

Session 2017

BACCALAURÉAT TECHNOLOGIQUE

PHYSIQUE – CHIMIE

Sciences et Technologies de Laboratoire

Spécialité Biotechnologies

Temps alloué : 3 heures

Coefficient : 4

La calculatrice (conforme à la circulaire n° 99-11-99) est autorisée.

Ce sujet comporte 13 pages.

La page 13/13 est à rendre avec la copie.

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 quatre parties indépendantes les unes des autres :

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

Partie B : le challenge énergétique à relever. (6,25 points)

Partie C : les cellules photovoltaïques à haut rendement. (4,25 points)

Partie D : les batteries Lipo. (4 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

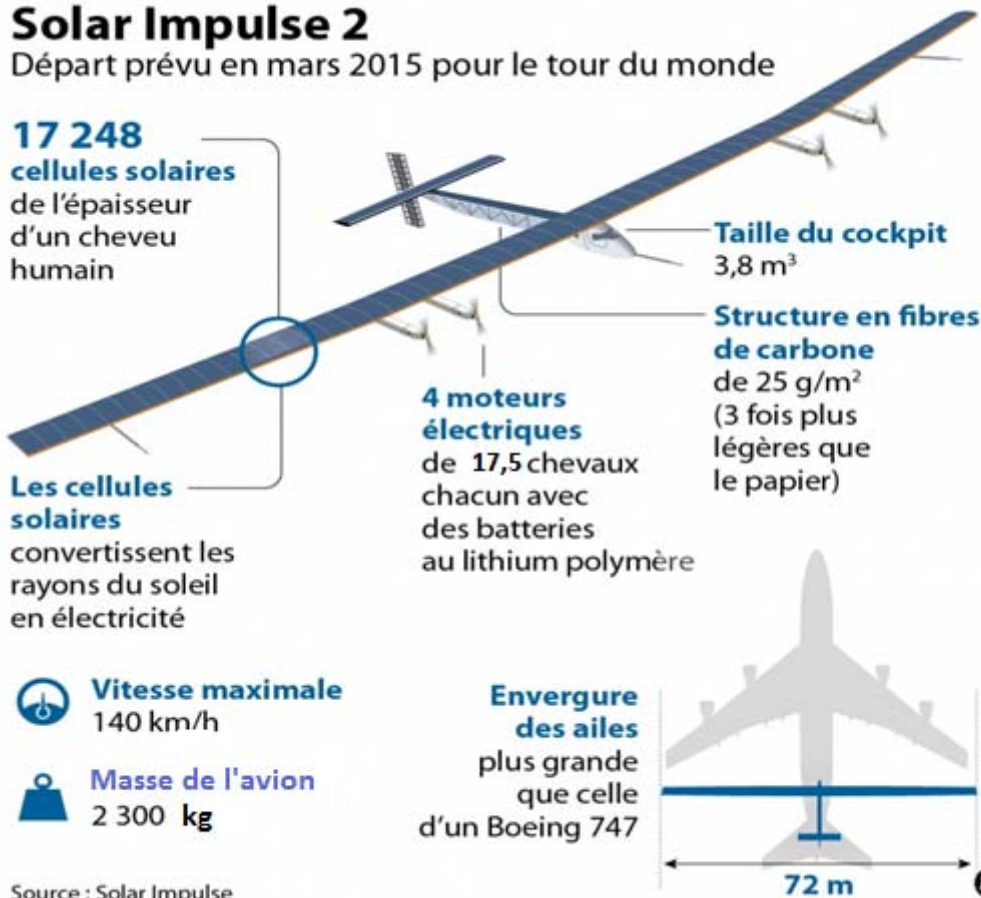


Vitesse maximale
140 km/h



Masse de l'avion
2 300 kg

Source : Solar Impulse



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, dire quelle condition doit remplir la force de portance pour que l'avion décolle.

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 $36 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Cette vitesse est appelée vitesse de décrochage.

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

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 $2330 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. 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 $25 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. Préciser ce qu'est un matériau composite.



