

**BACCALAURÉAT TECHNOLOGIQUE**  
**Sciences et technologies de l'industrie et du**  
**développement durable (STI2D)**

**Ingénierie, innovation et développement durable**

**Sujet zéro**

**Coefficient 16 – Durée 4 heures**

Aucun document autorisé – Calculatrice autorisée

**Constitution du sujet :**

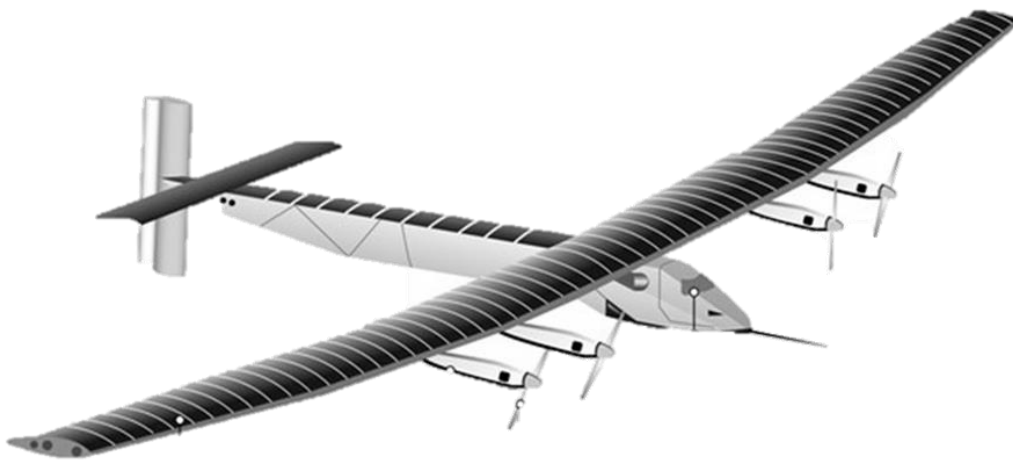
- **PARTIE COMMUNE (2h30) ..... 12 points**
- **PARTIE SPÉCIFIQUE (1h30) ..... 8 points**

**Le dossier sujet comporte deux parties indépendantes qui peuvent être traitées dans un ordre indifférent.**

**Ces deux parties seront traitées sur des feuilles indépendantes.**

**Les documents réponses sont à rendre agrafés avec vos copies.**

## **SOLAR IMPULSE 2**



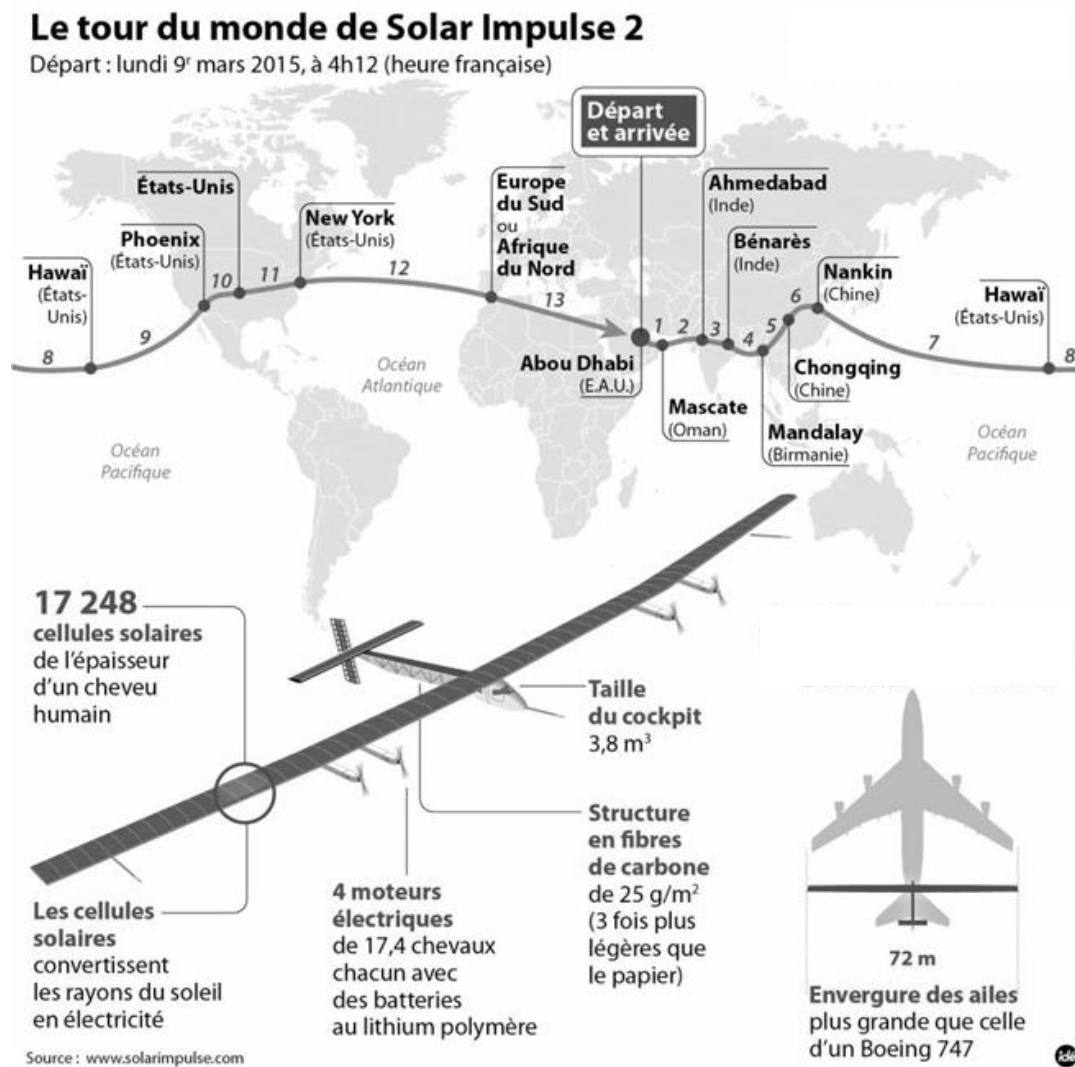
- **Présentation de l'étude et questionnaire**..... pages 3 à 10
- **Documents techniques**..... pages 12 à 21
- **Documents réponses** ..... pages 22 à 25

**Tous les documents réponses, DR 1 à DR 4, sont  
à rendre agrafés avec votre copie.**

## Mise en situation

Entre mars 2015 et juin 2016, les pilotes Bertrand Piccard et André Brossberg ont réussi un tour du monde historique en avion à énergie solaire, le Solar Impulse 2, un appareil autonome en énergie et silencieux. Volant de jour comme de nuit (grâce aux batteries) et sans carburant, l'avion a parcouru plus de 43 000 km en 600 heures de vols effectifs, répartis sur 17 étapes en solitaire (au lieu de 13, prévues initialement).

Ce sujet propose d'étudier certaines solutions techniques qui ont permis cet exploit.



Le Solar Impulse 2 est basé sur des technologies récentes, comme les cellules photovoltaïques, les batteries au lithium-polymère et les matériaux ultralégers en fibre de carbone. Afin que le projet aboutisse, chaque élément de l'avion a été conçu et optimisé pour réduire la masse de l'avion, augmenter son aérodynamisme, réduire sa consommation d'énergie et maximiser le rendement des cellules photovoltaïques.

## Travail demandé

### Partie 1 : l'énergie électrique est-elle une solution pertinente pour l'avenir du transport aérien ?

---

Question 1.1  
DT 1

À partir de la répartition mondiale des émissions du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) du document technique DT 1, **calculer** la somme de ces émissions en milliard de tonnes et le pourcentage dû au transport.

**Conclure** sur l'impact du transport dans les émissions mondiales de dioxyde de carbone.

Question 1.2  
DT 2  
DR 1

Le document technique DT 2 présente la comparaison des émissions de dioxyde de carbone en fonction du type de transport (train, car/bus, voiture, avion). Ces émissions sont données avec 3 unités différentes.

**Compléter** le document réponse DR 1 et **expliquer** pourquoi un trajet en avion a plus d'impact en matière d'émission de CO<sub>2</sub> qu'un trajet moyen en voiture ou en bus,-car.

Question 1.3  
DT 3

Après la lecture des différents extraits d'article du document technique DT 3, **expliquer** pourquoi l'avenir de la propulsion aérienne pourrait être électrique.

### Partie 2 : comment valider la solution « Solar Impulse 2 » ?

---

L'avion électrique est encore loin de pouvoir transporter de nombreux passagers, mais l'idée progresse. Le but de Solar Impulse 2, c'est de prôner et de développer l'utilisation des technologies propres. Il n'est pas le seul avion à se présenter de cette façon. De nombreux projets mettent en avant leur respect de l'environnement, on peut citer :

- Le Diamond DA42 – VI, un avion diesel qui met en avant sa faible consommation en gazole.
- Le X-57 de la Nasa, un avion électrique expérimental.
- L'aéronef Ehang 184, un drone capable de transporter un passager.

Ces trois avions ont des objectifs assez différents du Solar Impulse 2 ; les questions suivantes vont permettre de bien comprendre en quoi ils diffèrent.

Question 2.1  
DT 4  
DR 2

Après lecture du diagramme des exigences DT 4, **compléter** dans la première colonne du DR 2, les exigences attendues des lignes 1, 4 et 5.

Question 2.2 | Dans le DR 2 et en vous servant du DT 5, pour chaque avion, **vérifier** si les critères sont respectés ou pas (mettre +1 si le critère est respecté, sinon -1). **Faire** le total des points.

DT 4, DT 5  
DR 2

Question 2.3 | En bas du DR 2, **conclure** sur le seul avion qui respecte tous les critères.

DT 4, DT 5  
DR 2

### **Partie 3 : comment est structuré l'avion « Solar Impulse 2 » ?**

---

En fonctionnement de jour, l'énergie solaire récoltée par les cellules photovoltaïques est transmise aux batteries par l'intermédiaire d'un module de gestion MPPT (dont le rôle sera étudié dans la suite du sujet). Cette énergie permet d'alimenter les moteurs ; elle est ensuite adaptée grâce aux réducteurs, pour permettre aux hélices de tracter l'avion.

Question 3.1 | Après lecture du texte précédent décrivant le principe de fonctionnement et à l'aide du DT 6, **compléter** le diagramme IBD sur le DR 3 de la façon suivante :

DT 6  
DR 3

**Indiquer** les noms des blocs suivants : « cellules photovoltaïques », « batteries », « moteur », « réducteur » et « hélices ».

**Indiquer** les flux suivants : « énergie solaire », « énergie électrique », « énergie mécanique de rotation », « énergie mécanique de translation » (responsable de la traction de l'avion).

**Surligner** le flux d'énergie, du soleil à l'énergie mécanique de translation responsable du mouvement d'avancement de l'avion.

Le pilote doit également, durant cette phase de jour, effectuer une montée progressive en altitude afin d'optimiser le vol de nuit qui suivra. Pour cela, il doit monter progressivement la puissance et utiliser ses gouvernes en surveillant le niveau de batterie.

Question 3.2 | **Compléter** le diagramme IBD sur le DR 3 de la façon suivante :

DT 6  
DR 3

**Surligner** sur l'IBD le flux d'information relatif au niveau de charge de la batterie (de la batterie à l'afficheur de niveau batterie).

