

Premier vol réussi pour l'avion solaire « Solar Impulse 2 ».

L'avion suisse « **Solar Impulse 2** », uniquement propulsé à l'énergie solaire, a réussi tôt lundi son premier vol d'essai sur la base aérienne de Payerne, dans le centre de la Suisse. Avec aux commandes le pilote d'essai allemand Markus Scherdel, l'avion s'est élancé sur la piste avec ses quatre moteurs électriques alimentés par 17 248 cellules solaires... Ce second et nouveau prototype, alimenté exclusivement par l'énergie de ses cellules solaires, a une envergure de 72 mètres, autant qu'un Airbus A380, mais pour un poids de 2 300 kg, 150 fois moins que l'avion géant d'Airbus. *Solar Impulse 2* doit se lancer en 2015 dans une tentative de tour du monde [...] il devra pouvoir voler plus de cent-vingt heures d'affilée, cinq jours et cinq nuits, le temps dont il a besoin pour traverser le Pacifique ou l'Atlantique.

Sans être absolument révolutionnaire sur le plan scientifique, il est équipé de diverses technologies les plus novatrices utilisées dans le but d'économiser du poids. L'aile, par exemple, a été entièrement réalisée en fibres de carbone.



*D'après le Monde.fr avec
AFP le 02.06.2014*

L'aéroplane Solar Impulse 2, à Payerne, en Suisse. Jean Revillard/AP

Le sujet comporte cinq parties indépendantes les unes des autres :

Partie A : la mécanique du vol d'un avion et la course au poids pour *Solar Impulse 2*. (5 points)

Partie B : le challenge énergétique à relever. (5 points)

Partie C : les cellules photovoltaïques à haut rendement. (4 points)

Partie D : . Atterrissage de l'avion (4 points)

Partie E : . Système de chauffage du fluide (2 points)

Quelques caractéristiques techniques de *Solar Impulse 2*

Solar Impulse 2

Départ prévu en mars 2015 pour le tour du monde

17 248

cellules solaires
de l'épaisseur
d'un cheveu
humain

Les cellules solaires
convertissent les
rayons du soleil
en électricité



Vitesse maximale
140 km/h



Masse de l'avion
2 300 kg

Source : Solar Impulse



Taille du cockpit
3,8 m³

Structure en fibres de carbone
de 25 g/m²
(3 fois plus
légères que
le papier)

4 moteurs électriques
de 17,5 chevaux
chacun avec
des batteries
au lithium polymère

Envergure des ailes
plus grande
que celle
d'un Boeing 747



D'après <http://www.solarimpulse.com/fr/the-adventure/solar-impulse-2>

Partie A : la mécanique du vol d'un avion et la course au poids pour *Solar Impulse 2*

A.1. Forces exercées sur un avion en vol

A.1.1. Identifier chacune des quatre forces du schéma de l'annexe A1 en les mettant en correspondance avec les définitions.

A.1.2. Préciser, en justifiant, quelle force parmi les quatre identifiées permet à l'avion d'être maintenu en l'air.

A.1.3. Indiquer, en justifiant, quelle est la force dont la valeur ne varie pas lors du vol.

A.1.4. En s'appuyant sur les caractéristiques techniques de l'avion et l'annexe A1, calculer son poids.

A.1.5. En exploitant l'annexe A1, expliquer comment varie la portance quand la vitesse de l'avion augmente.

A.1.6. À partir du schéma de l'annexe A1,

- a- Dire quelle condition doit remplir la force de portance pour que l'avion décolle.
- b- L'avion vole horizontalement. Faire un schéma des forces qui s'exercent sur lui.
Appliquez le principe fondamental de la dynamique à l'avion.
- c- Que vaut l'accélération a de l'avion lorsqu'il vole horizontalement à vitesse **constante**.
- d- En déduire l'expression de la force de traction T lorsque l'avion vole horizontalement et à vitesse constante.

