet	7								52	10 573,22
Août	8								53	8 213,45
Septembre	9								54	8 181,99
Octobre	10								55	9 187,19
Novembre	11								56	8 814,96
Décembre	12					Moyenne	9 823,27		57	10 045,60



# Annexe 3

	Période de projection	Nombre de jour /mois	DIESEL			P.V.			DIESEL + P.V.		
			Consommation mensuelle en kWh	Consommation moyenne journalière en kWh / j	Consommation moyenne horaire journalière en kWh	Consommation mensuelle en kWh	Consommation moyenne journalière en kWh / j	Consommation moyenne horaire journalière en kWh	Consommation mensuelle en kWh	Consommation moyenne journalière en kWh / j	Consommation moyenne horaire journalière en kWh
An 3 Année 2005	Avril	30	18 251,60	608,39	25,3494	9 570,88	319,029	13,293	27 822,48	927,416	38,6423
	Mal	31	19 931,52	642,95	26,7897	7 197,61	232,181	9,674	27 129,12	875,133	36,4639
	Juin	30	17 949,47	598,32	24,9298	10 128,04	337,601	14,067	28 077,51	935,917	38,9965
	Juillet	31	16 750,55	540,34	22,5142	6 618,72	213,507	8,896	23 369,28	753,848	31,4103
	Août	31	16 422,66	529,76	22,0735	6 508,79	209,961	8,748	22 931,45	739,724	30,8218
	Septembre	30	15 037,79	501,26	20,8658	5 719,04	190,635	7,943	20 756,84	691,895	28,8289
	Octobre	31	18 492,86	596,54	24,8560	7 897,18	254,748	10,614	26 390,05	851,292	35,4705
	Novembre	30	22 224,48	740,82	30,8673	7 883,48	262,783	10,949	30 107,96	1 003,599	41,8166
	Décembre	31	22 002,87	709,77	29,5737	10 500,11	338,713	14,113	32 502,98	1 048,483	43,6868
An 4 Année 2006	Janvier	31	19 152,06	617,81	25,7420	6 620,96	213,580	8,899	25 773,02	831,388	34,6412
	Février	28	19 559,48	698,55	29,1064	9 401,80	335,778	13,991	28 961,27	1 034,331	43,0971
	Mars	31	20 812,38	671,37	27,9736	10 202,82	329,123	13,713	31 015,21	1 000,490	41,6871
	Avril	30	19 983,25	666,11	27,7545	9 952,08	331,736	13,822	29 935,33	997,844	41,5768
	Mai	31	21 807,72	703,47	29,3114	7 483,33	241,398	10,058	29 291,05	944,873	39,3697
	Juin	30	19 625,95	654,20	27,2583	10 528,76	350,959	14,623	30 154,72	1 005,157	41,8816
	Juillet	31	18 302,97	590,42	24,6008	6 879,74	221,927	9,247	25 182,71	812,345	33,8477

Août		17	31	17 933,03	578,48	24,1035	6 764,63	218,214	9,092	24 697,65	796,899	33,1958
Septembre		18	30	16 410,27	547,01	22,7920	5 943,11	198,104	8,254	22 353,38	745,113	31,0464
Octobre		19	31	20 167,94	650,58	27,1075	8 205,58	264,698	11,029	28 373,52	915,275	38,1365
Novembre		20	30	24 222,48	807,42	33,6423	8 190,34	273,011	11,375	32 412,82	1 080,427	45,0178
Décembre		21	31	23 966,24	773,10	32,2127	10 907,50	351,855	14,861	34 873,74	1 124,959	46,8733
Janvier	An 5 Année 2007	22	31	20 848,43	672,53	28,0221	6 877,02	221,839	9,243	27 725,46	894,370	37,2654
Février		23	28	21 279,24	759,97	31,6655	9 764,23	348,723	14,530	31 043,47	1 108,696	46,1956
Mars		24	31	22 629,00	729,97	30,4153	10 594,88	341,770	14,240	33 223,88	1 071,738	44,6558
Avril		25	30	21 714,90	723,83	30,1598	10 333,28	344,443	14,352	32 048,18	1 068,273	44,5114
Mai		26	31	23 683,92	764,00	31,8332	7 769,06	250,615	10,442	31 452,98	1 014,612	42,2755
Juin		27	30	21 302,43	710,08	29,5867	10 929,49	364,316	15,180	32 231,92	1 074,397	44,7666
Juillet		28	31	19 855,38	640,50	26,6873	7 140,76	230,347	9,598	26 996,14	870,843	36,2851
Août		29	31	19 443,39	627,21	26,1336	7 020,47	226,467	9,436	26 463,86	853,673	35,5697
Septembre		30	30	17 782,75	592,76	24,6983	6 167,17	205,572	8,566	23 949,93	798,331	33,2638
Octobre		31	31	21 843,02	704,61	29,3589	8 513,97	274,644	11,444	30 357,00	979,258	40,8024
Novembre		32	30	26 220,49	874,02	36,4173	8 497,20	283,240	11,802	34 717,69	1 157,258	48,2190
Décembre		33	31	25 929,62	836,44	34,8516	11 314,89	364,996	15,208	37 244,51	1 201,436	50,0598
Janvier		34	31	22 544,81	727,25	30,3022	7 133,08	230,099	9,587	29 677,89	957,351	39,8896
Février		35	29	22 999,01	793,07	33,0446	10 126,67	349,195	14,550	33 125,68	1 142,265	47,5944
Mars		36	31	24 445,62	788,57	32,8570	10 986,93	354,417	14,767	35 432,55	1 142,986	47,6244

