

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 :

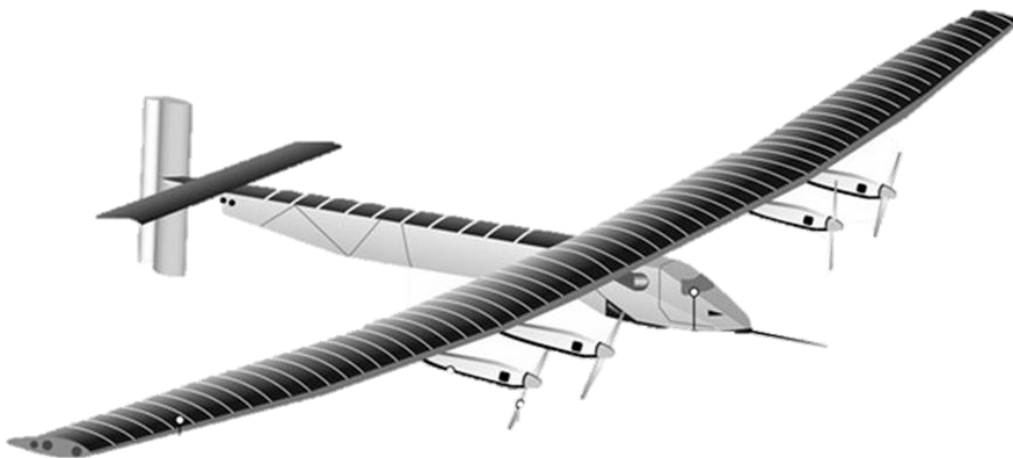
- **PARTIE COMMUNE (2h30) 12 points**
- **PARTIE SPÉCIFIQUE (1h30) 8 points**

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



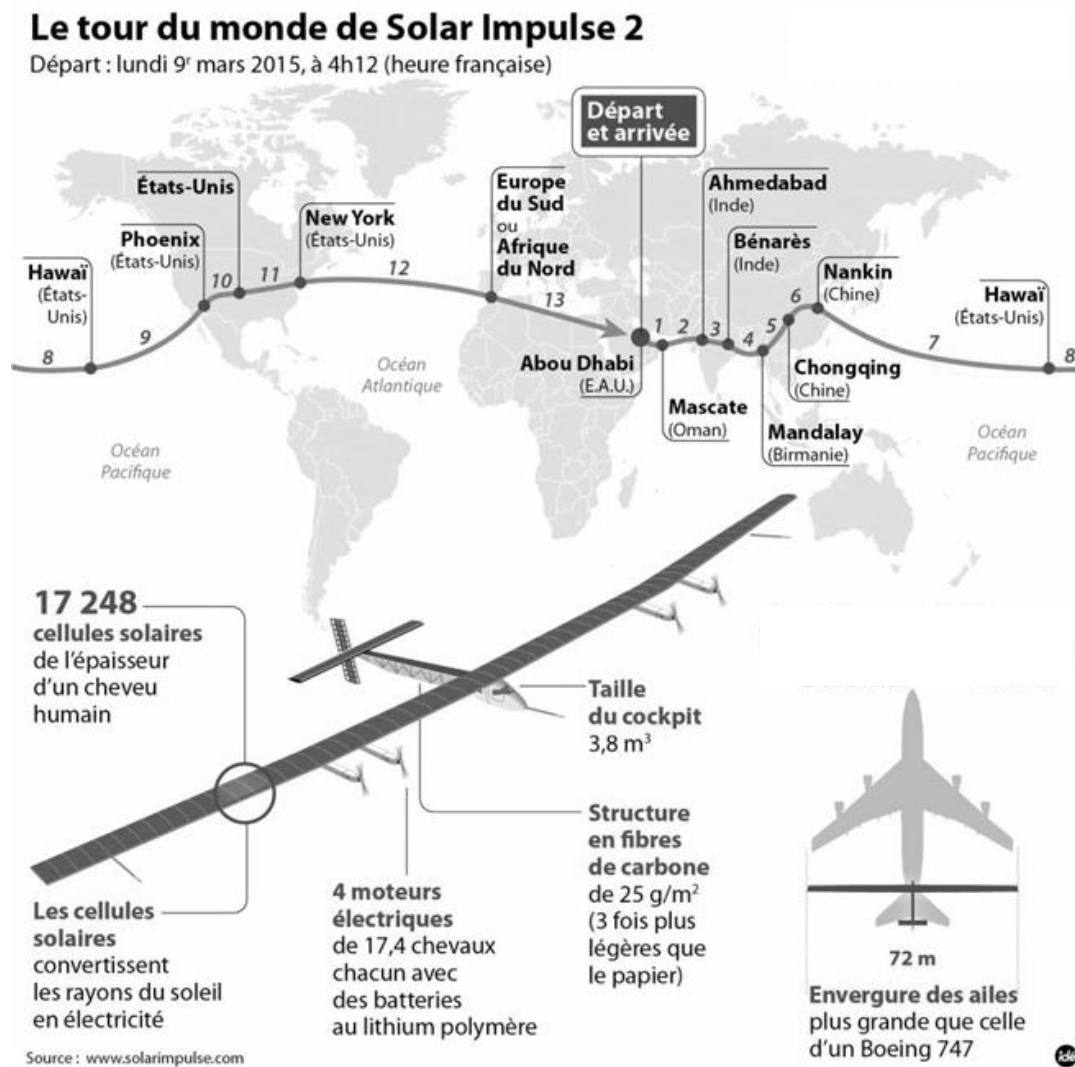
- **Présentation de l'étude et questionnaire**..... pages 3 à 10
- **Documents techniques**..... pages 12 à 21
- **Documents réponses** pages 22 à 25

**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 (CO₂) 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 CO₂ 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 : $\eta_{\text{moteur}} = P_{\text{méca moteur}} / P_{\text{élec moteur}}$

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_{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.

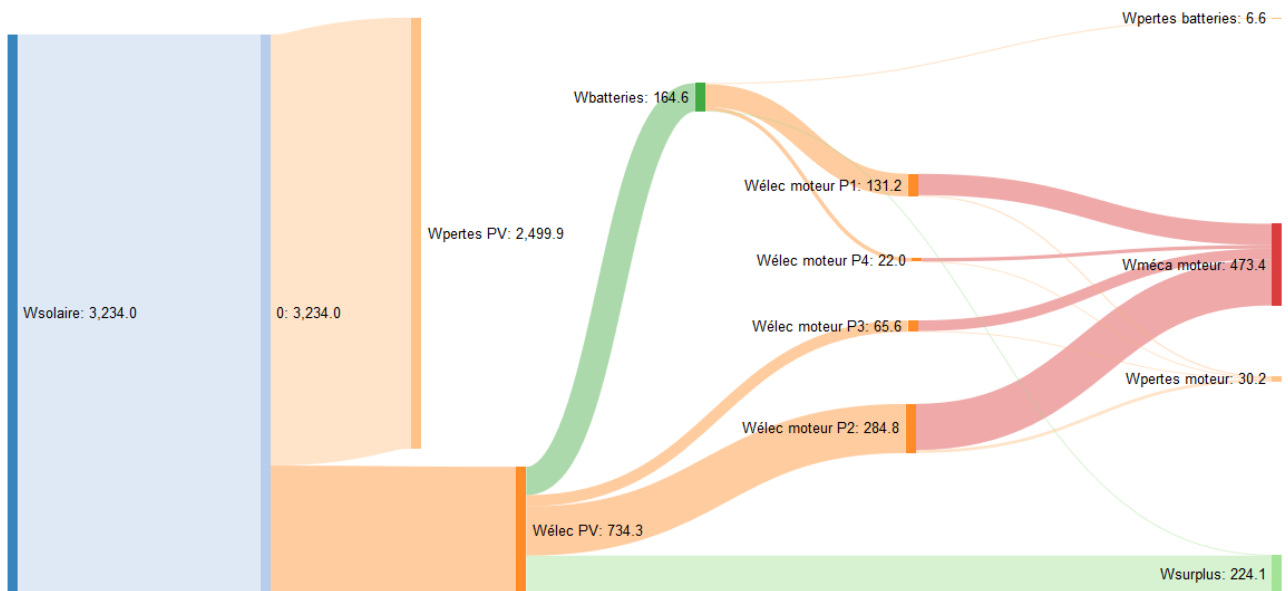
Question 4.10 | **Déterminer** la puissance électrique délivrable par les batteries durant la phase 1 : $P_{\text{batteries P1}}$.

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.

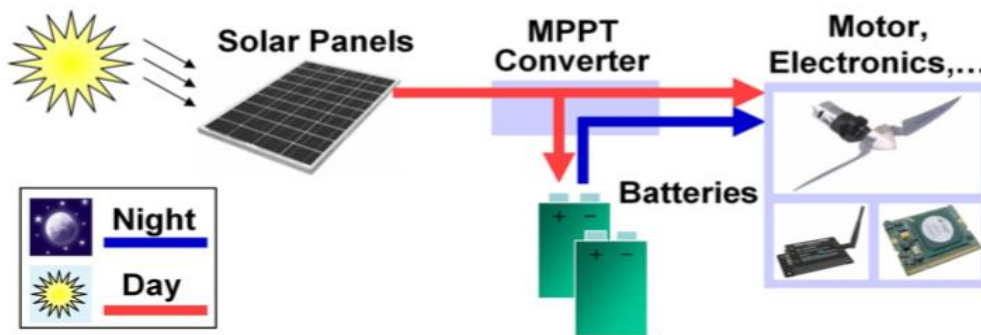
Partie 5 : comment optimiser l'efficacité énergétique du « Solar Impulse 2 » ?

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.