A.1.7. La puissance motrice est la puissance nécessaire pour faire avancer l'avion dans

l'atmosphère. Elle est donnée par la relation : $P_m = \frac{C_z}{C_L} \cdot \sqrt{\frac{2g^3}{\rho \cdot S \cdot C_L}} \cdot m^{\frac{3}{2}}$

- a- De quelle grandeur physique est-elle indépendante cette puissance motrice?
- b- On s'intéressera notamment à la vitesse de l'avion quand celui-ci doit voler horizontalement. Est-il plus facile de faire voler un avion à haute, ou à basse altitude ? Sur Terre,
- c- Calculer numériquement la puissance nécessaire pour faire voler le *Solar Impulse* sur Terre. On donne $g = 9.8 \text{ SI}$, La masse volumique de l'air au niveau du sol est $\rho = 1,2 \text{ kg.m}^{-3}$

Nom du projet	<i>Solar Impulse</i>
Masse totale m de l'avion (kg)	2300
Masse des batteries (kg)	360
Envergure (m)	66
Surface S des ailes (totalement recouvertes de panneaux solaires) (m^2)	250
Coefficient de traînée ("drag") C_L	0,0145
Coefficient de portance ("lift") C_z	1,50
Nombre de moteurs	4
Puissance maximale par moteur (W)	6600

A.2. Vitesse de décrochage

A.2.1. En prenant $C_z = 1,5$ et une surface des ailes $S = 250 \text{ m}^2$, montrer que la vitesse que *Solar Impulse 2* doit atteindre pour remplir la condition précédente est de 36 km.h^{-1} . Cette vitesse est appelée vitesse de décrochage.

Donnée : La masse volumique de l'air au niveau du sol est $\rho = 1,2 \text{ kg.m}^{-3}$.

A.2.2. En réalité, à cause des frottements des roues du train d'atterrissage, il faut atteindre 1,3 fois la vitesse de décrochage pour décoller sans risque. Déterminer la valeur de la vitesse de décollage et montrer qu'elle est conforme aux données de l'annexe A2.

A.2.3. En utilisant le graphe de l'annexe A3, déterminer la masse volumique de l'air à 9000 m d'altitude. Proposer une interprétation simple de la diminution de la masse volumique avec l'altitude.

A.2.4. En utilisant le constat précédent et l'expression de la portance de l'annexe A1, montrer que la vitesse de décrochage est plus grande à 9000 m d'altitude qu'au niveau du sol.

A.3. La course au poids

A.3.1. Expliquer pourquoi le poids joue un rôle crucial, surtout de nuit, lorsque *Solar Impulse 2* ne peut utiliser que l'énergie électrique de ses batteries.

A.3.2. La masse volumique du silicium est de 2330 kg.m^{-3} . En déduire la masse des $269,5 \text{ m}^2$ de cellules solaires photovoltaïques dont l'épaisseur est de 135 microns

Rappel : 1 micron = $1\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$

A.3.3. Les batteries représentent une part importante de la masse de l'avion. En vous appuyant sur l'annexe B3, calculer le pourcentage de la masse totale de l'avion qu'elles représentent.

A.3.4. La structure de *Solar Impulse 2* est réalisée en matériau composite constitué d'une peau en résine et fibres de carbone, dont la masse par unité de surface est inférieure à 25 g.m^{-2} . Préciser ce qu'est un matériau composite.



