

### TD-1

#### **a) Rappel : Systèmes d'unités et analyse dimensionnelle**

Les formules mathématiques utilisées en Astronomie définissent des relations entre grandeurs physiques. Ces grandeurs ont une dimension physique, et sont mesurées dans une certaine unité. La valeur de la grandeur physique, est fonction de l'unité utilisée.

On distingue sept types de grandeurs physiques, ou dimensions, indépendantes. Toute quantité physique peut s'exprimer comme combinaison de ces grandeurs de base. Le système officiel en vigueur est le SI (Système International d'unités) ou MKSA, qui définit les unités

**Table 1**

Grandeur de base	Dimension	Unité S. I.	Symbole S. I.
Longueur	L	mètre	m
Masse	M	kilogramme	kg
Temps	T	seconde	s
Intensité de courant	I	Ampère	A
Température	$\Theta$	Kelvin	K
Quantité de matière	N	mole	mol
Intensité lumineuse	J	candela	cd

de mesure des sept grandeurs. Deux autres grandeurs sont utilisées en complément de celles-ci. Elles sont dépourvues de dimension physique (elles peuvent être comprises comme des rapports de longueurs ou de surfaces), mais peuvent s'exprimer dans différentes échelles.

En pratique, on préfère l'échelle qui n'introduit pas de coefficient dans les fonctions trigonométriques (en radians, par opposition aux degrés pour les angles plats).

**Table 2**

Grandeur dérivée	Dimension	Unité S. I.	Symbole S. I.
Angle plan	1	radian	rad
Angle solide	1	stéradian	sr

L'**analyse dimensionnelle** est un outil pratique permettant de vérifier l'homogénéité d'une formule physique à travers ses **équations aux dimensions**. C'est également un outil théorique, servant à interpréter les problèmes à partir des dimensions des grandeurs physiques mises en jeu, c'est-à-dire de leur nature intrinsèque : longueur, durée, masse, intensité électrique, etc. L'analyse dimensionnelle est à la base des systèmes d'unités naturelles.

### **3. Équations aux dimensions**

Dans une relation entre grandeurs, on remplace chaque terme par la grandeur fondamentale correspondante L pour une longueur, M pour une masse, T pour un temps, I pour une intensité électrique. On obtient ainsi l'équation aux dimensions.

#### **Possibilité de différents systèmes**

Différents systèmes d'unités ont été utilisés au cours de l'histoire, et d'autres systèmes sont en usage dans des domaines particuliers.

Le système international (SI) que vous avez pris l'habitude d'utiliser date de 1960 ; c'était presque hier ! Avant cela, d'autres systèmes ont été élaborés, améliorés pour finir par être abandonnés... mais pas toujours. Il reste encore par exemple des traces d'utilisation du système cgs (centimètre, gramme, seconde) dans certaines disciplines !

**Unités fondamentales de la mécanique** En mécanique, trois unités fondamentales suffisent.

Longtemps, plusieurs systèmes d'unités ont coexisté.

#### **1- Système masse (M), longueur (L), temps (T)**

Le système mètre - tonne - seconde ou MTS a complètement disparu ;

Le système centimètre- gramme- seconde ou CGS n'est plus guère employé ;

Le système mètre - kilogramme - seconde ou MKS qui s'intégrait dans le système international d'unités a été remplacé en 1983.

#### **2- Système force (F), longueur (L), temps (T)**

Le système mètre - kilogramme-force - seconde ou MKfS, abandonné.

### 3- Système masse (M), célérité de la lumière (c), temps (T)

Ce système a été adopté par la Conférence Internationale des Poids et Mesures de 1983 pour remplacer le système MKS et s'intégrer dans le système international d'unités.

-----0-----

#### **b) Exercice**

- 1- Trouver la valeur de 1.eV (un électron volt) dans le SI.
- 2- La loi de Newton d'une force qui s'exerce entre deux masses  $m_1$  et  $m_2$  séparées par une distance  $r$  est donnée en module par  $F = G(m_1.m_2)/r^2$ , déterminer les dimensions de la constante  $G$ .
- 3- La loi de Coulomb d'une force qui s'exerce entre deux charges  $q_1$  et  $q_2$  séparées par une distance  $r$  est donnée en module par  $F = q_1.q_2/(4\pi\epsilon.r^2)$ , déterminer les dimensions de  $\epsilon$ .
- 4- La loi de Laplace d'une force qui s'exerce entre deux courants  $I_1$  et  $I_2$  parallèles, de longueur  $L$  séparées par une distance  $r$  est donnée en module par  $F = \mu.I_1.I_2.L/(2\pi.r)$ , déterminer les dimensions de  $\mu$ .
- 5- Vérifier l'homogénéité de la relation:  $\epsilon.\mu.c^2 = 1$ , où  $c$  est la vitesse de la lumière.
- 6- l'expérience a montré que la force subie par une sphère immergée dans un fluide en mouvement dépend
  - du coefficient de viscosité ( $\eta$ ) du fluide
  - du rayon ( $r$ ) de la sphère
  - de leur vitesse relative ( $v$ ).

Trouver l'expression de cette force en la supposant de la forme :  $F = K.\eta^x.r^y.v^z$

Où  $K$  est un coefficient numérique sans dimension, et  $[\eta] = L^{-1}MT^{-1}$

7- Quelles sont les dimensions

- a) de la quantité d'électricité  $q$  et de la densité superficielle de charge  $\sigma$
- b) du champ électrique  $E$ , ( $F = q.E$ )
- c) du potentiel  $V$  ( $V = E.l$ )
- e) de la résistance électrique  $R$  et de la résistivité  $\rho$  telles que  $R = \rho.L/S$   
L: longueur du fil, et S section du fil.
- f) de la capacité  $C$  ( $Q = C.V$ )
- g) du coefficient de self-induction  $L$  tel que la force électromotrice induite  $e = L.di/dt$
- h) Vérifier que  $\sigma^2/(2.\epsilon_0)$  est homogène à une pression
- i) Vérifier que  $R.C$ ,  $L/R$ , et  $(L.C)^{1/2}$  sont homogènes à un temps.

8- Vérifier l'homogénéité des diverses expressions de l'énergie :

$W = F.L.\cos(\theta)$  (travail de la force  $F$ )

$E_p = m.g.z$  (énergie potentielle de pesanteur à l'altitude  $z$ )

$K = (1/2).m.v^2$  énergie cinétique en mécanique classique

$E = m.c^2 = m.c^2/(1-v^2/c^2)^{1/2}$  énergie totale en mécanique relativiste

$W = (1/2).Q.V = (1/2).C.V^2 = (1/2).Q^2/C$  énergie électrostatique emmagasinée dans un condensateur.

#### **TD-2 : Rappel : Le rayonnement solaire, Irradiation, Irradiance et Coefficient Air-Masse**

En physique, l'**irradiation solaire** est l'exposition d'un corps à un flux de rayonnements en provenance du soleil. En météorologie, l'**insolation** ou ensoleillement désigne la quantité d'énergie reçue du soleil en un lieu.

#### **A- IRRADIATION et IRRADIANCE**

##### **1- Irradiation**

L'IRRADIATION est un cas particulier d'énergie surfacique transmise dans un milieu.

Equation de dimensions :  $M.T^{-2}$  Unité :  $J/m^2$

L'irradiation solaire reçue par une surface dépend de son angle d'orientation.

Ainsi, il convient toujours de préciser l'orientation du panneau solaire lorsqu'on parle d'irradiation reçue. Par exemple dans un lieu où, la valeur moyenne de l'irradiation reçue par une surface perpendiculaire aux rayons du soleil est de 1300 kWh/m<sup>2</sup>/an. Concrètement, cela signifie qu'une plaque plane de surface d'un m<sup>2</sup>, qui suit

la trajectoire du soleil, de façon à être toujours perpendiculaire aux rayons, recevrait une quantité d'énergie radiative de 1300 kWh par an.

**2- Irradiance** L'IRRADIANCE (ou radiance) est une puissance surfacique transmise

Equation de dimensions structurelles :  $M.T^{-3}$  Unité S.I :  $W/m^2$

**3- Relation entre Irradiance et Irradiation**  $IRRADIATION (J/m^2) = IRRADIANCE (W/m^2) \times temps (s)$

### **B- L'éclairement**

L'éclairement représente **une puissance**.

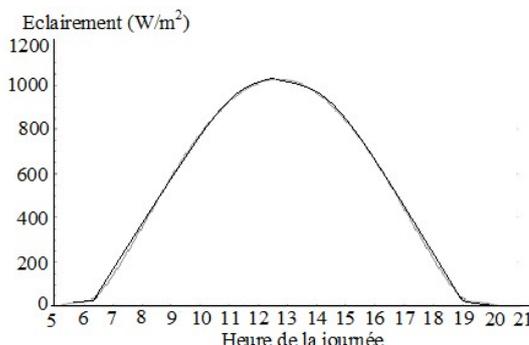
Une puissance est une quantité d'énergie fournie pendant une durée.