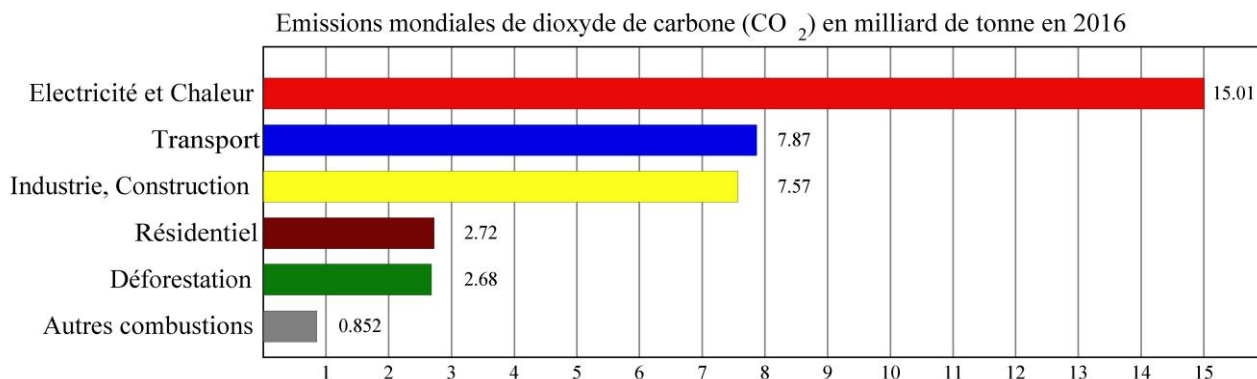
Par comparaison entre les simulations avec ou sans MPPT, **donner** 2 arguments permettant de justifier l'utilisation des modules MPPT dans la recherche de l'optimisation de l'efficacité énergétique.

Partie 6 : quel intérêt de développer des projets innovants ?

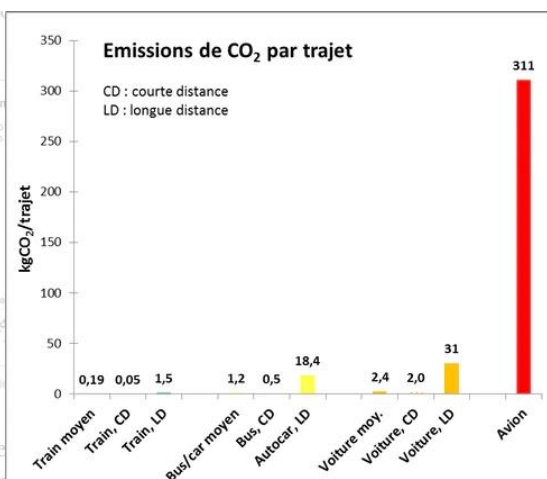
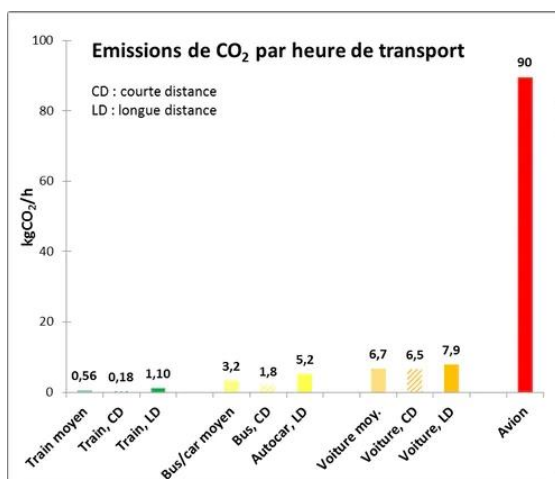
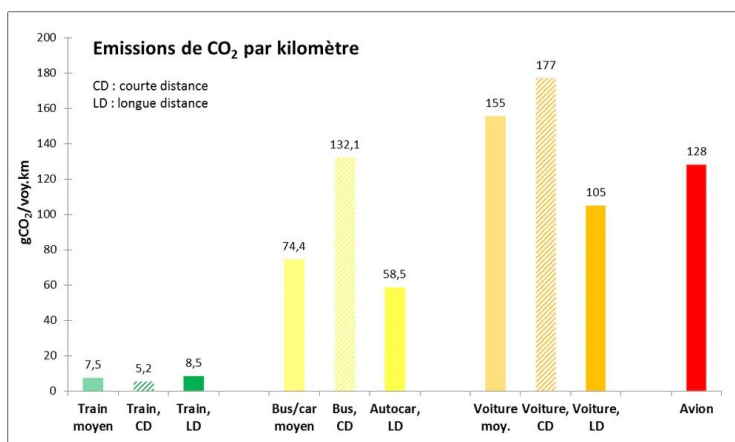
Question 6.1 | À l'aide du DT 10, **justifier** l'intérêt de concevoir un modèle virtuel global
DT 10 | en phase de développement de produit.

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 « CO₂ and Greenhouse Gas Emissions »



DT 2 : diagramme comparatif des émissions de CO₂ 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

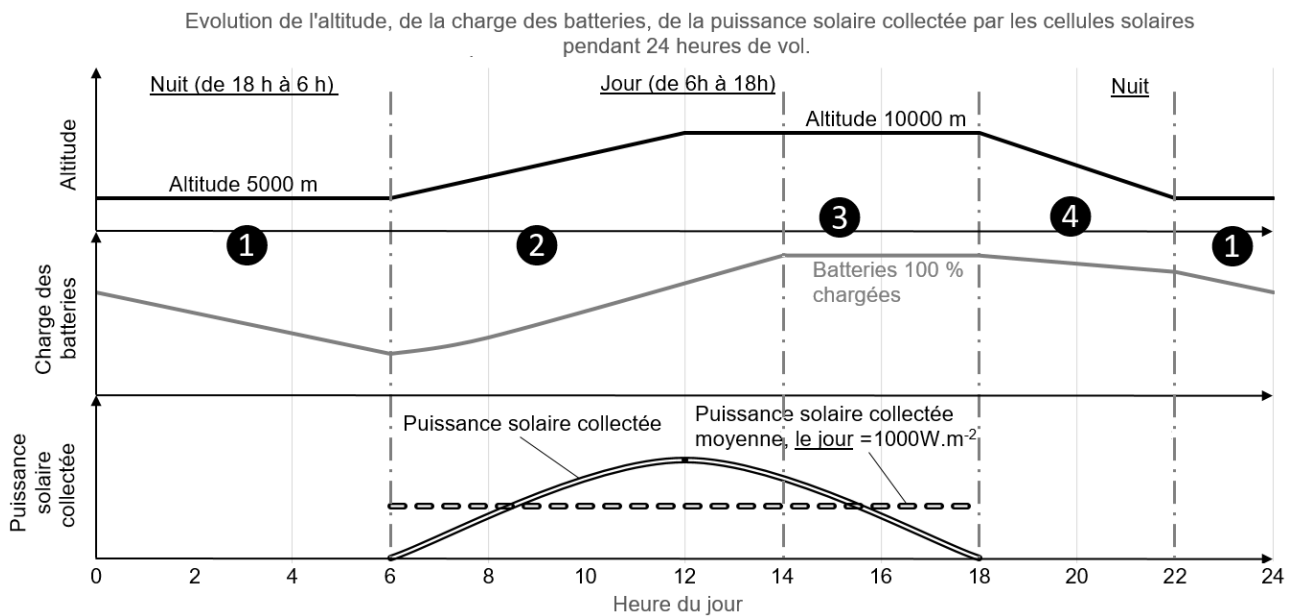
	Diamond DA42 - VI	X-57 de la Nasa	Aéronef Ehang 184	Solar Impulse 2
				
	Le DA42 est un bimoteur quadriplace. L'appareil est construit en fibre de carbone et reçoit une finition de surface de type planeur qui lui permet de compenser une motorisation plutôt faible. Celle-ci est composée de deux moteurs 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 ⁻¹ 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 ₂ / km en utilisation	0,33 kg CO ₂ par km	Estimée à 0,12 kg CO ₂ par km	Estimée à 0,05 kg CO ₂ par km	0 kg CO ₂ 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 ⁻¹	280 km·h ⁻¹	100 km·h ⁻¹	70 km·h ⁻¹
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



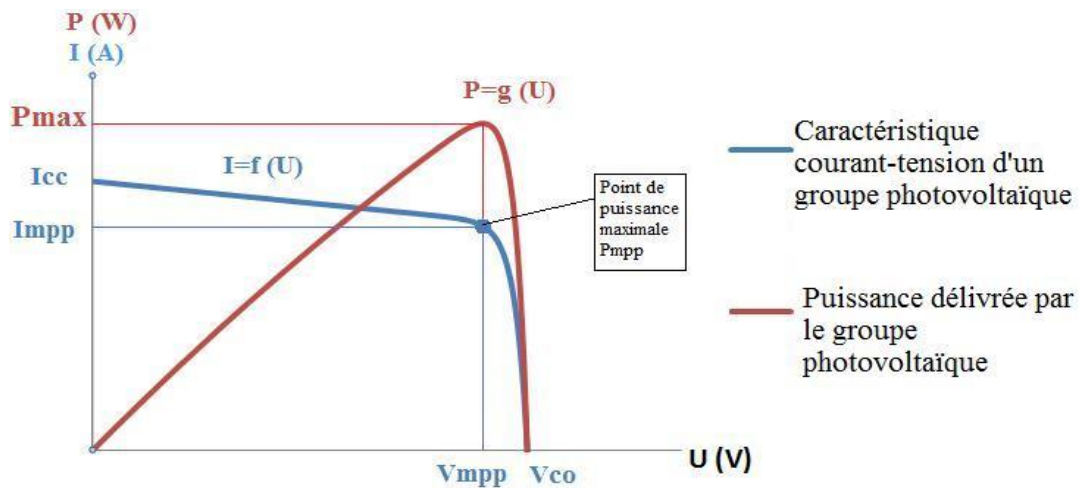
Phases de vol :

- 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.