## Partie 4 : pourquoi optimiser l'efficacité énergétique du « Solar Impulse 2 » ?

---

Le document DT 6 présente l'évolution sur 24 heures d'un vol en conditions normales (météorologie favorable) sans les phases de décollage et d'atterrissage.

Les moteurs sont au nombre de 4, chacun possède une puissance :  $P_{\text{méca moteur}} = 17,5 \text{ ch}$  ( $1 \text{ ch} = 735,5 \text{ W}$ ) et un rendement :  $\eta_{\text{moteur}} = 94 \%$ . Les moteurs doivent fonctionner à :

- Au moins 65 % de leur capacité pour permettre à l'avion de prendre de l'altitude ;
- Au moins 30 % de leur capacité pour conserver l'altitude de croisière de l'appareil ;
- Au moins 10 % de leur capacité pour permettre le pilotage et la stabilité ;
- Quasiment 100 % durant les phases d'accélération et de décélération rapides qui ont lieu au décollage et à l'atterrissage.

### Analyse de la phase de vol de jour P2 :

On souhaite dans un premier temps vérifier que les apports solaires vont permettre aux moteurs de faire prendre de l'altitude à l'avion et aux batteries de se recharger à 100 % durant la phase de jour (phase 2 du DT 6). Le jour, l'avion est soumis à une puissance solaire surfacique moyenne  $P_{\text{solaire}} = 1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

Les panneaux photovoltaïques ont une surface :  $S_{\text{photovoltaïque}} = 269,5 \text{ m}^2$  avec un rendement :  $\eta_{\text{photovoltaïque}} = 22,7 \%$ .

Question 4.1 | **Déterminer** les apports solaires en **calculant** la puissance électrique en sortie des panneaux photovoltaïques :  $P_{\text{élec photovoltaïque}}$ .

Rappel :  $P_{\text{élec photovoltaïque}} = S_{\text{photovoltaïque}} \times P_{\text{solaire}} \times \eta_{\text{photovoltaïque}}$

Question 4.2 | **Déterminer** la puissance mécanique totale maximum délivrable par les 4 moteurs :  $P_{\text{méca moteur}}$ .

**En déduire** la puissance électrique  $P_{\text{élec moteur}}$  nécessaire à leur fonctionnement à 100 % :

Rappel :  $\eta_{\text{moteur}} = \frac{P_{\text{méca moteur}}}{P_{\text{élec moteur}}}$

Les 4 batteries ont une masse totale de :  $m_{\text{batteries}} = 633 \text{ kg}$ , une densité énergétique :  $d_{\text{batteries}} = 260 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$  avec un rendement :  $\eta_{\text{batteries}} = 96 \%$ .

- Question 4.3 | **Déterminer** l'énergie à fournir aux batteries pour les charger à 100 % :  
 $W_{\text{batteries entrée}}$  puis l'énergie délivrable en sortie des batteries :  
 $W_{\text{batteries sortie}}$ .
- Question 4.4 | **Déterminer** la puissance électrique nécessaire à la recharge des  
DT 6 batteries :  $P_{\text{batteries}}$  durant le temps imparti à celle-ci.
- Question 4.5 | **Déterminer** la puissance de fonctionnement des moteurs durant cette  
phase de prise d'altitude.  
**Comparer** la puissance fournie par les cellules photovoltaïques à celle  
nécessaire pour charger les batteries ainsi que pour faire fonctionner les  
moteurs conformément à la demande lors de cette phase (on considère  
que l'intégralité de l'énergie fournie est consommée ou perdue lors de  
cette phase).  
**Conclure.**

### Analyse de la phase de vol de jour P3 :

On souhaite connaître la quantité d'énergie excédentaire dans le cas où tout se passe normalement. On considère désormais que les moteurs fonctionnent à la puissance minimale requise permettant pilotage et conservation d'altitude.

- Question 4.6 | **Déterminer** la puissance électrique nécessaire au fonctionnement des  
DT 6 moteurs durant cette phase  $P_{\text{élec moteur P3}}$   
**En déduire** la quantité d'énergie nécessaire au fonctionnement des  
moteurs durant cette phase  $W_{\text{élec moteur P3}}$ .
- Question 4.7 | **Déterminer** la quantité d'énergie excédentaire produite par les cellules  
DT 6 photovoltaïques  $W_{\text{surplus}}$ .

### Analyse de la phase de vol de nuit P4 :

L'avion perd de l'altitude, car il économise de l'énergie pour la fin de la nuit (phase P1). Durant cette phase 4, les moteurs reçoivent la puissance minimale nécessaire au pilotage et à la stabilité. On suppose que les batteries sont chargées au maximum au début de cette phase et qu'ils possèdent donc une quantité d'énergie délivrable de :

$$W_{\text{batteries sortie}} = 158 \text{ kWh.}$$

Question 4.8 | **Déterminer** la puissance électrique nécessaire au fonctionnement des moteurs durant cette phase  $P_{\text{élec moteur P4}}$

**En déduire** la quantité d'énergie nécessaire au fonctionnement des moteurs durant cette phase  $W_{\text{élec moteur P4}}$ .

Question 4.9 | **Déterminer** la quantité d'énergie restante pour la phase 1 dans les batteries une fois la phase 4 terminée :  $W_{\text{batteries P1}}$ .

### Analyse de la phase de vol de nuit P1 :

Cette phase correspond à la fin de la nuit, les moteurs doivent permettre le maintien de l'avion à son altitude plancher de 5 000 m. Il s'agit donc de vérifier que l'énergie disponible dans les batteries est suffisante à ce maintien.

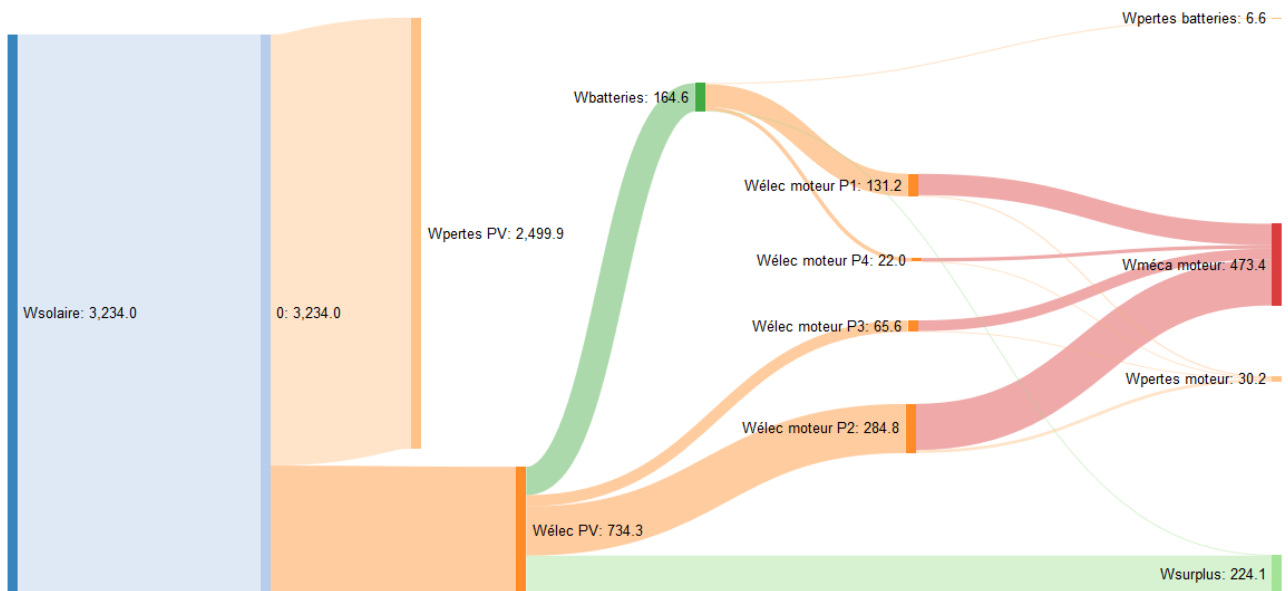
Question 4.10 | **Déterminer** la puissance électrique délivrable par les batteries durant la phase 1 :  $P_{\text{batteries P1}}$ .

**Vérifier** que cette puissance est suffisante pour maintenir l'altitude de l'avion.

Question 4.11 | **Conclure** sur la capacité du Solar Impulse 2 à voler de manière autonome sur un cycle de 24 h avec les batteries et les cellules solaires décrites.

**Expliquer** ce qu'il se passerait si le jour suivant, l'ensoleillement ne permettait la recharge des batteries qu'à 50 % ?

On considère que les consommations énergétiques du Solar Impulse 2 peuvent être représentées sous la forme du diagramme de Sankey suivant :



Question 4.12 | **Déterminer** le rendement global de la chaîne d'énergie du Solar Impulse 2 : entre l'énergie en entrée des panneaux photovoltaïques et l'énergie mécanique des moteurs (ne pas considérer les surplus dans le calcul du rendement).

Question 4.13 | **Repérer** l'élément principal responsable des pertes et **conclure** quant à l'efficacité globale des technologies mises en œuvre dans le Solar Impulse 2.

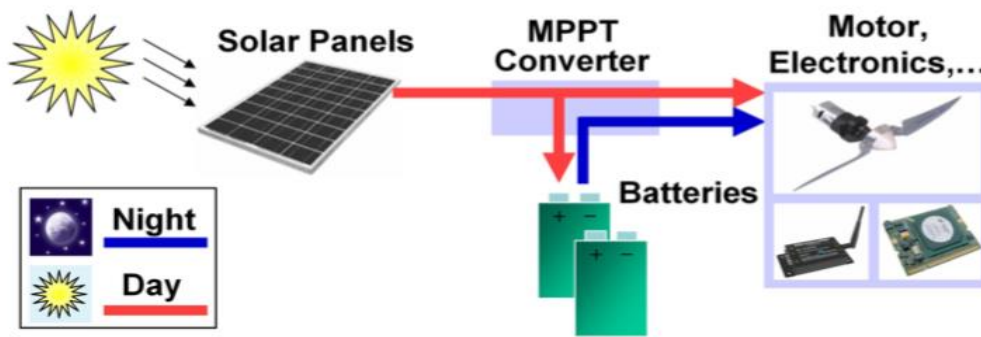
## Partie 5 : comment optimiser l'efficacité énergétique du « Solar Impulse 2 » ?

Le document DT 6 présente l'évolution sur 24 heures d'un vol en conditions normales (météorologie favorable) sans les phases de décollage et d'atterrissage.

Le vol en autonomie totale est par ailleurs rendu possible grâce à une étude poussée des éléments composant la chaîne d'énergie. Par exemple, la société Sun Power a développé des panneaux solaires plus légers et offrant un rendement de 22,7 %. De son côté, la société Kokam a développé des batteries lithium polymère spécifiques d'une densité énergétique optimisée à  $260 \text{ W}\cdot\text{h}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du panneau et de la transférer aux packs de batteries, on utilise des modules MPPT.

MPPT est l'abréviation de « Maximal Power Point Tracking », qui signifie en français « recherche du point de puissance maximale ». Intercalé entre un panneau solaire et un pack de batteries, le module MPPT cherche en permanence à produire une tension et un courant correspondant à la puissance maximale  $P_{MPP}$  que peut délivrer le panneau.



