

ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES,
 ECOLES NATIONALES SUPERIEURES DE L'AERONAUTIQUE ET DE L'ESPACE,
 DE TECHNIQUES AVANCEES, DES TELECOMMUNICATIONS,
 DES MINES DE PARIS, DES MINES DE SAINT ETIENNE, DES MINES DE NANCY,
 DES TELECOMMUNICATIONS DE BRETAGNE,
 ECOLE POLYTECHNIQUE (FILIERE T.S.I.),
 CONCOURS D'ADMISSION 2003
EPREUVE DE SCIENCES INDUSTRIELLES
FILIERE MP
 (Durée de l'épreuve : 3 heures)

Cet énoncé comporte 8 pages de texte numérotées de 1 à 8 et un dossier de présentation de 9 pages (un diagramme FAST et huit figures numérotées). Le travail doit être reporté sur le document réponse de 8 pages distribué avec l'énoncé. Pour valider ce document réponse, chaque candidat doit obligatoirement y inscrire à l'encre, à l'intérieur du rectangle d'anonymat situé en première page, ses nom, prénoms (souligner le prénom usuel), numéro d'inscription et signature, avant même de commencer l'épreuve. Il est conseillé de lire rapidement la totalité du sujet avant de commencer l'épreuve. Un seul document réponse est fourni au candidat. Le renouvellement de ce document en cours d'épreuve est interdit.

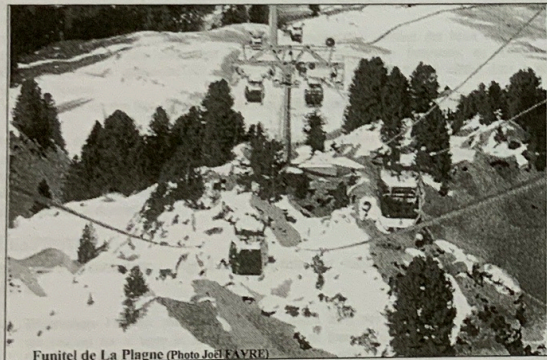
Les questions sont organisées suivant une progression logique caractéristique de la discipline. Toutefois les parties peuvent être abordées indépendamment les unes des autres.

La rédaction des réponses sera la plus concise possible : on évitera de trop long développements de calcul en laissant subsister les articulations du raisonnement (la taille des zones réservées aux réponses n'est pas représentative de la longueur des réponses attendues).

Si au cours de l'épreuve, le candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale sur sa copie et poursuit sa composition en notant et expliquant les raisons des initiatives qu'il est amené à prendre.

ETUDE D'UNE TELECABINE A STABILITE ACCRUE : LE FUNITEL

En cours de sujet les candidats seront amenés à faire des hypothèses et des approximations. Ces initiatives, attendues des candidats, font partie de la démarche de l'ingénieur et seront clairement indiquées sur la copie.



Funitel de La Plagne (Photo Joël FAYRE)

Une télécabine est un système de transport de personnes permettant un changement d'altitude important dans une zone d'accès difficile, généralement en montagne.

Le dossier de présentation de l'ensemble du dispositif sous forme d'une description fonctionnelle basée sur l'outil FAST structure la description du fonctionnement et des documents sur la télécabine Funitel. Un examen d'ensemble de ces documents est indispensable avant d'aborder le sujet. Cependant pour chaque question les documents nécessaires sont rappelés.

Le tableau ci-dessous précise les données caractéristiques de l'installation :

