

**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**



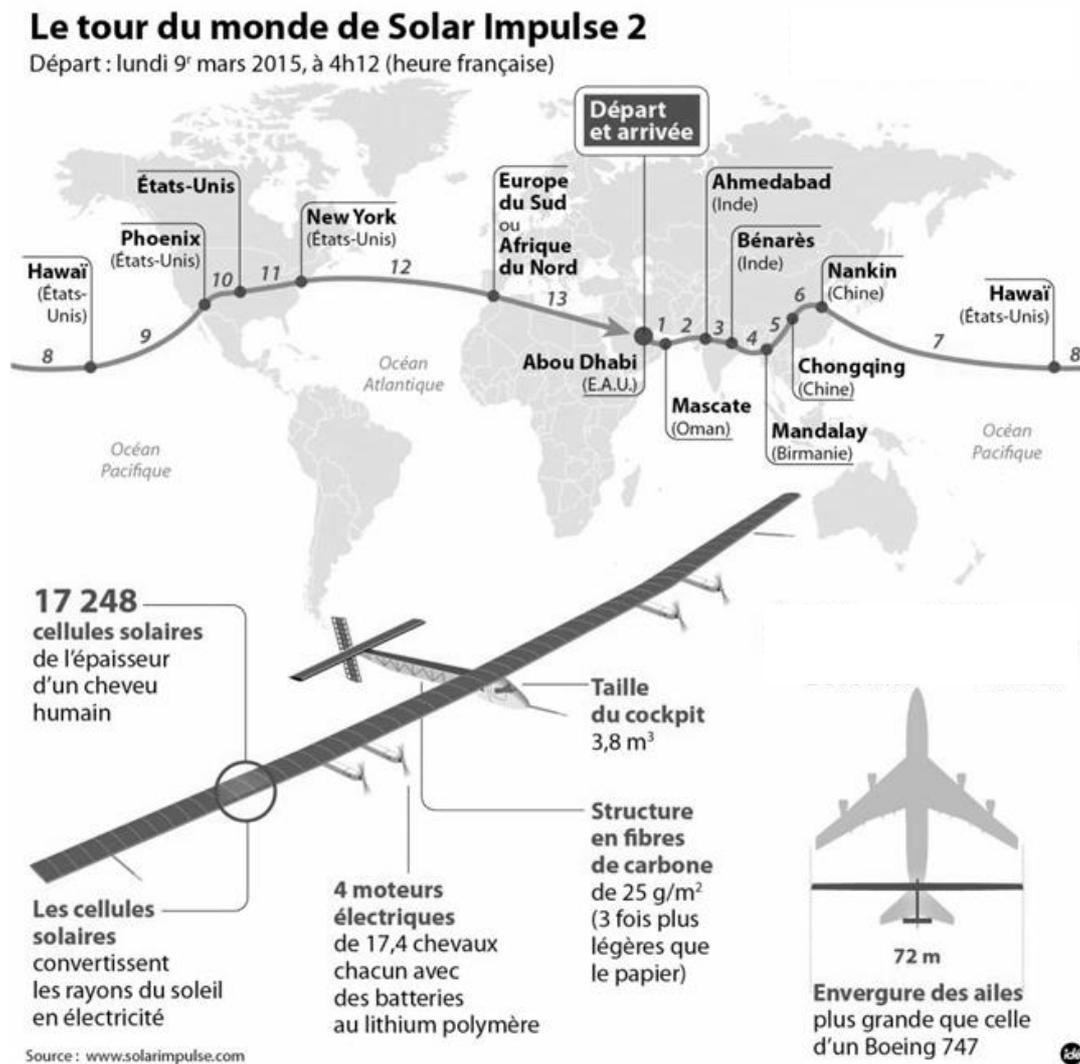
- **Présentation de l'étude et questionnaire**..... pages 3 à 10
- **Documents techniques**..... pages 12 à 21
- **Documents réponses** ..... pages 22 à 25

**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.

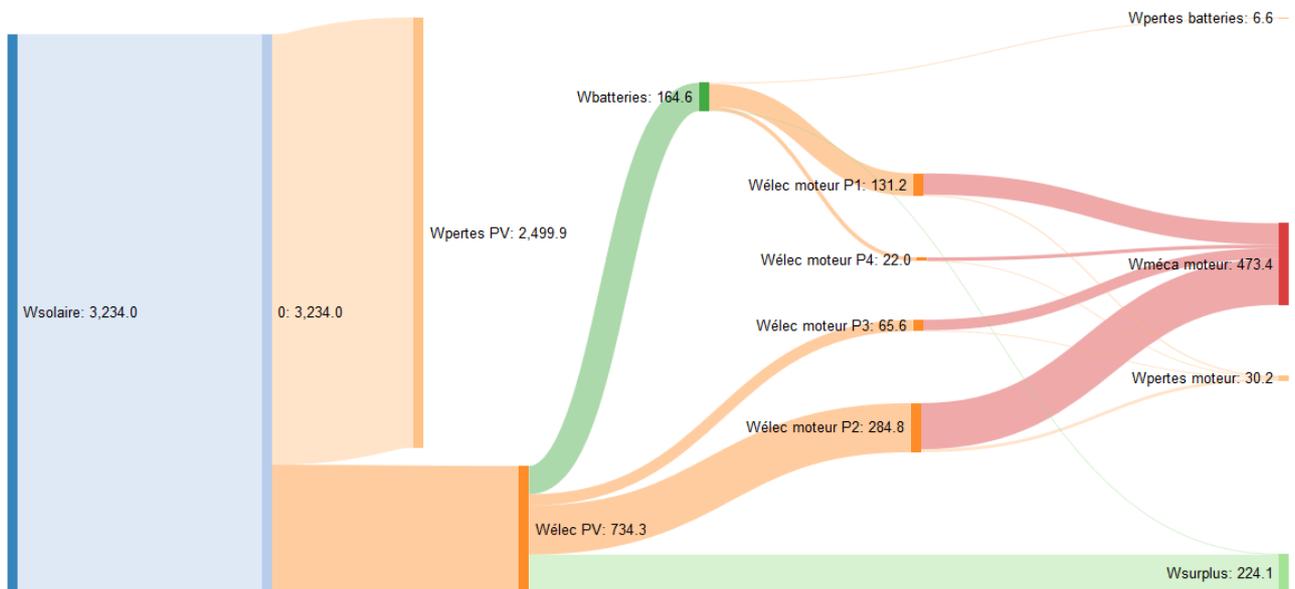
Question 4.10 | **Déterminer** la puissance électrique délivrable par les batteries durant la phase 1 :  $P_{\text{batteries P1}}$ .

**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.

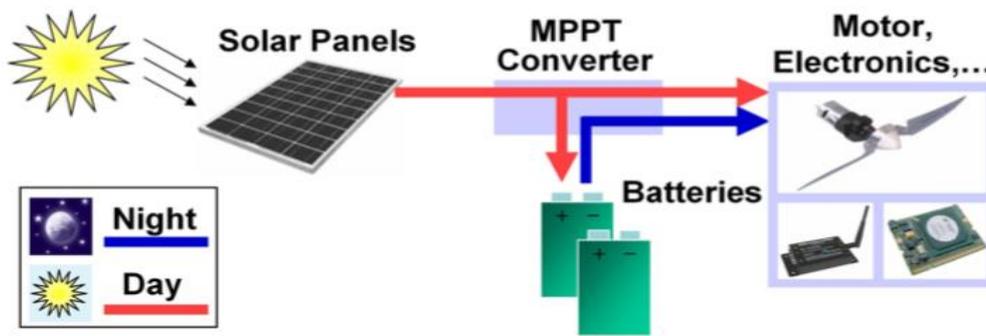
## Partie 5 : comment optimiser l'efficacité énergétique du « Solar Impulse 2 » ?

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 | 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.  
DT 8  
DR 3

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 | **Compléter** le document DR 4 en positionnant par des repères verticaux les 4 phases de vol du cycle journalier.  
DT 6, DT 9  
DR 4

Question 5.3 | Sur votre feuille, pour chacune des phases de vol :  
DT 6, DT 9  
DR 4

- **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 | Afin de déterminer le meilleur compromis dans la gestion de l'énergie, plusieurs simulations ont été réalisées.  
DT 7, DT 9  
DR 4

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.