Le principe du module MPPT est détaillé dans le DT 7. Le modèle multiphysique partiel des composants de la chaîne de puissance est donné dans le DT 8.

Question 5.1

DT 8

DR 3

À partir du modèle multiphysique du DT 8 et du diagramme IBD du DR 3, **identifier** et **nommer** la fonction réalisée par les blocs encadrés en pointillés.

La simulation du modèle multiphysique a permis d'obtenir le graphe donné dans le DR 5. Celui-ci représente l'évolution des puissances (en pourcentage de la puissance maximale disponible) et la charge du pack de batteries.

Question 5.2

DT 6, DT 9

DR 4

**Compléter** le document DR 4 en positionnant par des repères verticaux les 4 phases de vol du cycle journalier.

Question 5.3

DT 6, DT 9

DR 4

Sur votre feuille, pour chacune des phases de vol :

- **Préciser** les phases qui correspondent à la charge ou à la décharge des batteries.
- **Justifier** le signe de la grandeur « puissance batteries ».

Question 5.4

DT 7, DT 9

DR 4

Afin de déterminer le meilleur compromis dans la gestion de l'énergie, plusieurs simulations ont été réalisées.

Par comparaison entre les simulations avec ou sans MPPT, **donner** 2 arguments permettant de justifier l'utilisation des modules MPPT dans la recherche de l'optimisation de l'efficacité énergétique.

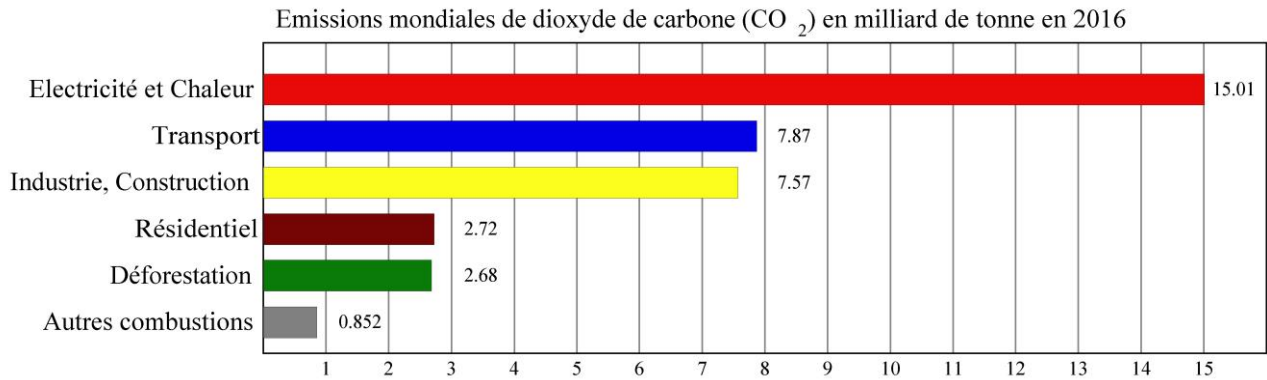
## Partie 6 : quel intérêt de développer des projets innovants ?

---

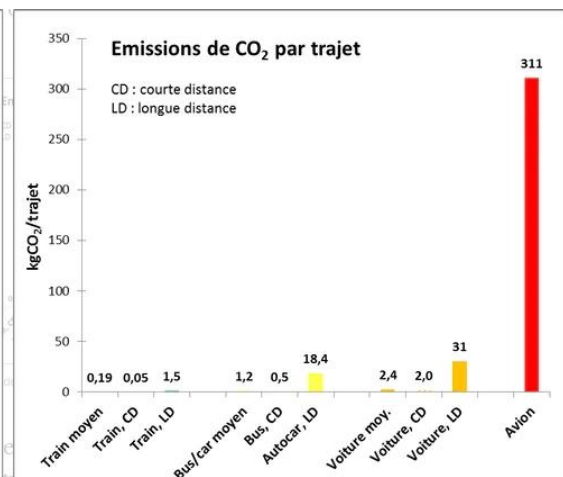
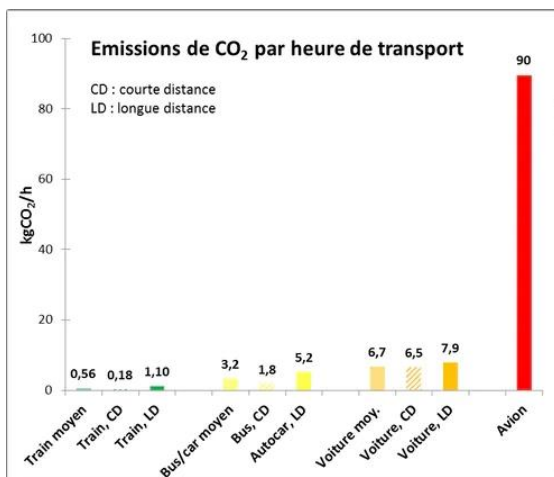
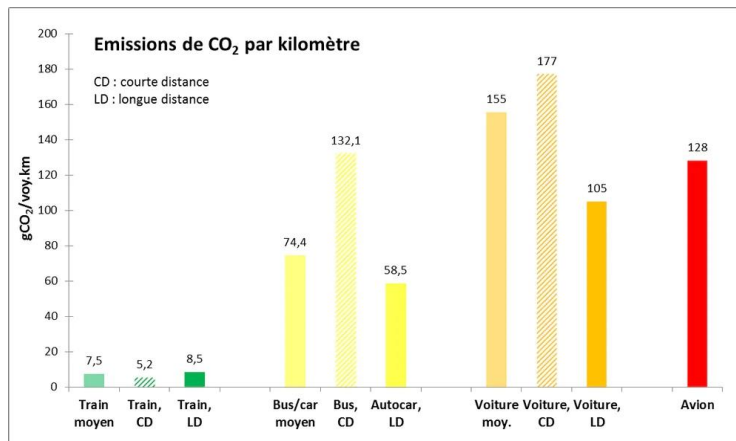
Question 6.1 | À l'aide du DT 10, **justifier** l'intérêt de concevoir un modèle virtuel global  
DT 10 | en phase de développement de produit.

Question 6.2 | À l'aide du DT 11, **justifier** l'intérêt scientifique, technologique et  
DT 11 | écologique de ce projet.

## DT 1 : extrait du rapport « CO<sub>2</sub> and Greenhouse Gas Emissions »



## DT 2 : diagramme comparatif des émissions de CO<sub>2</sub> en fonction du type de transport



## **DT 3 : extraits d'articles relatifs aux progrès envisagés pour réduire les émissions de dioxyde de carbone dans le transport aérien**

---

**Premier vol réussi pour l'avion hybride électrique Cassio 1 de Voltaero**, *L'Usine Nouvelle*, le 12/03/2020.

L'avion hybride de Voltaero prend son envol. Lundi 10 mars, le prototype de l'avion Cassio 1, développé par la petite entreprise basée à l'aérodrome de Médis, près de Royan (Charente-Maritime), a effectué son premier vol d'essai. Deux prototypes, deux configurations.

Le Cassio 1 vole avec deux moteurs électriques ENGINeUS 45 de Safran, montés sur les ailes et orientés vers l'avant, et avec un moteur à combustion interne dirigé vers l'arrière.

Le Cassio 2 embarquera un système propulsif constitué de deux moteurs électriques à l'avant de 60 kW chacun, ainsi que d'un moteur électrique à l'arrière de 180 kW couplé à un moteur thermique de 150 kW. La start-up développe un module breveté intégrant le moteur électrique et le moteur.

**Interview de Bertrand Piccard, pilote de Solar Impulse 2**, *Le Parisien*, le 09/06/2020.

Alors que l'État va aider l'industrie aéronautique française à concevoir d'ici 2035 des aéronefs neutres en carbone, le pilote Bertrand Piccard, auteur du tour du monde en avion solaire, estime que le défi est à notre portée.

Un avion de ligne volant sans carburant, est-ce réaliste ?





BERTRAND PICCARD : C'est crédible à moyen terme. Même si on ne va pas remplacer les avions volant au kérosène et qui font des traversées transatlantiques tout de suite, on peut commencer par travailler sur les vols court-courriers qui font 500 km de distance. Ils pourraient rapidement devenir en partie électriques grâce à une pile à combustible alimentée par de l'hydrogène.

**Le secteur aérien doit se réinventer avec des avions « verts »**, site internet *RTBF*, le 11/06/2020

Un premier avion électrique certifié en Europe. On est encore loin de l'avion électrique transportant une centaine de passagers sur des milliers de kilomètres, mais la recherche avance. L'agence européenne de la sécurité aérienne (EASA) a annoncé mercredi avoir certifié pour la première fois « un avion entièrement électrique », développé par la société slovène Pipistrel Aircraft. « C'est le premier avion électrique que l'EASA ait certifié, mais ce ne sera certainement pas le dernier », s'est réjoui Patrick Ky, le directeur exécutif de l'EASA, cité dans son communiqué. Véritable permis de voler, la certification constitue un sésame incontournable avant l'entrée en service d'un nouvel avion.



## DT 5 : modèles d'avion léger

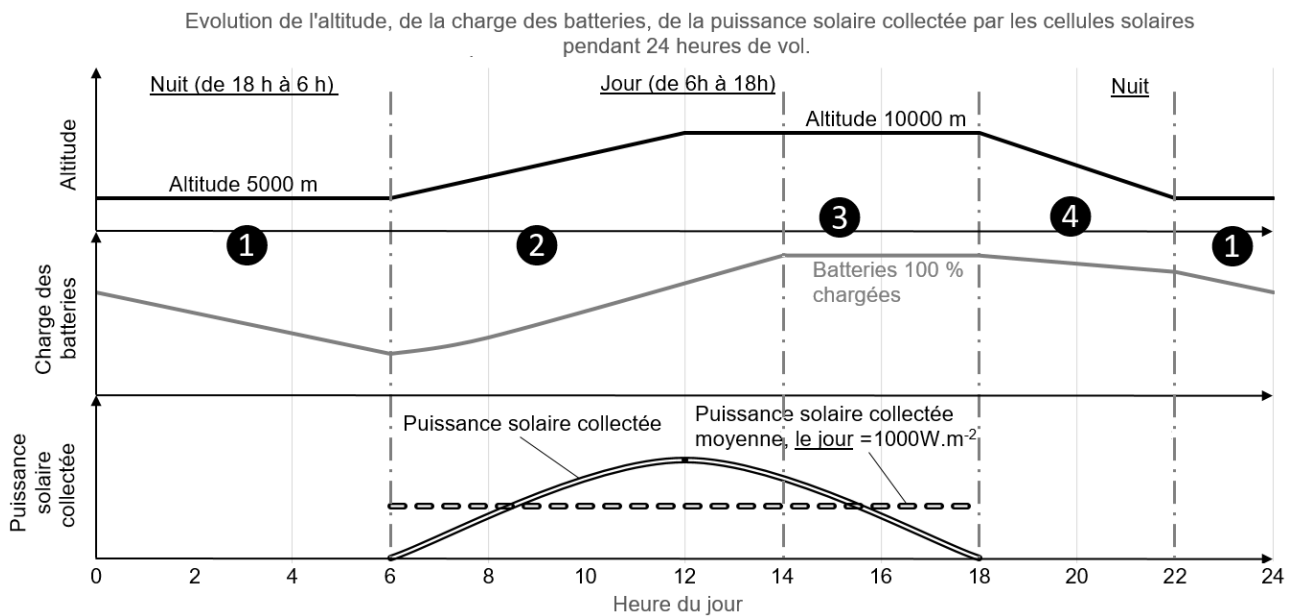
	Diamond DA42 - VI	X-57 de la Nasa	Aéronef Ehang 184	Solar Impulse 2
				
