

SESSION DE 2008

---

**CONCOURS EXTERNE  
DE RECRUTEMENT DE PROFESSEURS AGRÉGÉS**

Section : GÉNIE ÉLECTRIQUE

COMPOSITION D'ÉLECTROTECHNIQUE

Durée : 6 heures

---

Calculatrice électronique de poche, y compris programmable, alphanumérique ou à écran graphique, à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

Dictionnaire technique anglais-français autorisé.

L'usage de tout ouvrage de référence, de tout autre dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.

*Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.*

*De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.*

**NB :** *Hormis l'en-tête détachable, la copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.*

Tournez la page S.V.P.

A

# Etude d'une micro-centrale photo-solaire d'appoint pour un hameau de montagne

## Avertissements

Les quatre parties de cette composition sont indépendantes ; il est toutefois instamment recommandé de les traiter toutes et de consacrer à chacune un temps de travail proportionné. Chaque partie devra être rédigée sur une (des) copie(s) séparée(s).

Le questionnement dans chaque partie est progressif, il est recommandé de traiter les questions dans l'ordre proposé.

---

## Contexte

*Le hameau d'alpage des Dormillouzes est situé en moyenne montagne dans les Alpes du Sud. Il est relié au village le plus proche par une ligne triphasée 400 V ancienne, longue (4 km) et de faible puissance de court-circuit, compte tenu des besoins modestes initiaux (éclairage essentiellement).*

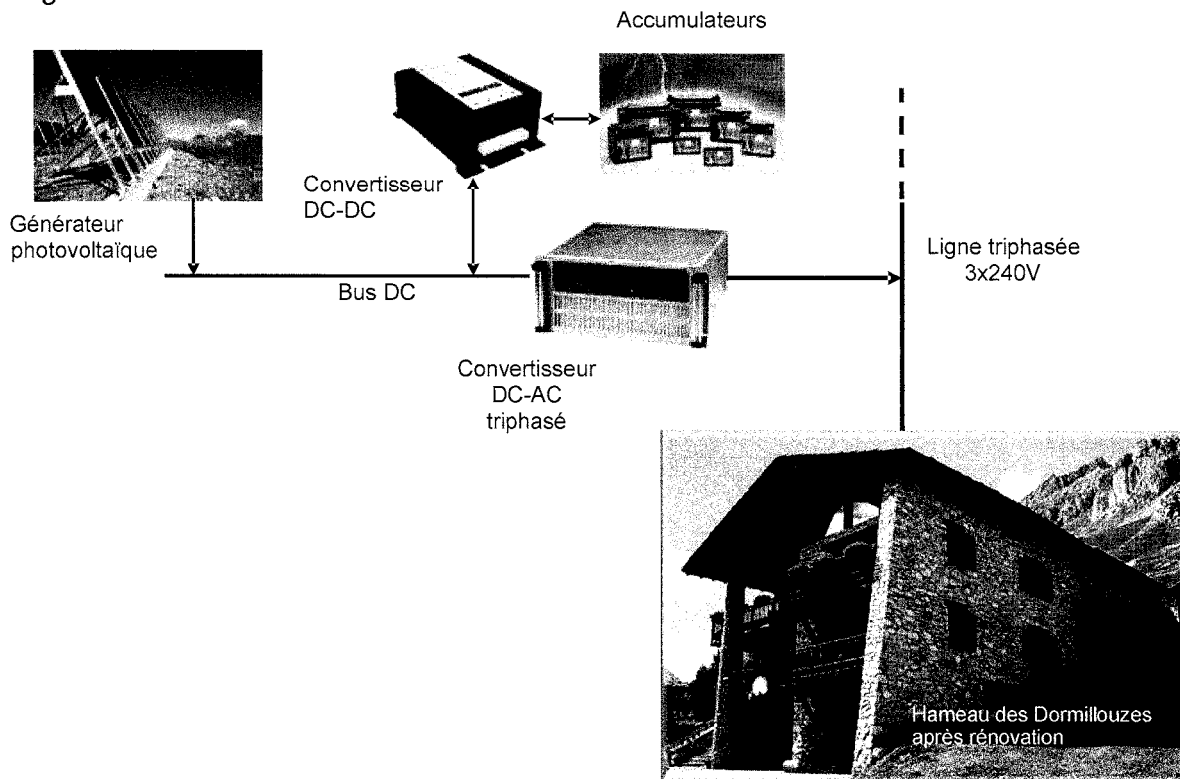
*Récemment, le hameau a été revendu à un comité d'entreprise qui l'a transformé en centre de loisir utilisé essentiellement durant les mois de juillet et d'août et durant les périodes de vacances.*

*Cependant, le centre rénové et modernisé pour accueillir davantage de touristes voit sa consommation d'électricité s'accroître sensiblement durant l'été, causant des chutes de tension, le papillotement de l'éclairage et l'usure prématurée des équipements électriques et électroniques.*

*Une étude économique tenant compte de la topologie des lieux (relief important) et de l'impact visuel a conclu à l'intérêt de conserver la ligne en l'état mais de la renforcer par une micro-centrale photovoltaïque en extrémité de ligne, côté hameau. Celle-ci fournit le surcroît de consommation durant les mois d'utilisation du centre. Hors période de forte consommation, sa production est revendue à EDF pour amortir le coût d'installation.*

*Par ailleurs, il a été nécessaire d'adjoindre un dispositif de stockage de l'énergie produite, compte tenu du décalage entre les moments de production et de consommation. Cette fonctionnalité autorise par ailleurs un fonctionnement îloté de la micro-centrale, assurant la continuité de fourniture en énergie nécessaire à certains dispositifs de sécurité et de communication obligatoires dans les centres d'accueil collectif.*

La structure du dispositif est représentée à la figure ci-dessous, le générateur photovoltaïque est constitué de panneaux en silicium polycristallin qui alimentent un bus continu (bus DC) sur lequel est connecté un convertisseur DC/AC qui transfère l'énergie produite vers la ligne, un convertisseur DC-DC permet d'assurer la gestion du stockage de l'énergie.



### Organisation de la micro-centrale photo-solaire

Ce sujet est consacré à l'étude de cette micro-centrale au travers de quatre parties :

- La première partie est consacrée à l'étude de la ligne triphasée, ses limitations et la justification du modèle simplifié retenu.
- La seconde partie concerne le dimensionnement énergétique de la micro-centrale et du dispositif de stockage tenant compte des besoins spécifiques de consommation et du gisement solaire.
- La troisième partie est dédiée à l'étude du générateur photovoltaïque associé au convertisseur DC-AC lors du fonctionnement au fil du soleil, c'est-à-dire hors des périodes d'usage touristiques. Le fonctionnement spécifique de l'onduleur à transfert de puissance maximal est exploré.
- La dernière partie concerne l'étude du convertisseur DC-DC permettant la gestion du stockage de l'énergie produite.

## Partie A. Etude de la ligne d'alimentation

L'accroissement de fréquentation du centre de loisir durant les mois de juillet et août provoque une augmentation de la puissance consommée. Il en résulte que la tension en extrémité de ligne est fluctuante avec la consommation, provoquant une gêne de confort et l'usure prématurée des équipements électriques. Ce point est étudié dans cette partie.

### Liste et données numériques des grandeurs utilisées pour cette partie

- $\underline{Z}_d$  : impédance équivalente monophasée de la ligne ( $\underline{Z}_d = R_d + jX_d$  avec  $X_d = 1,6 \Omega$ ),
- $\underline{z}_S$  : impédance linéique en série de la ligne,
- $\underline{y}_D$  : admittance linéique en dérivation de la ligne,
- $\underline{Z}_{ch}$  : impédance de la charge connectée en extrémité de ligne ( $\underline{Z}_{ch} = R_{ch} + jX_{ch}$ ),
- $v$  : tension en entrée de ligne,
- $V$  : tension efficace en entrée de ligne, supposée constante ( $V = 240 V$ ),
- $v_a$  : tension en extrémité de ligne,
- $\Delta V_a$  : chute de tension en ligne,
- $i_a$  : courant dans la ligne,
- $P_a$  : puissance totale consommée en extrémité de ligne,
- $Q_a$  : énergie réactive totale en extrémité de ligne,
- $S_a$  : puissance apparente consommée en extrémité de ligne,
- $F_p$  : facteur de puissance,
- $v_1, v_2, v_3$  : tensions simples de la ligne triphasée,
- $i_1, i_2, i_3$  : courants de la ligne triphasée,
- $\phi$  : déphasage entre le courant  $i_a$  (ou  $i_i$ ) et la tension  $v_a$  (ou  $v_i$ ),
- $\ell_{ii}, r_i$  et  $c_{ii}$  : inductances, résistances et capacités linéiques propres ( $\ell, r$  et  $c$ ),
- $\ell_{ij}$  et  $c_{ij}$  : termes linéiques de couplage par mutuelle inductance et capacité (m et  $c_m$ ),
- $x_0$  : longueur de la ligne triphasée ( $x_0 = 4 \text{ km}$ ),
- $\Delta x$  : élément de longueur de ligne
- $S$  : section d'un câble de la ligne triphasée ( $S = 180 \text{ mm}^2$ ),
- $\rho$  : résistivité du câble utilisé ( $\rho = 3,32 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ ),
- $\omega$  : pulsation du réseau (rad/s),

### Notations utilisées

- lettre minuscule : valeur électrique instantanée,
- lettre majuscule soulignée : grandeur complexe,
- lettre majuscule : valeur efficace.

La ligne triphasée qui alimente le centre de loisir est longue de  $x_0 = 4 \text{ km}$ . Chaque conducteur présente une section  $S$  ( $S = 180 \text{ mm}^2$ ), il est constitué par un alliage d'aluminium (Almélec) de résistivité  $\rho = 3,32 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ .

Dans la première partie (questions A.1. à A.11.) on étudiera la chute de tension en ligne à partir d'un modèle équivalent monophasé.

Dans la seconde partie (questions A.12. à A.17.), on montrera que la ligne triphasée peut être ramenée au modèle équivalent monophasé précédent qui facilite l'étude de la chute de tension en ligne.

## Etude de la chute de tension en extrémité de ligne

On suppose dans cette partie que chaque phase de la ligne peut être modélisée par un schéma équivalent monophasé. Le schéma équivalent, utilisé pour cette étude, est donné figure A.1 avec  $\underline{Z}_d$  l'impédance équivalente de la ligne, on a :  $\underline{Z}_d = R_d + jX_d$ .

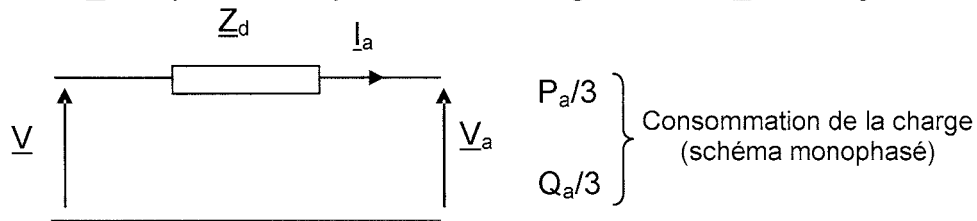


Figure A.1 : Schéma équivalent monophasé par phase de la ligne

A.1. Calculer numériquement la résistance  $R_d$ .

A.2. Tracer le diagramme de Fresnel représentant ce modèle en prenant pour référence le vecteur  $\underline{V}_a$ . Le déphasage  $\varphi$  entre le courant  $i_a$  et la tension  $v_a$  est positif par convention. Les ordres de grandeurs seront respectés.

On définit, dans un premier temps, la chute de tension  $\Delta V_a$  par la différence entre le module de la projection du vecteur  $\underline{V}$  sur l'axe de référence et le module de  $\underline{V}_a$ . Cette définition constitue une valeur approchée de  $\Delta V_a$  lorsque l'angle entre ces deux grandeurs reste faible.

A.3. Représenter la chute de tension  $\Delta V_a$  et donner son expression en fonction de  $R_d$ ,  $X_d$ ,  $\varphi$  et  $I_a$ .

A.4. Exprimer  $\Delta V_a$  en fonction de  $R_d$ ,  $X_d$ ,  $V_a$ ,  $P_a$  et  $Q_a$ . On rappelle que  $P_a$  et  $Q_a$  sont respectivement la puissance active et l'énergie réactive d'extrémité de ligne pour les 3 phases.

On admet qu'une fluctuation de la tension réseau de +/- 5% est la limite pour ne pas ressentir le scintillement des ampoules à incandescence ni occasionner des défauts sur les équipements électriques.

A.5. Donner numériquement l'expression de la courbe limite dans le plan  $(P_a, Q_a)$  en prenant une chute de tension  $\Delta V_a = 12V$  à  $V_a = 228V$  ( $X_d = 1,6 \Omega$ ). Tracer cette courbe en portant les valeurs numériques remarquables et préciser la zone du plan dans laquelle les fluctuations de tension restent acceptables dans la limite d'un angle  $\varphi$  tel que  $\cos(\varphi) > 0,85$ .

On souhaite maintenant calculer la chute exacte de tension. On raisonnera, pour faciliter l'approche, dans le cas d'une charge connectée en extrémité de ligne telle que  $\cos(\varphi) = 1$  puis dans le cas d'une charge quelconque. On note cette charge  $\underline{Z}_{ch} = R_{ch} + jX_{ch}$ .

A.6. Exprimer la relation entre  $V$ ,  $V_a$ ,  $R_d$ ,  $X_d$  et  $P_a$  si  $\cos(\varphi) = 1$ . Montrer que, pour ce cas particulier, la relation peut se mettre sous la forme :

$$\alpha \left( \frac{P_a}{V_a} \right)^2 + \beta P_a + V_a^2 = V^2.$$

Exprimer  $\alpha$  et  $\beta$  en fonction de  $R_d$  et  $X_d$ , puis les calculer numériquement.

Le tracé de la tension en extrémité de ligne  $V_a$  en fonction de  $P_a$  est donné, pour  $\cos(\varphi) = 1$ , sur le document réponse A.1.

A.7. Indiquer sur ce tracé (document réponse A.1) le point de fonctionnement correspond à une fluctuation de tension de +/- 5,3%. Vérifier que ce point est très proche d'une valeur remarquable trouvée en A.5.

A.8. Exprimer la relation entre la puissance consommée  $P_a$  par la ligne triphasée en fonction de  $V_a$  et  $R_{ch}$  si  $\cos(\varphi) = 1$ . Tracer sur le document réponse A.1 la caractéristique pour la valeur de  $R_{ch}$  correspondant à  $V_a = 228V$  (chute de tension de -5,3%) et  $\cos(\varphi) = 1$ .

On s'intéresse maintenant au cas général ( $\cos(\varphi)$  quelconque). Le calcul exact de la tension en extrémité de ligne  $V_a$  en fonction de la puissance  $P_a$  paramétré par le facteur de puissance est représenté à la figure A.2. On admet que le fonctionnement de la ligne reste acceptable jusqu'à ce que :  $\frac{dV_a}{dP_a} \rightarrow \infty$ .

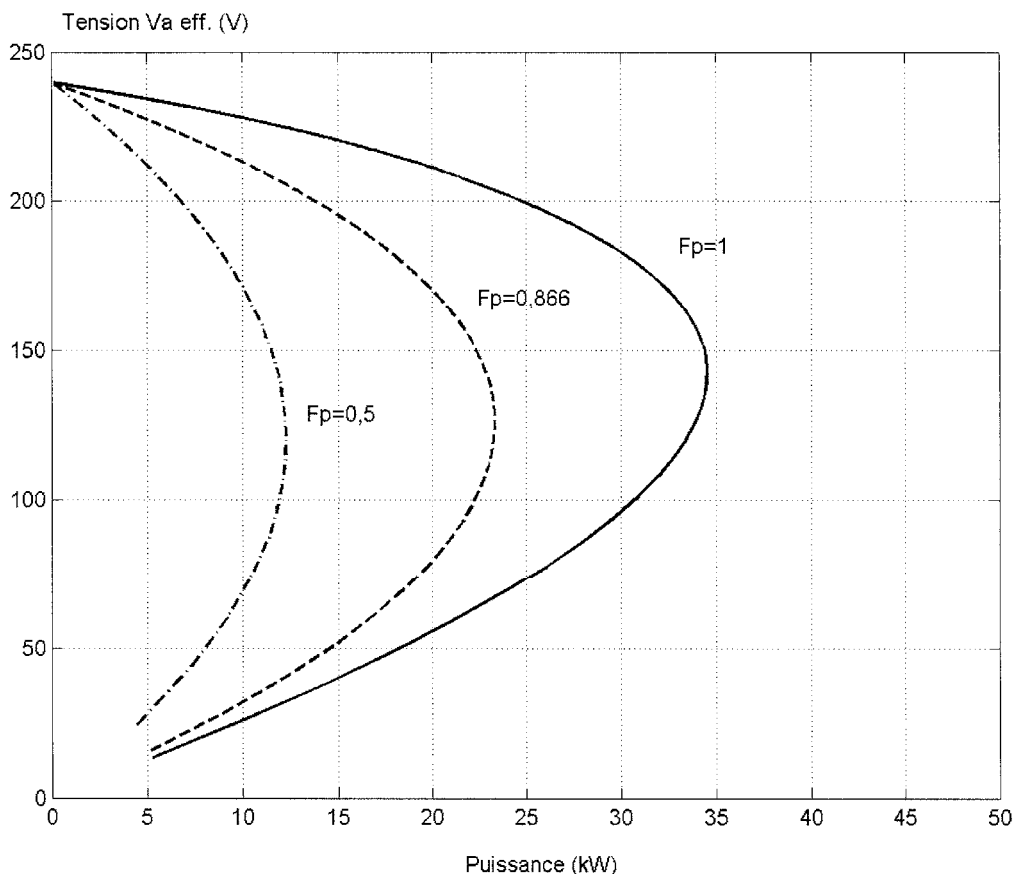


Figure A.2 : Tension efficace en extrémité de ligne  $V_a$  en fonction de la puissance  $P_a$

A.9. Déterminer pour chaque valeur de  $\cos(\varphi)$  la puissance maximale transmissible  $P_{amax}$  ainsi que la tension maximale d'extrémité  $V_{amax}$ . Les résultats seront donnés sous forme de tableau (document réponse A.2).