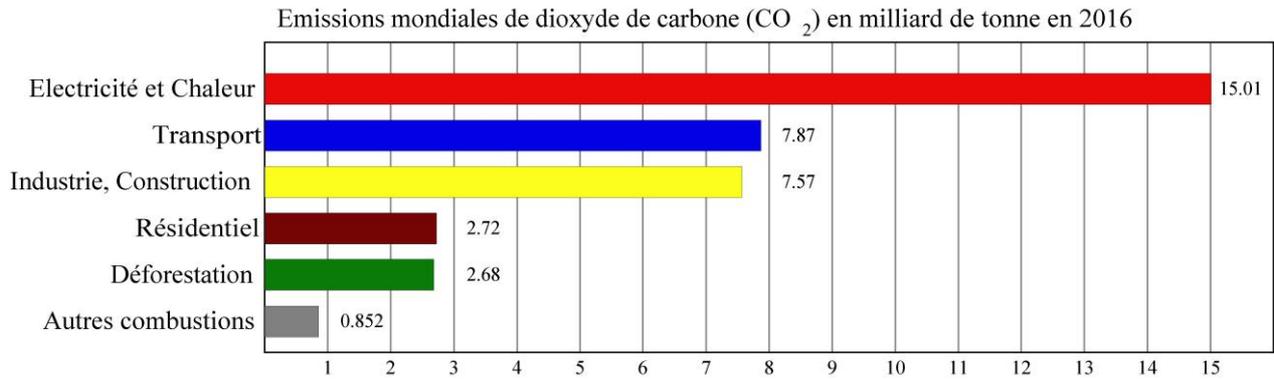
## Partie 6 : quel intérêt de développer des projets innovants ?

---

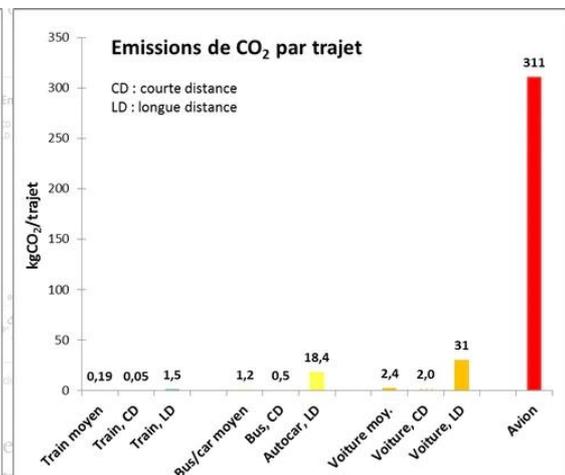
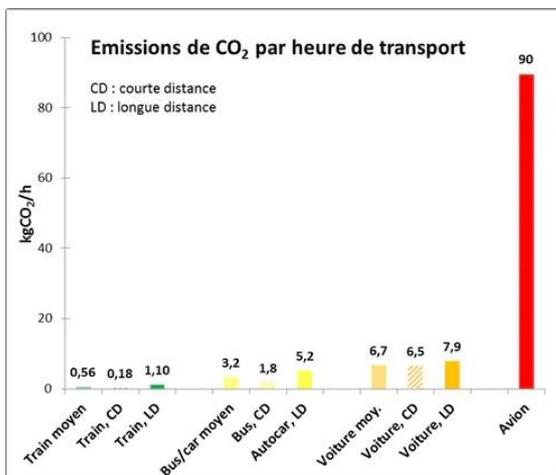
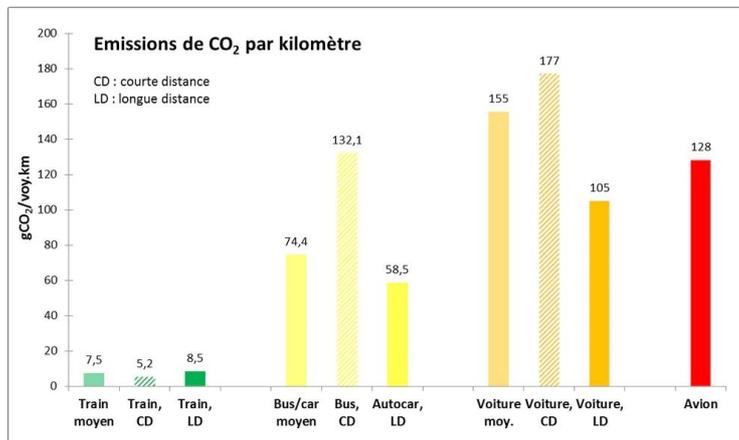
Question 6.1 | À l'aide du DT 10, **justifier** l'intérêt de concevoir un modèle virtuel global  
DT 10 | en phase de développement de produit.

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

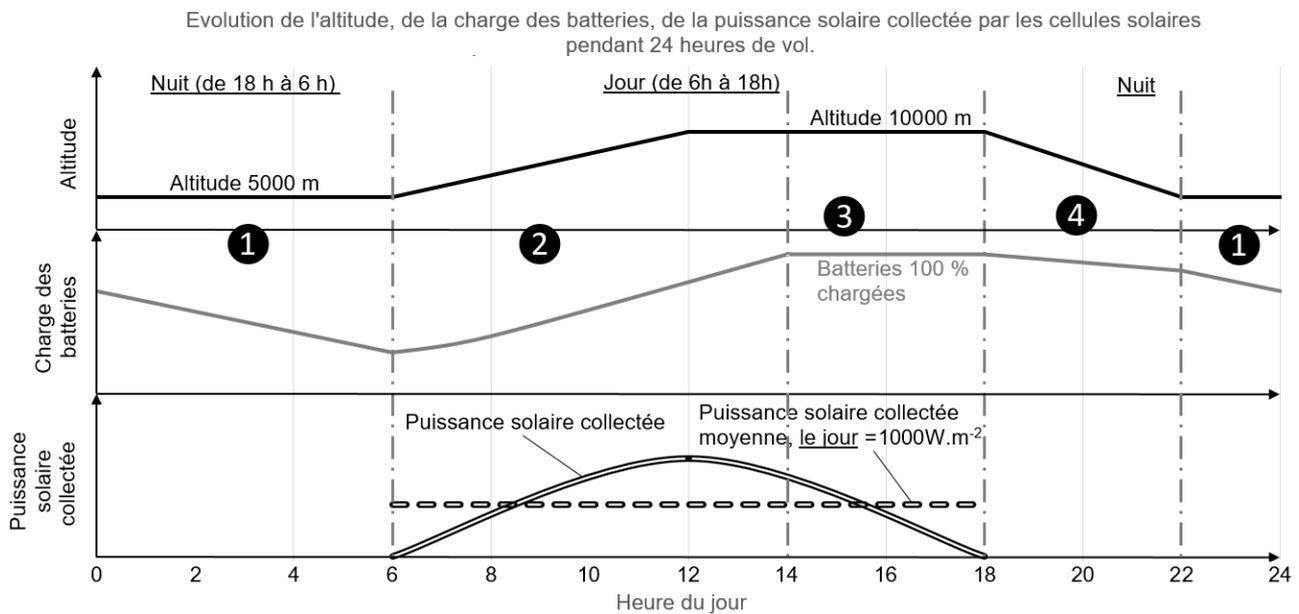
	Diamond DA42 - VI	X-57 de la Nasa	Aéronef Ehang 184	Solar Impulse 2
				
	Le DA42 est un bimoteur quadriplace. L'appareil est construit en fibre de carbone et reçoit une finition de surface de type planeur qui lui permet de compenser une motorisation plutôt faible. Celle-ci est composée de deux moteurs 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



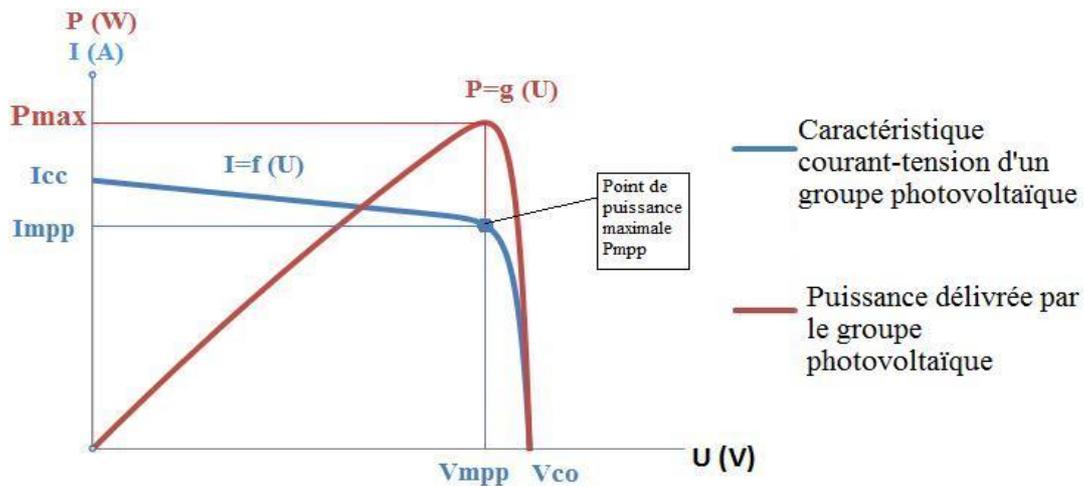
Phases de vol :

- 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.