	Le DA42 est un bimoteur quadriplace. L'appareil est construit en fibre de carbone et reçoit une finition de surface de type planeur qui lui permet de compenser une motorisation plutôt faible. Celle-ci est composée de deux moteurs diesel entraînant des hélices à trois pales.	Le X-57 Maxwell est un avion électrique expérimental développé par la NASA. Le but de l'appareil est de tester le concept qui consiste à installer plusieurs petits moteurs électriques sur le bord d'attaque de l'aile d'un avion pour réduire considérablement le besoin en énergie.	L'Ehang 184, est un aéronef (drone) capable de transporter une personne de façon autonome jusqu'à 100 km·h <sup>-1</sup> et d'atteindre une altitude maximale de 3500 m. La charge de transport maximale est de 100 kg pour une autonomie moyenne d'environ 20 minutes.	Solar Impulse 2 est un avion solaire monoplace à moteurs électriques alimentés uniquement par l'énergie solaire, qui peut voler de nuit comme de jour, sans carburant ni émission polluante pendant le vol.
Énergie	Diesel	Électrique par rechargement avant le vol	Électrique par rechargement avant le vol	Électrique par rechargement avant et pendant le vol
Autonomie en km	2250 km	160 km	30 km (20 minutes)	Illimitée dans de bonnes conditions météorologiques
Empreinte CO <sub>2</sub> / km en utilisation	0,33 kg CO <sub>2</sub> par km	Estimée à 0,12 kg CO <sub>2</sub> par km	Estimée à 0,05 kg CO <sub>2</sub> par km	0 kg CO <sub>2</sub> par km
Passagers	4	2	1	1
Taille	8,56 m ; Envergure 13,55 m	8,70 m ; Envergure 9,45 m	2,40 m par 2,40 m	22,4 m ; Envergure 72,3 m
Vitesse de croisière	365 km·h <sup>-1</sup>	280 km·h <sup>-1</sup>	100 km·h <sup>-1</sup>	70 km·h <sup>-1</sup>
Masse	2000 kg	Estimée à 1300 kg	300 kg	2300 kg
Stockage de l'énergie	Réservoir de 280 L de Gazole	360 kg de batterie	Estimée à 100 kg de batterie	633 kg de batteries rechargées en vol par les panneaux solaires

## DT 6 : détail de 24h de vol en conditions normales du Solar Impulse 2

Le Solar Impulse 2 doit être autonome en énergie pendant plusieurs jours de vol. L'optimisation de l'efficacité énergétique est essentielle pour mener à bien le projet.

Le jour, des cellules photovoltaïques assurent la production de l'énergie utilisée par les moteurs. La nuit, après une phase où l'avion plane, des batteries prennent le relais et fournissent l'énergie aux moteurs.

Ces mêmes batteries doivent être rechargées. Le jour, les cellules photovoltaïques ont donc un double rôle, alimenter les moteurs et recharger les batteries



Phases de vol :

① : (Nuit de 22 h à 6 h) Les batteries fournissent l'énergie nécessaire pour maintenir l'avion à une altitude constante de 5000 m.

② : (Jour de 6 h à 14 h) Les cellules solaires fournissent de l'énergie pour faire gagner à l'avion de l'altitude et recharger les batteries. Cette phase est celle qui consomme le plus d'énergie.

③ : (Jour de 14 h à 18 h) Les cellules solaires fournissent de l'énergie pour maintenir l'avion à une altitude constante de 10000 m et le chargement des batteries est terminé.

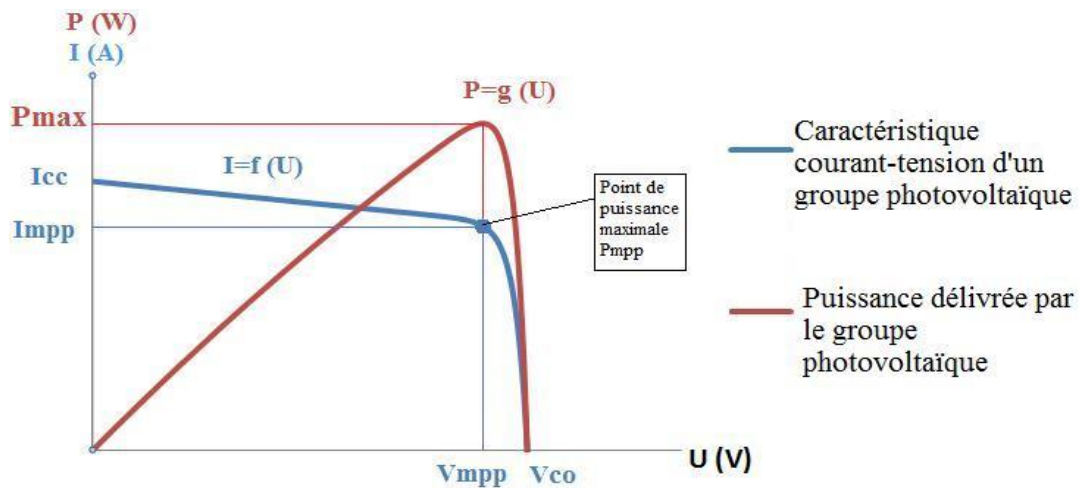
④ : (Nuit de 18 h à 22 h) L'avion plane, il perd de l'altitude, jusqu'à 5000 m. Cette phase consomme peu d'énergie, car les moteurs tournent au ralenti. L'énergie est fournie par les batteries.

① : (Nuit) Retour à la phase ①.

## DT 7 : principe de fonctionnement d'un module MPPT

MPPT est l'abréviation de « Maximal Power Point Tracking », qui signifie en français « recherche du point de puissance maximale ».

Intercalé entre un panneau solaire (appelé aussi groupe photo voltaïque GPV) et un pack batterie, le module MPPT cherche en permanence à produire une tension  $U_s$  et un courant  $I_s$  correspondant à la puissance maximale  $P_{MPP}$  que peut délivrer le GPV.



### Principe de fonctionnement

L'idée est d'utiliser entre le panneau et le pack batterie un convertisseur DC-DC (continu-continu) piloté par un microcontrôleur via un signal mPtracker : en faisant varier le rapport cyclique du signal mPtracker, le programme du microcontrôleur ajuste la tension de sortie  $U_s$  du convertisseur.

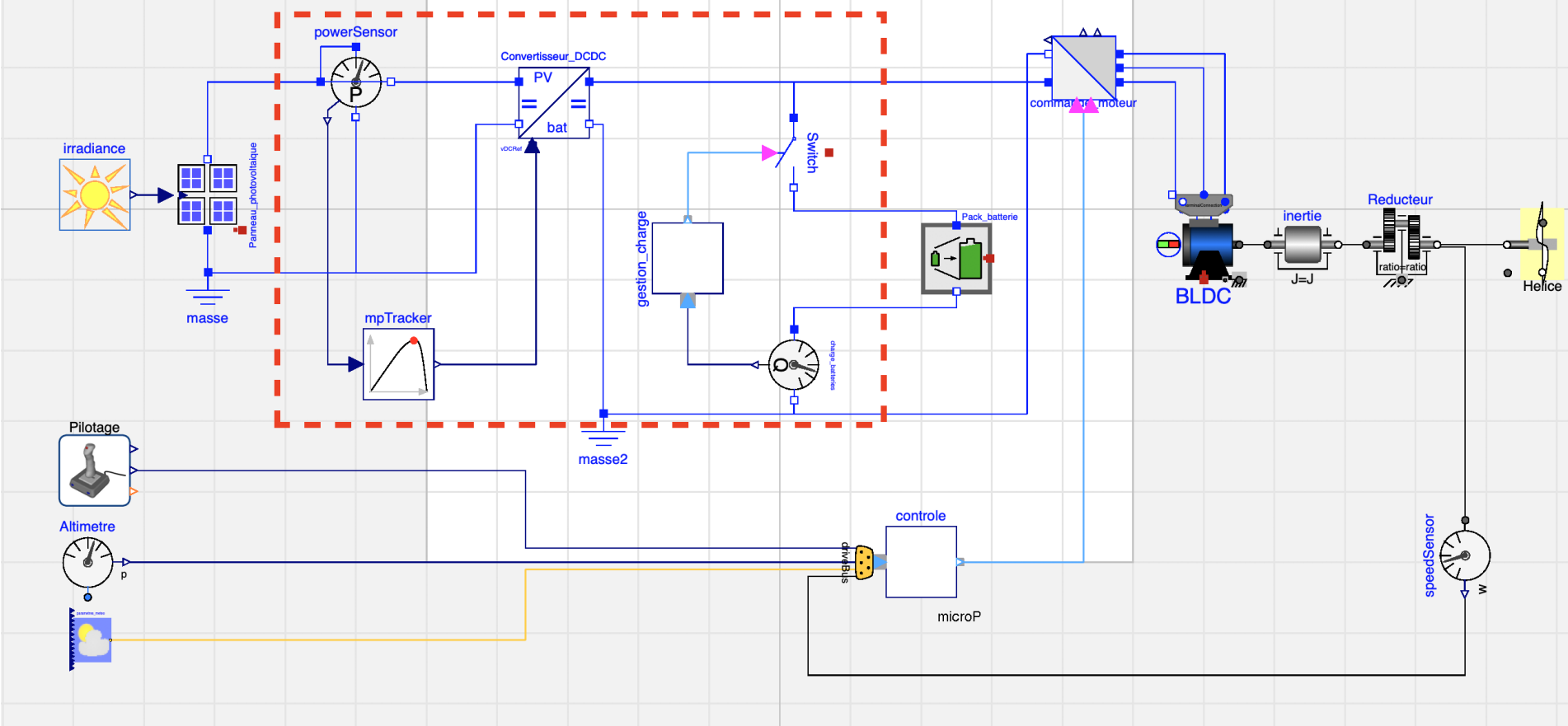
- Le module MPPT acquiert en permanence le courant  $I_{PV}$  et la tension  $U_{PV}$  délivrés par le panneau solaire.
- Il calcule en permanence la puissance d'entrée  $P_E$  et ajuste la tension de sortie  $U_s$  (et donc aussi le courant  $I_s$ ) du convertisseur jusqu'à atteindre en entrée la puissance maximale  $U_{MPP}$ ,  $I_{MPP}$  que peut délivrer le panneau. La puissance en sortie  $P_s$  est alors aussi maximale.

On considère que le rendement du convertisseur est de 100 %.

