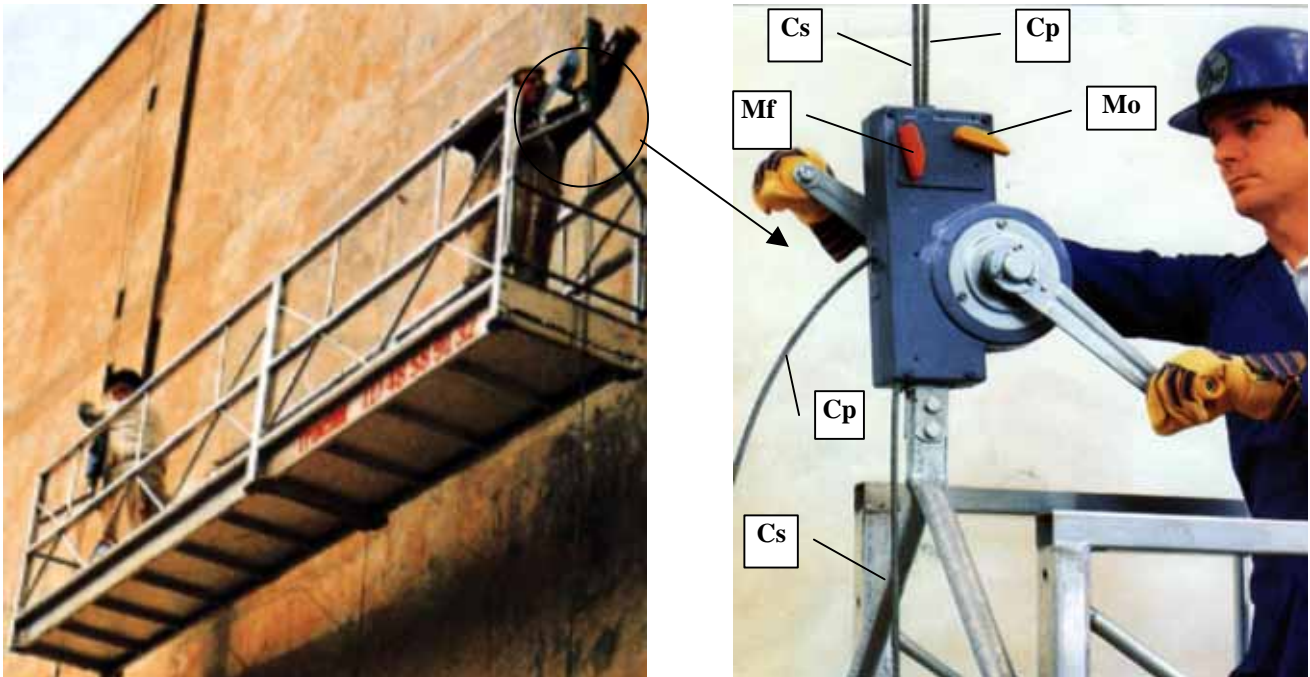


I - MISE EN SITUATION

Le système mécanique étudié appartient au domaine des « appareils de levage ».

Utilisé seul ou en duo, il permet à un (ou deux) opérateur(s) de hisser manuellement une sellette, une nacelle ou une passerelle de travail le long d'une façade d'immeuble.



Cp – Câble porteur

Cs – Câble de sécurité

Mo – Manette d'ouverture des mâchoires

Mf – Manette de fermeture des mâchoires

II - PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Le SCAFOR est un treuil manuel d'échafaudage à câble passant, ce qui implique qu'il n'y a aucun stockage interne de câble (sur un tambour par exemple). La hauteur de travail est donc illimitée.

Comme le montre la photo ci-dessus, le câble porteur Cp est doublé par un câble de sécurité Cs destiné à éviter la chute des passerelles en cas de défaillance du câble porteur ou du mécanisme d'entraînement.

II.1 - MISE EN PLACE DES CÂBLES

Le **câble porteur Cp** est introduit par l'opérateur dans l'orifice prévu à cet effet sur la partie supérieure du carter. La poussée continue sur le câble, associée à la rotation de la manivelle, engendre l'enroulement de ce dernier sur la poulie à gorge et sa sortie sur la face inférieure du treuil.

Le **câble de sécurité Cs** est ensuite mis en place dans le deuxième orifice, après avoir provoqué l'ouverture des mâchoires de sécurité par action sur la manette jaune Mo.

II.2 - MONTÉE – DESCENTE DES NACELLES

La montée est simplement obtenue par la rotation des deux manivelles.