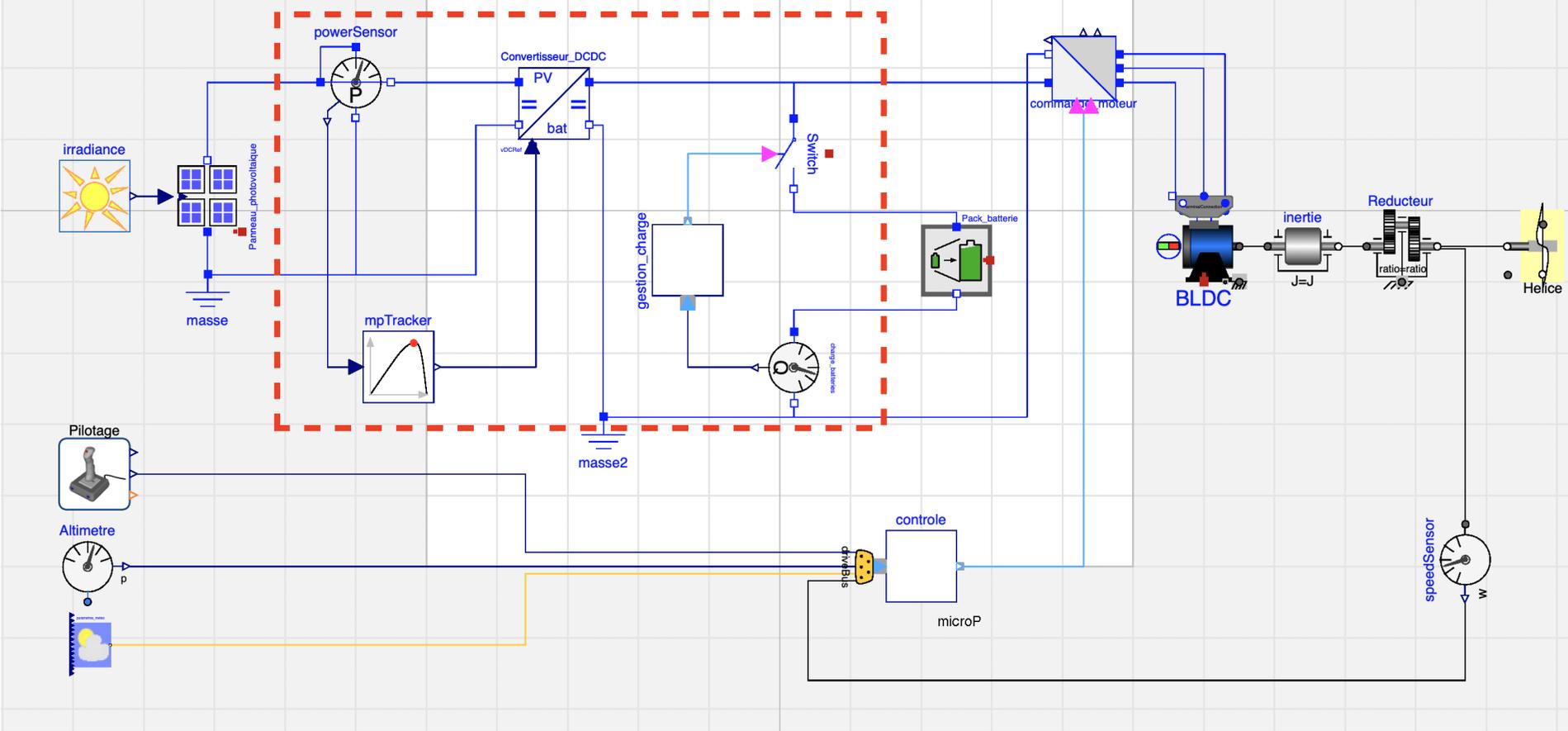
- Le module MPPT acquiert en permanence le courant  $I_{PV}$  et la tension  $U_{PV}$  délivrés par le panneau solaire.
- Il calcule en permanence la puissance d'entrée  $P_E$  et ajuste la tension de sortie  $U_s$  (et donc aussi le courant  $I_s$ ) du convertisseur jusqu'à atteindre en entrée la puissance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

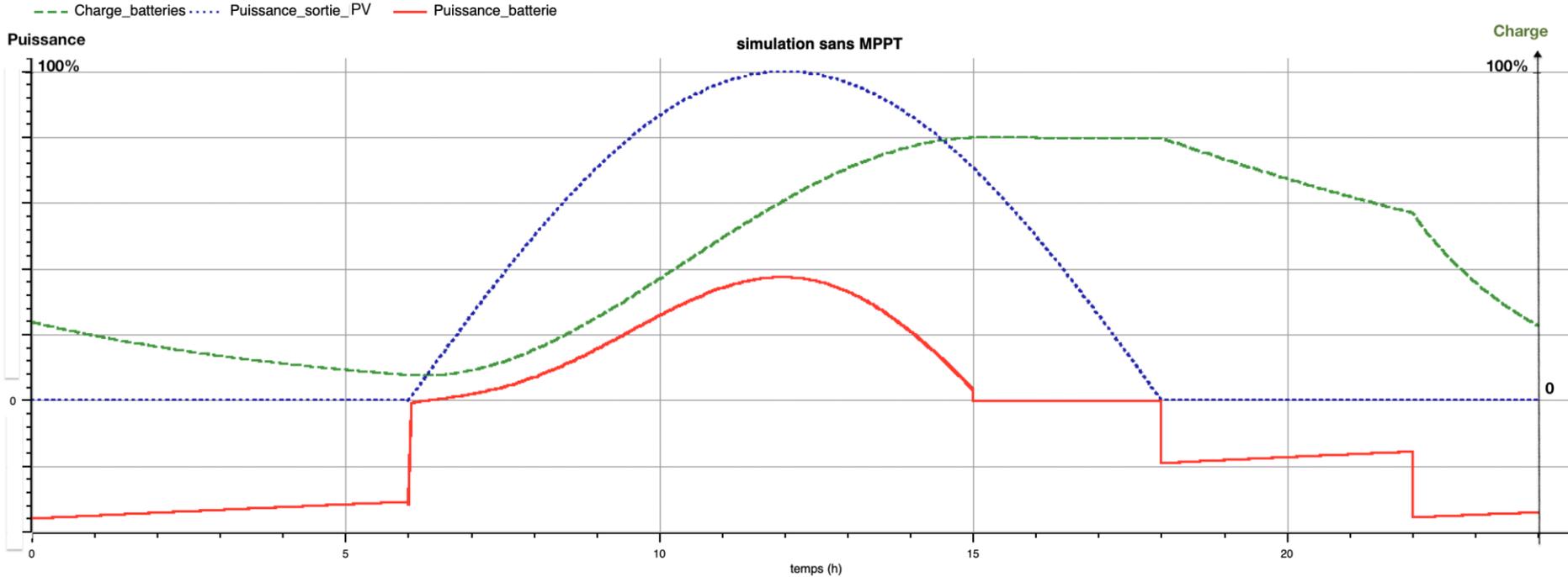
On a donc  $P_s = U_s \cdot I_s = P_E = U_{PV} \cdot I_{PV}$ .

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



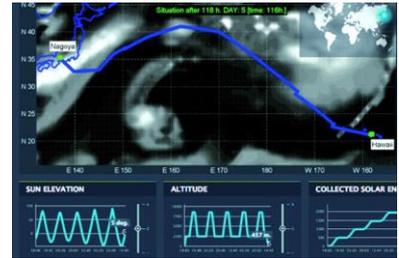
## DT 10 : solar Impulse 100 % calculé

---

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.

