

ÉPREUVE COMMUNE DE TIPE - Partie D

5

Voiliers solaires

10 Temps de préparation :2 h 15 minutes
Temps de présentation devant le jury :10 minutes
Entretien avec le jury :10 minutes

GUIDE POUR LE CANDIDAT :

15

Le dossier ci-joint comporte au total : 12 pages (celle-ci comprise)

Document principal : 5 pages : Le vent venu du soleil

Documents complémentaires : 4 documents pour un total de 5 pages et un glossaire (1 page)

20

Travail **suggéré** au candidat :

25 Construire une critique du texte *Le vent venu du soleil*, basée sur les lois de la physique et les documents complémentaires fournis. Des modèles **élémentaires** pour les différents phénomènes physiques impliqués dans le récit sont attendus, avec des calculs **simples** mettant en évidence l'exactitude ou non des propos de l'auteur. En particulier, il est intéressant de faire la distinction entre la poussée du vent solaire et celle des photons solaires.

CONSEILS GÉNÉRAUX POUR LA PRÉPARATION DE L'ÉPREUVE :

30

- * Lisez le dossier en entier dans un temps raisonnable.
- * Réservez du temps pour préparer l'exposé devant le jury.

35

- Vous pouvez écrire sur le présent dossier, le surligner, le découper ... mais tout sera à remettre au jury en fin d'oral.
- En fin de préparation, rassemblez et ordonnez soigneusement TOUS les documents (transparents, *etc.*) dont vous comptez vous servir pendant l'oral, ainsi que le dossier, les transparents et les brouillons utilisés pendant la préparation. En entrant dans la salle d'oral, vous devez être prêts à débiter votre exposé.

40

A la fin de l'oral, vous devez remettre au jury le présent dossier, les transparents et les brouillons utilisés pour cette partie de l'oral, ainsi que TOUS les transparents et autres documents présentés pendant votre prestation.

45

Avant propos : Ce document comporte un récit de fiction, intitulé *Le vent venu du soleil* (Arthur C Clarke, Presse Pocket, 1983, numéro dans la collection : 5164; pages 59 à 83), et des documents scientifiques intitulés *Puissance radiative et force mécanique, Détails sur l'interaction rayonnement – matière, Matériaux et Vent solaire*. L'ensemble se termine par un glossaire (les mots en italique gras, apparaissant dans le texte qui suit, sont définis dans ce glossaire)

Le vent venu du soleil

55

Dans trois minutes, la course commencerait, et pourtant John Merton se sentait plus détendu qu'il ne l'avait jamais été depuis un an. (...). Sur les quatre mondes habités, il y avait à peine vingt hommes capables de manœuvrer un voilier solaire, et ils étaient tous là, sur la ligne de départ à bord des sept voiliers qui allaient s'élancer, ou dans les navires d'escorte, en orbite à 60 36000 kilomètres au-dessus de l'équateur.(...)

Pour la dernière fois Merton vérifiait la tension dans le **gréement**. Les aiguilles de tous les dynamomètres étaient fixes et l'immense voile tendue, miroir splendide qui scintillait au soleil. Merton, qui flottait en apesanteur au périscope, avait l'impression qu'elle emplissait le ciel. Et il y avait de quoi : il y avait là cinq millions de mètres carrés de voile, reliés à sa capsule par cent cinquante mille mètres de **gréement**. Toute la voile portée par tous les 65 voiliers qui jadis, pour le commerce du thé, cinglaient à travers les mers de Chine, cousue ensemble en un gigantesque pan, n'aurait pu égaler la voile unique que *la Diane* avait déployée sous le soleil. Pourtant elle n'était guère plus substantielle qu'une bulle de savon : ces cinq cents hectares de plastique recouverts d'aluminium ne faisaient que quelques 70 millionnièmes de centimètres d'épaisseur. (...). L'esprit avait du mal à concevoir quelque chose d'aussi gigantesque et pourtant si frêle. Et Merton trouvait plus difficile encore de se faire à l'idée que ce fragile miroir pouvait l'arracher à la terre par la seule puissance solaire qu'il capterait. (...)

