

BACCALAURÉAT GÉNÉRAL

SÉRIE SCIENTIFIQUE

ÉPREUVE DE SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

Session 2020

Corrigé

Ce corrigé comporte 8 pages numérotées de 1 sur 8 à 8 sur 8.

Avion solaire Solar Impulse 2

1. Analyse des enregistrements

Q1. Analyser, à partir des relevés du document technique DT2 page 17, l'évolution du niveau de vol en associant les phases identifiées « phase 1 », « phase 2 » et « phase 3 » aux termes « vol à niveau constant », « vol en ascension » et « vol en descente » .

La phase de vol à niveau constant correspond à la phase 1.

Le vol en ascension correspond à la phase 2.

Le vol en descente correspond à la phase 3.

Q2. Relever sur la figure 3, les différentes valeurs de puissance fournie aux moteurs. **Indiquer** à quelle phase de vol elles correspondent. **Justifier** l'allure de cette courbe puissance.

La puissance maximale est de 28 kW, elle correspond à la phase 2.

La puissance médiane de 14 kW correspond à la phase 1.

La puissance minimale de 2 kW correspond à la phase 3.

Entre 10h00 et 15h00, la puissance absorbée par les moteurs permet de monter l'avion (stockage de l'énergie sous forme potentielle). Cette énergie est restituée entre 17h00 et 21h00.

Q3. Justifier le changement de signe de la puissance fournie par les batteries observé sur les enregistrements du document technique DT2 page 17.

Le changement de signe correspond à un changement de mode de fonctionnement des batteries. La convention adoptée est telle qu'une puissance positive correspond à un fonctionnement générateur des batteries et une puissance négative correspond à un fonctionnement récepteur (charge des batteries).

De 0h00 à 6h00 les batteries fonctionnent en générateur.

De 6h00 à 13h00 les batteries se rechargent.

De 13h à 17h, les batteries, pleinement chargées, ne sont plus utilisées. L'énergie produite par les panneaux suffit pour alimenter l'avion.

De 17h à 0h00, les batteries fonctionnent à nouveau en générateur.

Q4. Relever sur le document technique DT2 page 17, les heures de début et de fin de production des panneaux (heures de jour). En **déduire** la quantité d'énergie nécessaire si l'avion devait voler à altitude constante en dehors des heures de jour.

Sur le document DT2 les panneaux commencent à produire à partir de 6 h et finissent à 17 h.

En dehors des heures de jours la quantité d'énergie nécessaire correspond :

$$W = P_{\text{médian}} T_{\text{nuit}} = 14 \times 13 = 182 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

Q5. Déterminer à partir du document technique DT2 page 17 la variation du niveau de vol et **calculer** la variation ΔE_{pot} d'énergie potentielle en joules puis en kW·h.

La variation du niveau de vol est de : $28\,000 - 7\,500 = 21\,500$ pieds

$$\Delta e_p = m \cdot g \cdot \Delta h = 2\,500 \times 9,81 \times 21\,500 \times 0,3048 = 160 \cdot 10^6 \text{ Joules} = 160 \text{ MJ}$$

$$1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 3,6 \text{ MJ}$$

$$\text{donc } \Delta e_p = 45 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

Q6. Conclure sur l'écart d'énergie utilisée entre les vols à altitude constante et à niveau variable.

Le vol à altitude constante nécessite 182 kW·h durant la nuit.

Le vol à niveau variable nécessite une énergie durant les heures de nuit de :

$$W = P_{\text{médian}} T_{\text{nuit}} = 14 \times 9 + 2 \times 4 = 134 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

L'écart d'énergie entre les deux types de vol est de 48 kW·h.

Cet écart est l'image de l'énergie potentielle stockée durant les heures de jour, soit 45 kW·h trouvé en Q5.

Q7. Justifier le choix fait par l'équipe de Solar Impulse concernant le plan de vol à niveau variable.

Le gain en masse de batteries est de $48/0,26$ soit 184 kg

Ce qui correspond à un gain d'environ 7 % de la masse totale.

L'équipe de Solar Impulse a donc fait le choix d'avoir un avion le plus léger possible .