L'annexe 1 représente la consommation de puissance sur une journée du hameau pendant une journée d'été, on observe que le facteur de puissance moyen est proche de 0,85.

A.10. Cette ligne est-elle bien adaptée à cette consommation ? Justifier la réponse.

## Détermination du modèle équivalent monophasé par phase

La ligne alimentant le centre de vacances est triphasée. Son modèle par éléments de longueur  $\Delta x$  est représenté figure A.3. On rappelle que la longueur de la ligne  $x_0$  est de 4km. Les termes  $\ell_{ii}$ ,  $r_i$  et  $c_{ii}$  représentent les inductances, résistances et capacités linéiques propres, les termes  $\ell_{ij}$  et  $c_{ij}$  représentent respectivement les termes linéiques de couplage par mutuelle inductance et capacité. Par raison de symétrie de la ligne triphasée, les termes  $\ell_{ii}$  sont égaux, il en est de même des termes  $\ell_{ij}$ ,  $c_{ii}$  et  $c_{ij}$ .

On note :

$\ell_{ii} = \ell$  (H/m),  $\ell_{ij} = m$  (H/m),  $r_i = r$  ( $\Omega$ /m),  $c_{ii} = c$  (F/m),  $c_{ij} = c_m$  (F/m).

On donne :  $\ell = 1,5 \mu\text{H/m}$ ,  $m = 0,226 \mu\text{H/m}$ ,  $r = 0,184 \text{ m}\Omega/\text{m}$ ,  $c = 3,2 \text{ pF/m}$ ,  $c_m = 4,68 \text{ pF/m}$ .

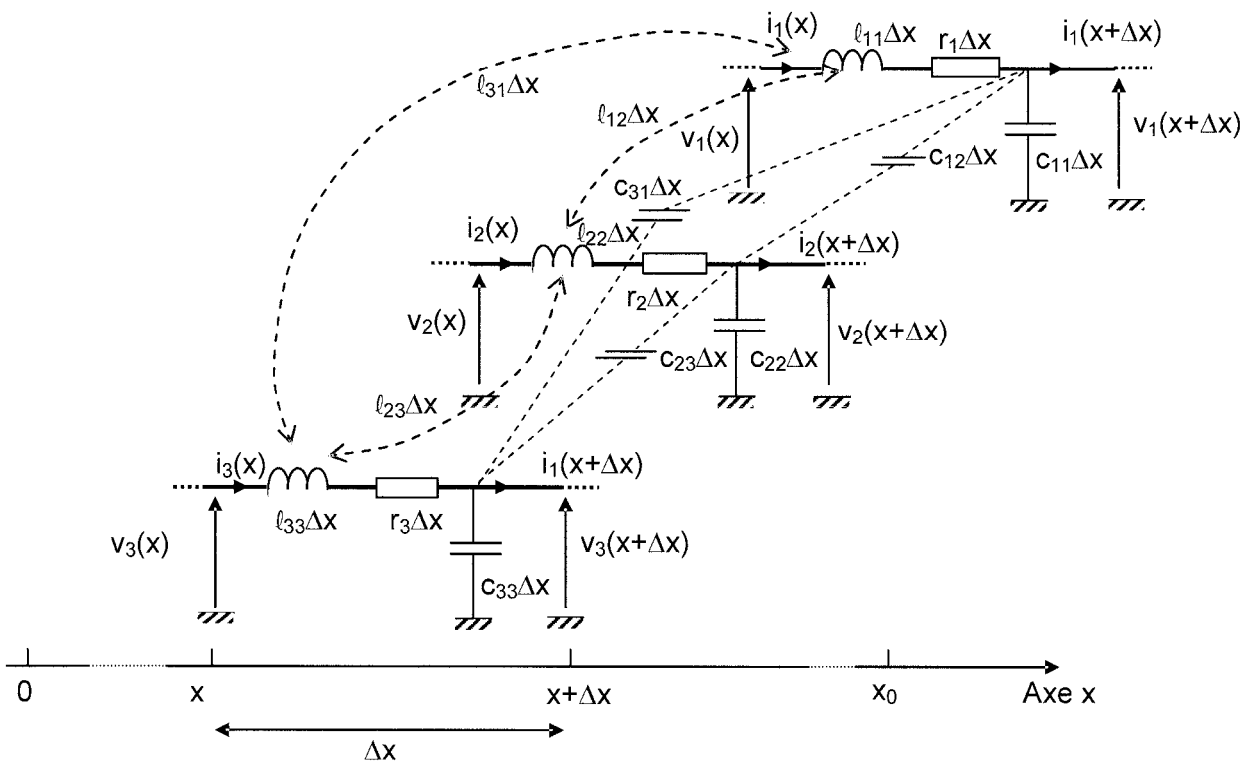


Figure A.3 : Modèle linéique de la ligne triphasée

Les tensions et courants sont triphasés sinusoïdaux équilibrés et symétriques. On considère que la ligne 1 est la référence et on pose :  $i_1 = i_d$  et  $v_1 = v_d$ . L'angle de déphasage entre le courant  $i_i$  et la tension  $v_i$  est noté  $\varphi$ .

On note :  $\underline{a} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ .

A.11. Exprimer les tensions  $\underline{V}_i$  et courants  $\underline{I}_i$  en fonction respectivement de  $\underline{a}$ ,  $\underline{V}_d$  et  $\underline{I}_d$  si le système triphasé est direct.

A.12. Exprimer la relation entre  $\underline{I}_1(x)$ ,  $\underline{I}_1(x+\Delta x)$ ,  $\underline{V}_1(x+\Delta x)$ ,  $\underline{V}_2(x+\Delta x)$ ,  $\underline{V}_3(x+\Delta x)$ ,  $c_{11}$ ,  $c_{12}$ ,  $c_{31}$ ,  $\Delta x$  et  $\omega$ .

A.13. Montrer, que si  $\Delta x \rightarrow 0$ , il est possible d'écrire la relation matricielle suivante :

$$\frac{d}{dx} \begin{pmatrix} I_1(x) \\ I_2(x) \\ I_3(x) \end{pmatrix} = -[Y] \cdot \begin{pmatrix} V_1(x) \\ V_2(x) \\ V_3(x) \end{pmatrix}$$

Exprimer les termes de la matrice  $[Y]$  en fonction de  $c$ ,  $c_m$  et  $\omega$ .

A.14. De même, montrer que :

$$\frac{d}{dx} \begin{pmatrix} V_1(x) \\ V_2(x) \\ V_3(x) \end{pmatrix} = -[Z] \cdot \begin{pmatrix} I_1(x) \\ I_2(x) \\ I_3(x) \end{pmatrix}$$

Exprimer les termes de la matrice  $[Z]$  en fonction de  $r$ ,  $\ell$ ,  $m$  et  $\omega$ .

A.15. Montrer que les relations matricielles précédentes peuvent s'exprimer sous la forme simplifiée suivante :

$$\frac{dV_d(x)}{dx} = -z_s I_d(x) \qquad \frac{dI_d(x)}{dx} = -y_D V_d(x).$$

Exprimer l'impédance linéique en série  $z_s$  et l'admittance linéique en dérivation  $y_D$  en fonction de  $r$ ,  $\ell$ ,  $m$ ,  $c$ ,  $c_m$  et  $\omega$ .

A.16. Proposer un schéma équivalent linéique de ce système d'équations.

A.17. Montrer que l'équation différentielle du second ordre en  $x$  qui détermine l'évolution du potentiel  $V_d(x)$  sur la ligne s'exprime par :

$$\frac{d^2 V_d}{dx^2} = \underline{n}^2 V_d$$

Exprimer la constante de propagation  $\underline{n}$  en fonction de  $z_s$  et  $y_D$ .

A.18. Donner la solution générale de cette équation sous la forme :

$$V_d(x) = K_i \cdot \exp(kx) + K_r \cdot \exp(-kx)$$

Identifier  $k$ .

On représente l'ensemble de la ligne équivalente monophasée comme un quadripôle dont les grandeurs sont orientées comme représenté à la figure A.4. La sortie du quadripôle est chargée par l'impédance  $Z_{ch}$ .

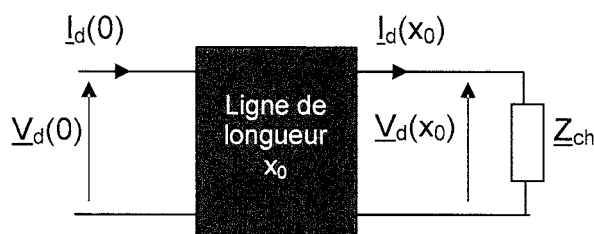


Figure A.4 : Modèle quadripolaire de la ligne

On appelle  $z_c$  l'impédance caractéristique de la ligne :  $z_c = \sqrt{\frac{z_s}{y_D}}$ .

A.19. Exprimer les constantes  $K_i$  et  $K_r$  en fonction de  $V_d(0)$ ,  $I_d(0)$  et  $z_c$ .

A.20. En déduire les expressions de  $V_d(x_0)$  et  $I_d(x_0)$  en fonction de  $V_d(0)$ ,  $I_d(0)$  et  $z_c$ . Montrer que la relation entre les grandeurs de sortie et d'entrée de ligne peut s'écrire :



$$\begin{pmatrix} \underline{V}_d(x_0) \\ \underline{I}_d(x_0) \end{pmatrix} = [\underline{T}] \begin{pmatrix} \underline{V}_d(0) \\ \underline{I}_d(0) \end{pmatrix}$$

Montrer que la matrice  $[\underline{T}]$  s'exprime sous la forme :

$$[\underline{T}] = \begin{pmatrix} \text{ch}(\underline{n}x_0) & -\underline{z}_c \text{sh}(\underline{n}x_0) \\ -\frac{\text{sh}(\underline{n}x_0)}{\underline{z}_c} & \text{ch}(\underline{n}x_0) \end{pmatrix}$$

On note  $\Delta \underline{V}_d$  la chute de tension en ligne avec  $\Delta \underline{V}_d = \underline{V}_d(x_0) - \underline{V}_d(0)$ .

A.21. Exprimer  $\frac{\Delta \underline{V}_d}{\underline{V}_d(0)}$  en fonction de  $\underline{z}_{ch}$ ,  $\underline{z}_c$  et  $x_0$ .

A.22. Après avoir vérifié que le terme  $\underline{k}x_0 \ll 1$ , montrer que :

$$\Delta \underline{V}_d = \frac{\underline{z}_{eq}}{\underline{z}_{ch} + \underline{z}_{eq}} \underline{V}_d(0)$$

Donner l'expression de  $\underline{z}_{eq}$ , vérifier que l'on retrouve bien le schéma équivalent de la ligne donné à la figure A.1 ainsi que les valeurs numériques à partir des données linéiques de la ligne.

## Partie B. Etude Energétique de la micro-centrale photovoltaïque

La solution retenue consiste à renforcer la ligne ancienne et à permettre l'ilotage du site par une micro-centrale électrique photovoltaïque, il est donc nécessaire de dimensionner celle-ci à partir d'un bilan énergétique de consommation et du gisement solaire disponible. Cette partie est consacrée à cette étude.

Le schéma suivant permet de montrer comment s'opèrent les flux d'énergie dans le dispositif : le générateur solaire transfère l'énergie électrique directement à la ligne via l'onduleur, une partie est stockée dans la batterie via un convertisseur DC/DC puis restituée au bus DC selon les besoins. Les rendements indiqués sont des rendements énergétiques.

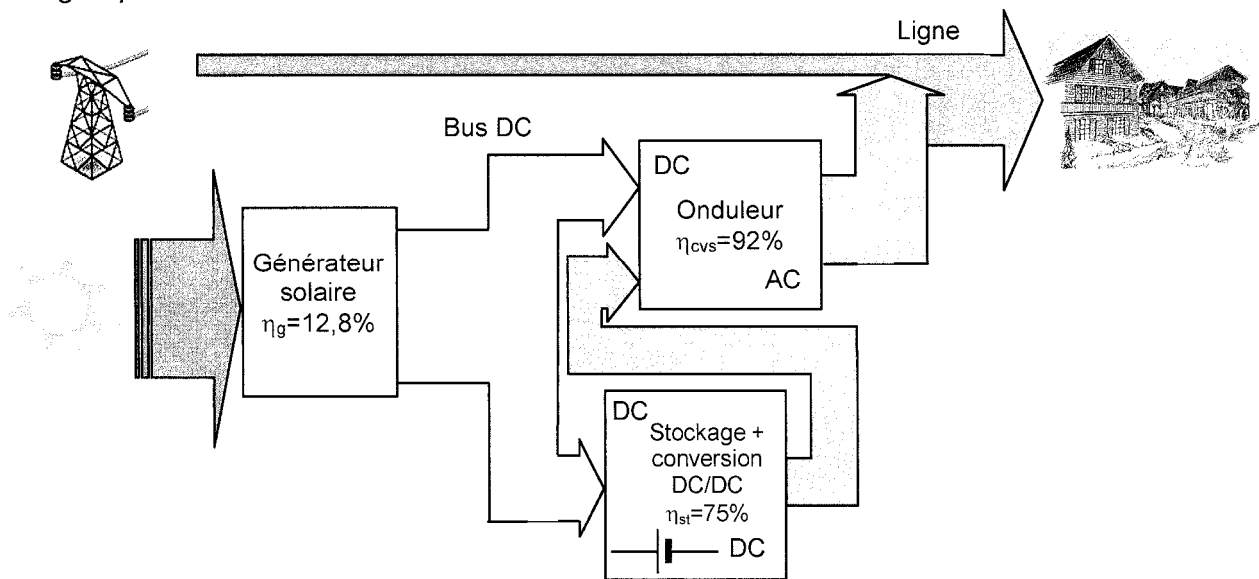


Schéma des flux d'énergie dans la micro-centrale solaire

### Définition de certains termes

• **Irradiance** : c'est la puissance solaire rayonnée par unité de surface ( $W/m^2$ ), elle dépend de :

- la position du soleil dans le ciel (qui dépend de la date, la longitude et l'heure),
- l'inclinaison par rapport à l'horizontale,
- la transparence de l'atmosphère (présence d'aérosols, de vapeur d'eau, de poussières),
- l'ombrage dû à l'environnement local (arbres, montagnes, etc..).

• **Irradiation** : c'est la quantité d'énergie solaire par unité de surface, exprimée en  $Wh/m^2$ , elle dépend des mêmes paramètres que l'irradiance.

### Liste des grandeurs utilisées pour cette partie

- $P_j$  : puissance moyenne journalière absorbée par le hameau (W)
- $P_c$  : puissance crête de l'installation photovoltaïque (W)
- $\Psi_j$  : irradiance journalière ( $W/m^2$ )
- $E_j$  : irradiation journalière ( $Wh/m^2$ )
- $E_{jme}$  : irradiation journalière moyenne estivale ( $Wh/m^2$ )
- $W_b$  : consommation moyenne de base du hameau par jour (Wh)
- $W_e$  : consommation moyenne estivale du hameau par jour (Wh)

$W_x$  : surconsommation moyenne estivale du hameau par jour (Wh)  
 $W_{gp}$  : énergie électrique produite journalièrement par le générateur photovoltaïque (Wh),  
 $W_{sol}$  : énergie solaire quotidienne fournie au générateur photovoltaïque,  
 $W_{st}$  : énergie fournie au dispositif de stockage par jour (Wh),  
 $W_{bat}$  : énergie élémentaire stockée dans une batterie par jour (Wh)  
 $h$  : temps exprimé en heure  
 $N_p$  : nombre de panneaux solaires  
 $N_b$  : nombre de batteries  
 $N_u$  : nombre d'années d'utilisation  
 $M_b$  : masse totale des batteries (kg)  
 $S_u$  : surface utile d'un panneau solaire  
 $S_t$  : surface totale de panneaux solaire  
 $\eta_{ps}$  : rendement d'un panneau solaire,  
 $\eta_g$  : rendement du générateur solaire,  
 $\eta_{cvs}$  : rendement de conversion du système de transmission de l'énergie au réseau,  
 $\eta_{st}$  : rendement énergétique de stockage,  
 $\lambda$  : fraction stockée de l'énergie produite par le générateur photo-solaire.