Elle s'exprime en W qui est équivalent à J/s (joule par seconde). Le joule est une unité d'énergie tout comme l'unité kWh (1 kWh=3600 kJ). 1 W correspond donc à 1 joule d'énergie fournie pendant 1 seconde.  $P = E/t$  L'éclairement direct provenant du soleil varie de 0 à 1000

$W/m^2$  au cours de la journée,

Concrètement, si une surface d'un  $m^2$  reçoit **1000 W** de puissance radiative pendant 1 heure, alors l'énergie radiative reçue est de 1000 Wh soit 1 kWh.

Ainsi, en ajoutant l'énergie radiative reçue par la surface d'un  $m^2$  tout au long de l'année, on obtient **l'irradiation annuelle moyenne** de l'ordre **1300 kWh/m<sup>2</sup>/an**.



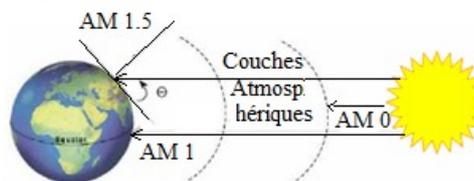
### **C- Le rayonnement solaire Coefficient Air-Masse**

L'intensité lumineuse issue du soleil normalement incidente sur la surface de la Terre est appelée la constante solaire. Cette constante est approximativement d'une valeur de

$1,4 kW/m^2$  au-dessus de la couche atmosphérique et est réduite sur Terre à  $1 kW/m^2$  par réflexion et absorption des particules présentes dans la couche atmosphérique. Cette perte est appelée la masse d'air (AM).

La désignation AM0 correspond à une masse d'air nulle pour la lumière arrivant au-dessus de

notre atmosphère à incidence normale. Le titre AM1 correspond lui à une même lumière arrivant à la surface terrestre. L'appellation AM1.5 désigne la masse d'air rencontrée pour la lumière arrivant à  $48,2^\circ$  sur la surface du Terre, soit une lumière plus faible du fait que l'épaisseur de la couche atmosphérique traversée est plus grande.



Trajet optique de rayonnement optique.

### **D- Définition de la puissance crête Pc (Puissance dans les conditions standard STC)**

#### **a- Conditions STC (Standard Test Conditions)**

Les conditions standards de test définissent la façon dont les modules photovoltaïques sont examinés en laboratoire afin d'en dégager les propriétés électriques. Il s'agit de conditions normalisées qui permettent de comparer des modules entre eux.

Les conditions STC donnent un certain nombre de conditions de tests dont notamment :

- Niveau d'éclairement du module :  $P_i = 1000 W/m^2$
- Température *des cellules* :  $25^\circ C$  et
- Coefficient Air Masse = 1.5

#### **b- Définition de la puissance crête**

La puissance crête d'un module, notée  $P_c$ , se définit alors comme la puissance maximale du module dans les conditions standard (STC). Donc  $P_c = P_{MPP}(STC) = U_{MPP}(STC) \times I_{MPP}(STC)$ .

La puissance crête représente une puissance donc s'exprime en Watt (W).

Cependant, s'agissant d'une puissance un peu particulière, on l'exprime en Watt-Crête ( $W_c$ ).

### **E- Les conditions NOCT**

NOCT est l'abréviation de l'anglais : **N**ormal **O**perating **C**ell **T**empérature, qui signifie en français : température nominale d'utilisation des cellules. En effet, les conditions STC imposent un niveau d'éclairement de  $1000 W/m^2$  et une température de cellule de  $25^\circ C$ . Or, dans la réalité, les cellules des modules ne fonctionnent pas dans ces conditions. Ainsi, la profession a introduit des conditions de test des cellules plus proches de la réalité. Il s'agit des conditions **NOCT** :

- Niveau d'éclairement :  $800 W/m^2$
- Température extérieure :  $20^\circ C$
- Vitesse du vent :  $1 m/s$
- Air Masse :  $AM=1.5$

Il n'y a plus de condition sur la température des cellules mais sur la température de l'air environnant (20°C) et sur la vitesse du vent (1 m/s). Dans ces conditions NOCT, qui sont proches des conditions de fonctionnement des installations photovoltaïques, les cellules constituant les modules photovoltaïques vont chauffer et atteindre une température stationnaire qu'on appelle température nominale d'utilisation des cellules (en anglais : Normal Operating Cell Temperature, NOCT).

### Exemple: Calcul de la tension à vide du module dans les conditions NOCT

D'après la fiche technique, la tension à vide  $V_{co}$  du module dans les conditions STC est de 37 V.

Cette tension est donc la tension à vide lorsque la température des cellules est de 25°C (conditions STC).

Nous savons que lorsque la température augmente, la tension à vide diminue.

Le but de cet exercice est de calculer la tension à vide dans les conditions NOCT, c'est-à-dire pour une température de cellule de 49 °C.

Un coefficient de température  $K_T(V)$  permet de connaître la variation de la tension en fonction de la température. La fiche technique nous donne :  $K_T(V) = -0.356 \text{ \%/}^\circ\text{C}$ ,

$K_T(V)$  est négatif car la tension diminue lorsque la température augmente.

$K_T(V) = -0.356 \text{ \%/}^\circ\text{C} \Rightarrow$  La tension diminue de 0.356 % lorsque la température augmente de 1°C.

**A remarquer que ce pourcentage s'applique à la tension à vide indiquée sur la fiche technique.**

**Calcul:**  $(0.356/100) \times V_{co}$  (conditions STC) =  $(0.356/100) \times 37 \text{ V} = 0.13172 \text{ V}$ .

**On en déduit que la tension diminue de 0.13172 V lorsque la température augmente de 1°C.**

Donc, lorsque la température augmente de 24 °C (différence entre 49°C et 25°C), la tension diminue de

$24 \times 0.13172 = 3.16128 \text{ V}$ . Par conséquent, la tension à vide du module dans les conditions NOCT vaut :

$V_{co}(\text{NOCT}) = (37 - 3.16128) \Rightarrow V_{co}(\text{NOCT}) \approx 33.84 \text{ V}$

### F- Formules de base pour connaître la production d'un panneau ou d'un SPV

#### a) Calcul par le rendement du panneau (ou de la cellule)

$E = S \cdot r \cdot H \cdot C_p$      $E =$  énergie produite(Wh)

$S =$  surface du champ photovoltaïque ( $\text{m}^2$ )     $r =$  rendement du module (14 % par exemple)

$H =$  ensoleillement ou rayonnement sur la surface inclinée (Irradiation ( $\text{kWh}/\text{m}^2$ ))

$C_p =$  coefficient de perte, sa valeur fréquente étant entre 0.75 et 0.8)

*Détail des pertes (varie selon les installations):*

- Pertes onduleurs 8% à 15 %      • Pertes température 5% à 12%
- Pertes câbles et connexion 2%      • Pertes masque 0 % à 50% (dépend de l'implantation)
- Pertes faible éclaircissement 3% à 7%      • Pertes liées à la réflectivité environ 3%

#### b) Méthode de la puissance crête du module et des heures d'ensoleillement :

Un module se caractérise avant tout par sa puissance crête  $P_c$ .

Le module exposé dans les conditions STC va produire à un instant donné une puissance électrique égale à cette puissance crête, et si cela dure ( $N_e$ ) heures, il aura produit une énergie électrique  $E$  égale au produit de la puissance crête par le temps écoulé, au coefficient de pertes près :  $E = P_c \cdot C_p \cdot N_e$

$E =$  énergie produite en Wh     $P_c =$  puissance crête du panneau en kWc

$N_e =$  Nombre d'heures équivalentes d'ensoleillement    Soit : **énergie électrique produite (Wh) =**

**[Nombre d'heures d'exposition aux conditions STC (h)] × [Puissance crête].**

Cependant, le rayonnement n'est pas constant pendant une journée d'ensoleillement, donc on ne peut pas appliquer strictement cette loi. Afin de calculer ce que produit un module photovoltaïque pendant une année d'ensoleillement qui a un certain profil et une énergie solaire intégrée en  $\text{Wh}/\text{m}^2$ , on va assimiler cette énergie solaire au produit du rayonnement instantané  $1000 \text{ W}/\text{m}^2$  par un certain nombre d'heures que l'on appelle : « **Nombre d'heures équivalentes pleine puissance** ». Grâce à la valeur de  $1000 \text{ (W}/\text{m}^2)$ , de ce rayonnement de référence, le nombre d'heures équivalentes se retrouve exactement égal à l'énergie solaire reçue si on l'exprime en  $\text{KWh}/\text{m}^2 \cdot \text{an}$ .  $\Rightarrow E = N_e \text{ (h)} \cdot 1000 \text{ (W}/\text{m}^2)$ .