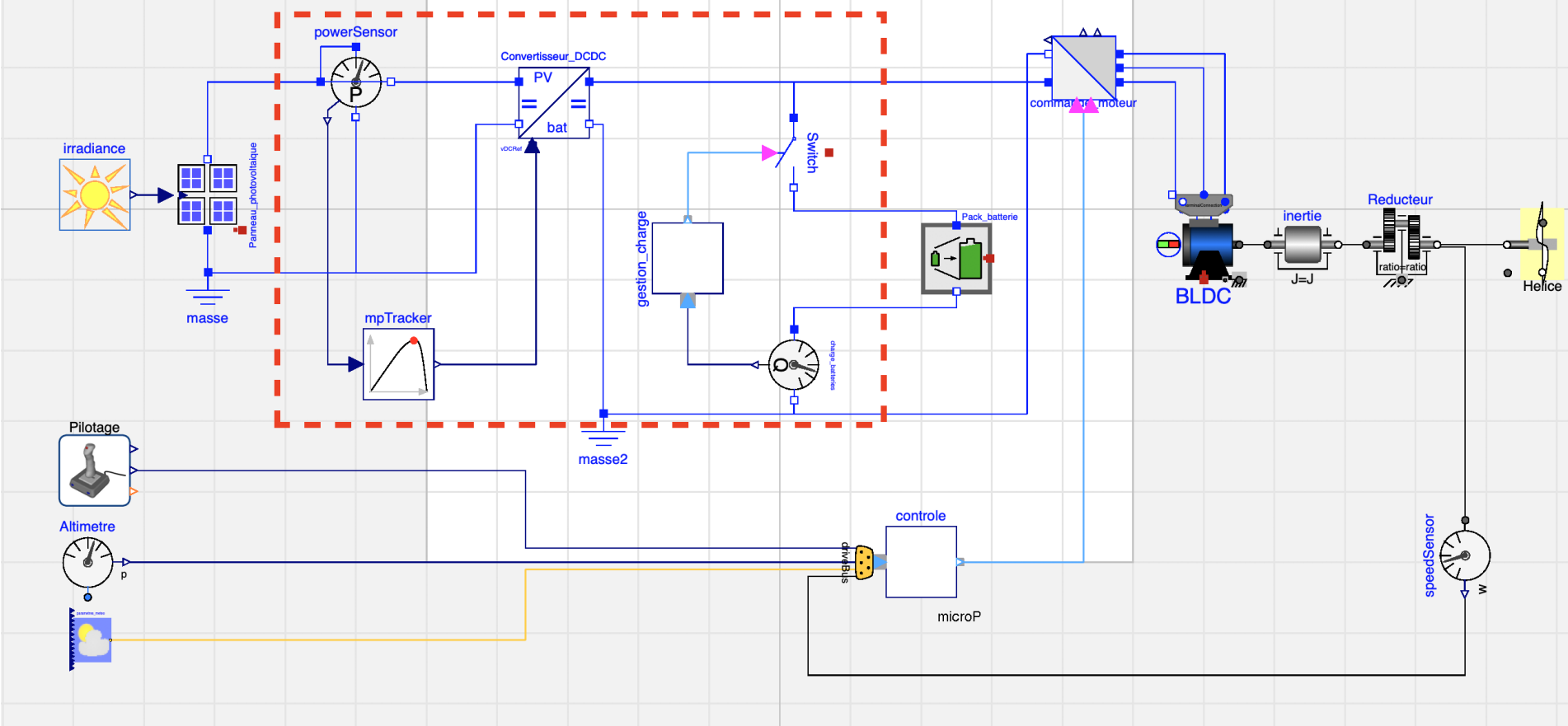
- Le module MPPT acquiert en permanence le courant I_{PV} et la tension U_{PV} délivrés par le panneau solaire.
- Il calcule en permanence la puissance d'entrée P_E et ajuste la tension de sortie U_s (et donc aussi le courant I_s) du convertisseur jusqu'à atteindre en entrée la puissance maximale U_{MPP}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

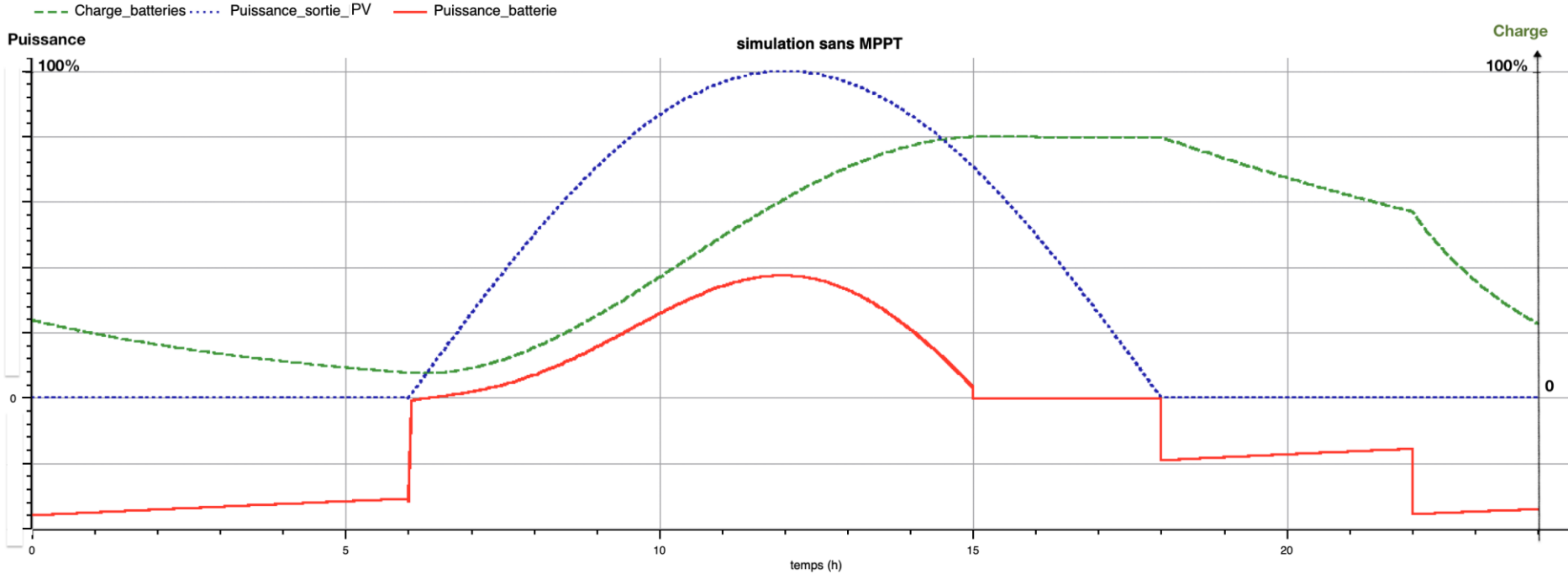
On a donc $P_s = U_s \cdot I_s = P_E = U_{PV} \cdot I_{PV}$.

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

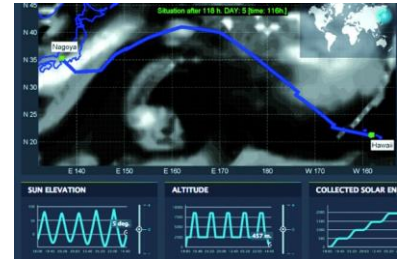


DT 10 : solar Impulse 100 % calculé

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.

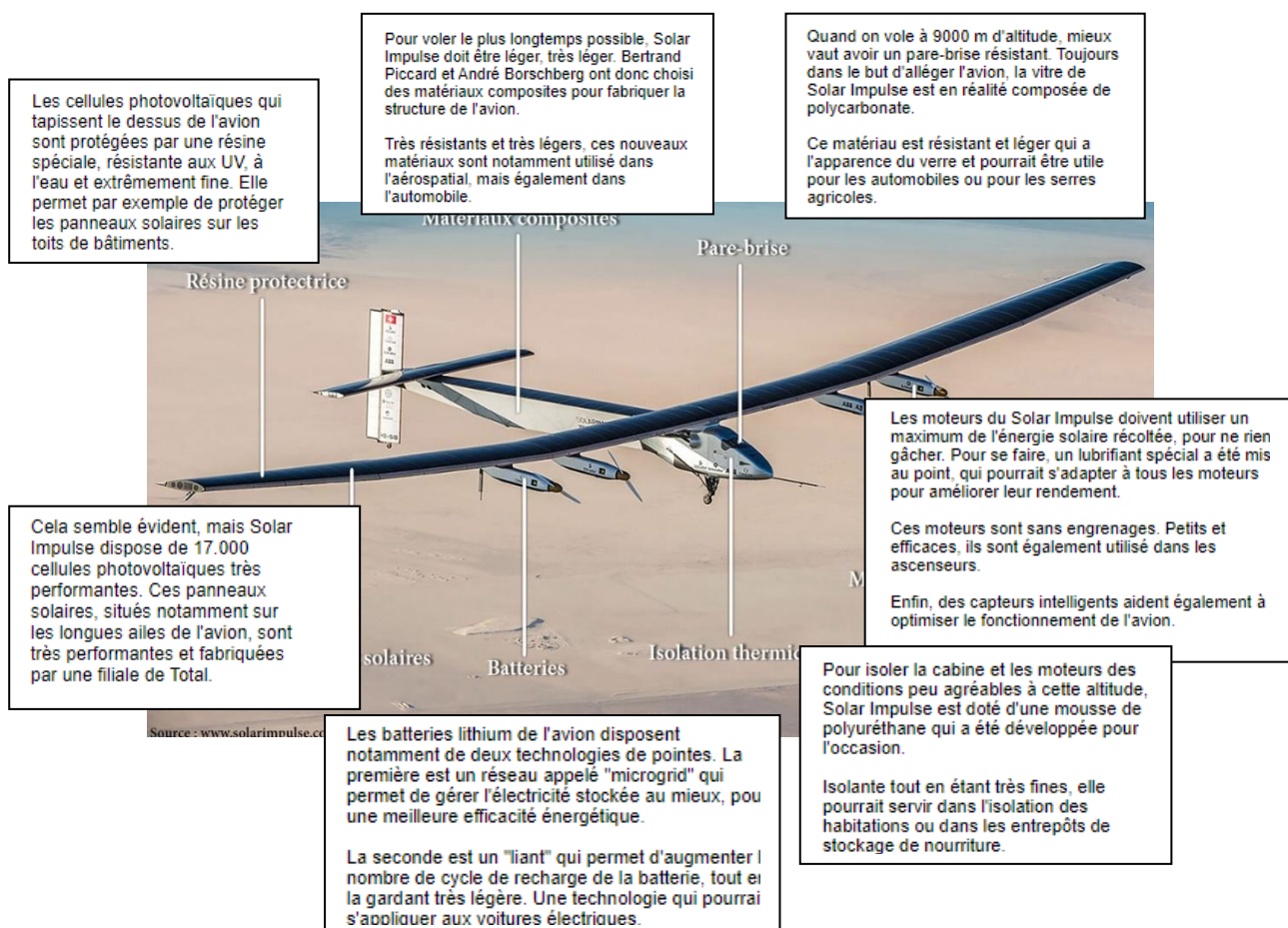
DT 11 : à quoi servent les technologies du Solar Impulse 2 dans la vie de tous les jours ?