B.1. En utilisant les données fournies (figure B.1) de consommation du hameau, déterminer numériquement :

- la consommation moyenne de base par jour  $W_b$  (calculée en se basant sur les mois de juin et septembre),
- la consommation moyenne estivale par jour  $W_e$  due à l'afflux touristique (calculée sur les mois de Juillet et d'Août),
- la surconsommation moyenne estivale par jour  $W_x$ .

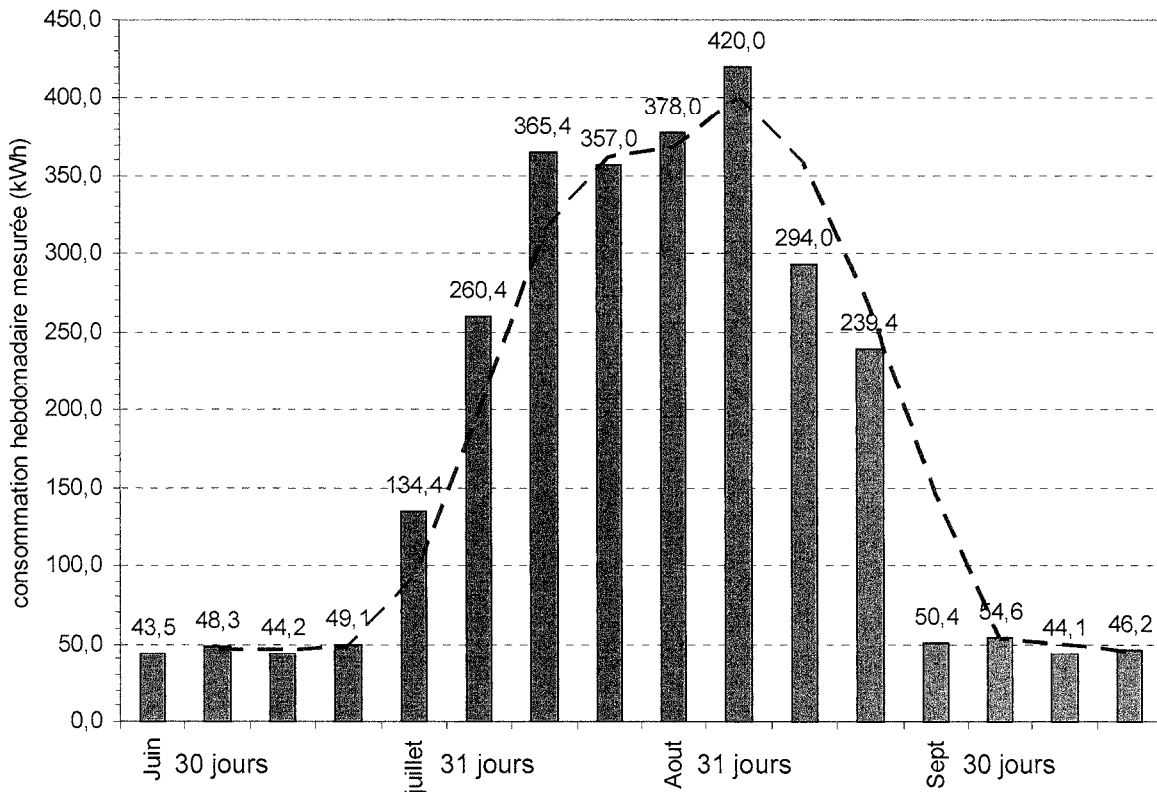


Figure B.1 : Consommation hebdomadaire (kWh) entre juin et septembre (16 semaines)

L'évolution de la puissance consommée sur une journée typique durant la période estivale est représentée en Annexe 1. Le relevé est effectué par tranche de 15 minutes, la puissance moyenne sur une journée  $P_j$  y est reportée.

B.2. Vérifier que l'énergie consommée sur une journée typique en été correspond à l'énergie  $W_e$  trouvée à la question B.1.

B.3. Compléter la courbe d'énergie consommée en été par  $\frac{1}{4}$  d'heure en déterminant l'échelle en kWh sur le document réponse B.1.

L'énergie solaire est transformée en énergie électrique grâce à des panneaux photovoltaïques dont l'orientation doit être optimisée en fonction de la trajectoire du soleil dans le ciel du lieu considéré.

B.4. En utilisant les documents de l'annexe 2, et en considérant l'usage assigné à la micro-centrale :

- justifier le choix d'une orientation fixe des panneaux (par rapport à une orientation adaptative),
- estimer numériquement l'angle optimal d'orientation des panneaux.

B.5. En utilisant les données de l'annexe 3a du gisement énergétique optimal (correspondant à l'angle précédemment proposé), déterminer numériquement l'irradiation journalière moyenne, disponible sur la période juillet-août, notée  $E_{jme}$ .

*La documentation technique des panneaux solaires utilisés est donnée en Annexe 4 (2 pages).*

B.6. En utilisant l'annexe 4, déterminer numériquement la surface utile d'un panneau solaire  $S_u$ .

B.7. En utilisant l'annexe 4, montrer que le rendement énergétique d'un panneau solaire  $\eta_{ps}$  pour une température d'exploitation moyenne de 60°C est de 12,8 %.

*On suppose que le rendement de conversion du système de transmission de l'énergie au réseau,  $\eta_{cvs}$ , vaut 92 %. D'autre part, une fraction moyenne  $\lambda$  de l'ordre de 50% de l'énergie produite par les panneaux est restituée après stockage (on fixera  $\lambda = 50\%$ ). Le rendement énergétique de stockage (gestion par le convertisseur DC/DC comprise)  $\eta_{st}$  est de 75%.*

B.8. Déterminer analytiquement puis numériquement la surface totale  $S_t$  de cellules photovoltaïques nécessaires pour fournir la surconsommation d'énergie  $W_x$ .

B.9. En déduire le nombre de panneaux  $N_p$  à installer.

*On suppose que la courbe d'irradiance journalière moyenne  $\Psi_{ji}$  ( $W/m^2$ ) reste quasiment constante sur un mois. Son évolution journalière pour les 12 mois de l'année est donnée en annexe 3b d'après un modèle de calcul astronomique. On note  $\Psi_{ji}$  l'irradiation journalière du mois  $i$  (par exemples, pour janvier  $i=1$  et pour décembre  $i=12$ ).*

*On suppose que l'évolution horaire de  $\Psi_{ji}(h)$  peut se mettre sous la forme simplifiée suivante :*

$$\text{pour } i = 1 \dots 12, \begin{cases} \Psi_{ji} = f_i & \text{si } f_i > 0 \\ \Psi_{ji} = 0 & \text{si } f_i < 0 \end{cases} \text{ avec } f_i = A_i \cos\left(\frac{\pi(h-h_0)}{D_i}\right).$$

B.10. En utilisant l'annexe 3b, compléter le tableau fourni du document réponse B.2. en y indiquant les valeurs numériques des  $A_i$ , des  $D_i$  et de  $h_0$  pour les différents mois.

B.11. Donner l'expression de l'irradiation journalière  $E_{ji}$  (pour un mois quelconque  $i$ ) en  $Wh/m^2$  en fonction de  $A_i$  et  $D_i$ .

B.12. Calculer numériquement l'irradiation journalière pour le mois d'août  $E_{j8}$ . Vérifier que cette valeur est cohérente avec les données expérimentales de l'irradiation journalière optimale fournies en annexe 3a.

### **Fonctionnement avec stockage temporaire**

*On admettra que la fonction d'approximation de l'irradiance au mois de juillet, identifiée d'après les données expérimentales du lieu peut s'écrire sous la forme :*

$$\Psi_{j7\text{expérimental}} = 710 \cos\left(\frac{\pi(h-12)}{13}\right)$$

B.13. Représenter l'allure de la fonction  $W_{gp}(h)$ , énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque par  $\frac{1}{4}$  d'heure dans le même repère que la fonction de consommation (document réponse B.1) en n'oubliant pas que l'heure locale est égale à l'heure universelle plus 2 heures. On expliquera le raisonnement fait pour effectuer ce tracé. Que peut-on en conclure quant à la possibilité qu'a la micro-centrale de fournir à chaque instant le surcroît de consommation ?

B.14. En déduire l'énergie électrique journalière totale  $W_{gp}$  fournie par le générateur photovoltaïque.

B.15. Sur quelles plages horaires est-il intéressant de stocker l'énergie disponible ?

B.16. Calculer numériquement l'énergie journalière pouvant être stockée  $W_{st}$ .

*On veut stocker cette énergie  $W_{st}$  dans des batteries dont la documentation est fournie en annexe 5. Le modèle ayant une capacité de 210 Ah est retenu compte tenu d'impératifs économiques.*

B.17. Calculer alors :

- la capacité en énergie d'une batterie  $W_{bat}$  en Wh,
- le nombre  $N_b$  de batteries nécessaires au stockage journalier,
- la masse totale  $M_b$  de batteries,
- le nombre d'années  $N_u$  d'utilisation si le dispositif de stockage n'est utilisé que pendant les deux mois d'été.

*On rappelle que le rendement énergétique de stockage dans la batterie  $\eta_{st}$  est de 75% (il correspond au rapport entre l'énergie restituée et l'énergie fournie, il intègre aussi le rendement du convertisseur DC/DC estimé à 95%).*

B.18. Calculer la durée d'autonomie en fonctionnement iloté en supposant la batterie d'accumulateurs complètement chargée pour une puissance consommée journalière moyenne de 1645W (le convertisseur DC/DC a un rendement de 95%).

B.19. Compléter, en indiquant les différentes valeurs numériques, le bilan énergétique pour une journée typique d'été (document réponse B.3).

B.20. Calculer alors l'énergie électrique d'origine solaire restituée à la ligne effectivement disponible sur une journée. En déduire le pourcentage d'apport d'énergie solaire par rapport à la consommation journalière.

### **Fonctionnement au fil du soleil**

*Durant les autres mois (hors juillet et août), le dispositif de stockage n'est pas utilisé, la production de la micro-centrale est donc directement fournie au réseau électrique.*

B.21. Calculer l'énergie électrique restituée à la ligne durant les 10 autres mois de l'année. Sachant que le prix de revente du kWh est de 0,305€, calculer le gain financier maximal prévisible.

B.22. Le coût actuel du W crête installé (équipement et installation comprise) est de l'ordre de 7€, calculer le nombre d'années nécessaires à l'amortissement du système.

## Partie C. Etude du générateur photovoltaïque et optimisation du transfert de puissance

En pratique pour améliorer le bilan économique tout en restant dans les capacités d'alimentation de la ligne triphasée, on choisit un nombre de panneaux légèrement inférieur à la valeur trouvée dans la partie B. Ainsi, le générateur photovoltaïque est constitué par 88 panneaux dont la documentation technique est donnée en annexe 4. Ils sont associés en 8 voies parallèles de 11 panneaux en série. On considérera que la température pourra fluctuer de 25 à 60°C. Un dispositif de supervision déconnecte le générateur lorsque la tension élémentaire de panneau chute sous 12V.

### Liste et données numériques des grandeurs utilisées pour cette partie

- V : tension fournie par un panneau photovoltaïque,
- P : puissance fournie par un panneau photovoltaïque,
- $P_{PV}$  : puissance fournie par le générateur photovoltaïque,
- $P_{PVmax}$  : puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque,
- $V_{AC}$  : tension efficace simple de la ligne triphasée ( $V_{AC} = 240$  V),
- $V_{DC}$  : tension fournie par le générateur photovoltaïque,
- $V_{DCmin}$  : tension minimale de fonctionnement du générateur photovoltaïque,
- $V_{bat}$  : tension fournie par la batterie d'accumulateur, on donne ( $V_{bat} = 96$  V),
- $F_d$  : fréquence de découpage de l'onduleur,
- $i_{ond}$  : courant instantané en sortie d'une phase de l'onduleur,
- $I_{ond}$  : valeur efficace de  $i_{ond}$ ,
- $\Delta i_{ond}$  : ondulation du courant dans une phase de sortie onduleur,
- $V_{ond}$  : tension efficace monophasée équivalente fournie par l'onduleur à la fréquence réseau,
- m : rapport de transformation du transformateur triphasé,  $m = n_2/n_1$
- $\Omega$  : pulsation du réseau,  $\Omega = 2\pi/T_0$ ,
- L : inductance de sortie de chaque phase de l'onduleur,
- $\beta$  : variable de réglage du modulateur MLI de l'onduleur,  $0 < \beta < 1$

C.1. Pour une température de 60°C, déterminer la plage de variation de  $V_{DC}$  entre l'irradiance minimale provoquant la déconnexion et l'irradiance maximale de 1 000 W/m<sup>2</sup> ( $V_{DCmin} < V_{DC} < V_{DCmax}$ ).

### Etude des conséquences de l'ombrage

Il est possible que les panneaux ne reçoivent pas tous la même irradiance, ils ne fournissent donc pas la même puissance électrique chacun. Ce phénomène et ses conséquences sont étudiés dans la suite dans le cas d'une association de 2 panneaux en série, comme représenté figure C.1.

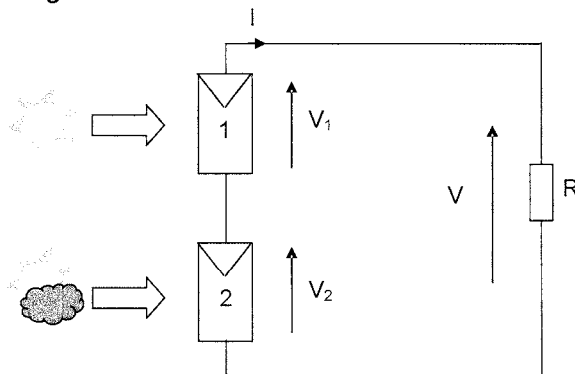


Figure C.1 : Association en série de deux panneaux photovoltaïques

Les panneaux sont connectés en série sur une résistance  $R = 5 \Omega$ .

L'étude porte sur 2 niveaux d'irradiance :  $600 \text{ W/m}^2$  et  $300 \text{ W/m}^2$ . La caractéristique électrique fournie en annexe 4 est approximée, pour une irradiance donnée, par des demi-droites  $\Delta_1$  et  $\Delta_2$  se coupant au point  $M$  comme indiqué à la figure C.2. Les données numériques, relatives à  $600 \text{ W/m}^2$  et  $300 \text{ W/m}^2$  y sont indiquées.

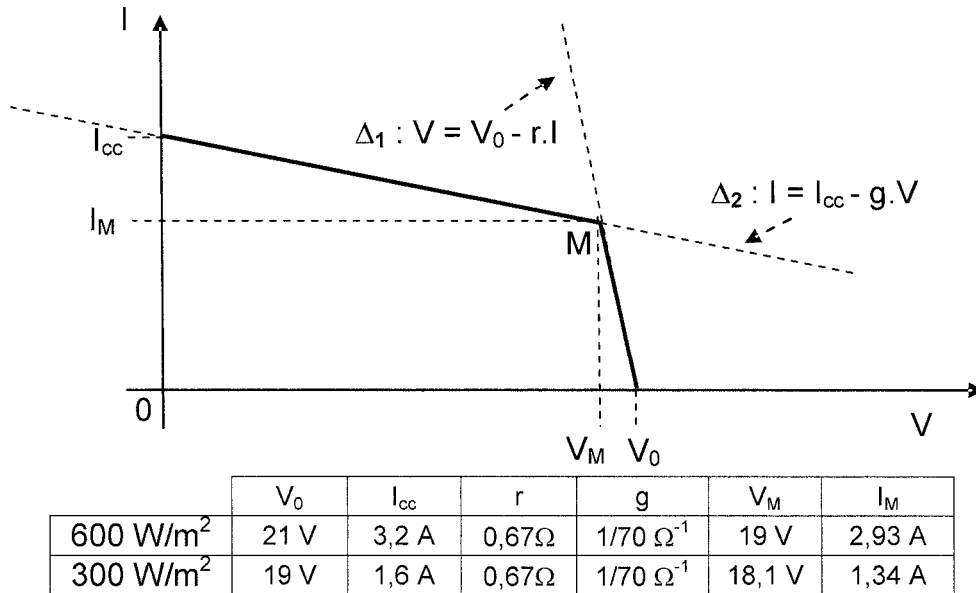


Figure C.2 : Caractéristiques linéarisées d'un panneau photovoltaïque

C.2. Tracer sur le document réponse C.1 la caractéristique résultante de cette association dans les cas suivants :

- cas 1 : même irradiance de  $600 \text{ W/m}^2$  sur chaque panneau,
- cas 2 : irradiation de  $600 \text{ W/m}^2$  sur le panneau 1 et  $300 \text{ W/m}^2$  sur le panneau 2.

