

Un véhicule paradoxal, une explication sous forme de questions-réponses

1- Quelles sont les caractéristiques du véhicule, et dans quelles conditions est-il utilisé ?

Le Blackbird est un véhicule à roues, portant une hélice dont l'axe est aligné sur la direction de déplacement du véhicule. Les roues et l'hélice sont reliées mécaniquement par un système d'engrenages qui les rend solidaires du point de vue de leurs rotations respectives. Quand ça tourne à un bout, ça tourne à l'autre bout. Il y a néanmoins un embrayage commandé par un levier pour désolidariser entrée et sortie à volonté.

Le véhicule est utilisé sur un sol plat et horizontal. Lorsqu'il se déplace, c'est en présence de vent venant de l'arrière du véhicule. Il y a deux phases à distinguer dans le mouvement. Dans un premier temps, avec le système de transmission débrayé, le véhicule est lâché en présence d'un vent qui le pousse suffisamment pour surmonter les frottements. Il accélère alors progressivement sans dépasser ni même atteindre la vitesse du vent. Dans cette phase les roues tournent, bien sûr. Elles tournent, sous l'effet des forces qu'exerce le sol sur les parties des pneus qui sont à chaque instant en contact avec lui. Tout est banal jusqu'ici.

La deuxième phase commence lorsque l'embrayage est actionné et que la rotation des roues est transmise à l'hélice. Alors, le véhicule accélère, jusqu'à atteindre une certaine valeur de vitesse qui n'est pas reliée de manière simple à la valeur de la vitesse du vent, elle peut être inférieure ou supérieure. C'est cette phase moins intuitive qui demande à être analysée, pendant laquelle le véhicule peut très bien avancer plus vite que le vent (2,8 fois plus vite par exemple pour ce Blackbird).

Appréhender le fonctionnement de cette machine n'est pas immédiat, au point de rendre certains suspicieux quant à sa réalité.

Ci-dessous trois vidéos montrant de quoi il s'agit, mais avec beaucoup de commentaires de natures variées...

L'oral est en anglais, mais il est possible dans les réglages des vidéos d'activer d'abord le sous-titrage en anglais, puis de choisir la traduction automatique en français (en admettant quelques erreurs dans le processus).

Les trois premières minutes de la première vidéo donnent déjà le contexte.

<https://www.youtube.com/watch?v=xHsXcHoJu-A>
<https://www.youtube.com/watch?v=jyQwgBAaBag>
https://www.youtube.com/watch?v=yCsgoLc_fzI

2- Quelle étude physique est à faire ?

La situation décrite ci-dessus présente a priori au moins trois référentiels mécaniques potentiellement intéressants. On peut se placer du point de vue du sol, comme c'était déjà le cas dans la section ci-dessus pour la description du mouvement. Le véhicule lui-même est un autre référentiel possible, c'est celui pour lequel le pilote assis dans le véhicule fait ses

observations. Enfin, il y a le référentiel de la masse d'air qui se déplace en bloc au-dessus du sol. De fait, la conclusion concernant la possibilité ou non du mouvement du véhicule est indépendante du choix du référentiel qu'on choisit pour l'étude. On va voir qu'en récapitulant à la fin l'étude par rapport au sol, une analyse complète n'est pas trop compliquée. En l'occurrence, on peut considérer ce référentiel du sol comme galiléen.

On veut comprendre en détails les forces en jeu et contrôler le bilan des différentes énergies associées. On va se référer aux notions physiques simples : vitesse, force, énergie cinétique, énergie dissipée par frottement, et leurs puissances correspondantes (c'est-à-dire les " énergies par unité de temps ").

La section 3 qui suit pose les généralités dont on a besoin concernant les hélices. On utilise ces notions dans la section 4 pour mettre au clair le rôle de l'hélice dans le cas du Blackbird. Dans la section 5, on fait le bilan d'énergie. On récapitule les différents processus dans la section 6, pour en faire la synthèse et assurer la compréhension générale. Les sections 7, 8, 9 répondent à quelques questions particulières.