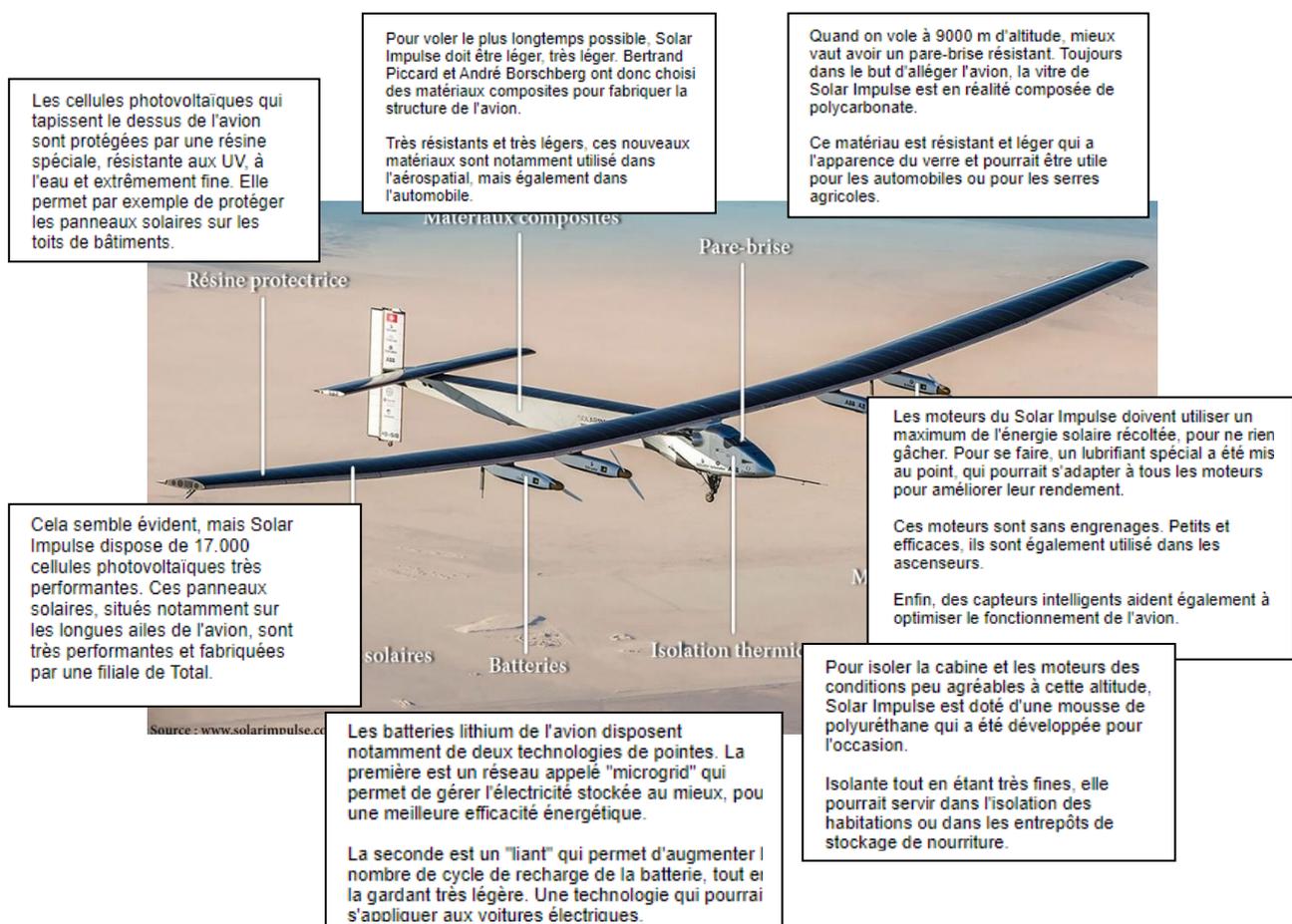
## DT 11 : à quoi servent les technologies du Solar Impulse 2 dans la vie de tous les jours ?

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**

---

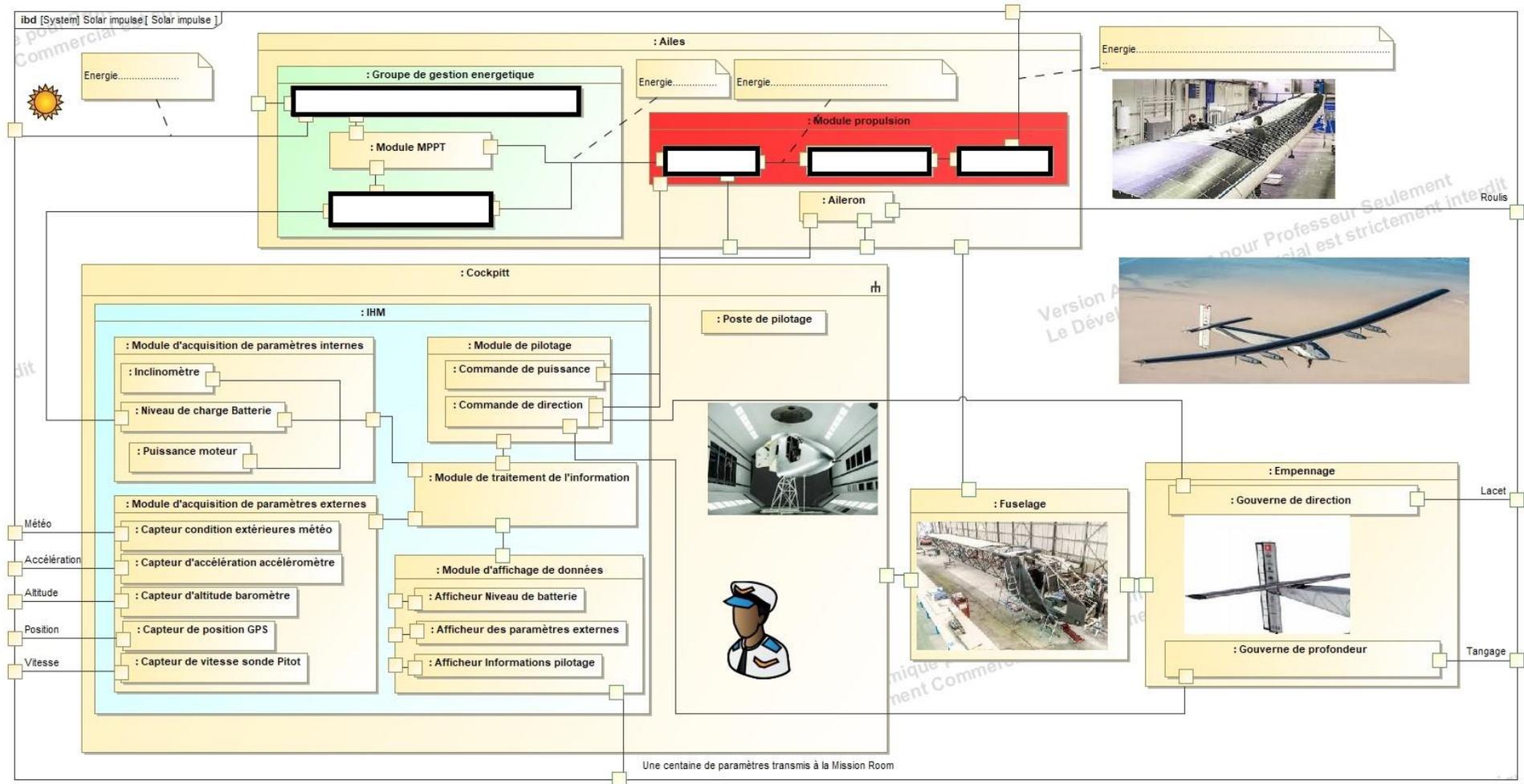
	Voiture (distance moyenne)	Car-Bus (distance moyenne)	Avion	Rapport : $\frac{\text{Avion}}{\text{Voiture (distance moyenne)}}$	Rapport : $\frac{\text{Avion}}{\text{Car-Bus (distance moyenne)}}$
g CO <sub>2</sub> émis par kilomètre et par voyageur					
kg CO <sub>2</sub> émis par heure de transport		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