2. Besoins énergétiques de l'avion pour la nuit.

Q8. Appliquer le théorème de la résultante dynamique en projection sur (G, \vec{z}) pour **déterminer** l'intensité de la portance $\|\vec{R}_z\|$. En **déduire** la valeur de C_z (coefficient de portance).

$$\|\vec{R}_z\| - \|m \cdot \vec{g}\| = 0$$

$$\text{donc } \|\vec{R}_z\| = 2\,500 \times 9,81 = 24\,525 \text{ N,}$$

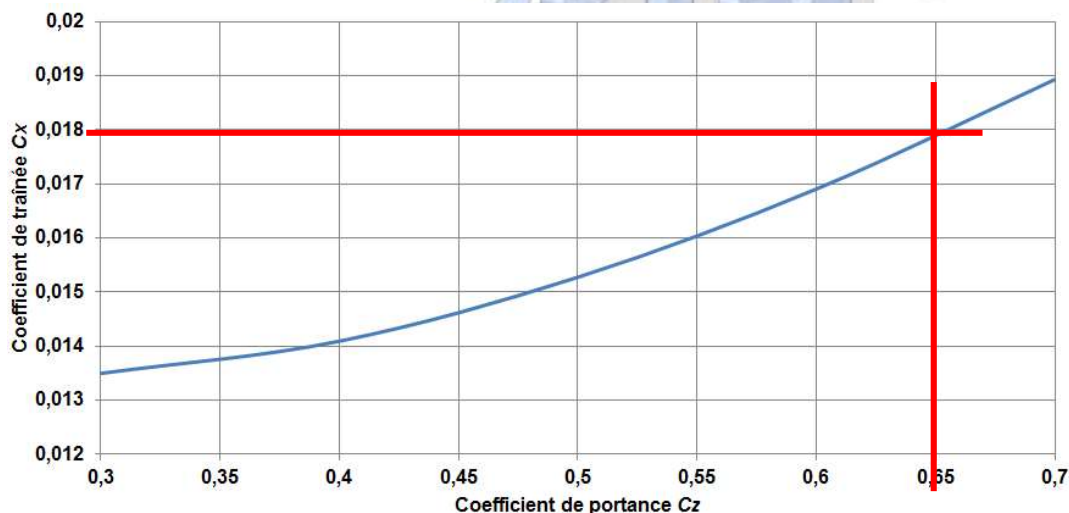
Valeur de ρ à 2 500 m = 0,95 et $V = 16,67 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ pour $60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$

$$C_z = \frac{2 \times \|\vec{R}_z\|}{\rho \cdot S \cdot V^2} = \frac{2 \times (24\,525)}{0,95 \times 284 \times 277,9} = 0,65$$

Q9. Déterminer l'intensité de la traînée R_x et donc de la traction T .

La valeur de la traînée se déduit de la formule donnée : $\|\vec{R}_x\| = 0,5 \cdot \rho \cdot S \cdot C_x \cdot V^2$.

Le coefficient de portance C_z est de 0,6.



La lecture de la figure 6 donne un C_x de 0,018 pour un C_z de 0,6.

$$\|\vec{R}_x\| = 0,5 \times 0,95 \times 284 \times 0,018 \times 16,67^2 = 677 \text{ N donc la traction est : } T = 677 \text{ N.}$$

Q10. Calculer la puissance P_h que doivent développer les quatre hélices. En **déduire** la puissance absorbée P_{a_m} par l'ensemble des quatre moteurs. **Analyser** l'écart entre les valeurs calculée et mesurée (document technique DT2 page 17) de la puissance P_{a_m} .

$$\|\vec{T}\| - \|\vec{R}_x\| = 0 \text{ donc } \|\vec{T}\| = 650 \text{ N.}$$

$$P_h = \|\vec{T}\| \cdot \|\vec{V}\| = 650 \times 16,67 = 10\,855 \text{ W}$$

$$\text{Puissance absorbée par les moteurs : } P_{a_m} = \frac{P_h}{\eta} = \frac{10\,000}{0,77} = 14 \text{ kW}$$

On retrouve bien l'ordre de grandeur de la puissance entre 10 et 15 kW.