Soit : **Énergie solaire annuelle ( $\text{Wh}/\text{m}^2/\text{an}$ ) = Nombre d'heures équivalentes ( $\text{h}/\text{an}$ ) × 1000 ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).**

Si par exemple dans un lieu où  $E = 1500 \text{ kWh}/\text{m}^2/\text{an}$ ; on a donc

$N_e = 15 \cdot 10^3 (\text{Wh}/\text{m}^2/\text{an}) / 1000 (\text{W}/\text{m}^2) = 1500 \text{ h}/\text{an} \Rightarrow N_e = 1500 \text{ h}/\text{an}$

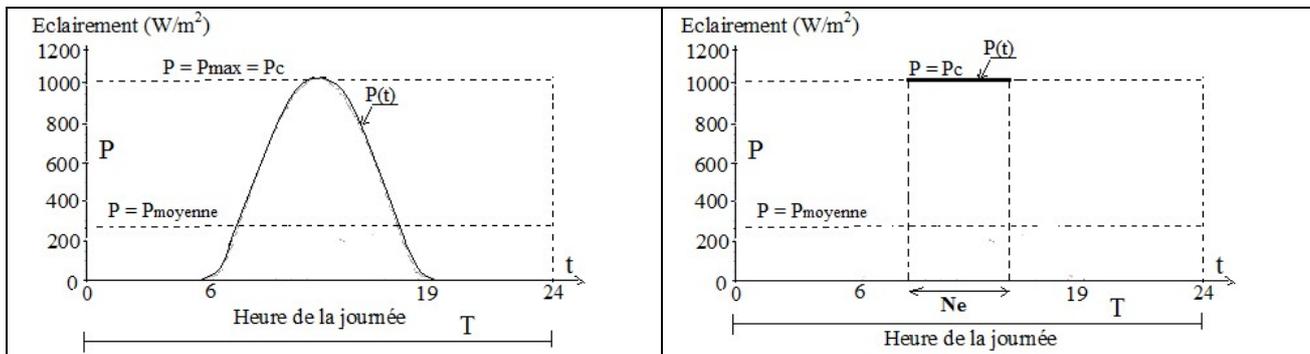
On peut ainsi avoir la production électrique :  $E = 1000 (\text{W}/\text{m}^2) \times 0.75 \times 1500 (\text{h}/\text{an}) =$

$1125 \cdot 10^3 (\text{W}/\text{m}^2) \cdot (\text{h}/\text{an}) = 1125 \cdot (\text{KW} \cdot \text{h}/\text{m}^2)/\text{an}$ . **Simplement :  $E = P_c (\text{KWc}) \cdot N_e \cdot C_p$**

#### **Nombre d'heures équivalentes d'ensoleillement ( $N_e$ ):**

La puissance instantanée  $P(t)$  sur une période de 24 heures (d'une journée donnée) est représentée par la courbe suivante. Sa valeur maximale  $P_{\text{max}}$  est égale à la puissance crête  $P_c$  ;  $P_c = P_{\text{max}}$

La puissance moyenne ( $P_{\text{moyenne}}$ ) sur une période  $T = 24$  heures est



$P_{moyenne} = (1/T) \cdot \int P(t) \cdot dt$  (intégrale de 0 à T). Cette puissance a pour unité ( $W/m^2$ ).

L'énergie moyenne ( $E_{moy}$ ) qui correspond à cette puissance moyenne est  $E_{moy} = P_{moy} \times t$

$E_{moy} = P_{moy} \times T$  (pour une période T) et Si  $T = 24$  heures et  $P_{moy}$  (en  $W/m^2$ )  $\Rightarrow$

$E_{moy} = 24 \cdot P_{moy}$  ( $W \cdot h/m^2$ ) énergie journalière pour une surface de  $1 m^2$ .

Si on utilise la puissance crête  $P_c$  au lieu de la puissance moyenne ( $P_{moy}$ ), pour la même quantité d'énergie moyenne ( $E_{moy}$ ) on aura:  $E_{moy} = 24 \cdot P_{moy}$  ( $W \cdot h/m^2$ ) =  $N_e \cdot P_c$ ,

Avec  $N_e = (24h) \cdot (P_{moy}/P_c)$  un nombre d'heures, appelé nombre d'heures équivalentes.

Par exemple pour  $P_c = 1000$  ( $W/m^2$ ) et  $P_{moy} = 250$  ( $W/m^2$ )  $\Rightarrow N_e = 6$  heures avec une puissance  $P_c$ , au lieu d'un nombre d'heures de 24h avec une puissance  $P_{moyenne}$ .

**Remarque:** Si on connaît la puissance moyenne de jour de l'année, en ajoutant l'énergie radiative reçue par la surface d'un  $m^2$  tout au long de l'année, on obtient l'**irradiation annuelle moyenne** de l'ordre **1300 kWh/m<sup>2</sup>/an**.

$(1300 \text{ kWh/m}^2/\text{an}) = (1300000 \text{ Wh/m}^2/365j) = 3562$  ( $Wh/m^2/j$ ) =  $3562$  ( $Wh/m^2/24h$ ) =  $150 W/m^2 = P_{moyenne}$ .

### TD-3 :

Un panneau solaire a une puissance crête de 100 W lorsqu'il reçoit une puissance lumineuse  $P_L = 1000 W \cdot m^{-2}$ . Il est constitué de cellules photovoltaïques branchées à la fois en série et en dérivation. Dans chaque branche les cellules sont associées en série, et les différentes branches sont montées en dérivation.

La tension aux bornes du panneau vaut 40V et chaque cellule délivre une tension de 0.5V et un courant de 500 mA.

1. Quel est le nombre de cellules dans une branche ?

La tension aux bornes d'une branche est la même que celle aux bornes du panneau, puisqu'elles sont branchées en dérivation.  $V_B = 40$  V.

Dans une branche la loi d'additivité des tensions s'applique et comme elle est constituée de n cellules, on a :  $V_B = n \cdot V_C$  donc  $n = V_B / V_C = 40/0.5 = 80$  cellules.

Une branche est constituée de 80 cellules.

2. Quelle est l'intensité du courant débitée par le panneau ? En déduire le nombre de branches du panneau.

On a  $P = V \cdot I$  donc  $I = P/V = 100/40 = 2.5$  A

Puisque les branches sont en dérivation, elles se rejoignent toutes au même nœud, on peut appliquer la loi des nœuds. On note « m » le nombre de branches et toutes délivrent l'intensité  $I_1$  puisqu'elles sont identiques (unicité de l'intensité dans une branche) :  $I = m \cdot I_1$

Donc  $m = I/I_1 = 5$ . Il y a 5 branches.

3. Déterminer le nombre total de cellules du panneau.

$N' = n \cdot m = 400$  cellules.

Il y a 400 cellules dans ce panneau solaire.

4. Chaque cellule est un carré de 5.0 cm de côté.

a) Quelle est la surface totale du panneau solaire ?

b) Calculer son rendement énergétique.

a) Soit « s » la surface d'une cellule :  $s = a^2 = (5.0 \cdot 10^{-2})^2 = 25 \cdot 10^{-4} = 2.5 \cdot 10^{-3} m^2$ .

La surface totale du panneau est  $S = N' \cdot s = 400 \times 2.5 \cdot 10^{-3} = 1.0 m^2$

b) Rendement :  $\eta = P_c / P_L$  avec  $P_c = 1.00 \cdot 10^2$  W et  $P_L = 1000 \times 1.0 = 1.0 \cdot 10^3$  W

Rendement :  $\eta = P_c / P_L = 10^2 \text{ W} / 10^3 \text{ W} = 0.10$  soit  $\eta = 10\%$ .