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

ANNEXES DE LA PARTIE A

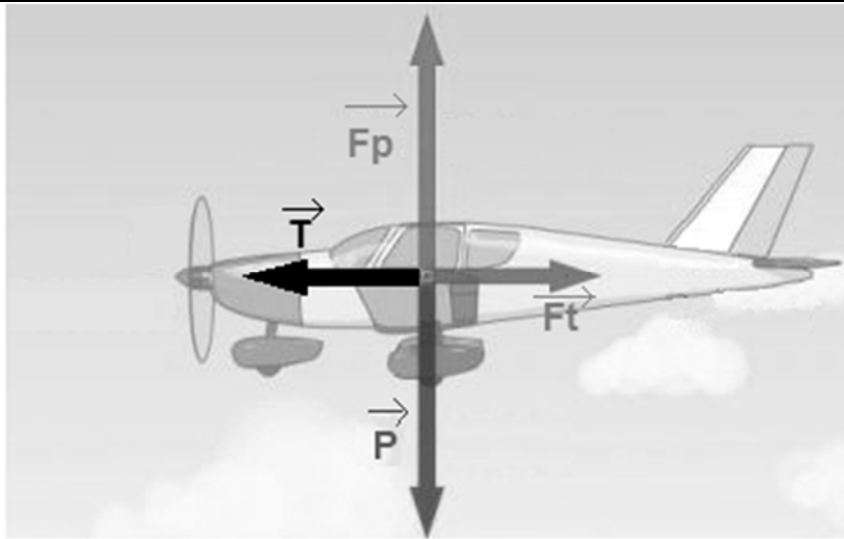


Schéma des quatre forces s'exerçant sur l'avion en vol à vitesse constante

- **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 $9,81 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$)
- **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 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; S : surface des ailes en m^2 ; v : vitesse de déplacement en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; 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 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; C_x : coefficient de traînée ; S_f : surface frontale en m^2 ; v : vitesse de déplacement en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

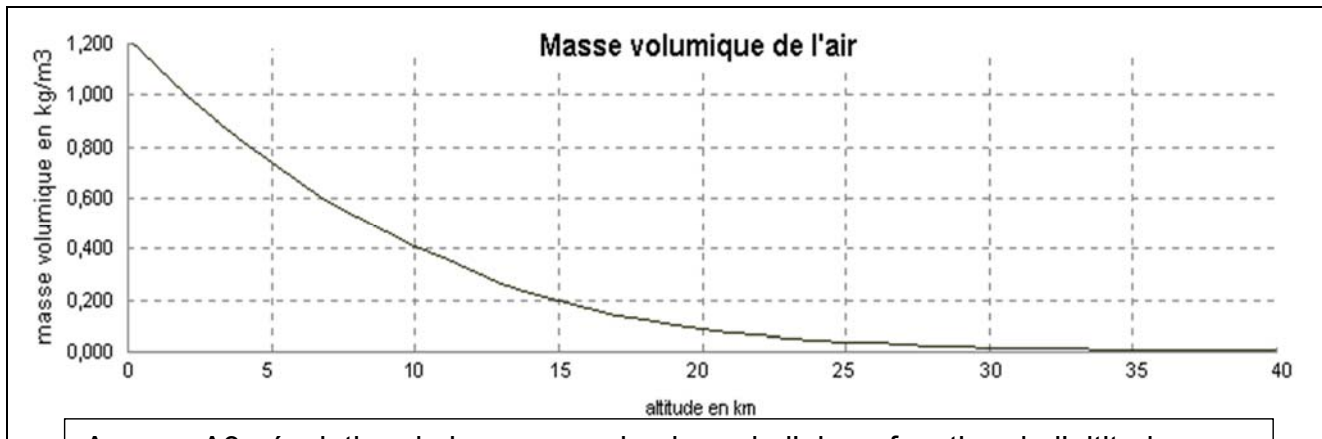
Annexe A1 : un avion en vol est soumis à quatre forces