Avril	An 6 Année 2008	37	30	23 446,56	781,55	32,5647	10 714,48	357,149	14,881	34 161,03	1 138,701	47,4459	
Mai		38	31	25 560,12	824,52	34,3550	8 054,78	259,832	10,826	33 614,91	1 084,352	45,1813	
Juin		39	30	22 978,91	765,96	31,9151	11 330,22	377,674	15,738	34 309,13	1 143,638	47,6518	
Juillet		40	31	21 407,80	690,57	28,7739	7 401,78	238,767	9,949	28 809,58	929,341	38,7225	
Août		41	31	20 953,75	675,93	28,1636	7 276,31	234,720	9,780	28 230,06	910,647	37,9436	
Septembre		42	30	19 155,23	638,51	26,6045	6 391,24	213,041	8,877	25 546,47	851,549	35,4812	
Octobre		43	31	23 518,10	758,65	31,6104	8 822,37	284,593	11,858	32 340,47	1 043,241	43,4684	
Novembre		44	30	28 218,49	940,62	39,1924	8 804,07	293,469	12,228	37 022,56	1 234,085	51,4202	
Décembre		45	31	27 892,99	899,77	37,4906	11 722,28	378,138	15,756	39 615,27	1 277,912	53,2463	
Janvier		An 7 Année 2009	46	31	24 241,18	781,97	32,5822	7 389,14	238,359	9,932	31 630,32	1 020,333	42,5139
Février			47	28	24 718,78	882,81	36,7839	10 489,10	374,611	15,609	35 207,88	1 257,424	52,3927
Mars			48	31	26 262,24	847,17	35,2987	11 378,99	367,064	15,294	37 641,22	1 214,233	50,5930
Avril	49		30	25 178,21	839,27	34,9697	11 095,68	369,856	15,411	36 273,88	1 209,129	50,3804	
Mai	50		31	27 436,33	885,04	36,8768	8 340,51	269,049	11,210	35 776,84	1 154,091	48,0871	
Juin	51		30	24 655,38	821,85	34,2436	11 730,95	391,032	16,293	36 386,34	1 212,878	50,5368	
Juillet	52		31	22 960,21	740,65	30,8605	7 662,80	247,187	10,299	30 623,01	987,839	41,1600	
Août	53		31	22 464,11	724,65	30,1937	7 532,16	242,973	10,124	29 996,27	987,622	40,3176	
Septembre	54		30	20 527,71	684,26	28,5107	6 615,30	220,510	9,188	27 143,02	904,767	37,6986	
Octobre	55		31	25 193,18	812,88	33,8618	9 130,76	294,541	12,273	34 323,95	1 107,224	46,1343	
Novembre	56		30	30 216,50	1 007,22	41,9674	9 110,93	303,698	12,654	39 327,43	1 310,914	54,6214	
Décembre	57		31	29 856,36	963,11	40,1295	12 129,87	391,280	16,303	41 986,04	1 354,368	56,4328	

		Année 2005 (Puissance enkW)												
		Janvier		Aout 38,527		Septembre 37,085		Octobre 44,338		Novembre 53,779		Décembre 54,608		
Heures	coeff / heure	Solaire	Diesel	Solaire	Diesel	Solaire	Diesel	Solaire	Diesel	Solaire	Diesel	Solaire	Diesel	
1	0,42			16,181		15,576		18,622		22,587		22,936		
2	0,39			15,026		14,464		17,292		20,974		21,297		
3	0,33			12,714		12,238		14,632		17,747		18,021		
4	0,42			16,181		15,576		18,622		22,587		22,936		
5	0,91			35,060		33,748		40,348		48,939		49,694		
6	0,69			26,584		25,589		30,593		37,108		37,680		
7	0,43			16,567		15,947		19,065		23,125		23,482		
8	0,35			13,485		12,980		15,518		18,823		19,113		
9	0,32			12,329		11,868		14,188		17,209		17,475		
10	0,27			10,402		10,013		11,971		14,520		14,744		
11	0,37			14,255		13,722		16,405		19,898		20,205		
12	0,46			17,723		17,060		20,396		24,739		25,120		
13	0,49			18,878		18,172		21,726		26,352		26,758		
14	0,49			18,878		18,172		21,726		26,352		26,758		
15	0,38			14,640		14,093		16,848		20,436		20,751		
16	0,31			11,943		11,497		13,745		16,672		16,929		
17	0,44			16,952		16,318		19,509		23,663		24,028		
18	0,58			22,346		21,510		25,716		31,192		31,673		
19	0,87				33,519		32,265		38,574		46,788		47,509	
20	2,1				80,907		77,881		93,110		112,937		114,678	
21	1,96				75,514		72,689		86,903		105,408		107,033	
22	1,82				70,120		67,497		80,695		97,879		99,387	
23	1,57				60,488		58,225		69,611		84,434		85,735	
0	0,58				22,346		21,510		25,716		31,192		31,673	Max
	MAXIMUM			35,060		33,748		40,348		48,939		49,694		49,69
					80,907		77,881		93,110		112,937		114,678	114,88