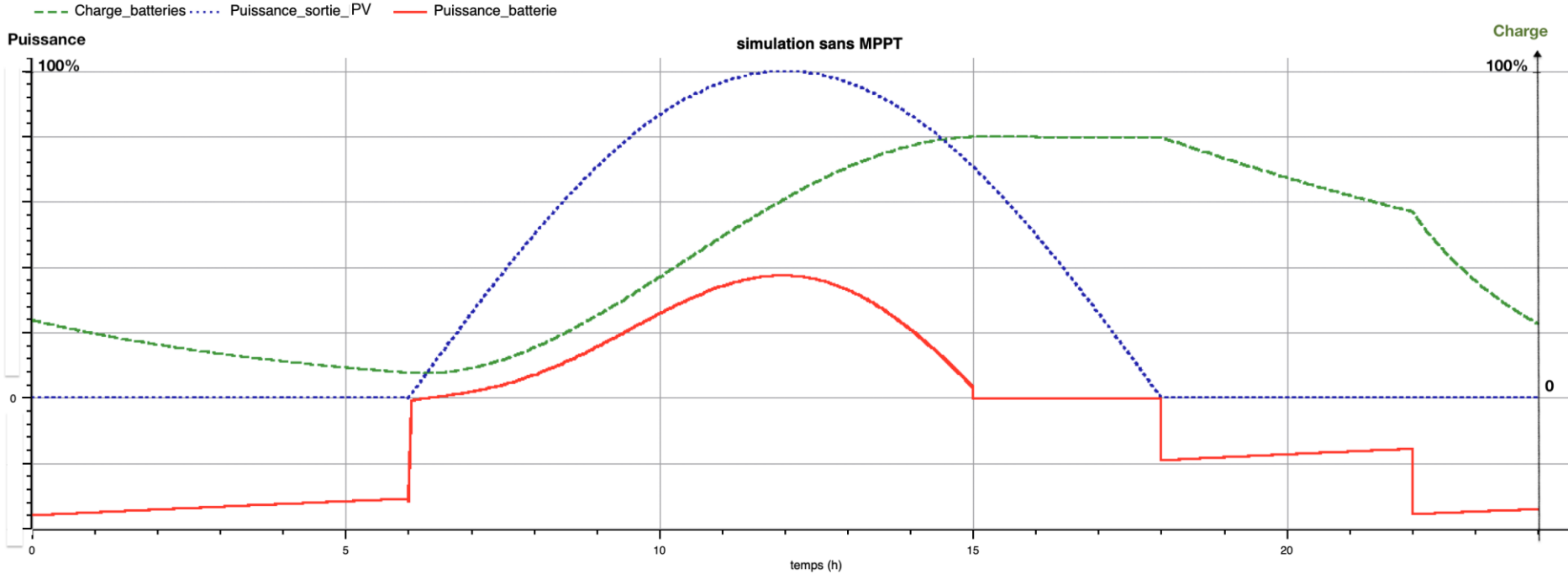
On a donc  $P_s = U_s \cdot I_s = P_E = U_{PV} \cdot I_{PV}$ .

Le module MPPT permet également la régulation de la charge du pack de batteries.

# DT 8 : modèle multiphysique partiel des constituants de la chaîne de puissance



# DT 9 : graphe obtenu par la simulation du modèle multiphysique SANS module MPPT



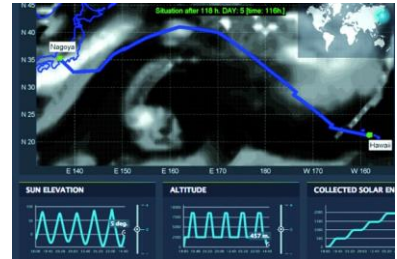
## DT 10 : solar Impulse 100 % calculé

---

Par Jean-François Prévéraud, publié le 14/04/2016

### Trajectoire de l'avion solaire calculée par le modèle de simulation d'Altran.

Solar Impulse est un pur produit de la simulation. Il a en effet fallu partir d'une feuille blanche pour concevoir un avion solaire capable de faire le tour du monde, puis prévoir tous les cas de vol et définir les meilleures routes. « Pour réussir un tel projet, il faut toujours être aux limites sans les franchir. C'est là que la simulation nous a aidés »



### Un modèle comportemental de l'avion

Il s'agit donc de réussir à faire tendre le processus de conception vers un optimum qui sera la meilleure réponse au problème.

On a aussi bâti un modèle comportemental de l'avion afin d'évaluer les différents choix conceptuels, dont certains sont contre-intuitifs.

### Un supercalculateur sur mesure

Cette approche a été utilisée, avant de construire l'avion, pour valider, grâce à des vols virtuels, son comportement dans son domaine de vol.

Elle a aussi servi pour créer la simulation de mission de l'avion, c'est-à-dire pour faire voler son modèle comportemental sur une route donnée dans les conditions les plus probables, issues des prévisions météo.

Cette méthode permet en outre de valider la faisabilité du vol en termes énergétiques. « Cette année, nous allons tenir compte de cinquante scénarios météo probabilistes pour chaque vol. On va ainsi augmenter les opportunités de décollage »

### Jumeau numérique : qu'est-ce que c'est ?

Le jumeau numérique est la réplique d'un objet, d'un système, d'une implantation... sous une forme numérique.

Soit on part d'un système réel équipé de capteurs pour récupérer les données qui en sont issues. Avec ces data, on construit des modèles de prédiction, grâce aux techniques d'intelligence artificielle (IA).

Soit on part d'équations issues de la physique qu'on nourrit de mesures et résout numériquement pour prédire des comportements.

### Le rôle des jumeaux numériques dans l'industrie

En phase de développement, il y a quelques années, une entreprise créait physiquement un objet pour lui faire subir un ensemble de tests, y apporter des modifications. Avec le jumeau numérique, les données recueillies sur l'évolution de l'objet permettent d'en anticiper et d'en optimiser les performances. Le but est de gagner en fiabilité, améliorer le niveau de sécurité et réduire les coûts de réparation en anticipant les défaillances à venir.

L'un des défis majeurs des entreprises reste la question de la maintenance prédictive. À cet effet, le jumeau numérique peut aussi se révéler très utile pour comprendre, anticiper et optimiser les performances d'un objet ou d'un système. En combinant une vision en continu d'un objet et en ajoutant des données de contrôle de la performance, le jumeau numérique permet de mener des analyses et d'identifier en amont un risque de défaillance.

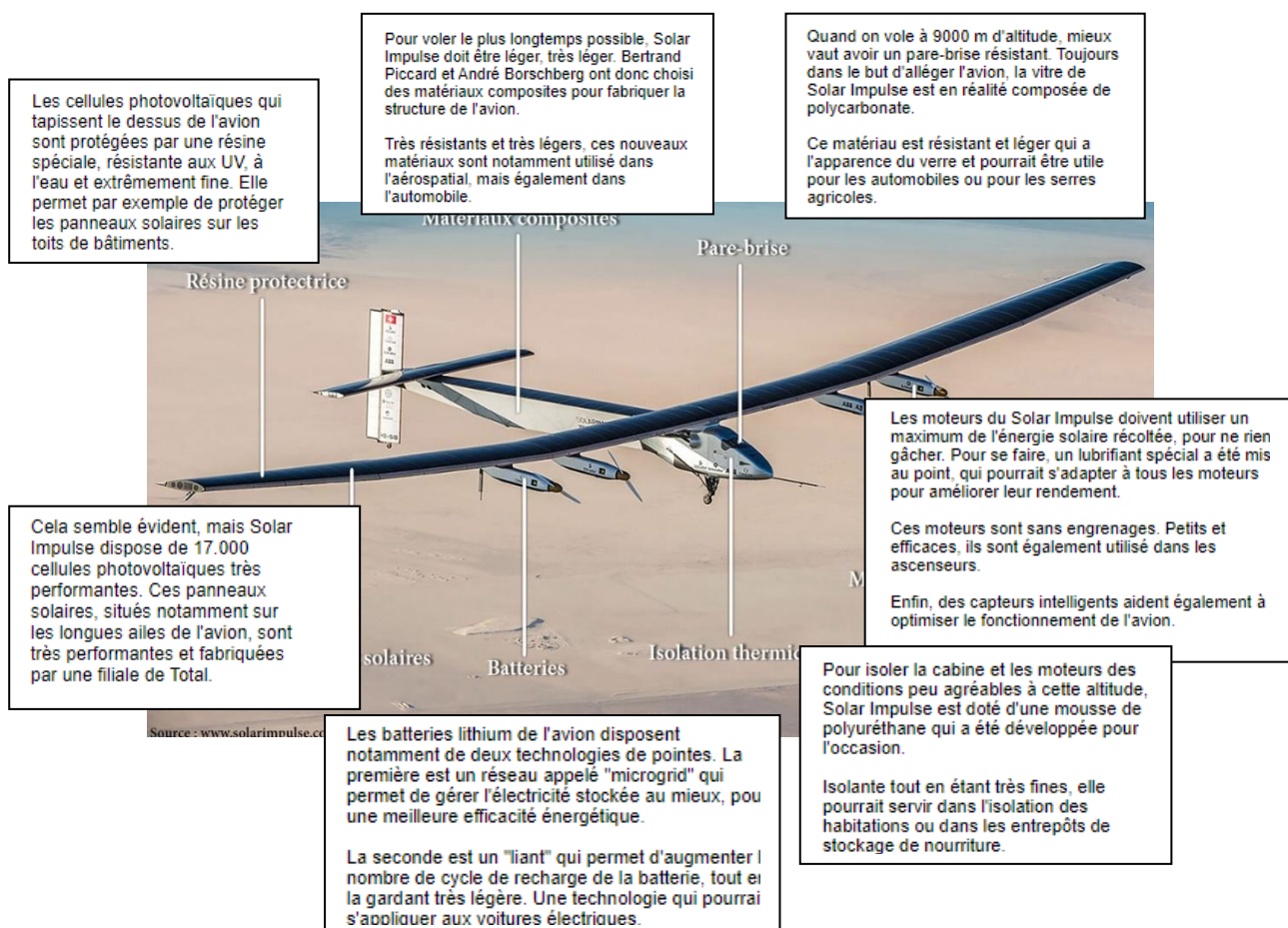
## DT 11 : à quoi servent les technologies du Solar Impulse 2 dans la vie de tous les jours ?

Grégory Rozières et Maxime Bourdeau, *Le HuffPost*.

Évidemment, dans un avenir proche, l'idée d'un avion commercial fonctionnant à 100 % à l'énergie solaire est inenvisageable. « Notre succès ne sera donc pas seulement de faire le tour du monde sans carburant, mais surtout de motiver tout un chacun à mettre en œuvre les mesures nécessaires pour diminuer sa propre dépendance aux énergies fossiles ».

À terme, Bertrand Piccard et André Borschberg, les deux Suisses à l'origine du projet, imaginent que Solar Impulse pourrait devenir un drone solaire, afin de remplacer par exemple les satellites (Google y réfléchit aussi).

En attendant, les technologies de pointe embarquées dans cet avion hors normes peuvent avoir beaucoup d'utilité sur le plancher des vaches<sup>1</sup>.