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

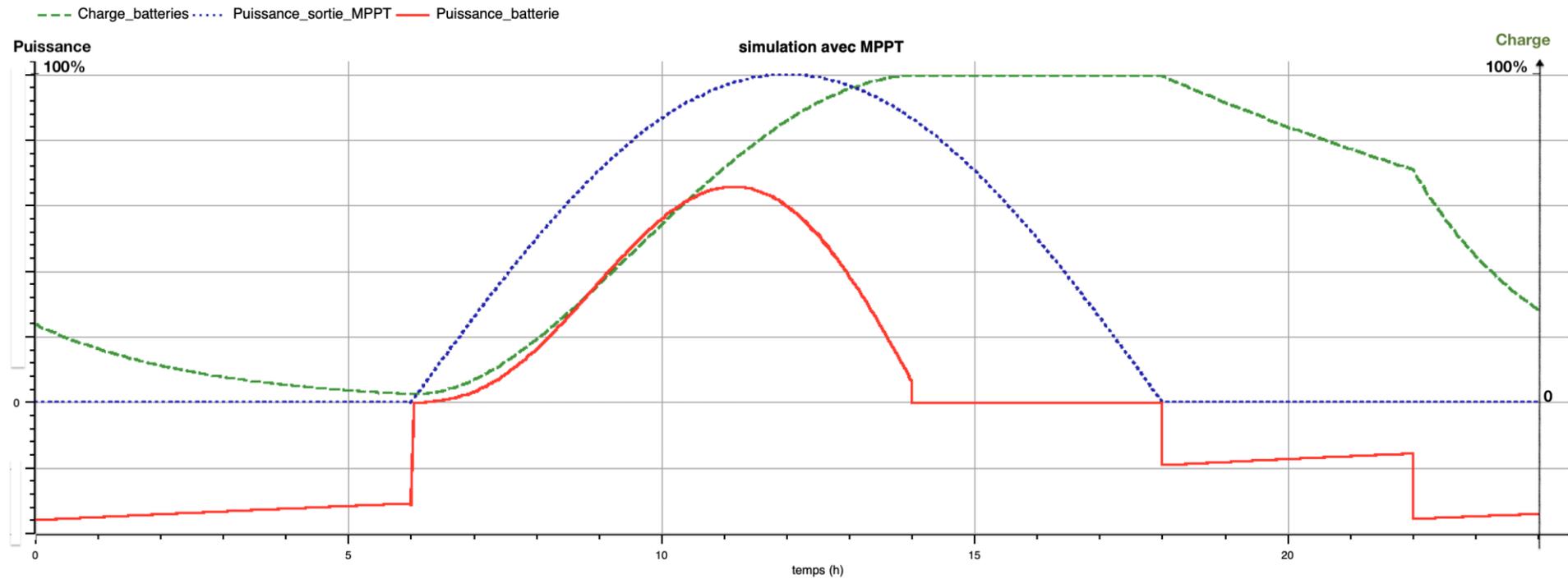
Question 2.1  Critères et exigences du cahier des charges à indiquer (cf. DT1)	Question 2.2 : Mettre <b>+1</b> si le critère est respecté, sinon indiquer <b>-1</b>			
	Diamond DA42 – VI 	X-57 de la Nasa 	Aéronef Ehang 184 	Solar Impulse 2 
Critère : <b>empreinte CO<sub>2</sub> en utilisation</b> Exigence : ----- -----				
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  
**Systemes d'information et numérique**

**Solar Impulse 2**



**Constitution du sujet :**

- Dossier sujet et questionnement ..... Pages 26 à 32
- Dossier technique..... Pages 33 à 36
- Documents réponses ..... Pages 37 à 39

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.

Tous les documents réponses, DRS1 à DRS4, sont à rendre agrafés avec votre copie.

## Mise en situation

En aviation, le phénomène de portance (ce qui permet à l'avion de voler) dépend, entre autres, de la vitesse relative de l'avion par rapport à l'air. Il est donc très important pour le pilote de connaître et de surveiller cette vitesse afin d'éviter tout risque de décrochage (phénomène de chute de l'avion). Dans le cas de Solar Impulse 2, cette vitesse est en plus transmise au sol afin d'y être enregistrée sur un serveur et analysée en temps réel par l'équipe d'assistance. L'étude qui suit permettra de valider la mesure, la transmission au sol et l'enregistrement sur serveur de la vitesse de Solar Impulse 2.

**Notation : toutes les valeurs hexadécimales sont précédées des caractères 0x**

**Exemple : l'octet de valeur 2b s'écrit : 0x2b = (2b)<sub>hex</sub> = (2b)<sub>16</sub>**

## Travail demandé

### **PARTIE A : Valider la précision de la chaîne d'acquisition de vitesse de l'avion Solar Impulse 2**

---

L'avion Solar Impulse 2 vole à des vitesses relativement faibles. La plage de mesure imposée par le cahier des charges est de 0 à 150 km.h<sup>-1</sup> (vitesse maximum réelle 140 km.h<sup>-1</sup>) avec une précision de 0,05 km.h<sup>-1</sup>.

Question A.1 | A l'aide du document technique DTS1, **justifier** l'utilisation d'une sonde  
DTS1 | Pitot pour mesurer la vitesse d'un avion.

Question A.2 | La chaîne d'information de la vitesse est partiellement donnée sur le  
DRS1 | document réponse DRS1. **Remplir** les rectangles vides en indiquant les  
termes ci-dessous :

« Grandeur numérique » - « Tension analogique » - « Information  
numérique » - « Tension analogique amplifiée » - « Pression différentielle »

Sur cette chaîne d'information, la fonction « Différentiel de pression » permet d'obtenir une linéarisation de la pression différentielle en fonction de la vitesse de l'avion.

Les caractéristiques des blocs « Différentiel de pression », « Convertisseur pression/tension » et « Convertisseur analogique numérique (CAN) » sont données sur document technique DTS2.

Question A.3 | **Donner** la valeur de  $U_{scap}$  pour une vitesse de 150 km.h<sup>-1</sup>. **Justifier** la mise  
DTS2 | en place de l'amplificateur avant le convertisseur.

On cherche à vérifier que l'information vitesse sera suffisamment précise. Pour cela, le choix du convertisseur analogique numérique (CAN) est important.

Question A.4 | Toujours en vous aidant du document technique DTS2, **calculer** le  
DTS2 | quantum (résolution) du CAN.

Question A.5 | **Calculer** la vitesse de l'avion pour ce quantum (N = 1 à la sortie de CAN)  
DTS2 | et **conclure** sur la précision de la mesure de vitesse de Solar Impulse 2.

On donne :

$$N = ENT\left(\frac{2^n - 1}{3,3} \times Ue\right)$$

$$Ue = 21,6 \times 10^{-3} \times V$$

*V* : vitesse de l'avion en km/h

*Ue* : tension d'entrée de CAN en volt

*n* : nombre de bits du convertisseur

*N* : nombre issus de la conversion

*ENT(x)* : Partie entière de *x*

**Choix 1 :**

## **PARTIE B : Validation de l'émission des paramètres vers le sol**

Tous les paramètres de l'avion Solar Impulse 2 (charge des batteries, vitesse, température, pression...) sont transmis au centre de contrôle sur terre. Au total, il y a 96 paramètres transmis en temps réel. Le cahier des charges impose une retransmission de tous ces paramètres à chaque seconde.

Chaque donnée est transmise via 3 octets :

- 1 octet pour le code de la grandeur physique (voir document technique DT3) ;
- 2 octets pour la valeur.

Pour être envoyées au sol, les données sont réunies sous forme de trames. Une trame est constituée de 3 données (9 octets) et 2 octets de transfert, soit 11 octets en tout.

0xFF	oct_0	oct_1	oct_2	oct_3	oct_4	oct_5	oct_6	oct_7	oct_8	Chk
------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-----

**FF** : est l'octet de synchronisation, il permet de repérer le début de la trame numérique

**oct\_0 ... oct\_8** : sont les valeurs des 9 octets de données. La valeur 255 n'est jamais atteinte (pour éviter l'obtention de FF).

**Chk** (checksum) : cet octet de checksum, comparé à la même opération effectuée au sol, permet de valider ou non la trame reçue.

Au fur et à mesure de l'acquisition, les valeurs sont stockées dans un tableau de données afin d'être transmises sur terre. Ce tableau de données est partiellement donné sur le DTS4.

L'algorithme ci-dessous permet à partir du tableau de données la mise en forme et l'envoi des 32 trames nécessaires à l'envoi des 96 paramètres de vol.

Il effectue le calcul, pour chaque trame, de l'octet de checksum « Chk ».