75 Sept lames de couteau tranchèrent sept amarres reliant les yachts aux vaisseaux qui avaient assuré leur montage et leur entretien. (...) Ils allaient commencer à se disperser et le gagnant serait celui qui le premier dépasserait la lune. A bord de *la Diane* rien ne sembla se passer, mais Merton ne s'y trompa pas ; bien que son corps ne perçut aucune poussée, le tableau de bord indiquait qu'il subissait maintenant une accélération de presque un millième de fois la

80 gravité terrestre standard. (...) A cette allure, faire deux fois le tour de la terre lui donnerait assez de vitesse pour échapper à l'attraction ; il pourrait alors mettre le cap sur la lune avec toute la force du soleil derrière lui.

Il eut un sourire désabusé en se rappelant tous ses efforts pour expliquer la navigation solaire au public de conférences. « Tendez les mains vers le soleil », disait-il « Que sentez-vous ? De la chaleur, bien sûr. Mais, il y a aussi de la pression, bien que vous ne l'ayez jamais remarquée tant elle est ténue. Sur toute la surface de vos mains, elle représente seulement une vingtaine de microgrammes. » (...) Et il exhibait alors quelques mètres carrés de voile. (...) « Voyez comme c'est léger : une tonne couvre 250 hectares qui peuvent capter des radiations
90 fournissant une pression de deux kilos et demi. (...) La première seconde, nous n'avancerons que d'un demi centimètre. Mais, au bout d'une minute nous aurons couvert une vingtaine de mètres. Au bout d'une heure nous serons à une bonne soixantaine de kilomètres de notre point de départ nous ferons du cent trente kilomètres / heure. (...) Au bout d'une journée de voyage nous atteindrons dans les trois mille kilomètres / heure. Et tout cela sans brûler une goutte de
95 combustible. » (...)

La Diane avait pris un bon départ. (...) *Le Lebedev* d'Astrograd avait l'allure d'une croix de Malte ; les voiles qui en formaient les quatre branches pouvaient apparemment être inclinées pour gouverner. (...) En ce début de course, ils mettaient tous le cap à l'opposé du soleil, courant pour ainsi dire vent arrière. (...) Les *haubans*, minces bandes de pellicule plastique non recouvertes d'aluminium, auraient été invisibles s'ils n'avaient été enduits de peinture fluorescente. C'étaient maintenant des lignes tendues de lumière colorée qui filaient en décroissant sur des centaines de mètres vers la gigantesque voile. Chacun d'eux avait son propre treuil électrique, guère plus gros qu'un moulinet de pêcheur au lancer. Ces petits
105 treuils tournaient sans arrêt pour donner du mou ou réduire l'allonge, selon les instructions du pilote automatique qui corrigeait constamment l'orientation de la voile par rapport au soleil. (...) Lorsqu'il se fut assuré que tout était impeccable, il balaya le ciel de son périscope, afin de vérifier la position de ses rivaux. Le tri allait commencer à se faire, mais le véritable critère serait le passage dans l'ombre de la Terre ; la maniabilité compterait alors autant que la
110 vitesse. (...) Les autres vaisseaux étaient montés par deux hommes, qui pouvaient se reposer à tour de rôle, mais Merton était seul. Il décida de profiter de cette première partie de la course pour dormir. (...) Il plaça sur son front les électrodes de l'hypnogène qu'il régla sur trois heures. (...) La sonnerie d'alarme le tira de son sommeil au bout de deux heures seulement.