Conseil : au moment où des exemples de mouvement précis sont considérés (le vent souffle vers la droite, le véhicule est en mouvement vers la droite, l'hélice souffle de l'air vers la gauche, etc.), cela peut être utile de se faire ses propres dessins pour visualiser en même temps.

3- Comment fonctionne une hélice, et qu'arrive-t-il à l'air lors du passage à travers une hélice ?

En fait, il existe deux modes différents de fonctionnement : dans un cas c'est l'air en mouvement qui fait tourner l'hélice (cas d'une éolienne), dans l'autre, c'est l'hélice qui en tournant met l'air en mouvement (un ventilateur ou un avion à hélice). Il faut avoir les idées claires sur ce sujet. Pendant qu'une hélice tourne, dans les deux cas, de l'air traverse l'hélice en permanence, ce qui définit pour elle une face d'entrée et une face de sortie. On va considérer dans cette section l'hélice du point de vue du référentiel de son support, défini par exemple par le mat qui porte l'axe de rotation de l'hélice. A retenir déjà, la pression et la vitesse de l'air sont plus grandes d'un côté que de l'autre.

Dans le cas d'une éolienne, la vitesse est plus grande sur la face d'entrée de l'air. On peut raisonner sur des "particules d'air", par exemple des petits volumes d'air de 1 millimètre-cube. Le vent amène de telles particules contre la surface inclinée d'une pale. Au contact, chaque particule pousse une partie de pale, ce qui globalement provoque la rotation de l'hélice. A cette occasion, chaque particule subit un ralentissement. Au-delà de la face de sortie, elles ont toutes une vitesse plus faible et donc une énergie cinétique plus basse qu'à l'entrée. La différence d'énergie se retrouve dans l'énergie mécanique de rotation, d'abord au niveau de l'arbre de l'hélice, et au-delà par exemple en énergie électrique si l'arbre fait tourner un générateur de courant.

Notons pour plus tard que, par rapport à une éolienne, l'air environnant va dans un certain sens avant de rencontrer l'hélice, et continue ensuite dans le même sens bien qu'à vitesse plus faible.

Dans le cas d'une hélice propulsive, comme celle d'un ventilateur ou d'un avion, la vitesse est plus élevée du côté de la face de sortie. Lorsqu'une particule est frappée par la surface inclinée d'une pale en rotation, sa vitesse augmente. Cela se passe dans ce cas sur la face de sortie de l'hélice. Cette fois, l'énergie cinétique de l'air est augmentée. Pour que l'hélice puisse entretenir ce processus sans s'arrêter de tourner, il faut qu'un certain dispositif, un moteur, impose la rotation. Pour fonctionner, ce dispositif reçoit de l'énergie de l'extérieur.

Regardons du côté des forces. L'action de l'hélice qui accélère l'air dans un certain sens est représentée par une force. En réaction, l'hélice subit elle-même une force en sens inverse exercée par l'air. Son effet peut être constaté par exemple en plaçant le ventilateur sur une planche à roulettes. Lorsque l'hélice est solidaire d'un véhicule, la force propulsive qui s'exerce sur elle est transmise au véhicule.

Notons qu'ici, par rapport au support de l'hélice, l'air environnant, c'est-à-dire l'air à distance de l'hélice, peut être en mouvement dans un sens ou dans l'autre. Dans l'usage habituel d'un ventilateur, l'air environnant est au repos dans la pièce, et l'air proche traité par le ventilateur est en mouvement, traversant l'hélice selon un certain sens imposé par l'hélice. Mais il est aussi possible de déplacer à la main le ventilateur pendant qu'il fonctionne, aussi bien vers l'avant que vers l'arrière. Il y a donc trois cas de figure, que l'on retrouve dans le cas d'un avion. De même, lorsqu'un avion est arrêté sur une piste, sans vent, l'hélice tournant, par rapport à l'avion, l'air environnant est au repos, tandis que l'air subissant l'action de l'hélice est éjecté vers l'arrière. Lorsque l'avion vole normalement, par rapport à lui l'air environnant est en mouvement vers l'arrière, l'air éjecté par l'hélice également vers l'arrière mais avec une vitesse plus grande. Le troisième cas est réalisé par exemple lorsque l'avion est arrêté sur la piste avec cette fois un vent arrière et l'hélice tournant. Par rapport à l'avion, l'air environnant vient de l'arrière, alors que l'air traité par l'hélice est, lui, éjecté vers l'arrière. Dans tous les cas, indépendamment du sens du mouvement de l'air environnant, l'air traité par l'hélice est éjecté toujours dans le même sens.