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

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

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

Annexe A2 : vitesse de l'avion Solar Impulse 2



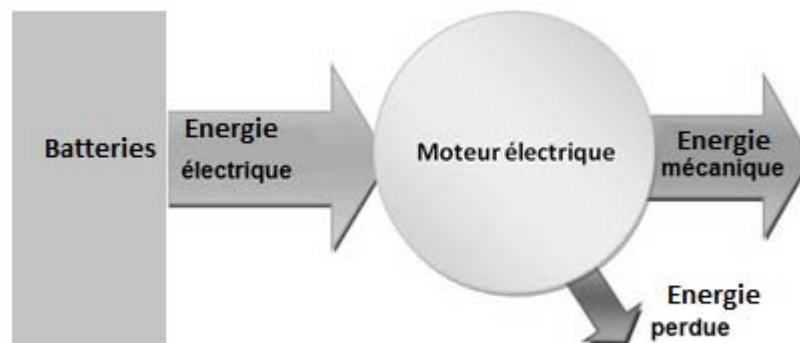
Annexe A3 : évolution de la masse volumique de l'air en fonction de l'altitude

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.

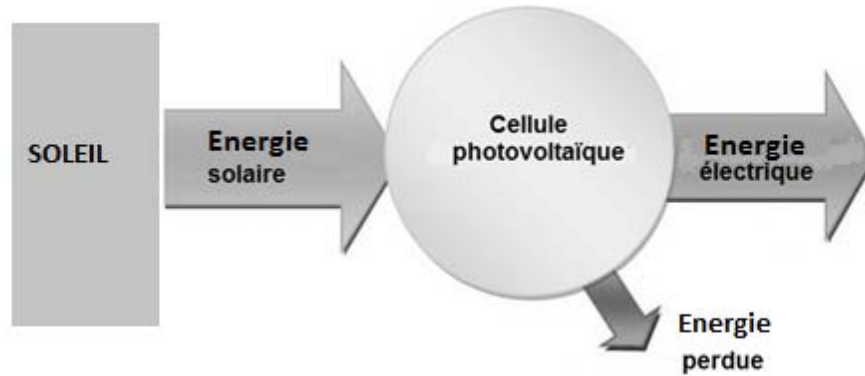
B.2.2. En admettant que les quatre moteurs fonctionnent à pleine puissance, montrer que la durée maximale d'utilisation des batteries serait alors de 3,0 heures.

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 ($m \cdot s^{-1}$) ; λ : longueur d'onde de l'onde électromagnétique (m).

Données :

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

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.

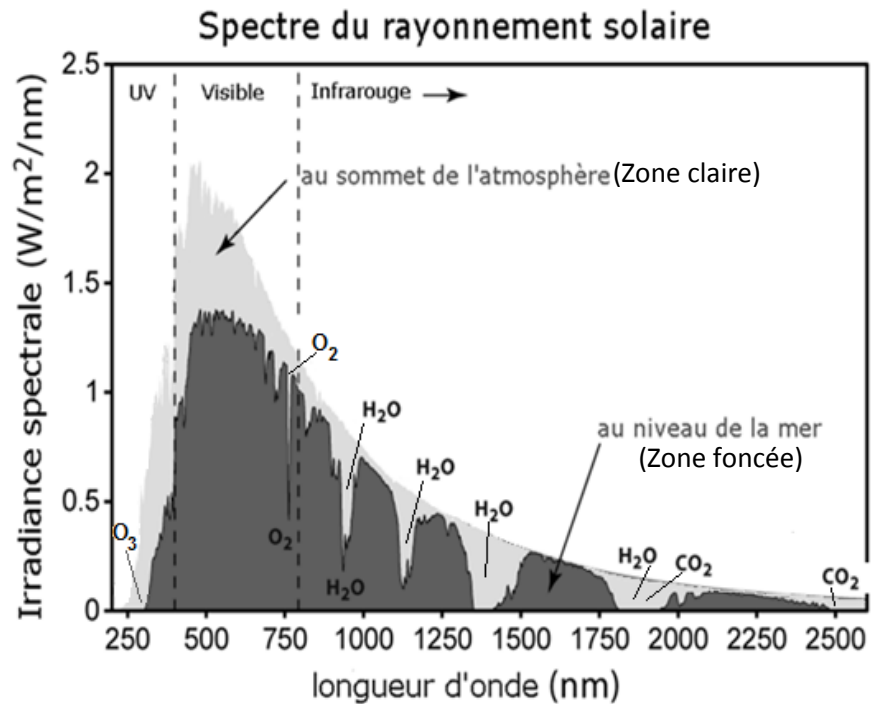
C.3.1. Déterminer en nm la longueur d'onde de l'onde électromagnétique dont le photon a une énergie égale au gap du silicium. Dans quel domaine d'onde se situe cette radiation ?