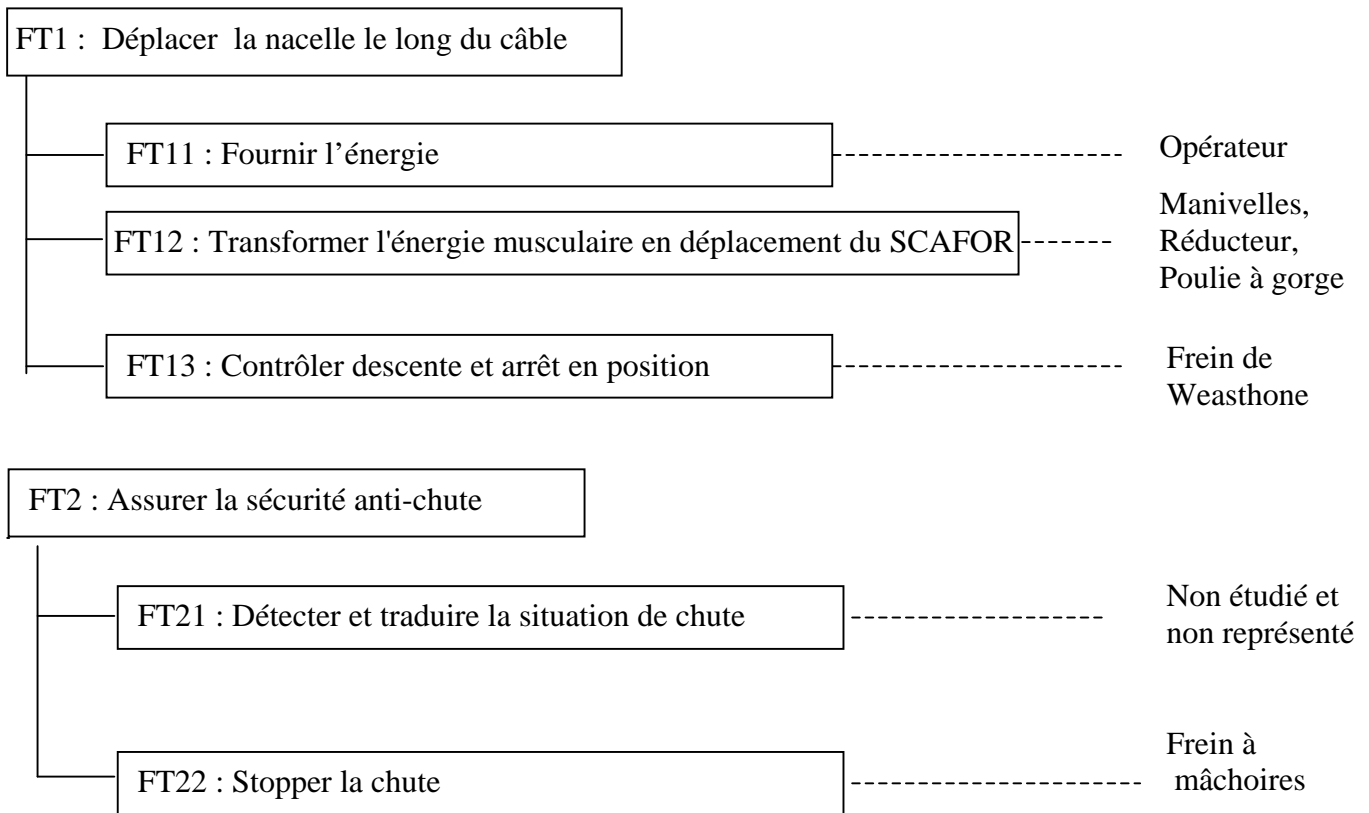
La descente est obtenue par la rotation inverse des mêmes manivelles.

II.3 - SÉCURITÉ

Le principe de la sécurité repose sur la fermeture de mâchoires sur le câble de sécurité provoquée à partir de la détection de la chute libre par des dispositifs entièrement mécaniques.

III - ANALYSE FONCTIONNELLE DU PRODUIT EXISTANT

(Voir également le document DR1)



IV - CARACTERISATION DES FONCTIONS

FONCTION TECHNIQUE		CRITÈRE	NIVEAU
FT1		Distance Diamètre des câbles	Illimitée 8,4 mm
	FT11	Vitesse relative maximale SCAFOR-Câble Accélération au démarrage Charge nominale « Q » pour un Scafor	0,3 m/s Passage de 0 à 0,3 m/s en 1 s 4000 N
	FT12	Nombre de cycles montée/descente du Scafor Avance du câble par tour de manivelle.	50000 cycles sur 1 mètre 75 mm
FT2	FT22	Distance d'arrêt	10 cm à partir de la vitesse maximale admise en situation de chute qui est de 0.5 m/s.