Assemblage des panneaux solaires - © Solar Impulse | Revillard | rezo.ch

ANNEXES DE LA PARTIE A

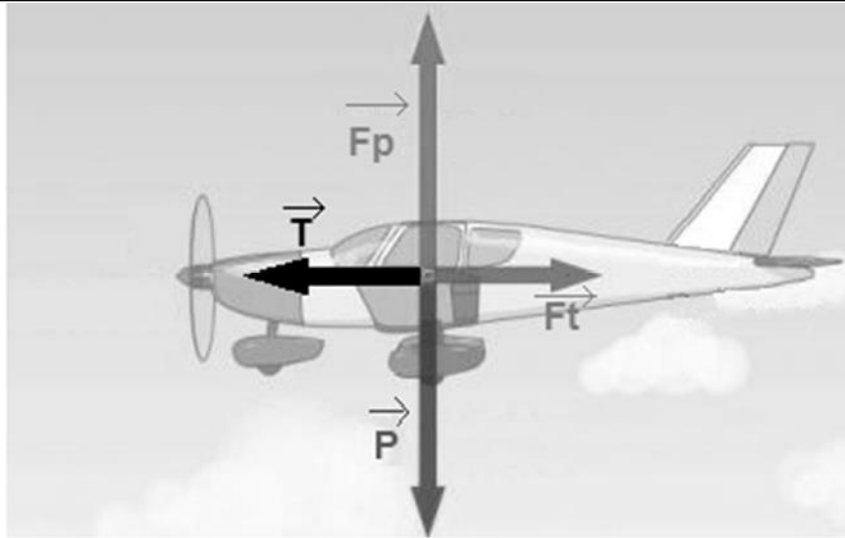


Schéma des quatre forces s'exerçant sur l'avion en vol à vitesse constante

- **Le poids.** C'est la force d'attraction gravitationnelle exercée par la Terre sur l'avion. Sa valeur vaut : $m \cdot g$
(m : masse de l'avion en kg ; g : intensité de la pesanteur terrestre valant $9,81 \text{ N.kg}^{-1}$)
- **La poussée ou traction.** Elle est dirigée dans le sens et la direction du mouvement.
- **La portance.** Elle est due au déplacement de l'air autour des ailes profilées. Elle vaut : $0,5 \cdot \rho \cdot S \cdot C_z \cdot v^2$
(ρ : masse volumique de l'air en kg m^{-3} ; S : surface des ailes en m^2 ; v : vitesse de déplacement en m.s^{-1} ; C_z : coefficient de portance sans unité)
- **La traînée.** Cette force est la somme des résistances aérodynamiques qui s'opposent au mouvement. Elle vaut : $0,5 \cdot \rho \cdot S_f \cdot C_x \cdot v^2$
(ρ : masse volumique de l'air en kg.m^{-3} ; C_x : coefficient de traînée ; S_f : surface frontale en m^2 ; v : vitesse de déplacement en m.s^{-1})

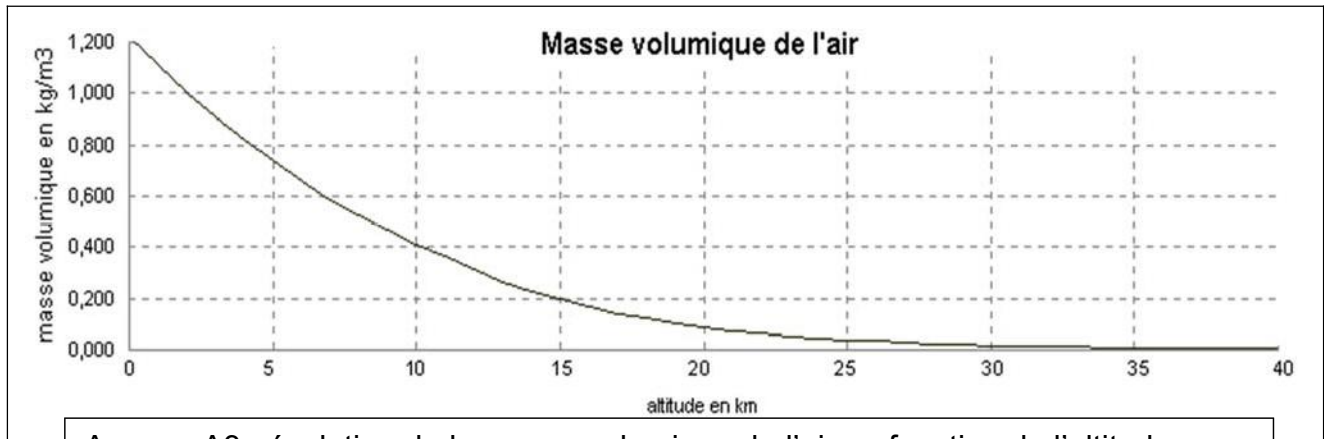
Annexe A1 : un avion en vol est soumis à quatre forces

Vitesse de l'avion : Solar Impulse 2 peut voler à la vitesse d'une voiture, entre 36 km.h^{-1} et 140 km.h^{-1} .

