

TD 2023

Mécanique INSA

Durée : 2h30 heures

LE TÉLÉPHÉRIQUE DU PIC DU MIDI

Ce dossier comprend :

■ Présentation du Téléphérique du Pic du Midi

Introduction
Le téléphérique du Pic du Midi
Les modes d'exploitation
Analyse fonctionnelle générale

■ Etude de la motorisation principale

- Données et notations utilisées
- Mise en situation
- Détermination du couple maximum nécessaire à fournir sur l'arbre moteur
- pour une situation critique particulière

1. Introduction

Le site d'astronomie du Pic du Midi de Bigorre est équipé d'un observatoire qui a été construit en 1878.

Cette construction a été réalisée au sommet du Pic du Midi. Celui-ci culmine à 2877 m et se situe en bordure de la chaîne des Pyrénées et surplombe la vallée de l'Adour au-dessus de Tarbes (65).

L'observatoire du Pic du Midi de Bigorre permet de réaliser des images d'étoiles, notamment du soleil, avec une excellente qualité.

Depuis l'an 2000 le site s'est doté d'un musée d'astronomie, d'un restaurant, de chambres d'hôtel, de terrasses qui permettent d'accueillir le public toute l'année.

Afin de permettre l'acheminement du public sur le site (pas de route existante), deux téléphériques se succèdent entre La Mongie et le Pic du Midi.

Le Premier tronçon part de la station de ski du Tourmalet (domaine de la Mongie, altitude 1753 m) et arrive à la gare du Taoulet, dite « de renvoi », à 2309 m.

Le second tronçon (**objet de l'étude**) repart du Taoulet et arrive en gare du Pic du Midi à 2860 m.

Ce moyen de transport est utilisé à plusieurs fins :

- Monter et descendre les visiteurs.
- Monter du matériel logistique et notamment de l'eau.
- Monter des pratiquants de sports d'hiver avides de sensations fortes (utilisation de la piste de ski depuis le Pic du Midi).



Vue du site du Pic du Midi

2. Le téléphérique du pic du Midi



Cabine du téléphérique

Présentation générale

Le téléphérique du Pic du Midi est composé de 2 cabines se déplaçant alternativement et symétriquement dans un mouvement de va-et-vient, au moyen d'un câble "tracteur" entraîné par le treuil de la station motrice.

Chacune des 2 cabines est supportée par un chariot roulant sur 2 câbles "porteurs" fixes.

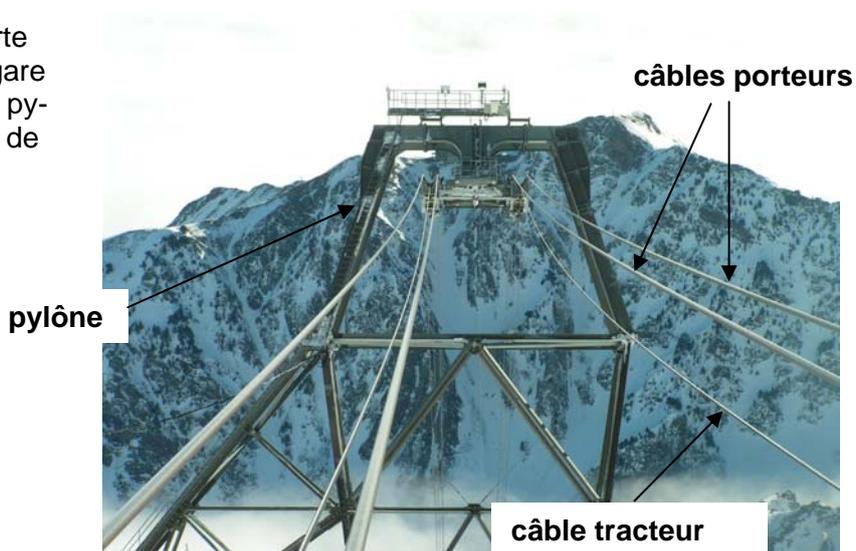
Chaque cabine peut transporter des personnes et de l'eau. Cette eau est utilisée au Pic pour les sanitaires et les douches.

Le téléphérique du Pic du Midi comprend 3 stations qui divisent le parcours en deux tronçons : La Mongie - Le Taoulet et Le Taoulet - Le Pic du Midi.

Notre étude portera sur le second tronçon Le Taoulet - Le Pic du Midi (**PR 6, figure 1**).

Sur ce tronçon, le téléphérique parcourt 2631 m à la vitesse nominale de 12,5 m/s et permet de franchir en moins de 6 minutes les 551 m de dénivelé qui séparent la gare du Taoulet de la gare du Pic du Midi.

Cette remontée comporte un pylône situé juste avant la gare d'arrivée du Pic. Au droit de ce pylône la vitesse des cabines est de 6 m/s.



Vue de la ligne

La station motrice, située au Pic du Midi, renferme :

- ❑ tous les dispositifs d'entraînement et de freinage du câble tracteur : moteur principal, réducteur, accouplement, poulie motrice, freins, moteur de secours.
- ❑ un pupitre qui regroupe les commandes de marche, les signalisations, les sécurités, les appareils indicateurs permettant de contrôler à tout moment la vitesse et la position des cabines par rapport aux stations et au pylône.
- ❑ Une armoire électrique qui intègre les dispositifs de protection ainsi que les automates de contrôle et de commande.