V - LA RÉFLEXION DU BUREAU D'ÉTUDES ET LA PROBLÉMATIQUE DE RECONCEPTION

V.1 - L'ENQUÊTE DE SATISFACTION ET LE BESOIN DE RECONCEPTION

Cet appareil, présent depuis longtemps sur le marché des engins de levage, donne toute satisfaction au plan technique. Mais, face à la concurrence, le constructeur décide de reprendre l'étude du produit à partir d'une enquête de satisfaction et d'une réflexion s'articulant autour de deux pôles :

- **La possibilité, de rendre le produit plus confortable :**

Le SCAFOR n'existe pour l'instant qu'en version manuelle. Les immeubles devenant de plus en plus hauts (une vingtaine d'étages et environ une soixantaine de mètres en moyenne), il devient long et fastidieux pour les opérateurs de hisser la nacelle manuellement.

L'enquête menée auprès des utilisateurs met en évidence le besoin d'assister l'opérateur à l'aide d'un moteur électrique.

- **L'abaissement des coûts de production :**

Une analyse de la valeur a été menée. Il est bien évident, que pour des raisons de confidentialité, il ne sera fait ici état que de conclusions partielles à savoir :

Une étude de reconception doit être menée pour les fonctions techniques :

- | | | |
|---|------|---------------------------------|
| - Fournir l'énergie : | FT11 | } (partie A du travail demandé) |
| - Transformer l'énergie musculaire : | FT12 | |
| - Contrôler descente et arrêt en position : | FT13 | |
| - Stopper la chute : | FT22 | (partie B du travail demandé) |

V.2 - STRATÉGIE DE RECONCEPTION

Des études d'abaissement des coûts ont été menées avec succès sur des produits de la gamme « levage » et constituent une base de données et une base de familles de solutions transposables, a priori, au SCAFOR. En s'appuyant sur cette culture d'entreprise, le constructeur désire étudier la possibilité de remplacer l'ensemble des pignons usinés dans la masse, par des pignons en tôle découpée.

C'est dans cette stratégie que s'inscrivent les calculs, réflexions et conclusions recensés ci-dessous :

- **quantifier les possibilités de l'appareil actuel**, notamment au regard de certains de ses constituants sollicités en traction de charge et en sécurité ;
- définir les modifications minimales à apporter à la structure actuelle du SCAFOR permettant **l'adoption du nouveau mode d'obtention des pignons** ;
- **définir certaines caractéristiques de choix du moteur** ;
- **quantifier les efforts** sur le frein de sécurité afin d'en optimiser la forme et de valider un nouveau mode d'obtention pour les pièces qui le constituent.

Le produit reconçu respectera, bien évidemment, les normes concernant la résistance des éléments de levage de personnes et la vitesse de défilement des câbles.

PARTIE A**ÉTUDE RELATIVE A LA FONCTION FT1****OBJECTIFS :**

Concernant FT12 : Recherche d'une configuration de l'engrenage (intervenant dans le guidage en rotation de la poulie dentée et dans la transmission de l'énergie) minimisant les efforts sur la denture. Cette diminution du niveau d'effort, permettra d'envisager un mode d'obtention des éléments dentés par découpage de tôle.

Concernant FT11 : Définir certaines caractéristiques du moteur optionnel.

Données, paramétrage, notations : voir les documents ressources DR2 à DR7

A1 - ÉTUDE DES PERFORMANCES ACTUELLES DE L'ENTRAÎNEUR DU SCAFOR

Question 1 : Établir, dans le cadre A du document-réponse 1, le schéma cinématique minimal des parties du mécanisme global relatives aux fonctions :

- FT12 : Transformer l'énergie musculaire en déplacement du SCAFOR
- FT13 : Contrôler descente et arrêt en position