Au niveau de la mer : vitesse minimale de 36 km.h^{-1} et maximale de 90 km.h^{-1} .

À l'altitude maximale de 9000 m : vitesse minimale de 57 km.h^{-1} et maximale de 140 km.h^{-1}
Sa vitesse de décollage est de 47 km.h^{-1} .

Annexe A2 : vitesse de l'avion Solar Impulse 2



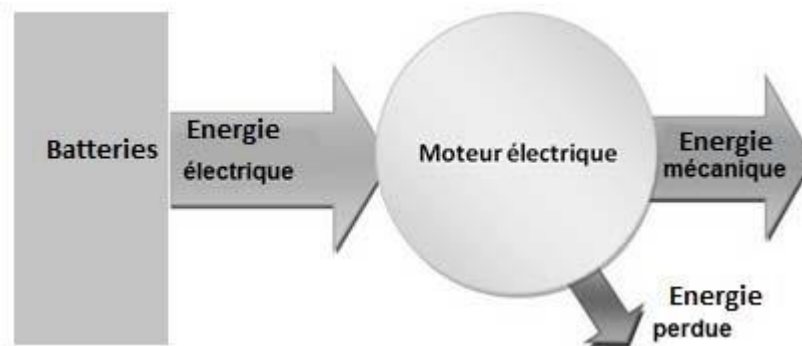
Annexe A3 : évolution de la masse volumique de l'air en fonction de l'altitude

Partie B : le challenge énergétique à relever

B.1. La puissance des moteurs

B.1.1. En s'appuyant sur les caractéristiques de l'avion et l'annexe B1, montrer que la puissance maximale développée par les quatre moteurs fonctionnant ensemble est de 51,5 kW.

Le diagramme d'énergie d'un moteur électrique est le suivant :



B.1.2. Compte tenu du rendement du moteur donné dans l'annexe B2, montrer que la puissance électrique absorbée par les quatre moteurs fonctionnant à pleine puissance est de 54,8 kW.

B.2. L'énergie stockée dans les batteries

B.2.1. En utilisant l'annexe B3, déterminer en kW.h l'énergie maximale pouvant être stockée dans les batteries de l'avion.

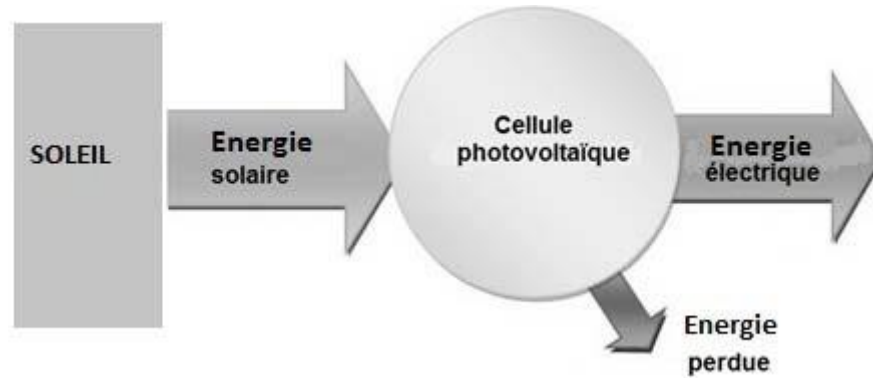
B.2.2. En admettant que les quatre moteurs fonctionnent à pleine puissance, montrer que la durée maximale d'utilisation des batteries serait alors de 3,0 heures.

B.3. Le vol de jour

Le jour, l'avion est soumis à une puissance solaire surfacique moyenne de 1000 W.m^{-2} .

B.3.1. Calculer, en kW, la puissance solaire reçue par les $269,5 \text{ m}^2$ de cellules solaires de l'avion.