La station de renvoi, située au Taoulet, comporte :

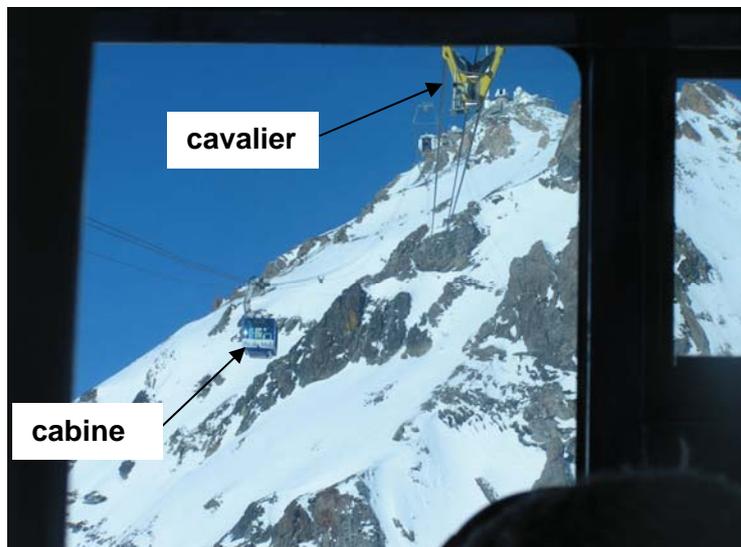
- ❑ Un système de renvoi du câble tracteur composé de poulies (**PR 8, figure 5**).
- ❑ le contreponds de tension des câbles dont la position est repérée par un indicateur local.
- ❑ des interrupteurs de position extrême qui commandent l'interruption du fonctionnement automatique.

Description technique

Le câble tracteur qui met en mouvement les cabines forme une boucle (**PR 7, figure 3**). Il est entraîné au sommet par la poulie motrice et est retenu en bas par un système de 7 poulies de renvoi (**PR 8, figure 5**) qui maîtrisent la tension du câble.

Chaque cabine roule sur 2 câbles dits "câbles porteurs" qui sont fixes. Cette paire de câbles forme une voie.

Des cavaliers (**PR 8, figure 4**), permettent de maintenir l'espacement entre les câbles porteurs. Ils sont au nombre de 9 par voie.



Prise de vue depuis l'intérieur d'une cabine s'approchant de la gare du Pic du Midi.

Le téléphérique est donc constitué de 2 voies (une par cabine). Les cabines montent et descendent en restant sur leur voie.

Les cabines se déplacent sur les câbles porteurs par l'intermédiaire du chariot qui comporte 16 galets qui roulent sans glisser sur ces câbles (**PR 6, figure 2**).

La cabine est reliée au chariot par la suspente.

Une articulation entre le chariot et la suspente permet à la cabine de maintenir son plancher à l'horizontale.

3. Principe de fonctionnement

□ Mode normal :

Lorsque toutes les sécurités ont été vérifiées par l'automate, les cabines quittent les stations à une vitesse voisine de 0,5 m/s pendant quelques mètres pour atteindre progressivement la vitesse nominale de 12,5 m/s en passant par un palier à 6 m/s. (voir **PR10**)

A l'arrivée, à proximité de la gare, les cabines ralentissent une première fois afin que celle qui se présente au niveau du pylône franchisse ce dernier à la vitesse de 6 m/s. Ensuite les cabines ralentissent de nouveau, puis s'arrêtent aux quais de débarquement respectifs. Le frein de service est actionné et les portes peuvent s'ouvrir.

□ Mode dégradé :

Il est impératif d'arrêter les cabines de manière imminente et à n'importe quelle position, pour des raisons telles que 'vents forts', 'incohérence des informations issues des capteurs de vitesse et de position des cabines'.

Aussi, au redémarrage, la machine motrice devra fournir le couple nécessaire pour déplacer les cabines. Ce couple peut atteindre des valeurs importantes, largement supérieures au couple nominal, suivant la position des cabines.

4. Les modes d'exploitation

Afin de répondre en toute sécurité à toutes les circonstances qui peuvent se présenter en cours d'exploitation, l'opérateur dispose de quatre modes de marche :

□ mode de marche automatique

Tout le cycle de fonctionnement est pris en charge par les automates.

□ mode de marche manuel

Le préposé assure la totalité des opérations. La vitesse en différents points du parcours est comparée à celle définie pour la marche en automatique. S'il y a discordance, le système s'arrête.

□ mode de marche exceptionnel

Ce mode de marche est utilisé dans le cas de pannes d'automatisme importantes. La plupart des sécurités sont inhibées. La vitesse est limitée à 1 m/s.

□ mode de marche secours

L'entraînement est assuré par une machine hydrostatique composée d'un moteur thermique, d'une pompe hydraulique et d'un moteur hydraulique.

5. Architecture fonctionnelle générale

□ L'alimentation en énergie électrique.

Un transformateur HT/BT, 20 kV / 400 V - 1250 KVA, alimente la station en énergie électrique.

□ Les automates programmables

L'automate principal prend en charge :

- La commande des portes.
- L'élaboration des ordres de mouvement.
- L'élaboration des consignes de vitesse pour le variateur.
- La gestion des défauts de fonctionnement.

L'automate de suivi de ligne gère le profil de vitesse des cabines sur la ligne ainsi que les fonctions auxiliaires (éclairage, tourniquets et portillons d'accès) .

□ L'entraînement principal

Il est constitué d'une machine à courant continu à excitation indépendante de 400 kW. Cette machine entraîne l'arbre de la poulie motrice à travers un réducteur de rapport 15,4. 2 freins sont également prévus : 1 frein de service et 1 frein d'urgence.