La poussée diminuait. (...) Il s'empressa de vérifier la tension des haubans : d'un côté de la
115 voile, les relevés étaient normaux, alors que de l'autre, la traction baissait lentement sous ses
yeux. (...) Une ombre immense avait commencé à s'étendre sur l'argent miroitant de la voile.
Bien entendu il n'y a pas de nuage à cette distance de la Terre. (...) L'ordinateur de bord
120 donna son verdict : il fallait ouvrir les panneaux de commande 3 et 4 jusqu'à ce que la voile
ait pris 30 degrés d'inclinaison de plus ; alors la poussée de radiation écarterait *La Diane* du
dangereux cône d'ombre et l'exposerait alors à nouveau en plein aux feux du soleil. (...) Il
était difficile de s'habituer à cet univers ralenti où il fallait attendre dix minutes pour que les
effets de toute action soit visible à l'œil. (...) Bien avant que l'ombre ait disparu, il inversa
l'inclinaison et fit reprendre son cap à *la Diane* : sur sa lancée nouvelle elle allait échapper au
125 danger. Dans l'espace, au moment même où l'on déclenche un processus, il faut déjà songer à
l'arrêter. (...)

« Bonjour Docteur Merton » l'interpella la voix du journaliste. « Pourquoi avez-vous décidé
de courir en solitaire ? »

130 « Vous savez que les performances de ces voiliers dépendent de manière cruciale de leur
masse. Un coéquipier avec ses provisions, cela veut dire deux cents kilogrammes de plus.
Cela peut faire la différence entre la victoire et la défaite. »

« Mais ces cinq millions de mètres carrés de voile à manipuler cela semble beaucoup pour un
seul homme » reprit le journaliste.

Merton se mit à rire : « Cette surface produit une force de 50 N seulement. Je peux exercer
135 une poussée supérieure avec un seul doigt ! ». (...)

Sur presque la moitié de son orbite autour de la Terre, il devrait maintenir toute cette immense
surface la tranche tournée vers le soleil. La voile serait inutile, encombrante. (...)

140 Il y eut une explosion de lumière au bord de la Terre : le Soleil jaillissait du Pacifique. Les
aiguilles du dynamomètre décollèrent du zéro, mais à peine. La Diane était encore presque
totalement en apesanteur ; en effet, avec sa voile pointée vers le soleil, son accélération n'était
maintenant que de quelques millièmes de g. (...) Les douze heures suivantes s'écoulèrent
sans incident, tandis que, dans le ciel, la Terre devenait visible puis, peu à peu, pleine. Il y
avait peu à faire pendant que la flotille décrivait la partie de son orbite où elle était privée de
145 propulsion. (...) La Diane avait maintenant plus de cinq cents kilomètres d'avance sur son
poursuivant et l'écart devrait encore se creuser pendant les prochaines heures. (...)

150 A bord de la vedette officielle, près de deux mille kilomètres derrière les concurrents, le Commodore Van Stratten fixait un regard consterné et furieux sur le radiogramme qui avait parcouru des dizaines de milliers de kilomètres depuis le chapelet d'observatoires suspendus à bonne distance de la surface solaire embrasée, pour lui apporter la pire des nouvelles possibles. (...) Dans les profondeurs de l'astre, d'énormes forces s'amassaient. A tout moment, l'énergie d'un million de bombes à hydrogènes pouvait se déchaîner, stupéfiante explosion appelée éruption solaire. A des millions de kilomètres à l'heure, une boule de feu
155 invisible, dont la taille représentait plusieurs fois celle de la Terre, s'élancerait du soleil vers l'espace. (...) Les vaisseaux spatiaux ne risquaient rien avec leur blindage et leurs écrans magnétiques, mais les légers voiliers étaient sans défense contre une telle menace. Il faudrait recueillir les équipages et abandonner la course.

160 Tout cela restait ignoré de Merton qui doublait la Terre pour la seconde fois. Si tout se passait bien, ce serait le dernier tour pour lui et ses derniers poursuivants, à savoir *le Lebedev*. Leur spirale leur avait fait gagner des milliers de kilomètres d'altitude grâce à l'énergie des rayons solaires. (...)

« Salut Merton » sonna l'appel du commandant du *Lebedev* dans les oreilles de l'interpellé.
« Si tu veux bien regarder cela, ça ne manquera pas d'intérêt ! »

165 Merton se jeta sur le périscope. A cinq cent kilomètres derrière, sous ses yeux, les quatre bras de la croix se détachèrent du carré central, avec tous les *espars* et tous les cordages. *Le Lebedev* serait pratiquement ingouvernable, mais peu importait, maintenant qu'il avait atteint la vitesse de libération. (...)

