

BACCALAURÉAT TECHNOLOGIQUE

SESSION 2019

Série STI2D
Toutes spécialités

Série STL
Spécialité sciences physiques et chimiques en laboratoire

PHYSIQUE – CHIMIE

DURÉE : 3 HEURES

COEFFICIENT : 4

*L'USAGE DE TOUT MODÈLE DE CALCULATRICE,
AVEC OU SANS MODE EXAMEN, EST AUTORISÉ.*

Ce sujet comporte 14 pages numérotées de la page 1/14 à la page 14/14.

Avant de composer, assurez-vous que l'exemplaire qui vous a été remis est bien complet.

Les pages 13/14 à 14/14 où figurent les documents réponses sont à numéroté et à rendre avec la copie même non complétées.

Lors des applications numériques, les résultats seront donnés avec un nombre de chiffres significatifs cohérent avec ceux de l'énoncé et une attention particulière sera portée aux unités utilisées.

La clarté des raisonnements et la qualité de la rédaction interviendront dans l'appréciation des copies.

Les parties du sujet sont indépendantes et peuvent être traitées séparément dans l'ordre choisi par la candidate ou le candidat.

SOLAR IMPULSE 2

Solar Impulse 2 est un projet d'avion solaire entrepris à l'initiative des Suisses Bertrand Piccard et André Borschberg, à l'École polytechnique fédérale de Lausanne. Les deux pilotes en assurent le développement depuis 2003.

Le projet vise à construire puis à faire voler de nuit comme de jour un avion monospace, sans carburant ni émission polluante pendant le vol, jusqu'à effectuer un tour du monde.



André Borschberg entamait le 9 mars 2015 à Abu Dhabi la première étape du tour du monde solaire, réalisé avec son collègue et fondateur du projet Bertrand Piccard.

Le 26 juillet 2016 sonnait la fin d'un extraordinaire périple. Initialement prévu en 5 mois, il aura fallu 17 étapes et près d'un an et demi d'attente pour que les deux pilotes arrivent au bout de leur voyage, un problème survenu au niveau des batteries ayant immobilisé l'avion pendant 8 mois à Hawaï.



Grâce à sa technologie, Solar Impulse 2 a ainsi pu voler à une vitesse moyenne de 80 km/h et à une altitude maximale de 8 500 m, et atteindre un record de cinq jours et cinq nuits de vol consécutifs sans carburant.

En lien avec le projet Solar Impulse 2, le sujet aborde trois parties distinctes :

PARTIE A – LA PRODUCTION ET LE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE

PARTIE B – LE MATÉRIAU DU SQUELETTE

PARTIE C – LE VOL DE CROISIÈRE ET SA CONSOMMATION

PARTIE A – LA PRODUCTION ET LE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE

A.1 Les technologies mises en œuvre

A.1.1 À partir du document A-1 de la page 3, énumérer les trois principales technologies utilisées pour l'élaboration de Solar Impulse 2.

A.1.2 Pour chacune de ces technologies, proposer un exemple d'utilisation dans un autre domaine que celui de l'aérospatial.

A.1.3 Quels paramètres physiques les concepteurs ont-ils dû optimiser pour que le projet aboutisse ?

Document A-1

L'ambition de Solar Impulse est à la fois scientifique et technologique. Ce défi technologique est aussi celui d'une innovation industrielle, sans oublier la pratique sportive pratiquée par les pilotes. Solar Impulse repose sur des technologies éprouvées du début du XXI^e siècle, telles que les cellules photovoltaïques, les batteries au lithium-polymère et les matériaux en fibres de carbone ultra-légers. En ce qui concerne le projet, chaque élément de l'aéronef a été conçu et optimisé pour réduire sa masse, améliorer son aérodynamisme, réduire sa consommation d'énergie et augmenter l'efficacité des cellules photovoltaïques.

D'après : https://fr.wikipedia.org/wiki/Solar_Impulse (traduit de la version anglaise)

Document A-2

Caractéristiques générales

- Équipage : 1 personne
- Longueur : 22,4 m
- Envergure : 72,3 m
- Hauteur : 6,37 m
- 17 248 cellules photovoltaïques couvrent le haut des ailes, le fuselage et l'empennage sur une superficie totale de 270 m²
- Rendement des cellules photovoltaïques : 22,7 %
- Vitesse de décollage : 36 km/h
- Groupe motopropulseur : 4 moteurs électriques fournissant chacun 13,0 kW
- Batteries : 4 accumulateurs au lithium stockant chacun une énergie de 41,0 kW.h
- L'ensemble des 4 accumulateurs a une masse totale de 633 kg
- Diamètre de l'hélice : 4 m
- Masse de l'avion : 2 300 kg

Performance

- Vitesse maximale : 140 km/h
- Vitesse de croisière : 90 km/h le jour et 60 km/h la nuit pour économiser de l'énergie
- Plafond de service : 8 500 m