B.3.2. Le diagramme des puissances d'une cellule solaire est le suivant :



En tenant compte du rendement de 23 % des cellules solaires, montrer que la puissance électrique que peuvent fournir les cellules solaires de l'avion est de 62,0 kW.

B.3.3. En justifiant la réponse, indiquer si cette puissance est suffisante pour alimenter les quatre moteurs fonctionnant à pleine puissance.

B.3.4. En admettant que 25 % de la puissance électrique produite par les cellules solaires est en moyenne utilisée pour la recharge des batteries, calculer la durée d'exposition solaire nécessaire pour recharger intégralement les batteries de l'avion.

B.3.5. Quel type d'énergie est utilisé pour la propulsion de l'avion durant le vol de jour ?

B.3.6. Compléter le diagramme en énergie de l'avion solaire volant de jour donné au document-réponse DR1 page 13.

B.4. Le vol de nuit

B.4.1. En vous appuyant sur l'annexe B4, indiquer la forme d'énergie utilisée pour la propulsion de l'avion en début de nuit (après 21 h 30) puis en fin de nuit.

B.4.2. En admettant qu'à 7 heures du matin l'avion reprend les conditions énergétiques du vol de jour, calculer la durée pendant laquelle les batteries doivent assurer l'alimentation des moteurs.

B.4.3. Compte tenu du résultat précédent et de celui de la question B.2.2., expliquer pourquoi l'avion ne peut pas adopter une vitesse maximale durant cette phase de vol à 1500 m d'altitude.

B.4.4. Compléter le diagramme en énergie de l'avion solaire volant de nuit donné au document-réponse DR2 page 13.

ANNEXES DE LA PARTIE B

Le cheval-vapeur : C'est une unité de puissance, ne faisant pas partie du système international d'unités, qui exprime une équivalence entre la puissance fournie par un cheval tirant une charge et celle fournie par une machine de propulsion à vapeur. Le cheval était, du fait de son utilisation massive, la référence de puissance des attelages avant l'avènement de la propulsion mécanique. Par exemple, en 1879, les 38 lignes d'omnibus de Paris requéraient l'entretien de 16 500 chevaux. 1 ch = 735,5 W.

Annexe B1 : le cheval-vapeur (ch)

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Cheval-vapeur>

Quatre moteurs brushless sensorless de 17,5 ch chacun fixés sous les ailes, munis d'un réducteur limitant à 525 tours.min⁻¹ la rotation d'une hélice bipale de 4 mètres de diamètre. L'ensemble comporte un rendement de 94%, ce qui en fait un record d'efficacité énergétique.

Annexe B2 : motorisation du Solar Impulse 2

L'énergie collectée par les cellules solaires est stockée dans des batteries au lithium polymère, d'une densité énergétique de 260 W.h.kg⁻¹. Réparties dans les quatre nacelles et isolées dans une mousse de haute densité, avec un système de contrôle des seuils de charge et de température, leur masse totale est de 633 kg.

Annexe B3 : caractéristiques des batteries

...à 18h43, Solar Impulse atteignait 8720 mètres, altitude où la température extérieure se traduisait par -20 °C dans le cockpit. Le froid et la fatigue étaient les seules difficultés éprouvées par le pilote. Chaque étape de la mission se déroulait parfaitement. Après 14 heures et demie de vol, à 21h30, son pilote éteignait le générateur solaire. Une demi-heure plus tard, le soleil se couchait. L'avion solaire s'enfonçait dans la nuit. Pendant quatre heures, l'avion a volé sans apport d'électricité, uniquement en se laissant descendre... En effet, plus l'avion monte haut, plus sa descente est longue. Au début de la nuit, la perte d'altitude de *Solar Impulse 2* s'est cependant avérée plus rapide que prévu. Mais, grâce aux instructions de l'équipe MISSION, le pilote a pu éviter les zones de vents descendants et prolonger son vol plané. L'avion se trouvait à un peu moins de 1500 mètres, altitude à laquelle il devait être maintenu jusqu'au lever du soleil...lorsque son pilote a alors commuté sur l'énergie des batteries. Le surplus d'électricité accumulé pendant la journée servait désormais à l'alimentation des moteurs.