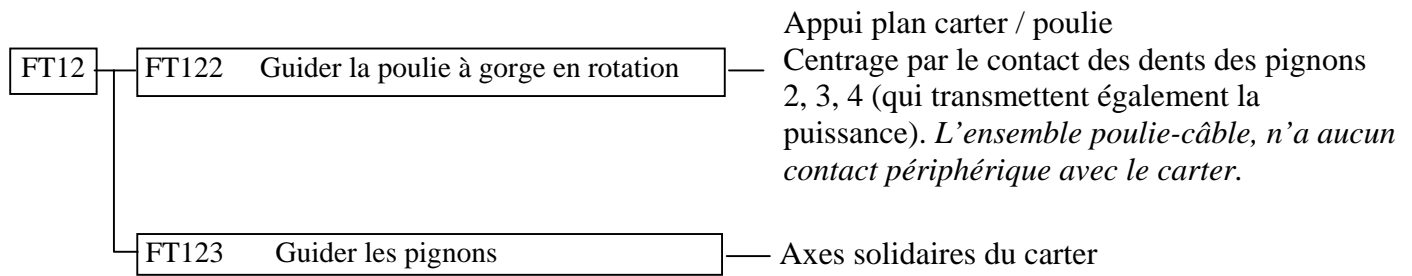
Question 2 : La nacelle est fixée au carter 0. Le câble porteur Cp est fixé sur un point d'ancrage de l'immeuble. Aucun glissement ne se produit entre le câble Cp et la poulie en usage normal.

Démontrer que le vecteur vitesse $\mathbf{V}_{O \text{ carter} / \text{câble}} = \mathbf{OD} \wedge \mathbf{\Omega}_{\text{poulie} / \text{carter}}$

Question 3 : Donner l'expression littérale du rapport de transmission $k = \omega_{1/0} / \omega_{8/0}$
Calculer ce rapport de transmission.

Question 4 : Si l'opérateur tourne la manivelle à une fréquence de 1 tour/seconde, donner l'expression littérale du temps T nécessaire à une ascension h (60m) de la nacelle, le long de la façade d'un immeuble. Calculer ce temps.

Pour la suite du problème, nous pouvons préciser partiellement la fonction FT12 comme suit :



Hypothèses de travail et notation :

- le modèle de l'action du câble sur la poulie est un glisseur de support (D, Y_0) dont le module de la résultante est noté Q ;
- le module de la résultante de l'action d'un pignon i sur la couronne 1, est noté R_i ;
- l'action de la pesanteur est négligée.

Question 5 : Dans le cadre B du document-réponse 1, représenter graphiquement l'action de la denture d'un pignon sur celle de la poulie dentée pour les deux sens de rotation du pignon menant (sens indiqués par les flèches). Paramétrer la direction du support de chaque action.

Question 6 : On isole la poulie dentée 1.

A partir du schéma et des repères du document DR2, exprimer les torseurs des actions extérieures à cette poulie à l'aide de leurs éléments de réduction, fonctions de α et β , dans la base de référence R_0 aux points A, B, C et D.

Question 7 : Écrire les équations d'équilibre projetées sur les axes de R_0 en fonction de $Q, R_i, r, \alpha, \beta, \lambda$ (l'équation de moment sera écrite en O).

Question 8 : Écrire le système d'équations donnant R_2, R_3 , et R_4 avec ses coefficients numériques, prêt à être traité à l'ordinateur par un programme de calcul.

Question 9 : Les courbes du document DR3 donnent les valeurs de R_2, R_3 et R_4 en fonction de la configuration angulaire de la transmission paramétrée par β .

En utilisant ce document, donner les valeurs des intensités des efforts sur les dentures des pignons de la version actuelle du SCAFOR, et commenter les résultats.

Question 10 : Expliquer la discontinuité des courbes R_2 et R_4 .

A2 - DÉTERMINATION DE L'ÉPAISSEUR DE TÔLE

Au regard des valeurs des R_i , on désire rechercher s'il existe une configuration minimisant la sollicitation maxi sur la denture par l'étude de l'influence de l'architecture du système d'engrènement paramétrée par β .

Les courbes du document DR3 donnent les valeurs de R_2 , R_3 et R_4 en fonction de la configuration angulaire de la transmission paramétrée par β .

Question 11 : Donner la valeur de β minimisant l'intensité des efforts maximum sur les dentures et les valeurs correspondantes des R_i

Question 12 : Dans cette configuration optimisée, un calcul de denture pour le critère de rupture, nous conduit à une valeur de largeur de denture de 8,6 mm.

Compte tenu des moyens et de l'expérience de l'entreprise en matière de découpage, l'épaisseur de tôle maximum découpée pour des éléments dentés est limitée à 3 mm.

En conservant le mode d'obtention par découpage, proposer une solution constructive permettant d'obtenir un pignon d'une largeur égale ou supérieure à la valeur calculée.