170 « Et tu n'as pas encore tout vu. Il y a dans mon pays un vieux conte d'un traîneau poursuivi par les loups et le cocher doit jeter l'un après l'autre les passagers pour sauver sa propre vie. Tu vois l'analogie ? Une vedette récupérera mon compagnon dans dix minutes ! » (...)

Merton ne répondit pas ; il était plongé dans des calculs fondés sur la nouvelle physionomie de la course. *Le Lebedev* le rattraperait à peu près au moment où il espérait dépasser la lune.
(...)

175 A l'observatoire solaire III, dont l'orbite était bien inférieure à celle de mercure, les instruments automatiques enregistrèrent tout le début de l'éruption : un quart de milliards de kilomètres carrés s'embrasèrent. De cet enfer bouillonnant jaillit le grand jet de plasma ionisé que précédait, en avant coureur à la vitesse de la lumière, l'éclair de rayons X et ultraviolets.
180 Ce dernier atteindrait rapidement la Terre, mais bien que relativement inoffensif, il signalerait

l'arrivée, à leur pas de sénateur, des atomes ionisés qui suivaient à six millions et demi de kilomètres à l'heure. Ils engloutiraient au bout de plus d'un jour *le Lebedev* et *la Diane*. (...)

185 C'est avec un regret immense que les deux capitaines durent se résoudre à abandonner leur course, suite à l'appel du Commodore. Merton préféra simplement sauter de son voilier. (...)

Maintenant qu'il n'était plus à bord, la Diane gagnerait trois mille kilomètres à l'heure chaque jour de son voyage. Dans un mois, elle se déplacerait plus vite qu'aucun navire jamais construit par l'homme. La distance allait, certes, affaiblir le rayonnement solaire, mais, même à hauteur de mars, elle prendrait encore quinze cents kilomètres / heures chaque jour. Et il y

190 aurait alors beau temps qu'elle aurait atteint une vitesse trop grande pour que le soleil lui-même puisse la retenir. (...)

Puissance radiative et force mécanique

Le flux solaire radiatif dans l'espace, à la distance D du soleil est donné par :

$$195 \quad \Phi = \Phi_0 \left(\frac{D_0}{D} \right)^2$$

où Φ_0 est la constante solaire et vaut : $\Phi_0 = 1,36 \text{ kW m}^{-2}$; $D_0 = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$ est la valeur de l'unité astronomique (ua). On en déduit facilement la puissance radiative P_r associée à une surface S : $P_r = S \Phi$

Cette puissance est causée par les photons dont l'énergie E s'exprime à partir de leur fréquence ν (h est la constante de Planck et vaut $6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$) : $E = h\nu$

Soit une quantité de mouvement par photon :

$$p = \frac{h}{2\pi} k$$

où k est le nombre d'onde, défini à partir de la fréquence, et c désignant la vitesse de la lumière :

$$205 \quad k = \frac{2\pi}{c} \nu$$

Si l'on considère maintenant un ensemble de n photons de même fréquence, l'énergie totale associée est bien sûr :

$$E_n = nh\nu$$

et la quantité de mouvement associée à cet ensemble est ainsi égale, après quelques calculs,

210 à :

$$p_n = \frac{nh\nu}{c}$$

La puissance P_r correspond à l'énergie par unité de temps, soit pour cet ensemble de photons identiques :

$$P_r = \frac{dE_n}{dt} = h\nu \frac{dn}{dt}$$

215 Lorsque ces photons frappent une surface qui les réfléchit, leurs quantités de mouvement et leurs énergies sont transmises à la surface, produisant une force :

$$F = 2 \frac{dp_n}{dt} = 2 \frac{h\nu}{c} \frac{dn}{dt}$$

Ce qui correspond ainsi à :

$$F = 2 \frac{P_r}{c}$$

Détails sur l'interaction rayonnement – matière

Les photons frappant une surface matérielle peuvent être :