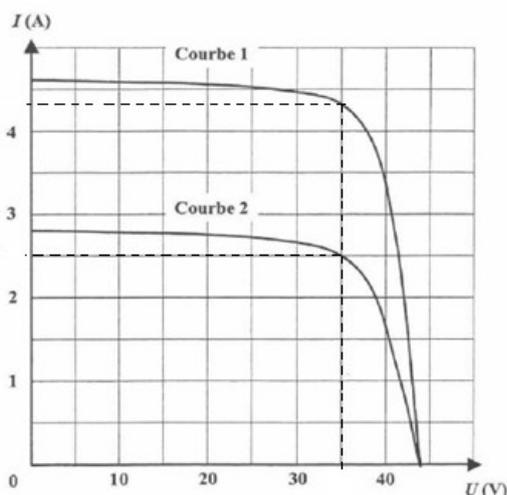
**TD-4 :**

Les caractéristiques I-V d'un panneau solaire, pour deux ensoleillements différents sont représentées sur la figure suivante:

**A-Etude dans le cas d'un ensoleillement optimal (courbe 1):**

- Déterminer la valeur de la tension à vide du panneau :  $V_{co} = 44 \text{ V}$
- Déterminer l'intensité du courant de court-circuit du panneau :  $I_{cc} = 4.6 \text{ A}$
- Déterminer la puissance électrique fournie par le panneau pour une tension de fonctionnement égale à 35 V:  $P_f = 35 \times 4.3 = 150.5 \text{ W}$  (voir la courbe 1 de I(V),  $I = 4.3 \text{ A}$ )
- En déduire l'énergie électrique produite en 10 heures d'ensoleillement

$$W_e = P_f \cdot t = 150,5 \cdot 10 = 1505 \text{ Wh}$$

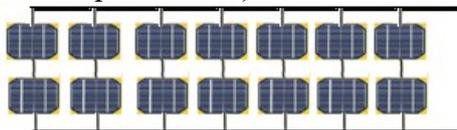
**B- Etude dans le cas d'un ensoleillement plus faible (courbe 2):**

Déterminer la puissance électrique fournie par ce panneau pour une tension de fonctionnement égale à 35 V:  $P_f = 35 \cdot 2.5 = 87.5 \text{ W}$  (voir la courbe 2 de I(V),  $I = 2.5 \text{ A}$ )

C- Pour disposer de puissance suffisante pour alimenter une maison, il faut associer plusieurs panneaux

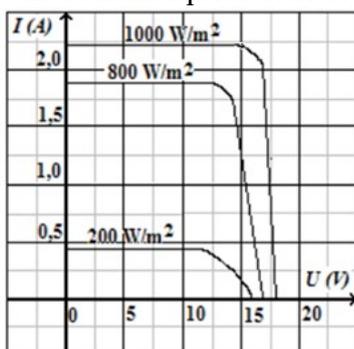
- Quelle est l'intérêt d'une association en série ? : **Permet d'augmenter la tension.**
  - Quelle est l'intérêt d'une association en parallèle ? : **Permet d'augmenter le courant.**
- D- La puissance maximale délivrée par chaque panneau vaut 150 W. L'installation doit pouvoir fournir une puissance égale à 2100W.

- Combien de panneaux faut-il utiliser ?  $N = 2100/150 = 14$  panneaux
- La tension de fonctionnement nominal d'un panneau à puissance maximale est égale à 35 V. L'installation doit délivrer une tension de 70 V. Comment associer ces panneaux ? (pour répondre, un schéma peut suffire).

**TD-5 :**

Un module photovoltaïque comprend un grand nombre de cellules qui convertissent une partie de l'énergie rayonnante du Soleil qu'elles reçoivent, en énergie électrique. Certaines caractéristiques d'un module photovoltaïque sont représentées sur le graphique de la feuille de réponses. Les caractéristiques sont données pour des puissances lumineuses reçues par m<sup>2</sup> de cellule photovoltaïque ;

Par exemple 800 W/m<sup>2</sup> : le module photovoltaïque reçoit une puissance rayonnante de 800 W sur 1 m<sup>2</sup> de surface de module. Les caractéristiques électriques pour une puissance lumineuse reçue de 1000 W/m<sup>2</sup> sont indiquées dans le tableau ci-dessous.



Température du module (°C)	50
Puissance électrique maximale (W)	32.8
Tension aux bornes du module à puissance maximale (V)	14.9
Intensité I (A) pour une tension U = 15V	2.2
Tension en circuit ouvert (V)	18.4
Intensité de court-circuit (A)	2.2

- 1- Sur le graphique, placer respectivement pour une puissance rayonnante reçue de  $800 \text{ W/m}^2$
- le point de fonctionnement A correspondant à la puissance électrique maximale disponible ;
  - le point de fonctionnement B correspondant à l'intensité de court-circuit ;
  - le point de fonctionnement C correspondant à un circuit ouvert.

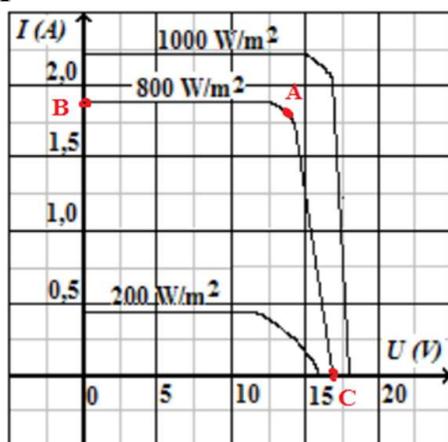
2- Ce module reçoit, à  $50^\circ\text{C}$ , une puissance rayonnante de  $1000 \text{ W/m}^2$ . La tension à ces bornes, lorsqu'il fonctionne est égale à  $10 \text{ V}$ .

- D'après le graphique, quelle est la valeur de l'intensité du courant débité ?
- Quelle est la puissance électrique fournie ?
- La surface du module est égale à  $0,185 \text{ m}^2$ . Calculer le rendement énergétique du module.

3- En utilisant le graphique ou le tableau, quelle résistance doit-on brancher aux bornes du panneau solaire recevant  $1000 \text{ W/m}^2$  pour qu'il fournisse une puissance maximale ?

### Corrigé

1-



2- Ce module reçoit, à  $50^\circ\text{C}$ , une puissance rayonnante de  $1000 \text{ W/m}^2$ . La tension à ces bornes, lorsqu'il fonctionne est égale à  $10 \text{ V}$ .

- D'après le graphique, quelle est la valeur de l'intensité du courant débité ?

**Rép :  $I = 2,25 \text{ A}$**

- Quelle est la puissance électrique fournie ?

**Rép :  $P_e = UI = 22,5 \text{ W}$**

- La surface du module est égale à  $0,185 \text{ m}^2$ . Calculer le rendement énergétique du module.

**Rép :  $P_{re\acute{c}ue} = 1000 \times 0,185 = 185 \text{ W}$  ;**

**$\rho = 22,5/185 = 0,12 = 12,2 \%$**

3- Quelle résistance doit-on brancher aux bornes du panneau solaire recevant  $1000 \text{ W/m}^2$  pour qu'il fournisse une puissance maximale.

**Rép :  $V_{op} = 14,9 \text{ V}$  et  $I_{op} = P_{op}/V_{op} = 32,8/14,9 = 2,2 \text{ A} \Rightarrow R = V_{op}/I_{op} = 14,9/2,2 = 6,8 \Omega$**

**Caractéristique I(V) de la charge est une droite  $V = R.I$**

**TD-6:** Les caractéristiques d'un module photovoltaïque sont données dans le tableau ci-dessous lorsque le module reçoit une puissance rayonnante de **1000 W** sur **1 m<sup>2</sup>** de surface du module.

1- Donner l'allure de la caractéristique tension-intensité (tension en abscisse et intensité en ordonnée) de ce module photovoltaïque, à  $50^\circ\text{C}$ , pour une puissance rayonnante reçue de  $1000 \text{ W/m}^2$ . On placera

- le point de fonctionnement A correspondant à l'intensité de court-circuit ;
- le point de fonctionnement B correspondant à un circuit ouvert ;
- le point de fonctionnement C correspondant à la puissance électrique maximale disponible.

2- Ce module reçoit, à  $50^\circ\text{C}$ , une puissance rayonnante surfacique de  $1000 \text{ W/m}^2$ .

La tension à ses bornes, lorsqu'il fonctionne est égale à **10V**.

- D'après les données, quelle est, alors, la valeur de l'intensité **I** du courant ?
- Quelle est la puissance électrique fournie ?
- La surface du module est égale à **0,185 m<sup>2</sup>**. Calculer le rendement énergétique du module.

3- Que peut-on conclure de l'influence d'une augmentation de la température sur les performances d'un panneau solaire photovoltaïque ? En est-il de même pour un panneau solaire thermique ?

4- Ce panneau est installé en site isolé dans un système autonome. Faites le schéma synoptique de l'installation.

5- Comment maintenir le panneau en fonctionnement optimal (maximum de puissance) ? Citer deux méthodes.

-----o-----

1) Allure de la caractéristique tension- intensité du module photovoltaïque

Caractéristiques électriques (à $1000 \text{ W/m}^2$ )		
T cellules ( $^\circ\text{C}$ )	25	50
$P_{\text{max}}$ (W)	36	32,5
V à $P_{\text{max}}$ (V)	16,3	14,4
I court-circuit (A)	2,45	2,50
V circuit ouvert (V)	20,3	18,4
I à V = 10(V)	2,29	2,28

Rendement  $\rho = \frac{\text{(Puissance fournie par le module)}}{\text{(Puissance reçue par le module)}}$

$$V_{co} = 18.4 \text{ V}, I_{cc} = 2.5 \text{ A}, P_{max} = 32.5 \text{ W} \text{ et } V_{op} = 14.4 \text{ V} \Rightarrow I_{opt} = P_{max} / V_{op} = 2.26 \text{ A}$$

2) a) Pour  $V = 10 \text{ V} \Rightarrow I = 2,28 \text{ A}$ . (courbe)

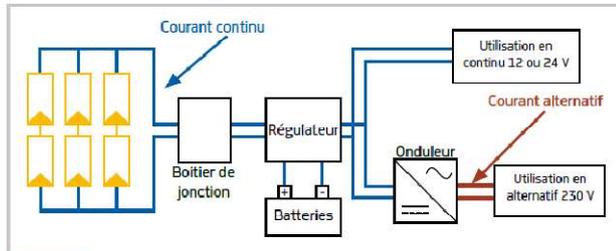
$$b) P = U \cdot I = 10 \times 2,28 = 22,8 \text{ W} = P_{fournie} \text{ et } P_{recue} = 1000 (\text{W/m}^2) \times 0,185 (\text{m}^2) = 185 \text{ W}$$

c) rendement:  $\rho = P_{fournie} / P_{recue} = 22,8 / 185 = 12,3\%$ .