3. Phase d'ascension

Q11. Déterminer l'intensité de la traînée Rx' . **Exprimer** littéralement l'intensité de la traction T en montée que doit fournir l'ensemble des quatre hélices, en utilisant l'équation de la résultante dynamique en projection sur l'axe x' (figure 7). **Faire** l'application numérique.

$$\|\vec{R}x'\| = 0,5 \times 0,75 \times 284 \times 0,03 \times 15,3^2 = 746 \text{ N}$$

$$T - Rx' - m \cdot g \cdot \sin\beta = 0$$

$$\text{donc } T = Rx' + m \cdot g \cdot \sin\beta = 746 + 2\,500 \times 9,81 \times \sin 1,3^\circ = 1\,302 \text{ N.}$$

Q12. Déterminer la puissance de traction P_h fournie par l'ensemble des quatre hélices. **Déterminer** la puissance absorbée Pa_m par l'ensemble des quatre moteurs. **Analyser** l'écart entre les valeurs calculée et mesurée (document technique DT2 page 17) de la puissance Pa_m .

$$P_h = T \cdot v = 1302 \times 15,3 = 19\,920 \text{ W.}$$

$$P_{am} = \frac{P_h}{\eta} = \frac{19\,920}{0,77} = 26 \text{ kW.}$$

4. Modélisation multiphysique

Q13. Justifier le choix de réaliser la traversée au mois de juillet. **Déterminer** l'énergie journalière productible E_{jp} , par l'ensemble des cellules en $\text{kW} \cdot \text{h}$.

Le mois de juillet correspond à une période où l'ensoleillement est maximal. L'éclairement énergétique est de $8,2 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$.

L'énergie journalière productible E_{jp} peut être estimée à :

$$E_{jp} = 8,2 \times 269 \times 0,227 = 500 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

Q14. À l'aide de la figure 9 page 9, calculer l'énergie produite par les panneaux en $\text{kW} \cdot \text{h}$ en décomposant la surface en éléments simples. **Donner** une explication à l'écart observé entre l'énergie journalière productible E_{jp} et l'énergie réellement produite par les panneaux (figure 9 page 9).

$$\text{L'aire, image de l'énergie produite est de : } \frac{60 \times 7}{2} + 30 \times 2 + 15 \times 2 = 240 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

L'écart peut s'expliquer par le fait que l'orientation des panneaux n'est pas obligatoirement optimale (route à suivre et angle incidence), d'autre part à 12 h 30 on relève une réduction de puissance produite du fait de la pleine charge des batteries.

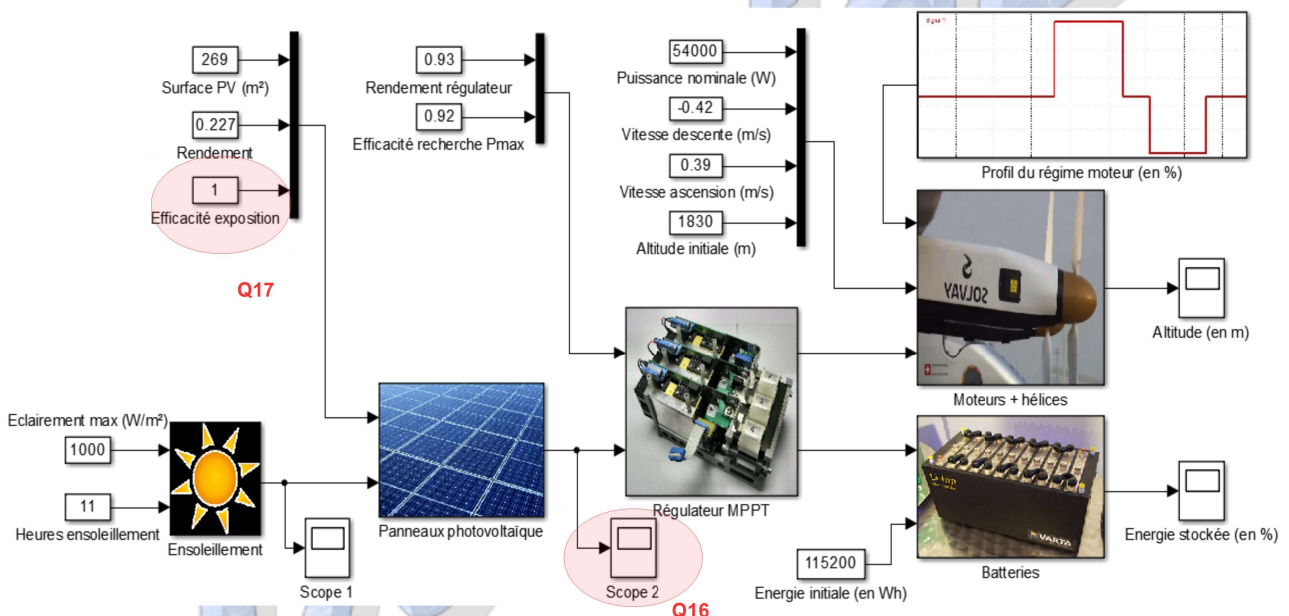
Q15. Déterminer la puissance maximale théorique $P_{max_{Th}}$ délivrée par les 17 248 cellules des panneaux. **Comparer** avec la valeur maximale réelle P_{max_R} relevée sur les enregistrement (DT2 page 17). **Donner** une justification possible à l'éventuel écart observé.

