

TD : Énergétique

Étude d'une télécabine à stabilité accrue : le funitel¹

Compétences travaillées : En dynamique :

- Déterminer l'énergie cinétique d'un solide ou ensemble de solides.
- Déterminer la puissance d'une action mécanique.
- Appliquer le théorème de l'énergie cinétique à un solide ou ensemble de solides.
- Choisir une méthode adaptée (PFD ou énergétique) pour résoudre un problème.

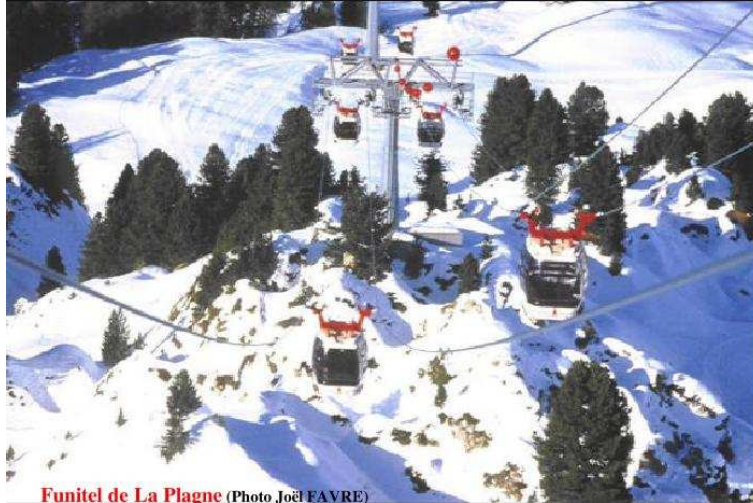


FIGURE 1 – Funitel de la Plagne.

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 tableau 1 précise les données caractéristiques de l'installation.

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

1 Intérêt de la solution funitel

1.1 Solution à 2 câbles parallèles

Dans cette architecture particulière, les cabines reposent sur deux brins de câble porteurs et tracteurs distants de 3.2 m .

Cette solution est plus complexe à réaliser car les deux câbles doivent être motorisés ensemble pour être parfaitement synchrones.

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 : $p = \frac{1}{2}\rho V_a^2$ avec p en pascal.

- ρ : masse volumique de l'air $\rho = 1.3\text{ kg/m}^3$,
- V_a module de la vitesse relative de l'air par rapport à la cabine en m/s .

1. Adapté du sujet MP du concours Mines-Ponts 2003.

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 et masse des passagers	26 $M_p = 2080 \text{ kg}$	Masse linéique du câble	$\mu = 8,47 \text{ kg/m}$
Vitesse nominale de défilement du câble (identique en tous points de la ligne)	$V = 7,2 \text{ m/s}$	Nombre de pylônes	9
Fréquence de rotation nominale du moteur d'entraînement	$N = 1700 \text{ tr/min}$	Diamètre d'une poulie motrice :	$D_P = 4 \text{ m}$
Longueur de la ligne	$L = 1669 \text{ m}$	Inertie* de l'ensemble de la motorisation ramenée sur l'axe des poulies motrices	$I_M = 575.103 \text{ m}^2.kg$
Dénivelé	$h = 510 \text{ m}$		

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

TABLE 1 – Extrait du CdCF.

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

Document à consulter : Cabine du Funitel figure 6 et document réponse figure 4

Q 1 : À 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 Km/h)

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. 6) 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, ce qui permet de maintenir le fonctionnement du Funitel par vent important, lorsqu'un télécabine classique ne pourrait plus fonctionner.

1.2 Solution multi-cabines

Un téléphérique classique dispose d'un câble porteur très fortement tendu (fixe) et d'un câble tracteur (mobile) faiblement tendu. 2 cabines font les allers-retours du point bas au

point haut.

L'avantage du Funitel est d'imposer une tension des câbles beaucoup plus faible car les cabines sont réparties sur l'ensemble de la ligne, ce qui permet d'utiliser le câble tracteur comme câble porteur.