Extrait du cahier des charges		Autres caractéristiques techniques	
Nombre de cabines	21	Masse d'une cabine vide	$M_c = 2500 \text{ kg}$
Nombre maxi de cabines en montée	8	Surface latérale d'une cabine	$S_l = 10 \text{ m}^2$
Nombre maxi de cabines en descente	8	Surface frontale d'une cabine	$S_f = 7,1 \text{ m}^2$
Nombre maxi de passagers par cabine	26	Masse linéique du câble	$\mu = 8,47 \text{ kg/m}$
et masse des passagers	$M_p = 2080 \text{ kg}$	Nombre de pylônes	9
Vitesse nominale de défilement du câble (identique en tous points de la ligne)	$V = 7,2 \text{ m/s}$	Diamètre d'une poulie motrice :	$D_p = 4 \text{ m}$
Fréquence de rotation nominale du moteur d'entraînement	$N = 170 \text{ tr/min}$	Inertie* de l'ensemble de la motorisation ramenée sur l'axe des poulies motrices	$I_M = 575,10^3 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}$
Longueur de la ligne	$L = 1669 \text{ m}$		
Dénivelé	$h = 510 \text{ m}$		

Inertie* : Cette inertie tient compte de l'inertie du moteur et du réducteur et de deux volants d'inertie de diamètre 870 mm et d'épaisseur 200 mm.

Hypothèse : compte tenu des masses des éléments du système, l'inertie de l'ensemble des poulies est négligeable pour cette étude.

I - INTERÊT DE LA SOLUTION FUNITEL

Dans cette architecture particulière les cabines reposent sur deux brins de câble porteur et tracteur distants de 3,2m. On se propose de montrer l'intérêt de cette solution par rapport à la solution classique dans laquelle les cabines sont accrochées à un seul câble porteur et tracteur. Pour cela on va comparer le comportement des cabines vides de passagers arrêtées et soumises uniquement à l'effet d'un vent latéral.

L'action du vent sur la surface latérale d'une cabine est modélisable par une pression uniforme p :

$$p = 1/2 \rho V_a^2 \text{ avec } p \text{ en pascal}$$

$$\rho : \text{masse volumique de l'air} = 1,3 \text{ kg/m}^3,$$

$$V_a : \text{module de la vitesse relative de l'air par rapport à la cabine en m/s}$$

Compte tenu de la longueur des portées, la raideur en torsion d'un brin de câble est négligeable.

QUESTIONS

Document à consulter : Fig. 4 Cabine Funitel et document réponse

- Q-1 A partir du modèle donné sur la feuille réponse déterminer l'inclinaison γ d'une cabine « classique » à la position d'équilibre atteinte sous l'action d'un vent latéral constant de 30 m/s. (108 Kmh)
- Q-2 Sous l'action d'une rafale de vent (échelon de vent de 0 à 30 m/s) la position d'équilibre ci dessus ne sera atteinte qu'au bout d'un temps assez long compte tenu du très faible coefficient d'amortissement visqueux. En considérant cet amortissement visqueux nul, et à partir de la connaissance de la réponse d'un système du second ordre à une sollicitation en échelon, donner sans calculs en fonction de γ , défini en Q-1 l'amplitude maxi du mouvement d'oscillation d'une cabine classique soumise à une rafale de vent de 30 m/s.
- Q-3 Pour la cabine du FUNITEL (voir Fig. 4) et par rapport à une situation sans vent, déterminer aux appuis A et B sur les deux brins de câble, la variation des composantes verticales des actions des brins sur la cabine, due à un vent latéral de 30 m/s.

Compte tenu de la tension des brins de l'ordre de 300 000 N cette variation de charge n'entraîne pas de variation significative de flèche du câble, l'inclinaison de la cabine n'est donc pas affectée par un vent latéral.

II - EVALUATION DE LA PUISSANCE NECESSAIRE A L'INSTALLATION

Afin de procéder à une évaluation de la puissance nécessaire à l'entraînement du câble, on prend comme modèle une ligne rectiligne supportée par 9 pylônes (voir Fig. 1 Ligne totale). Le guidage des brins de câble est réalisé par des palonniers à galets fixés sur les pylônes pour lesquels le contact peut être modélisé par un roulement avec frottement sec de coefficient de frottement $f = 0.03$.

Cette donnée, associée à un calcul numérique des actions de contact des brins de câble sur les palonniers, a permis une estimation à 400 KW des pertes par frottement au niveau de ces palonniers (puissance galiléenne des actions des palonniers sur les brins de câble) dans la situation étudiée ci dessous.