		Année 2006 (Puissance enkW)												
		Janvier 43,301		Aout 41,495		Septembre 39,893		Octobre 47,671		Novembre 57,831		Décembre 58,592		
Heures	coeff / heure	Solaire	Diesel	Solaire	Diesel	Solaire	Diesel	Solaire	Diesel	Solaire	Diesel	Solaire	Diesel	
1	0,42	18,187		17,428		16,755		20,022		24,289		24,608		
2	0,39	16,888		16,183		15,558		18,592		22,554		22,851		
3	0,33	14,289		13,693		13,165		15,731		19,084		19,335		
4	0,42	18,187		17,428		16,755		20,022		24,289		24,608		
5	0,91	39,404		37,760		36,302		43,380		52,626		53,318		
6	0,69	29,878		28,631		27,526		32,893		39,903		40,428		
7	0,43	18,620		17,843		17,154		20,498		24,867		25,194		
8	0,35	15,156		14,523		13,962		16,685		20,241		20,507		
9	0,32	13,856		13,278		12,766		15,255		18,506		18,749		
10	0,27	11,691		11,204		10,771		12,871		15,614		15,820		
11	0,37	16,022		15,353		14,760		17,638		21,397		21,679		
12	0,46	19,919		19,088		18,351		21,928		26,602		26,952		
13	0,49	21,218		20,332		19,547		23,359		28,337		28,710		
14	0,49	21,218		20,332		19,547		23,359		28,337		28,710		
15	0,38	16,455		15,768		15,159		18,115		21,976		22,265		
16	0,31	13,423		12,863		12,367		14,778		17,927		18,163		
17	0,44	19,053		18,258		17,553		20,975		25,445		25,780		
18	0,58	25,115		24,067		23,138		27,649		33,542		33,983		
19	0,87		37,672		36,100		34,707		41,473		50,318		50,975	
20	2,1		90,933		87,139		83,775		100,108		121,444		123,042	
21	1,96		84,871		81,330		78,190		93,434		113,348		114,840	
22	1,82		78,809		75,520		72,605		86,760		105,252		106,637	
23	1,57		67,983		65,147		62,631		74,843		90,794		91,989	
0	0,58		25,115		24,067		23,138		27,649		33,542		33,983	
	MAXIMUM	39,404	90,933	37,760	87,139	36,302	83,775	43,380	100,108	52,626	121,444	53,318	123,042	Max
														53,32
														123,04

		Année 2007 (Puissance enkW)												
		Janvier 46,582		Aout 44,462		Septembre 42,699		Octobre 51,003		Novembre 61,882		Décembre 62,575		
Heures	coeff / heure	Solaire	Diesel	Solaire	Diesel	Solaire	Diesel	Solaire	Diesel	Solaire	Diesel	Solaire	Diesel	
1	0,42	19,564		18,674		17,934		21,421		25,990		26,281		
2	0,39	18,167		17,340		16,653		19,891		24,134		24,404		
3	0,33	15,372		14,673		14,091		16,831		20,421		20,650		
4	0,42	19,564		18,674		17,934		21,421		25,990		26,281		
5	0,91	42,389		40,461		38,856		46,413		56,313		56,943		
6	0,69	32,141		30,679		29,463		35,192		42,699		43,177		
7	0,43	20,030		19,119		18,361		21,931		26,609		26,907		
8	0,35	16,304		15,562		14,945		17,851		21,659		21,901		
9	0,32	14,906		14,228		13,664		16,321		19,802		20,024		
10	0,27	12,577		12,005		11,529		13,771		16,708		16,895		
11	0,37	17,235		16,451		15,799		18,871		22,896		23,153		
12	0,46	21,428		20,453		19,642		23,461		28,466		28,784		
13	0,49	22,825		21,786		20,923		24,991		30,322		30,662		
14	0,49	22,825		21,786		20,923		24,991		30,322		30,662		
15	0,38	17,701		16,896		16,226		19,381		23,515		23,778		
16	0,31	14,440		13,783		13,237		15,811		19,183		19,398		
17	0,44	20,496		19,563		18,788		22,441		27,228		27,533		
18	0,58	27,017		25,788		24,766		29,582		35,892		36,293		
19	0,87		40,526		38,682		37,148		44,373		53,837		54,440	
20	2,1		97,822		93,370		89,669		107,106		129,952		131,407	
21	1,96		91,300		87,146		83,691		99,966		121,289		122,647	
22	1,82		84,779		80,921		77,713		92,825		112,625		113,886	
23	1,57		73,133		69,806		67,038		80,075		97,155		98,242	
0	0,58		27,017		25,788		24,766		29,582		35,892		36,293	
	MAXIMUM	42,389	97,822	40,461	93,370	38,856	89,669	46,413	107,106	56,313	129,952	56,943	131,407	Max
														56,94
														131,41