□ Le variateur de vitesse

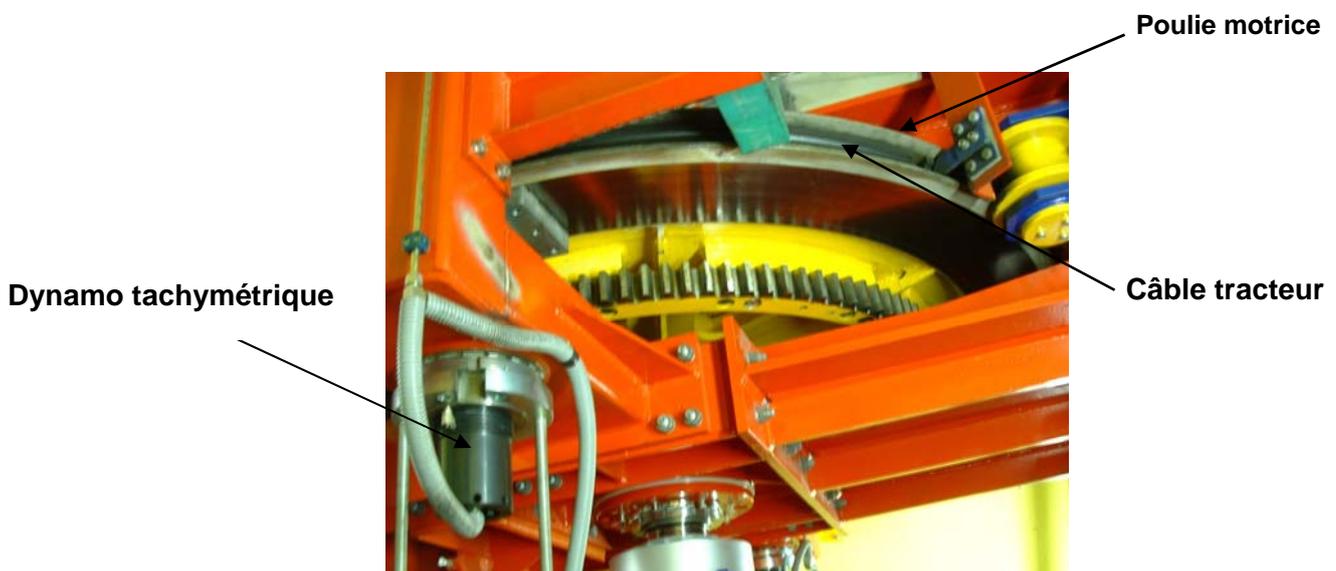
Il s'agit d'un variateur à thyristors à 4 quadrants. Il permet d'adapter la vitesse des cabines en fonction de leur position sur le trajet.

□ Mesure de vitesse

La mesure de vitesse est assurée par 2 dynamos tachymétriques. L'une est montée directement sur l'arbre de la machine à courant continu, l'autre est montée sur l'axe de la poulie motrice.

□ Mesure de position

La position des cabines est donnée par 2 générateurs d'impulsions optiques entraînés par la poulie motrice.