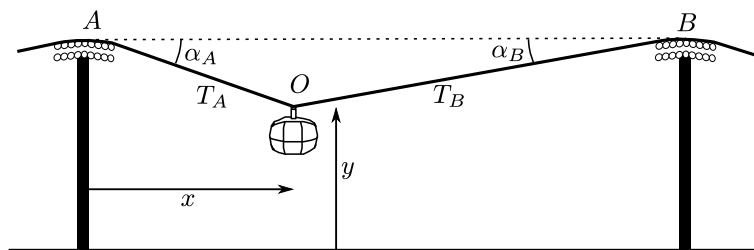


FIGURE 2 – .

Q 4 : Montrer sur la figure 2 que le câble est d'autant moins tendu que les cabines descendent entre les pylônes. La conception du Funitel fait donc apparaître un compromis entre tension du câble et hauteur des pylônes.

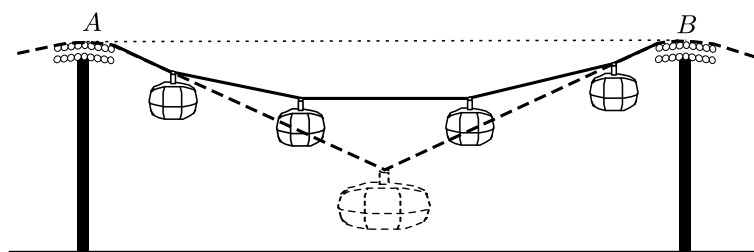


FIGURE 3 – .

Q 5 : La figure 3 montre la forme du câble entre deux pylônes éloignés, pour une même tension maximale du câble, lorsque la même charge est localisée dans une seule cabine ou 4 cabines. Justifier que dans les deux cas, la tension du câble est la même. Quel est l'avantage de la solution multi-cabines ? Expliquez le compromis tension du câble / nombre de cabines, puis tension du câble / nombre de pylônes.

2 Évaluation de la puissance nécessaire à l'installation

2.1 Approche locale

Pour évaluer la puissance nécessaire à l'entraînement du câble, on envisage dans un premier temps de calculer la puissance résistante du poids pour une portion de câble entre deux pylônes.

L'objectif de cette partie est de montrer la complexité d'une approche locale pour ce calcul. On considère le cas simplifié d'une seule cabine entre deux pylônes sans dénivelé (figure 2). Le problème est supposé quasi-statique. La tension du câble est supposée quasi-constante et on note D la distance entre les pylônes.

Q 6 : Déterminer y en fonction de x . vous pourrez faire les approximations raisonnables qui vous semblent nécessaires et vous préciserez dans quelle mesure T_A et T_B peuvent être considérées égales.

Q 7 : Si le Funitel avance à vitesse constante V , déterminer la puissance du poids sur la cabine en fonction de x .

Q 8 : Expliquez pourquoi il est très compliqué de généraliser au cas réel cette méthode pour déterminer la puissance fournie par le moteur.

2.2 Approche globale : 1er niveau d'approximation

On préfère à l'approche locale une approche globale, en considérant le travail à fournir pour 1 tour de câble, ce qui permet de déterminer la puissance moyenne à fournir par le moteur.

Dans un premier niveau d'approximation (très simple), on souhaite dimensionner le moteur à partir d'un calcul en régime permanent, sous les hypothèses apportant un maximum de simplifications (sans toutefois dénaturer le calcul), puis en adoptant un coefficient de sécurité raisonnable au vu des hypothèses.

Q 9 : Proposer une estimation de la puissance motrice en précisant les théorèmes utilisés et les hypothèses effectuées.

Q 10 : Le tableau 2 indique quelques exemples de coefficients de sécurité adoptés en fonction de la précision des calculs de dimensionnement et de la criticité de l'application. Proposer le coefficient de sécurité qui vous semble raisonnable dans ce cas et en déduire la puissance du moteur à installer.