		Année 2008 (Puissance enkW)												
		Janvier 49,862		Aout 47,430		Septembre 45,506		Octobre 54,335		Novembre 65,933		Décembre 66,558		
Heures	coeff / heure	Solaire	Diesel	Solaire	Diesel	Solaire	Diesel	Solaire	Diesel	Solaire	Diesel	Solaire	Diesel	
1	0,42	20,942		19,920		19,113		22,821		27,692		27,954		
2	0,39	19,446		18,498		17,747		21,191		25,714		25,958		
3	0,33	16,454		15,652		15,017		17,931		21,758		21,964		
4	0,42	20,942		19,920		19,113		22,821		27,692		27,954		
5	0,91	45,374		43,161		41,411		49,445		59,999		60,568		
6	0,69	34,405		32,726		31,399		37,491		45,494		45,925		
7	0,43	21,441		20,395		19,568		23,364		28,351		28,620		
8	0,35	17,452		16,600		15,927		19,017		23,077		23,295		
9	0,32	15,956		15,177		14,562		17,387		21,099		21,299		
10	0,27	13,463		12,806		12,287		14,671		17,802		17,971		
11	0,37	18,449		17,549		16,837		20,104		24,395		24,626		
12	0,46	22,937		21,818		20,933		24,994		30,329		30,617		
13	0,49	24,432		23,240		22,298		26,624		32,307		32,613		
14	0,49	24,432		23,240		22,298		26,624		32,307		32,613		
15	0,38	18,948		18,023		17,292		20,647		25,055		25,292		
16	0,31	15,457		14,703		14,107		16,844		20,439		20,633		
17	0,44	21,939		20,869		20,023		23,908		29,011		29,285		
18	0,58	28,920		27,509		26,394		31,515		38,241		38,604		
19	0,87		43,380		41,264		39,590		47,272		57,362		57,905	
20	2,1		104,710		99,602		95,563		114,104		138,460		139,772	
21	1,96		97,730		92,962		89,192		106,498		129,229		130,454	
22	1,82		90,749		86,322		82,821		98,891		119,999		121,135	
23	1,57		78,283		74,464		71,445		85,307		103,515		104,496	
0	0,58		28,920		27,509		26,394		31,515		38,241		38,604	
	MAXIMUM	45,374	104,710	43,161	99,602	41,411	95,563	49,445	114,104	59,999	138,460	60,568	139,772	Max
														60,57
														139,77

		Année 2009 (Puissance enkW)												
		Janvier 53,142		Aout 50,397		Septembre 48,313		Octobre 57,668		Novembre 69,984		Décembre 70,541		
Heures	coeff / heure	Solaire	Diesel	Solaire	Diesel	Solaire	Diesel	Solaire	Diesel	Solaire	Diesel	Solaire	Diesel	
1	0,42	22,320		21,167		20,291		24,221		29,393		29,627		
2	0,39	20,726		19,655		18,842		22,490		27,294		27,511		
3	0,33	17,537		16,631		15,943		19,030		23,095		23,279		
4	0,42	22,320		21,167		20,291		24,221		29,393		29,627		
5	0,91	48,360		45,861		43,964		52,478		63,686		64,192		
6	0,69	36,668		34,774		33,336		39,791		48,289		48,673		
7	0,43	22,851		21,671		20,774		24,797		30,093		30,333		
8	0,35	18,600		17,639		16,909		20,184		24,495		24,689		
9	0,32	17,006		16,127		15,460		18,454		22,395		22,573		
10	0,27	14,348		13,607		13,044		15,570		18,896		19,046		
11	0,37	19,663		18,647		17,876		21,337		25,894		26,100		
12	0,46	24,445		23,183		22,224		26,527		32,193		32,449		
13	0,49	26,040		24,695		23,673		28,257		34,292		34,565		
14	0,49	26,040		24,695		23,673		28,257		34,292		34,565		
15	0,38	20,194		19,151		18,359		21,914		26,594		26,806		
16	0,31	16,474		15,623		14,977		17,877		21,695		21,868		
17	0,44	23,383		22,175		21,258		25,374		30,793		31,038		
18	0,58	30,823		29,230		28,021		33,447		40,591		40,914		
19	0,87		46,234		43,845		42,032		50,171		60,886		61,371	
20	2,1		111,599		105,834		101,457		121,103		146,967		148,136	
21	1,96		104,159		98,778		94,693		113,029		137,170		138,260	
22	1,82		96,719		91,722		87,929		104,956		127,372		128,385	
23	1,57		83,433		79,123		75,851		90,539		109,876		110,749	
0	0,58		30,823		29,230		28,021		33,447		40,591		40,914	Max
	MAXIMUM	48,360		45,861		43,964		52,478		63,686		64,192		64,19
			111,599		105,834		101,457		121,103		146,967		148,136	148,14

# Annexe 4

## RETScreen® - Données météorologiques et solaires de la NASA

Langue/Language : 

Description du projet		Données	Note	Plage
Nom du projet		Senegal-Nippon		
Lieu du projet		Dionewar-Niodior		
Latitude du lieu du projet	°N	14	Étape 1 : Entrer la latitude	-90 à 90
Longitude du lieu du projet	°E	-16	Étape 2 : Entrer la longitude	-180 à 180
			Étape 3 : <a href="#">Cliquer ici pour rechercher les données satellitaires</a>	

Données annuelles		Données
Température extérieure de calcul en chauffage	°C	12,5
Température extérieure de calcul en climatisation	°C	37,6
Écart moyen températures quotidiennes en été	°C	18,4
Amplitude annuelle des temp. du sol en surface	°C	7,0