Vue de la poulie motrice à l'intérieur de la salle des machines

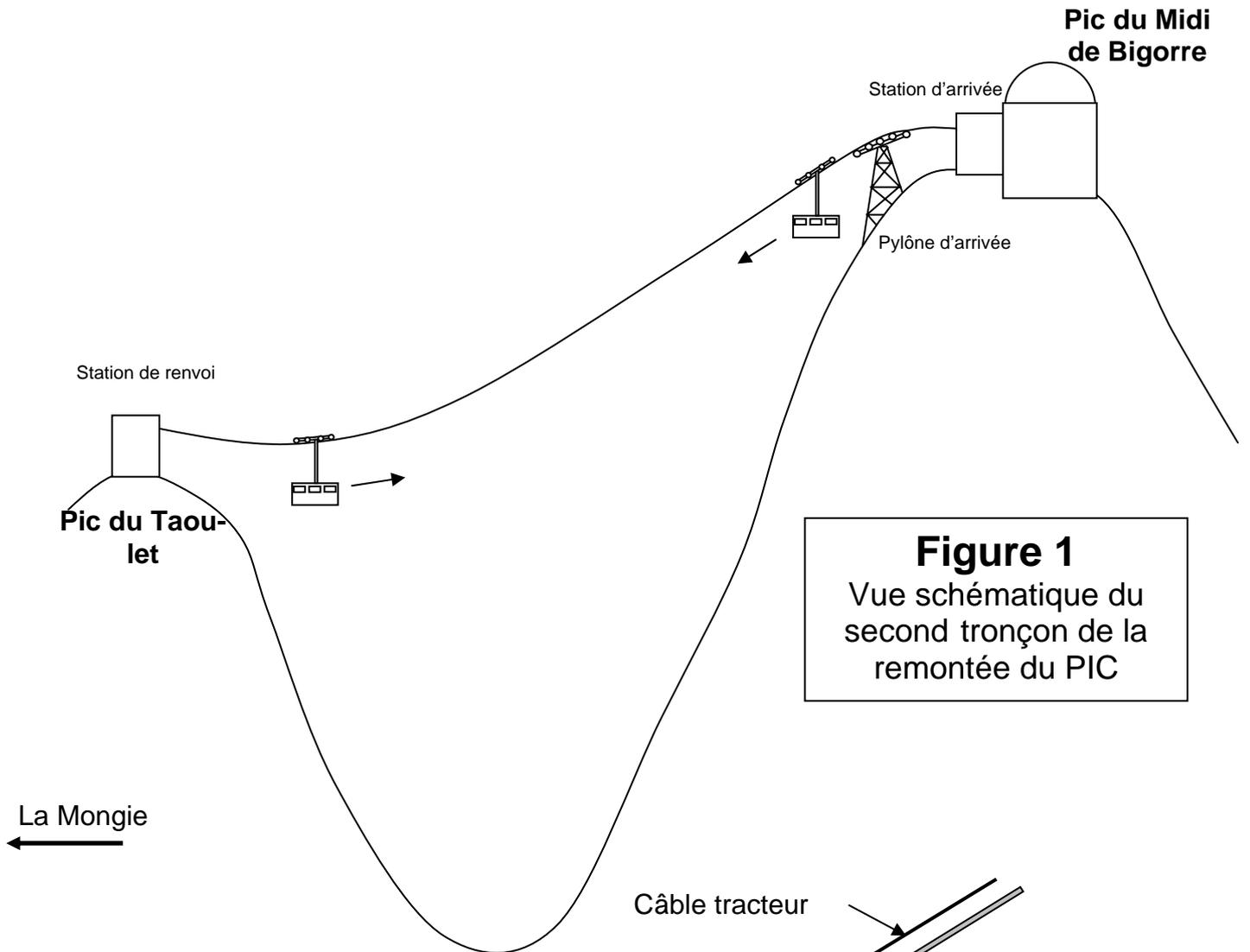


Figure 1
 Vue schématique du second tronçon de la remontée du PIC

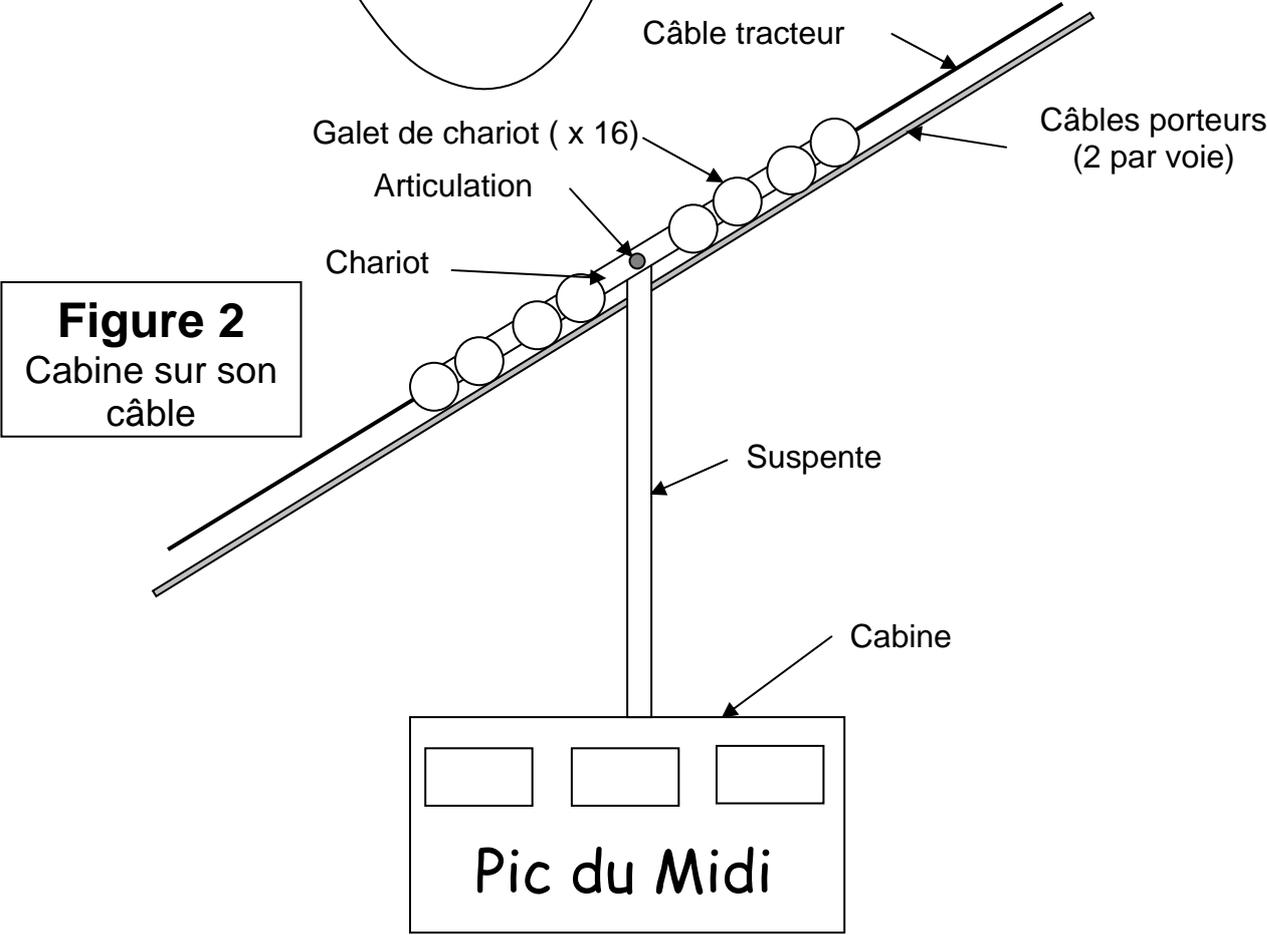


Figure 2
 Cabine sur son câble

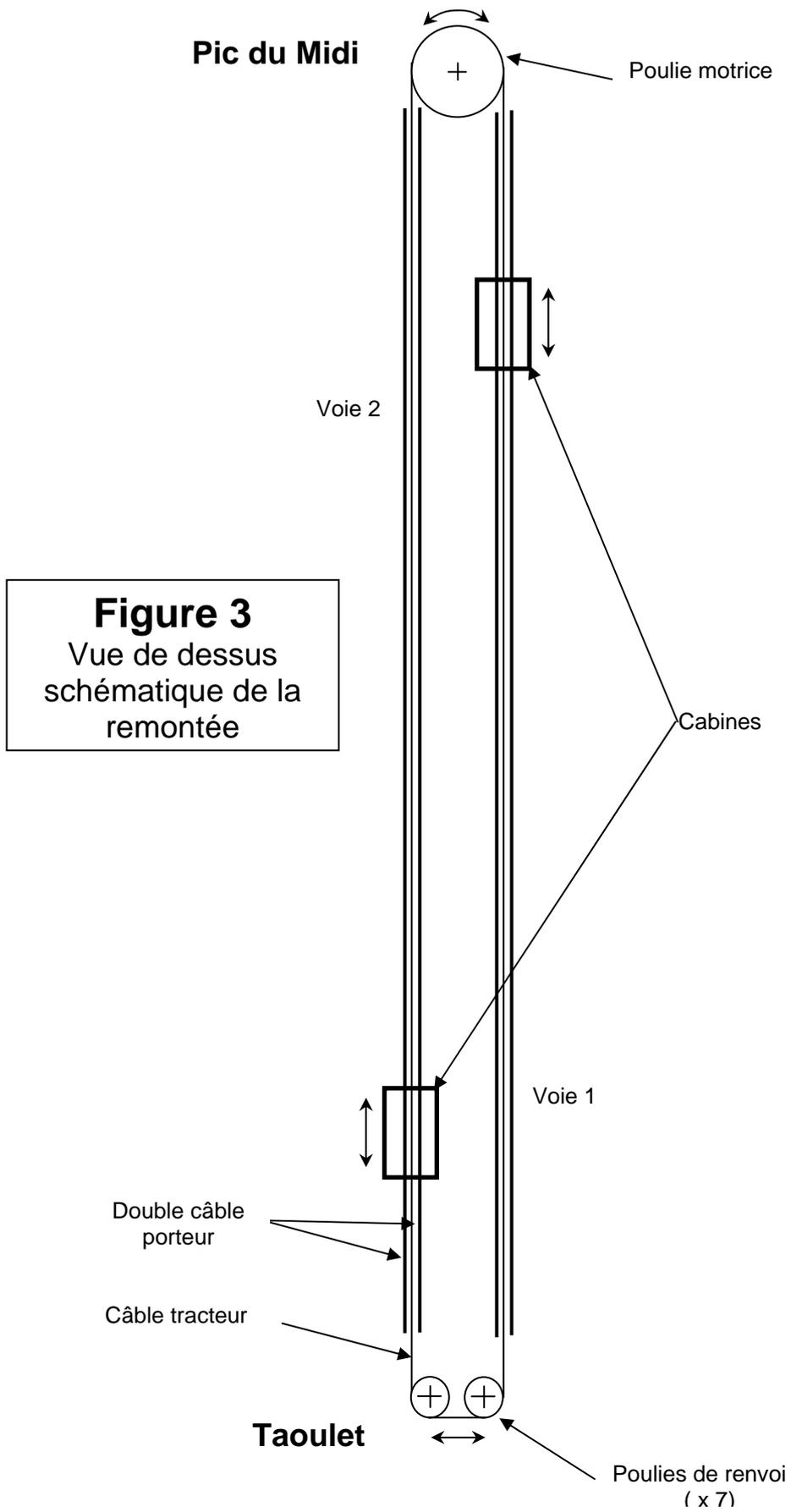