D'après : https://fr.wikipedia.org/wiki/Solar_Impulse

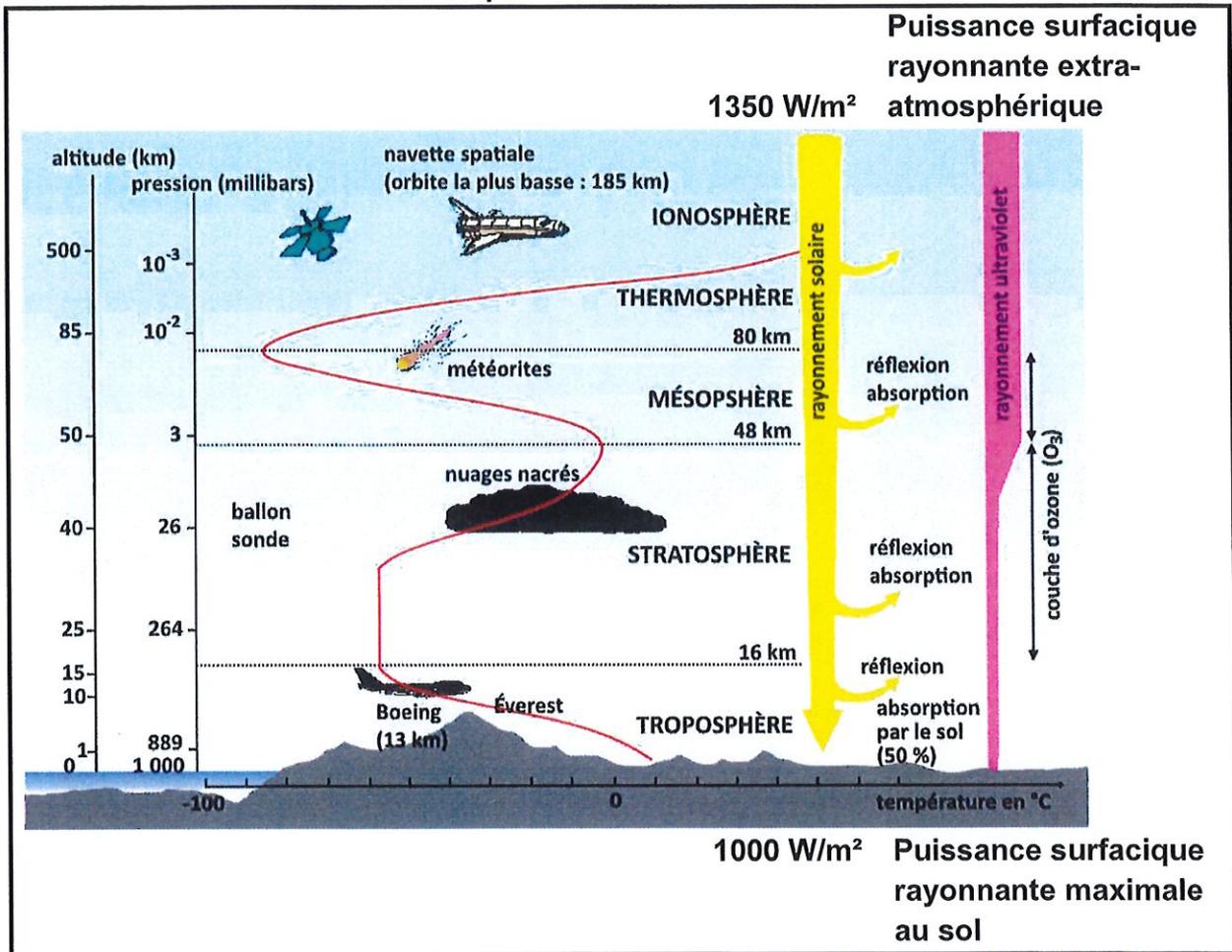
A.2 Les panneaux solaires

- A.2.1** À partir du **document A-3** de la **page 5**, quels sont les phénomènes physiques responsables de la différence entre l'énergie rayonnante extra-atmosphérique – située au-dessus de l'atmosphère terrestre – et l'énergie rayonnante arrivant jusqu'au sol.
- A.2.2** À partir des **documents A-2** de la **page 3** et **A-3** de la **page 5**, montrer que la puissance rayonnante maximale pouvant être absorbée au sol par l'ensemble des cellules photovoltaïques de Solar Impulse 2 s'élève à 270 kW.
- A.2.3** Compléter le schéma du bilan énergétique d'un panneau solaire photovoltaïque sur le **document-réponse DR1** de la **page 13** à rendre avec la copie.
- A.2.4** À partir du **document A-2** de la **page 3**, montrer que la puissance électrique maximale pouvant être fournie par l'ensemble des cellules photovoltaïques de Solar Impulse 2 vaut $P_{\text{elec}} = 61,3 \text{ kW}$.
- A.2.5** À partir du **document A-2** de la **page 3**, déterminer le rendement des moteurs électriques lorsqu'ils sont alimentés uniquement par l'ensemble des cellules photovoltaïques.

Les 17 248 cellules photovoltaïques sont en silicium monocristallin et chaque cellule photovoltaïque délivre une tension nominale de 3,58 V. Une branche est constituée de plusieurs cellules en série.