Données mensuelles									
Mois	Moyenne mensuelle du rayonnement quotidien sur l'horizontale (kWh/m <sup>2</sup> )/j	Température moyenne mensuelle °C	Moyenne mensuelle de l'humidité relative %	Moyenne mensuelle de pression atmosphérique kPa	Degrés-jours mensuels en chauffage sous 18°C °C-jours	Moyenne mensuelle de la vitesse du vent @ 10 m m/s	Moyenne mensuelle de la vitesse du vent @ 50 m m/s	Température moyenne mensuelle du sol en surface °C	Nombre mensuel de jours de gel au site jours
janvier	4,89	22,3	44	100,6	0	3,7	4,7	22,6	0
février	5,80	23,6	48	100,5	0	3,7	4,6	24,2	0
mars	6,65	24,8	50	100,4	0	3,5	4,4	25,9	0
avril	7,01	26,9	51	100,3	0	3,5	4,4	28,2	0
mai	6,88	28,6	54	100,4	0	3,7	4,7	30,2	0
juin	6,11	27,9	66	100,6	0	3,8	4,8	29,2	0
juillet	5,64	26,2	76	100,7	0	3,6	4,6	26,8	0
août	5,37	26,3	78	100,7	0	3,2	4,0	26,5	0
septembre	5,40	26,5	77	100,7	0	2,9	3,7	26,3	0
octobre	5,66	27,1	70	100,6	0	2,8	3,5	26,6	0
novembre	5,18	26,2	55	100,6	0	3,2	4,0	25,6	0
décembre	4,73	23,6	45	100,6	0	3,6	4,6	23,5	0
Annuel	5,77	25,8	60	100,6	0	3,4	4,3	26,3	0



Modèle énergétique RETScreen<sup>®</sup> - Projet d'installation photovoltaïque

Caractéristiques du site		Données	Notes/plage
Nom du projet		Senegal-Nippon	
Lieu du projet		Dionewar-Niodior	
Station météorologique la plus proche du projet	-	Kaolack	<i>compléter la feuille Ressource solaire</i>
Latitude du lieu du projet	°N	13,5	-90,0 à 90,0
Rayonnement solaire annuel (surface inclinée)	MWh/m <sup>2</sup>	1,97	
Température moyenne annuelle	°C	25,8	-20,0 à 30,0
Demande énergétique en CC pour les mois considérés	MWh	0,000	
Demande énergétique en CA pour les mois considérés	MWh	344,626	

Paramètres du système		Données	Notes/plage
Type d'application	-	Hors réseau	
Configuration du système PV	-	PV/batterie/génératrice	
<b>Système de génération de référence</b>			
Source	-	Génératrice	
Source d'énergie	-	Diesel (mazout #2)	
Consommation spécifique d'énergie	L/kWh	0,2600000	
<b>Conditionnement de l'énergie</b>			
Puissance de l'onduleur (CC à CA) suggérée	kW (AC)	49,69	
Puissance de l'onduleur	kW (AC)	100,0	
Rendement moyen de l'onduleur	%	92%	80% à 95%
Pertes diverses du conditionnement de l'énergie	%	2%	0% à 10%
<b>Batterie d'accumulateurs</b>			
Nombre de jours d'autonomie requis	j	1,0	1,0 à 15,0
Tension nominale de la batterie	V	384,0	12,0 à 120,0
Rendement de la batterie	%	85%	50% à 85%
Niveau maximal de décharge	%	85%	20% à 85%
Rendement du régulateur de charge (CC à CC)	%	93%	85% à 95%
Contrôle de la température de la batterie	-	Ambiant	
Réduction moy. de capacité de la batterie due à la temp	%	0%	0% à 50%
Capacité nominale suggérée de la batterie	Ah	3 184	
Capacité nominale de la batterie	Ah	2 500	
<b>Champ PV</b>			
Type de module PV	-	mono-Si	
Manufacturier de modules PV / # de modèle	-	Isototon	<i>voir la base de données de produits</i>
Rendement nominal du module PV	%	12,8%	4,0% à 15,0%
Température nominale des cellules en opération	°C	45	40 à 55
Coefficient de température du module PV	% / °C	0,40%	0,10% à 0,50%
Régulateur du champ PV	-	MPPT	
Pertes diverses du champ PV	%	1,0%	0,0% à 20,0%
Puissance nominale du champ PV suggérée	kWp	88,50	
Puissance nominale du champ PV	kWp	101,76	
Surface du champ PV	m <sup>2</sup>	798,1	
<b>Génératrice</b>			
Rendement du chargeur (CA à CC)	%	90%	80% à 95%
Puissance de la génératrice suggérée	kW	156,9	
Puissance de la génératrice	kW	200,0	
Source d'énergie	-	Diesel (mazout #2)	
Consommation spécifique d'énergie	L/kWh	0,26	

Production annuelle d'énergie (12,00 mois considérés)		Données	Notes/plage
Demande énergétique équivalente en CC	MWh	374,593	
Energie provenant de la génératrice (Diesel (mazout #2)	MWh	206,983	
Demande énergétique équivalente en CC excédentaire	MWh	0,000	
Rendement au m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>	210,0	
Rendement global du système PV	%	10,7%	
Energie renouvelable fournie	MWh	167,610	
	kWh	167610	

*compléter la feuille Analyse des coûts*



## Modèle énergétique RETScreen® - Projet d'installation photovoltaïque

Caractéristiques du site		Données	Notes/plage
Nom du projet		Senegal-Nippon	
Lieu du projet		Dionewar-Niodlor	
Station météorologique la plus proche du projet	-	Kaolack	<i>compléter la feuille Ressource solaire</i>
Latitude du lieu du projet	°N	13,5	-90,0 à 90,0
Rayonnement solaire annuel (surface inclinée)	MWh/m <sup>2</sup>	1,97	
Température moyenne annuelle	°C	25,8	-20,0 à 30,0
Demande énergétique en CC pour les mois considérés	MWh	0,000	
Demande énergétique en CA pour les mois considérés	MWh	369,763	