$$P_{max_{Th}} = (17\ 248) P_{max_{cel}} = (17\ 248) \times 0,6 \times 6 = 62\ \text{kW}$$

Sur le DT2 on relève une puissance maximale de 55 kW.

L'écart peut encore se justifier par l'orientation des cellules non optimal.

Q16. Placer sur le document réponse DR1 page 18, un élément appelé « Scope 2 » qui permet d'obtenir cette puissance.



Q17. Comparer le temps de production et la valeur crête de la puissance produite par les cellules sur les résultats de simulation et sur les relevés de mesures. **Identifier**, en le citant, le paramètre du modèle multiphysique qui permet d'ajuster la valeur crête du modèle. **Déterminer** la nouvelle valeur de ce paramètre.

En terme de temps de production, il n'y a pas de différence notable, par contre d'un point de vue de la valeur crête il est noté un écart de 5 kW crête, écart qui peut être annulé en modifiant le paramètre « Efficacité exposition » des panneaux photovoltaïques. La nouvelle valeur du paramètre doit être telle que :

$$S_{panneaux} \times \text{rendement} \times \text{Efficacité exposition} \times \text{éclairage} = 55\ \text{kW}$$

$$\text{Efficacité exposition} = \frac{55\ \text{kW}}{S_{panneaux} \times \text{rendement} \times \text{Eclairage}} = \frac{55\ \text{kW}}{269 \times 0,227 \times 1000}$$

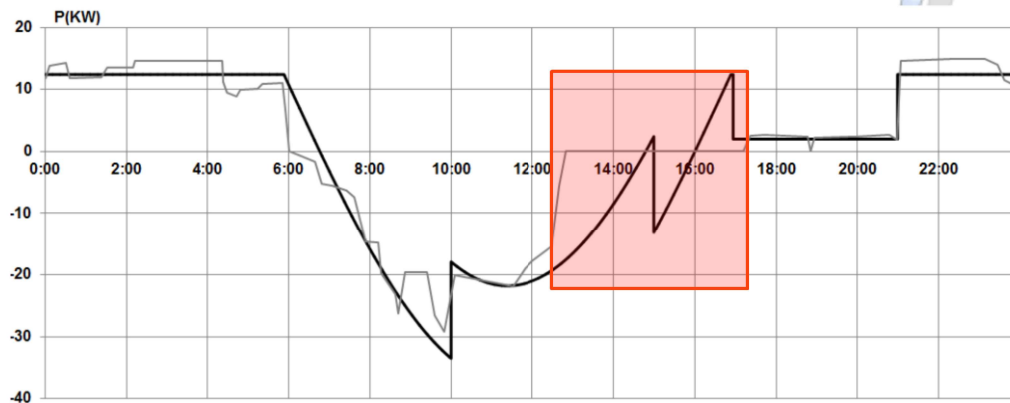
soit : Efficacité exposition = 0,9

Q18. Comparer l'évolution de l'état de charge des batteries obtenue par simulation à celle obtenue lors des enregistrements (document technique DT2 page 17).
Conclure quant à la pertinence du modèle.

Le profil de la simulation du niveau de charge des batteries est similaire à celui relevé sur l'enregistrement.

Le modèle est représentatif du comportement réel du point de vue charge des batteries.

Q19. Comparer les deux courbes et **entourer** la zone concernée des écarts notables sur le document réponse DR1 page 18.