L'alimentation en air de l'hélice est assurée du fait de la dépression qu'elle entretient du côté de sa face d'entrée. Dans sa zone d'influence, l'air est dévié vers elle, venant de devant, du pourtour, ou même de l'arrière, en suivant des trajectoires incurvées.

Il est aussi utile de savoir qu'on peut varier la valeur de la force propulsive. On peut bien sûr faire tourner l'hélice plus ou moins vite pour avoir plus ou moins d'air la traversant pendant chaque seconde. Si la vitesse de rotation d'hélice est fixée, il est encore possible d'augmenter par exemple la force, à condition de donner à l'hélice la possibilité d'interagir pendant chaque seconde avec une plus grande quantité d'air. C'est le cas en choisissant une hélice de plus grand diamètre ou une hélice dotée d'un plus grand nombre de pales.

4- Quel est le mode fonctionnement de l'hélice dans le cas du Blackbird ?

Comme tout système mécanique, ce véhicule est le siège de frottements et de divers autres phénomènes de dissipation d'énergie. De l'énergie est par exemple dépensée par la déformation des pneus au cours du roulement, par les frottements dans les paliers des roues, dans le mécanisme de transmission entre les roues et l'hélice, par le frottement de l'air.

Il existe donc une source d'énergie susceptible de compenser cette dissipation et qu'il faut identifier. La section précédente suggère la possibilité de considérer l'hélice comme une éolienne récupérant de l'énergie à partir de l'air environnant. De fait, cette hypothèse ne peut pas expliquer que le véhicule puisse aller plus vite que l'air. En particulier, lorsque le véhicule avance sur le sol juste à la vitesse du vent, l'air est au repos relativement à l'hélice et ne peut pas agir comme il le fait sur une éolienne. Il est important d'écartier de son l'esprit cette version de l'hélice si l'on veut entrer dans la logique de cette machine.

Nous avons donc maintenant le schéma de l'hélice propulsive à considérer en détails. On note pour commencer que, dès que le véhicule avance effectivement sur le sol, les roues sont mises en rotation, et que cette rotation est transmise à l'hélice. On a donc à faire à une hélice effectivement actionnée par un moteur, certes d'un type particulier. Par rapport au référentiel du support de l'hélice, qui est aussi celui du véhicule, on peut appliquer ce que l'on sait au sujet d'une hélice propulsive. Dans le référentiel du support de l'hélice, que l'air environnant soit globalement en mouvement vers l'avant ou vers l'arrière du véhicule, ou au repos, dans tous

les cas, l'hélice est capable de traiter une partie de l'air en l'éjectant vers l'arrière. La force propulsive qui en résulte pousse le véhicule vers l'avant. Il suffit qu'on ait choisi le bon sens pour faire tourner l'hélice !

Une force est une donnée valable indépendamment du référentiel pour lequel on a raisonné pour la mettre en évidence. Ce n'est pas le cas de la notion de vitesse. En particulier, on s'intéresse à la vitesse de l'air traité par l'hélice. Comme annoncé au début du texte, on se place maintenant dans le référentiel du sol. Une particule d'air a initialement la vitesse du vent. Après aspiration et éjection par l'hélice vers l'arrière, sa vitesse par rapport au sol a changé. Selon l'efficacité de l'hélice, il y a différentes possibilités. La particule d'air peut par exemple a) continuer à aller dans le sens du vent mais avec une valeur plus faible, ou b) se trouver juste à l'arrêt, ou c) aller maintenant dans le sens inverse du vent.