Paramètres du système		Données	Notes/plage
Type d'application	-	Hors réseau	
Configuration du système PV	-	PV/batterie/génératrice	
<b>Système de génération de référence</b>			
Source	-	Génératrice	
Source d'énergie	-	Diesel (mazout #2)	
Consommation spécifique d'énergie	L/kWh	0,2600000	
<b>Conditionnement de l'énergie</b>			
Puissance de l'onduleur (CC à CA) suggérée	kW (AC)	53,32	
Puissance de l'onduleur	kW (AC)	100,0	
Rendement moyen de l'onduleur	%	92%	80% à 95%
Pertes diverses du conditionnement de l'énergie	%	2%	0% à 10%
<b>Batterie d'accumulateurs</b>			
Nombre de jours d'autonomie requis	j	1,0	1,0 à 15,0
Tension nominale de la batterie	V	384,0	12,0 à 120,0
Rendement de la batterie	%	85%	50% à 85%
Niveau maximal de décharge	%	85%	20% à 85%
Rendement du régulateur de charge (CC à CC)	%	93%	85% à 95%
Contrôle de la température de la batterie	-	Ambiant	
Réduction moy. de capacité de la batterie due à la temp	%	0%	0% à 50%
Capacité nominale suggérée de la batterie	Ah	3 416	
Capacité nominale de la batterie	Ah	2 500	
<b>Champ PV</b>			
Type de module PV	-	mono-Si	
Manufacturier de modules PV / # de modèle	-	Isofoton	<i>voir la base de données de produits</i>
Rendement nominal du module PV	%	12,8%	4,0% à 15,0%
Température nominale des cellules en opération	°C	45	40 à 55
Coefficient de température du module PV	% / °C	0,40%	0,10% à 0,50%
Régulateur du champ PV	-	MPPT	
Pertes diverses du champ PV	%	1,0%	0,0% à 20,0%
Puissance nominale du champ PV suggérée	kWp	94,95	
Puissance nominale du champ PV	kWp	104,76	
Surface du champ PV	m <sup>2</sup>	798,1	
<b>Génératrice</b>			
Rendement du chargeur (CA à CC)	%	90%	80% à 95%
Puissance de la génératrice suggérée	kW	156,9	
Puissance de la génératrice	kW	200,0	
Source d'énergie	-	Diesel (mazout #2)	
Consommation spécifique d'énergie	L/kWh	0,26	

Production annuelle d'énergie (12,00 mois considérés)		Données	Notes/plage
Demande énergétique équivalente en CC	MWh	401,916	
Energie provenant de la génératrice (Diesel (mazout #2)	MWh	233,288	
Demande énergétique équivalente en CC excédentaire	MWh	0,000	
Rendement au m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>	211,3	
Rendement global du système PV	%	10,7%	
Energie renouvelable fournie	MWh	168,628	
	kWh	168628	

*compléter la feuille Analyse des coûts*

## Évaluation de la ressource solaire et calcul de la charge RETScreen® - Projet d'installation photovoltaïque

Latitude du site et position du champ PV		Données	Notes/Plage
Station météorologique la plus proche du projet	-	Kaolack	<i>voir la base de données météorologiques</i>
Latitude du lieu du projet	°N	13,5	-90,0 à 90,0
Système de positionnement du champ PV	-	Fixe	
Inclinaison du champ PV	°	15,0	0,0 à 90,0
Orientation du champ PV p/r à l'azimut	°	180,0	0,0 à 180,0

Données mensuelles					
Mois	Portion d'utilisation du système dans le mois (0 - 1)	Moyenne mensuelle du rayonnement quotidien sur l'horizontale (kWh/m <sup>2</sup> /j)	Température moyenne mensuelle (°C)	Moyenne du rayonnement quotidien sur le champ PV (kWh/m <sup>2</sup> /j)	Fraction solaire mensuelle (%)
janvier	1,00	4,89	22,3	4,08	31%
février	1,00	5,80	23,6	5,02	37%
mars	1,00	6,65	24,8	6,10	44%
avril	1,00	7,01	26,9	6,83	49%
mai	1,00	6,88	28,6	6,98	50%
juin	1,00	6,11	27,9	6,29	45%
juillet	1,00	5,64	26,2	5,75	42%
août	1,00	5,37	26,3	5,32	39%
septembre	1,00	5,40	26,5	5,12	38%
octobre	1,00	5,66	27,1	5,03	37%
novembre	1,00	5,18	26,2	4,35	33%
décembre	1,00	4,73	23,6	3,89	30%
			Annuel	Période d'utilisation	
Rayonnement solaire sur l'horizontale		MWh/m <sup>2</sup>	2,11	2,11	
Rayonnement solaire sur surface inclinée		MWh/m <sup>2</sup>	1,97	1,97	
Température moyenne		°C	25,8	25,8	

Caractéristiques de la charge			Données	Notes/Plage	
Type d'application	-		Hors réseau		
Utilisation du calculateur de charge détaillée?	oui/non		Oui		
Description	CA/CC	Corrélation entre la charge et l'énergie solaire	Charge (kW)	Heures d'utilisation par jour (h/j)	Jours d'utilisation par semaine (j/semaine)
			Moyenne quotidienne	Annuel	
Demande énergétique en CC		kWh (CC)	0,000	0,0	
Demande énergétique en CA		kWh (CA)	1 081,918	394 900,0	
Charge de pointe en CA		kW (CA)		56,943	
					<i>retour à la feuille Modèle énergétique</i>