- A.2.6** Déterminer le nombre nécessaire de cellules dans une branche pour alimenter les batteries de 240 V.
- A.2.7** Montrer que le nombre de branches placées en dérivation vaut 257 et en déduire l'intensité nominale délivrée par chaque cellule.
- A.2.8** À partir du **document A-4** de la **page 5**, calculer l'énergie minimale, en joules, qu'un photon doit posséder pour arracher un électron du réseau du silicium.
Donnée : $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.
- A.2.9** En s'aidant du **document A-5** de la **page 6**, préciser dans quelle zone du spectre électromagnétique ce photon se situe.

Document A-3 : structure de l'atmosphère terrestre

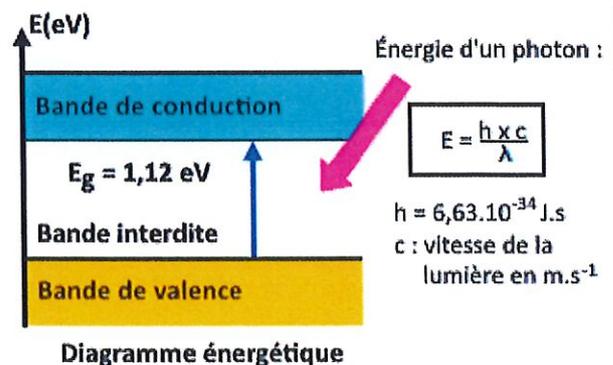


Source : [www.encyclo-ecolo.com/Atmosphère terrestre](http://www.encyclo-ecolo.com/Atmosphère_terrestre)

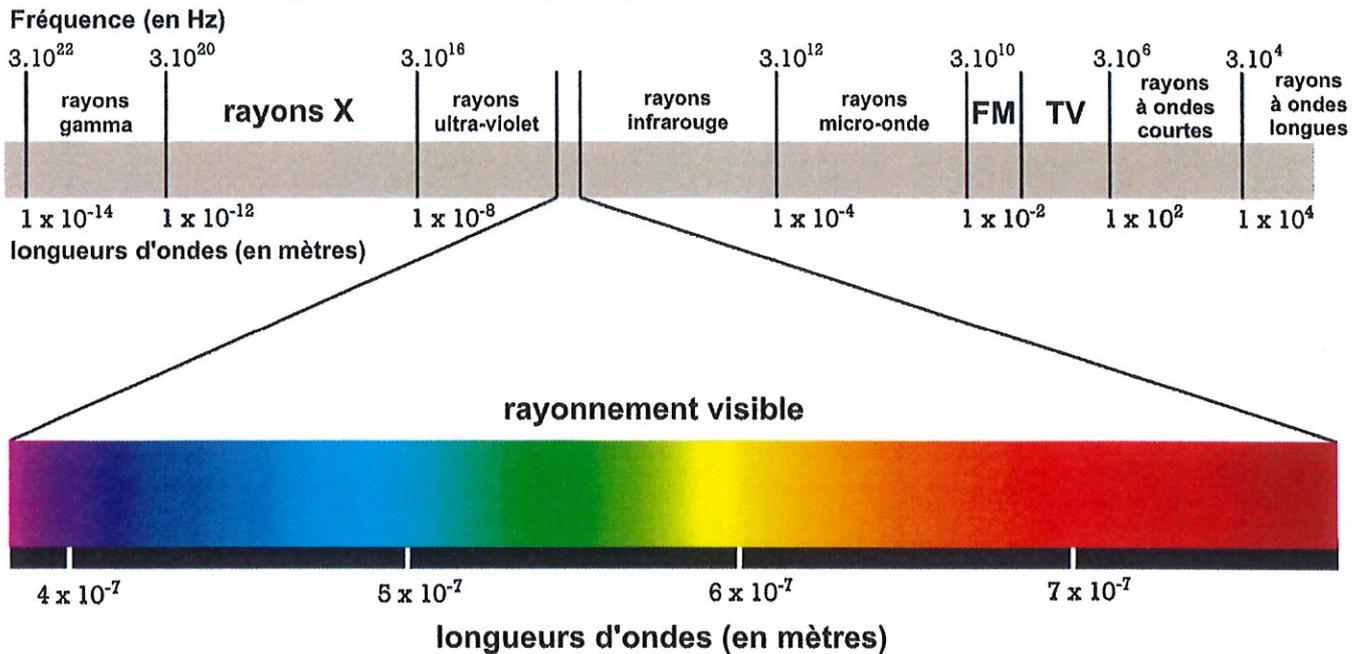
Document A-4

Pour les électrons d'un cristal de silicium (semi-conducteur présent dans les cellules photovoltaïques), il existe deux bandes d'énergie appelées l'une bande de conduction et l'autre bande de valence. Ces deux bandes sont séparées par une bande interdite inaccessible aux électrons.

Si l'énergie d'un photon incident est supérieure au gap ($E_g = 1,12 \text{ eV}$), alors l'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction et génère un courant électrique.



Document A-5 : spectre électromagnétique



A.3 Les batteries

A.3.1 À partir du **document A-2** de la **page 3**, déterminer l'énergie massique (en W.h.kg^{-1}) des batteries au lithium.

A.3.2 En comparant les données du **document A-6** de la **page 7** au résultat de la question précédente, justifier le choix des concepteurs de Solar Impulse 2 d'utiliser des batteries au lithium.

Il existe différentes technologies au lithium : lithium ion, lithium fer phosphate, lithium métal polymère. Les concepteurs ont choisi celle au lithium métal polymère.