A3 - DÉTERMINATION DES CARACTÉRISTIQUES DU MOTEUR

Dans cette étude, il n'est pas envisagé de remettre en cause le guidage en rotation par les dentures. Une étude parallèle a permis de quantifier les pertes énergétiques au niveau des axes des pignons et des dentures. Elles sont modélisées par un couple de frottement dont le moment ramené à l'axe 8 est : $C_f = 15 \text{ Nm}$.

Question 13 : Proposer une solution technique pour minimiser les pertes énergétiques.

Question 14 : Compte tenu de la vitesse limite du câble, quelle sera la fréquence de rotation maxi du moteur ?

Question 15 : Calculer, en phase de démarrage moteur, la valeur de l'accélération angulaire ω'_8 du pignon 8 (supposée constante), en fonction des caractéristiques techniques du SCAFOR.

Question 16 : Le moteur doit être capable de mettre la charge en mouvement .

Pendant le régime transitoire d'accélération, on tiendra compte des caractéristiques inertielles des pièces ou groupement de pièces suivants :

- masse de l'ensemble mobile en translation : M (qui sera évaluée à 400 kg pour la question 17) ;
- moment d'inertie des éléments dentés (et éventuellement de tous les éléments cinématiquement équivalents qui leurs sont rattachés) par rapport à leur axe de rotation : I_i avec $i = 1, 2, \dots, 8$.

Donner l'expression du moment du couple moteur C_8 , s'exerçant sur l'axe de 8 *en transmission réelle* (prise en compte des frottements), sous forme d'une relation entre : C_f , C_8 , I_i , g , M , k , ω'_8 , λ et les caractéristiques des dentures.

Question 17 : Calculer la valeur numérique de C_8 , compte tenu des données suivantes :

- élément denté 1 de masse $m_1 = 3,5 \text{ kg}$ assimilé à une « jante » de rayon moyen $r_1 = 85 \text{ mm}$;
- élément denté 8 de masse $m_8 = 0,2 \text{ kg}$ assimilé à un cylindre plein de rayon moyen $r_8 = 12 \text{ mm}$;
- éléments dentés 2 à 7 de masses $m = 0,3 \text{ kg}$ assimilés à des cylindres pleins de rayons moyens $r = 20 \text{ mm}$.

PARTIE B**ÉTUDE RELATIVE A LA FONCTION FT22**

OBJECTIF : Diminuer le nombre de pièces du frein secondaire et améliorer sa rigidité.

Présentation du problème

Le frein (voir document DR5) est composé de 4 ensembles de pièces cinématiquement équivalentes (un étrier supérieur, un étrier inférieur et 2 mâchoires), eux-mêmes en liaison avec le carter de l'appareil. Chaque étrier est formé par un assemblage de 2 plaques identiques reliées par les axes participant aux liaisons pivot avec les mâchoires. Cet ensemble, après montage, laisse subsister des jeux préjudiciables à la rigidité et à la sûreté du frein.

Pour remédier à ce problème le constructeur envisage de développer une nouvelle solution pour laquelle chaque étrier serait constitué d'une seule pièce obtenue par moulage. Les axes d'articulation seraient ensuite sertis sur les étriers lors du montage des mâchoires. Cette nouvelle solution tout en améliorant la rigidité, devrait entraîner une réduction des coûts consécutive à la diminution du nombre de pièces et aux usinages associés.

L'étude proposée consiste à étudier la faisabilité de nouvelles formes pour **l'étrier supérieur** compatibles avec la cinématique et les efforts mis en jeu.

Démarche

- Analyse de la solution existante et optimisation des paramètres géométriques du frein.
- Développement et calculs associés à la solution envisagée pour l'étrier supérieur : validation des formes envisagées.

B1 - ANALYSE DE LA SOLUTION EXISTANTE

Objectif de cette étude : Optimiser la géométrie actuelle du frein à mâchoires en regard des conditions imposées par la norme.

Données, paramétrage, notations : Voir le document ressource DR5.

Hypothèses:

- toute l'étude sera conduite dans le plan (A, $\mathbf{X}_0, \mathbf{Y}_0$), supposé plan de symétrie du mécanisme ;
- le câble de sécurité et toutes les pièces du frein sont supposés parfaitement rigides ;
- les liaisons sont supposées parfaites (à l'exception du contact câble / mâchoires) et sans jeu ;
- le poids propre de chaque pièce est négligé devant les actions mécaniques mises en jeu.

B11 - Recherche de la position du mécanisme lorsque le frein est en service

Question 18 : L'épure représentée dans le cadre C du document-réponse 1 définit la position relative des éléments constituant le frein lorsque l'écartement des mâchoires est maximal. Représenter, sur cette même épure, la nouvelle position de ce mécanisme lorsque les deux mâchoires sont en contact avec le câble (freinage actif).