3) A  $25^\circ\text{C}$  les performances sont meilleures. Une augmentation de la température diminue donc les performances d'un panneau solaire photovoltaïque. C'est le contraire pour un panneau solaire thermique.

4) Schéma Synoptique d'une installation photovoltaïque autonome ?

5) Un Maximum Power Point Tracking (abrégé MPPT), dispositif de poursuite du point de

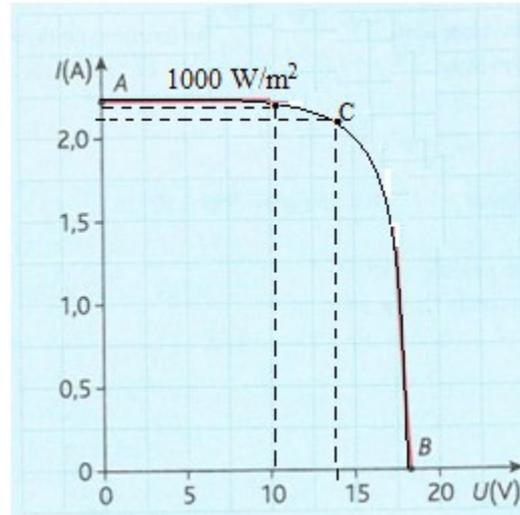


puissance maximale, régulateur MPP ou un tracker MPP est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale du panneau photovoltaïque.

• Méthodes MPPT :

- 1) Perturb and Observ,
- 2) Incremental Conductance

• Méthodes MPPT : 1) Perturb and Observ, 2) Incremental Conductance



### TD-7

Sur la courbe de la caractéristique  $I(V)$  d'un panneau photovoltaïque de surface  $12 \text{ m}^2$ , on lit:  $I_{opt} = 7.9 \text{ A}$  et  $V_{opt} = 123 \text{ V}$

1- Évaluer la puissance crête du panneau et la puissance lumineuse reçue par le panneau

$$\text{La puissance de crête : } P_{opt} = U_{opt} \times I_{opt} = 123 \times 7,9 = 9,72 \times 10^2 \text{ W}$$

2- Évaluer la puissance lumineuse reçue par le panneau, sachant que la puissance lumineuse reçue par unité de surface (dans le site considéré) est de  $600 \text{ W/m}^2$ .

$$\text{La puissance lumineuse du panneau} = (\text{la puissance lumineuse reçue par unité de surface}) \times (\text{la surface du panneau}) : P_{lum} = 600 (\text{W/m}^2) \times 12 (\text{m}^2) = 7200 \text{ W}$$

3- Déterminer le rendement de ce panneau dans ces conditions

$$\text{Rendement : rapport de la puissance crête du panneau sur la puissance lumineuse reçue par le panneau de } 12 \text{ m}^2 ; \eta = P_{opt} / P_{lum} = 972 / 7200 = 0,135 = 13,5 \%$$

4- Soit une maison dont la surface de toiture est de  $120 \text{ m}^2$ , placée dans ce site.

Les besoins en énergie de cette maison, sont évalués à  $8400 \text{ kWh}$  par an.

L'ensoleillement annuel moyen à ce site est de  $E = 1310 \text{ kWh/m}^2$ , c'est une énergie par unité de surface. Et la durée d'ensoleillement est de  $\Delta t = 1530 \text{ h}$ . du même site.

Évaluer la puissance lumineuse par unité de surface

$$\text{L'ensoleillement annuel moyen du site est de } E = 1310 \text{ kWh/m}^2, \text{ avec } E = P \cdot \Delta t \Rightarrow$$

$$P = E / \Delta t = 1310 (\text{kWh/m}^2) / 1530 (\text{h}) = 0,8562 (\text{kW/m}^2) = 856,2 \text{ W/m}^2$$

5- Évaluer l'énergie électrique produite par  $1 \text{ m}^2$  de panneaux par an:

$$\text{Ensoleillement du site est de } E = 1310 \text{ kWh/m}^2$$

$$\text{En tenant compte du rendement de } 13,5 \%, \eta = E_{\text{électrique}} / \text{Ensoleillement}$$

$$\text{l'énergie électrique produite par } 1 \text{ m}^2 \text{ de panneaux solaire est } E_{\text{électrique}} = \eta \times \text{Ensoleillement} \Rightarrow$$

$$E_{\text{électrique}} = 0,135 \times 1310 = 176,85 (\text{kWh/m}^2) \text{ par an}$$

6- On considère que la moitié de la toiture est utilisée, soit  $60 \text{ m}^2$ .

Déterminer le nombre des panneaux à utiliser.

$$\text{La surface de la toiture permet d'installer } 60 \text{ m}^2 / 12 \text{ m}^2 = 5 \text{ panneaux solaires de } 12 \text{ m}^2.$$

$$\text{Ainsi la surface des panneaux solaires est égale à } S = 5 \times 12 = 60 \text{ m}^2.$$

7-Déterminer l'énergie électrique produite par les panneaux durant une année (en Wh).

$$E_{\text{panneaux}} = E_{\text{électrique}} \times S$$

$$E_{\text{panneaux}} = 176,85 (\text{KWh/m}^2/\text{an}) \times 48 (\text{m}^2) = 8,5 \times 10^3 \text{ kWh par an}$$

### TD-8 (Cas d'une Petite résidence)

Soit une petite installation qui alimente les appareils suivants:

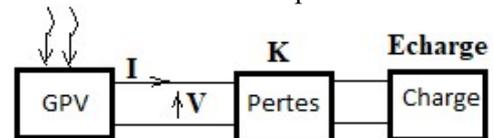
Usage	Equipement	Puissance (W)	Consomma. Veille (W) 10%	Nbre	Durée (h)	Période	Cons. (Wh)
Eclairage	Lampe 13 W	13	0	3	6	J	
Réfrigération (+2°C)	Coffre 130 litres	77	0	1	8	J	
Audio-visuel	Radio-réveil	5	0	1	3	J	
Audio-visuel	Téléviseur couleur 42cm	50	5	1	3	J	

La consommation en mode veille est de 10% pour la Télévision couleur (éteint avec la télécommande). Cette "consommation de veille" (appelée aussi "standby")

#### Données

- La puissance crête ( $P_c$ ), c'est la puissance solaire max reçue par un panneau PV ( $P_c = 1000 \text{ W/m}^2$ ).
- Le rayonnement étant variable au cours de la journée, on peut déterminer, par intégration, la quantité d'énergie solaire reçue par le générateur dans une journée ( $E_{\text{sol}}$  exprimée en  $\text{Wh/m}^2$ ).
- L'énergie journalière du site (lieu de l'habitation) en décembre est de:  $E_{\text{sol}} = 2837 \text{ Wh/m}^2$
- Le coefficient K des pertes entre le générateur photovoltaïque et la charge est  $K = 75\%$  (25% de pertes)
- Utilisation des panneaux photovoltaïques de : Puissance max = 155W, Tension = 24 V, Rendement  $\eta = 17\%$  Surface  $S_p = 1 \text{ m}^2$ .

- 1- Calculer l'énergie journalière de chaque récepteur.
- 2- Déterminer l'énergie journalière de l'ensemble des récepteurs ( $E_{\text{charge}}$ ).
- 3- Calculer le nombre d'heures équivalentes journalière ( $N_e$ ).
- 4- Calculer la puissance max du générateur photovoltaïque.
- 5- Combien de modules doit on installer sur cette résidence, pour fournir l'énergie nécessaire  $E_{\text{charge}}$ .



