ÉCOLE NAVALE INTERNE 1ère ANNÉE

Concours 2011

Deuxième composition de physique

Durée : 3 h 30

Remarque : *Le sujet comporte des questions indépendantes. Il est donc conseillé aux candidats de lire complètement l'énoncé. Les résultats fournis, même non démontrés, peuvent être utilisés. Si le candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale sur sa copie et poursuit sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il est amené à prendre. La qualité de la rédaction sera également prise en compte.*

Apportage sur le Charles de Gaulle

Dans ce problème, on étudie le dispositif mis en place sur le porte-avions Charles de Gaulle pour permettre l'appontage des avions. La capacité d'embarquement est de 40 aéronefs. Le bâtiment dispose de trois pistes sur le pont supérieur, deux pour le décollage et une pour l'appontage. La piste d'appontage est située sur la moitié arrière, elle est légèrement oblique (8,5°) et se termine au ras du décrochement latéral, pour permettre à un avion, échouant à apponter, de re-décoller. Un espace limité situé sur tribord et au tiers avant est occupé par l'îlot de la passerelle. Le reste de la surface du pont est consacré aux parkings, aux zones de circulation et aux arrivées des ascenseurs qui assurent le transfert des avions et du matériel vers les hangars. Malgré les dimensions du pont d'envol, 260 m de long et 65 m de large, les pistes sont réduites, environ 70 m pour celles de décollage et 100 m pour celle d'appontage. Les avions embarqués sont de type : Rafale marine, Hawkeye, Super étendard, … Leur masse au décollage est de 12 à 25 tonnes (en fonction du type d'aéronef) réservoirs pleins, à l'appontage, avec très peu de carburant, de 8 à 20 tonnes. La vitesse au décollage est de l'ordre de 250 km.h^{-1} et celle d'appontage 220 km.h^{-1}.

Dans ce problème, les efforts du sol sur les roues des aéronefs sont supposés toujours vérifier les lois de Coulomb du frottement solide, coefficient de frottement f, constant et identique pour toutes les roues. Pour les applications numériques, on prendra $f = 0,6$. Les lois de Coulomb sont rappelées en fin de problème. Les mouvements des aéronefs sont rectilignes, on prendra l'axe des x dans la direction et le sens de déplacement de l'aéronefs considéré et on note G son centre de masse. Tous les éléments sont toujours symétriques par rapport au plan vertical, noté (G, x, z). De plus, pour simplifier, on suppose que, une fois que l'aéronef touche le sol, son poids s'applique totalement sur les roues (la portance est supprimée et l'avion n'est pas non plus « plaqué » au sol).

Étude préliminaire

On étudie le problème de l'arrêt de l'avion, par exemple un rafale, sur une piste à terre. On suppose que le système de freinage est optimal, de sorte que les roues roulent sans glisser, mais l'action du sol sur les roues est à la limite du glissement. L'avion a trois roues (une à l'avant, 2 à l'arrière) une masse totale (roues, carburant résiduel, armement, … compris) M = 15 tonnes, l'accélération de la pesanteur est g = 9,8 m.s^{-2} et la vitesse initiale de l'avion lorsqu'il touche le sol est v_0 = 220 km.h^{-1}.

1) Exprimer l'accélération a de l'avion en fonction des différentes composantes T_i (avec i = 1, 2 et 3 pour désigner les différentes roues) des actions du sol sur chaque roue.
2) En déduire, en utilisant les lois de Coulomb, l'expression de a en fonction de f et g. Pouvait-on prévoir, dans le cadre des lois de Coulomb, que ce soit indépendant de M ?
3) Déterminer le temps τ_1 nécessaire pour arrêter l'avion.
4) Calculer la distance de freinage D_1, distance parcourue au sol jusqu'à l'arrêt complet.
5) Calculer la variation d'énergie cinétique de l'avion au cours du freinage. Sous quelle forme est dissipée cette énergie ?
6) Justifier qu'un avion doit utiliser un système spécifique pour apponter sur le porte-avions.