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 vaches¹.







¹ La terre ferme

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

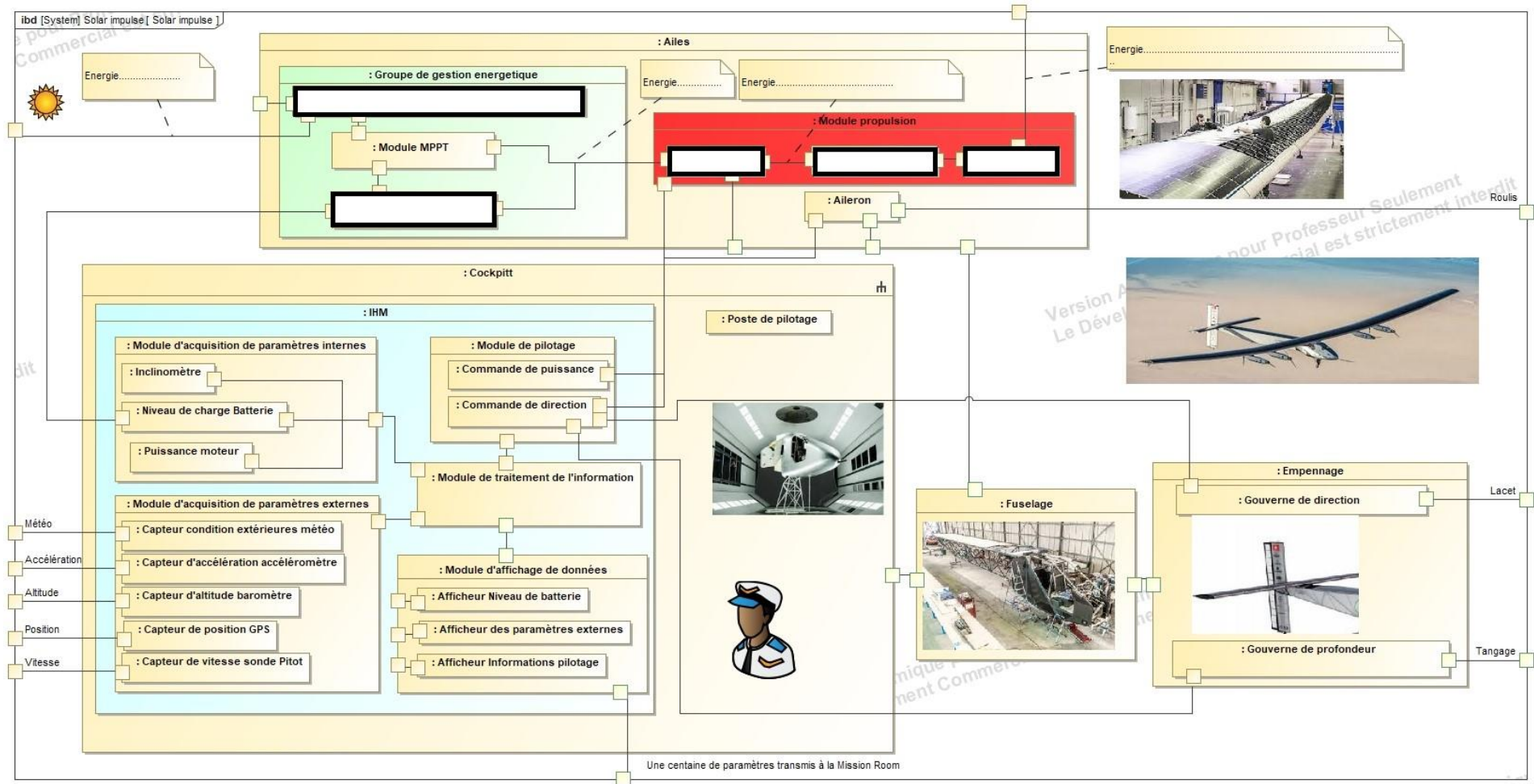
	Voiture (distance moyenne)	Car-Bus (distance moyenne)	Avion	Rapport : $\frac{\text{Avion}}{\text{Voiture (distance moyenne)}}$	Rapport : $\frac{\text{Avion}}{\text{Car-Bus (distance moyenne)}}$
g CO ₂ émis par kilomètre et par voyageur					
kg CO ₂ émis par heure de transport					
kg CO ₂ émis par trajet					

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

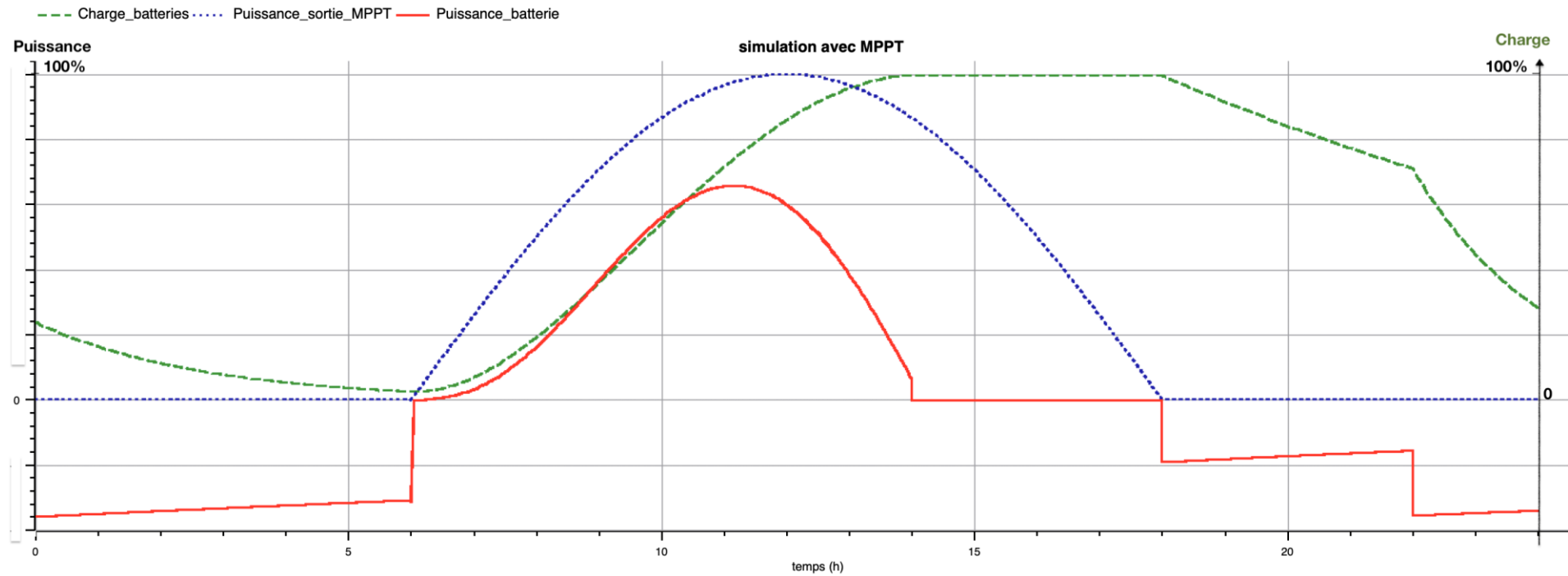
Question 2.1 Critères et exigences du cahier des charges à indiquer (cf. DT1)	Question 2.2 : Mettre +1 si le critère est respecté, sinon indiquer -1			
Critère : empreinte CO₂ en utilisation Exigence : ----- -----	Diamond DA42 – VI 	X-57 de la Nasa 	Aéronef Ehang 184 	Solar Impulse 2 
Critère : Distance à parcourir sans atterrissage Exigence : 9000 km	-1	-1	-1	+1
Critère : Ne pas être dépendant des énergies fossiles Exigence : pas de consommation d'essence, de gaz ou de gazole	-1	+1	+1	+1
Critère : Autonome en énergie en vol Exigence : ----- -----				
Critère : Limiter la masse de l'avion Exigence : ----- -----				
TOTAL :				

Conclusion : (Question 2.3)

DR 3 : IBD Solar Impulse à compléter



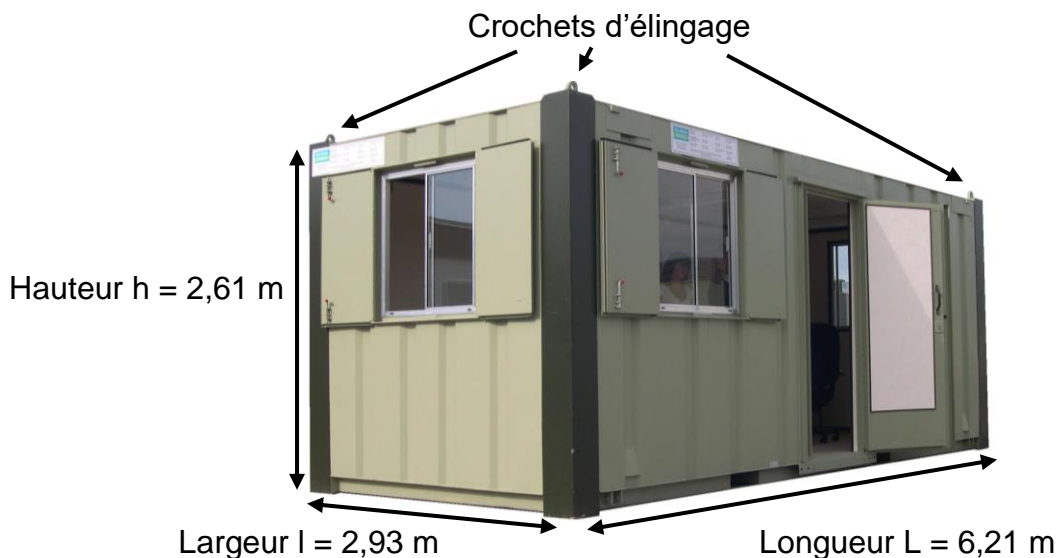
DR 4 : graphe obtenu par la simulation du modèle multiphysique AVEC module MPPT



Sujet zéro

**2I2D Enseignement spécifique
Architecture et constructions**

**Solar Impulse 2
Étude d'un bungalow technique**



Constitution du sujet :

- Dossier sujet et questionnaire Pages 26 à 31
- Dossier technique..... Pages 32 à 42

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

Mise en situation

À l'image de la caravane du Tour de France, le Solar Impulse est suivi de près par tout un cortège de techniciens et ingénieurs pour permettre les réparations entre chaque étape.