<sup>1</sup> La terre ferme

**DR 1 : comparaison des émissions de dioxyde de carbone par moyen de transport**

---

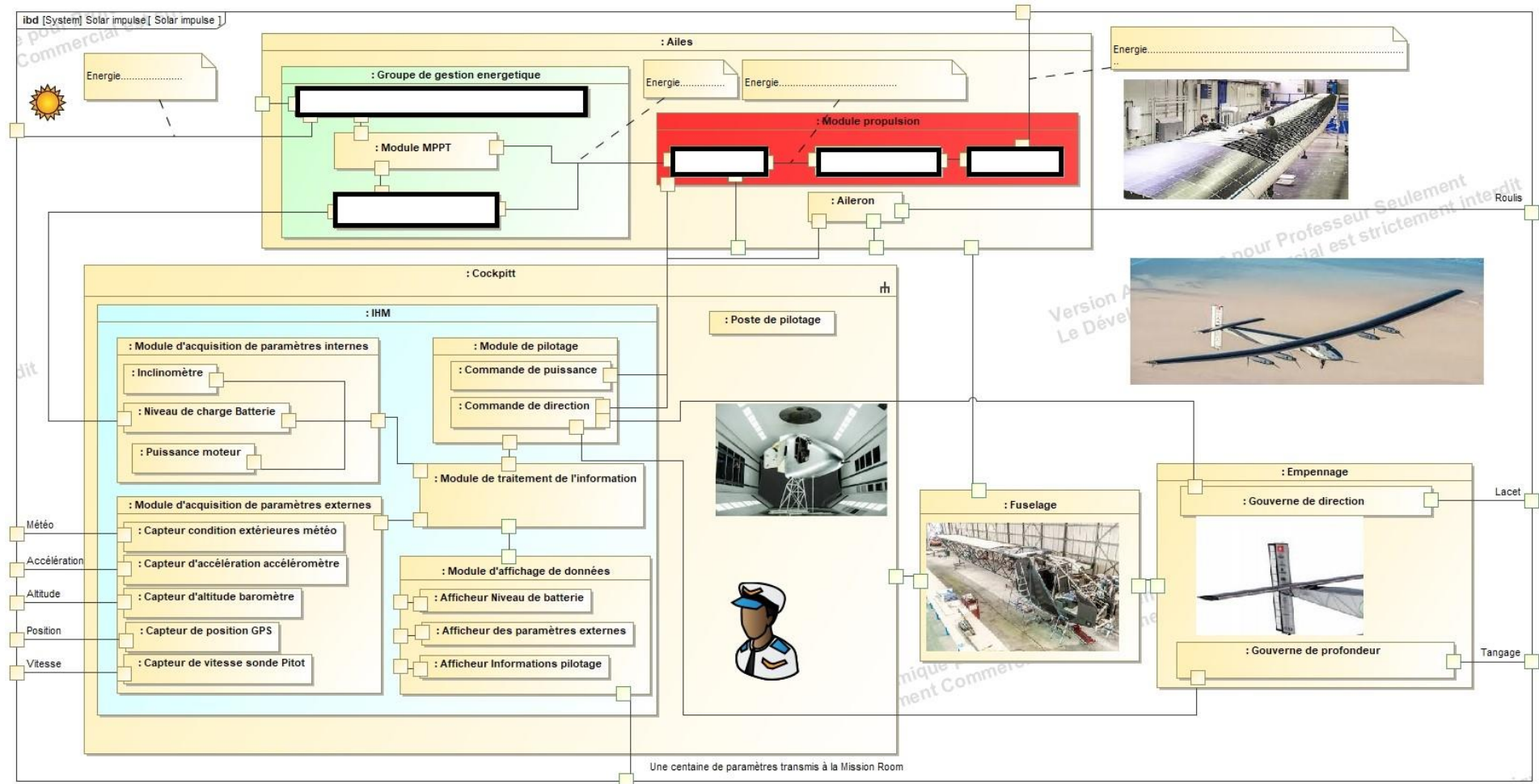
	Voiture (distance moyenne)	Car-Bus (distance moyenne)	Avion	Rapport : $\frac{\text{Avion}}{\text{Voiture (distance moyenne)}}$	Rapport : $\frac{\text{Avion}}{\text{Car-Bus (distance moyenne)}}$
g CO <sub>2</sub> émis par kilomètre et par voyageur					
kg CO <sub>2</sub> émis par heure de transport					
kg CO <sub>2</sub> émis par trajet					

## DR 2 : choix de l'avion léger répondant aux critères

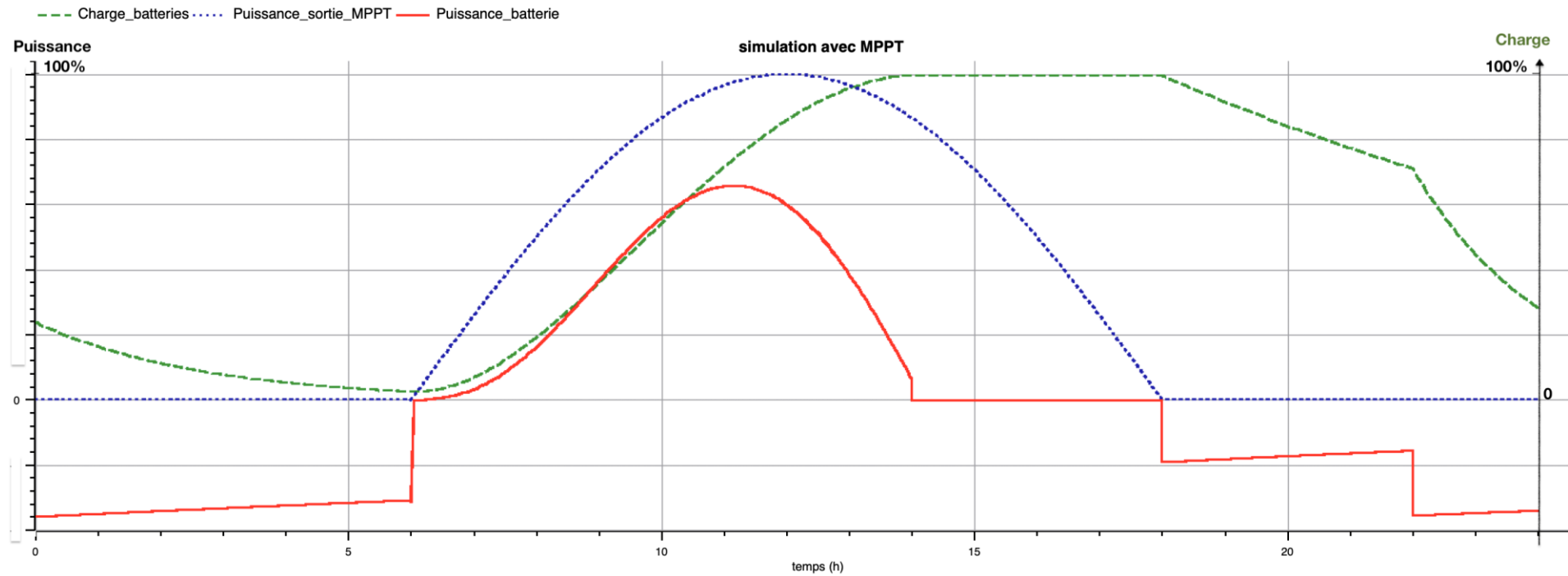
Question 2.1  Critères et exigences du cahier des charges à indiquer (cf. DT1)	Question 2.2 : Mettre <b>+1</b> si le critère est respecté, sinon indiquer <b>-1</b>			
Critère : <b>empreinte CO<sub>2</sub> en utilisation</b> Exigence : ----- -----	Diamond DA42 – VI  	X-57 de la Nasa  	Aéronef Ehang 184  	Solar Impulse 2  
Critère : <b>Distance à parcourir sans atterrissage</b> Exigence : 9000 km	<b>-1</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>	<b>+1</b>
Critère : <b>Ne pas être dépendant des énergies fossiles</b> Exigence : pas de consommation d'essence, de gaz ou de gazole	<b>-1</b>	<b>+1</b>	<b>+1</b>	<b>+1</b>
Critère : <b>Autonome en énergie en vol</b> Exigence : ----- -----				
Critère : <b>Limiter la masse de l'avion</b> Exigence : ----- -----				
TOTAL :				

Conclusion : (Question 2.3)

# DR 3 : IBD Solar Impulse à compléter



## DR 4 : graphe obtenu par la simulation du modèle multiphysique AVEC module MPPT



**Sujet zéro**

**2I2D Enseignement spécifique**  
**Énergies et environnement**

**Solar Impulse 2**



**Constitution du sujet :**

- Dossier sujet et questionnement ..... Pages 26 à 31
- Dossier technique..... Pages 32 à 37
- Document réponse ..... Pages 38

**Dans cette partie spécifique, vous devez choisir de traiter la partie B (choix 1) ou la partie C (choix 2). Les autres parties, A et D, sont à traiter obligatoirement.**

**Le document réponse DRS1 est à rendre agrafé avec votre copie.**

## Mise en situation

La première problématique est la collecte d'énergie. L'avion a été conçu pour pouvoir voler 24 heures sur 24 dans des conditions favorables, et il faut avoir une majorité de ciel bleu pour collecter un maximum d'énergie et pouvoir passer la nuit.

Les ingénieurs de l'équipe Solar Impulse 2 ont pour mission de trouver la meilleure route pour l'avion, afin d'optimiser les périodes de charge solaire entre 9 h et 23 h. L'idée est qu'il puisse ensuite continuer de voler la nuit en mode propulsion, avec des batteries en décharge, jusqu'au lever du jour.

« La météo est un élément critique et doit être préparée, calculée, évaluée, planifiée, réestimée, soupesée », détaille le responsable de la stratégie et des prévisions de vol pour Solar Impulse.

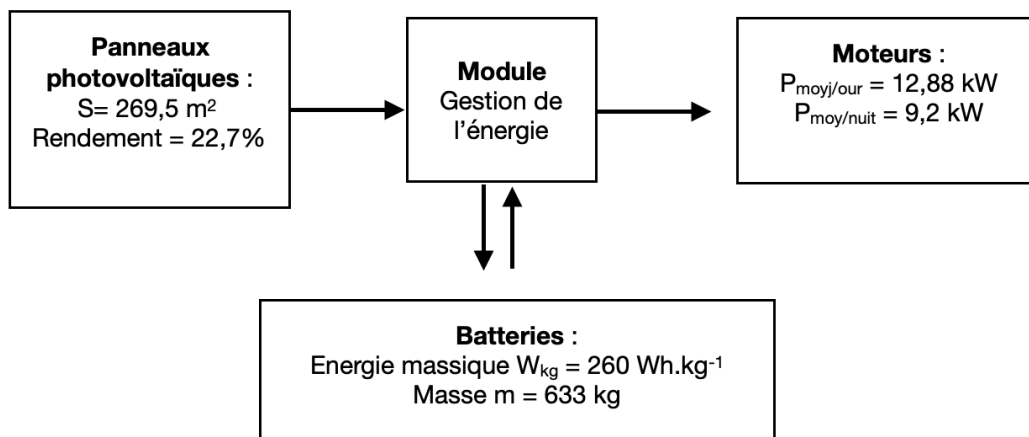
Aucune situation n'est identique à la précédente. « Les calculs dépendent de la latitude de vol, de la saison, du profil de vol, de très nombreux facteurs. »

<https://ignition.altran.com/fr/article/solar-impulse-5-challenges-pour-reussir-le-tour-du-monde/>

Le choix des constituants de la chaîne de puissance est essentiel pour mener à bien ce projet. Il nécessite la prise en compte de paramètres dont l'influence serait négligeable dans d'autres circonstances.