C.3. Pour ces 2 cas, déterminer le point de fonctionnement ( $V$  et  $I$ ) avec une résistance de charge  $R$  de  $8,3 \Omega$ .

C.4. En déduire les points de fonctionnement de chaque panneau.

C.5. Calculer les puissances  $P_1$  et  $P_2$  fournies par chaque panneau. Quel inconvénient résulte de la différence d'irradiance ?

C.6. Proposer une solution simple pour éviter cet inconvénient.

C.7. Par dualité, quelle précaution doit-on prendre pour la mise en parallèle des panneaux vis-à-vis du même problème de différence d'irradiance ?



## Optimisation de la production d'énergie électrique

La caractéristique réelle de puissance disponible pour un seul panneau en fonction de la tension, paramétrée par l'irradiance est donnée à la figure C.3.

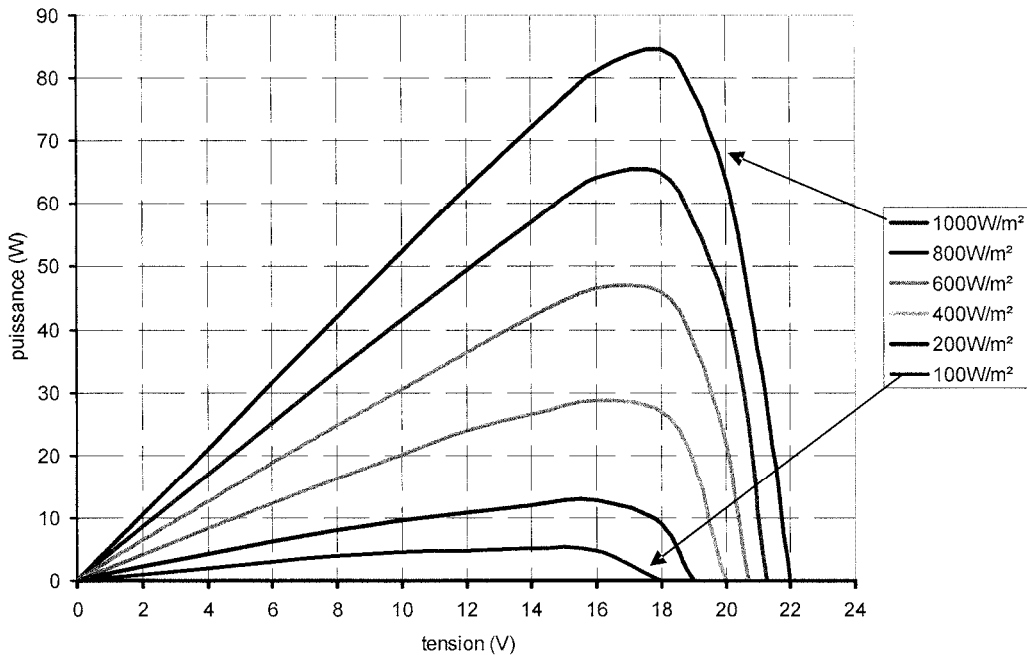


Figure C.3 : Caractéristique  $P(V)$  d'un panneau photovoltaïque paramétré par l'irradiance (doc. PHOTOWATT)

C.8. A quels points de fonctionnement est-il judicieux de faire fonctionner chaque panneau ? Justifier la réponse.

C.9. Compléter les échelles du document réponse C.2 pour obtenir les caractéristiques du générateur photovoltaïque constitué de 88 panneaux. Donner la valeur de  $P_{PVmax}$  pour l'irradiation maximale.

Compte tenu de ces caractéristiques particulières, il est nécessaire d'adapter en permanence la charge vue par le générateur photovoltaïque à la puissance maximale disponible. Le dispositif qui assure cette fonction est appelé un contrôleur MPPT (Maximum Power Point Tracking). On abordera cette problématique sur une configuration simplifiée du système (pas de stockage), dans lequel le générateur est directement connecté à un convertisseur DC-AC (onduleur triphasé) lui-même connecté au réseau triphasé, comme représenté à la figure C.4.

La puissance disponible est transmise à la ligne triphasée via les trois inductances  $L$  et un transformateur d'isolement de rapport de transformation  $m$ .

Le courant  $i_{ond}$  (à la fréquence du réseau) dans chaque phase de l'onduleur est contrôlé par un dispositif de régulation (cadres en pointillés) qui permet aux courants  $i_{ond}$  d'être en phase avec les tensions simples de la ligne.

On admettra que les régulateurs de courant fonctionnent de façon idéale et qu'ils assurent que la grandeur de consigne est effectivement atteinte en sortie avec une dynamique optimale.

Les pertes dans l'onduleur sont négligées.

Les trois cellules de commutation sont commandées avec les fonctions de modulation instantanées de période  $T_d$  :

$$F_1(t) = F(t), F_2(t) = F(t-T_0/3), F_3(t) = F(t-2T_0/3) \quad \text{avec } T_0 : \text{période du réseau} = 20 \text{ ms.}$$

On raisonnera en termes d'évolution de la valeur moyenne de ces fonctions de modulation pour établir le modèle moyen basse fréquence de l'onduleur à la fréquence du réseau. On peut montrer que l'évolution moyenne de ces fonctions sur une période du réseau peut s'écrire :

$$\begin{aligned} \langle F_1(t) \rangle &= [1 + \beta \cos(2\pi t/T_0)] / 2, \\ \langle F_2(t) \rangle &= [1 + \beta \cos(2\pi t/T_0 - 2\pi/3)] / 2, \\ \langle F_3(t) \rangle &= [1 + \beta \cos(2\pi t/T_0 - 4\pi/3)] / 2 \end{aligned}$$

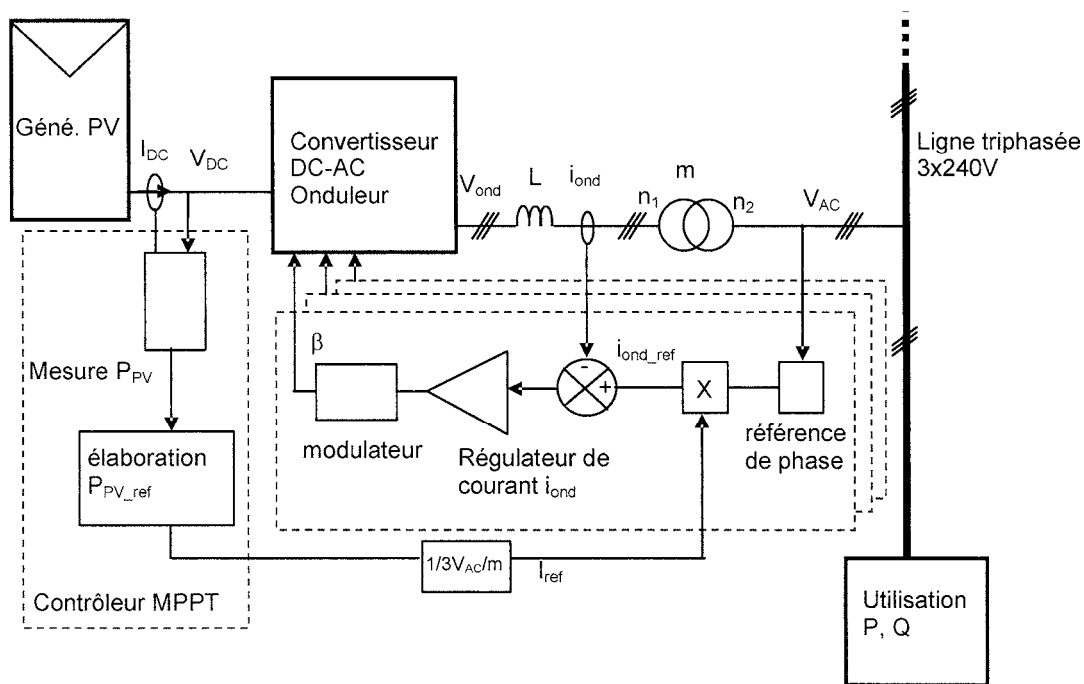


Figure C.4 : Dispositif permettant la réinjection directe de la puissance produite au réseau

C.10. Représenter la structure de l'onduleur en y faisant apparaître les 3 tensions des points milieu des cellules de commutation  $v_{1M}$ ,  $v_{2M}$ ,  $v_{3M}$  (définies par rapport au 0V de l'alimentation DC) et la source de tension  $V_{DC}$ .

C.11. Exprimer les tensions composées  $u_{12}(t)$ ,  $u_{23}(t)$  et  $u_{31}(t)$  de l'onduleur au sens de la moyenne instantanée en fonction de  $V_{DC}$ ,  $\langle F_1(t) \rangle$ ,  $\langle F_2(t) \rangle$  et  $\langle F_3(t) \rangle$ .

C.12. Montrer que l'onduleur connecté au réseau peut être représenté par le modèle équivalent monophasé (en tension simple) simplifié donné à la figure C.5.

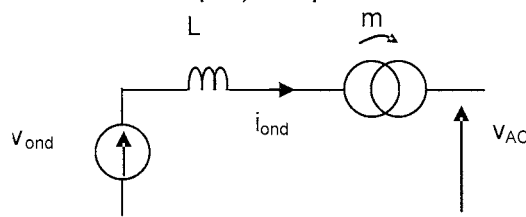


Figure C-5 : modèle équivalent au sens de la moyenne instantanée

Exprimer la tension efficace  $V_{\text{ond}}$  en fonction de la tension  $V_{\text{DC}}$  et  $\beta$ .

C.13. Etablir le diagramme de Fresnel liant les grandeurs vectorielles associées aux grandeurs  $V_{\text{ond}}$ ,  $i_{\text{ond}}$ ,  $V_{\text{ac}}$  correspondant au fonctionnement imposé par le dispositif de régulation.

C.14. Exprimer la puissance fournie par l'onduleur  $P_{\text{ond}}$  en fonction de la tension  $V_{\text{DC}}$ ,  $V_{\text{AC}}$ ,  $L$ ,  $\Omega$ ,  $m$  et  $\beta$ .

C.15. Etablir alors une condition nécessaire (entre  $V_{\text{DC}}$ ,  $V_{\text{AC}}$ ,  $m$  et  $\beta$ ) au fonctionnement de l'onduleur.

### Dimensionnement des composants

Le rapport de transformation  $m$  est déterminé pour obtenir  $P_{\text{ond}} = 0$  lorsque  $V_{\text{DC}} = V_{\text{DCmin}}$  et  $\beta = 1$ .

C.16. Déterminer alors la relation littérale entre  $V_{\text{DCmin}}$ ,  $V_{\text{AC}}$  et  $m$ . Calculer numériquement  $m$ .

C.17. Montrer que la tension  $V_{\text{DC}}$  peut s'exprimer sous la forme :  $V_{\text{DC}} = \frac{V_{\text{DCmin}}}{\beta} \sqrt{1 + \varepsilon^2}$  On désigne cette fonction par le terme de « caractéristique de charge ». Donner l'expression de  $\varepsilon$  en fonction de  $P_{\text{ond}}$ ,  $L$ ,  $\Omega$ ,  $m$  et  $V_{\text{AC}}$ .

On souhaite rendre la caractéristique de charge de l'onduleur quasi-indépendante de  $P_{\text{ond}}$  par un choix adéquat de  $L$ .

C.18. Calculer numériquement la puissance maximale transmise par l'onduleur  $P_{\text{ondMAX}}$ . On impose alors que  $\varepsilon = 0,2$  pour cette valeur, en déduire la valeur numérique de l'inductance  $L$ .

C.19. Déterminer numériquement la plage de variation possible de  $\beta$  pour obtenir  $V_{\text{DCmin}} < V_{\text{DC}} < V_{\text{DCmax}}$  (valeurs trouvées en C.1). Montrer que le réglage de  $\beta$  permet de faire fonctionner le générateur à son point nominal quelle que soit l'irradiance.

C.20. Tracer simplement (dans l'hypothèse  $\varepsilon \ll 1$ ) la fonction  $P_{\text{ond}}(V_{\text{DC}})$  dans le document réponse C.2 pour  $\beta = 1$  et  $0,53$ .

C.21. Quelle valeur initiale de  $\beta$  est-il judicieux d'utiliser au démarrage de l'onduleur pour obtenir un point de fonctionnement en toutes circonstances ?

Le principe du contrôleur MPPT est représenté à la figure suivante. Une horloge de période  $10 \text{ s}$  permet de synchroniser les opérations d'échantillonnage des mesures de puissance, et de tension. On note  $P_{\text{PV}}(n)$  et  $P_{\text{PV}}(n-1)$  les mesures de la puissance fournies par le générateur photovoltaïque aux instants  $n$  et  $n-1$ , idem pour les mesures de la tension  $V_{\text{DC}}$ .

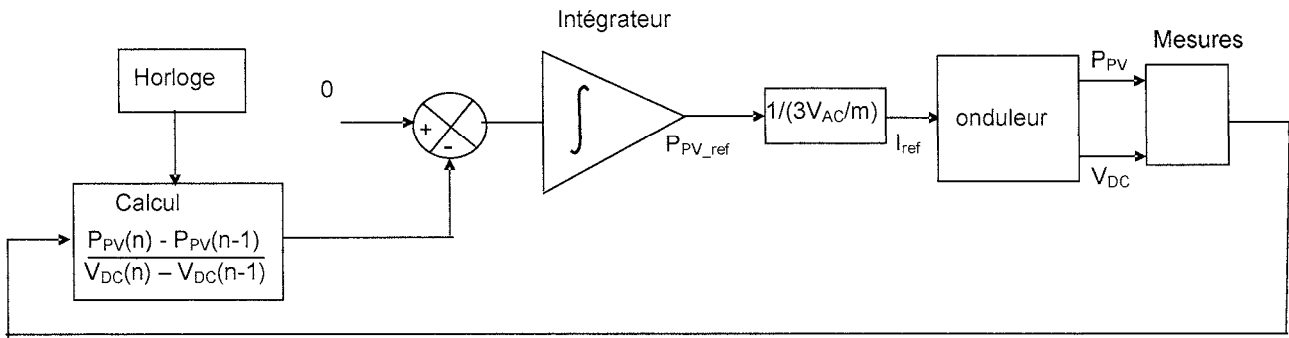


Figure C.6 : contrôleur MPPT

C.22. Expliquer qualitativement le fonctionnement du dispositif. Pour une irradiation donnée autour de quel point de fonctionnement le système s'établit-il ?

C.23. En déduire, en complétant le document réponse C.3, les valeurs de  $V_{DC}$ ,  $P_{ond}$ ,  $\beta$ ,  $V_{ond}$  et  $I_{ond}$  en régime établi pour les irradiances de  $400 \text{ W/m}^2$  et  $1000 \text{ W/m}^2$ .

Le dispositif de contrôle du système complet (avec le stockage) est représenté à la figure C.7. Le bloc non-linéaire a un gain unitaire si la grandeur d'entrée est positive, sinon il impose une valeur nulle à sa sortie. On impose que la ligne ne soit pas sollicitée au-delà d'une consommation de  $3 \text{ kW}$ .

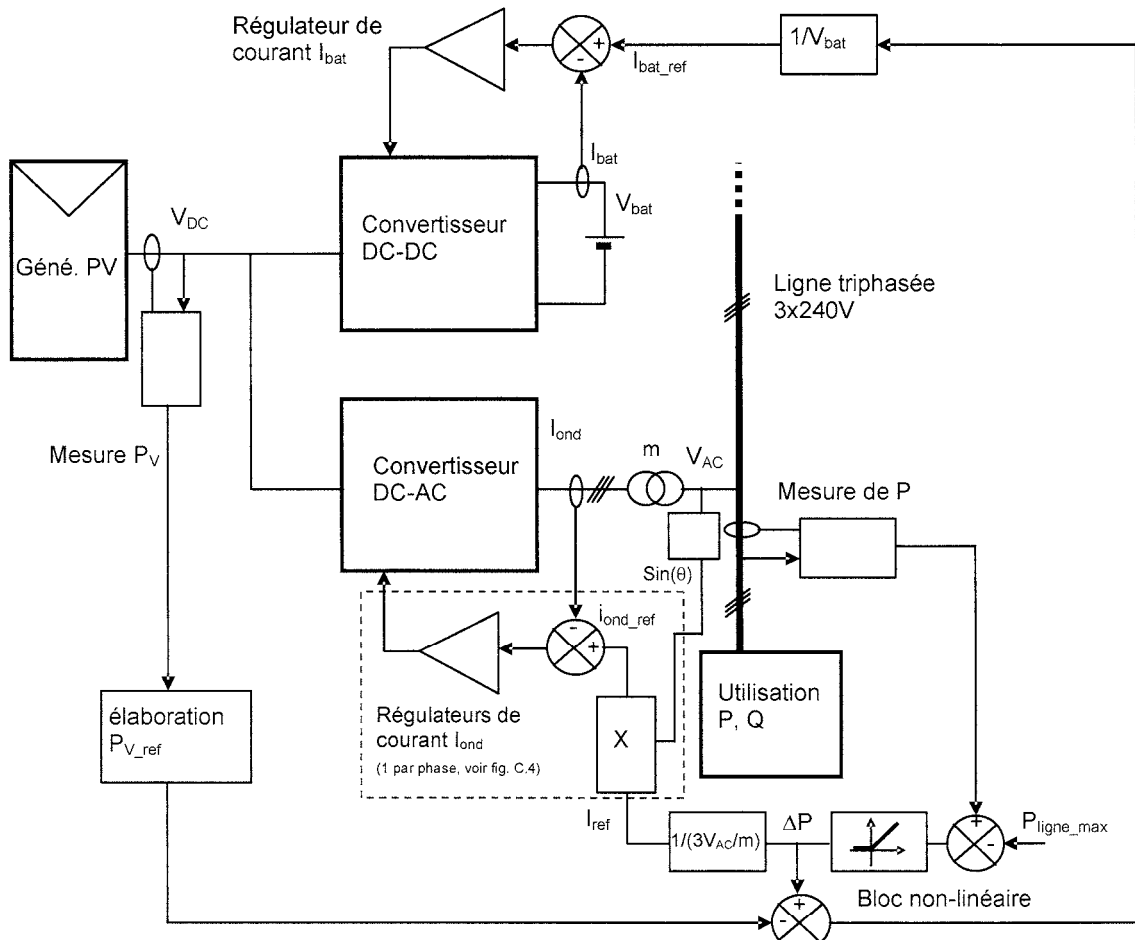


Figure C.7 : Synoptique de contrôle du système

C.24. Compléter le document réponse C.4 en précisant les flux de puissance dans les différents convertisseurs selon les régimes de consommation et de production du générateur photovoltaïque (griser les plages de fonctionnement correspondantes aux fonctionnements proposés et indiquer le signe des puissances transmises).