Pour leur permettre de travailler dans de bonnes conditions, et surtout avec tous les outils nécessaires (ordinateur, logiciels, documents, instruments...), deux bungalows techniques font partie de ce cortège. La dernière étude portera sur les solutions retenues pour permettre un travail optimal de l'équipe, quelles que soient les conditions extérieures.

Travail demandé

L'étude suivante porte sur la prise en compte du confort de l'équipe technique (2 fois 7 personnes) travaillant dans l'un des deux bungalows techniques très similaires. Seuls les équipements spécialisés varient. Les différentes études ne seront menées que sur l'un d'entre eux.

Partie A : Comment choisir l'éclairage du bungalow technique ?

La première étape porte sur le choix des luminaires. Deux modèles ont été pré-retenus :

- PHILIPS TCS165 4xTL5-14W HFP M1/840 (tubes néon) ;
- PHILIPS SM120V W20L120 1xLED27S/840 (LED).

Les 3 derniers chiffres indiqués sur le modèle du luminaire correspondent au code normalisé par les fabricants indiquant les caractéristiques vis-à-vis de la réglementation liée au confort visuel.

Question A.1

DT S1

Commenter les choix des luminaires des points de vue de l'IRC et de la température de couleur à l'aide du DT S1.

Question A.2

DT S2, DT S3

Justifier la conformité réglementaire des deux simulations à partir du DT S2 et du DT S3.

Question A.3

DT S2, DT S3

Étudier et **commenter** les deux résultats de simulation et **choisir** la solution la plus adaptée, à partir du DT S2 et du DT S3.

Partie B : Comment réduire les apports en froid du climatiseur ?

La deuxième étape porte sur les confort respiratoire et thermique. Le but est de justifier l'intérêt de la climatisation dans le bungalow et d'en déterminer sa puissance de froid. Elle permet de réduire la température et de ne pas dépasser un taux d'humidité de 50 %.

Question B.1

DT S4, DT S5

Choisir, à partir des DT S4 et DT S5, parmi les sensations d'inconfort liées au climat ci-après, celles auxquelles l'équipe technique sera soumise durant le tour du monde :

- chaleur ou fraîcheur ;
- humidité ou aridité.

Question B. 2

DT S6, DT S7

Expliquer en quoi cet inconfort peut être nuisible à la santé de l'équipe à partir de la réponse précédente et des DT S6 et DT S7.

Question B.3

Justifier l'utilisation de la climatisation dans les bungalows techniques.

Les apports par les parois, ou transfert de chaleur par conduction, ont été déterminés grâce au tableau du DT S9.

Question B.4

DT S8, DT S9

Commenter et **expliquer** les pourcentages obtenus des apports de chaque surface par rapport aux apports totaux à partir des documents DT S8 et DT S9.

Proposer une solution pour réduire ces apports.

Choix 1

Partie C : Comment choisir un climatiseur ?

La puissance de froid nécessaire peut être déterminée en calculant les apports thermiques du bungalow. En effet, elle doit équilibrer les apports en chaleur qui sont de plusieurs sortes :

- Apports par les parois : $A_{\text{parois}} = \Sigma(U \times S \times \Delta T)$ [W] (voir DT S9)
- Apports aérauliques : $A_{\text{aéro}} = 0,34 \times \text{débit de ventilation} \times \Delta T$ [W]
- Apports par ponts thermiques : $A_{\text{PT}} = 10 \% A_{\text{parois}}$ [W]
- Apports par les occupants : $A_{\text{occupants}} = 80 \text{ W}$ par personne
- Apports par les installations électriques : $A_{\text{élec}} = 250 \text{ W}$
- Apports solaires : $A_{\text{solaires}} = 150 \text{ W}$

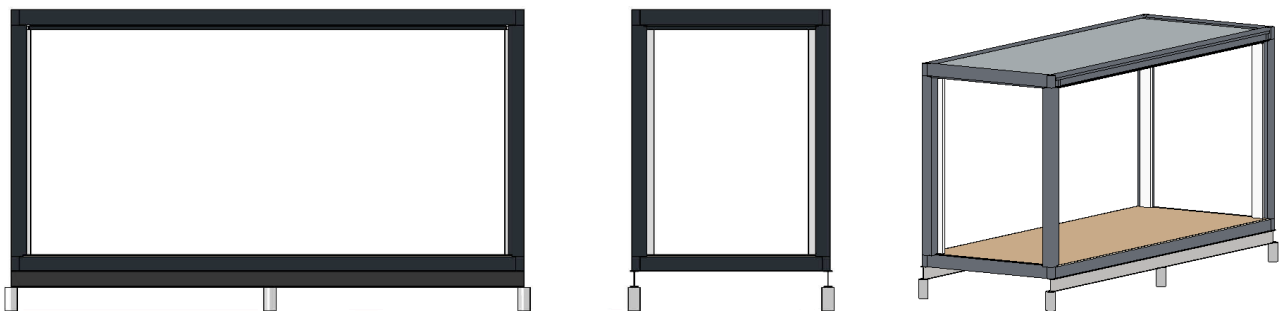
On choisit un débit de ventilation par technicien de $25 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ et on rappelle $\Delta T = 16 \text{ }^\circ\text{C}$.

Question C.1 DT S9	Calculer le débit de ventilation total d'air à renouveler par heure dans un bungalow pour les 7 techniciens et en déduire les apports aérauliques $A_{aéro}$.
Question C.2 DT S9	Déterminer les apports par pont thermique A_{PT} et par occupant $A_{occupant}$, en prenant $A_{parois} = 1\,361,88\text{ W}$.
La puissance de froid nécessaire est : $A_{froid} = A_{parois} + A_{aéro} + A_{PT} + A_{occupants} + A_{élec} + A_{solaires}$	
Question C.3	À l'aide des résultats précédents, déterminer la puissance de froid nécessaire au maintien des 22 °C dans le bungalow A_{froid} .
Question C.4 DT S10	Choisir le climatiseur le plus adéquat parmi la gamme proposée dans le DT S10.

Partie D : Comment calculer les moments dans une poutre en flexion ?

Les bungalows techniques sont déchargés de leur moyen de locomotion (généralement le bateau) à l'aide des crochets situés aux quatre coins. Ensuite, ils prennent la route de l'aérodrome où vient d'arriver le Solar Impulse. Là, ils sont posés sur 2 poutres dans le sens longitudinal servant de support. Chaque poutre est supportée par trois plots en béton.

Ces supports sont universels et dimensionnés à partir des valeurs extrêmes de chargement.



Vues d'un bungalow et de son support

Question D.1 | **Expliquer** pourquoi il est plus judicieux de supporter les bungalows sur leur longueur plutôt que leur largeur.

On considère les efforts de vent W uniquement en toiture ($W = 1,40 \text{ kN.m}^{-2}$), de direction verticale vers le bas afin d'être les plus défavorables possible. On considère que toutes les charges se répartissent uniformément.

Question D.2 | **Déterminer**, à l'aide des données du DT S11, sur une des deux poutres support :

DT S11

- les charges linéiques permanentes G_L ;
- les charges linéiques d'exploitation Q_L ;
- les charges linéiques de vent W_L .

Question D.3 | **Calculer** le cas de charges aux états limites ultimes (ELU) :
 $P = 1,35 \times G + 1,5 \times Q + W$

Pour la suite de l'étude, on considère un cas de charges sur une poutre $P = 10 \text{ kN.ml}^{-1}$. Deux possibilités s'offrent aux constructeurs : mettre en œuvre une poutre continue sur les trois appuis ou mettre en œuvre deux poutres distinctes. Les réactions d'appuis dans les deux cas sont données dans le tableau ci-dessous :

Réactions d'appuis		
Moment de flexion maximum	$M_{\max} = \frac{p \ell^2}{8}$	$M_{\max} = -\frac{p \ell^2}{8}$ $M = \frac{9}{128} p \ell^2$

Question D.4 | **Identifier** la mise en œuvre la moins défavorable pour les appuis.
Expliquer pourquoi l'autre peut être considérée comme plus « sûre ».

Le choix s'est porté sur une solution avec une poutre continue (dont le poids propre est négligé) pour des facilités de mise en œuvre.

Question D.5 | **Déterminer** le moment fléchissant maximal dans la poutre $M_{f\max}$

Partie E : Comment choisir une poutre métallique aux Eurocodes soumise à de la flexion ?