http://www.solarimpulse.com/pdf/edu/fr/fiche_11_fr.pdf

Annexe B4 : le vol de nuit

Partie C : les cellules photovoltaïques à haut rendement

C.1. Le rayonnement solaire

C.1.1. À l'aide du spectre du rayonnement solaire donné dans l'annexe C1, quelle(s) espèce(s) chimique(s) est(sont) la cause d'une partie de l'absorption du rayonnement solaire constatée au niveau de la mer pour le rayonnement UV, puis pour le rayonnement infrarouge ?

C.1.2. Quel risque représente le rayonnement UV pour l'homme ?

C.1.3. En le justifiant, dire si le danger est plus important à basse ou à haute altitude.

C.2. Le choix des cellules photovoltaïques

On donne quelques caractéristiques de trois types de cellules photovoltaïques existantes :

Type de matériaux de la cellule	Durabilité	Rendement typique en %	Rendement maximum en %	Coût de fabrication
Silicium monocristallin	supérieure à 20 ans	de 15 à 20	25	+++
Silicium polycristallin	supérieure à 20 ans	de 12 à 16	20	++
Silicium amorphe	20 ans	de 5 à 8	13	+

<http://www.panneau-solaire-souple.com/technologies-photovoltaïques/comparatif/>

C.2.1. Expliquer pourquoi les concepteurs de l'avion *Solar Impulse 2* ont retenu les cellules en silicium monocristallin.

C.2.2. Le rendement de 23 % des cellules photovoltaïques de *Solar Impulse 2* est l'un des meilleurs rencontrés pour ce type de convertisseur d'énergie à l'heure actuelle. Ce rendement peut-il être qualifié de bon pour un convertisseur d'énergie ? Justifier la réponse.

C.3. L'effet photoélectrique

Les théories actuelles associent à chaque onde électromagnétique du rayonnement solaire une particule appelée photon dont l'énergie est donnée par la relation de Planck :

$$E = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

Avec : E : énergie du photon (J) ; ν : fréquence de l'onde électromagnétique (Hz) ; c : célérité de la lumière dans le vide (m.s^{-1}) ; λ : longueur d'onde de l'onde électromagnétique (m).

Données :

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1} \quad h = 6,62 \times 10^{-34} \text{ m}^2.\text{kg.s}^{-1} \quad 1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J} \quad 1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}$$

Seuls les photons dont l'énergie est supérieure à $E_g = 1,12 \text{ eV}$ (appelé gap du silicium) peuvent libérer un électron qui participera au courant électrique délivré par la cellule photovoltaïque en silicium.

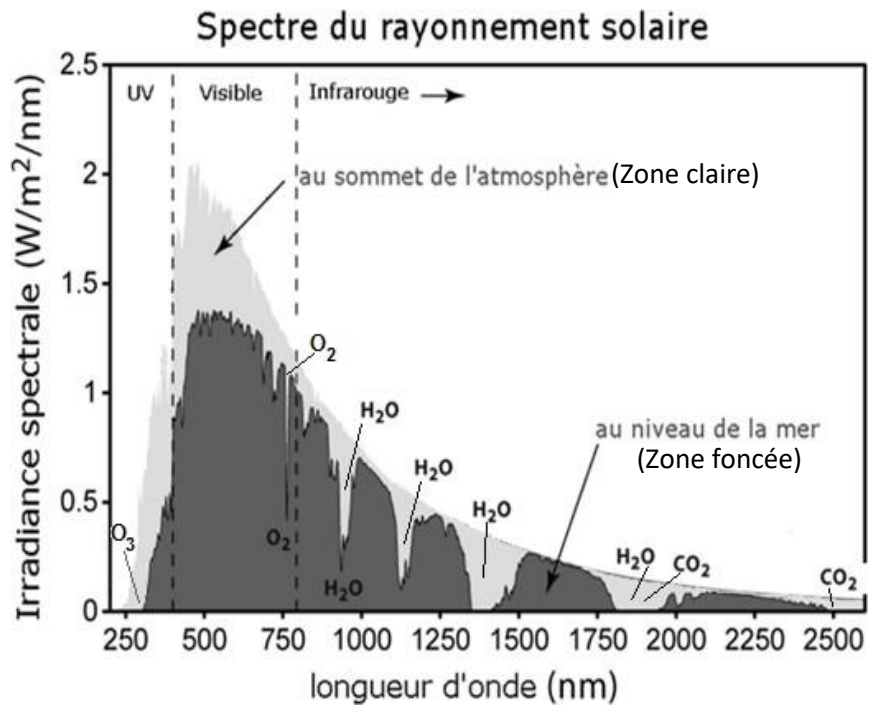
C.3.1. Déterminer en nm la longueur d'onde de l'onde électromagnétique dont le photon a une énergie égale au gap du silicium. Dans quel domaine d'onde se situe cette radiation ?