C.25. Pourquoi a-t-on choisi de placer le contrôleur MPPT sur le contrôle du convertisseur DC-DC ?

## Partie D. Etude du convertisseur DC-DC

Cette partie s'intéresse au convertisseur DC-DC chargé de la gestion du stockage et de la mise à disposition de l'énergie dans la batterie. Il est commandé à fréquence de découpage fixe et à rapport cyclique variable. On rappelle que :

$$132 \text{ V} < V_{DC} < 240 \text{ V}$$

$$V_{bat} = 96 \text{ V}$$

La puissance maximale de 7 500 W est transmise pour  $V_{DC}=190 \text{ V}$

On note :

$X$  : valeur moyenne d'une grandeur,

$X_M$  : valeur moyenne maximale,

$x(t)$  : valeur instantanée (domaine temporel),

$x_M$ , valeur instantanée maximale,

$x$  : notation symbolique (domaine de Laplace)

$i_s$  : courant instantané de sortie de la structure DC-DC,

$\alpha$  : rapport cyclique de commande d'un interrupteur

$F_K(t)$  : fonction de connexion temporelle d'un interrupteur  $F_K(t)=1$  si l'interrupteur est passant.

$T_d, F_d$  : respectivement période et fréquence de découpage,

$k$  : facteur d'ondulation d'un courant, défini par  $\Delta i/I$ ,

$N$  : nombre de cellules de commutation de la structure,

$\mathfrak{R}$  : réluctance d'un circuit magnétique.

### Structure simple

D.1. La structure de base du convertisseur est représentée à la figure D.1. Compte tenu des modes de gestion de l'énergie que doit assurer ce convertisseur, préciser la nature des interrupteurs, leurs segments de fonctionnement statique et leur mode de commande. Proposer en le justifiant un choix technologique de ces composants, indiquer les critères de choix de leur calibre.

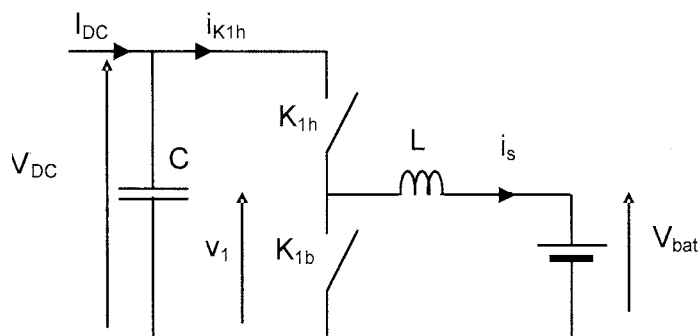


Figure D.1 : structure de base du convertisseur DC-DC

D.2. Etablir une relation entre les rapports cycliques  $\alpha_{1h}$  et  $\alpha_{1b}$ . Quel est le régime de conduction de cette structure ?

D.3. Rappeler les relations entre  $V_{DC}$ ,  $V_{bat}$ ,  $I_{DC}$  et  $I_s$  en fonction de  $\alpha_{1h}$ . Donner l'expression de l'ondulation de courant  $\Delta i_s$  dans l'inductance en fonction de  $L$ ,  $F_d$ ,  $V_{DC}$  et  $\alpha_{1h}$ . Donner l'expression de sa valeur maximale  $\Delta i_{sM}$ .

### Structure entrelacée

Pour optimiser le volume de cette structure, on la modifie comme représenté à la figure D.2, cette opération est appelée « entrelacement » de structures. La commande des interrupteurs de la cellule de rang  $m$  est obtenue à partir de celle de rang 1, selon la relation suivante (décalage temporel de  $mT_d/N$ ) :

$$F_{K_{mh}}(t) = F_{K_{1h}}(t - mT_d/N)$$

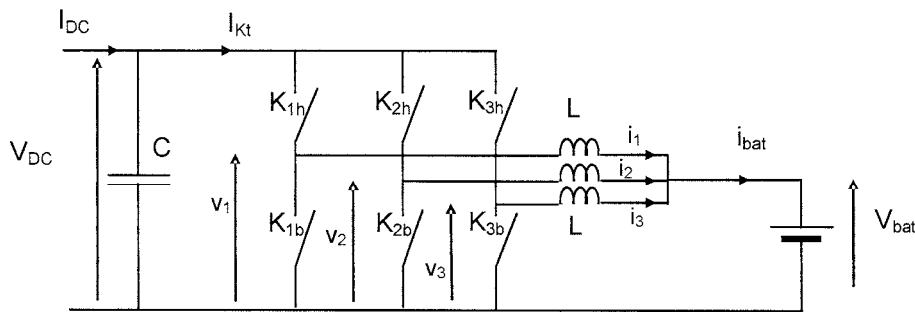


Figure D.2 : structure entrelacée à 3 cellules

D.4. Etablir la relation entre  $V_{DC}$  et  $V_{bat}$  puis celle entre  $I_{DC}$  et  $I_{bat}$  en fonction de  $\alpha_{1h}$ .

D.5. Pour  $\alpha_{1h} = 0,5$  et  $V_{DC} = 190$  V,  $I_{bat} = 9$  A,  $F_d = 40$  kHz,  $L = 200$   $\mu$ H, donner les valeurs numériques de  $\Delta i_1$  et de  $\Delta i_{bat}$ , compléter la construction des tensions  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $v_3$ , et des courants  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_3$ ,  $i_{bat}$  dans le document réponse D-1.

D.6. Donner la fréquence de l'ondulation  $\Delta i_{bat}$  et du courant  $i_{kt}$  en fonction de  $f_d$ . Quels sont les avantages de cette structure ?

On rappelle que le volume d'une inductance de valeur  $L$  est de la forme :

$$V = (\zeta \cdot Li_{max}^2)^{3/4}$$

où  $\zeta$  est un facteur technologique.

On impose au courant  $i_{bat}$  une certaine valeur de son facteur d'ondulation définie par :

$$k_{batM} = \Delta i_{batM} / I_{batM}$$

On rappelle que la relation entre les ondulations maximales dans une cellule et en sortie d'une structure entrelacée à  $N$  cellules est donnée par :

$$\Delta i_{batM} = \Delta i_{sM} / N$$

D.7. Donner l'expression de  $L$  en fonction de  $\Delta i_{sM}$ ,  $V_{DC}$ ,  $F_d$ . Etablir la relation entre  $i_{sM}$ ,  $I_s$  et  $\Delta i_{sM}$ .

D.8. En déduire l'expression  $V_{tot}$  du volume total des  $N$  inductances dans une structure à  $N$  cellules entrelacées, en fonction de  $N$ ,  $V_{DC}$ ,  $F_d$ ,  $\zeta$ ,  $k_{batM}$ ,  $I_{batM}$ , en supposant conservées l'ondulation  $\Delta i_{batM}$  du courant dans la batterie et toutes les contraintes technologiques de fabrication des inductances.

D.9. Montrer que le rapport des volumes d'inductance pour une structure à N cellules et une structure simple est de la forme :

$$\frac{V_{\text{tot}}^{(N)}}{V_{\text{tot}}^{(1)}} = \frac{(1 + aN^2)^\beta}{N^\gamma (1 + a)^\beta}$$

Identifier a, β, γ. On fixe  $k_{\text{bat}}=2/9$ , calculer les valeurs de cette fonction pour  $1 \leq N \leq 5$ , pour quelle valeur de N le rapport des volumes d'inductance est-il le plus favorable ?

D.10. Quelles sont les contradictions qui apparaissent en termes de fonctionnement électrique et de dimensionnement volumique lorsque l'on accroît N.

*Une solution au problème précédemment évoqué consiste à coupler entre elles les inductances, ce principe est étudié dans la suite.*

### Modélisation d'un coupleur

On adopte les conventions suivantes pour représenter un composant magnétique constitué par deux circuits couplés. Les nombres de spires sont identiques au primaire et au secondaire.

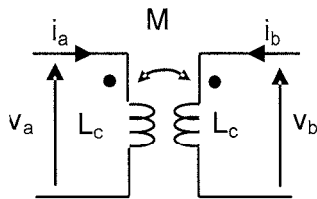


Figure D.3 : coupleur

Equations du coupleur (avec les conventions définies fig. D-3) :

$$v_a = pL_c i_a + pM i_b$$

$$v_b = pM i_a + pL_c i_b$$

D.11. Le coupleur est utilisé dans la configuration représentée à la figure D-4. Montrer qu'il peut être modélisé par le circuit constitué par des inductances indépendantes  $L_1$ ,  $L_2$  et  $L_3$ . Exprimer  $L_1$ ,  $L_2$  et  $L_3$  en fonction de  $L$  et  $M$ .

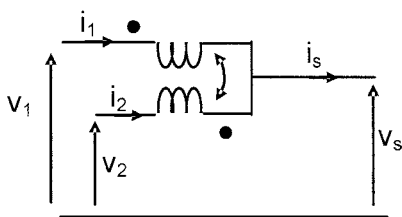


Figure D.4

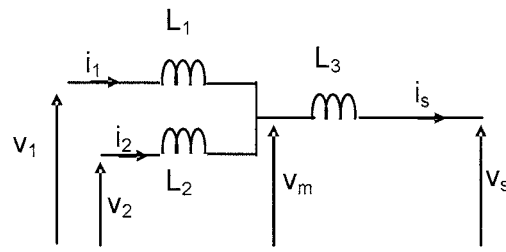


Figure D.5

On a schématisé un coupleur à la figure D.6, il est constitué d'un circuit magnétique en « E » dont la jambe centrale est pourvue d'un entrefer, les bobinages ont n spires sur chaque jambe latérale.

On définit la tension de mode commun par :

$$v_o = \frac{v_1 + v_2}{2},$$

et la tension de mode différentiel par :

$$v_d = \frac{v_1 - v_2}{2}.$$



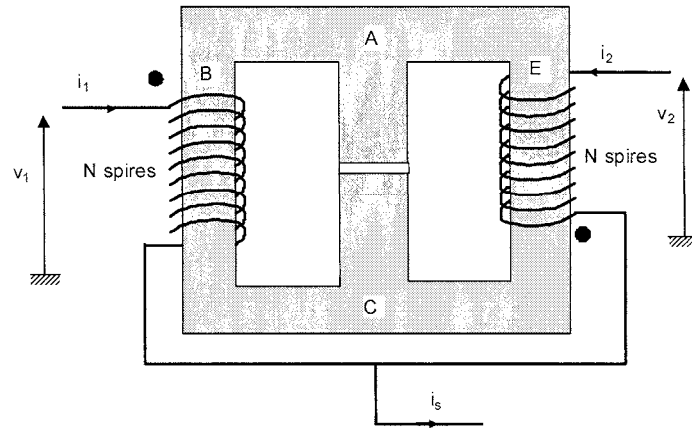


Figure D.6 : schéma du coupleur

D.12. On appelle  $\mathfrak{R}_1$  la réductance du circuit magnétique entre les points ABC,  $\mathfrak{R}_2$  celle entre les points AEC et  $\mathfrak{R}_3$  celle entre les points AC. Quelle est la relation entre  $\mathfrak{R}_1$  et  $\mathfrak{R}_2$  ?

D.13. Représenter sur le document réponse D-2 le trajet des lignes d'induction selon que le coupleur est alimenté seulement par la tension de mode commun  $v_0$  ou de mode différentiel  $v_d$ . Etablir le schéma équivalent électrique de ce circuit magnétique dans chaque cas d'alimentation, exprimer  $L_c$  et  $M$  en fonction de  $\mathfrak{R}_1$ ,  $\mathfrak{R}_3$  et  $n$ .

### Structure entrelacée par coupleurs

Pour exploiter au mieux le découplage existant entre les modes commun et différentiel, on applique à présent ce principe sur une structure entrelacée à 3 voies, selon le montage représenté à la figure D.7. Tous les coupleurs sont identiques et définis par leurs inductances  $L_c$  et  $M$ .

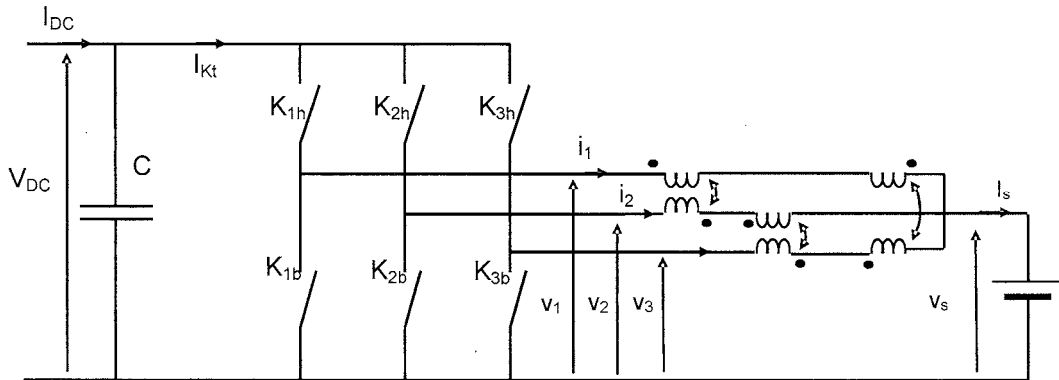


Figure D.7 : structure entrelacée à 3 coupleurs

D.14. Etablir les équations électriques du système de coupleurs liant  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $v_3$ ,  $v_s$ ,  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_3$ ,  $L_c$  et  $M$ .

D.15. Montrer que la tension  $v_s$  peut s'exprimer sous la forme :  $v_s = v_0 - Zi_s$ .  $v_0$  est la tension de mode commun de la structure.

Identifier  $v_0$  en fonction de  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $v_3$  et  $Z$  en fonction de  $L_c$  et  $M$ . Donner la fréquence de  $v_0$  et sa valeur moyenne en fonction de  $\alpha_{1h}$ .

D.16. En déduire l'expression de l'ondulation maximale du courant  $\Delta i_{sM}$  en fonction de  $V_{DC}$ ,  $F_d$ ,  $L_c$  et  $M$ . Quelle est la fréquence de cette ondulation ?

D.17. Montrer que le courant  $i_k$  en sortie de chaque cellule de commutation s'écrit sous la forme suivante, on exprimera en particulier le courant  $i_1$  :

$$i_1 = \frac{i_s}{3} + \frac{v_{md1}}{Z_d}$$

Identifier  $Z_d$  en fonction de  $L_c$  et  $M$  et  $v_{md1}$  en fonction de  $v_1$ ,  $v_2$  et  $v_3$ .

D.18. Exprimer de la même façon qu'aux questions D.14 et D.15 la tension  $v_s$  et l'ondulation  $\Delta i_{sM}$  pour la structure entrelacée à 3 inductances (non couplées). Etablir la relation entre  $L$ ,  $L_c$  et  $M$  pour que l'ondulation  $\Delta i_{sM}$  soit conservée entre les deux cas.

### Comparaison des structures couplées et non-couplées à trois phases

*Dans des volumes de circuit magnétique sensiblement identiques et avec les contraintes électriques données, on peut soit réaliser deux coupleurs de valeur  $L_c=600 \mu H$ ,  $M=500 \mu H$  soit une inductance de valeur  $L=200 \mu H$  (cas de la question D.5).*

D.19. On donne :  $\alpha_{1h} = 1/2$ ,  $V_{DC}=190 V$ ,  $I_{bat}= 9A$ ,  $F_d= 40 kHz$ . Calculer numériquement  $\Delta i_{s(nc)}$ ,  $\Delta i_{s(c)}$ ,  $\Delta i_{1(nc)}$ . (Les indices  $(nc)$  et  $(c)$  désignent respectivement la structure non-couplée et la structure couplée). Construire les tensions  $v_0$ ,  $v_{md1}$  et le courant  $i_s$  dans le document réponse D.3.