Question 19 : A partir de l'analyse géométrique du mécanisme, déterminer l'expression littérale de d (diamètre du câble) en fonction de l'angle θ et des paramètres δ , b et e . En déduire la valeur de θ_a correspondant à un diamètre de câble $d = 8.4\text{mm}$.

Remarque : pour la suite de l'étude on adoptera $\theta_a = -9,5^\circ$.

B12 - Vérification des conditions de freinage

Hypothèses et données complémentaires :

- Lorsque le frein est actif ($\theta_a = -9,5^\circ$), on admet que les actions mécaniques de contact entre le câble et les mâchoires peuvent se modéliser par les 2 torseurs suivants :

$$\{T_{\text{cable}} \rightarrow 4\} = I \begin{Bmatrix} -N X_0 + Q/2 Y_0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \{T_{\text{cable}} \rightarrow 5\} = J \begin{Bmatrix} N X_0 + Q/2 Y_0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Où N représente la résultante des actions de contact entre le câble et une mâchoire en projection sur l'axe X_0 , et Q la charge maximale admissible par le treuil.

- L'action mécanique exercée par le ressort sur l'étrier 2 est modélisée par le torseur suivant :

$$\{T_{\text{Ressort}} \rightarrow 2\} = N \begin{Bmatrix} R Y_0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \text{Avec } R = 29 \text{ N en position de freinage correspondant à } \theta_a = -9,5^\circ.$$

B121 - Évolution de l'effort presseur N en fonction de θ

A partir de la position d'équilibre définie par la figure 4 du document DR5 (position de freinage), on considère un rapprochement virtuel des mâchoires consécutif à un déplacement en rotation élémentaire $d\theta$ de l'étrier 2.

Question 20 : En appliquant le théorème des travaux virtuels à l'ensemble de solides $\{2,3,4,5\}$, déterminer une relation littérale mettant en évidence l'évolution de N en fonction de θ pour une charge Q donnée.

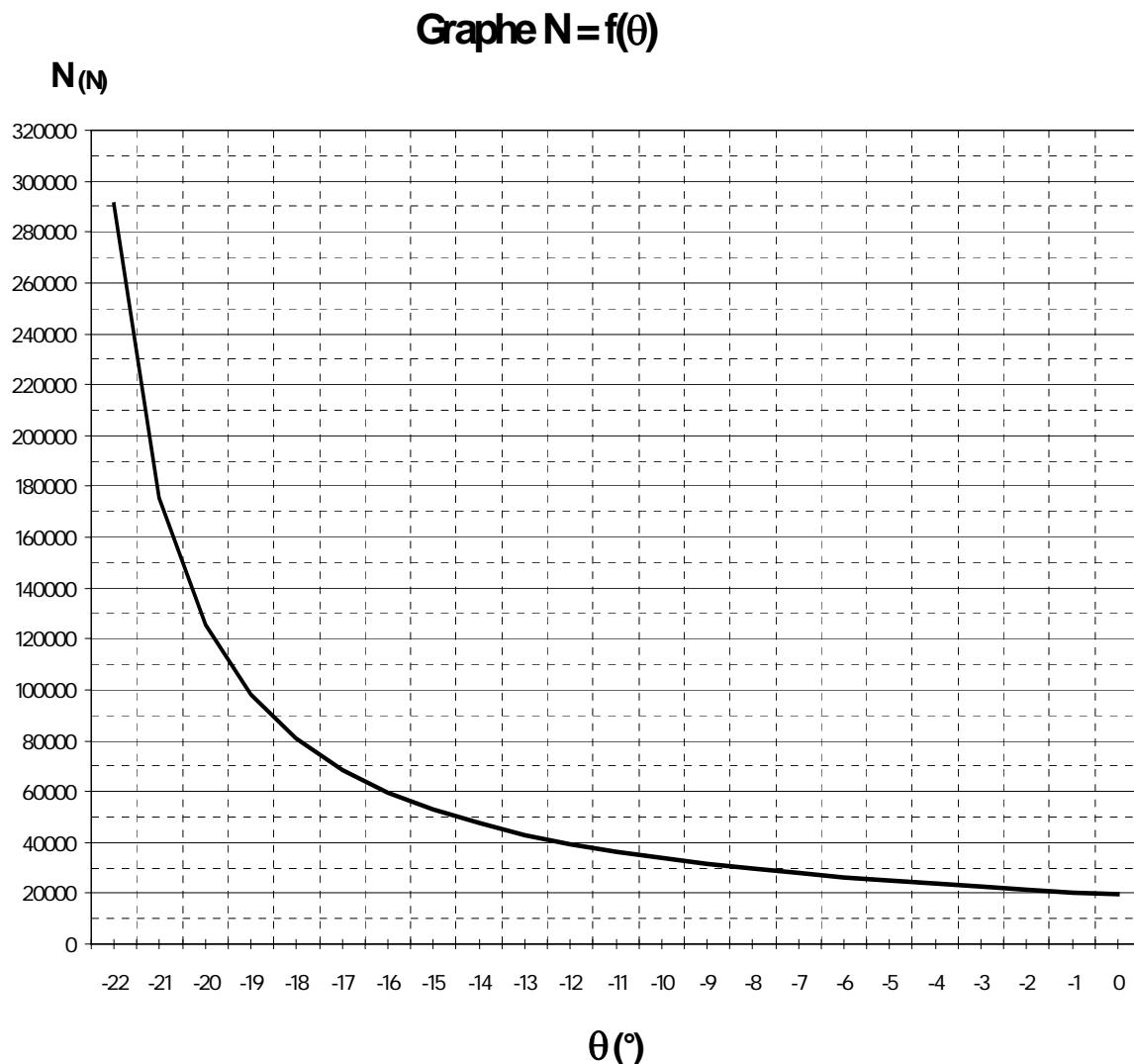
Rappel (théorème des travaux virtuels) : Pour qu'un système de solides, en contact sans frottement entre eux et avec un bâti, soit en équilibre, il faut et il suffit que, pour tout déplacement virtuel compatible avec les liaisons, la somme algébrique des travaux des forces extérieures et intérieures qui lui sont appliquées soit nulle.