- 225 - réfléchis (on note généralement ρ le coefficient de réflexion, rapport entre la puissance réfléchie et la puissance incidente),
- absorbés (on note généralement α le coefficient d'absorption, rapport entre la puissance absorbée et la puissance incidente),
- transmis (on note généralement τ le coefficient de transmission, rapport entre la puissance transmise et la puissance incidente),

230 La force qu'ils communiquent à la surface dépend de ces cas de figure de manière tout à fait triviale.

Dans le cas idéal, la force communiquée à la surface matérielle d'aire S sera ainsi égale à :

$$F_{id\acute{e}ale} = 2 \frac{S\Phi}{c} \cos^2 \theta$$

235 Ce cas idéal correspondant à une surface parfaitement réfléchissante pour l'ensemble des photons incidents en provenance du soleil. θ représente l'angle entre la direction du soleil et la normale à la surface, en supposant celle-ci parfaitement plane.

Matériaux

240

L'amélioration des propriétés radiatives des matériaux, en particulier la réflectivité – ou coefficient de réflexion, c'est-à-dire le rapport entre la puissance radiative réfléchie et la puissance radiative incidente - est une clef pour la réalisation de voiles solaires. Mais ces performances doivent être regardées en ayant à l'esprit les contraintes mécaniques, la masse globale...

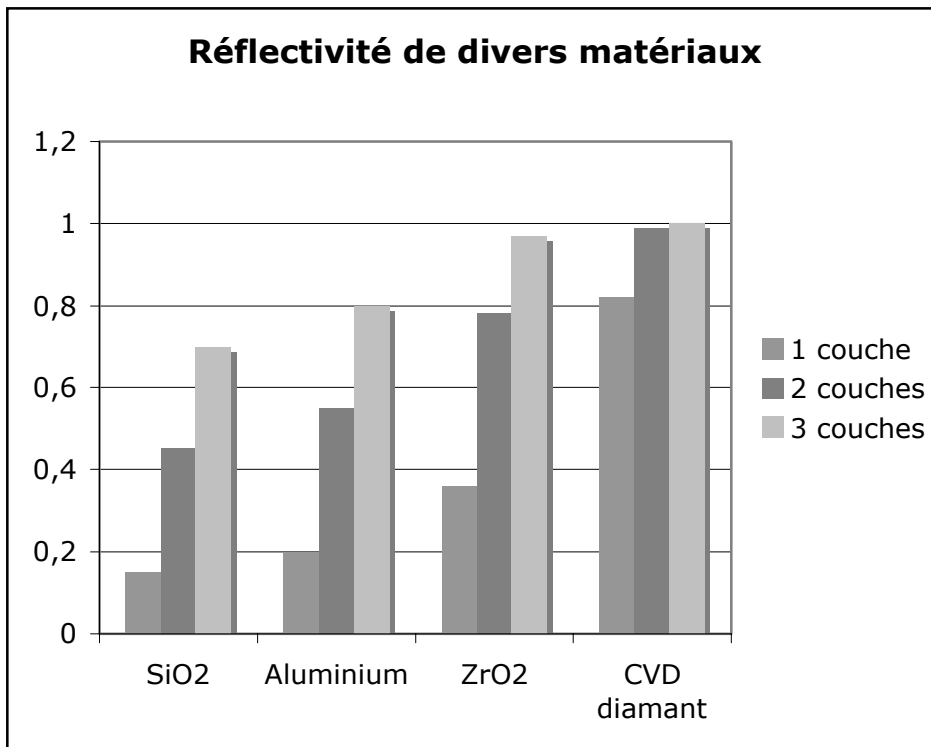
245

Sont d'abord présentés un tableau de caractéristiques élémentaires et un graphe de propriétés radiatives (réflectivité) qui sont cohérents entre eux : les épaisseurs de couches du premier sont à mettre en relation avec les mentions du graphe.

Caractéristiques élémentaires				
Matériau	SiO ₂	Aluminium	ZrO ₂	CVD Diamant
Epaisseur de couche (en µm)	0,02	0,02	0,02	0,02
Masse volumique (en 10 ³ kgm ⁻³)	2,6	2,7	6,0	4,4

250

Pour mémoire, le plastique a une masse volumique d'environ 1,3 10³ kgm⁻³.