## Début

**Pour** ( Num\_Trame de 0 jusqu'à 31 par pas de 1)

**Envoyer** ( FF )

// Envoyer l'octet FF (synchronisation)

**Pour** ( Num\_Octet de 0 jusqu'à 8 par pas de 1)

Valeur = **Lire** (Num\_Octet+9xNum\_Trame) // Lire l'octet n°x du tableau de données

**Envoyer** ( Valeur )

// Envoyer l'octet lu

Chk = Chk + Valeur

// Additionner la valeur de l'octet avec la valeur précédente de Chk

**Fin de Pour**

Chk = Chk\_Temp /2

// Calculer le Chk en divisant sa valeur par 2

**Envoyer** ( Chk )

// Envoyer l'octet Chk

**Fin de Pour**

// Mettre Chk à 0

Chk = 0

## Fin

Valeur : valeur lue dans le tableau des paramètres. Type : octet (byte)

Num\_Trame : Numéro de la trame en cours. Type : octet (byte)

Num\_Octet : Numéro de l'octet en cours. Type : octet (byte)

Chk : Cheksum (octet de contrôle). Type octet (byte) il est calculé par une addition sur 8 bits des 9 octets suivie d'une division entière par 2 (pour éviter l'obtention de FF).

Question B.1 | À partir de cet algorithme, **compléter** l'algorithme du document  
DRS2 | réponse DRS2.

Question B.2 | A l'aide du tableau du document technique DTS3 et du tableau de  
DTS3, DTS4, DRS3 | données du document technique DTS4, **remplir** sur le document réponse  
DRS3 la trame incluant les paramètres de vol : « Température cockpit »,  
« Vitesse Solar Impulse » et « Pression extérieure ».

Les 2 octets liés au paramètre 0x26 représentent la partie entière et la partie décimale de la vitesse du Solar Impulse.

Question B.3 | **Calculer** la valeur de ces 2 octets en hexadécimal si l'avion vole à une  
DRS3 | vitesse de 71,86 km.h<sup>-1</sup>. **Consigner** les résultats sur le document réponse  
DRS3. **Comparer** ces résultats avec la trame émise et **conclure**.

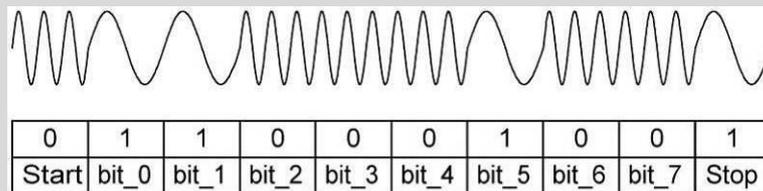
**Choix 2 :**

**PARTIE C : Réception des données et transfert vers la salle de contrôle**

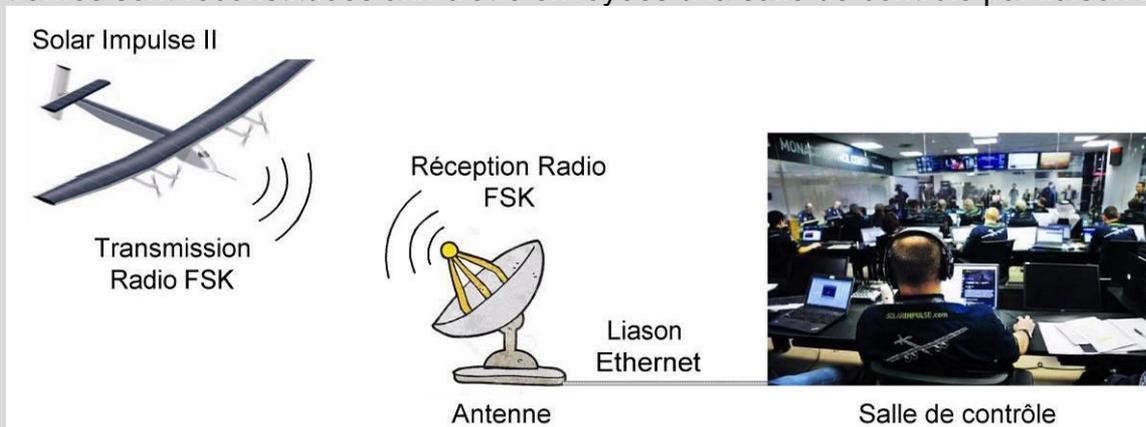
Les données sont transmises par modulation FSK. Le codage FSK (décalage en fréquence) associe à chaque bit un signal sinusoïdal de fréquence déterminée :

- un « zéro logique » correspond la fréquence de 28,8 kHz ;
- un « un logique » correspond la fréquence de 9,6 kHz.

Exemple de transmission par modulation FSK d'un octet de valeur 0x23 = b00100011 :



Une fois transmis par radio, ces signaux sont réceptionnés au sol par une antenne et les trames sont reconstituées afin d'être envoyées à la salle de contrôle par liaison Ethernet.



Pour détecter les « 0 » et les « 1 » dans la trame, on utilise un filtre passe-bas. Il permet de filtrer les basses fréquences et donc les 0 logiques de la trame. La courbe de ce filtre est donnée sur le document technique DTS5.

Question C.1 | À partir de cette courbe, **donner** la fréquence de coupure du filtre à -3dB et **conclure** sur la pertinence de cette valeur.

DTS5

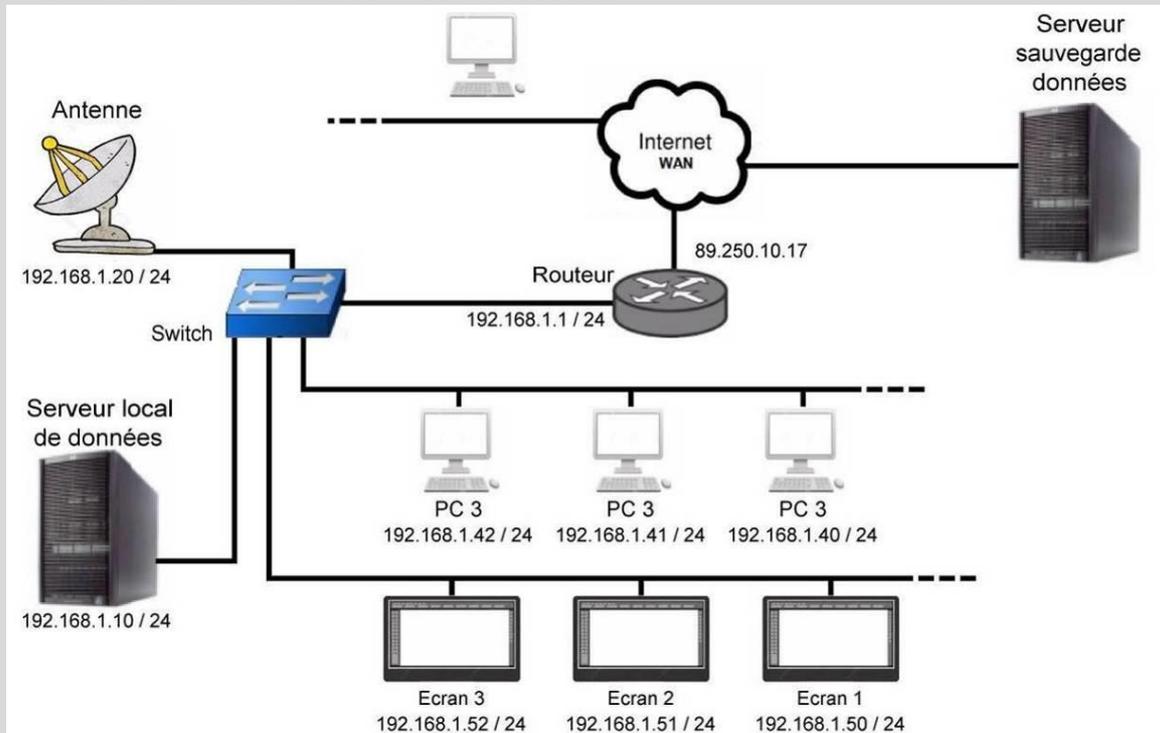
Le document réponse DRS4 donne la réception avant filtrage des 2 octets « vitesse Solar Impulse ».

Question C.2 | Sur ce même document, **dessiner** l'allure de ces 2 octets après filtrage et en déduire la vitesse de l'avion.