Figure 3
 Vue de dessus
 schématique de la
 remontée

Figure 4

Cavaliers : ils supportent le câble tracteur le long des voies et maintiennent l'espacement entre les câbles porteurs

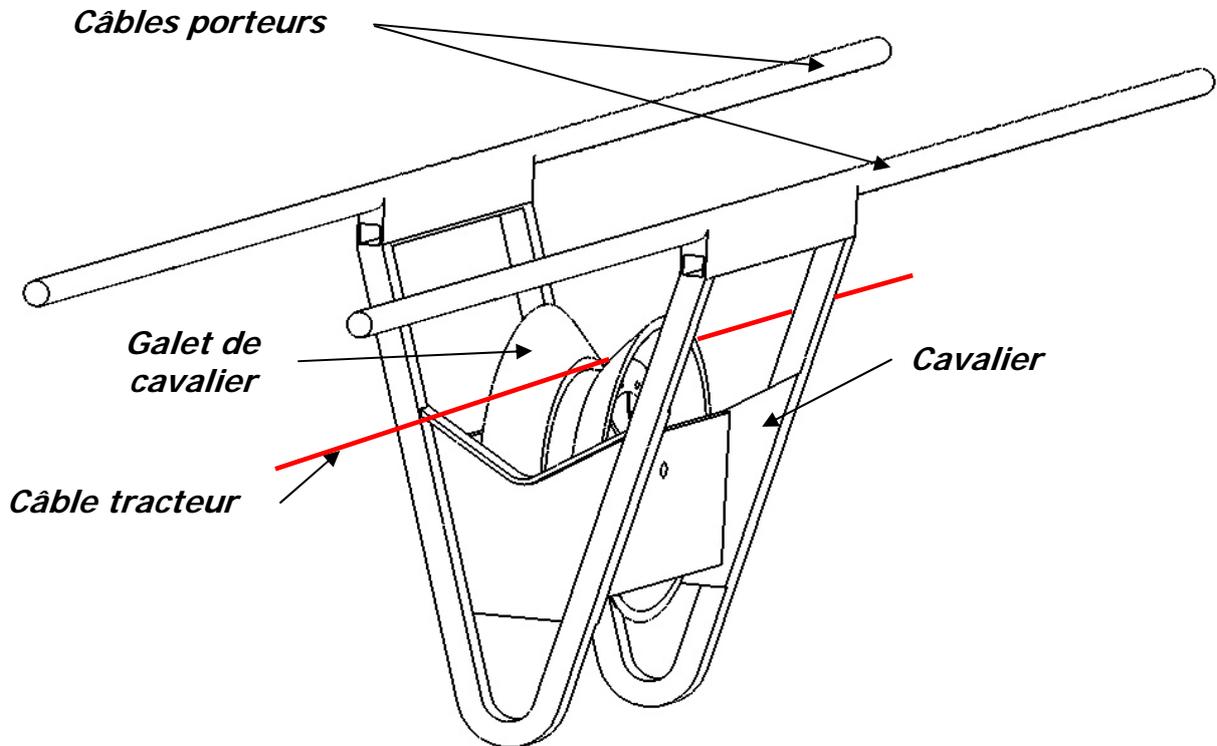
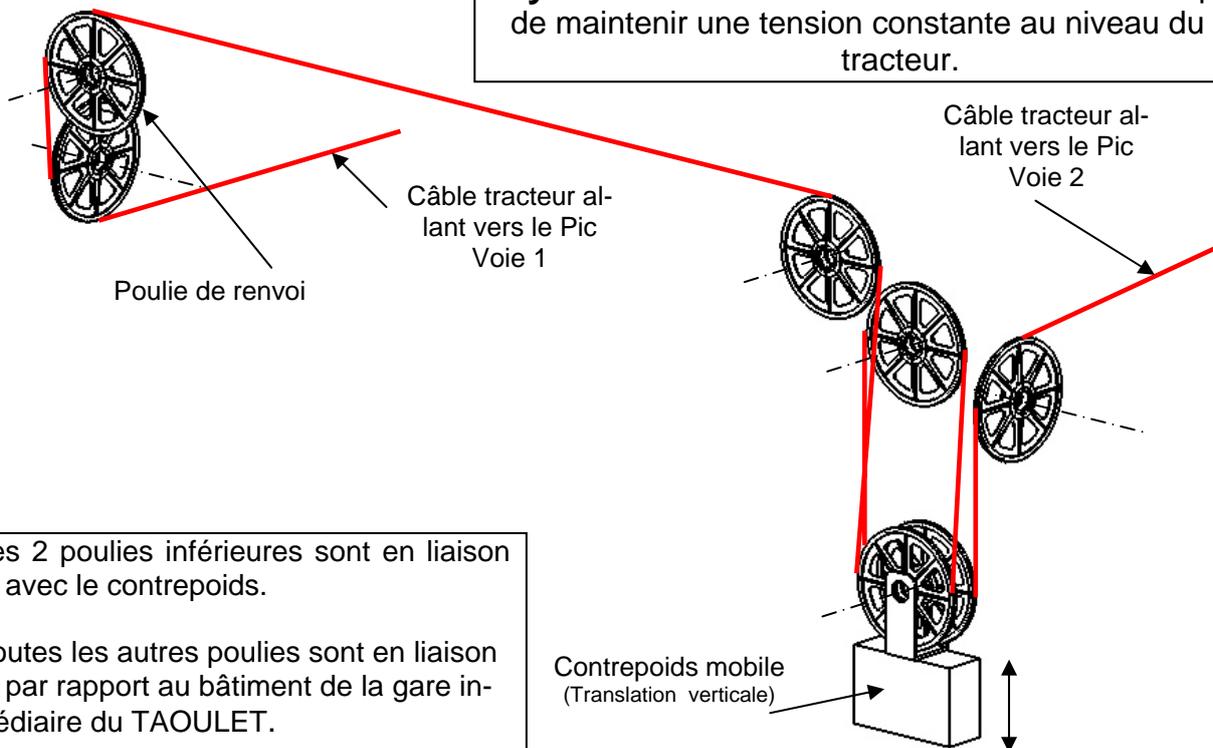