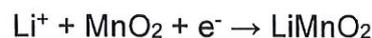
A.3.3 À partir du **document A-7** de la **page 7**, expliquer sur quel(s) critère(s) s'est opéré leur choix.

A.3.4 Le lithium, de symbole Li, se trouve initialement sous forme solide inséré dans du graphite (carbone) au niveau d'une des électrodes de la batterie. Lorsque la batterie débite, le lithium se transforme en ion Li^+ .

Écrire la réaction à cette électrode.

S'agit-il d'une oxydation ou d'une réduction ? Justifier votre réponse.

A.3.5 À l'autre électrode, lorsque la batterie débite du courant, la réaction ci-dessous se produit :



En déduire l'équation-bilan de la réaction de fonctionnement de la batterie lorsqu'elle débite du courant pour alimenter les moteurs.

A.3.6 Sur le **document-réponse DR2** de la **page 13** à rendre avec la copie, compléter les indications manquantes sur le schéma de la batterie avec les propositions suivantes :

- ❖ sens de déplacement des électrons
- ❖ sens de déplacement du courant
- ❖ borne (+), borne (-)
- ❖ anode, cathode

Document A-6

Type de batterie	Énergie massique (W.h/kg)	Avantages	Inconvénients
plomb	entre 30 et 40	Grande capacité volumique. Fort courant de décharge.	Très lourd. Électrolyte liquide (acide).
nickel - cadmium	entre 40 et 60	Robuste. Possibilité de charge rapide. Fort courant de décharge. Faible autodécharge.	Problème d'effet mémoire. Pollution au cadmium.
nickel - métalhydruure	entre 50 et 80	Grande capacité. Pas d'effet mémoire.	Charge plus délicate. Courant de décharge plus limité.

Source : www.lesnumeriques.com/voiture/voitures-electriques-point-sur-toutes-technos-batteries-a2485.html

Document A-7

Les batteries lithium métal polymère utilisent un électrolyte gélifié à la place d'un électrolyte liquide. Cela a deux avantages principaux :

- D'une part, il n'y a plus besoin d'un boîtier métallique rigide autour de la batterie pour contenir le liquide. Le gel reste en place et les batteries peuvent alors être faites de matériaux plastiques, plus légers. Elles peuvent aussi être fabriquées avec des formes plus complexes, fines et variées, et donc au final prendre moins de place, en « bouchant les trous » laissés par les autres composants.
- D'autre part, le gel est beaucoup moins volatil et inflammable que l'électrolyte liquide. En cas de détérioration, la batterie est donc moins dangereuse. De même, d'éventuelles impuretés métalliques ne peuvent plus se déplacer d'une électrode à l'autre pour créer un court-circuit.
- L'un des inconvénients des batteries lithium métal polymère est leur plus faible densité énergétique, comparée aux batteries Li-ion.

D'après : <https://www.tomshardware.fr/2006/12/08/les-batteries-lithium-polymere-remplaceront-les-li-ion/>

A.4 Comparaison avec un combustible fossile

Le carburant principal dans le transport aérien est le kérosène, issu de la distillation du pétrole brut (voir document A-8 de la page 8).

- A.4.1** À partir du document A-8 de la page 8, exprimer le pouvoir calorifique inférieur du kérosène en W.h.kg⁻¹.
- A.4.2** La valeur approchée de l'énergie massique des batteries au lithium est d'environ 260 W.h.kg⁻¹. Peuvent-elles concurrencer aujourd'hui les combustibles fossiles sur le critère de l'énergie massique ? Justifier.
- A.4.3** À partir du document A-8 de la page 8, identifier le procédé industriel qui permet de séparer les différentes fractions du pétrole.
- A.4.4** Quelle grandeur physique caractérise chacune de ces fractions ?
- A.4.5** Compléter, sur le document-réponse DR3 de la page 14 à rendre avec la copie, le tracé de la courbe de changement d'état du kérosène assimilé au corps pur C₁₀H₂₂. Préciser où sont les différentes phases L (liquide) et V (vapeur).
- A.4.6** Recopier et compléter la réaction de combustion complète du kérosène :
- $$2 \text{C}_{10}\text{H}_{22} + \dots \text{O}_2 \rightarrow 20 \text{CO}_2 + \dots \text{H}_2\text{O}$$
- A.4.7** Montrer que la masse molaire moyenne du kérosène peut être considérée équivalente à 142 g.mol⁻¹.
Données : M(H) = 1,0 g.mol⁻¹ M(C) : 12 g.mol⁻¹ M(O) : 16 g.mol⁻¹
- A.4.8** Montrer que chaque kilogramme de kérosène brûlé libère dans l'atmosphère 3,1 kg de dioxyde de carbone. Justifier la démarche.
- A.4.9** Citer une conséquence de ce dégagement de dioxyde de carbone dans l'atmosphère.