On veut vérifier qu'il est raisonnable de supposer que le freinage s'effectue avec un roulement sans glissement. Pour cela, on cherche à évaluer la durée τ_2 de la phase du glissement. Lorsque l'avion touche le sol, les roues ne tournent pas et la vitesse de translation de l'appareil est v_0. On considère ici que les trois roues sont identiques, de rayon R, de masse m, et de moment d'inertie par rapport à l'axe de rotation $J = \frac{1}{2}mR^2$. À un instant t, on note $\omega(t)$ la vitesse angulaire de rotation des roues et $v(t)$ la vitesse de translation de l'avion. À t = 0, l'avion touche le sol, on a donc $v(0) = v_0$ et $\omega(0) = 0$. Pour simplifier, on suppose que, tant que les roues glissent, les trois portent la même charge (donc chacune 1/3 de la masse totale de l'avion) et que la seule action ayant un moment par rapport à l'axe de rotation est celle du sol sur les roues (les freins ne sont pas en action quand la roue dérape).

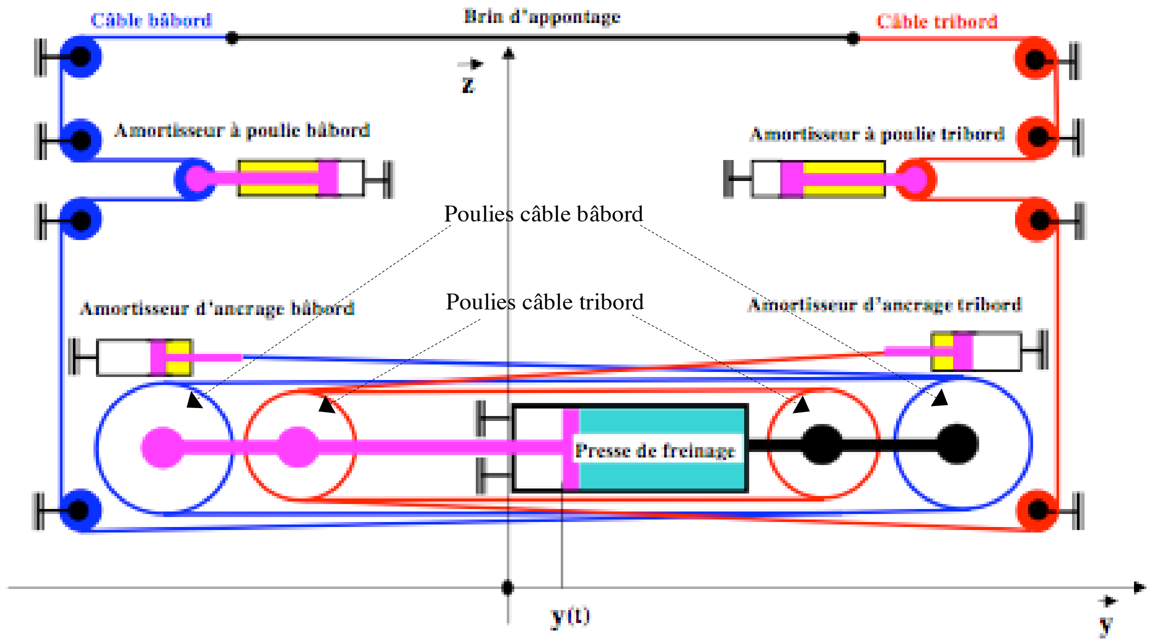
7) Écrire la vitesse de glissement $u(t)$ des roues en fonction de $v(t)$, $\omega(t)$ et R. Justifier qu'il y a nécessairement une phase de glissement.
8) Calculer, tant qu'il y a glissement, la vitesse $v(t)$ de l'avion, et la vitesse $\omega(t)$ des roues.
9) En déduire la durée τ_2 de la phase de glissement, en fonction de M, m et de la durée τ_1 d'arrêt calculée à la question 3.
10) Au moment de l'atterrissage, on a $\frac{M}{m}$ = 750. En déduire le rapport τ_1/τ_2. Conclure sur l'hypothèse initiale de non glissement.

Freins d'apponntage du Charles de Gaulle

L'avion est muni d'un bras appelé crosse, situé sous le fuselage à l'extrémité arrière. Ce bras est déployé au moment de l'appontage et permet d'accrocher un brin d'appontage tendu en travers du pont, maintenu par des arceaux à une dizaine de centimètres au-dessus de ce dernier. Les deux extrémités du brin sont liées aux câbles principaux reliés à un système hydromécanique qui transforme l'énergie cinétique de l'avion en énergie hydraulique. Une vanne de laminage permet de dissiper une partie de cette énergie. Pour la décrire simplement, de façon très schématique, une vanne de laminage est un tuyau dont on peut régler la section (par introduction d'un pointeau conique) ; à débit donné, cela impose une vitesse plus ou moins rapide au fluide, qui, du fait de sa viscosité dissipe plus ou moins d'énergie sous forme thermique. Le complément d'énergie est accumulé dans un système oléopneumatique.