Figure 5

Système de renvoi du câble tracteur : il permet de maintenir une tension constante au niveau du câble tracteur.



Les 2 poulies inférieures sont en liaison pivot avec le contrepois.

Toutes les autres poulies sont en liaison pivot par rapport au bâtiment de la gare intermédiaire du TAOULET.



ETUDE DE LA MOTORISATION PRINCIPALE

- Données et notations utilisées
- Mise en situation
- Détermination du couple maximum nécessaire à fournir sur l'arbre moteur.

Afin de bien évaluer quantitativement les effets qui dimensionnent le moteur de traction, on étudie séparément la contribution de chacun des phénomènes physiques.

La partie A1 permet de calculer le couple qui entraîne la charge à vitesse quasi nulle dans le cas le plus critique.

La partie A2 permet de savoir si l'accélération prévue est correcte : ni trop faible pour ne pas perdre de temps inutilement, ni trop forte pour ne pas dépasser les capacités du moteur (la seule charge est due à l'inertie).

Le couple total à fournir sera la somme de ces 2 couples; La prise en compte des frottements se fait à partir des rendements.

Données :

- M_t = masse maximale transportable dans une cabine : 3220 kg.
- M_c = masse d'une cabine à vide : 5215 kg (masse de l'ensemble roulant)
- D_p = diamètre d'enroulement du câble sur la poulie motrice : 2650 mm. (représentée sur le document **DT A4**)
- Inertie des pièces en mouvement (document **DT A1**).
- Relevé topographique du site (document **DR A2**).
- Caractéristiques du réducteur (document **DT A2** et **DT A3**).
- Caractéristiques du câble tracteur : longueur 5520 m, masse linéique 2.65 kg/m.
- V : vitesse d'une cabine exprimée en $m.s^{-1}$
- g (gravité terrestre à l'altitude) : $9.81m.s^{-2}$
- η_{red} (rendement du réducteur) : 0.95
- η_{PC} (rendement du système poulie/câble) : 0.9
- θ = angle d'inclinaison entre la direction horizontale et le câble tracteur (voir document **DR A1**).
- Ω : vitesse angulaire de l'**arbre moteur** exprimée en $rad.s^{-1}$.
- Ω_p : vitesse angulaire de la **poulie motrice**, exprimée en $rad.s^{-1}$

Notations utilisées:

- C_m = Couple nécessaire à fournir sur l'arbre moteur.
- $C_{résistant/mot}$ = Couple résistant à fournir sur l'arbre moteur pour équilibrer la charge.
- C_{dyn} = Couple dynamique ou couple accélérateur à fournir sur l'arbre moteur.
- J_i = Inertie de la pièce i exprimée en son centre de gravité autour de son axe de rotation.
- $J_{i/mot}$ = Inertie de la pièce i ramenée sur l'arbre moteur.
- $\dot{\Omega} = \frac{d\Omega}{dt}$: accélération angulaire de l'arbre moteur exprimée en $rad.s^{-2}$
- Z_i = Nombre de dents de la roue dentée i .

Mise en situation

Les deux cabines sont chargées au maximum. Elles arrivent sur la fin de leur trajet. La cabine aval se déplace donc vers la gare intermédiaire et la cabine amont arrive au Pic du Midi. Suite à une vitesse du vent trop importante, la machine motrice doit être arrêtée et les deux cabines chargées sont stoppées à une position pour laquelle la pente des câbles porteurs, côté Pic du Midi, est maximale (**cas le plus défavorable**). Le redémarrage va avoir lieu en mode dégradé.

On se propose dans cette partie de calculer le couple à fournir sur l'arbre moteur afin de pouvoir redémarrer dans cette position critique.

A.1 Détermination du couple résistant à fournir sur l'arbre moteur pour équilibrer la charge (cas statique).

On se propose d'étudier l'équilibre statique d'une cabine (voir DR A1). Pour cela, on isole l'ensemble $S_0 = \{\text{cabine} + \text{charge maxi} + \text{chariot} + \text{galets de chariot} + \text{suspente}\}$.

On note :

\vec{P} : Le vecteur qui représente l'action de la pesanteur sur le système isolé. Il est exercé au point **G**.

\vec{R} : Le vecteur qui représente l'action des câbles **porteurs** sur le système isolé. Ce vecteur est considéré perpendiculaire à la direction des câbles. Il est exercé au point **E**.

\vec{T} : le vecteur représentant l'action du brin du câble tracteur sur le système isolé. Ce vecteur est parallèle au câble tracteur. Il est exercé au point **E**.

A.1.1. Représenter sur DR A1 les supports de ces actions.

A.1.2. Ecrire l'équation vectorielle de la résultante.

A.1.3. Ecrire l'équation scalaire de la résultante en projection sur \vec{X} .

A.1.4. Exprimer la tension **T** dans le câble en fonction de M_t , de M_c , de g et de l'angle θ .