Correspondant au premier cas (l'air éjecté par l'hélice se déplace encore dans le sens du vent), voici un exemple plus concret avec des valeurs numériques, et qui pourra être utilisé dans la section suivante.

Le véhicule se déplace sur le sol, de la gauche vers la droite. On le regarde de profil, et la gauche et la droite sont celles du lecteur. L'hélice tourne, avec sa face d'entrée qui est sur le côté droit et sa face de sortie sur le côté gauche. L'air qui passe à travers l'hélice est donc envoyé vers la gauche, et la force propulsive est donc dirigée vers la droite.

Par rapport au sol

L'air environnant (le vent) va vers la droite à 10 m/s (= 36 km/h).

Le véhicule roule vers la droite à 22 m/s (= 2,2 fois plus vite que le vent).

Par rapport au véhicule

L'air environnant (le vent) va vers la gauche à 12 m/s.

L'air éjecté par l'hélice va vers la gauche à 20 m/s.

On peut déduire la vitesse, par rapport au sol, de l'air éjecté. Puisque le véhicule roule vers la droite à 22 m/s, et que par rapport à lui, l'air part vers la gauche à 20 m/s, il faut soustraire 20 à 22 pour avoir la vitesse vers la droite. L'air éjecté va donc vers la droite à 2 m/s.

5- Lorsque le véhicule avance grâce à l'action de l'hélice, le bilan des énergies mises en jeu peut-il être cohérent avec le mouvement observé ?

On rappelle l'enjeu concernant l'énergie. Il existe des frottements qui dissipent l'énergie au fur et à mesure que le véhicule avance. En absence de compensation, l'énergie cinétique du véhicule doit diminuer et le véhicule s'arrêter. Puisque le mouvement peut se perpétuer, le processus de propulsion doit inclure une source d'énergie, quelque chose dont l'énergie diminue et qui compense la dissipation par les frottements.

On continue bien sûr de raisonner par rapport au référentiel du sol.

Lorsque l'hélice est entraînée par la rotation des roues, on est tenté de résumer comme suit le processus de production de la force propulsive :

- l'air accéléré par l'hélice exerce une poussée sur le véhicule qui roule sur le sol ;
- lors du roulage, le sol fait tourner les roues et par donc l'hélice qui accélère l'air.

Formulé ainsi, on pourrait croire à un processus en circuit fermé, mais ce n'est pas le cas. En effet, l'air est en permanence renouvelé. L'air dont il est question fait d'abord partie de l'air environnant, puis fait partie de l'air éjecté par l'hélice. Dans l'exemple numérique précédent on voit que les particules d'air continuent à aller vers la droite, mais avec une vitesse qui passe de

10 m/s à 2 m/s. Sa vitesse diminue donc et son énergie cinétique associée diminue à cette occasion.

Allons plus loin en faisant une évaluation rapide pour chiffrer cette diminution d'énergie, et la puissance associée.

Pendant 1 seconde, l'hélice traite une certaine quantité d'air. Admettons que c'est l'air qui se trouve, au début de la seconde, dans un cylindre situé juste devant l'hélice. Prenons pour son rayon R le même que l'hélice (disons 1,5 m), et pour sa longueur la distance que parcourt l'air pendant $t = 1$ seconde, ceci à la vitesse v' de l'air environnant par rapport au véhicule (12 m/s). Cela va nous donner un volume d'air V , puis une masse M compte-tenue de la masse volumique de l'air dans les conditions ordinaires (1,2 kg/m³). On pourra alors calculer la diminution d'énergie cinétique de cette masse d'air, par rapport au sol, lorsque sa vitesse passe de 10 m/s à 2 m/s. Et en divisant par le temps de passage dans l'hélice (1 seconde), on obtiendra la puissance correspondante.