Sur le Charles de Gaulle, le pilote dispose de trois câbles, chacun lié à un dispositif indépendant, les trois presses de freinage correspondantes (nommées « Athéna », « Aphrodite » et « Andromède » en partant de l'arrière du bâtiment) ont un fonctionnement identique, dont on étudie l'action sur le freinage de l'avion dans la suite du problème. Les brins sont distincts des câbles principaux car ils s'usent très vite et doivent être changés fréquemment ; cette question purement technique est sans incidence pour l'étude simplifiée qui est faite ici.

L'énergie est transportée par les câbles principaux et est adaptée par un double moufle, l'un pour le câble bâbord, l'autre pour le câble tribord. Le système de moufle est implanté sur un pont intermédiaire situé juste au-dessous du pont d'appontage. Un ensemble de poulies de renvoi, non complètement représenté, permet de passer du plan horizontal dans lequel se déplace le brin (plan parallèle au pont), au plan vertical dans lequel se trouvent les poulies du moufle (voir figure).

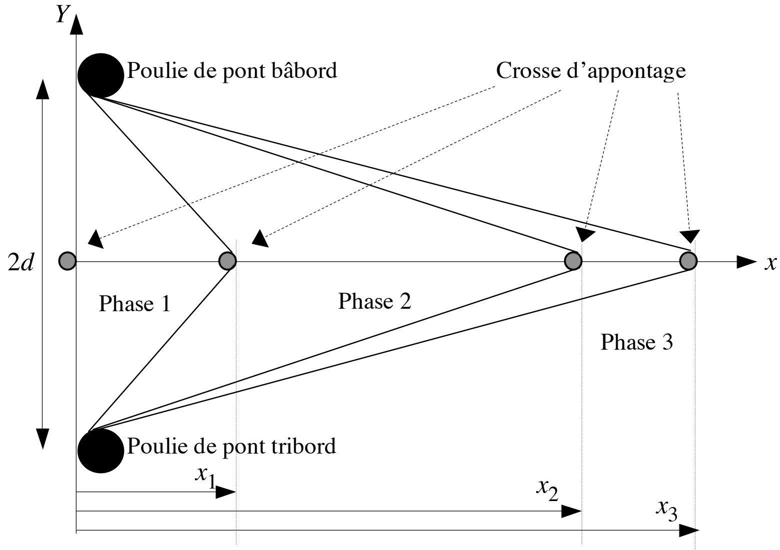


Le moufle est constitué par deux ensembles de poulies à axes fixes (à droite sur la figure), et deux ensembles de poulies à axes mobiles (à gauche sur la figure). Chacun de ces ensembles comporte un groupe de 9 poulies de diamètre d_b sur lesquelles s'enroule le câble bâbord (les poulies, liées à la presse de freinage mais à l'extérieur) et un groupe de n_p poulies de diamètre d_t (avec ici $n_p = 9$) sur lesquelles s'enroule le câble tribord (les poulies, liées à la presse de freinage mais à l'intérieur).

Remarque : Immédiatement après la traversée de pont, les câbles passent sur des amortisseurs dits « à poulie » dont le but est de lisser les surtensions et d'assurer les reprises de mous dus aux effets dynamiques résultant du choc de la crosse sur le brin. Malgré ces amortisseurs, des ondes longitudinales de tension se propagent le long des câbles. Pour les absorber on utilise des amortisseurs d'ancrage, aux extrémités des câbles. Ces deux dispositifs, décrits dans cette remarque, sont représentés sur la figure, mais ne seront pas étudiés ici.

Remarque : Le modèle qui suit est volontairement très simplifié pour éviter l'étude de comportements non linéaires qui nécessitent des techniques d'analyse numérique non envisageable dans cette épreuve.

Le freinage s'effectue en trois phases :



Positions du brin à chaque phase du mouvement de l'avion

Phase 1 : Elle suit immédiatement l'entrée en contact de la crosse avec le brin. Entre t = 0 et $t = t_1$. Très forts effets dynamiques, mais la presse est peu active, elle se met en vitesse sans augmentation notable de pression. L'avion est en x_1 = 25 m en fin de phase 1.