DRS4

Une fois reconstituées, les trames sont envoyées sur un serveur local de données afin de les enregistrer et de faciliter le partage sur l'ensemble des équipements de la salle de contrôle.

L'architecture du réseau est donnée ci-dessous :



La liaison Ethernet est analysée afin de s'assurer de l'exactitude des données transmises. La trame capturée en hexadécimal est la suivante :

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
00	12	25	96	13	68	3f	45	97	00	0f	20	28	06	17	00	16
01	53	21	15	73	00	80	45	00	04	02	7c	c0	40	00	3b	06
02	ee	bd	c0	a8	01	14	c0	a8	01	0a	3b	06	4c	17	01	62
03	27	02	24	59	03	91	23	04	54	15	05	f3	3c	06	21	4d
04	07	10	00	08	9f	65	09	48	98	0a	12	07	0b	03	07	0c
05	28	06	0d	29	08	0e	28	10	0f	12	07	10	03	07	11	22
06	06	12	1b	05	13	06	43	14	ba	ca	15	20	21	16	62	59
07	17	13	75	18	29	56	19	31	84	1a	67	68	1b	42	69	1c
08	09	37	1d	28	06	1e	29	08	1f	28	10	20	25	06	21	ba
09	fe	22	a8	01	23	c0	a8	24	0a	3b	25	4c	17	26	47	56
0A	27	36	02	28	c2	1a	29	72	73	2a	66	c8	2b	...		

Question C.3 | En utilisant le document technique DTS6, **déterminer** l'adresse IP source et l'adresse IP destination incluses dans cette trame. **En déduire** les appareils en liaison : source et destination.

DTS6

On rappelle que la vitesse est codée sur deux octets liés au paramètre 0x26. Le premier représente la partie entière et le deuxième la partie décimale de cette vitesse.

Question C.4 | La plage de données réelles représentative des paramètres de Solar Impulse 2 commence à l'octet numéro 02E. En utilisant les documents techniques DTS3 et DTS6, **trouver** dans cette trame les 2 octets relatifs à la vitesse de l'avion. Donner la valeur de cette vitesse puis **conclure**.

DTS3, DTS6

## **PARTIE D : Synthèse**

---

Question D.1 | À partir des résultats obtenus dans les différentes parties, **conclure** sur cette étude de mesure de vitesse du Solar Impulse 2 en termes de précision, transmission et enregistrement.

Le même principe de chaîne d'information est utilisé pour l'ensemble des paramètres de l'avion Solar Impulse 2.

Question D.2 | **Expliquer** en quelques lignes l'intérêt de transmettre l'ensemble de ces paramètres de vol en temps réel.

# DTS1 : Caractéristiques de différents capteurs permettant de connaître la vitesse d'un fluide ou d'un gaz

---

## Capteur de débit d'un liquide



Le capteur de débit est constitué d'un rotor et d'un capteur à effet hall. Lorsque le liquide passe dans le capteur, le rotor génère des impulsions en fonction du débit. La fréquence de sortie varie en fonction de la vitesse du rotor. En connaissant le diamètre du tuyau, il est possible de calculer la vitesse du liquide.

Avantages : Facilité de mise en œuvre  
Légèreté

Inconvénients : Précision 7%  
Fonctionnement uniquement avec du liquide  
Ne prend pas en compte les variables extérieures au circuit.

## Anémomètre



L'anémomètre est constitué d'un rotor et d'un capteur à effet hall. Lorsque le vent frappe les coupelles demi-sphériques, le rotor génère des impulsions en fonction de sa vitesse de rotation. La fréquence des impulsions est donc directement liée à la vitesse du vent.

Avantages : Facilité de mise en œuvre  
Bonne précision

Inconvénients : Fragilité de la partie en mouvement

## Sonde Pitot



La sonde Pitot a été inventée par Henri Pitot en 1732. Ce tube de Pitot permet la détermination de la vitesse d'un fluide grâce à la mesure d'une différence de pression entre la pression statique  $P_s$  et la pression totale  $P_t$ . La vitesse du fluide est directement liée à cette différence de pression.

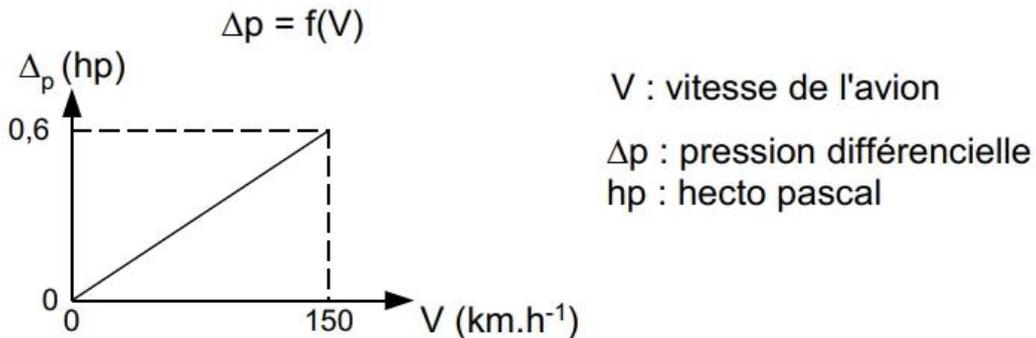
Avantages : Peu de pièces mécaniques en mouvement  
Très bonne précision

Inconvénients : Nécessité d'avoir deux circuits (pneumatique et électrique)  
Fonctionnement uniquement dans une direction

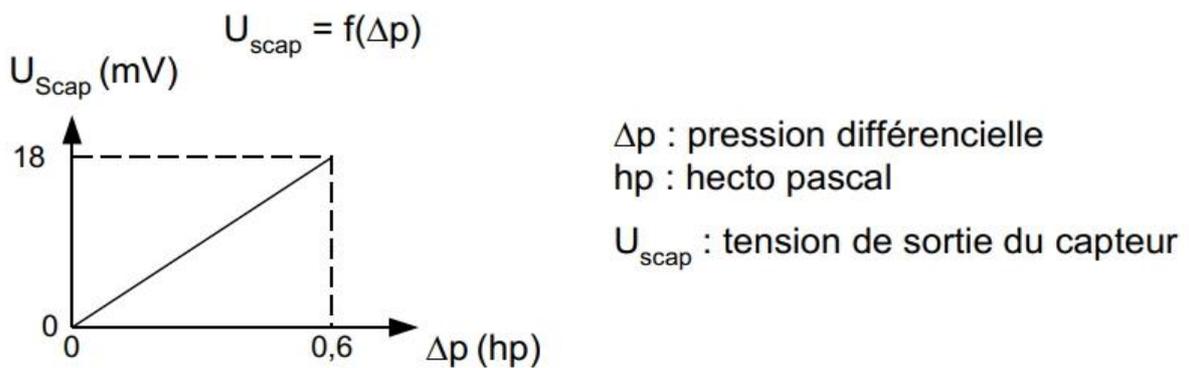
## DTS2 : Caractéristiques des différents modules de la chaîne d'information « vitesse » du Solar Impulse 2.

---

Différence de pression en fonction de la vitesse de Solar Impulse 2.

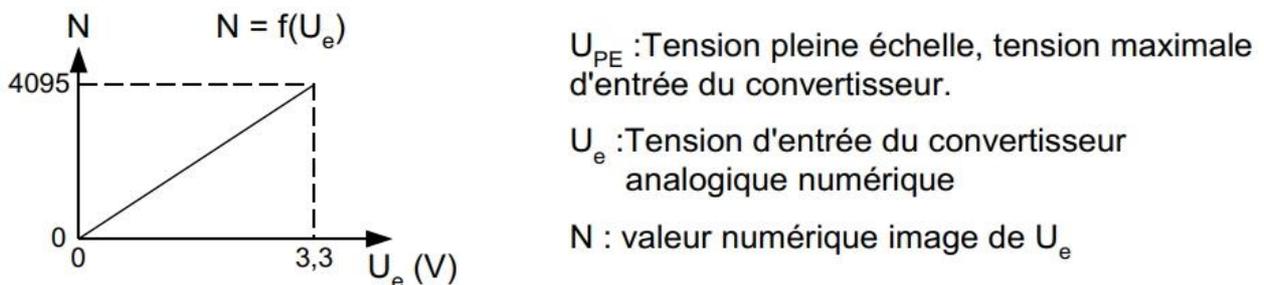


Tension de sortie du capteur en fonction de la différence de pression.



Nombre entier N en fonction de la tension d'entrée du convertisseur.