#### Solution :

##### 1- L'énergie journalière de chaque récepteur.

Eclairage:  $13(\text{W}) \cdot 3.6(\text{h}) = 234 (\text{Wh})$

Réfrigération:  $77(\text{W}) \cdot 1.8(\text{h}) = 616 (\text{Wh})$

Radio-Réveil:  $5(\text{W}) \cdot 1.3(\text{h}) = 15 (\text{Wh})$

Téléviseur :  $[50 (\text{W}) \cdot 1.3(\text{h})] + [5(\text{W}) \cdot 1 \cdot (24-3)(\text{h})] = 255 (\text{Wh})$

2- l'énergie journalière de l'ensemble des récepteurs ( $E_{\text{charge}}$ ).  $E_{\text{charge}} = \sum E_i = 1120 \text{ Wh}$

##### 3- Le nombre d'heures équivalentes journalière ( $N_e$ )

La puissance solaire reçue par le panneau lors d'une journée est considérée comme constante et de valeur  $1000 \text{ W/m}^2$ , pendant une durée d'heures ( $N_e$ ) appelée nombre d'heures équivalentes journalière.

La quantité d'énergie reçue lors d'une journée ( $E_{\text{sol}}$ ) :  $E_{\text{sol}} = 1000 (\text{W/m}^2) \times N_e = 2837 \text{ Wh/m}^2 \Rightarrow$

$$N_e = 2837/1000 = 2.837 \text{ h}$$

##### 4- La puissance Max du générateur photovoltaïque. Côté

###### Côté : GPV- Esoleil

Par utilisation de la relation du rendement :  $\eta = (E_{\text{Elec}})_{\text{max}} / E_{\text{sol}}$

Pour un temps d'une heure et une surface de  $1 \text{ m}^2$  (c'est-à-dire l'exposition d'un panneau pendant une heure)

$$\eta = (P_{\text{max}} \times 1(\text{h})) / E_{\text{sol}} \Rightarrow P_{\text{max}} \cdot (1\text{h}) = E_{\text{sol}} \times \eta = 2837 (\text{Wh/m}^2) \times 0.17 \Rightarrow P_{\text{max}} = 482.29 (\text{W/m}^2)$$

##### 5- Le nombre de modules nécessaire

###### Côté : GPV- Charge:

Pour l'exposition de N panneaux (de de surface  $S = N \text{ m}^2$ ) pendant une heure :

$$E_{\text{charge}} = K \times E_{\text{elec}} = K \times P_{\text{max}} \times S \times (1\text{h}) \Rightarrow S = E_{\text{charge}} / [K \times P_{\text{max}} \cdot (1\text{h})]$$

$$S = 1120 (\text{Wh}) / [0.75 \times 482.29 (\text{W/m}^2) \cdot (\text{h})] = 1120 (\text{Wh}) / [361.72 (\text{Wh/m}^2)] = 3 \text{ m}^2$$

Donc le nombre de panneaux N est de 3 panneaux.

**TD-9 Exemple de dimensionnement d'une installation photovoltaïque****1)- Composition de l'installation**

- a). L'installation a pour but d'alimenter: ▪. 40 logements identiques ▪. Une maison de retraite:  
 b) L'installation est raccordée au réseau, mais sans production d'excédent.  
 c) On ne tient pas compte de pertes autres que celles dues aux panneaux et l'onduleur.

**2)- Consommation annuelle moyenne d'électricité** a) **Les 40 logements:** La consommation annuelle moyenne en électricité d'un logement est supposée de 3000 kWh (Avec stockage et Hors chauffage). Pour les 40 logements supposés identiques:  $40 \times 3000 = 120000$  (kWh).

b) **La maison de retraite:**

La consommation annuelle d'électricité de la maison de retraite est supposée de 36420 kWh.

**3)- Conditions climatiques:****A) Ensoleillement :**

- **Le nombre d'heures d'ensoleillement :**

Nous considérons que le nombre d'heures d'ensoleillement annuel est de 1898 h.

- **Nombre d'heures d'équivalent plein soleil (Ne) :**

Nous considérons que le nombre d'heures d'équivalent plein soleil est de  $Ne = 1000$  h..

- **Constante solaire :**

Pour la production d'électricité photovoltaïque, nous considérons que les différentes valeurs sont fournies aux conditions standards de test (SIC). [ $P_c = 1 \text{ kW/m}^2$ ,  $T = 25 \text{ °C}$ , AM 1,5]

**B) Température:** La température d'utilisation est un paramètre important dans le comportement des modules photovoltaïques. La variation de la température se traduit par la variation de la puissance maximale crête (Wc). Ainsi, une hausse de température se traduit par une baisse de la puissance maximale.

En pratique, nous devrions utiliser des coefficients de correction données par les constructeurs liés à la température pour la tension, le courant et la puissance.

**C) L'exposition:**

La production brute de panneaux photovoltaïques dépend de plusieurs facteurs, cela dépend de la situation géographique (latitude, longitude et altitude) et des conditions climatiques.

Nous pouvons également citer l'orientation et l'inclinaison (angle / horizontale). des panneaux photovoltaïques. par exemple le tableau suivant indique le facteur de correction pour une inclinaison et une orientation données d'un site donné.

		Inclinaison			
		0° ---	30° ↙	60° ↘	90° ⊥
Orientation	Est 	0.93	0.90	0.78	0.55
	Sud-est 	0.93	0.96	0.88	0.66
	Sud 	0.93	<b>1.00</b>	0.91	0.68
	Sud-ouest 	0.93	0.96	0.88	0.66
	Ouest 	0.93	0.90	0.78	0.55

*Facteur de correction de production en fonction de l'inclinaison et de l'orientation des PV.*

Ce tableau montre qu'à chaque orientation et à chaque inclinaison correspondent un facteur de correction de la production du système photovoltaïque d'un site donné.

Nous considérerons que nous sommes dans la configuration suivante:

Orientation sud et Inclinaison de 30° => facteur de correction = 1..

**D) Masques** Des masques éventuels comme des ombres, des mousses peuvent abaisser la production (et en particulier le niveau de rayonnement), nous considérerons que nous n'en avons pas. Nous considérerons donc qu'à tout moment le rayonnement solaire est maximum, avec le nombre d'heures équivalentes (Ne).

**4. Choix du type de producteur d'énergie photovoltaïque (type de panneau):****a) Les principaux types et caractéristiques de cellule photovoltaïque :**

Il existe 3 principaux types de cellules photovoltaïques.

	Silicium amorphe	Silicium poly cristallin	Silicium monocristallin
Rendement	-	+	++
Rendement commercial	5 à 9 %	11 à 15 %	12 à 20 %
Durée de vie	(+/-) 10 ans	(+/-) 30 ans	(+/-) 30 ans
Prix	++	+	-

Nous considérons les panneaux photovoltaïques composés de cellules à silicium polycristallin, car ce type de cellule offre le meilleur compromis.

**b). Les panneaux photovoltaïques (disponibles sur le marché):**

On suppose que nous avons sur le marché des panneaux poly cristallin de puissance ayant les caractéristiques suivantes : - Caractéristiques électriques :

Puissance nominale P (Wc)	185
Efficacité des cellules (%)	15.2
Tension au point de puissance Max $V_{opt}$ (V)	24.4
Courant au point de puissance Max $I_{opt}$ (A)	7.58

Ces valeurs sont fournies aux conditions standards de test (SIC).

- <u>Dimensions</u> : Panneaux identiques rectangulaires	Longueur (mm)	1658
	Largeur (mm)	834

- L'épaisseur du cadre est de 5mm (Aluminium)    ▪ Les dimensions d'une cellule: 165mm par 165mm.
- Les panneaux photovoltaïques sont identiques.

**Onduleurs : Caractéristiques électriques des onduleurs (disponibles sur le marché)**

Supposons que nous avons à notre disposition les 4 onduleurs de marque SolarMax Suivants

Entrée DC	SolarMax 2000S	SolarMax 3000S	SolarMax 4200S
Puissance Max	2300 W	3300 W	5000 W
Tension d'entrée Max	600V	600V	600V
Courant d'entrée	0--11 A	0--11 A	0--22 A

**Questions 1) Déterminer :**

- la Surface d'une cellule    • la Surface totale des cellules du panneau
- le Nombre de cellules du panneau.

**2) Energie électrique annuelle produite par 1 m<sup>2</sup> en fonction de ( $\eta_{ond}$ ):**

(Orientation sud et Inclinaison de 30°=> *Facteur de correction = 1*)

- Le rendement de conversion de l'onduleur est de  $\eta_{ond}$ .
- Le rendement de conversion du panneau  $\eta_p$  = Le rendement de conversion de la cellule:  $\eta_p = 15,2\%$ .

**a)** Déterminer l'énergie électrique annuelle nécessaire –en considérant que  $\eta_{ond} = 100\%$ ), en fonction de la surface de l'ensemble des panneaux.

**b)** Les panneaux photovoltaïques transforment l'énergie solaire (les radiations), en énergie électrique disponible sous la forme d'une tension continue. Il nous faudra ensuite envoyer cette tension continue vers un onduleur, qui la convertira en tension alternative aux normes compatible avec le réseau de distribution électrique disponible.