Phase 2 : Entre $t = t_1$ et $t = t_2$. La presse a une action prépondérante. La pression augmente fortement puis elle est maintenue sensiblement constante par la modification de la taille de l'ouverture de la vanne de laminage. À la fin de cette phase, la vitesse de l'avion est de l'ordre de 20 km.h^{-1}. Il est en x_2 = 88 m en fin de phase 2.

Phase 3 : Entre $t = t_2$ et $t = t_3$. La vitesse de l'avion est trop faible pour que la perte de charge dans la presse soit significative. Le pilote actionne les freins de l'avion pour finir de s'arrêter. Il est en x_3 = 92 m en fin de phase 3.

On suppose que l'appontage s'effectue parfaitement dans l'axe et au centre de la piste. Le fonctionnement est donc totalement symétrique pour les éléments bâbord et tribord. De plus, pendant l'appontage, le porte-avions est en translation rectiligne et uniforme par rapport au repère terrestre. Les vitesses de l'avion sont mesurées dans le référentiel lié au porte-avion. La position de l'avion est repérée par $x(t)$, mesuré à partir du point d'accrochage du brin, celle de la partie mobile de la presse par $y(t)$ mesurée par rapport à sa position initiale (donc $x = 0$ quand $y = 0$). La masse de l'équipage mobile de la presse est m_p = 12 tonnes. La section du piston est notée S_p. Le fluide dans la presse est un mélange « éthylène-glycol » en phase liquide supposé totalement incompressible. On donne d = 17,5 m. On néglige le moment d'inertie des poulies.

11) Déterminer la relation entre $x(t)$, $y(t)$, d et n_p (où y est ici la position de la presse). En déduire les positions y_1, y_2 et y_3 de la presse en fin de phase 1, 2 et 3.
12) Déterminer la relation qui lie la vitesse $V_p(t)$ de l'équipage mobile de la presse à la vitesse $v(t)$ et la position $x(t)$ de l'avion.
13) Déterminer la relation entre l'accélération $a(t)$ de l'avion, la tension $T(t)$ du câble (supposée identique en tout point du câble) et la position $x(t)$ de l'avion.
14) Le piston de la partie mobile de la presse à une surface S_p. La masse de l'équipage mobile est m_p. Déterminer la pression $P(t)$ dans la presse en fonction de m_p, $T(t)$ et $a_p(t)$ accélération de la partie mobile de la presse.

On mesure expérimentalement la vitesse de la presse au cours du temps. On donne également quelques valeurs de y pour faciliter les calculs. Les données numériques sont fournies dans le tableau ci-dessous (temps en seconde, V_p en m.s^{-1}, y en m) :

t	0,0	0,09	0,17	0,24	0,31	0,40	0,60	0,80	1,0	1,4	1,7	2,0	2,3	2,7	2,8	3,2	3,6	4,0
V_p	0,0	0,50	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,1	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0	0,50	0,39	0,13	0,05	0,0
y	0,0					0,40		1,4		2,6		3,6				4,2		

15) Représenter la vitesse en fonction du temps sur un graphe. Unités : abscisses 4 cm pour 1 seconde, ordonnées 2 cm pour 1 m.s^{-1}.
16) Avec les données sur la vitesse et les quelques valeurs fournies, évaluer le déplacement de la presse $y(t)$ en fonction du temps. On expliquera la méthode utilisée. Représenter le graphe, même échelle pour l'abscisse, ordonnées 1 cm pour 0,6 m.
17) Évaluer de même l'accélération de la presse. La représenter, même échelle pour les abscisses, 1 cm pour 1 m.s^{-2} en ordonnées.
18) À l'aide des graphes précédents, déterminer la date t_1 de la fin de la phase 1. En déduire la vitesse de l'avion à cette date.
19) En déduire l'accélération moyenne de l'avion pendant la phase 1.
20) Déterminer la date t_2 de la fin de la phase 2. Justifier que l'accélération de l'avion reste presque constante pendant cette phase. Calculer cette accélération. Commenter.
21) Pour maintenir l'accélération presque constante, il faut maintenir la pression dans la presse également presque constante. Pour cela, on modifie la taille de l'ouverture de la vanne de laminage pendant le ralentissement de l'avion. Dans quel sens est cette modification (ouverture ou fermeture) ? Justifier.
22) Pourquoi cherche-t-on à maintenir l'accélération la plus constante possible ?