Une connaissance des variabilités des performances de ces éléments et une gestion des puissances échangées entre générateurs et récepteurs d'énergie pour tous les scénarios de vols permettent d'anticiper les aléas de fonctionnement.

Les échanges d'énergie entre les constituants de la chaîne de puissance sont représentés de manière simplifiée ci-dessous.



## ***Travail demandé***

### **Partie A : Gestion de la puissance et scénarios de fonctionnement**

De nombreux scénarios de gestion de la puissance peuvent être proposés en fonction des conditions de vol, de la consommation d'énergie et de l'état de charge de la batterie pendant 24 heures.

Un algorithme de gestion de la puissance permet de déterminer à chaque instant le fonctionnement des différents éléments constituant l'alimentation en énergie des moteurs.

On considère que :

- Les panneaux photovoltaïques (PV) représentent la source principale de production d'énergie. Ils produisent une puissance  $P_{PV}$ .
- Les packs de batteries sont utilisés à la fois comme une source dans le cas d'un déficit de production, et comme une charge dans le cas d'une surproduction. Leur puissance est notée  $P_{bat}$ .
- La grandeur Soc (State of charge) définit l'état de charge des batteries. Celui-ci ne doit pas être inférieur à un niveau minimum ( $Soc_{min}$ ) et supérieur à un niveau maximum ( $Soc_{max}$ ).
- Le niveau de charge  $Soc_{min}$  doit permettre une autonomie supplémentaire de 5h minimum.
- Les moteurs représentent la principale consommation d'énergie (charge principale). Ils sont alimentés en permanence et consomment une puissance notée  $P_{mot}$ .
- Chaque composant peut prendre deux états : actif (✓) et inactif (X) en fonction des périodes du jour. La consommation d'énergie et l'état de charge des batteries étant variables, il existe plusieurs scénarios de fonctionnement du système.

Le tableau ci-dessous récapitule les états des différents composants en fonction des conditions rencontrées :

État		Actif (✓)	Inactif (X)
Source principale	Panneaux photovoltaïques (PV)	Pendant un jour ensoleillé	1. Pendant la nuit 2. Pendant un jour nuageux 3. En cas de panne
Source secondaire	Batteries	Pendant l'incapacité de la source principale, par exemple lorsque : 1. Les conditions climatiques sont mauvaises 2. La demande des moteurs est supérieure à la production 3. La source principale est en panne 4. L'état de charge est compris entre $SoC_{min}$ et $SoC_{max}$	1. Pendant le fonctionnement normal de la source principale (PV) 2. La demande de la charge est égale ou inférieure à la production ( $P_{mot} \leq P_{PV}$ )
Charge principale	Moteurs	La charge est toujours alimentée	
Charge secondaire	Batteries	En cas d'excès d'énergie et $SoC$ est inférieur à $SoC_{max}$	Lorsque $SoC$ est supérieur à $SoC_{max}$

L'algorithme de gestion des puissances est donné dans le DTS1.

Question A.1 | **Compléter** sur le DRS1 le tableau des différents scénarios de fonctionnement pour les cas 2, 3, 4 et 5.  
DTS1, DRS1

Question A.2 | **Identifier** la grandeur permettant d'éviter le scénario dans lequel les batteries seraient déchargées et les panneaux photovoltaïques non fonctionnels (scénario non évoqué dans le tableau DRS1).  
DTS1

On impose une marge de sécurité sur la décharge des batteries afin que celle-ci ne descende pas en dessous de  $SoC_{min} = 30\%$  de leur capacité maximale.

Question A.3 | **Calculer** alors l'autonomie restante  $T_{sécurité}$  (en heures) si les moteurs fonctionnent au minimum de puissance  $P_{moy/nuit}$ .

Question A.4 | **Expliquer** en quoi la valeur de  $T_{sécurité}$  respecte le cahier des charges.

## Choix 1

### Partie B : Choix des cellules photovoltaïques

Lors du vol du Solar Impulse 2, les panneaux solaires photovoltaïques sont soumis à des conditions climatiques et environnementales variables.

La technologie des cellules photovoltaïques évolue sans cesse pour arriver aujourd'hui aux cellules de 3<sup>e</sup> génération.

Dans leur recherche de l'optimisation énergétique, les concepteurs de l'avion Solar Impulse ont utilisé des cellules photovoltaïques constituées de matériaux semi-conducteurs au silicium.

Question B.1  
DTS2, DTS3

**Déterminer** quel type de technologie a été utilisé dans l'avion Solar Impulse 2 pour le choix des cellules photovoltaïques.

Question B.2  
DTS2, DTS3

En vous plaçant du point de vue efficacité énergétique, **donner** le principal argument pour le choix de cette technologie.

Question B.3  
DTS2

Une évolution technologique est-elle encore possible pour améliorer l'autonomie du Solar Impulse 2. **Justifier** votre réponse.

## Choix 2

### Partie C : Choix de la technologie des batteries

L'énergie produite par les panneaux photovoltaïques est stockée dans 4 packs de 70 batteries (1 pack par moteur).

Tout comme les panneaux photovoltaïques, les batteries sont soumises aux contraintes environnementales, certains phénomènes d'échauffement peuvent apparaître lors des cycles de charge/décharge, notamment si un incident perturbe le plan de vol.

Question C.1  
DTS4

**Préciser** pourquoi les batteries au lithium ont un avantage considérable sur les autres batteries pour le projet *Solar Impulse 2*.

Question C.2  
DTS5

**Indiquer** les avantages qui ont vraisemblablement guidé les ingénieurs de *Solar Impulse 2* dans le choix des batteries Lipo plutôt que Li-ion.

Question C.3  
DTS6

**Expliquer** comment l'équipe de Solar Impulse a résolu le problème de surchauffe des batteries.  
**Préciser** quel type de transfert d'énergie est utilisé.

## **Partie D : Contrôle de la température des batteries**

Afin de contrôler les variations de la température, les ingénieurs ont mis en place une régulation de celle-ci par la commande « tout ou rien » (TOR) de l'ouverture de l'orifice du conteneur porte-batteries, gérant ainsi l'entrée d'air frais extérieur.

Le principe de la régulation et sa commande TOR sont donnés au DTS8.

La mesure de température est effectuée par l'intermédiaire d'une sonde de température PT-100 et d'un conditionneur. Celui-ci permet d'obtenir la tension  $U_{Tbat}$  image de la température.

Question D.1 DTS7, DTS8	<b>Indiquer</b> le rôle de la sonde PT-100. <b>Préciser</b> quelle est la grandeur physique qui varie en fonction de la température dans ce type de capteur. <b>Préciser</b> le rôle du conditionneur.
----------------------------	--

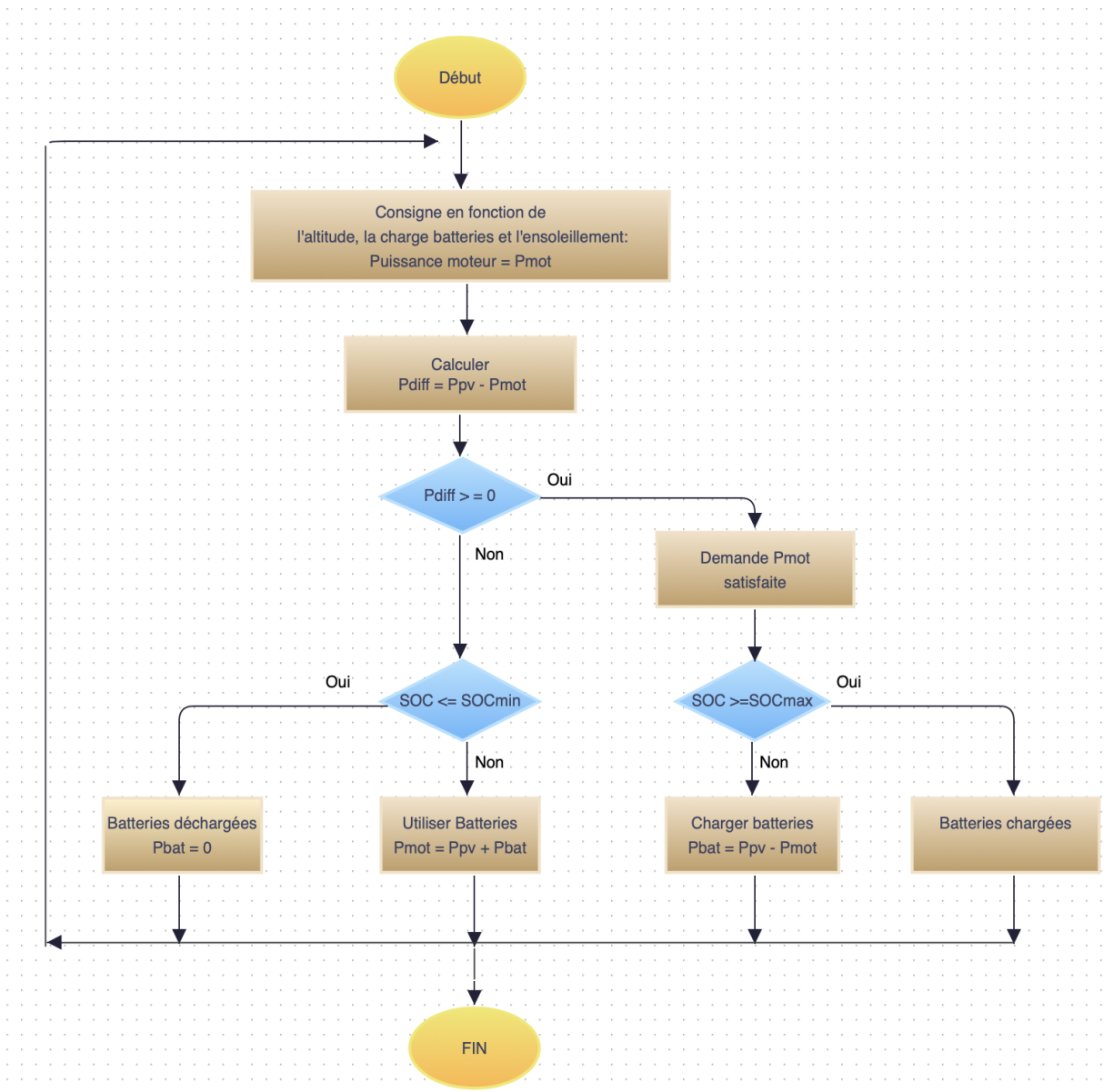
Question D.2 DTS8	<b>Donner</b> l'expression de l'écart $\varepsilon$ . <b>Indiquer</b> son unité.
----------------------	---

Les batteries ont un rendement optimum pour une température de consigne de 25°C.