Coefficient de sécurité s	Charges exercées sur la structure	Observations
$1 < s < 2$	régulières et connues	fonctionnement constant sans à-coups
$2 < s < 3$	régulières et assez bien connues	fonctionnement usuel avec légers chocs et surcharges modérées
$3 < s < 4$	mal connues ou incertaines	fonctionnement usuel avec légers chocs et surcharges modérées

Exemple :

- pour les appareils de levage industriels (manipulation par un opérateur professionnel, formé et sensibilisé) : $s = 1,5$;
- matériel routier : $s = 3$;
- ascenseur (transport du public) : $s = 10$.

TABLE 2 – Extrait du CdCF.

2.3 Approche globale : 2ème niveau d'approximation

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. 5 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 appui 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 modélisable conformément au paragraphe 1.1.

On étudie la situation suivante (qui correspond au cas le plus défavorable) : Redémarrage de l'installation après un incident avec une accélération de 0.15 m/s^2 . On se place à l'instant où la vitesse de 7.2 m/s va être atteinte, 8 cabines chargées de passagers

sont en montée, 8 cabines vides sont en descente et un vent de vitesse $V_e = 30 \text{ m/s}$ souffle parallèlement à la ligne dans le sens de la descente.

Documents à consulter : Fig. 5 Ligne totale et tableau 1 des caractéristiques.

Q 11 : 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 , m , L , V , D_P et I_M . L'application numérique donne : $E_{cT} = 6.7 \times 10^6 \text{ J}$ soit $E_{cT} = 1,3 \times 10^5 \text{ V}^2$ en fonction de la vitesse du vent, pour la situation étudiée en négligeant la longueur de câble dans les gares.

Q 12 : Dédire de la question précédente l'inertie équivalente rapportée à l'arbre moteur.

Q 13 : 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 $P_p = -3.6 \times 10^5 \text{ W}$ pour la situation étudiée.

Q 14 : 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 S_f , V , V_e et $\alpha = \arcsin(h/L)$. L'application numérique donne : $P_v = -2.2 \times 10^5 \text{ W}$ pour la situation étudiée.

Q 15 : 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.

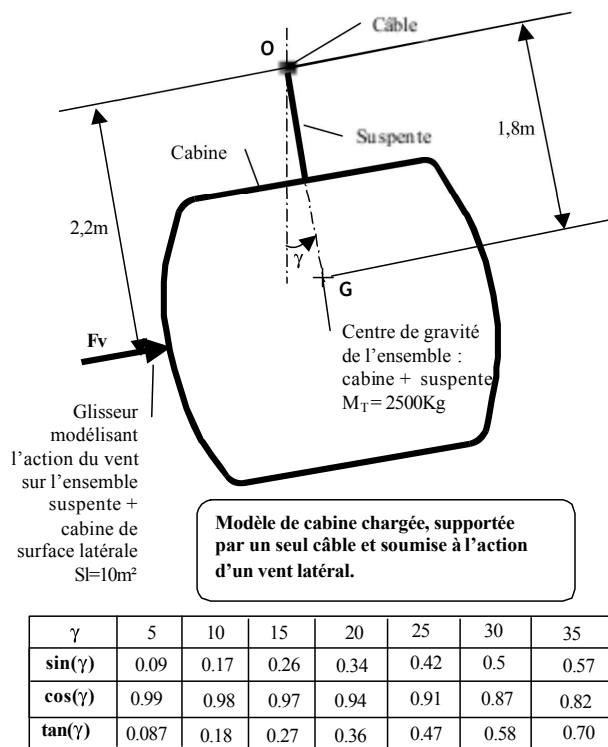


FIGURE 4 – Paramétrage pour une cabine.