Selon l'Eurocode 3 (NF EN 1993-1-1), les IPE de nuance S235 (limite d'élasticité de 235 MPa) sont de classe 1 lorsqu'ils sont fléchis. Cette classe correspond à la possibilité de déformations plastiques sans remettre en cause la stabilité d'ensemble de la structure. Le moment résistance d'un tel IPE est donné par la formule suivante :

$$M_{pl,Rd} = W_{pl,y} \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

Avec :

- $M_{pl,Rd}$: moment résistant plastique [N.m]
- $W_{pl,y}$: module de résistance plastique en flexion [m³]
- f_y : limite d'élasticité [MPa]
- γ_{M0} : coefficient de sécurité ($\gamma_{M0} = 1$ quelle que soit la classe)

Question E.1 | **Déterminer** le module de résistance plastique en flexion nécessaire à la vérification de l'inégalité suivante permettant de dimensionner le profilé :

$$M_{fmax} < M_{pl,Rd}$$

Question E. 2 | **Choisir** parmi les profilés du DT S12 celui qui convient pour supporter les charges du bungalow

DT S12

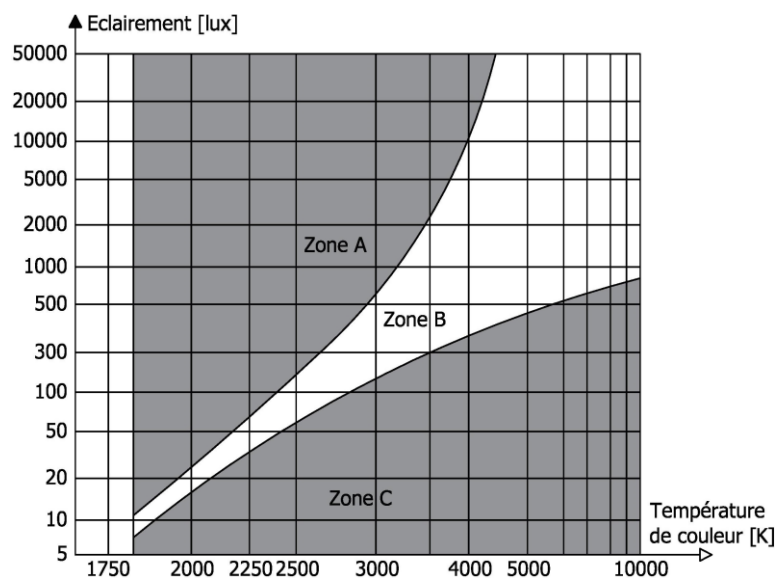
DT S1 : Normes d'éclairage

Courbe de Kruithof :

Elle décrit une zone où niveaux d'éclairage et températures de couleur sont considérés comme confortables. Les ambiances en fonction des zones sont les suivantes :

- A : ambiance lumineuse trop chaude ;
- B : zone de confort ;
- C : ambiance lumineuse trop froide.

L'entrée dans la courbe se fait par la valeur d'éclairage souhaitée et la zone de confort, on en déduit la plage des températures de couleurs possibles.



Code identifiant le modèle du luminaire :

IRC minimal pour assurer un certain confort : 80. IRC maximal : 100.

Code	IRC Indice couleurs	Température de couleur Teinte de lumière
825	82 à 85	2500K blanc orangé
827	82 à 85	2700K blanc très chaud
830	82 à 85	3000K blanc chaud
840	82 à 85	4000K lumière du jour
930	92 à 98	3000K blanc chaud
940	92 à 98	4000K lumière du jour

Éclairages réglementaires (Emoy) :

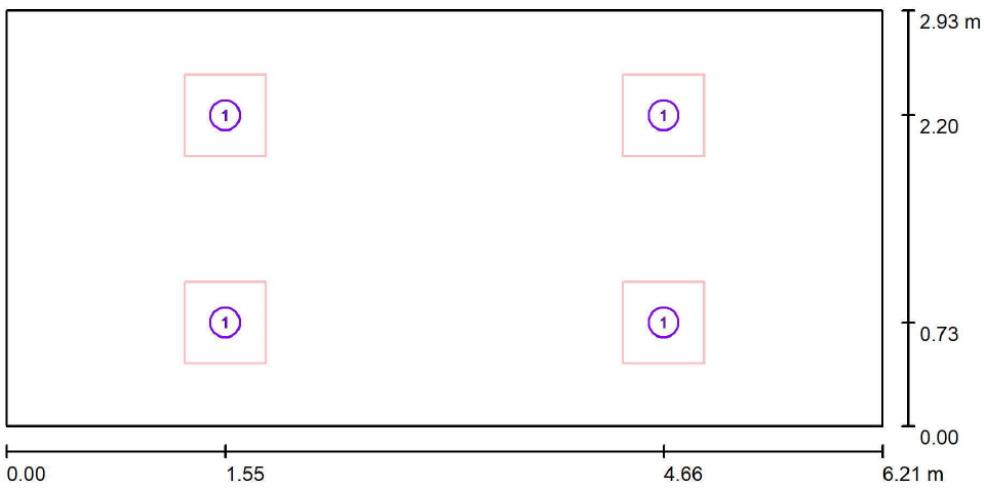
- Circulation, couloirs : 100 Lux
- Bureaux, salles de travail : 500 Lux

DT S2 : Résultats simulation éclairage TCS165

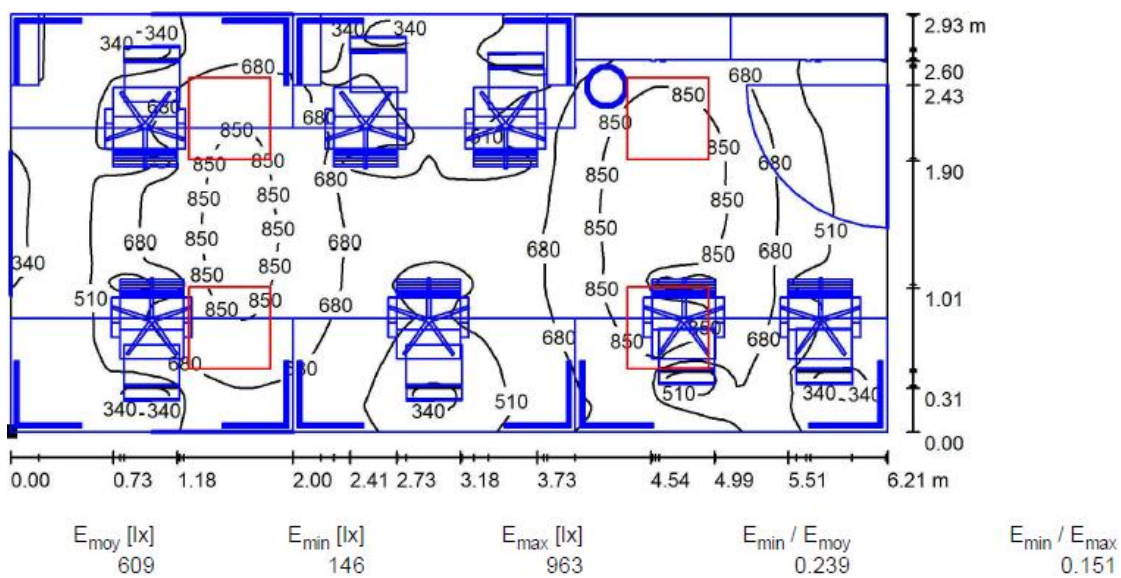
Données :

- PHILIPS TCS165 4xTL5-14W HFP M1_840
- Puissance de chaque tube : 15,75 W
- Nombre de tubes par appliques : 4
- Nombre d'appliques : 4
- Équation photométrique : 0,67 C

Plan d'implantation :



Résultats de la simulation (valeurs en Lux) :