Document A-8

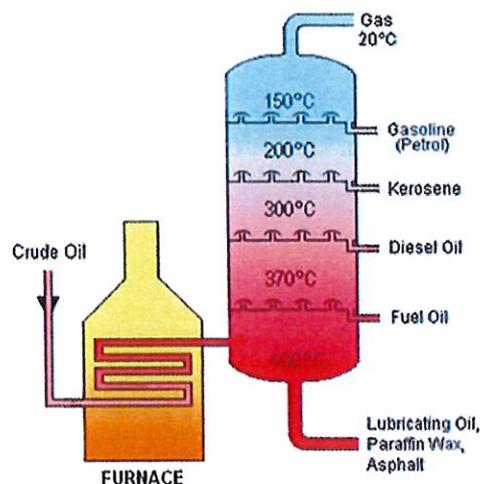
Le pétrole ne peut pas être utilisé en tant que tel, sous sa forme brute, car il contient un très grand nombre de composants. Il est en général impossible de séparer chaque composant du pétrole individuellement.

Différentes fractions sont ainsi obtenues par distillations. La température d'ébullition augmente avec leur nombre d'atomes de carbone.

Le kérosène est un mélange d'hydrocarbures contenant des alcanes de formule chimique allant de C₁₀H₂₂ à C₁₄H₃₀. Sa formule moyenne est C₁₀H₂₂.

L'oxydation du kérosène par l'oxygène donne de la vapeur d'eau et du dioxyde de carbone en dégageant de la chaleur.

Le pouvoir calorifique inférieur (P.C.I) de cette combustion est de 43,1 MJ par kilogramme de carburant.



Source de l'image : commons.wikimedia.org/wiki/File:Crude_Oil_Distillation.png

PARTIE B – LE MATÉRIAU DU SQUELETTE

- B.1** À partir des documents B-1 et B-2 de la page 9, citer deux avantages économiques apportés par l'usage des matériaux composites, en comparaison de celui des métaux. Justifier votre raisonnement.
- B.2** À partir du document B-3 de la page 10, déterminer graphiquement la résistance mécanique R_e (en MPa de la fibre de carbone). Inscire cette valeur dans le document-réponse DR4 de la page 14 à rendre avec la copie.
- B.3** À partir du document B-3 de la page 10, calculer le module de Young E (GPa) correspondant. Inscire cette valeur dans le document-réponse DR4 de la page 14 à rendre avec la copie.
- B.4** En vous appuyant sur les résultats indiqués au tableau du document-réponse DR4 de la page 14 à rendre avec la copie, préciser l'avantage d'utiliser les matériaux composites pour l'aviation en termes de résistance mécanique.

Document B-1 : squelette de Solar Impulse 2

Solar Impulse 2 est construit autour d'un squelette en matériau composite (fibre de carbone et nid d'abeille en sandwich). La surface inférieure des ailes est revêtue d'un film souple et la surface supérieure est couverte de cellules solaires SunPower encapsulées.

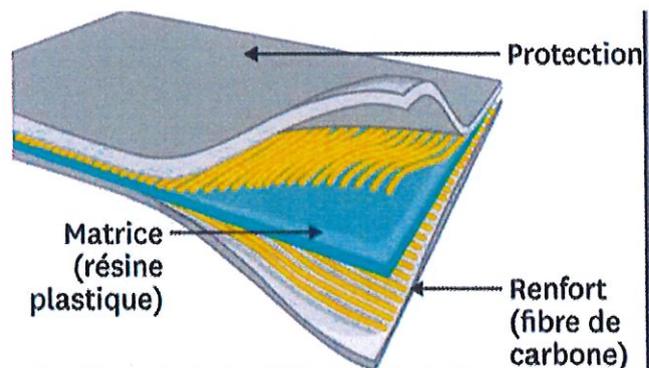
Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Solar_Impulse

Document B-2 : les matériaux composites

C'est un assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles qui possède des propriétés que les éléments constitutifs seuls n'ont pas.

Un matériau composite est constitué :

- d'une ossature appelée renfort qui assure la tenue mécanique du matériau composite. Le renfort permet aux matériaux composites d'avoir des propriétés isotropes¹ ou anisotropes².
- d'une matrice : matériau constitué de plastique (thermodurcissable ou thermoplastique), métal ou céramique qui assure la transmission des efforts.



L'avantage principal des matériaux composites est leur aptitude à être conçus à la carte. Ainsi, on peut concevoir des matériaux fortement anisotropes. Cet avantage permet de concevoir la pièce en tenant compte des sollicitations mécaniques qu'elle va subir et accroître sa durée de vie.