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 %.

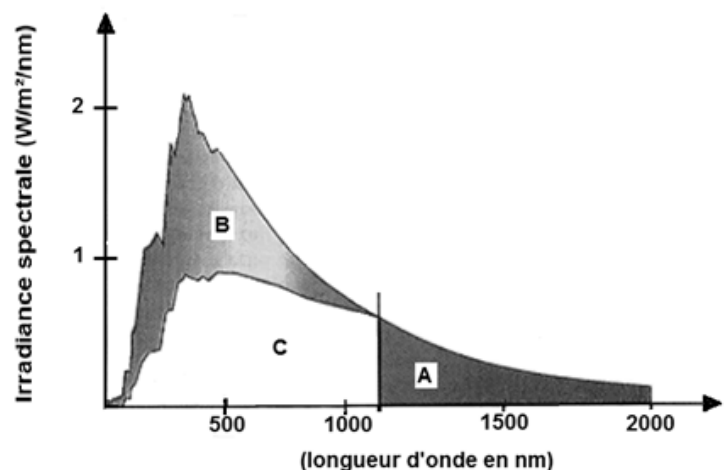
C'est ce rayonnement que nous ressentons comme une onde de chaleur. Le reste du rayonnement solaire est émis dans l'ultraviolet (UV). Après avoir traversé toute l'atmosphère terrestre, ce rayonnement solaire arrive au niveau de la mer. Une partie du rayonnement solaire a été absorbée comme le montre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

D.1. Le choix des batteries

D.1.1. En exploitant l'annexe D1, préciser pourquoi les batteries au lithium ont un avantage considérable sur les autres batteries pour le projet *Solar Impulse 2*.

D.1.2. À partir de l'annexe D2, indiquer les avantages qui ont vraisemblablement guidé les ingénieurs de *Solar Impulse 2* dans le choix des batteries Lipo plutôt que Li-ion.

Le fonctionnement d'une batterie Lipo est similaire au fonctionnement d'une batterie Li-ion décrit dans l'annexe D3.

D.1.3. D'après l'annexe D3, indiquer la conséquence de l'amélioration apportée par les nanotechnologies lors de la recharge de nos batteries au lithium dans le futur proche.

D.2. Fonctionnement en générateur des batteries au lithium

Lors de la décharge d'une batterie les réactions chimiques intervenant aux électrodes sont modélisées de façon simplifiée par les équations chimiques ci-après :

- sur l'électrode en graphite : $\text{Li} = \text{Li}^+ + \text{e}^-$

- sur l'électrode en oxyde de cobalt : $\text{CoO}_2 + \text{Li}^+ + \text{e}^- = \text{CoLiO}_2$

D.2.1. En le justifiant, dire quelle électrode de la batterie Li-ion est le siège d'une oxydation.

D.2.2. Indiquer sur le document-réponse DR 3 page 13, le sens de circulation et le nom des porteurs de charge responsables du passage du courant dans les différentes parties du circuit ainsi que les polarités de la batterie lors de son fonctionnement en générateur.

D.3. Fonctionnement en récepteur des batteries au lithium

D.3.1. Indiquer sur le document-réponse DR 4 page 13, le sens de circulation et le nom des porteurs de charge responsables du passage du courant dans les différentes parties du circuit ainsi que les polarités de la batterie lors de son fonctionnement en récepteur.

D.3.2. Écrire les équations chimiques intervenant aux deux électrodes.

D.3.3. Sur quelle électrode intervient l'oxydation ?