L'action du vent sur une face d'une cabine est négligeable conformément à la question I.

On étudie la situation suivante (qui correspond au cas le plus défavorable) :

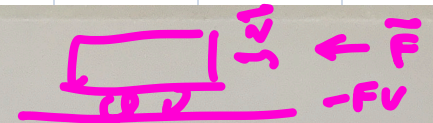
Redémarrage de l'installation après un incident avec une accélération de 0.15m/s². On se place à l'instant où la vitesse de 7.2m/s va être atteinte, 8 cabines chargées de passagers sont en montée, 8 cabines vides sont en descente et un vent de vitesse $V_e = 30$ m/s souffle parallèlement à la ligne dans le sens de la descente.

QUESTIONS

Documents à consulter : Fig. 1 Ligne totale et tableau des caractéristiques de la page 2

- Q-4 Déterminer l'énergie cinétique galiléenne, notée E_{CT} , des 4 brins de câble, de l'ensemble des cabines sur la ligne et de la motorisation, en fonction de M_c , M_p , μ , L , V , D_p et k_A . L'application numérique donne : $E_{CT} = 6.7 \cdot 10^6$ J soit $E_{CT} = 1.3 \cdot 10^5$ V² en fonction de la vitesse du vent, pour la situation étudiée en négligeant la longueur de câble dans les gares.

MP

Page 3
Tourner la page S.V.P.

- Q-5 Déterminer la puissance galiléenne des actions de pesanteur sur l'installation en fonction de M_p , V , h , g et L . L'application numérique donne $P_p = -3.6 \cdot 10^5$ W pour la situation étudiée.

- Q-6 Après avoir évalué la vitesse relative et l'action du vent sur une cabine en montée et une cabine en descente, déterminer la puissance galiléenne des actions du vent sur l'ensemble des cabines en fonction de ρ , S_f , V , V_e et $\alpha = \arcsin(h/L)$. L'application numérique donne $P_v = -2.2 \cdot 10^5$ W pour la situation étudiée.

- Q-7 En déduire une estimation de la puissance galiléenne nécessaire pour l'entraînement de la ligne entre les gares dans la situation étudiée. La puissance effectivement installée par le constructeur est de 1560 kW, commentez vos résultats par rapport à cette valeur.

III - ETUDE DE LA SORTIE DE GARE D'UNE CABINE

Sur la ligne, les cabines se déplacent à $V = 7.2$ m/s. En gare, pour permettre l'embarquement et le débarquement des passagers, la vitesse maximum de la cabine doit être de $v_0 = 0.3$ m/s.

Lors de leur circulation en gare les cabines sont donc libérées des brins de câble, supportées et guidées par 4 galets sur deux rails parallèles. Elles sont entraînées par des trains de pneus constitués de roues de 400 mm de diamètre, d'axe fixe, qui roulent sur un patin lié à la suspente articulée de la cabine. Voir photo Fig. 3 : Photo Gare et dessin Fig. 4 : Cabine et le document Fig. 7 : Zone de lancement

La circulation des cabines en gare se fait en plusieurs secteurs selon un trajet en U. voir dessin Fig. 2 : schéma Gare.

Dans une première analyse on envisagera une accélération constante des cabines de $a = 1.3$ m/s².

La zone rectiligne de lancement (secteur F) comporte 45 roues pneumatiques. Les roues du train de pneus sont reliées cinématiquement par des poulies-courroies qui assurent des rapports de réduction « k_i » entre deux roues successives (voir dessin Fig. 7a : lanceur)

L'entraînement de la roue la plus rapide (celle située en sortie de gare, roue n°45) est réalisé par la « poulie de guidage-déviator » du brin de câble en sortie de gare, à travers une chaîne cinématique (voir Fig. 3 : Photo Gare et Fig. 1 Ligne totale).