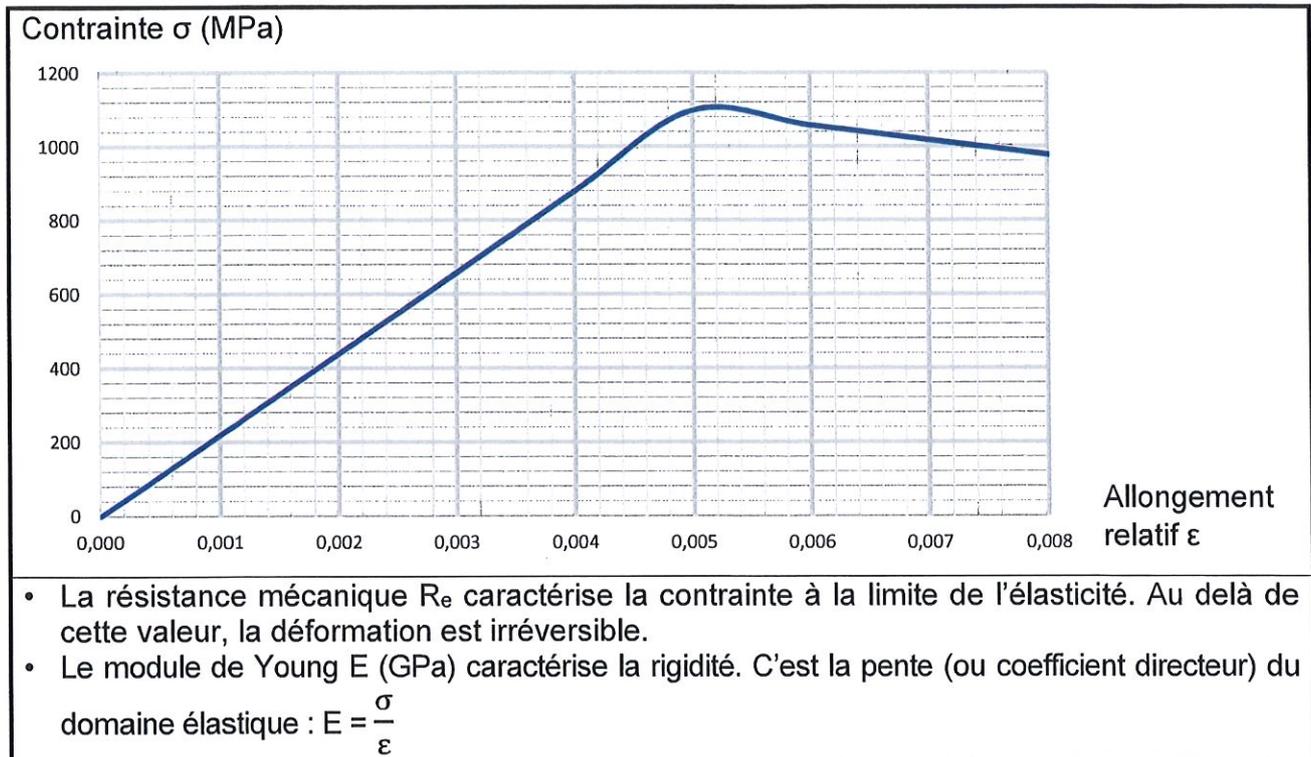
L'autre avantage des matériaux composites est leur masse volumique très faible, ils permettent ainsi un allègement des structures en industrie aéronautique et spatiale.

¹ – invariable quelle que soit la direction considérée

² – variable selon la direction considérée

Source : <http://cluster-meca.fr/qu.est.ce.qu.un.materiau.composite-364500-5-41-45.php>

Document B-3 : courbe de traction de la fibre de carbone



PARTIE C – LE VOL DE CROISIÈRE ET SA CONSOMMATION

On considère dans cette partie que la trajectoire de l'avion est rigoureusement horizontale (suivant l'axe Ox sur le **document C-1** de la **page 11**).

- C.1** À partir du **document C-1** de la **page 11** et du **document C-2** de la **page 12**, tracer le vecteur force de portance $\vec{F}_{portance}$ et le vecteur poids \vec{P} sans souci d'échelle sur le **document-réponse DR5** de la **page 14** à rendre avec la copie.
- C.2** À partir du **document C-3** de la **page 12**, déterminer la masse volumique de l'air à l'altitude de 8 500 m (plafond de service).
- C.3** À quelle condition sur les forces verticales l'avion maintient-il une trajectoire horizontale ?
- C.4** À partir du **document C-1** de la **page 11**, vérifier que, pour la vitesse de croisière de 90 km/h, la surface des ailes (270 m²) est suffisante pour maintenir la trajectoire de l'avion horizontale.
- C.5** À partir du **document C-2** de la **page 12**, justifier sans calcul, que dans la situation décrite sur le **document C-1** de la **page 11**, le mouvement de l'avion est accéléré.
- C.6** La nuit, afin d'économiser l'énergie des batteries, les pilotes préfèrent voler à vitesse réduite constante. Justifier la stratégie qui consiste à voler à plus basse altitude à partir du **document C-1** de la **page 11** et du **document C-3** de la **page 12**.
- C.7** À partir du **document C-1** de la **page 11**, calculer la force de traînée lorsque l'avion avance la nuit (la vitesse est alors de 60 km/h) à l'altitude de 2 000 m. On prendra pour surface des ailes $S = 270 \text{ m}^2$.
- C.8** À partir du **document C-1** de la **page 11**, vérifier que pour ce trajet de nuit, les moteurs électriques ne fonctionnent qu'à 40 % de leur puissance nominale.