La chaleur massique du mélange « éthylène-glycol » est c = 4,5 kJ.kg^{-1}.K^{-1}, sa masse volumique ρ = 900 kg.m^{-3} et sa température initiale 25°C. La section du piston de la presse est cylindrique de diamètre D_p = 400 mm.

23) Déterminer la section du piston de la presse et le volume total de fluide qui passe dans la vanne pendant l'appontage (pendant les trois phases).
24) Déterminer la variation totale d'énergie cinétique de l'avion au cours de l'appontage.
25) En supposant que la totalité de cette énergie cinétique est dissipée dans la vanne de laminage par énergie thermique cédée au fluide, déterminer la température moyenne qu'aurait le fluide après la vanne, en absence d'un dispositif de refroidissement.

En fait l'évolution de la température n'est pas régulière au cours du ralentissement de l'avion, et la cadence d'appontage empêche de laisser le fluide se refroidir entre chaque utilisation de la presse ; la température normale de fonctionnement du fluide dans la vanne est de 50°C, pouvant monter à l'extrême jusqu'à 70°C. Le refroidissement du fluide, pour le garder à une température de fonctionnement normal, est assuré par un échangeur thermique refroidi par une circulation d'eau de mer.

Le porte-avion doit pouvoir autoriser l'appontage de différents types d'avions, donc de masses très différentes. Il faut toujours que la distance de freinage soit la même. De plus, il doit permettre une cadence d'appontage importante, le système doit pouvoir être remis en place pour un nouvel appontage en moins de 2 minutes.

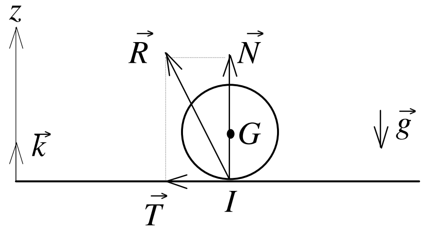
26) Comment doit être la pression dans la presse pour permettre l'appontage d'un avion beaucoup plus lourd que le rafale ? Quel réglage doit effectuer le chef de pont pour cet appontage ?

Après la vanne de laminage, le fluide passe dans un accumulateur oléopneumatique. En fait le fluide déplace un piston ce qui comprime l'air contenu dans un réservoir. La pression de l'air sur le piston augmente donc.

27) Pour quelle raison procède-t-on ainsi, plutôt que de laisser le fluide à la pression atmosphérique après la vanne ? En effet, cela réduit le différentiel de pression entre l'entrée et la sortie de la vanne, donc également l'énergie dissipée par viscosité dans celle-ci. À quoi peut servir cette pression accumulée ? *Indication : Pour répondre à cette question, analyser ce qu'il se passe dans le système quand la pression dans la presse baisse notablement à la fin de l'appontage, et donc devient plus faible que celle dans l'accumulateur.*

28) Comment règle-t-on l'ouverture de la vanne de laminage dans la phase de remise en fonction du système d'appontage ?

Annexe - Rappel des lois de Coulomb



La réaction du sol, sur le solide en contact en I, par exemple une roue de centre de gravité G, comme sur la figure, est $\vec{R}$. Cette réaction peut s'écrire sous la forme $\vec{R} = \vec{T} + \vec{N}$, où $\vec{N}$, composante normale de la réaction, est perpendiculaire au plan du sol, dirigée dans le sens $\vec{IG}$, et $\vec{T}$, composante tangentielle de la réaction, est contenue dans le plan du sol. T et N sont les normes algébriques des forces ; tant qu'il y a contact sur le sol $N > 0$. Le coefficient de frottement de la sphère sur le sol étant f, les lois de Coulomb indiquent que :

- En absence de glissement, donc quand la vitesse du point du solide en contact avec le sol (ici I) est la même que la vitesse du sol, $|T| < fN$;
- En cas de glissement (donc si la condition de non glissement précédente n'est pas remplie), $|T| = fN$ et $\vec{T}$ est opposée au sens du glissement.

En d'autres termes, il est impossible que la norme de T soit plus grande que fN ; quand il y a glissement, la composante tangentielle de la réaction s'oppose en direction et sens à la vitesse de glissement avec une norme égale à fN, et quand il n'y pas glissement sa norme reste inférieure à fN et sa direction permet d'éviter le glissement. Valable que le contact soit ponctuel, ou étendu sur la largeur de la roue.

*   *
*