D.20. En utilisant le résultat de la question D.17, construire l'allure du courant  $i_{md1} = \frac{v_{md1}}{Z_d}$  dans le document réponse D.3, on donne  $\Delta i_{d(c)}=0,62 A$ . Compléter alors la construction du courant  $i_{1(c)}$  dans le document réponse D.3. Donner la valeur approchée de  $\Delta i_{1(c)}$ . Au vu des tracés, quel est l'intérêt de la structure couplée par rapport à la structure non couplée ?

NE RIEN ÉCRIRE DANS CE CADRE

MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE

Académie : \_\_\_\_\_ Session : \_\_\_\_\_

Concours : \_\_\_\_\_

Spécialité/option : \_\_\_\_\_ Repère de l'épreuve : \_\_\_\_\_

Intitulé de l'épreuve : \_\_\_\_\_

NOM : \_\_\_\_\_

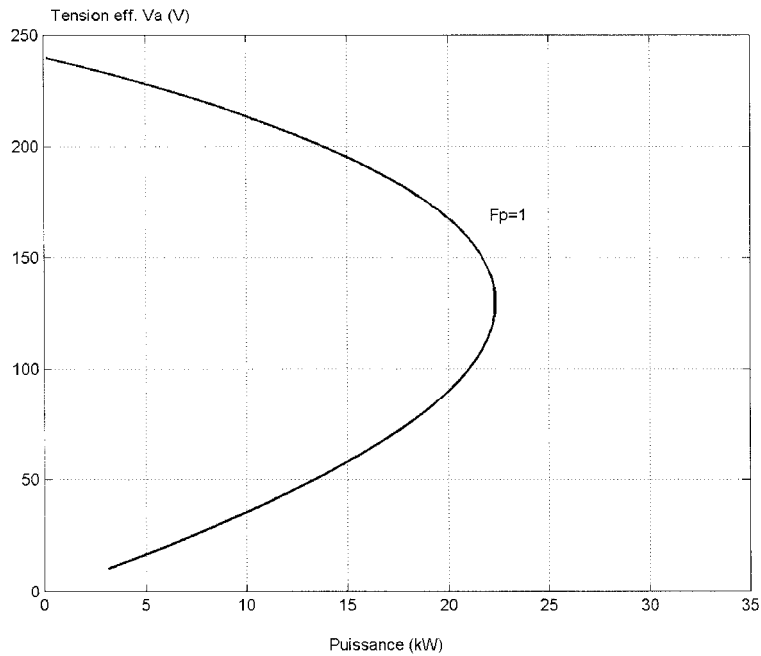
Prénoms : \_\_\_\_\_ N° du candidat

(le numéro est celui qui figure sur la convocation ou la liste d'appel)

AE3-6

Epreuve d'électrotechnique

**Document réponse A.1**  
Questions A.7. et A.8.



Tension efficace en extrémité de ligne  $V_a$  en fonction de la puissance  $P_a$   
( $\cos(\varphi) = 1$ )

**Document réponse A.2**  
Question A.9.

$F_p$	0,5 ar	0,886 ar	1
$V_{amax}$			
$P_{amax}$			

NE RIEN ÉCRIRE DANS CE CADRE

MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE

Académie : \_\_\_\_\_ Session : \_\_\_\_\_

Concours : \_\_\_\_\_

Spécialité/option : \_\_\_\_\_ Repère de l'épreuve : \_\_\_\_\_

Intitulé de l'épreuve : \_\_\_\_\_

NOM : \_\_\_\_\_

(en majuscules, suivi s'il y a lieu, du nom d'épouse)

Prénoms : \_\_\_\_\_ N° du candidat

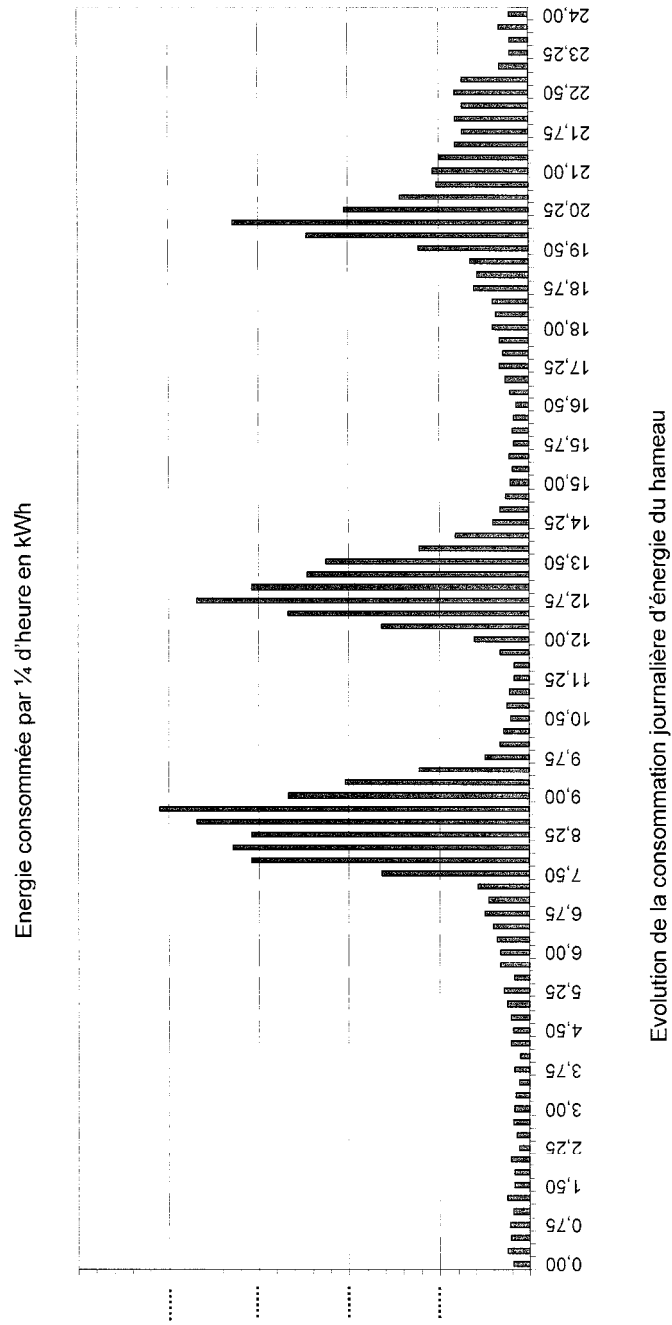
(le numéro est celui qui figure sur la convocation ou la liste d'appel)

AE3-6

Epreuve d'électrotechnique

Document réponse B.1

Questions B.3. et B.13.



**MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE**

Académie : \_\_\_\_\_ Session : \_\_\_\_\_

Concours : \_\_\_\_\_

Spécialité/option : \_\_\_\_\_ Repère de l'épreuve : \_\_\_\_\_

Intitulé de l'épreuve : \_\_\_\_\_

NOM : \_\_\_\_\_

(en majuscules, suivi s'il y a lieu, du nom d'épouse)

Prénoms : \_\_\_\_\_ N° du candidat

(le numéro est celui qui figure sur la convocation ou la liste d'appel)

AE3-6

Epreuve d'électrotechnique

**Document réponse B.2**

Question B.10.

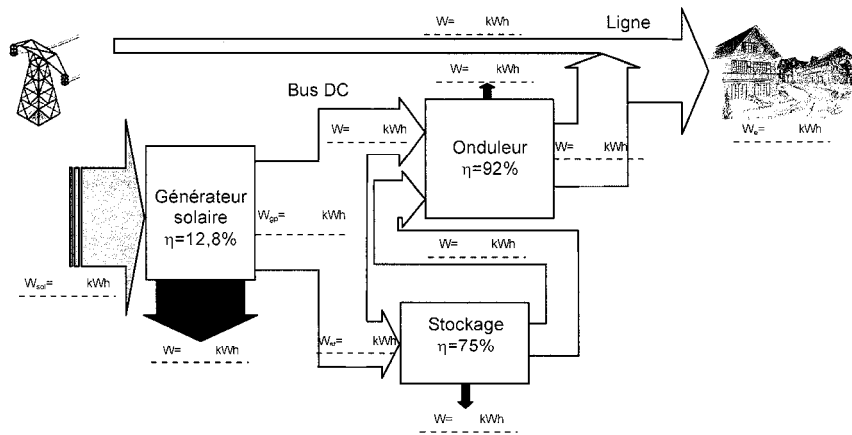
$$\text{pour } i = 1 \dots 12, \begin{cases} \Psi_{ji} = f_i & \text{si } f_i > 0 \\ \Psi_{ji} = 0 & \text{si } f_i < 0 \end{cases} \text{ avec } f_i = A_i \cos\left(\frac{\pi(h-h_0)}{D_i}\right)$$

	été											
i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>A<sub>i</sub> (W/m<sup>2</sup>)</b>												
<b>D<sub>i</sub> (heures)</b>												
<b>h<sub>0</sub> (heures)</b>												

Irradiance journalière pour les différents mois de l'année

**Document réponse B.3**

Question B.19.



Bilan énergétique sur une journée d'été (en kWh)

NE RIEN ÉCRIRE DANS CE CADRE

MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE

Académie : \_\_\_\_\_ Session : \_\_\_\_\_

Concours : \_\_\_\_\_

Spécialité/option : \_\_\_\_\_ Repère de l'épreuve : \_\_\_\_\_

Intitulé de l'épreuve : \_\_\_\_\_

NOM : \_\_\_\_\_

*(en majuscules, suivi s'il y a lieu, du nom d'épouse)*

Prénoms : \_\_\_\_\_ N° du candidat

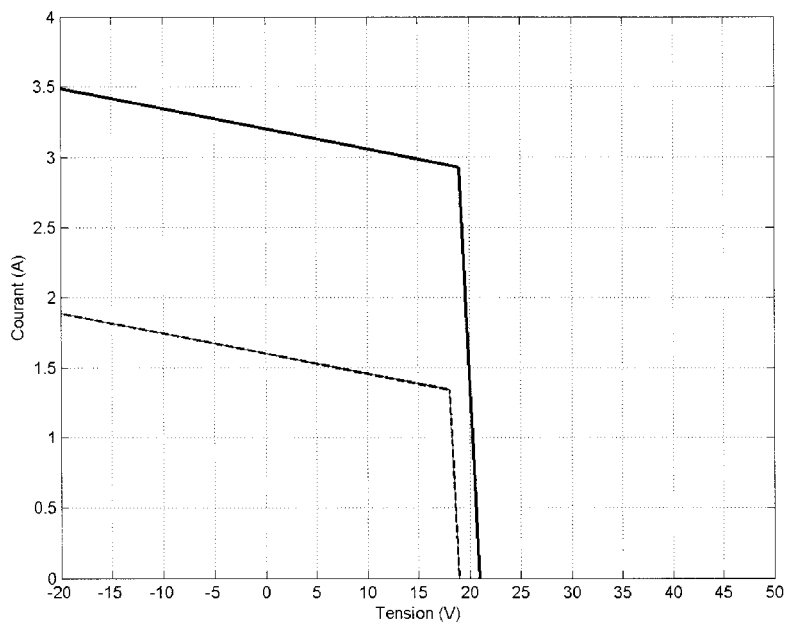
*(le numéro est celui qui figure sur la convocation ou la liste d'appel)*

AE3-6

Epreuve d'électrotechnique

Document réponse C.1

Question C.2



NE RIEN ÉCRIRE DANS CE CADRE

MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE

Académie : \_\_\_\_\_ Session : \_\_\_\_\_

Concours : \_\_\_\_\_

Spécialité/option : \_\_\_\_\_ Repère de l'épreuve : \_\_\_\_\_

Intitulé de l'épreuve : \_\_\_\_\_

NOM : \_\_\_\_\_

(en majuscules, suivi s'il y a lieu, du nom d'épouse)

Prénoms : \_\_\_\_\_ N° du candidat

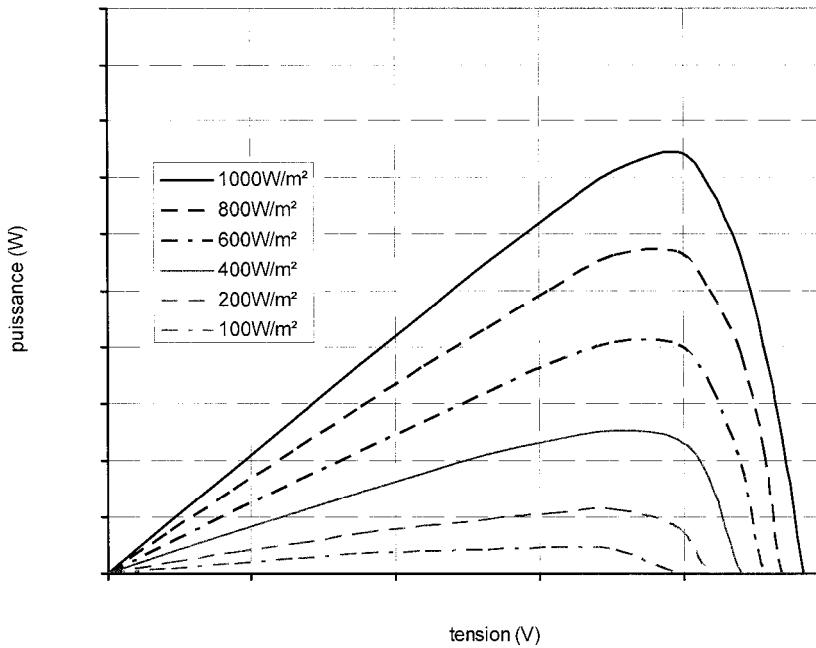
(le numéro est celui qui figure sur la convocation ou la liste d'appel)

AE3-6

Epreuve d'électrotechnique

Document réponse C.2

Questions C.9 et C.20



Document réponse C.3

Question C.23

	$V_{DC}$ (V)	$\beta$	$P_{ond}$ (W)	$V_{ond}$ (V)	$I_{ond}$ (A)
400 W/m <sup>2</sup>					
1000 W/m <sup>2</sup>					

G

NE RIEN ÉCRIRE DANS CE CADRE

MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE

Académie : \_\_\_\_\_ Session : \_\_\_\_\_

Concours : \_\_\_\_\_

Spécialité/option : \_\_\_\_\_ Repère de l'épreuve : \_\_\_\_\_

Intitulé de l'épreuve : \_\_\_\_\_

NOM : \_\_\_\_\_

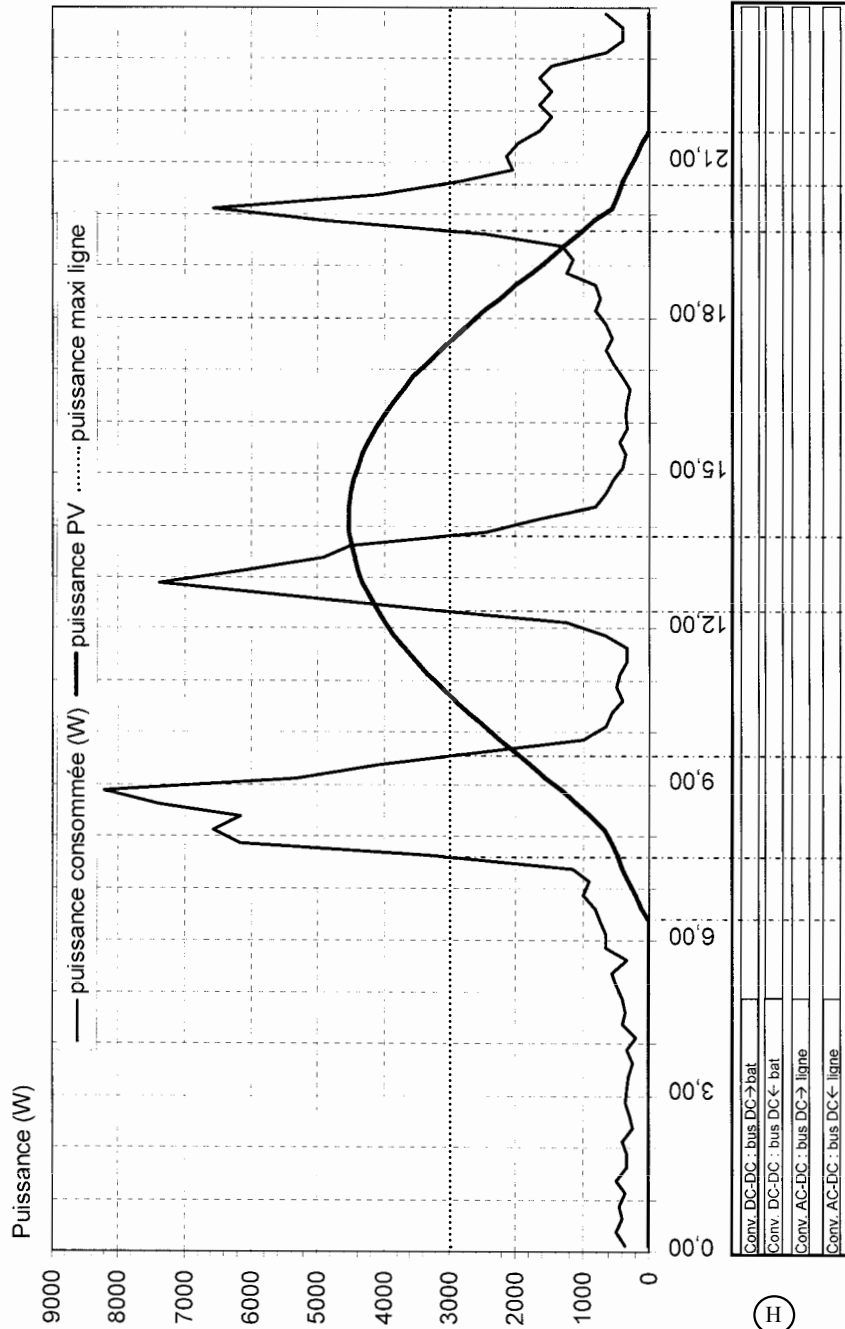
Prénoms : \_\_\_\_\_ N° du candidat \_\_\_\_\_