De plus, l'onduleur dispose d'un rendement ( $\eta_{ond}$ ) de conversion et il faudra donc une surface minimale plus grande pour garantir la consommation moyenne électrique  $S = S_{min} / \eta_{ond}$

Considérons les deux cas suivants de rendement de l'onduleur :  $\eta_{ond} = 90\%$  et  $\eta_{ond} = 97\%$ .

- **Comparer la surface totale des panneaux suivant le rendement  $\eta_{ond}$ . (deux cas).**

**3) La surface et le nombre de panneaux de l'installation PV:**

Si  $E_{con}$  est la consommation moyenne électrique annuelle de l'installation

$E_{pv}$  est l'énergie des panneaux photovoltaïques par an.

$S$  est la surface des panneaux concernant cette installation, en tenant compte des rendements des panneaux et des onduleurs. Le nombre des panneaux (surface) doit être capable de fournir les besoins en énergie électrique de

l'ensemble 40 logement et maison de retraite.

On sait que l'énergie fournie par les panneaux est proportionnelle à leur nombre (surface).

On suppose que l'énergie de consommation = l'énergie de fournie par les panneaux de  $S_{min}$ .

**a)** Ecrire  $E_{con}$  en fonction de  $S_{min}$  et l'énergie électrique ( $E_{el}$ ) annuelle d'un panneau de surface de 1 m<sup>2</sup> à la sortie du GPV (avec  $\eta_{ond} = 100\%$ )

**b)** Ecrire  $E_{con}$  en fonction de  $S_{min}$  et l'énergie électrique ( $E_{el}$ ) annuelle d'un panneau de surface de 1 m<sup>2</sup> à la sortie du GPV (en tenant compte du  $\eta_{ond} \neq 100\%$  de l'onduleur).

**4)- Surface des panneaux pour une charge représentant les 40 logements :**

Les logements sont identiques Dans ce cas la surface  $S$  de l'ensemble des panneaux est de  $40 \times S_{IL}$ , avec  $S_{IL}$  représente la surface des panneaux pour un logement.

- Déterminer  $S_{IL}$  et en déduire  $S$  suivant l'onduleur utilisé.
- Déterminer le nombre de cellule et de panneaux PV, suivant l'onduleur utilisé.

**Les onduleurs et le raccordement des panneaux en série ou en parallèle ?**

**5) Surface des panneaux pour une charge représentant la Maison de retraite :**

- Utilisation de Panneau poly cristallin de puissance crête de 185 Wc
- Utilisation de la même marque de l'onduleur de type SolarMax 2000S, de rendement:  $\eta_{ond} = 97\%$
- La consommation moyenne électrique de la maison de retraite est fixée à 36420 kWh par an.

La surface minimale ( $S_{MR}$  des panneaux concernant cette maison s'exprime par :  $S_{MR} = E_{con} / [(E_{el}) \times \eta_{ond}]$   
Déterminer la Surface, le nombre de panneaux et le raccordement des panneaux en série ou en parallèle ?

### Réponse

- 1):
- la Surface d'une cellule:  $165 \times 165 \text{ (mm}^2) = 27225 \text{ (mm}^2) = 0.027 \text{ (m}^2)$
  - la Surface totale des cellules du panneau:  $(1658-10) \times (834-10) \text{ (mm}^2) = 1357952 \text{ (mm}^2) = 1.36 \text{ (m}^2)$
  - le Nombre de cellules:  $1.36 \text{ (m}^2) / 0.027 \text{ (m}^2) = 50$

### 2) Energie électrique annuelle produite par 1 m<sup>2</sup> en fonction de ( $\eta_{ond}$ ):

- L'énergie électrique annuelle s'exprime par la formule suivante :  $(E_{el}) = \eta_p \times P_c \times N_e$

Energie électrique pour une surface de 1 m<sup>2</sup> ( $E_{el1}$ )

$(E_{el1}) = \text{Le rendement (panneau)} \times (\text{puissance rayonnée maximale par m}^2) \times (\text{nombre d'heures de plein soleil})$   
=>  $(E_{el1}) = 0,152 \times 1 \text{ kW/m}^2 \times 1000 \text{ h} = 152 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$  pour une surface de 1 m<sup>2</sup>.

a) L'énergie électrique annuelle nécessaire (en considérant que  $\eta_{ond} = 100\%$ ), en fonction de la surface de l'ensemble des panneaux. Si on considère plusieurs panneaux de surface S (en m<sup>2</sup>): ( $E_{el}$ ) fournie par les panneaux est  $E_{el} = S \times 152 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ . Et  $(E_{el}) \times \eta_{ond} = (S \times 152 \text{ kWh/an}) \times \eta_{ond}$  est l'énergie à la sortie de l'onduleur de  $\eta_{ond}$ , qui doit être égale à l'énergie de la charge ( $E_{con}$ ):  $(S \times 152$

$\text{kWh/m}^2/\text{an}) \times \eta_{ond} = E_{con}/\text{an}$ . Dans le cas où  $\eta_{ond} = 1$ ,  $E_{el} = S \times 152 \text{ kWh/m}^2/\text{an} = E_{con}/\text{an}$

b) L'énergie électrique annuelle nécessaire à la charge (en considérant que  $\eta_{ond} \neq 100\%$ ), en fonction de la surface S (en m<sup>2</sup>) de l'ensemble des panneaux. A la sortie de l'onduleur :

$(S \times 152 \text{ kWh/m}^2/\text{an}) \times \eta_{ond} = E_{con}/\text{an} \Rightarrow S = (E_{con}/\text{an}) / [(152 \text{ kWh/m}^2/\text{an}) \times \eta_{ond}]$

Comparaison de la surface totale des panneaux suivant le rendement  $\eta_{ond}$  (deux cas).

•)  $\eta_{ond} = 90\%$   $S_1 = S = (E_{con}/\text{an}) / [(152 \text{ kWh/m}^2/\text{an}) \times \eta_{ond}]$   
 $= (E_{con}/\text{an}) / [(152 \text{ kWh/m}^2/\text{an}) \times 0.9] = (E_{con}/\text{an}) / (136.8 \text{ kWh/an})$  en m<sup>2</sup>.

•)  $\eta_{ond} = 97\%$   $S_2 = S = (E_{con}/\text{an}) / [(152 \text{ kWh/m}^2/\text{an}) \times \eta_{ond}]$   
 $= (E_{con}/\text{an}) / [(152 \text{ kWh/m}^2/\text{an}) \times 0.97] = (E_{con}/\text{an}) / (147.44 \text{ kWh/an})$  en

m<sup>2</sup>.

=>  $S_1 > S_2 \Rightarrow$  la surface diminue avec l'augmentation du  $\eta_{ond}$ .

### 3) La surface et le nombre de panneaux de l'installation PV:

a) Ecrire  $E_{con}$  en fonction de  $S_{min}$  et l'énergie électrique ( $E_{el}$ ) annuelle d'un panneau de surface de 1 m<sup>2</sup> à la sortie du GPV (avec  $\eta_{ond} = 100\%$ ).  $(E_{el})_1 = (S/\eta_{ond}) \times 152 \text{ kWh/m}^2/\text{an} = (S_{min}) \times 152 \text{ kWh/m}^2/\text{an} = E_{con}/\text{an}$

Cette ( $E_{el}$ )<sub>1</sub> fournie par les panneaux de surface ( $S = S_{min}$ ) doit être égale à l'énergie de consommation ( $E_{con}$ ). Donc  $E_{con}/\text{an} = (S_{min}) \times 152 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$

b) Ecrire  $E_{con}$  en fonction de  $S_{min}$  et l'énergie électrique ( $E_{el}$ ) annuelle d'un panneau de surface de 1 m<sup>2</sup> à la sortie du GPV (en tenant compte du  $\eta_{ond} \neq 100\%$ ) de l'onduleur.

Le rendement de l'onduleur  $\eta_{ond} \neq 100\%$  =>  $(E_{el})_2 = (S_{min})/\eta_{ond} \times 152 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ .

$(E_{el})_2$  fournie par les panneaux de surface S doit être égale à l'énergie de consommation ( $E_{con}$ ).

Donc  $E_{con}/\text{an} = (S_{min}/\eta_{ond}) \times 152 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ .

### 4)- Surface des panneaux pour une charge représentant les 40 logements :

Les 40 logements sont identiques, dans ce cas la surface S de l'ensemble des panneaux est de  $S = 40 \times S_{IL}$ ,  $S_{IL}$  représente la surface en m<sup>2</sup> des panneaux pour un logement.

a) Déterminer  $S_{IL}$  et en déduire S suivant l'onduleur utilisé.  $S_{IL} = (E_{con}/\text{an}) / [(152 \text{ kWh/an}) \times \eta_{ond}]$

Le rendement de l'onduleur  $\eta_{ond} \neq 1$  et  $E_{con}$  pour un logement  $E_{IL} = 3000 \text{ kWh/an} \Rightarrow$

$S_{IL} = 3000 \text{ (kWh/an)} / [(152 \text{ kWh/m}^2/\text{an}) \times \eta_{ond}] = (3000/152) \times \eta_{ond}$  (en m<sup>2</sup>)

=>  $S_{IL} = 19.74 / \eta_{ond}$  en m<sup>2</sup>.