Cette chaîne cinématique est constituée d'un mécanisme poulie-courroie et d'un multiplicateur de vitesse dont l'arbre d'entrée est directement entraîné par l'axe de la poulie de guidage-déviator. Cette poulie a un diamètre de 4m. On notera K le rapport de multiplication de cette chaîne cinématique : $K = \omega_{roue\ rapide} / \omega_{poulie\ de\ guidage\ déviator}$

La zone de freinage (secteur A) est symétrique de la zone de lancement.

QUESTIONS

Document à consulter : Fig. 2 : schéma Gare, Fig. 3 : Photo Gare, Fig. 4 Cabine et document, Fig. 7 : Zone de lancement.

- Q-8 Quelle est alors la durée t de la phase d'accélération? Exprimer la longueur « x » (en mètre) de la zone rectiligne en fonction de a , v_0 , t et V . Pour que l'accélération de 1.3m/s² permette le lancement des cabines de $v_0 = 0.3$ m/s à $V = 7.2$ m/s, l'application numérique donne environ : $x = 20$ m.

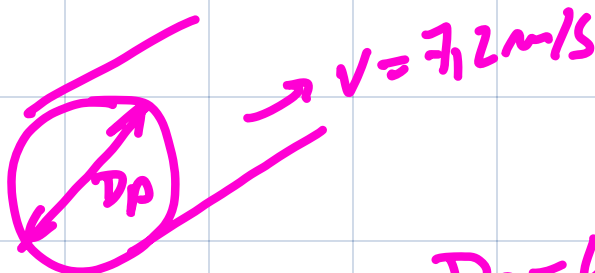
MP

Page 4
Tourner la page S.V.P.

$$E_{CT} = \frac{1}{2} \left[16 \pi_c + 8 \pi_p + 4 \mu L \right] v^2 \leftarrow (7.2 \text{ m/s})^2 = 6.7 \cdot 10^6 \text{ J?}$$

$$\frac{1}{2} (I_m) \omega_m^2 \leftarrow$$

$$m_T = 16 \pi_c + 8 \pi_p + 4 \mu L \approx 113 \text{ t} \leftarrow$$



$$D_p = 4 \text{ m}$$

$$V = \frac{D_p}{2} \omega_m$$

$$\omega_m = \frac{2V}{D_p} = \frac{2V}{4} = \frac{V}{2}$$

$$\omega = 3.6 \text{ rad/s}$$

Nombre de cabines : 21
 Nombre maximum de cabines en montée : 8
 Nombre maximum de cabines en descente : 8

 Dénivelé $h = 510 \text{ m}$
 Longueur de la ligne $L = 1669 \text{ m}$

 $\vec{g} = g \cdot \vec{z}$
 vitesse de défilement du câble : $\vec{V} = \pm V \cdot \vec{i}$