Document C-1 : les forces principales agissant sur Solar Impulse



Dans le référentiel terrestre supposé galiléen, l'avion est soumis essentiellement à l'action de quatre forces :

- le poids de l'avion : $P = m \times g$ avec $m = 2\,300\text{ kg}$
- la portance, générée par l'écoulement de l'air autour de l'avion, perpendiculaire à la direction du mouvement et orientée vers le haut ;
- la traînée, générée également par l'écoulement de l'air autour de l'avion, dans la même direction que le mouvement mais de sens contraire ;
- la traction exercée par l'air sur les hélices.

$$F_{\text{portance}} = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot S \cdot C_z$$

$$F_{\text{trainée}} = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot S \cdot C_x$$

ρ : masse volumique de l'air en kg m^{-3} ;
 v : vitesse de déplacement en m.s^{-1} ;

S : surface des ailes en m^2 ;
 C_z : coefficient de portance (sans unité) : 0,60
 C_x : coefficient de traînée (sans unité) : 0,03

Puissance mécanique dans le cas d'un mouvement rectiligne uniforme :

$$P = F \times v$$

$$P \text{ en W, } F \text{ en N, } v \text{ en m.s}^{-1}$$

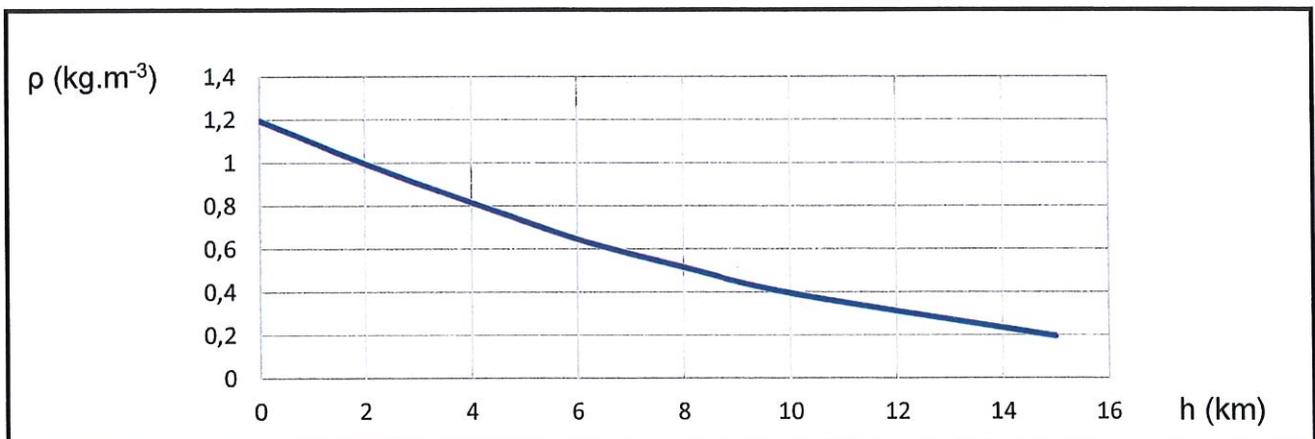
Pour rappel, le groupe motopropulseur est constitué de quatre moteurs électriques fournissant chacun 13,0 kW.

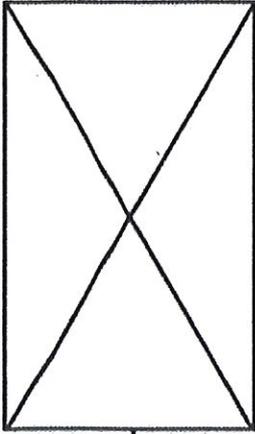
Document C-2 : le principe fondamental de la dynamique

Pour un mobile en translation, l'accélération, a , de son centre de gravité est liée à la somme des forces extérieures exercées sur le mobile :

Projection sur l'axe horizontal Ox :	$\Sigma F_{ext_x} = m \times a_x$	F_{ext_x} et F_{ext_z} en N ; m en kg
Projection sur l'axe vertical Oz :	$\Sigma F_{ext_z} = m \times a_z$	a_x et a_z en $m.s^{-2}$