ANNEXES DE LA PARTIE D

Type de batterie	Énergie massique (W.h.kg ⁻¹)	Nombre de cycles	Auto-décharge par mois en %	Tension d'un élément (V)	Avantages	Inconvénients
Au Plomb (Pb)	30-50	400-1200	5	2,1	Faible coût	Faible puissance
Nickel – Cadmium (NiCd)	45-65	1000-2000	20	2,3	Performance à froid	Effet mémoire, toxicité, peu de puissance
Nickel Métal Hydrure (NiMH)	55-80	500-1500	30	1,3	Énergie massique correcte	Coût
Batterie au Lithium (Li ion et Lipo)	150-200	500-1200	10	3,6	Pas d'effet mémoire, énergie massique importante	Coût

Annexe D1 : tableau comparatif de quatre technologies de batterie

La batterie lithium occupe aujourd'hui une place prédominante sur le marché de l'électronique portable (téléphone et ordinateur) et des véhicules électriques. On distingue deux types de batteries : les batteries Lithium ion (Li-ion) et les batteries Lithium ion polymère (Lipo). Dans la batterie Li-ion, l'électrolyte est constitué de sels de lithium dissous dans un solvant liquide. Dans la batterie Lipo, l'électrolyte est un gel polymère contenant également des sels de lithium.

Les avantages de la Lipo par rapport à la Li-ion sont :

- batterie pouvant prendre des formes fines et variées,
- batterie pouvant être déposée sur un support flexible,
- faible poids (la Lipo permet d'éliminer l'enveloppe de métal lourde du Li-Ion),
- plus sûre que les Li-ion (plus résistante à la surcharge et aux fuites d'électrolytes).

Les faiblesses de la Lipo par rapport à la Li-Ion sont :

- plus chère,
- charge soumise à des règles strictes en terme de charge/décharge.

<http://www.velo-electrique.com/Pages/batteries.htm> On distingue deux catégories d'électrolytes

Annexe D2 : différents types de batterie au lithium

L'anode de la batterie est constituée de lithium inséré dans du carbone ; la cathode d'oxyde de manganèse ou de cobalt. Lors de la décharge de la batterie, des ions lithium Li^+ sont générés à l'anode et migrent à travers l'électrolyte vers la cathode, pendant qu'une circulation de charges négatives, des électrons, intervient dans le circuit électrique extérieur. Lors de la recharge de la batterie, le procédé s'inverse. Le temps de recharge d'une batterie dépend de la vitesse à laquelle les porteurs de charge (ions et électrons) vont pouvoir se déplacer dans le dispositif.

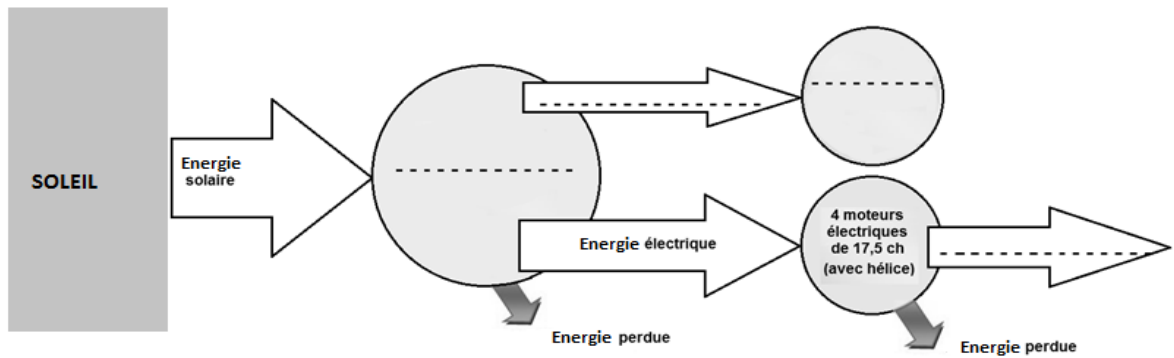
Le challenge de la conception de ce type de batterie repose sur l'utilisation d'un matériau d'électrode permettant l'insertion, lors de la décharge, et l'éjection de l'ion lithium, lors de la charge. Les oxydes sont très souvent utilisés mais limitent les performances de la batterie. En effet, le lithium a du mal à s'insérer dans la structure cristalline et le courant circule donc à faible vitesse dans la batterie. Actuellement, la recherche s'oriente sur la conception de nanomatériaux pour la cathode, permettant une insertion des ions et une circulation des électrons plus rapides.