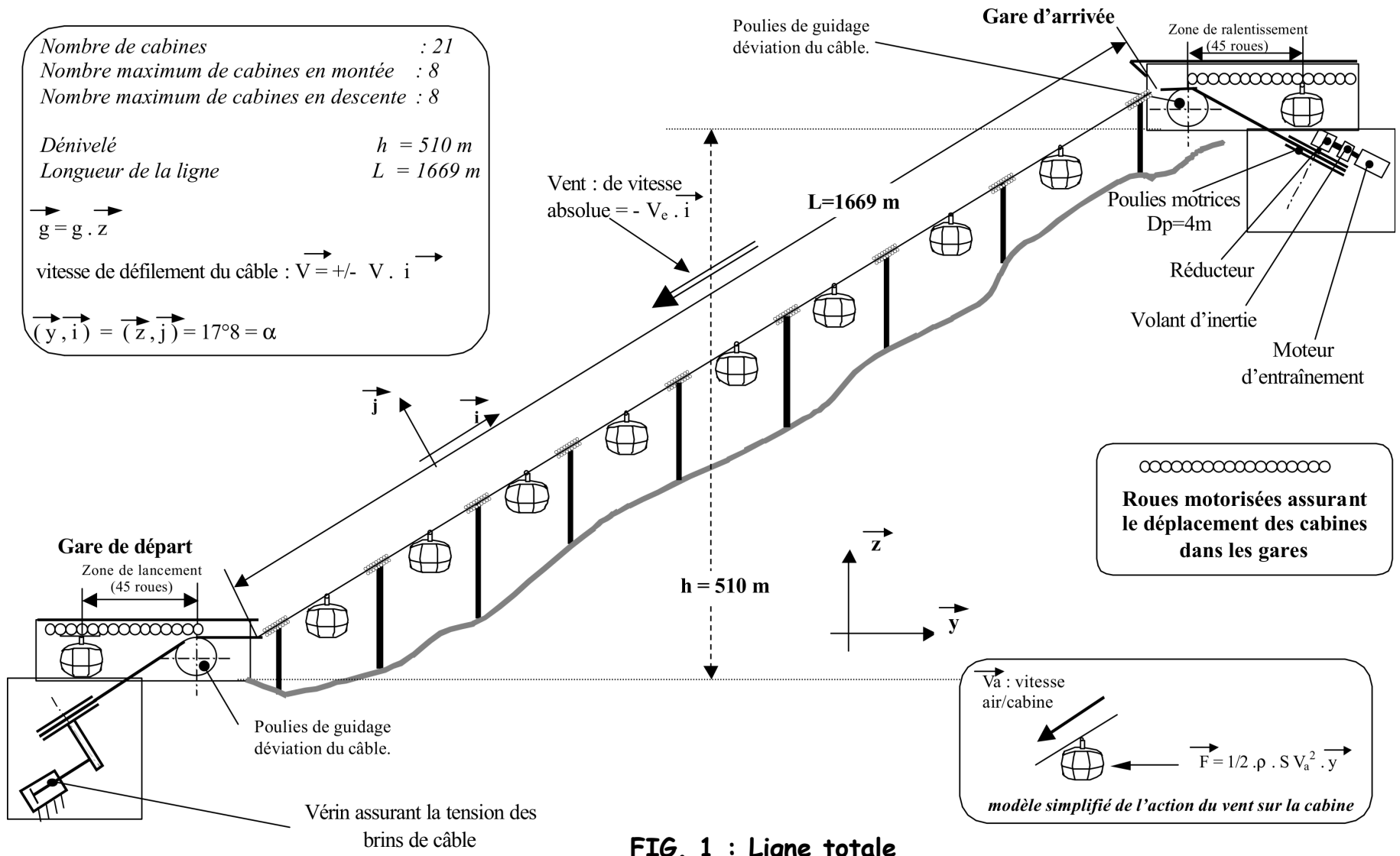
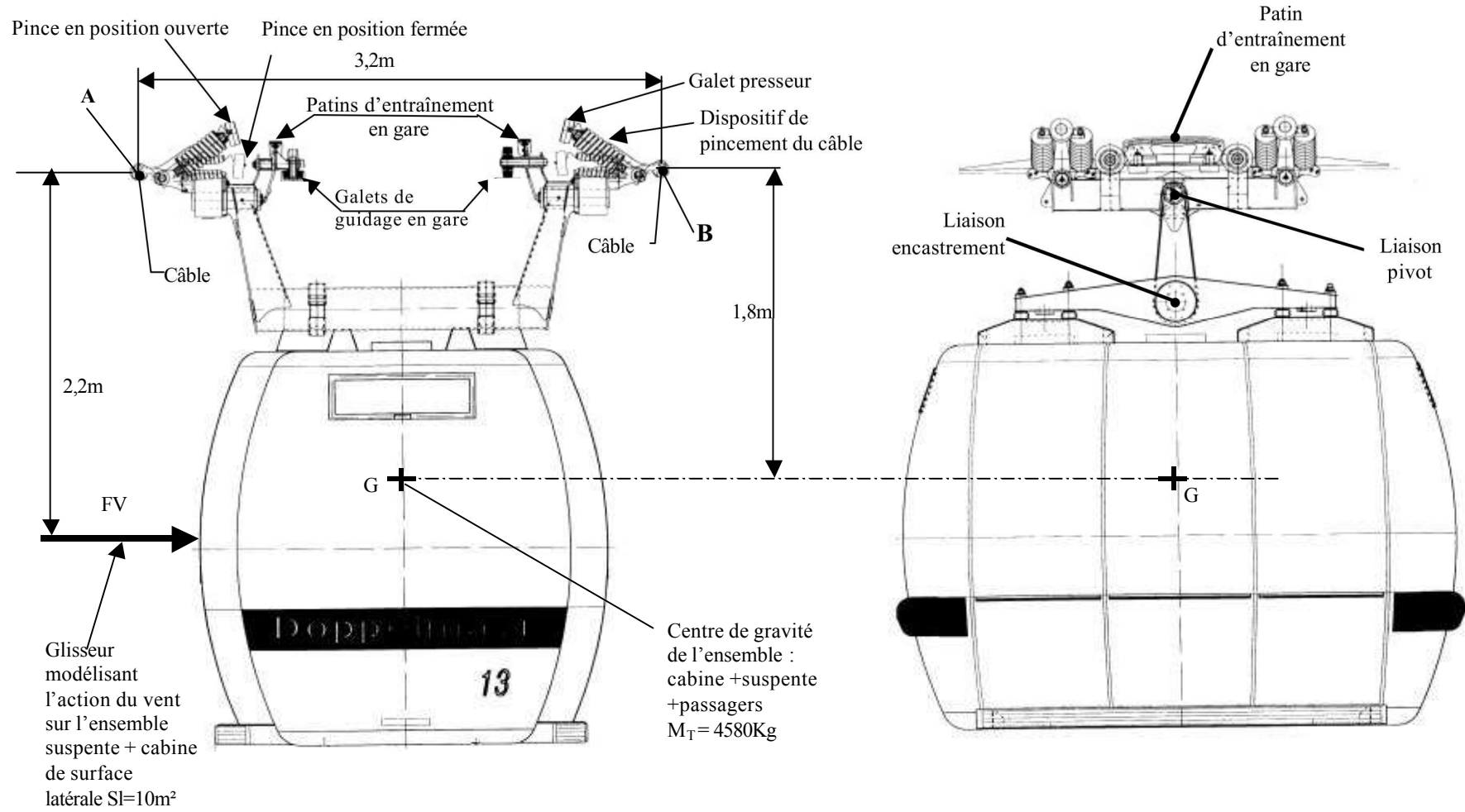


FIG. 1 : Ligne totale

FIGURE 5 – Ligne totale.

FIGURE 6 – Cabine du Funitel.



Fonctionnement du dispositif de pincement du câble : lors de l'entrée / sortie des cabines des gares, une rampe vient agir sur les galets presseurs, provoquant l'ouverture des pinces nécessaire à la libération ou la préhension des brins de câble. Sur le dessin ci dessus les galets presseurs sont représentés dans les deux positions correspondant aux pinces ouvertes et fermées. Les ressorts assurent l'effort de serrage des pinces.

Fig. 4 : Cabine du Funitel