 $(\vec{y}, \vec{i}) = (\vec{z}, \vec{j}) = 17^\circ 8' = \alpha$

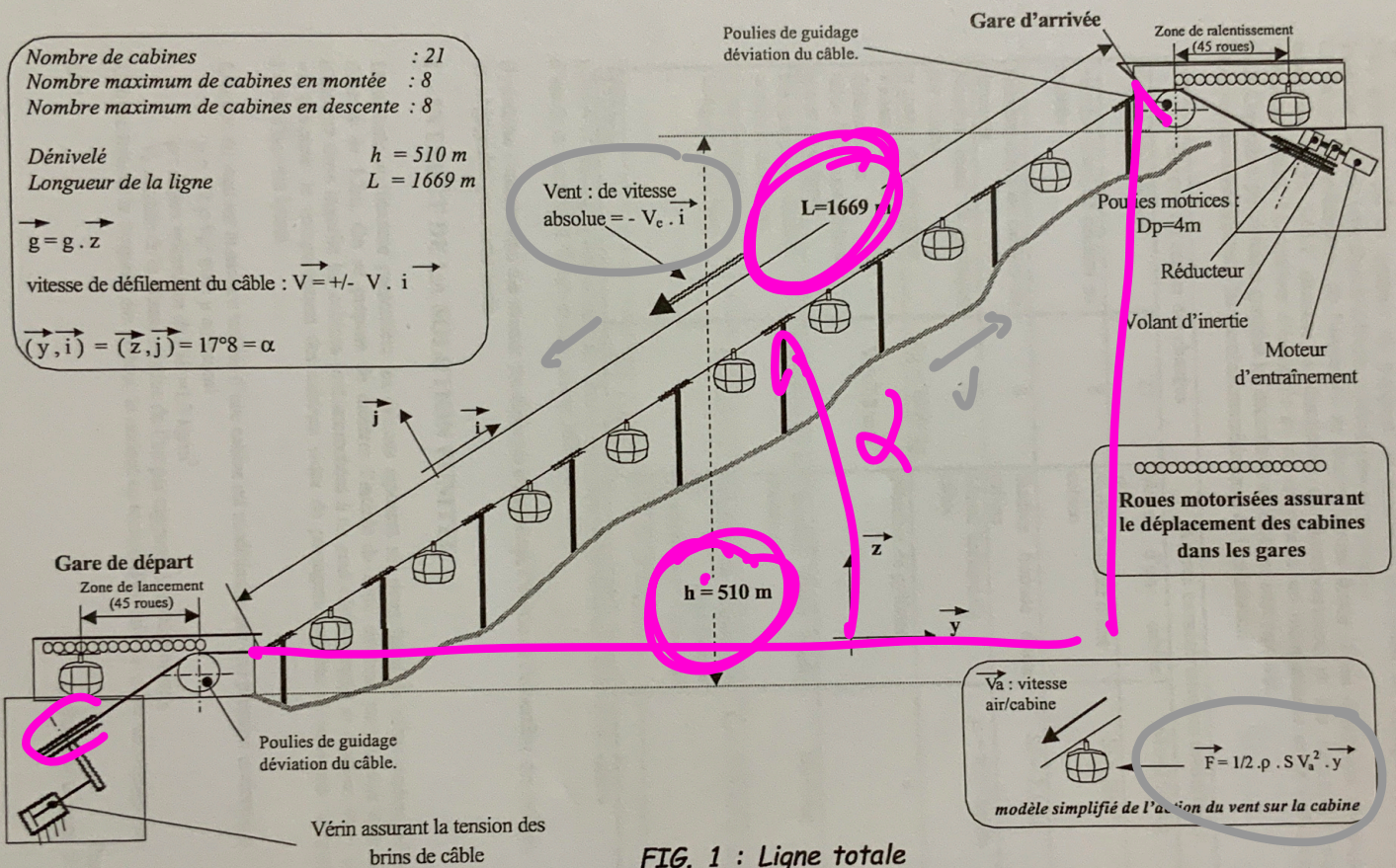
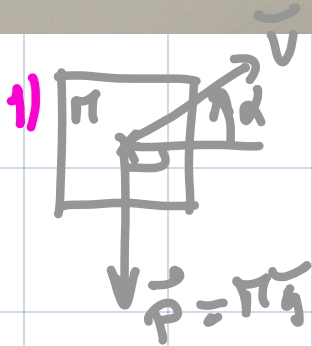
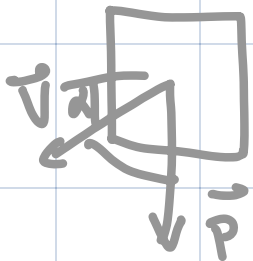
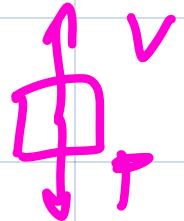


FIG. 1 : Ligne totale



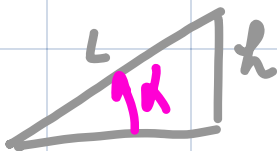
$$\begin{aligned}
 \vec{p} \cdot \vec{v} &= p v \cos(\alpha + \frac{\pi}{2}) \\
 &= -p v \sin \alpha
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 \vec{p} \cdot \vec{v} &= p v \cos(\frac{\pi}{2} - \alpha) \\
 &= p v \sin \alpha > 0
 \end{aligned}$$