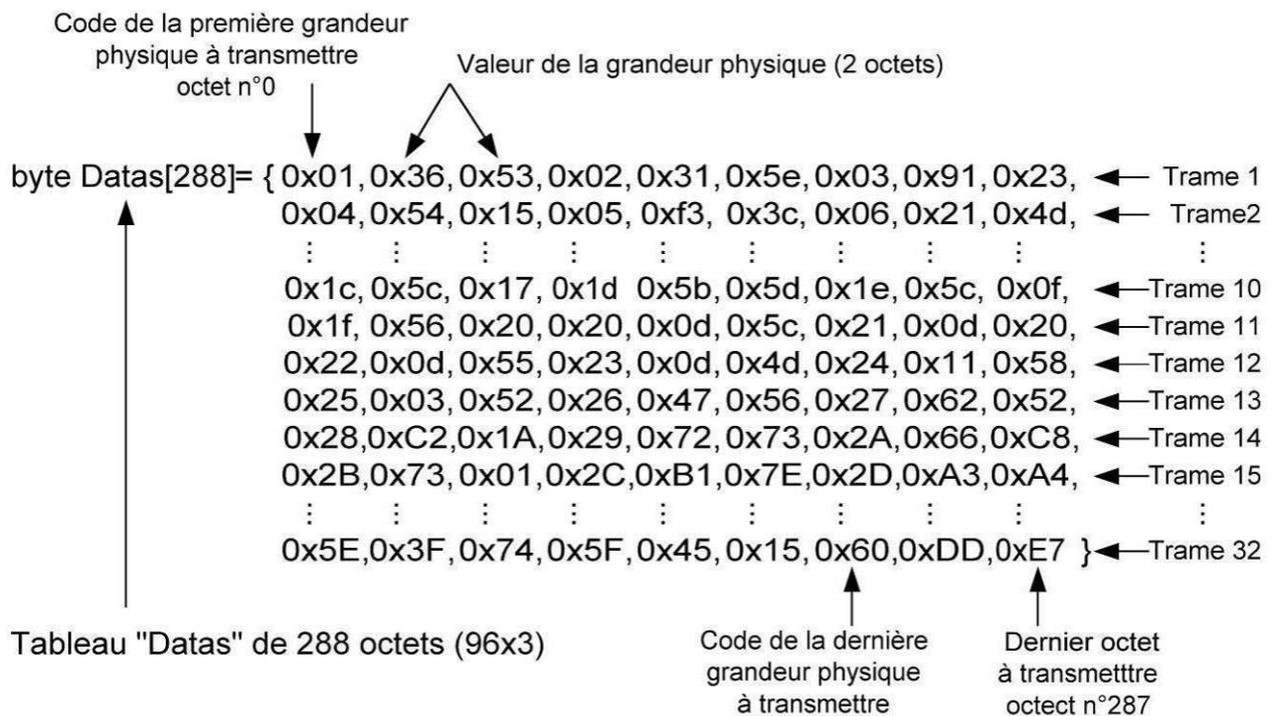
Convertisseur Analogique - Numérique 12 bits ;  $U_{PE} = 3,3$  Volt



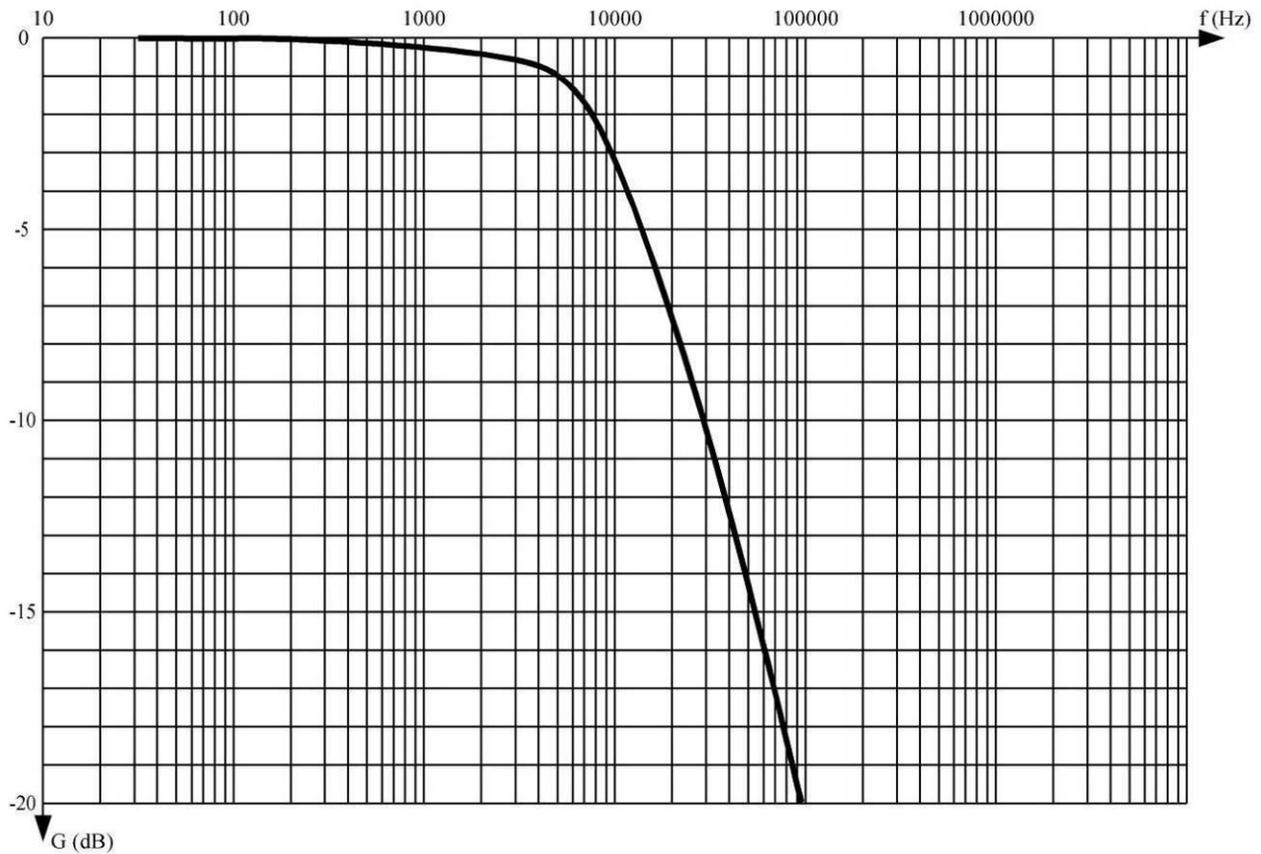
**DTS3 : Partie du tableau donnant le code hexadécimal sur un octet en fonction du paramètre de l'avion.**

Numéro	Paramètre	Code correspondant (1 octet)
01	Altitude	0x01
02	Tension Panneaux	0x02
27	% Charge Batterie 1	0x1C
28	% Charge Batterie 2	0x1D
29	% Charge Batterie 3	0x1E
30	% Charge Batterie 4	0x1F
31	Courant charge batterie 1	0x20
32	Courant charge batterie 2	0x21
33	Courant charge batterie 3	0x22
34	Courant charge batterie 4	0x23
35	Température extérieure	0x24
36	Température cockpit	0x25
37	Vitesse solar impulse	0x26
38	Pression extérieure	0x27
39	Pression cockpit	0x28

**DTS4 : Architecture du tableau des données à transmettre au sol.**



## DTS5 : Courbe de réponse du filtre passe bas $G = f(f)$ .



## DTS6 : Structure d'une trame Ethernet.

En tête Ethernet

**En octets**

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	a	b	c	d	e	f	10	11	12	13	14	15	16	...	5e9	5ea	5eb	5ec	5ed
Préambule + SFD								Adresse MAC destination						Adresse MAC source						Type de données	Données encapsulées		FCS / CRC					

**En bits**

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Version 4 bits				Longueur d'en tête 4 bits				Type de service 8 bits								Longueur totale 16 bits															
Identification 16 bits																Drapeau 3 bits			Décalage fragment 13 bits												
Durée de vie 8 bits								Protocole 8 bits								Somme de contrôle en tête 16 bits															
Adresse IP source 32bits																															
Adresse IP destination 32bits																															
Options éventuelles																								Bourage							
Données																															

# DRS1 : Chaîne d'information « Vitesse de Solar Impulse 2 ».

Question A.2