A.1.5. Sur le relevé topographique document DR A2, tracer le point **A**, lieu où la cabine amont (côté Pic du Midi) supporte la plus grande pente sur les câbles porteurs. Mesurer au point **A**, sur le document DR A2 l'angle θ_{Pic} . Vérifier que sa valeur est proche de 32° .

A.1.6. Connaissant la position de la cabine amont (point **A**), **tracer** le point **B** position de la cabine aval (côté gare intermédiaire). **Mesurer** au point **B**, sur le document **DR A2** l'angle θ_{inter} . Vérifier que sa valeur est proche de 3° .

A.1.7. On note $C_{résistant / poulie}$, le couple résistant à fournir sur la poulie motrice pour équilibrer la charge (les deux cabines chargées en A et B). A partir des 2 angles relevés, **déterminer** ce couple en fonction de D_p . **Effectuer** l'application numérique.



A.1.8. On définit pour le réducteur, le rapport de réduction $K_{10/4} = \frac{\Omega_{10/18}}{\Omega_{4/18}}$ avec $\Omega_{10/18}$ et $\Omega_{4/18}$ les vitesses angulaires respectives de l'arbre de sortie 10 et de l'arbre d'entrée 4 par rapport au carter fixe 18. A l'aide du dessin d'ensemble du réducteur et de sa nomenclature (document **DT A2** et **DT A3**), **déterminer** le rapport de réduction du réducteur.

$K_{10/4}$



A.1.9. On note $C_{résistant / mot.}$ le couple résistant à fournir sur l'arbre moteur pour équilibrer la charge. **Exprimer** ce couple. **Effectuer** l'application numérique.



A.2 Détermination du couple dynamique.

En mode dégradé, le cahier des charges fixe l'accélération des cabines à $a_{cabine} = 0,3 \text{ m.s}^{-2}$.

A.2.1. Exprimer l'accélération angulaire correspondante sur l'arbre moteur notée $\dot{\Omega} = \frac{d\Omega}{dt}$ en fonction de a_{cabine} . **Calculer** cette accélération.

A.2.2. :

On considère l'ensemble $S_1 = \{ \text{câble + cabines chargées} \}$ de masse m_s .

Remarque : le câble est considéré comme une masse se déplaçant en translation à la vitesse V d'une cabine.

Exprimer l'énergie cinétique E_C de l'ensemble S_1 en fonction de m_s et de V .

A.2.3. Ecrire l'énergie cinétique précédente en fonction de : D_p ; m_s ; $K_{10/4}$; Ω

A.2.4. On souhaite calculer l'inertie du système S_1 ramenée sur l'arbre moteur :

$J_{S_1/\text{mot}}$ représente l'inertie du système S_1 ramenée à l'arbre moteur.

Exprimer $J_{S_1/mot}$, puis calculer sa valeur.

A.2.5. A partir des données du document **DT A1**, **citer** les pièces qui sont prépondérantes en terme d'inertie et **calculer** leur inertie ramenée à l'arbre moteur en utilisant le fichier excel pré-rempli.

En tenant compte du résultat de la question précédente, **déterminer** l'inertie équivalente du système complet rapportée sur l'arbre moteur. On notera cette inertie J_T .

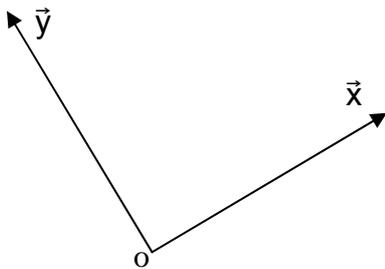
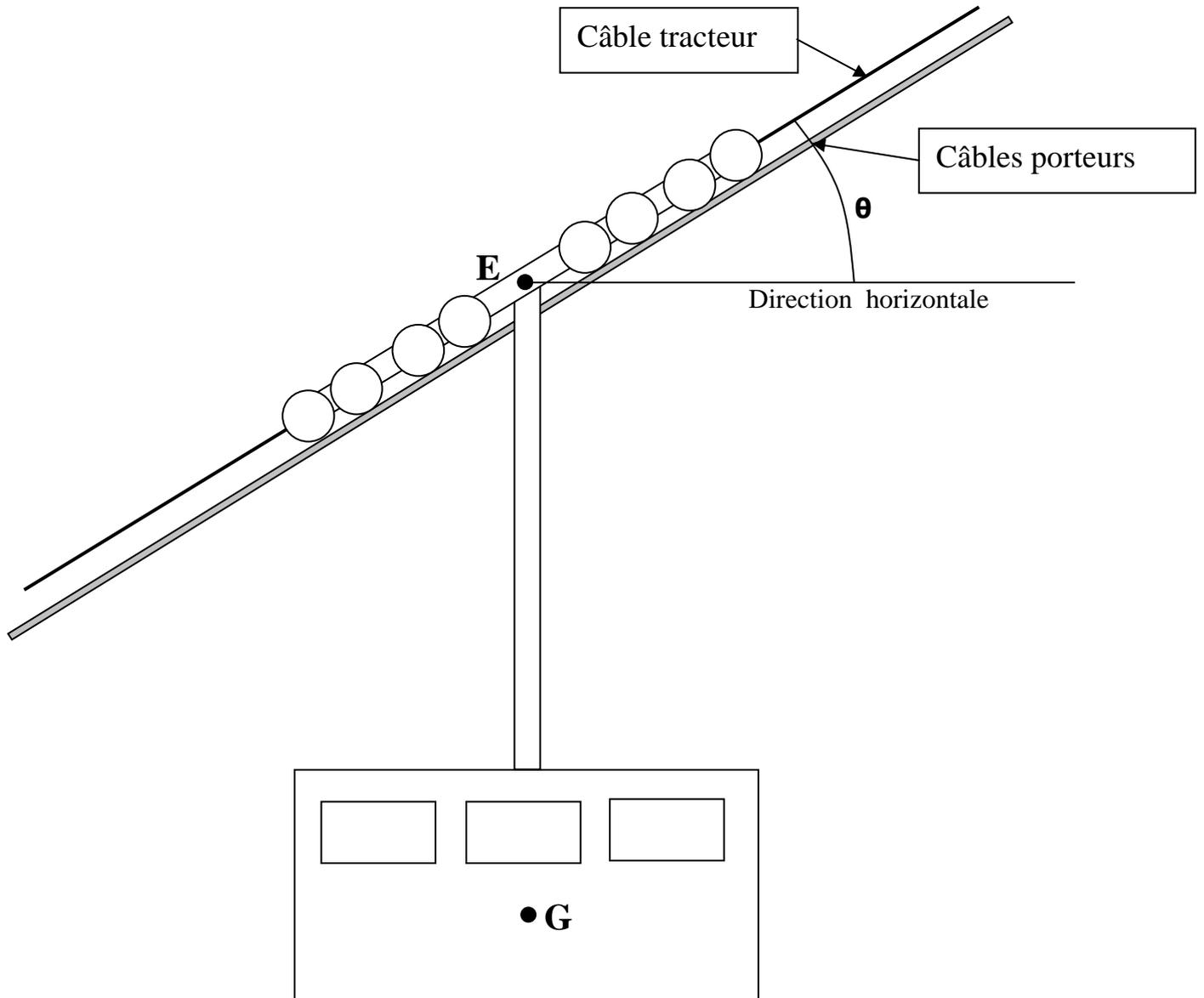
A.2.6. **Exprimer** le couple dynamique C_{dyn} en fonction de J_T et de $\dot{\Omega}$. **Calculer** C_{dyn} .