C.3.2. En s'appuyant sur l'annexe C2, indiquer à quelle(s) zone(s) (A, B ou C) correspondent les photons potentiellement utiles à la production d'énergie électrique par le silicium ?

ANNEXES DE LA PARTIE C

Avec sa température d'émission de 5500°C , le soleil rayonne des ondes électromagnétiques dont le maximum d'émission est dans le jaune ($\lambda = 570 \text{ nm}$). La lumière visible représente 46 % de l'énergie totale émise par le soleil et le rayonnement infrarouge en représente 49 %.

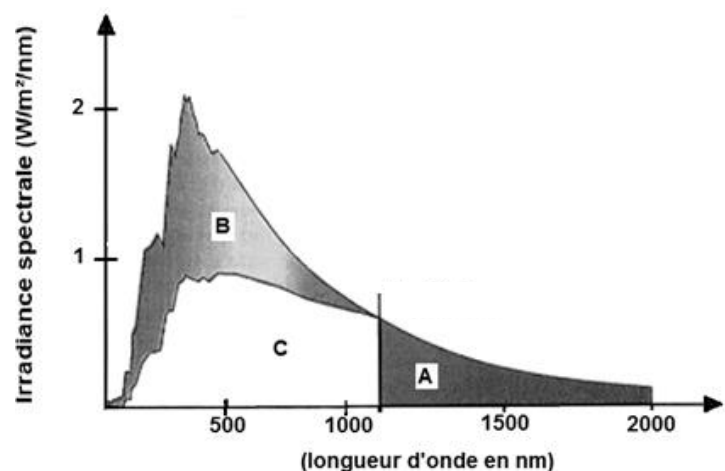
C'est ce rayonnement que nous ressentons comme une onde de chaleur. Le reste du rayonnement solaire est émis dans l'ultraviolet (UV). Après avoir traversé toute l'atmosphère terrestre, ce rayonnement solaire arrive au niveau de la mer. Une partie du rayonnement solaire a été absorbée comme le montre la figure ci-contre.



D'après http://fr.wikipedia.org/wiki/Rayonnement_solaire

Annexe C1 : le rayonnement solaire

Les photons ayant une énergie inférieure à E_g ne peuvent pas être utilisés par le silicium pour produire de l'énergie électrique et leur énergie est donc convertie en énergie thermique. L'énergie perdue par ces photons non-absorbés représente 23,5 % de l'énergie solaire. Les photons ayant une énergie supérieure à E_g peuvent eux déloger un électron utile, mais l'énergie excédentaire sera perdue elle aussi. Cet excès d'énergie représente quant à lui 33% de l'énergie solaire. C'est ce que montre le schéma ci-contre. À ces pertes, s'ajoutent celles du facteur de forme, de la réflexion et de la surface des collecteurs.



D'après <http://ines.solaire.free.fr/solpv/page4.html>

Annexe C2 : les photons utiles de l'effet photoélectrique pour le silicium

Partie D : Atterrissage de l'avion.