Modèle énergétique RETScreen<sup>®</sup> - Projet d'installation photovoltaïque

Caractéristiques du site		Données	Notes/plage
Nom du projet		Senegal-Nippon	
Lieu du projet		Dionewar-Niodior	
Station météorologique la plus proche du projet	-	Kaolack	<i>compléter la feuille Ressource solaire</i>
Latitude du lieu du projet	°N	13,5	-90,0 à 90,0
Rayonnement solaire annuel (surface inclinée)	MWh/m <sup>2</sup>	1,97	
Température moyenne annuelle	°C	25,8	-20,0 à 30,0
Demande énergétique en CC pour les mois considérés	MWh	0,000	
Demande énergétique en CA pour les mois considérés	MWh	394,900	

Paramètres du système		Données	Notes/plage
Type d'application	-	Hors réseau	
Configuration du système PV	-	PV/batterie/génératrice	
<b>Système de génération de référence</b>			
Source	-	Génératrice	
Source d'énergie	-	Diesel (mazout #2)	
Consommation spécifique d'énergie	L/kWh	0,2600000	
<b>Conditionnement de l'énergie</b>			
Puissance de l'onduleur (CC à CA) suggérée	kW (AC)	56,94	
Puissance de l'onduleur	kW (AC)	100,0	
Rendement moyen de l'onduleur	%	92%	80% à 95%
Pertes diverses du conditionnement de l'énergie	%	2%	0% à 10%
<b>Batterie d'accumulateurs</b>			
Nombre de jours d'autonomie requis	j	1,0	1,0 à 15,0
Tension nominale de la batterie	V	384,0	12,0 à 120,0
Rendement de la batterie	%	85%	50% à 85%
Niveau maximal de décharge	%	85%	20% à 85%
Rendement du régulateur de charge (CC à CC)	%	93%	85% à 95%
Contrôle de la température de la batterie	-	Ambiant	
Réduction moy. de capacité de la batterie due à la temp	%	0%	0% à 50%
Capacité nominale suggérée de la batterie	Ah	3 648	
Capacité nominale de la batterie	Ah	2 500	
<b>Champ PV</b>			
Type de module PV	-	mono-Si	
Manufacturier de modules PV / # de modèle	-	Isotlon	<i>voir la base de données de produits</i>
Rendement nominal du module PV	%	12,8%	4,0% à 15,0%
Température nominale des cellules en opération	°C	45	40 à 55
Coefficient de température du module PV	% / °C	0,40%	0,10% à 0,50%
Régulateur du champ PV	-	MPPPT	
Pertes diverses du champ PV	%	1,0%	0,0% à 20,0%
Puissance nominale du champ PV suggérée	kWp	101,41	
Puissance nominale du champ PV	kWp	101,76	
Surface du champ PV	m <sup>2</sup>	798,1	
<b>Génératrice</b>			
Rendement du chargeur (CA à CC)	%	90%	80% à 95%
Puissance de la génératrice suggérée	kW	156,9	
Puissance de la génératrice	kW	200,0	
Source d'énergie	-	Diesel (mazout #2)	
Consommation spécifique d'énergie	L/kWh	0,26	

Production annuelle d'énergie (12,00 mois considérés)		Données	Notes/plage
Demande énergétique équivalente en CC	MWh	429,239	
Energie provenant de la génératrice (Diesel (mazout #2)	MWh	259,676	
Demande énergétique équivalente en CC excédentaire	MWh	0,000	
Rendement au m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>	212,5	
Rendement global du système PV	%	10,8%	
Energie renouvelable fournie	MWh	169,563	
	kWh	169563	

*compléter la feuille Analyse des coûts*



## Modèle énergétique RETScreen® - Projet d'installation photovoltaïque

Caractéristiques du site		Données	Notes/plage
Nom du projet		Senegal-Nippon	
Lieu du projet		Dionewar-Niodior	
Station météorologique la plus proche du projet	-	Kaolack	<i>compléter la feuille Ressource solaire</i>
Latitude du lieu du projet	°N	13,5	-90,0 à 90,0
Rayonnement solaire annuel (surface inclinée)	MWh/m <sup>2</sup>	1,97	
Température moyenne annuelle	°C	25,8	-20,0 à 30,0
Demande énergétique en CC pour les mois considérés	MWh	0,000	
Demande énergétique en CA pour les mois considérés	MWh	420,037	