<http://www.cvc.u-psud.fr/spip.php?article171>

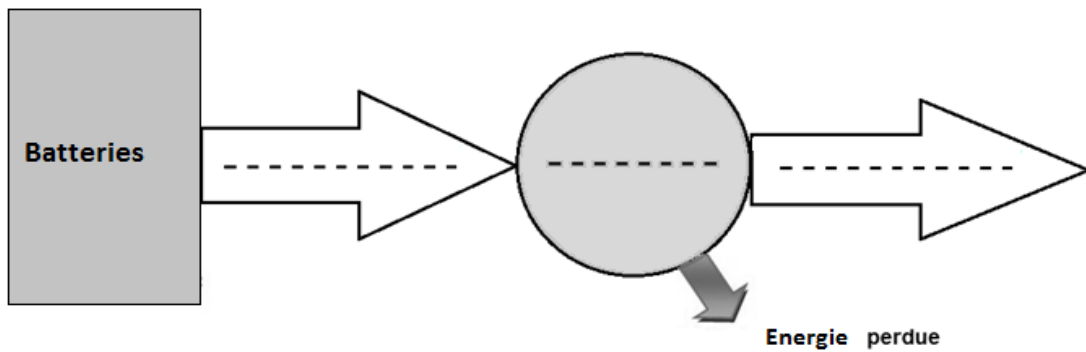
Annexe D3 : fonctionnement des batteries Li-ion

DOCUMENTS-RÉPONSES À RENDRE AVEC LA COPIE

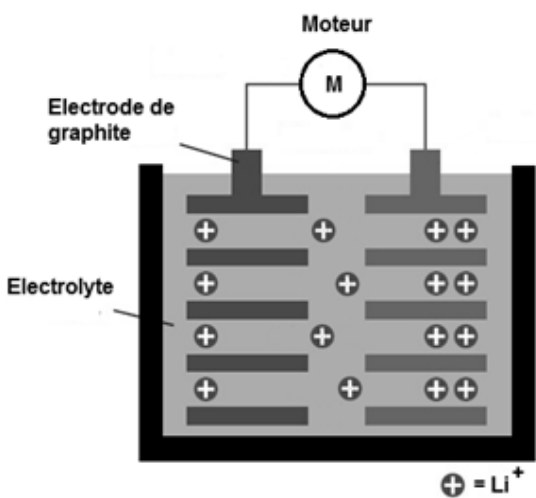
DR1- Diagramme des puissances en jeu lors du vol de jour



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

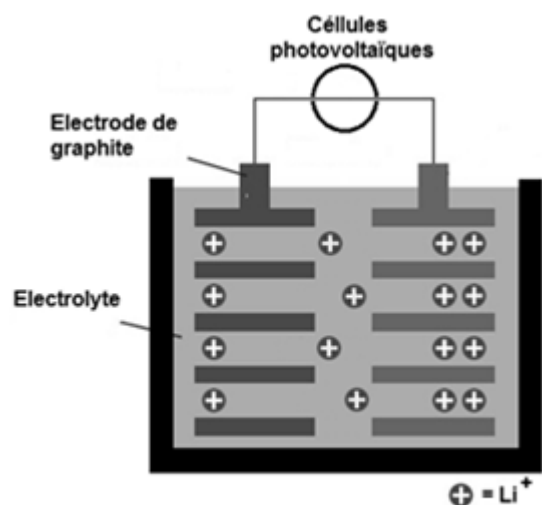


DR3 - Circulation des porteurs de charges en fonctionnement générateur



Batterie en fonctionnement générateur

DR4 - Circulation des porteurs de charges en fonctionnement récepteur



Batterie en fonctionnement récepteur