$$\text{Volume } V = \pi R^2 v t = 3,14 \times 1,5^2 \times 12 \times 1 \approx 85 \text{ m}^3.$$

$$\text{Masse } M = 1,2 \times 85 = 102 \text{ kg}$$

Diminution d'énergie après passage dans l'hélice

$$= \frac{1}{2} M v_{\text{avant}}^2 - \frac{1}{2} M v_{\text{après}}^2 = (\frac{1}{2} \cdot 102 \cdot 10^2) - (\frac{1}{2} \cdot 102 \cdot 2^2) \approx 4900 \text{ Joules}$$

$$\text{Puissance} \approx 4900 / 1 = 4,9 \text{ kW}$$

La puissance perdue par l'air vaut donc dans cet exemple environ 5 kilowatts. C'est dans un ordre de grandeur tout à fait crédible pour la puissance nécessaire à entretenir le mouvement d'un véhicule de la dimension du Blackbird. On a bien trouvé la source d'énergie, à savoir l'air rencontré par l'hélice qui se trouve ralenti alors que le véhicule avance.

On peut se demander quelle est la vitesse optimale pour l'air sortant de l'hélice (2m/s dans l'exemple). C'est le cas quand l'air éjecté n'a conservé aucune énergie cinétique, donc se trouve à vitesse nulle, c'est-à-dire à l'arrêt par rapport au sol. En particulier, il faut éviter que l'hélice éjecte l'air trop fortement et qu'il se retrouve à reculer par rapport au sol (aller vers la gauche dans l'exemple). Ce sujet est à prendre en compte au moment de la conception du dispositif d'hélice.

Dans le même ordre d'idées, on se rappelle que, pour obtenir la plus grande force propulsive possible, et donc aller le plus vite possible, il vaut chercher à maximiser la masse d'air qui traverse l'hélice pendant chaque seconde. Et cela est possible en augmentant le diamètre de l'hélice et son nombre de pales. Mais il y a des limites, liées à la stabilité du véhicule sur le sol, aux résistances à la rupture des pièces soumises à des efforts mécaniques, à l'augmentation de la masse totale du véhicule, etc.

6- Pourquoi le processus de création de force à partir de l'énergie disponible, n'est-il pas plus intuitif ?

On comprend bien la création de force dans les cas suivants :

- sur une éolienne, l'air en mouvement crée des forces sur l'hélice d'éolienne et la fait tourner ;
- une hélice d'avion ou de ventilateur crée des forces sur l'air et le met en mouvement
- le sol fait tourner les roues d'un chariot si quelque chose met le chariot en mouvement.

Ces cas sont simples au sens où on se représente bien qu'une certaine entité A agit directement sur une entité B.

C'est déjà un peu moins intuitif que l'air éjecté par une hélice de ventilateur exerce une force sur ce dernier.

Dans le cas du véhicule paradoxal, la création de force se réalise via une composition de plusieurs processus de ce genre ; cela le rend plus difficile à appréhender.

Listons ces processus :

- l'hélice crée des forces sur l'air qui se trouve ainsi projeté,
- par réaction, le processus précédent s'accompagne d'une force propulsive en sens opposé, exercée par l'air sur l'hélice
- le véhicule, auquel l'hélice est liée, est donc poussé par cette force parallèlement au sol
- le sol fait tourner les roues d'un véhicule
- la transmission mécanique transmet la rotation à l'hélice.

La force qui nous intéresse est celle du 2^{ème} processus, mais ce processus n'existe que s'il est intégré dans l'ensemble des cinq éléments de la liste.

Le caractère peu intuitif du véhicule avançant plus vite que le vent est aussi renforcé par la difficulté à imaginer spontanément le mouvement de l'air dans la zone d'influence de l'hélice. Cela demande de prendre en compte la dépression existant devant l'hélice, et l'aspiration qui en résulte pour l'air se trouvant dans cette zone. C'est en rentrant dans les détails, qu'on a intégré l'idée que l'air qui traverse l'hélice est en ralenti par rapport au sol.

Pour comparaison, dans le cas d'une éolienne, on a également à faire à de l'air qui est ralenti, mais qui va toujours dans le même sens par rapport au sol, alors que dans le cas étudié ici, l'air est éjecté à contre sens du vent.