Question D.3 DTS8	<b>Indiquer</b> les valeurs des températures d'ouverture $T_{ouv}$ et de fermeture $T_{fer}$ de l'orifice du conteneur.
----------------------	---

Question D.4 DTS8	En tenant compte des réponses aux questions précédentes, <b>expliquer</b> le principe de fonctionnement de la régulation de température et <b>conclure</b> quant à son utilité.
----------------------	---

# DTS1 : Algorithme de gestion des puissances



## DTS2 : Comparatif des types de technologies des cellules photovoltaïques

Type	Rendement cellule (en labo)	Module (en labo)	Module (commercial)	Niveau de développement
<b>1re génération</b>				
Silicium monocristallin	24,70%	22,70%	12-20%	Production industrielle
Silicium polycristallin	20,30%	16,20%	11-15%	Production industrielle
<b>2e génération</b>				
Silicium amorphe	13,40%	10,40%	5-9%	Production industrielle
Silicium cristallin en couche mince		9,40%	7%	Production industrielle
CIS	19,30%	13,50%	9-11 %	Production industrielle
CdTe	16,70%		6-9%	Prêt pour la production
<b>3e génération</b>				
Cellule organique	5,70%			Au stade de la recherche
Cellule de Grätzel	11%	8,40%		Au stade de la recherche
Cellules multi-jonctions	39%*	25-30%**		Au stade de la recherche, production exclusivement pour applications spatiales

\*sous concentration de 236 soleils

\*\* Module triple jonction GaInP/AsGa/G/Ge

Source : Systèmes Solaires – hors série spécial recherche solaire –

## DTS3 : Les technologies cristallines Silicium

(source : planete-energie.com)

Deux familles peuvent être distinguées dans la filière silicium :

● la première est constituée de plaquettes de silicium monocristallin, élaborées à partir d'un bloc de silicium très pur, formé d'un seul cristal. Le procédé industriel pour l'obtenir est lourd et coûteux, mais il permet d'obtenir des cellules avec quelques 20 % de rendement (qui est le rapport entre la puissance électrique de sortie et la puissance lumineuse incidente). Le record en phase industrielle, sur une pièce de 125x125 mm<sup>2</sup>, est détenu par SunPower (24,2 %). En outre, le circuit électrique est placé sur la face arrière de la cellule, ce qui améliore sa performance. Ainsi, on ne verra pas sur ces modules le rainurage qu'on observe sur les autres types. L'avion solaire Solar Impulse a été fabriqué avec de telles cellules.

● la seconde est constituée de cellules de silicium multicristallin. C'est un matériau moins pur et meilleur marché, mais le rendement tourne autour de 15 %. Les groupes chinois sont leaders sur ce segment. Le coût inférieur de la cellule a assuré son fort développement mondial, mais le niveau de rendement électrique est bien sûr un élément déterminant dans le calcul final de la rentabilité financière des installations photovoltaïques.

## **DTS4 : Tableau comparatif de 4 technologies de batteries**

Type de batterie	Énergie massique (W.h.kg <sup>-1</sup> )	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

Tableau comparatif technologies batterie

## **DTS5 : Batteries Lithium**

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

Types de batteries au lithium

## **DTS6 : Un système de stockage de l'énergie amélioré pour Solar Impulse**

*(<http://www.kokam.com>)*

Pendant l'étape la plus difficile du vol autour du monde de Solar Impulse 2 - le vol record de 5 jours et 5 nuits entre Nagoya, au Japon et Hawaï - la température des batteries de Solar Impulse 2 s'est élevée en raison d'un profil de vol différent de celui prévu et de la sur-isolation des gondoles (boîtiers des moteurs) par rapport à la température extérieure.

Par conséquent, les batteries NMC ultra-haute puissance de Solar Impulse 2 ont atteint une température proche des 50 degrés Celsius pendant une période prolongée, une température plus élevée que celle des normes de conception.

Pour éviter une éventuelle surchauffe de ses batteries à l'avenir, l'équipe de Solar Impulse a installé un nouveau système de refroidissement conçu pour éviter tout problème lié à la température si le profil de la mission de vol change.

Par ailleurs, au cas où le système de refroidissement tombe en panne, un nouveau système de secours permet au pilote d'ouvrir manuellement l'orifice du conteneur, ce qui lui permet d'utiliser l'air extérieur pour refroidir les batteries sans les laisser trop se refroidir et geler.

En outre, quelques ajustements ont été faits sur le boîtier du moteur (ou gondole), qui abrite à la fois la batterie et le moteur : une prise d'air a été ajoutée pour permettre l'écoulement de l'air dans le système de refroidissement de la batterie.

L'équipe de Solar Impulse a également veillé à ce que les futurs plans de vol offrent suffisamment de temps aux batteries pour refroidir entre les vols, et a ajusté son programme de vol pour éviter la surchauffe des batteries dans les climats tropicaux.

« Lorsque l'on conçoit un avion expérimental, tout système supplémentaire est une source potentielle d'échec. C'est la raison pour laquelle nous n'avons initialement pas intégré de système de refroidissement.

Comme nous avons eu ce moment de remplacement des batteries à Hawaï, nous avons décidé d'intégrer le système de refroidissement pour donner plus de flexibilité à l'avion, en particulier dans des environnements à très haute température », a déclaré M. Borschberg.

## DTS7 : Mesure de température

### Sonde de température modèle PT-100



#### APPLICATIONS

La sonde de température modèle PT-100 sert à mesurer la température, autant dans l'environnement que dans une structure liée au génie civil.

Elle est utilisée pour le contrôle à long terme de bâtiment et d'ouvrage sur lesquels la variation de température a une forte influence, ou lorsque la valeur de la température est une information indispensable pour les calculs ou pour permettre une corrélation avec les autres données physiques collectées.

#### DESRIPTIF

La sonde de température PT-100 est constituée d'une résistance de platine enchâssée dans un tube de protection en inox habituellement gainée de quartz dans sa partie intérieure.

La valeur de la résistance du platine variant de manière connue en fonction de la température, ce type de capteur permet d'obtenir une grande précision dans la mesure de température.

Sur les sondes 4 fils, une résistance de référence permet de connaître avec précision le courant généré. La mesure se fait alors en utilisant cette source de courant connue, et en mesurant la tension aux bornes de la sonde. Aucun courant ne circulant dans les fils de mesure de tension, il n'y a aucune chute de tension, et donc aucune erreur sur la mesure de la résistance. La tension lue est directement proportionnelle à la valeur de la résistance de la sonde.

La lecture sur 4 fils permet de s'affranchir de la longueur du câble par compensation directe, et ainsi de conserver une grande précision de mesure.

#### CARACTERISTIQUES

Gamme de mesure :  
-50 à +300°C

Précision :  
>0.01°C

Résolution :  
0.1°C

Résistance :  
100  $\Omega$   $\pm$  0.1 à 0°C

Facteur de température :  
0.385  $\Omega$ /°C

Diamètre :  
6 mm

Longueur :  
50 mm (standard)

Classe :  
A

Étanchéité :  
IP68

Câble :  
4 conducteurs

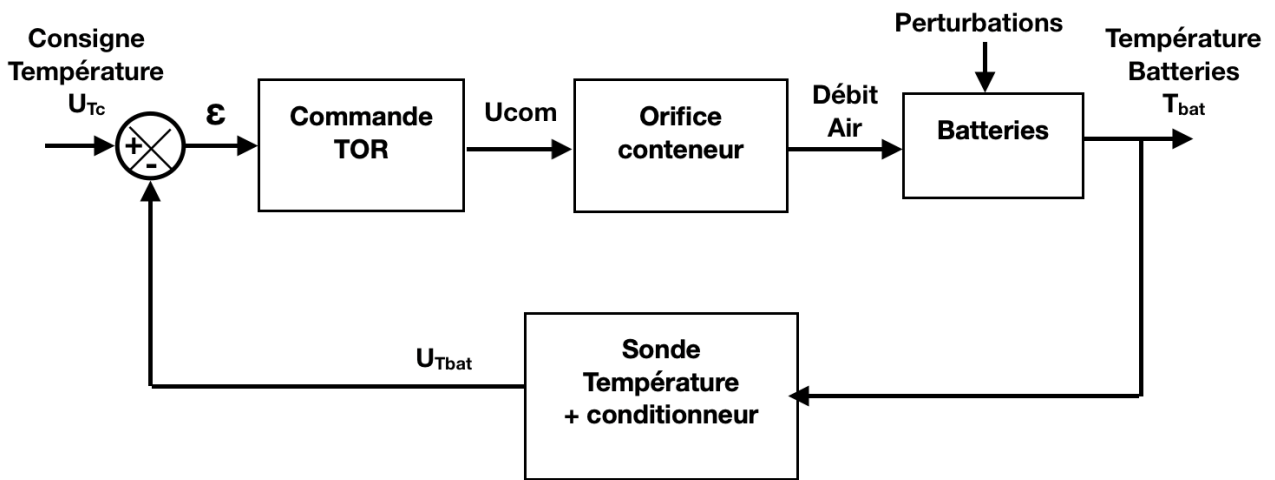
Options :  
Câble blindé  
Chapelet de sondes  
Prise en bout de câble  
Autres longueurs de sonde  
Sonde 3 fils

Accessoires :  
Boîtier à commutateur rotatif  
Poste de lecture

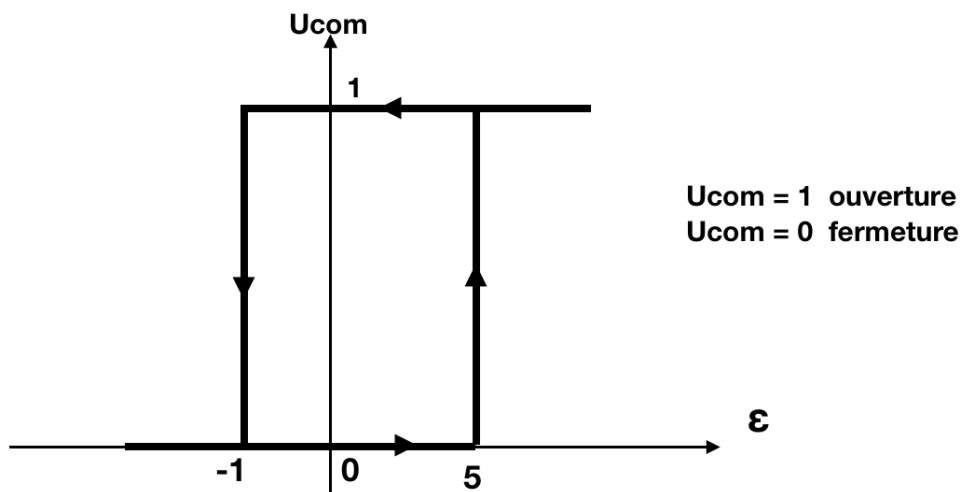
Source : <http://www.geo-instrumentation.fr>

## DTS8 : Principe de régulation de la température des batteries

Schéma-bloc :



La commande TOR est représentée ci-dessous :



**DRS1 : Différents scénarios de fonctionnement** question A.1

cas	période	PV	Batteries	$P_{diff}$	Soc (état de charge)	Description
1	jour ensoleillé ou nuageux	✓	repos	0	$Soc_{min} < Soc < Soc_{max}$	$P_{mot} = P_{PV}$
2		✓	.....	.....		$P_{mot} = \dots\dots\dots$
3		X	.....	.....		$P_{mot} = \dots\dots\dots$
4		✓	En charge	.....	.....	$P_{bat} = \dots\dots\dots$
5	nuit	X	.....	< 0	.....	$P_{mot} = \dots\dots\dots$