255

Eléments de résistance des matériaux

Point de vue macroscopique

260 On définit une grandeur, appelée résistance limite à la traction et notée R, qui permet de déterminer la force maximale applicable, en traction, à une structure, avant que cette dernière ne se rompe. L'unité employée est une unité de pression, car cette grandeur est rapportée à la surface de matériau concernée : il est évident que plus la surface de la tranche de matériau est importante, plus l'objet en question supportera des forces importantes.

matériau	SiO ₂	Aluminium	ZrO ₂	CVD Diamant	plastique	Nanotubes carbone
R (MPa)	3 000	300	10 000	20 000	80	150 000

265

Point de vue microscopique

270 Les dimensions de matériau présentées par l'auteur sont a priori très petites, et l'on peut s'interroger sur la fiabilité des relations macroscopiques. On peut alors exploiter des données adaptées au monde sub-nanométrique en utilisant les forces de Van der Waals. On admettra que ces forces ont une portée de l'ordre de 0,5 nm, pour une énergie potentielle de 0,1 eV.

Vent solaire

275 Ce flot de particules chargées expulsées par le Soleil a été observé pour la première fois en 1962 par la sonde Mariner 2. Mais, avant de mettre en œuvre les calculs prenant en compte le champ magnétique du soleil, on ne parvenait pas à comprendre comment il pouvait atteindre la vitesse fantastique de 800 km/s.

280 Le vent solaire se compose essentiellement de protons. Dans la couronne surchauffée du Soleil, à un million de degrés, ces atomes d'hydrogène sont ionisés, ce qui leur confère une charge électrique. Ces gaz brûlants sont expulsés à une vitesse considérable.

Le vent solaire représente une quantité considérable de matière. Notre étoile expulse en huit heures une quantité de gaz équivalente à toute l'atmosphère de la Terre. Heureusement, le champ magnétique de notre planète dévie la majeure partie de ces particules.

285 Le Soleil est décidément en pleine forme. Après avoir connu 2 puissantes éruptions les 22 et 23 octobre 2003, il a libéré au matin du 28 octobre 2003, une énorme quantité de matière coronale qui se dirige droit sur notre planète à la vitesse de 2125 kilomètres par seconde. La quantité de matière est dite énorme, mais se traduit par un flux de particules réduit au niveau de l'atmosphère terrestre : 10^4 particules par centimètre carré, par seconde et par stéradian, à comparer à environ 10 particules par centimètre carré, par seconde et par stéradian, en 290 l'absence d'éruption solaire.

8 minutes après l'éruption, notre planète a été bombardée par une pluie de rayons X consécutive à l'éruption qui ont fortement ionisé les couches supérieures de l'atmosphère, provoquant d'importantes perturbations des communications radio. L'atmosphère de notre planète nous protège de l'essentiel de ces radiations, mais plus on se trouve en altitude, moins 295 le filtre atmosphérique joue son rôle. Aussi les personnels navigants et les passagers des vols longs courriers peuvent à ces occasions recevoir une dose de radiations équivalente à celle reçue lors d'une radio des poumons. Les plus exposés sont naturellement les astronautes en orbite à bord de la Station Spatiale Internationale, lesquels doivent s'abriter dans les zones de la station les moins exposées aux radiations et naturellement proscrire toute sortie extra-300 véhiculaire.

Glossaire

Grément

305 Ensemble des cordages, manoeuvres, poulies qui servent à l'établissement et à la manoeuvre des voiles d'un bateau.

Hauban

Cable servant à maintenir ou à consolider.

Espar

310 Longue pièce de bois effilée utilisée comme mâât, vergue (pièce de bois cylindrique, effilée à ses extrémités et placée en travers d'un mâât, pour soutenir et orienter la voile) ou bôme (espar horizontal servant à tendre le bord inférieur de certaines voiles sous lequel il est placé).

Données complémentaires :

315 L'orbite de mars se situe à 1,54 u.a., où une u.a. est égale à D_0 citée dans le texte.
Celle de Pluton à environ 50 u.a.