En complément, pour avoir un deuxième angle de vue sur l'ensemble des processus de création de force par le véhicule, on peut considérer une version différente qui serait à transmission électrique plutôt que mécanique. Cela permet de séparer physiquement et séquentiellement les différents processus. Les roues en tournant entraînent un générateur de courant qui charge une batterie embarquée. Cette batterie sert par ailleurs à alimenter en courant un moteur électrique qui fait tourner l'hélice. Avec ce dispositif, on peut alors choisir d'alterner des phases où la batterie est reliée au moteur seulement, et des phases où elle est reliée au générateur seulement. Pendant les phases où elle alimente le moteur, l'hélice tourne et l'air par réaction exerce effectivement une force capable d'augmenter la vitesse du véhicule. Pendant les phases où la batterie est reliée au générateur, celle-ci se recharge grâce aux roues qui tournent, pendant que la vitesse, elle, décroît. Alternant au cours du temps des phases de ralentissement et des phases d'accélération, le mouvement du véhicule est entretenu. Les frottements et les autres causes de dissipation consomment de l'énergie, mais, en contrepartie, à chaque phase d'accélération du véhicule, de l'air perd de l'énergie cinétique pendant que le véhicule en gagne. Pour que le mouvement perdure, il suffit que l'hélice soit suffisamment dimensionnée pour récupérer suffisamment d'énergie pendant ses phases de travail.

7- Est-ce nécessaire de débrayer au départ ?

Au départ, c'est la seule poussée du vent s'exerçant sur le véhicule qui doit amorcer son mouvement. Pour réduire autant que possible la résistance au mouvement, il vaut mieux débrayer le mécanisme de transmission et l'hélice. Une fois qu'une vitesse suffisante est acquise en roue libre, l'hélice peut être mise en rotation. Pendant cette période transitoire de lancement de l'hélice, une certaine quantité d'énergie cinétique de translation du véhicule est transformée en énergie cinétique de rotation de l'hélice. A partir d'une certaine vitesse de rotation, le processus de génération de la poussée par l'air commence à fonctionner.

Le tout début du mouvement peut aussi être initié en poussant à la main lorsqu'il s'agit d'un véhicule léger, ou s'initier par le vent seul s'il présente peu d'inertie. C'est le cas par exemple aux instants à 1'20" et 6'20" de la première vidéo citée.

8- Peut-on observer la situation en continu depuis le référentiel de l'air ?

On peut bien sûr prendre place dans une voiture qui roule à la vitesse de l'air et regarder le véhicule paradoxal en mouvement. Dans le cas où le véhicule paradoxal est un modèle réduit, on peut le faire en intérieur et sans vent dans la pièce. Puisqu'il faut que les roues tournent pour faire tourner l'hélice, on peut poser le véhicule sur un tapis roulant.

On a ainsi la même situation du point mécanique, mais observée en l'occurrence depuis le référentiel de l'air.

C'est aussi l'occasion de bien faire apparaître que cette situation mécanique réclame dans tous les cas une vitesse non nulle entre d'une part l'air, et d'autre part le support en contact avec les roues.

9- Peut-on obtenir le même résultat avec un bateau sur l'eau ?

Oui, bien sûr. Comme le véhicule à roues, il doit être équipé d'une hélice en haut d'un mat et d'une transmission reliée cette fois à une hélice marine immergée. Le bateau est alors propulsé par l'air lorsque l'hélice tourne. Lorsque le bateau avance, l'hélice immergée est mise en rotation par l'eau qui défile, et cette rotation est transmise à l'hélice aérienne.

Sur le sol ou sur l'eau, il est donc possible d'avoir des véhicules qui avancent sans apport d'énergie par l'utilisateur. Par contre, leur mode de fonctionnement est bien trop constraint pour permettre une utilisation ordinaire. Il faut que le vent souffle à une vitesse utilisable, et surtout en direction de la destination souhaitée. Ensuite, changer de cap signifie être oblique par rapport au vent, donc ralentir une moins grande quantité d'air. Dans ce cas, le véhicule ralentit, voire s'arrête, en plus d'être incliné sous l'effet de la composante latérale du vent. D'une manière générale, les possibilités de s'adapter à l'environnement sont très limitées.