Paramètres du système		Données	Notes/plage
Type d'application	-	Hors réseau	
Configuration du système PV	-	PV/batterie/génératrice	
<b>Système de génération de référence</b>			
Source	-	Génératrice	
Source d'énergie	-	Diesel (mazout #2)	
Consommation spécifique d'énergie	L/kWh	0,2600000	
<b>Conditionnement de l'énergie</b>			
Puissance de l'onduleur (CC à CA) suggérée	kW (AC)	60,57	
Puissance de l'onduleur	kW (AC)	100,0	
Rendement moyen de l'onduleur	%	92%	80% à 95%
Pertes diverses du conditionnement de l'énergie	%	2%	0% à 10%
<b>Batterie d'accumulateurs</b>			
Nombre de jours d'autonomie requis	j	1,0	1,0 à 15,0
Tension nominale de la batterie	V	384,0	12,0 à 120,0
Rendement de la batterie	%	85%	50% à 85%
Niveau maximal de décharge	%	85%	20% à 85%
Rendement du régulateur de charge (CC à CC)	%	93%	85% à 95%
Contrôle de la température de la batterie	-	Ambiant	
Réduction moy. de capacité de la batterie due à la temp	%	0%	0% à 50%
Capacité nominale suggérée de la batterie	Ah	3 881	
Capacité nominale de la batterie	Ah	2 500	
<b>Champ PV</b>			
Type de module PV	-	mono-Si	
Manufacturier de modules PV / # de modèle	-	Isototon	<i>voir la base de données de produits</i>
Rendement nominal du module PV	%	12,8%	4,0% à 15,0%
Température nominale des cellules en opération	°C	45	40 à 55
Coefficient de température du module PV	% / °C	0,40%	0,10% à 0,50%
Régulateur du champ PV	-	MPPT	
Pertes diverses du champ PV	%	1,0%	0,0% à 20,0%
Puissance nominale du champ PV suggérée	kWp	107,86	
Puissance nominale du champ PV	kWp	101,76	
Surface du champ PV	m <sup>2</sup>	798,1	
<b>Génératrice</b>			
Rendement du chargeur (CA à CC)	%	90%	80% à 95%
Puissance de la génératrice suggérée	kW	156,9	
Puissance de la génératrice	kW	200,0	
Source d'énergie	-	Diesel (mazout #2)	
Consommation spécifique d'énergie	L/kWh	0,26	

Production annuelle d'énergie (12,00 mois considérés)		Données	Notes/plage
Demande énergétique équivalente en CC	MWh	456,562	
Energie provenant de la génératrice (Diesel (mazout #2)	MWh	286,129	
Demande énergétique équivalente en CC excédentaire	MWh	0,000	
Rendement au m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>	213,5	
Rendement global du système PV	%	10,8%	
Energie renouvelable fournie	MWh	170,433	
	kWh	170433	

*compléter la feuille Analyse des coûts*



Modèle énergétique RETScreen<sup>®</sup> - Projet d'installation photovoltaïque

Caractéristiques du site		Données	Notes/plage
Nom du projet		Senegal-Nippon	
Lieu du projet		Dionewar-Niodior	
Station météorologique la plus proche du projet	-	Kaolack	<i>compléter la feuille Ressource solaire</i>
Latitude du lieu du projet	°N	13,5	-90,0 à 90,0
Rayonnement solaire annuel (surface inclinée)	MWh/m <sup>2</sup>	1,97	
Température moyenne annuelle	°C	25,8	-20,0 à 30,0
Demande énergétique en CC pour les mois considérés	MWh	0,000	
Demande énergétique en CA pour les mois considérés	MWh	445,174	

Paramètres du système		Données	Notes/plage
Type d'application	-	Hors réseau	
Configuration du système PV	-	PV/batterie/génératrice	
Système de génération de référence			
Source	-	Génératrice	
Source d'énergie	-	Diesel (mazout #2)	
Consommation spécifique d'énergie	L/kWh	0,2600000	
Conditionnement de l'énergie			
Puissance de l'onduleur (CC à CA) suggérée	kW (AC)	64,19	
Puissance de l'onduleur	kW (AC)	100,0	
Rendement moyen de l'onduleur	%	92%	80% à 95%
Pertes diverses du conditionnement de l'énergie	%	2%	0% à 10%
Batterie d'accumulateurs			
Nombre de jours d'autonomie requis	j	1,0	1,0 à 15,0
Tension nominale de la batterie	V	384,0	12,0 à 120,0
Rendement de la batterie	%	85%	50% à 85%
Niveau maximal de décharge	%	85%	20% à 85%
Rendement du régulateur de charge (CC à CC)	%	93%	85% à 95%
Contrôle de la température de la batterie	-	Ambiant	
Réduction moy. de capacité de la batterie due à la temp	%	0%	0% à 50%
Capacité nominale suggérée de la batterie	Ah	4 113	
Capacité nominale de la batterie	Ah	2 500	
Champ PV			
Type de module PV	-	mono-Si	
Manufacturier de modules PV / # de modèle	-	Iscofoton	<i>voir la base de données de produits</i>
Rendement nominal du module PV	%	12,8%	4,0% à 15,0%
Température nominale des cellules en opération	°C	45	40 à 55
Coefficient de température du module PV	% / °C	0,40%	0,10% à 0,50%
Régulateur du champ PV	-	MPPT	
Pertes diverses du champ PV	%	1,0%	0,0% à 20,0%
Puissance nominale du champ PV suggérée	kWp	114,32	
Puissance nominale du champ PV	kWp	101,76	
Surface du champ PV	m <sup>2</sup>	798,1	
Génératrice			
Rendement du chargeur (CA à CC)	%	90%	80% à 95%
Puissance de la génératrice suggérée	kW	156,9	
Puissance de la génératrice	kW	200,0	
Source d'énergie	-	Diesel (mazout #2)	
Consommation spécifique d'énergie	L/kWh	0,26	

Production annuelle d'énergie (12,00 mois considérés)		Données	Notes/plage
Demande énergétique équivalente en CC	MWh	483,885	
Energie provenant de la génératrice (Diesel (mazout #2)	MWh	312,651	
Demande énergétique équivalente en CC excédentaire	MWh	0,000	
Rendement au m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>	214,5	
Rendement global du système PV	%	10,9%	
Energie renouvelable fournie	MWh	171,234	
	kWh	171234	

*compléter la feuille Analyse des coûts*