L'avion a une phase d'approche et commence à ralentir. On suppose que les forces ont les valeurs suivantes :

$$T = 2.2 \cdot 10^4 \text{ N}, \text{ et } F_T = 3 \cdot 10^4 \text{ N}$$

1 - Donner l'expression du travail $W_{app}(\vec{T})$ de la force $\vec{T}$, en fonction uniquement de la force de traction T et de la distance d'approche d_{app} parcourue lors de la phase d'approche. Ce travail est-il moteur ou résistant ? justifier.

2 - Donner l'expression du travail $W_{app}(\vec{F}_T)$ de la force $\vec{F}_T$, en fonction uniquement de la force de traction F_T et de la distance d'approche d_{app} parcourue lors de la phase d'approche. Ce travail est-il moteur ou résistant ? justifier.

3- Montrer que la somme des travaux des 4 forces qui s'exercent sur l'avion a pour expression :

$$\sum W(\vec{F}) = (T - F_T) \cdot d_{app}.$$

4- L'avion commence sa phase d'approche au point A avec une Vitesse $v_A = 140 \text{ km.h}^{-1}$ et terminera sa phase d'approche au point B avec une Vitesse $v_B = 102 \text{ km.h}^{-1}$.

a- Calculer l'énergie cinétique de l'avion au point A, $E_c(A)$ puis au point B, $E_c(B)$.

b- En appliquant le théorème de l'énergie cinétique, calculer déduire la distance approche d_{app} .

Rappel : Dans un référentiel galiléen, entre l'instant initial t_i où le point matériel est en A et le temps t_f où le point matériel est en B, la variation de l'énergie cinétique est égale à la somme des travaux des forces de A à B.

Partie E : Système de chauffage du fluide

L'avion dispose d'un système de chauffage d'eau pour entretenir une température optimale de 21°C dans l'avion, la mesure de la vitesse d'eau dans un tuyau de $d_1 = 12 \text{ cm}$ de diamètre a donné une valeur $v_1 = 1,2 \text{ m.s}^{-1}$.

1- Calculer le débit d'eau Q en $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ puis en l.s^{-1} .

2- Calculer le débit massique Q_m , la masse volumique d'eau : $\rho = 1\text{kg.l}^{-1}$

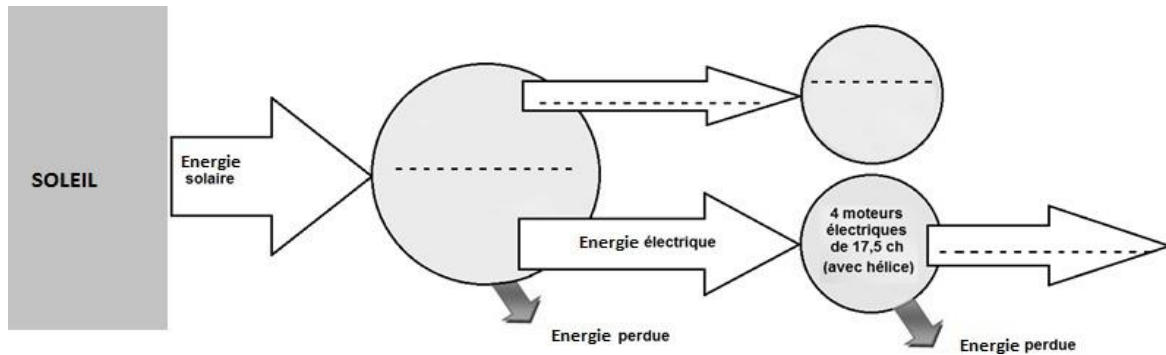
3- Quelle est la Vitesse d'eau v_2 si cette eau repasse par un autre tuyau de diamètre $d_2 = 8 \text{ cm}$.

4- La volume d'eau dans toute la tuyauterie approche les 160 l, au bout de combien de temps on aura fait la vidange?

Nom : Prénom : Classe :

DOCUMENTS-RÉPONSES À RENDRE AVEC LA COPIE

DR1- Diagramme des puissances en jeu lors du vol de jour



DR2 - Diagramme des puissances en jeu lors du vol en fin de nuit