Document C-3 : masse volumique de l'air en fonction de l'altitude

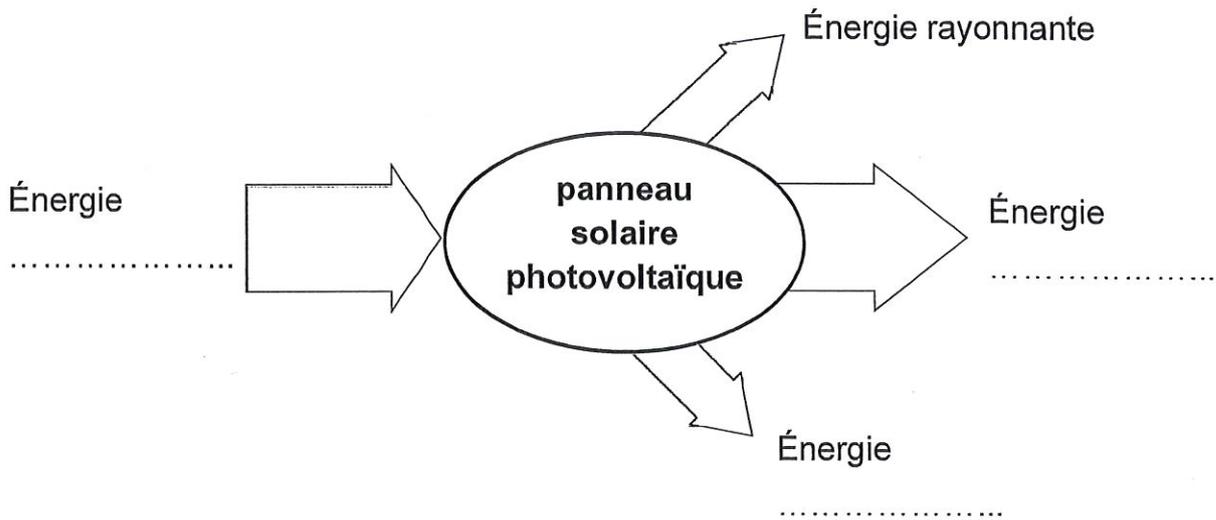




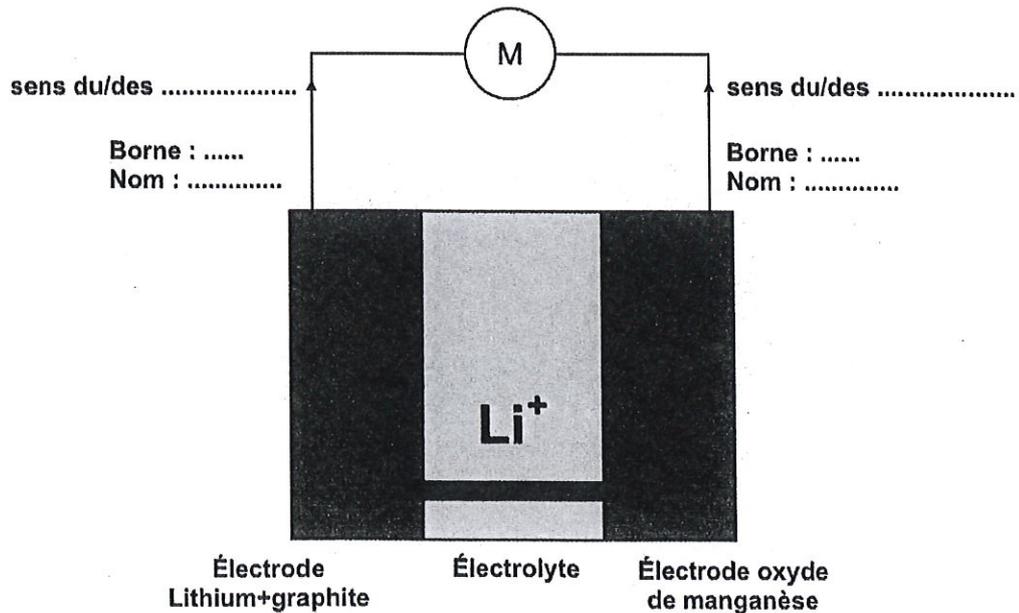
Annexe à numéroté et à remettre avec la copie à la fin de l'épreuve même non complétée

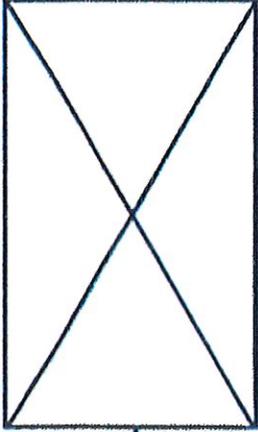
(placer à l'intérieur de la copie pour agrafage)

Document-réponse DR1 : chaîne énergétique d'un panneau solaire (question A.2.3)



Document-réponse DR2 : schéma de la batterie lithium métal polymère en fonctionnement génératrice (question A.3.6)

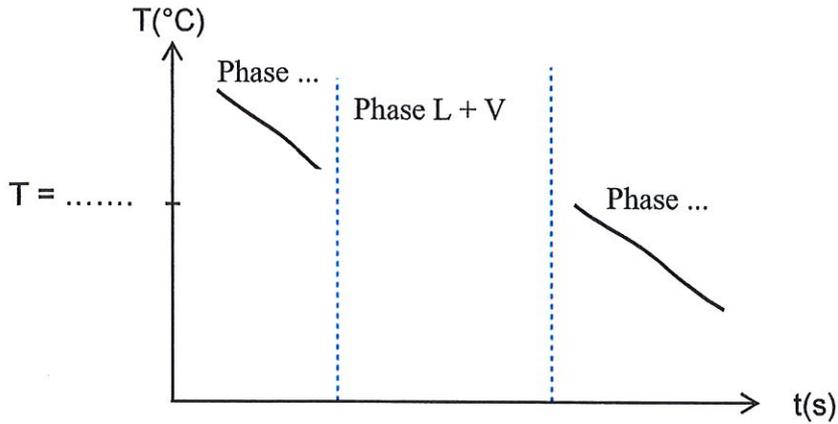




Annexe à numéroté et à remettre avec la copie à la fin de l'épreuve même non complétée

(placer à l'intérieur de la copie pour agrafage)

Document-réponse DR3 : courbe de liquéfaction du kérosène, assimilé à $C_{10}H_{22}$ (question A.4.5)



Document-réponse DR4 : quelques caractéristiques de métaux (questions B.2 et B.3)

	E (GPa)	Re (MPa)	masse (kg) pour 1 m ³ de matériau
Acier	200	350	7800
Aluminium	70	250	2700
Carbone	1800

Document-réponse DR5 : les forces principales agissant sur Solar Impulse (question C.1)