(le numéro est celui qui figure sur la convocation ou la liste d'appel)

AE3-6

Epreuve d'électrotechnique

Document réponse C.4 (question C.24)



(H)

Documents réponse Page N°6



NE RIEN ÉCRIRE DANS CE CADRE

MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE

Académie : \_\_\_\_\_ Session : \_\_\_\_\_

Concours : \_\_\_\_\_

Spécialité/option : \_\_\_\_\_ Repère de l'épreuve : \_\_\_\_\_

Intitulé de l'épreuve : \_\_\_\_\_

NOM : \_\_\_\_\_

(en majuscules, suivi s'il y a lieu, du nom d'épouse)

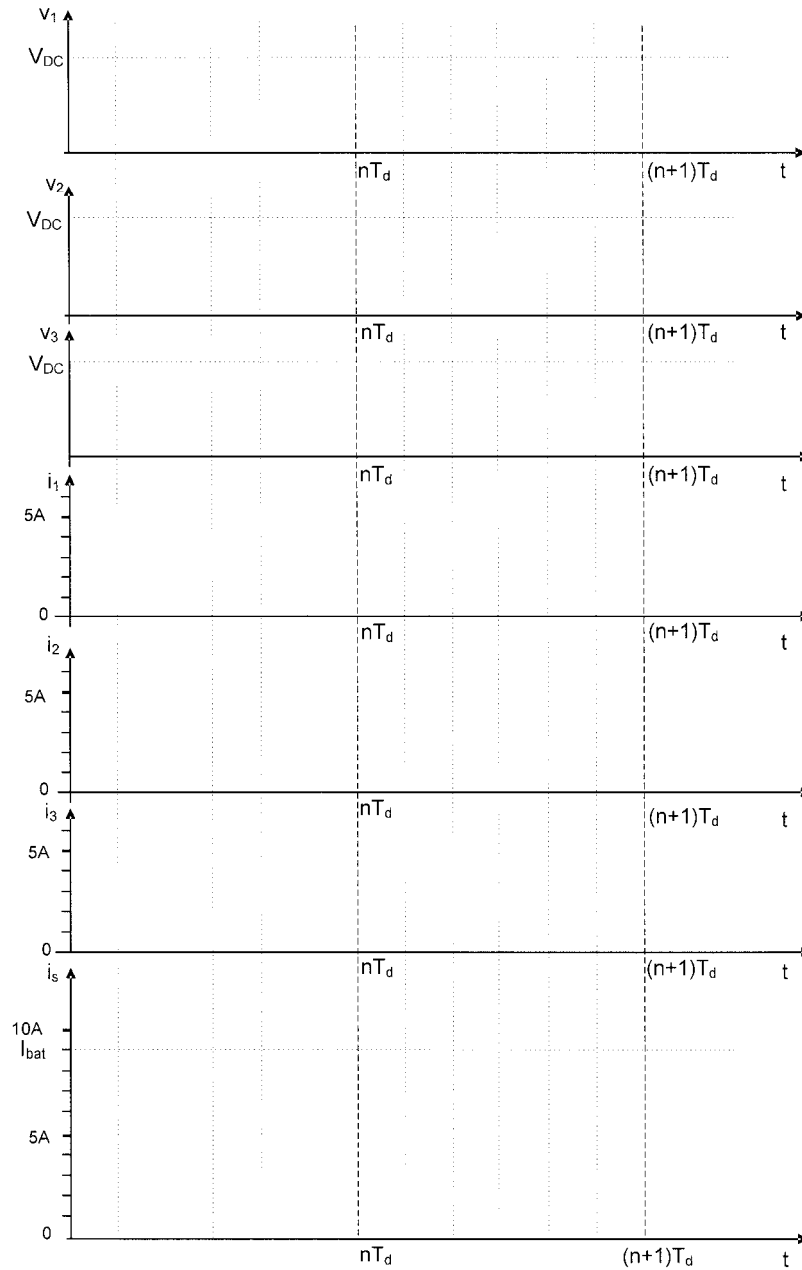
Prénoms : \_\_\_\_\_ N° du candidat

(le numéro est celui qui figure sur la convocation ou la liste d'appel)

AE3-6

Epreuve d'électrotechnique

Document réponse D.1,  
Question D.5



NE RIEN ÉCRIRE DANS CE CADRE

MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE

Académie : \_\_\_\_\_ Session : \_\_\_\_\_

Concours : \_\_\_\_\_

Spécialité/option : \_\_\_\_\_ Repère de l'épreuve : \_\_\_\_\_

Intitulé de l'épreuve : \_\_\_\_\_

NOM : \_\_\_\_\_

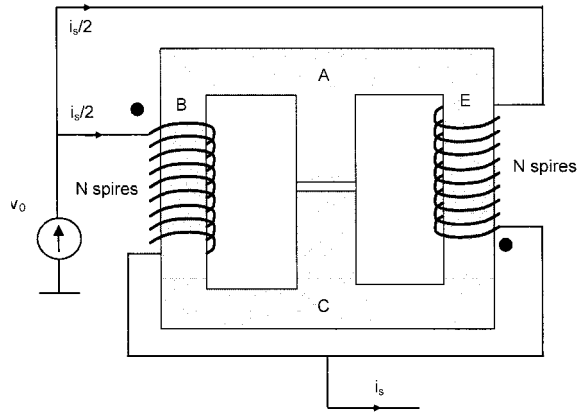
Prénoms : \_\_\_\_\_ N° du candidat

(le numéro est celui qui figure sur la convocation ou la liste d'appel)

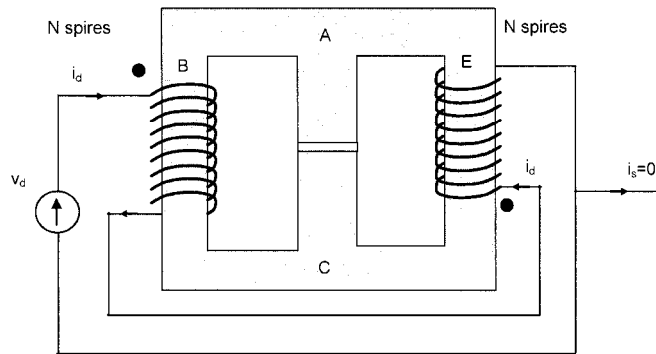
AE3-6

Epreuve d'électrotechnique

Document réponse D.2,  
Question D.13



Mode commun



Mode différentiel

NE RIEN ÉCRIRE DANS CE CADRE

MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE

Académie : \_\_\_\_\_ Session : \_\_\_\_\_

Concours : \_\_\_\_\_

Spécialité/option : \_\_\_\_\_ Repère de l'épreuve : \_\_\_\_\_

Intitulé de l'épreuve : \_\_\_\_\_

NOM : \_\_\_\_\_

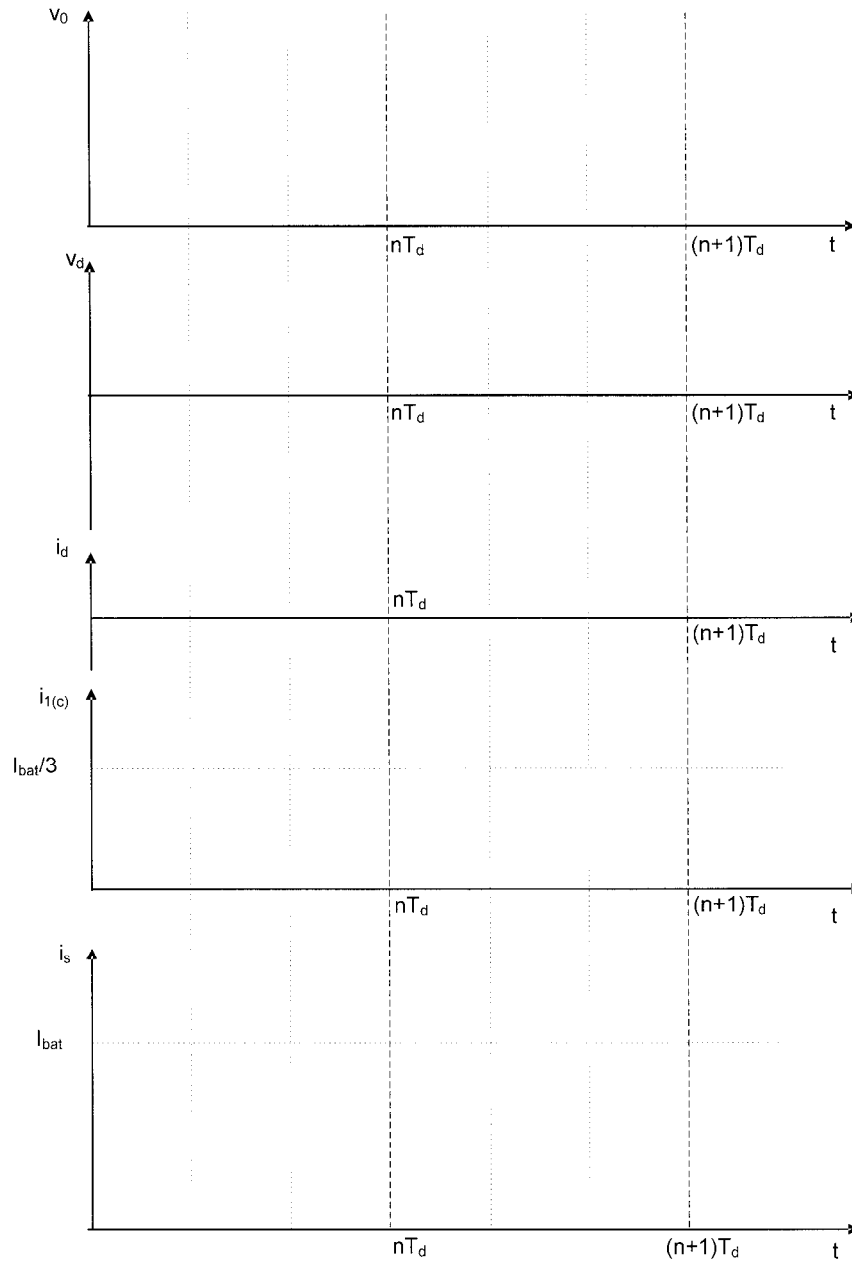
Prénoms : \_\_\_\_\_ N° du candidat

(en majuscules, suivi s'il y a lieu, du nom d'épouse)  
(le numéro est celui qui figure sur la convocation ou la liste d'appel)

AE3-6

Epreuve d'électrotechnique

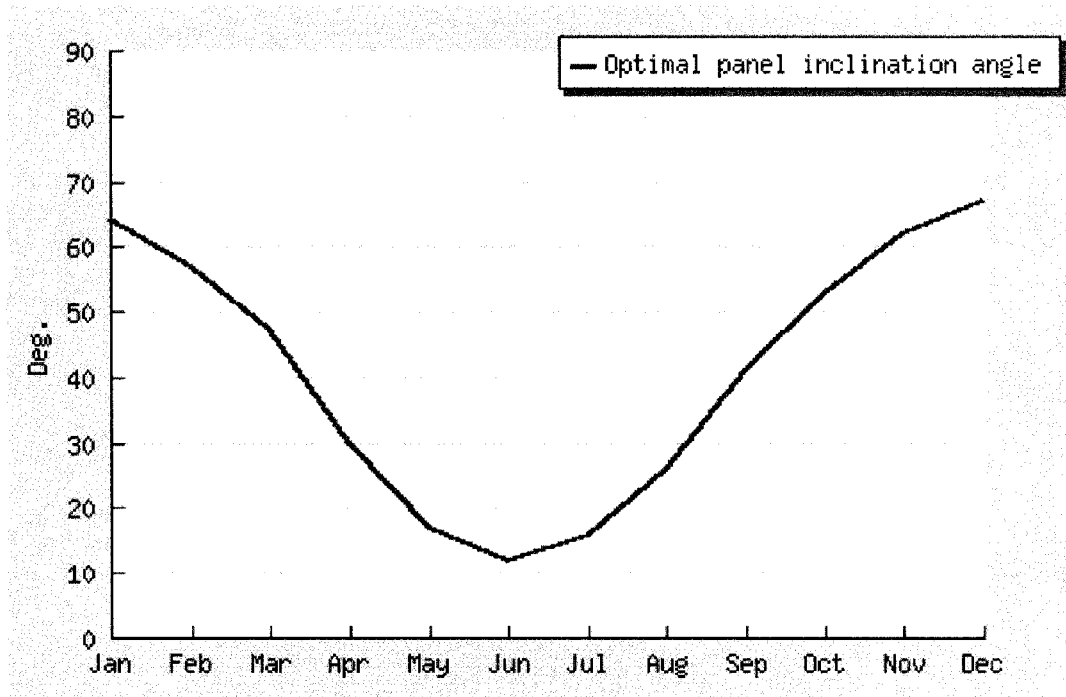
Document réponse D.3,  
Questions D.19, D.20





## Annexe 2

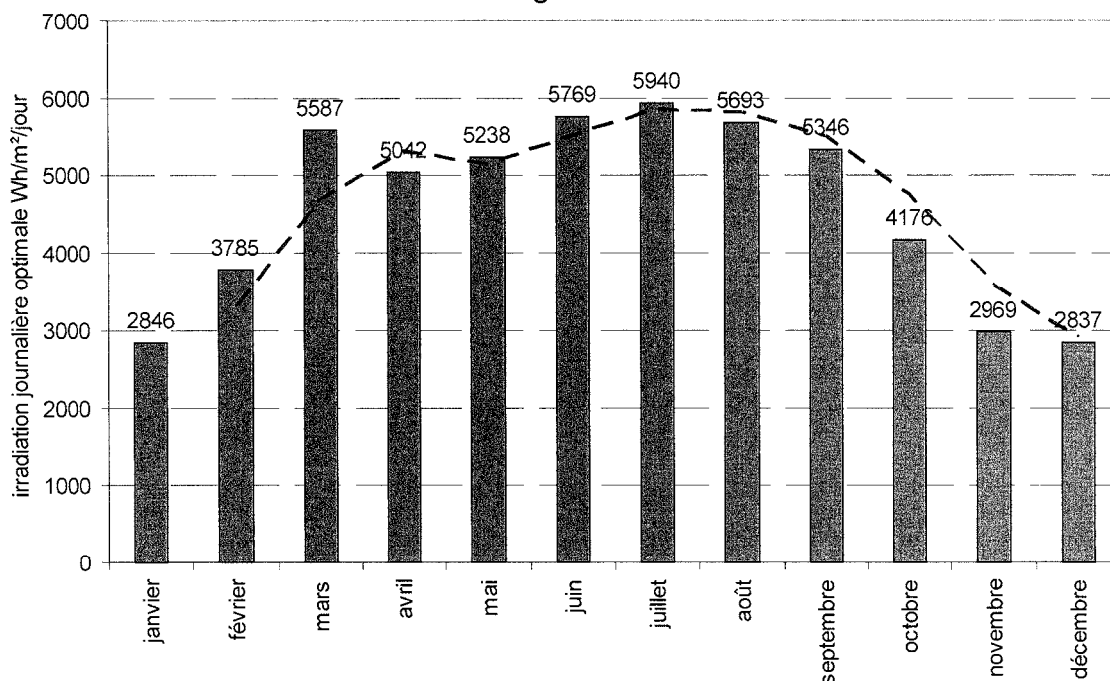
Relevés de caractérisation du gisement solaire au lieu considéré