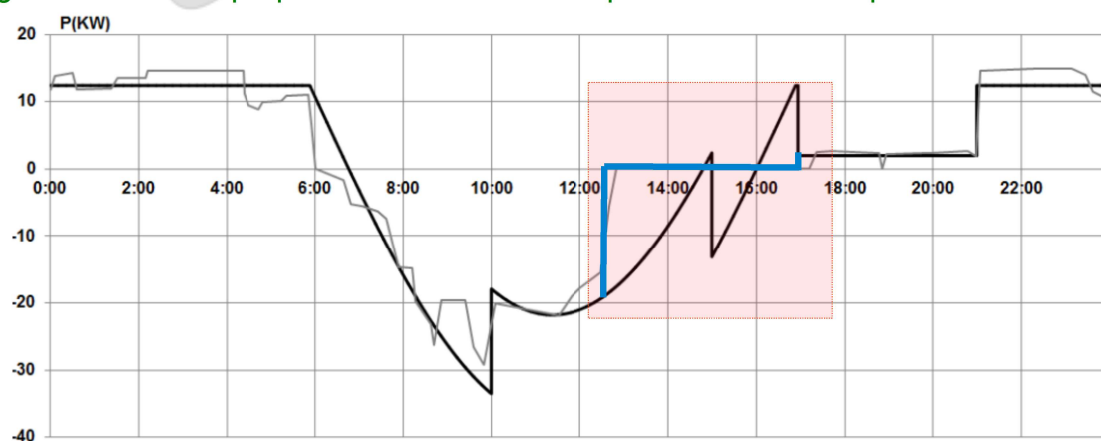
Q20. Modifier l'allure, sur le document réponse DR1 page 18, de la puissance simulée des batteries en prenant en compte la contrainte de saturation.

La question Q3 permet d'identifier sur cette courbe les différents modes de fonctionnement des batteries. Le modèle précédent ne prend pas en compte la contrainte de saturation.

Lorsque les batteries sont chargées (vers 13h00 environ), la charge doit être stoppée et la puissance des panneaux est utilisée uniquement pour continuer l'alimentation des moteurs (discontinuité sur la courbe de puissance panneaux).

Pour que le modèle soit fidèle au fonctionnement réel de l'avion, il est nécessaire que les batteries ne reçoivent ni ne produisent d'énergie tant que les panneaux peuvent subvenir aux besoins de l'avion.

La figure ci-dessous propose une modification qui rend le modèle plus fidèle au réel.



Q21. Montrer que les deux parcours sont équivalents du point de vue énergétique. Le vol en altitude demandant une assistance respiratoire (oxygène stockée en bouteille) au-delà de 10 000 pieds. **Justifier** le choix de parcours retenu par l'équipe de Solar Impulse.

Du point énergétique les deux parcours sont identiques car le niveau de charge en fin de nuit est identique dans les deux cas.

En revanche le parcours 2 entraîne un vol à une altitude supérieure à 10 000 pieds pendant environ 11 h contre 4 h pour le premier parcours. Ce parcours 2 nécessiterait d'embarquer beaucoup plus d'oxygène, dégraderait le confort (vol sous oxygène et température faible).

5. Navigation et sécurité

Q22. Écrire, au point G, l'équation littérale des moments en projection sur l'axe (G, \vec{y}) .

$$-R_{z1} \cdot (d-a) + R_{z2} \cdot (b + d) = 0$$

Q23. Exprimer le moment supplémentaire ΔM engendré par la variation de portance $\delta \vec{R}_z$, par rapport à l'axe (G, \vec{y}) . À partir du signe de ΔM , **indiquer** l'influence de ce moment sur la stabilité de l'avion.

$$\Delta M = - \|\delta \vec{R}_z\| \cdot d$$

Le moment est de signe négatif, il s'oppose donc à l'action de la perturbation.

Son action a tendance à contrer la rotation de l'avion due à la perturbation .

C'est un élément important de stabilité.

Q24. À partir des résultats précédents, **justifier** le choix du constructeur d'une structure en treillis.

La simulation par éléments finis montre que la structure en treillis est plus légère et plus rigide que la poutre à section rectangulaire.

Q25. Indiquer les principaux choix effectués par l'équipe Solar Impulse qui ont permis d'aboutir au succès du projet. **Préciser** quelles perspectives en terme de développement durable peut apporter une telle expérience.

- Conditions climatiques optimales choisies par le centre de contrôle de Monaco.
- Plan de vol à niveau variable pour minimiser la quantité d'énergie stockée dans les batteries et par conséquent leur poids.
- Optimisation de la masse : avion calculé « au plus juste », un seul pilote à bord, vol le plus longtemps à FL 80 sans oxygène.
- Système de production d'énergie, de stockage et de motorisation à très haut rendement.

Le projet Solar Impulse a démontré que dans ces conditions très particulières, le bilan énergétique peut être positif, tout en ne rejetant aucun élément nocif en phase d'utilisation. C'est une bonne base de réflexion pour un transport aérien d'avenir moins polluant.