DT S4 : Étapes du Solar Impulse 2

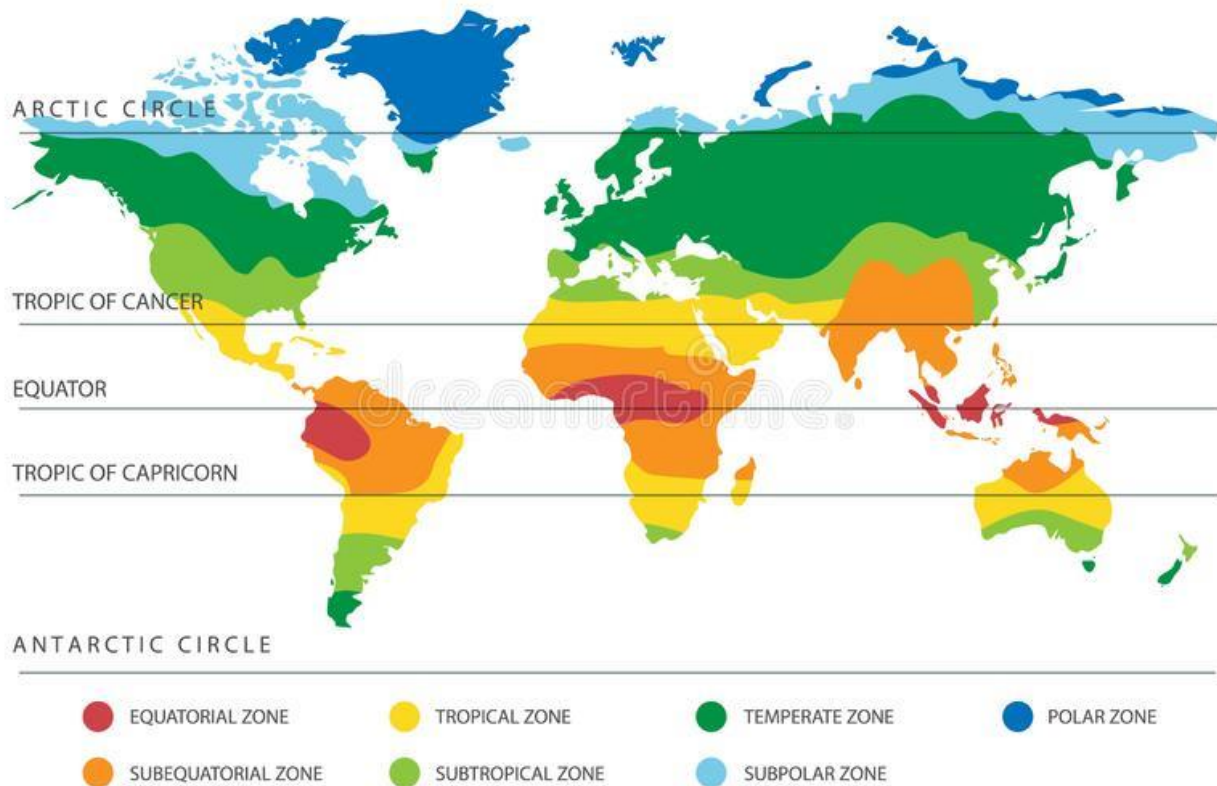
Le tour du monde de Solar Impulse 2

Départ fin février ou début mars 2015

35 000 km en 25 jours
de vol et 13 étapes



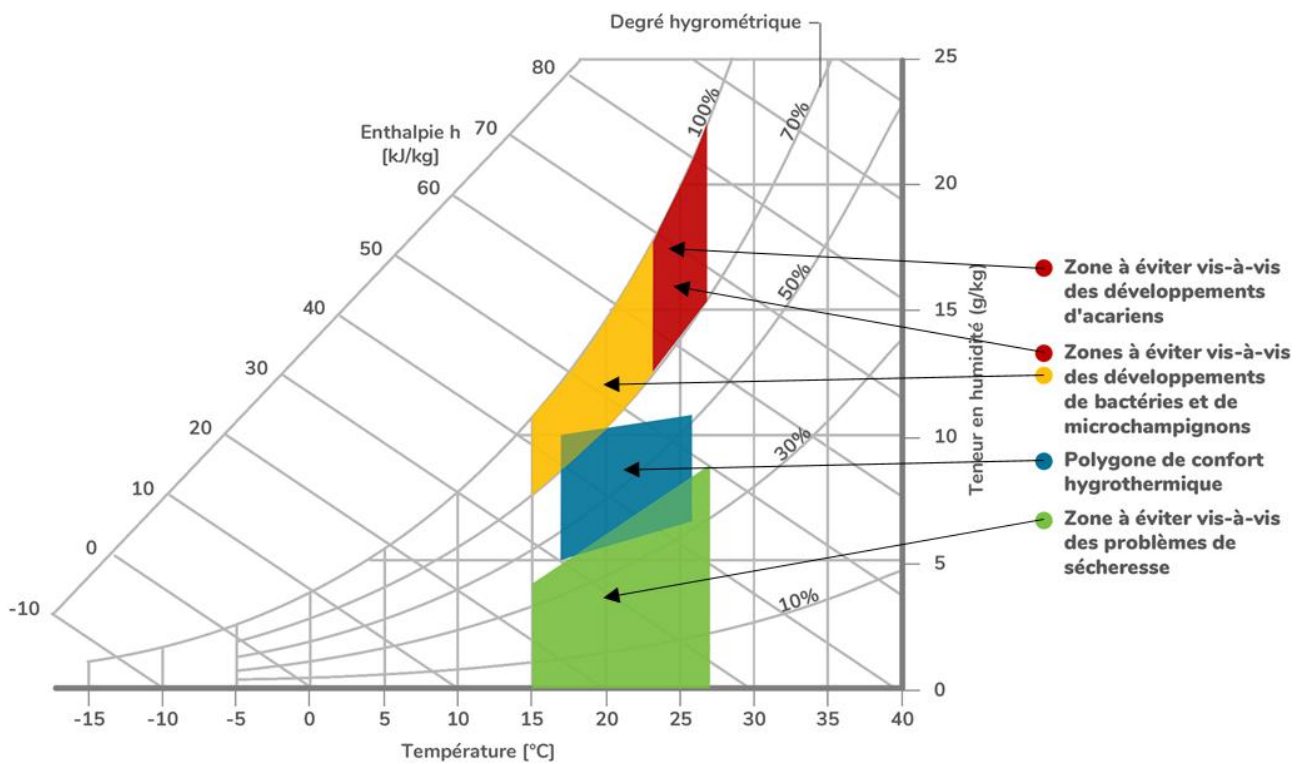
DT S5 : Climats



On peut définir les climats tropicaux et subtropicaux comme des climats non arides où la température moyenne mensuelle ne descend pas en dessous de 18 °C. Il existe une saison sèche (faibles températures, précipitations quasiment nulles) et une saison très humide (hautes températures, très fortes précipitations).

On peut définir les climats équatoriaux et subéquatoriaux comme des climats tropicaux, mais sans saison sèche. Ce climat est donc en permanence humide et peut être très chaud.

DT S6 : Diagramme de l'air humide et zones remarquables



DT S7 : Phénomènes influençant la qualité de l'air intérieur

La vapeur d'eau

Elle est présente en permanence, et dépend de plusieurs éléments comme du corps humain, qui en rejette jusqu'à 3 litres par jour, des appareils de cuisson, des appareils d'entretien, des activités sanitaires (douches, bain, lave-linge...) ou du climat.

Les moisissures (champignons)

Leur inhalation est dangereuse et peut causer beaucoup de désagréments (asthme, urticaire, maladies plus graves). Elles peuvent apparaître sur le bois, le plâtre, les tissus ou dans les systèmes de ventilation.

Les moisissures peuvent être inactives pendant des années et de nouveau proliférer quand les conditions sont réunies.

Les acariens

Ils sont inoffensifs, mais leurs excréments sont allergènes. Ils sont présents partout. Ils se concentrent surtout dans les tissus (matelas, draps, vêtements...). Dans 1 g de poussière, il y a jusqu'à 1 500 acariens.

Le CO₂

Il est naturellement émis par les êtres vivants. Dans l'air, le taux de CO₂ varie, mais il est en moyenne d'environ 380 ppm soit 0,038 %. La valeur de 0,1 % est celle admise au maximum pour les systèmes de ventilation. On peut parler de seuil de déclenchement. À partir de 4 %, les effets sur la santé peuvent être irréversibles, les bâtiments doivent être évacués. Le CO₂ est donc un gaz toxique.

Les COV

Ce sont les composés organiques volatils, provenant des solvants, de la fermentation, ou des plantes. On en trouve dans les colles, tissus, vernis, peintures, bois. Certains d'entre eux sont nocifs et causent également des troubles.

DT S8 : Formulaire de thermique

Résistance thermique :

$$R = \frac{e}{\lambda}$$

Avec :

- R : résistance thermique [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$]
- e : épaisseur [m]
- λ : conductivité thermique [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

Résistance thermique totale :

$$R_T = R_{si} + R_{se} + \sum \left(\frac{e}{\lambda} \right) + \sum (R)$$

Sens du flux	Paroi en contact avec l'extérieur	
	Rsi	Rse
Horizontal	0.13	0.04
Ascendant	0.10	0.04
Descendant	0.17	0.04

Avec :

- R_T : résistance thermique totale de la paroi [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$]
- R_{si} : résistance thermique superficielle d'échange intérieur [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$]
- R_{se} : résistance thermique superficielle d'échange extérieur [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$]
- R : résistance thermique d'un élément [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$]
- e : épaisseur [m]
- λ : conductivité thermique [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

Coefficient de transmission thermique :

$$U = \frac{1}{R_T}$$

Avec :

- U : coefficient de transmission thermique [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]
- R_T : résistance thermique totale de la paroi [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$]

Flux de chaleur (A_{parois}) :

$$\phi = U \cdot S \cdot \Delta T$$

Avec :

- Φ : flux de chaleur (A_{parois}) [W]
- U : coefficient de transmission thermique [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]
- S : surface de l'échange [m^2]
- ΔT : différence de température [K]

$$\Delta T = T_{\text{extérieure}} - T_{\text{intérieure}}$$

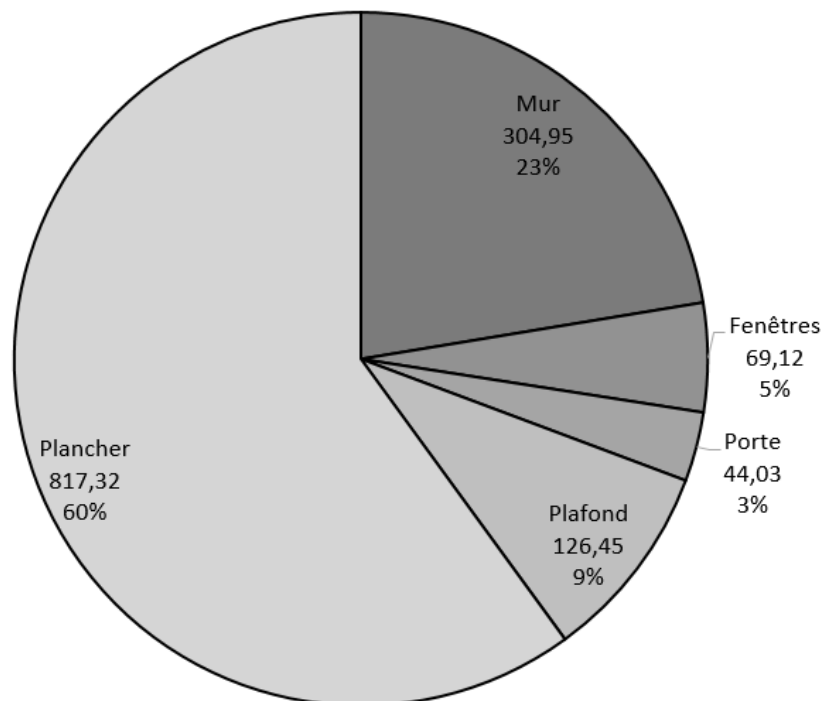
DT S9 : Étude des apports par conduction thermique

Tableau de calcul des apports thermiques par conduction dans les parois A_{parois} :

Éléments		Épaisseur (m)	λ (W/m.K)	R (m ² .K/W)	R _{si} (m ² .K/W)	R _{se} (m ² .K/W)	R total (m ² .K/W)	U (W/K.m ²)	Surface (m ²)	T int (°C)	T ext (°C)	ΔT (K)	Φ (W)			
Mur	Tôle ext.	0,002	50,000	0,00004	0,13	0,04	2,22	0,45	42,39	22,00	38,00	16,00	304,95			
	Isolant	0,076	0,037	2,05405												
	Tôle int.	0,002	50,000	0,00004												
Fenêtres (3 unités)		/	/	/	/	/	/	1,20	3,60				22,00	38,00	16,00	69,12
Porte (1 unité)		/	/	/	/	/	/	1,60	1,72							44,03
Plafond	Tôle ext.	0,002	50,000	0,00004	0,10	0,04	2,30	0,43	18,20							22,00
	Isolant	0,080	0,037	2,16216												
	Tôle int.	0,001	50,000	0,00002												
Plancher	CTBH	0,019	0,130	0,14615	0,17	0,04	0,36	2,81	18,20	22,00	38,00	16,00	817,32			
	Tôle ext.	0,002	50,000	0,00004												
Total :													1361,88			

Les formules utilisées dans ce tableau sont celles décrites dans le DT S9.