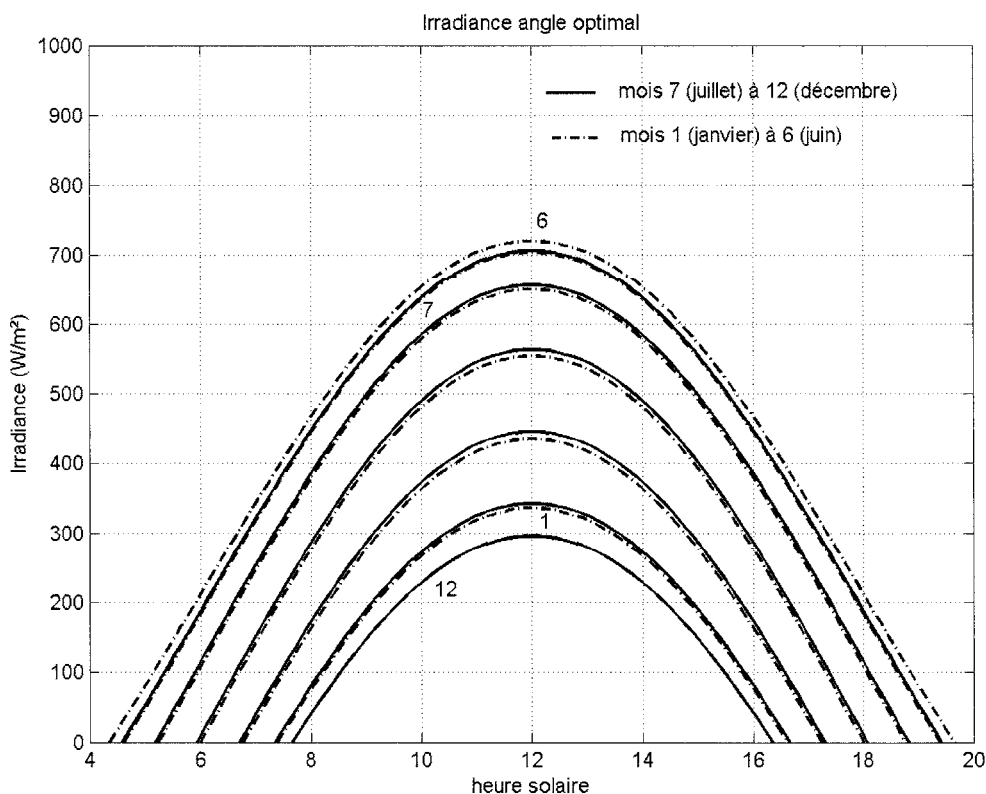
Angle d'inclinaison optimal pour la maximisation d'irradiance (données expérimentales)

### Annexe 3

Relevés de caractérisation du gisement solaire au lieu considéré



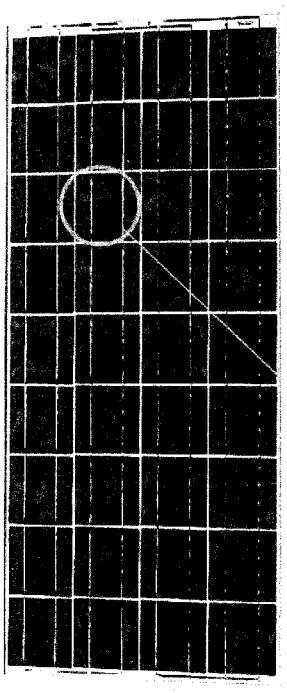
**Annexe 3a :** Irradiation journalière optimale tenant compte de la transparence de l'atmosphère (angle d'inclinaison optimisé chaque mois) en Wh/m<sup>2</sup> (données expérimentales)



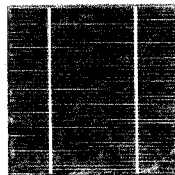
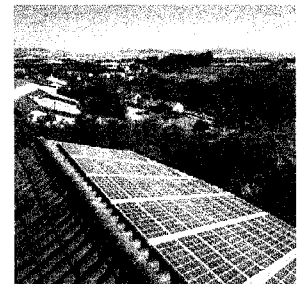
**Annexe 3b :** Evolution de l'irradiance journalière en fonction des mois de l'année (d'après modèle de calcul astronomique au 21 juin de chaque mois en temps universel, en supposant une atmosphère claire)  
 (Janvier à juin en tirets, juillet à décembre en trait plein)



# PW850-12V GRANDE PUISSANCE MODULE PHOTOVOLTAÏQUE - JBox

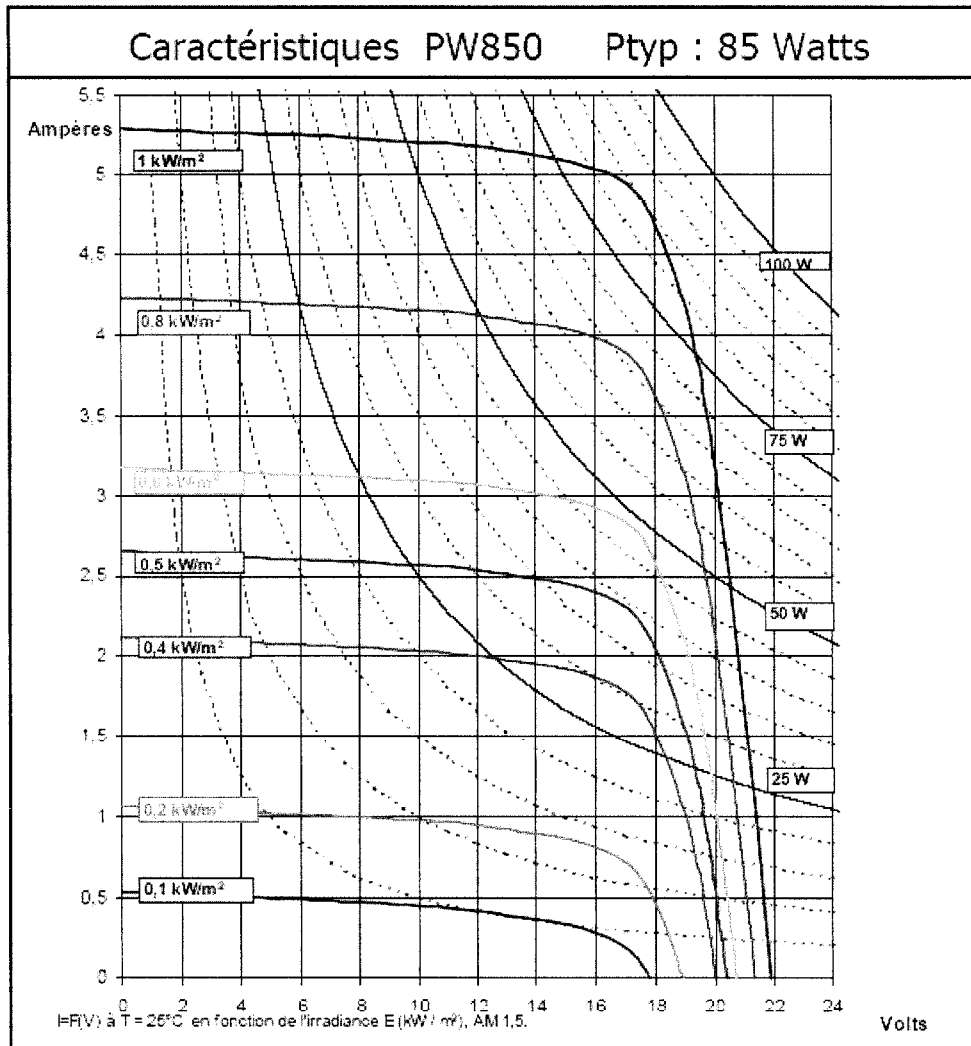


- Télécommunications
- Protection cathodique
- Pompage
- Signalétique
- Electrification rurale
- Résidences privées
- Intégration bâtiments
- Raccordement réseau



Le PW850 est fabriqué à partir de 4 X 9 cellules polycristallines 5 pouces (125,50 mm X 125, 50mm) à haut rendement (jusqu'à 15%), avec une couche anti-reflet en nitrure de silicium.

PW 850		Configuration 12 V		
Puissance typique	W	75	80	85
Puissance minimale	W	70,1	75,1	80,1
Tension à la puissance typique	V	17	17,3	17,6
Intensité à la puissance typique	A	4,4	4,6	4,8
Intensité de court circuit	A	4,7	5	5,2
Tension en circuit ouvert	V	21,5	21,6	21,6
Tension maximum du circuit	V	600V DC		
Coefficient de température		$\alpha = +1,46 \text{ mA}/^\circ\text{C}$ ; $\beta = -79 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ ; $\gamma \text{ P/P} = -0,43 \text{ \%}/^\circ\text{C}$		
Spécifications de puissance à 1000 W/m <sup>2</sup> : 25°C : AM 1,5				

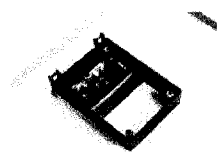


➔ Poids du Module : 7,8 kg

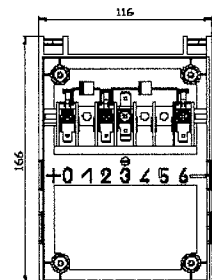
➔ Taille du Module :  
1237 mm X 556 mm X 45 mm

➔ Emballage par 2 unités  
1280 mm x 600 mm x 70 mm, 18,5 kg

➔ Taille maximum d'une palette (24 modules)  
1400 mm x 1000 mm x 740 mm, 232 kg



Boîte universelle de  
raccordement permettant  
une section de câble de  
1,5 mm<sup>2</sup> à 4 mm<sup>2</sup>  
(AWG11 à AWG16)



Module protégé par 2 diodes  
anti-retour (1 pour 18 cellules)



## Annexe 5



**Classic**™

La gamme CLASSIC OPzS Solar a depuis des dizaines d'années prouvé ses qualités pour de larges besoins en énergie.

Ces batteries sont à faible entretien et à électrolyte libre. Grâce à leur robustesse, leur longue durée de vie et leur extrême sécurité, elles sont parfaitement adaptées pour l'utilisation dans les centrales à énergie solaire et éolienne, les télécommunications, la distribution d'énergie, les applications ferroviaires ainsi que beaucoup d'autres équipements de sécurité.



Plaques tubulaires



Capacité nominale : 70 à 4600 Ah



Monobloc



Élément



4000 cycles à 20 % de C<sub>120</sub>



Faible entretien



Recyclable

- Plaques positives tubulaires
- Bac translucide pour remplissage
- Connexions vissées pour un meilleur contact et une plus grande fiabilité

Type	Codification	Tension nominale V	Capacité C <sub>120</sub> 1,85 V/elt 25°C Ah	Longueur (L) max. mm	Largeur (l) max. mm	Hauteur* (h) max. mm	Longueur ins-tallée (L/l) mm	Poids acide inclus approx. kg	Poids acide** approx. kg	Résistance interne mΩ	Courant de court-circuit A	Bornes de sortie	Nombre de sorties	Capacités en Ah (C <sub>6</sub> - C <sub>240</sub> à 25° C)									
														C <sub>6</sub> 1,75 V/C	C <sub>10</sub> 1,80 V/C	C <sub>12</sub> 1,80 V/C	C <sub>24</sub> 1,80 V/C	C <sub>48</sub> 1,80 V/C	C <sub>72</sub> 1,80 V/C	C <sub>100</sub> 1,85 V/C	C <sub>120</sub> 1,85 V/C	C <sub>240</sub> 1,85 V/C	
<b>Bloc</b>																							
OPzS Solar 70	NVSL120070WC0FA	12	70	275	208	385	285	35,0	15,0	18,18	688	F-M8	1	55,0	51,5	63,7	69,4	78,4	79,8	83,2	82,7	92,9	
OPzS Solar 140	NVSL120140WC0FA	12	140	275	208	385	295	45,0	14,0	9,26	1314	F-M8	1	95,4	103,0	108,2	118,7	141,6	137,8	144,0	139,9	162,3	
OPzS Solar 210	NVSL120210WC0FA	12	210	383	208	385	393	64,0	19,0	6,46	1884	F-M8	1	131,4	154,5	150,7	167,0	187,5	196,2	204,5	208,3	234,1	
OPzS Solar 280	NVSL060280WC0FA	6	280	275	208	385	285	41,0	13,0	2,68	2283	F-M8	1	203,4	206,0	229,3	250,8	296,2	289,2	301,8	294,0	338,3	
OPzS Solar 350	NVSL060350WC0FA	6	350	383	208	385	393	56,0	20,0	2,39	2800	F-M8	1	245,5	257,5	284,0	311,5	374,2	361,2	377,5	364,1	424,5	
OPzS Solar 420	NVSL060420WC0FA	6	420	383	208	385	393	63,0	20,0	1,96	3106	F-M8	1	284,3	309,0	322,9	354,6	420,8	410,8	429,4	417,7	482,9	
<b>Élément</b>																							
OPzS Solar 190	NVSL020190WC0FA	2	190	105	208	405	115	13,7	5,2	1,45	1400	F-M8	1	122	132	134	145	165	175	185	190	200	
OPzS Solar 245	NVSL020245WC0FA	2	245	105	208	405	115	15,2	5,0	1,05	1950	F-M8	1	159	173	176	190	215	230	240	245	260	
OPzS Solar 305	NVSL020305WC0FA	2	305	105	208	405	115	16,6	4,6	0,83	2450	F-M8	1	203	220	224	240	270	295	300	305	320	
OPzS Solar 380	NVSL020380WC0FA	2	380	126	208	405	136	20,0	5,8	0,72	2850	F-M8	1	250	273	277	300	330	350	370	380	400	
OPzS Solar 450	NVSL020450WC0FA	2	450	147	208	405	157	23,3	6,9	0,63	3250	F-M8	1	296	325	330	355	395	420	440	450	470	
OPzS Solar 550	NVSL020550WC0FA	2	550	126	208	520	136	26,7	8,1	0,63	3250	F-M8	1	353	391	398	430	480	515	540	550	580	
OPzS Solar 660	NVSL020660WC0FA	2	660	147	208	520	157	31,0	9,3	0,56	3650	F-M8	1	422	469	477	515	575	615	645	660	695	
OPzS Solar 765	NVSL020765WC0FA	2	765	168	208	520	178	35,4	10,8	0,50	4100	F-M8	1	492	546	555	600	670	710	750	765	805	
OPzS Solar 965	NVSL020965WC0FA	2	965	147	208	695	157	43,9	13,0	0,47	4350	F-M8	1	608	700	710	770	860	920	970	985	1035	
OPzS Solar 1080	NVSL021080WC0FA	2	1080	147	208	695	157	47,2	12,8	0,43	4800	F-M8	1	669	773	784	845	940	1000	1055	1080	1100	
OPzS Solar 1320	NVSL021320WC0FA	2	1320	215	193	695	225	59,9	17,1	0,30	6800	F-M8	2	820	937	950	1030	1150	1230	1295	1320	1385	
OPzS Solar 1410	NVSL021410WC0FA	2	1410	215	193	695	225	63,4	16,8	0,27	7500	F-M8	2	888	1009	1024	1105	1225	1305	1380	1410	1440	
OPzS Solar 1650	NVSL021650WC0FA	2	1650	215	235	695	225	73,2	21,7	0,26	7900	F-M8	2	1024	1174	1190	1290	1440	1540	1620	1650	1730	
OPzS Solar 1990	NVSL021990WC0FA	2	1990	215	277	695	225	86,4	26,1	0,23	8900	F-M8	2	1218	1411	1430	1550	1730	1850	1950	1990	2090	
OPzS Solar 2350	NVSL022350WC0FA	2	2350	215	277	845	225	108,0	33,7	0,24	8500	F-M8	2	1573	1751	1770	1910	2090	2200	2300	2350	2470	
OPzS Solar 2500	NVSL022500WC0FA	2	2500	215	277	845	225	114,0	32,7	0,22	9300	F-M8	2	1667	1854	1875	2015	2215	2335	2445	2500	2600	
OPzS Solar 3100	NVSL023100WC0FA	2	3100	215	400	815	225	151,0	50,0	0,16	12800	F-M8	3	2080	2318	2343	2520	2755	2910	3040	3100	3250	
OPzS Solar 3350	NVSL023350WC0FA	2	3350	215	400	815	225	158,0	48,0	0,14	14600	F-M8	3	2268	2524	2550	2740	2985	3135	3280	3350	3520	
OPzS Solar 3850	NVSL023850WC0FA	2	3850	215	490	815	225	184,0	60,0	0,12	17000	F-M8	4	2592	2884	2915	3135	3430	3615	3765	3850	4040	
OPzS Solar 4100	NVSL024100WC0FA	2	4100	215	490	815	225	191,0	58,0	0,11	17800	F-M8	4	2775	3090	3125	3355	3650	3840	4000	4100	4300	
OPzS Solar 4600	NVSL024600WC0FA	2	4600	215	580	815	225	217,0	71,0	0,11	18600	F-M8	4	3099	3451	3490	3765	4100	4300	4500	4600	4850	

\* La hauteur indiquée peut varier en fonction des bouchons utilisés.

\*\* Densité nominale acide 1,24 kg/l.

**EXIDE**  
TECHNOLOGIES