Question 21 : En exploitant la relation précédente, identifier, pour une valeur de θ donnée, les paramètres géométriques du frein qui modifient la valeur de N , et évaluer leur influence respective.

B122 - Recherche du facteur de frottement optimal entre câble et mâchoires

Le graphe ci-dessous met en évidence l'évolution de N en fonction de θ pour la charge nominale du treuil $Q = 4000 \text{ N}$ (charge correspondant à une masse suspendue de 400 kg).

Question 22 : En exploitant ce graphe, déterminer la valeur minimale du facteur d'adhérence f qui garantit le non-glissement entre le câble et les mâchoires pour la charge nominale $Q = 4000 \text{ N}$. (On rappelle qu'en position de freinage $\theta_a = -9.5^\circ$).



B123 - Validation des conditions de freinage par rapport aux exigences imposées par la norme

Données complémentaires :

- On adopte $f = 0.1$ comme facteur de frottement entre câble et mâchoires ;
- Conditions imposées par la norme EN 1808 : Le frein secondaire doit s'engager automatiquement dès que la vitesse de la charge suspendue au treuil dépasse 0.5 m/s en descente. A partir de cet instant, le frein doit être en mesure d'arrêter cette charge sur une distance inférieure ou égale à 10 cm .

Question 23 : En utilisant les données à votre disposition, vérifier que, pour la charge nominale, le frein ainsi constitué ($f = 0.1$; $\theta_a = -9.5^\circ$; $N = 33000 \text{ N}$) répond aux exigences imposées par la norme. Pour cela :

- Appliquer le principe fondamental de la dynamique à l'ensemble mobile pendant le freinage. En déduire la valeur de la décélération supposée constante pendant cette phase.
- Déterminer sous ces conditions la distance d'arrêt.
- Calculer la marge (ou le coefficient) de sécurité et conclure sur la validité du frein.

B124 - Optimisation de la géométrie du frein

Une analyse statique du frein montre que les actions mécaniques dans les liaisons entre étriers et mâchoires sont étroitement liées à la valeur de N. Afin de diminuer la valeur de ces actions sans pour autant nuire à son efficacité, le constructeur souhaite évaluer l'influence de certains paramètres géométriques du frein.

La figure 1 du document DR6 représente les résultats d'une analyse des contraintes appliquées sur l'étrier actuel en position freinage ($Q = 4000 \text{ N}$). La figure 2 du même document représente les résultats d'une analyse similaire conduite sur un étrier dont la géométrie a été modifiée de telle sorte à diminuer la valeur de N de 15%.

Question 24 : En utilisant les résultats des analyses précédentes et en exploitant l'ensemble des données en votre possession, faire un choix raisonné de la solution qui vous semble être la plus appropriée dans le contexte de cette étude. Préciser les critères retenus.