Répartition des apports par conduction dans les parois :



DT S10 : Modèles de climatiseurs monobloc pour bungalows

Modèle	Unité	ALG2.0	ALG2.5
Alimentation électrique		220-240V, 50Hz, 1 Ph	220-240V, 50Hz, 1 Ph
Classe énergétique		A+	A+
Puissance frigorifique	W	2 000	2 500
Puissance absorbée	W	667	833
Déshumidification	L/h	0,8	1
Puissance consommée max.	W	1 000	1 250
Câble d'alimentation		1,5x3/VDE	1,5x3/VDE
Commande		Manuelle + télécommande	Manuelle + télécommande
Gaz		R32 / 400g	R32 / 400g
Niveau sonore (Int. / Ext.)	dB(A)	51,3 / 58,7	51,3 / 58,7
Dimensions (LxHxP)	mm	560 x 400 x 660	560 x 400 x 660
Poids net	kg	43	43

Modèle	Unité	ALG3.5	ALG5.0
Alimentation électrique		220-240V, 50Hz, 1 Ph	220-240V, 50Hz, 1 Ph
Classe énergétique		A+	A
Puissance frigorifique	W	3 500	5 000
Puissance absorbée	W	1 167	1 667
Déshumidification	L/h	1,2	2
Puissance consommée max.	W	1 750	2 500
Câble d'alimentation		1,5X3/VDE	1,5X3/VDE
Commande		Manuelle + télécommande	Manuelle + télécommande
Gaz		R32 / 500g	R32 / 500g
Niveau sonore (Int. / Ext.)	dB(A)	51,3 / 58,7	51,3 / 58,7
Dimensions (LxHxP)	mm	560 x 400 x 660	560 x 400 x 660
Poids net	kg	43	43



Vue extérieure



Vue intérieure

DT S11 : Données sur le bungalow technique

Ossature :

- Poteaux et toiture galvanisés
- Plancher protection antirouille et sous-face en tôle d'acier galvanisé (épaisseur équivalente : 2 mm, $\lambda_{\text{acier}} = 50 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
- Laquée gris clair RAL 7035

Couverture :

- Bacs nervurés en acier revêtu alu-zinc (épaisseur équivalente : 2 mm)
- Laine de verre de 80 mm d'épaisseur avec pare-vapeur aluminium, Euroclasse A1 (équivalent M0) ($\lambda_{\text{laine de verre}} = 0,037 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

Plafond :

- Plafond en tôle acier prélaquée RAL 9002 avec feutre isophonique (acoustique) (épaisseur : 1 mm)
- Hauteur sous plafond : 2,50 m

Panneau :

- Épaisseur totale 80 mm
- Remplissage : laine de roche Euroclasse A1 (équivalent M0)
- Finition tôle d'acier galvanisé prélaquée gaufrée RAL 7035, intérieure et extérieure (épaisseurs : 2 mm)

Plancher (18,20 m²) :

- Revêtement de sol PVC U2SP2 (résistance thermique négligeable) (épaisseur : 3 mm)
- CTBH épaisseur 19 mm (EN312 P5) ($\lambda_{\text{CTBH}} = 0,13 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) (les panneaux estampillés CTBH (Centre Technique du Bois, classement Humide) sont des panneaux en aggloméré de particules en bois hydrofugé ayant satisfait à des critères de résistance aux ambiances humides)
- Laine de verre de 160 mm d'épaisseur Euroclasse A1 (équivalent M0) avec tôle de protection en sous-face
- Charge d'exploitation admissible de 250 kg.m⁻²

Fenêtres :

- PVC blanc (en aluminium laqué blanc pour les baies vitrées)
- Dimensions : 1,20 m × 1,00 m
- Nombre : 3
- Double vitrage 4-15-4 trempé 2 faces
- $U_w = 1,2 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

Porte :

- PVC blanc
- 2,15 m × 0,80 m
- $U_d = 1,6 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

Masse hors éléments d'aménagement : 2 300 kg

DT S12 : Catalogue de profilés métalliques IPE

Désignation Designation Bezeichnung g		Dimensions Abmessungen		Dimensions de construction Dimensions for detailing Konstruktionsmaße		Surface Oberfläche e		Désignation Designation Bezeichnung g		Valeurs statiques / Section properties / Statische Kennwerte																		
										axe fort y-y strong axis y-y starke Achse y-y			axe faible z-z weak axis z-z schwache Achse z-z															
G	h	b	t _w	t _f	r	A	h _i	d	Ø	p _{min}	p _{max}	AL	AG	G	I _y	W _{ely}	W _{ply} ♦	I _y	W _{ely}	W _{ply} ♦	I _z	W _{eiz}	W _{piz} ♦	I _z	S _s	t _f	I _w	
kg/m	mm	mm	mm	mm	mm	mm ²	mm	mm	mm	mm	mm	m ² /t	m ² /t	kg/m	mm ⁴ x10 ⁴	mm ³ x10 ³	mm ³ x10 ³	mm ² x10 ²	mm ²	mm ³ x10 ³	mm ³ x10 ³	mm ⁴ x10 ⁴	mm ³ x10 ³	mm ³ x10 ³	mm ²	mm	mm ⁴ x10 ⁴	mm ⁶ x10 ⁹
IPE 80*	80	46	3,8	5,2	5	7,64	69,6	59,6	-	-	-	0,328	54,64	IPE 80	6,0	80,14	20,03	23,22	3,24	3,58	8,49	3,69	5,82	1,05	20,10	0,70	0,12	
IPE 100*	100	55	4,1	5,7	7	10,3	88,6	74,6	-	-	-	0,400	49,33	IPE 100	8,1	171,0	34,20	39,41	4,07	5,08	15,92	5,79	9,15	1,24	23,70	1,20	0,35	
IPE 120	120	64	4,4	6,3	7	13,2	107,4	93,4	-	-	-	0,475	45,82	IPE 120	10,4	317,8	52,96	60,73	4,90	6,31	27,67	8,65	13,58	1,45	25,20	1,74	0,89	
IPE 140	140	73	4,7	6,9	7	16,4	126,2	112,2	-	-	-	0,551	42,70	IPE 140	12,9	541,2	77,32	88,34	5,74	7,64	44,92	12,31	19,25	1,65	26,70	2,45	1,98	
IPE 160	160	82	5	7,4	9	20,1	145,2	127,2	-	-	-	0,623	39,47	IPE 160	15,8	869,3	108,7	123,9	6,58	9,66	68,31	16,66	26,10	1,84	30,34	3,60	3,96	
IPE 180	180	91	5,3	8	9	23,9	164	146	M 10	48	48	0,698	37,13	IPE 180	18,8	1317	146,3	166,4	7,42	11,25	100,9	22,16	34,60	2,05	31,84	4,79	7,43	
IPE 220	220	110	5,9	9,2	12	33,4	201,6	177,6	M 12	60	62	0,848	32,36	IPE 220	26,2	2772	252,0	285,4	9,11	15,88	204,9	37,25	58,11	2,48	38,36	9,07	22,67	
IPE 240	240	120	6,2	9,8	15	39,1	220,4	190,4	M 12	66	68	0,922	30,02	IPE 240	30,7	3892	324,3	366,6	9,97	19,14	283,6	47,27	73,92	2,69	43,37	12,88	37,39	
IPE 270	270	135	6,6	10,2	15	45,9	249,6	219,6	M 16	72	72	1,041	28,86	IPE 270	36,1	5790	428,9	484,0	11,23	22,14	419,9	62,20	96,95	3,02	44,57	15,94	70,58	
IPE 300	300	150	7,1	10,7	15	53,8	278,6	248,6	M 16	72	86	1,160	27,46	IPE 300	42,2	8356	557,1	628,4	12,46	25,68	603,8	80,50	125,2	3,35	46,07	20,12	125,9	
IPE 330	330	160	7,5	11,5	18	62,6	307	271	M 16	78	96	1,254	25,52	IPE 330	49,1	11770	713,1	804,3	13,71	30,81	788,1	98,52	153,7	3,55	51,59	28,15	189,1	
IPE 360	360	170	8	12,7	18	72,7	334,6	298,6	M 22	88	88	1,353	23,70	IPE 360	57,1	16270	903,6	1019	14,95	35,14	1043	122,8	191,1	3,79	54,49	37,32	313,6	
IPE 400	400	180	8,6	13,5	21	84,5	373	331	M 22	96	98	1,467	22,12	IPE 400	66,3	23130	1156	1307	16,55	42,69	1318	146,4	229,0	3,95	60,20	51,08	490,0	
IPE 450	450	190	9,4	14,6	21	98,8	420,8	378,8	M 24	100	102	1,605	20,69	IPE 450	77,6	33740	1500	1702	18,48	50,85	1676	176,4	276,4	4,12	63,20	66,87	791,0	
IPE 500	500	200	10,2	16	21	116	468	426	M 24	102	112	1,744	19,23	IPE 500	90,7	48200	1928	2194	20,43	59,87	2142	214,2	335,9	4,31	66,80	89,29	1249	
IPE 550	550	210	11,1	17,2	24	134	515,6	467,6	M 24	110	122	1,877	17,78	IPE 550	106	67120	2441	2787	22,35	72,34	2668	254,1	400,5	4,45	73,62	123,2	1884	
IPE 600	600	220	12	19	24	156	562	514	M 27	116	118	2,015	16,45	IPE 600	122	92080	3069	3512	24,30	83,78	3387	307,9	485,6	4,66	78,12	165,4	2846	