$$(8\pi c g v \sin \alpha - 8\pi c g v \sin \alpha)$$

$$\begin{aligned}
 P(p \rightarrow \varepsilon / p_s) &= -8\pi p g v \sin \alpha \\
 &= 8\pi p g v \frac{h}{L}
 \end{aligned}$$



$$9090 \quad 10 \quad 7,2$$

$$\frac{1669}{510}$$

Q-6 Puissance galiléenne de l'action du vent sur les cabines

On suppose que les surfaces frontales des cabines sont dans le plan (z,x) et que l'action du vent peut être modélisée par un vecteur $\vec{s}$ s'exerçant au centre G_{sf} de la surface de la cabine.

8 cabines montantes :

$$P(\text{vent} \rightarrow \text{cabines}) = 8 \left\{ -\frac{1}{2} \rho S_f V_{a_m}^2 \vec{y} \right\}_{G_{sf}} \otimes \left\{ \begin{matrix} \vec{0} \\ V_i \end{matrix} \right\}_{G_{sf}} = -4 \rho S_f V_{a_m}^2 V \cos \alpha$$

8 cabines descendantes :

$$P(\text{vent} \rightarrow \text{cabines}) = 8 \left\{ -\frac{1}{2} \rho S_f V_{a_d}^2 \vec{y} \right\}_{G_{sf}} \otimes \left\{ \begin{matrix} \vec{0} \\ -V_i \end{matrix} \right\}_{G_{sf}} = 4 \rho S_f V_{a_d}^2 V \cos \alpha$$

$$\text{Au total : } P(\text{vent} \rightarrow \text{cabines}) = 4 \rho S_f (V_{a_d}^2 - V_{a_m}^2) V \cos \alpha$$

Expression de la vitesse V_a

$$\vec{V}_a = \vec{V}(G_{sf}, \text{vent} / \text{cabine}) = \vec{V}(G_{sf}, \text{vent} / 0) - \vec{V}(G_{sf}, \text{cabine} / 0)$$

$$\text{donc } \vec{V}_{a_m} = -\vec{V}_e - \vec{V} = -(V_e + V)\vec{i} \text{ et } \vec{V}_{a_d} = -\vec{V}_e - (-\vec{V}) = (V - V_e)\vec{i}$$

$$\text{Finalement : } P_v = 4 \rho S_f (-4 V V_e) V \cos \alpha = -16 \rho S_f V_e V^2 \cos \alpha$$

Avec les valeurs numériques on obtient $P_v = -218686 \text{ (W)}$. On adopte $P_v = -2.2 \cdot 10^5 \text{ (W)}$

$$T.E.C. \dot{a} \Sigma$$

$$\frac{dE_C(\varepsilon/R_s)}{dt} = \underbrace{P_{ext}(\varepsilon/R_s)}_{P_p + P_v} + \underbrace{P_{int}(\varepsilon)}_{P_m + P_{frot}}$$

$$E_C(\varepsilon/R_s) = \frac{1}{2} m_{eq}(\varepsilon) V^2$$

$$m_{eq}(\varepsilon) V \dot{V} = P_p + P_v + P_m + P_{frot}$$

$$\left[\eta P_m - (1-\eta) P_m \right] \text{ pertes}$$

400 kW

$$\Rightarrow P_m = \underbrace{m_{cy}(\varepsilon) \dot{V} \dot{V}}_{+12} - \underbrace{P_p}_{+12} - \underbrace{P_v}_{+12} - \underbrace{P_{rot}}_{+12}$$

→ A.N. $P_m = \underline{\underline{1,1 \text{ MW}}} < 1,56 \text{ MW}$

$\dot{V} = 0,15 \text{ m}^3/\text{s}$
 $v = 7,2 \text{ m/s}$

$$= 118 \cdot 10^3 \times 7,2 \times 0,15 + 3,6 \cdot 10^5 + 212 \cdot 10^5 + 400 \cdot 10^3$$

$$1,56 \text{ MW} \rightarrow 2000 \text{ cv}$$

$$1 \text{ cv} = 736 \text{ W}$$