B2 - CALCULS D'AVANT-PROJET ASSOCIES A LA SOLUTION ENVISAGEE POUR L'ETRIER SUPERIEUR

Objectifs de cette étude : Valider les solutions constructives envisagées pour l'étrier supérieur.

Données relatives à la solution envisagée : voir documents DR6 (figures 3 et 4) et DR7.

- Matériau pour l'étrier : EN-GJS 500-7 ($R_{p0.2} = 320 \text{ MPa}$, $R_m = 500 \text{ MPa}$)
- Procédé d'élaboration de l'étrier: moulage.
- Extrait de la norme EN 1808 :
 - “vérification contre la rupture: la vérification des parties mécaniques contre la rupture est effectuée en s'assurant que la contrainte calculée n'excède pas la contrainte admissible prenant en compte la contrainte de rupture du matériau utilisé” ;
 - Coefficient de sécurité (pour le calcul du frein de sécurité) : $s = 1,5$.
- Une étude statique a permis de déterminer les torseurs d'action mécaniques dans les liaisons entre l'étrier supérieur et les 2 axes d'articulation des mâchoires en B et C (ces 2 points appartiennent au plan médian de l'étrier - voir fig 3, DR6). Ces axes sont montés serrés sur l'étrier puis sertis après montage.

$$\{T_4 \rightarrow 2\}_B = \begin{Bmatrix} \begin{matrix} (N) & (Nm) \\ -18360 & 0 \\ 5612 & 0 \\ 0 & 0 \end{matrix} \end{Bmatrix}_{(X, Y, Z)} \quad \{T_5 \rightarrow 2\}_C = \begin{Bmatrix} \begin{matrix} (N) & (Nm) \\ 14420 & 0 \\ -1516 & 0 \\ 0 & 0 \end{matrix} \end{Bmatrix}_{(X, Y, Z)}$$

Le travail proposé consiste à analyser sous conditions nominales d'utilisation l'état des contraintes dans le nouvel étrier. Cette étude est conduite en utilisant un logiciel de calcul par éléments finis interfacé avec un modéleur 3D.

B21 - Modélisation

La précision des résultats donnés par le logiciel est étroitement liée à la qualité du maillage et à la bonne définition des conditions aux limites imposées au modèle (modélisation des liaisons et des actions mécaniques de contact).

Dans le cadre A du document réponse 2, figurent quelques exemples de définition de contacts dans les liaisons (« *déplacements imposés nuls* » → *couleur verte*) et d'actions mécaniques (« *forces* » → *couleur rouge*).

Sur ce même document (cadre B), la modélisation des conditions aux limites appliquées à l'étrier a été ébauchée en imposant un « *déplacement radial nul* » au niveau des surfaces cylindriques de l'étrier en contact avec l'axe d'articulation sur l'équerre fixe en A.

Question 25 : En vous inspirant des exemples proposés dans le cadre A du document-réponse 2, compléter, dans le cadre B de ce même document, la modélisation des conditions aux limites à appliquer à l'étrier. Pour cela, représenter de manière qualitative les « *déplacements imposés* » par un champ de vecteurs de couleur verte et les « *forces* » appliquées par un champ de vecteurs de couleur rouge.

Les choix seront effectués en prenant en compte les considérations suivantes :

- les « *déplacements imposés* », ou les « *forces* », s'appliquent à des éléments géométriques du modèle (ligne ou surface) ;
- afin que le logiciel puisse effectuer le calcul, il est impératif que l'ensemble des « *déplacements imposés* » suppriment les 6 libertés de mouvements possibles de la pièce ;
- les choix concernant les « *déplacements imposés* » doivent être effectués en tenant compte des possibilités réelles de déformation de la pièce (ne pas imposer un déplacement nul à un élément géométrique du modèle alors que la zone correspondante de la pièce tend visiblement à se déformer sous l'effet des actions mécaniques mises en jeu) ;
- les choix concernant les « *forces* » doivent être effectués en tenant compte des contacts réels entre les pièces.

Dans tous les cas, les candidats sont invités à justifier leurs choix en précisant les hypothèses retenues.

B22 - Analyse des résultats

Le document DR7 représente l'état des contraintes exercées sur ce nouvel étrier pendant le freinage (résultats donnés par le logiciel).

Question 26 : En exploitant ces résultats, conclure sur la validité de la solution envisagée pour l'étrier supérieur. Proposer si nécessaire des adaptations ou des modifications éventuelles.