▪  $\eta_{ond} = 0,90 \Rightarrow S_{IL} = (19.74/0.9) = 21.9$  en m<sup>2</sup>.

▪  $\eta_{ond} = 0,97 \Rightarrow S_{IL} = (19.74/0.97) = 20.4$  en m<sup>2</sup>.

b) Déterminer le nombre de cellule et de panneaux PV, suivant l'onduleur utilisé.

Détermination du nombre de cellules et de panneaux photovoltaïques pour  $\eta_{ond} = 90\%$ .

Dans ce cas la surface des panneaux (ensemble des cellules) est  $S = 21,9 \text{ m}^2$  par logement.

Une cellule a pour dimensions 0,165m x 0,165m, c'est à dire une surface unitaire de 0,027 m<sup>2</sup>.

Nous pouvons en déduire que nous avons besoin de  $21.9/0.027 = 811$  cellules.

Alors sachant qu'un panneau est composé de 50 cellules, nous aurons besoin de

$811/50 = 16$  panneaux solaires pour fournir l'ensemble de l'électricité nécessaire à un logement.

$\eta_{\text{ond}} = 90\% \Rightarrow 811$  cellules et 16 panneaux solaires

Détermination du nombre de cellules et de panneaux photovoltaïques  $\eta_{\text{ond}} = 97\%$  :

Nous avons déterminé une surface S de 20,31 m<sup>2</sup> par logement.

Une cellule a pour surface unitaire de 0,027m<sup>2</sup>.

Nous pouvons en déduire que nous avons besoin de  $20.31/0.027 = 753$  cellules.

Sachant qu'un panneau est composé de 50 cellules, nous aurons besoin de  $753/50 = 15$  panneaux solaires pour fournir l'ensemble de l'électricité nécessaire à un logement.

$\eta_{\text{ond}} = 97\% \Rightarrow 753$  cellules et 15 panneaux solaires

$\Rightarrow$  Le nombre des panneaux dépend des rendements  $\eta_{\text{panneau}}$  et  $\eta_{\text{onduleur}}$

Les onduleurs et le raccordement des panneaux en série ou en parallèle ?

Détermination de l'onduleur :      a) Rendement onduleur  $\eta_{\text{ond}} = 90\% \Rightarrow 16$  panneaux

GPV :

**1) Puissance :** Notre installation est composée de 16 panneaux de 185Wc soit

$16 \times 185 = 2960$ Wc  $\Rightarrow 2960$ W > 2300 W (SolarMax 2000S) mais  $2960$ W < 3300 W (SolarMax 3000S).

Nombre Max de panneaux pour un onduleur de marque (SolarMax 3000S) est :  $3300/185 = 17 > 16$

**2) Tension :** La tension maximale possible de la sortie du GPV est obtenue de la mise en série des 16 panneaux. Donc  $V_{\text{max}} = 16 \times 24,4 \text{ V} = 390,4 \text{ V}$ , cette tension est < 600V tension max d'entrée de l'onduleur, donc l'onduleur supporte les 16 panneaux es série.

**3) courant :** Le courant maximal possible de la sortie du GPV est obtenue de la mise en parallèle des 16 panneaux, avec  $I_{\text{max}}$  (panneau) = 7,58 A, ce qui donne  $I_{\text{max}}$  (GPV) =  $16 \times 7,58 \text{ A} = 121,28 \text{ A}$

Ce courant est très supérieur à 11 A courant max d'entrée de l'onduleur.

A remarquer que la mise en parallèle de deux panneaux donne  $I_{\text{max}} = 15,16 \text{ A} > 11 \text{ A}$ , donc l'onduleur ne supporte pas la mise en parallèle des panneaux.

Nombre Max de panneaux pour un onduleur de marque (SolarMax 3000S) :  $3300/185 = 17 > 16$ .

▪ **Conclusion :** les 16 panneaux sont connectés en série, avec un seul onduleur (SolarMax 3000S).

b) Rendement onduleur  $\eta_{\text{ond}} = 97\% \Rightarrow 15$  panneaux

GPV :

**1) Puissance:** Notre installation est composée de 15 panneaux de 185Wc soit  $15 \times 185 = 2775$  Wc.  $2775 \text{ W} > 2300 \text{ W}$  (SolarMax 2000S) ; mais  $2775 \text{ W} < 3300 \text{ W}$  (SolarMax 3000S).

**2) Tension :** La tension maximale possible de la sortie du GPV est obtenue de la mise en série des 15 panneaux. Donc  $V_{\text{max}} = 15 \times 24,4 \text{ V} = 366 \text{ V}$ , cette tension est < 600V tension max d'entrée de l'onduleur.

**3) courant :** Le courant maximal possible de la sortie du GPV est obtenue de la mise en parallèle des 15 panneaux, avec  $I_{\text{max}}$  (panneau) = 7,58 A, ce qui donne  $I_{\text{max}}$  (GPV) =  $15 \times 7,58 \text{ A} = 113,7 \text{ A}$

Ce courant est > > 11 A courant max d'entrée de l'onduleur.

A remarquer que la mise en parallèle de deux panneaux donne  $I_{\text{ma}} = 15,16 \text{ A} > 11 \text{ A}$ .

**Conclusion : les 15 panneaux sont connectés en série, avec un seul onduleur (SolarMax 3000S).**

**Remarque :** Les 40 logements sont identiques  $\Rightarrow$  chaque logement à son GPV constitué de 15 ou 16 panneaux (suivant le rendement de l'onduleur) branchés en série, avec un seul onduleur (SolarMax 3000S).

-----0-----

**5) Surface des panneaux pour une charge représentant la Maison de retraite :**

▪ Utilisation de Panneau poly cristallin de puissance crête de 185 Wc

▪ Utilisation de la même marque de l'onduleur de type SolarMax 3000S, de rendement:  $\eta_{\text{ond}} = 97\%$

▪ La consommation moyenne électrique de la maison de retraite est fixée à 36420 kWh par an.

La surface minimale ( $S_{\text{MR}}$  des panneaux concernant cette maison s'exprime par :  $S_{\text{MR}} = E_{\text{con}} / [(E_{\text{el}}) \times \eta_{\text{ond}}]$

**Déterminer la Surface, le nombre de panneaux et le raccordement des panneaux en série ou en parallèle ?**

**1) Surface :**  $S_{\text{MR}} = E_{\text{con}} / [(E_{\text{el}}) \times \eta_{\text{ond}}] = 36420 \text{ (kwh)} / [152 \text{ (kWh/m}^2) \times 0,97] = 247 \text{ m}^2$ .

**Nombre de cellules:**  $247 / 0.027 = 9148 \Rightarrow$  **Nombre de panneaux:**  $9148/50 = 183$

**Surface de toit nécessaire:** Surface d'un panneau  $1658 \times 834 \text{ (mm}^2) = 1,383 \text{ m}^2$

=> Surface de toit nécessaire:  $183 \times 1,383 = 253 \text{ m}^2$  (panneaux avec l'aluminium)

## 2) Nombre de panneaux et Raccordement

**1) Puissance:** Notre installation est composée de 183 panneaux de 185Wc, soit  $183 \times 185 \text{ W} = 33,855 \text{ kW} \gg 3,3 \text{ KW}$  (SolarMax 3000S). (*Avec  $3300\text{W} / 185\text{W} = 17,84 \Rightarrow 17$  panneaux pour un onduleur*)

**2) Tension :** La tension maximale possible de la sortie du GPV est obtenue de la mise en série des 183 panneaux. Donc  $V_{\text{max}} = 183 \times 24,4 \text{ V} = 4.4652 \text{ KV}$ , cette tension est  $\gg 0.6 \text{ KV}$  tension max d'entrée de l'onduleur. (*Avec  $600/24.4 = 24,6 \Rightarrow$  au max 24 panneaux en série pour un onduleur*)

**3) courant :** A remarquer que la mise en parallèle de deux panneaux donne  $I_{\text{max}} = 15,16 \text{ A} > 11 \text{ A}$ .

=> Pas de mise en parallèle.

**Conclusion :** Chaque 17 panneaux sont connectés en série, avec un seul onduleur (SolarMax 3000S), ce qui donne  $183/17 = 10.74 \Rightarrow 10$  rangées de  $10 \times (17 \times 185) = 31,450 \text{ KW} < 33,855 \text{ KW}$  (-2,4 KW)

ou 11 rangées de  $11 \times (17 \times 185) = 34,595 \text{ KW} > 33,855 \text{ KW}$  (+0.74 KW)

=> 11 rangées de 17 panneaux connectés en série et 11 onduleurs (SolarMax 3000S), pour les 11 rangées.

---