A.3 Détermination du couple moteur.

A.3.1. On considère la chaîne cinématique {réducteur et système poulies/câble}. **Déterminer** le rendement global de cette chaîne cinématique.

A.3.2. **En déduire** C_m , le couple à fournir sur l'arbre moteur nécessaire au redémarrage dans cette situation critique. **Effectuer** l'application numérique.

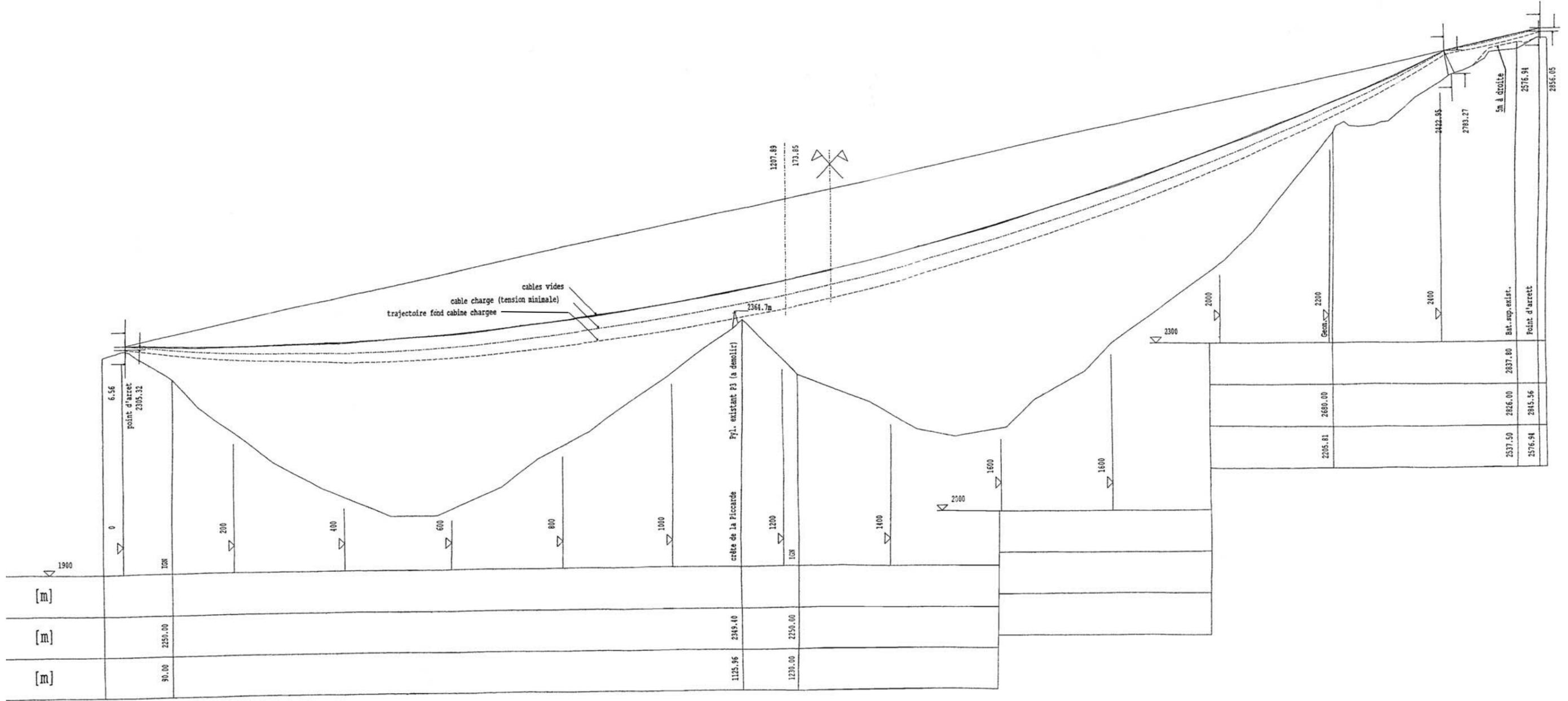
Equilibre d'une cabine



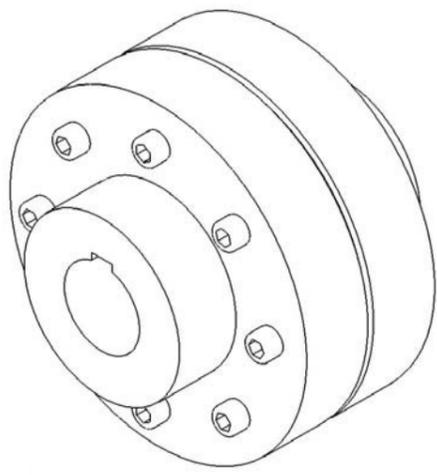
Hypothèse : les câbles sont considérés rectilignes et parallèles.

Remarque : L'axe \vec{x} est parallèle à la direction des câbles

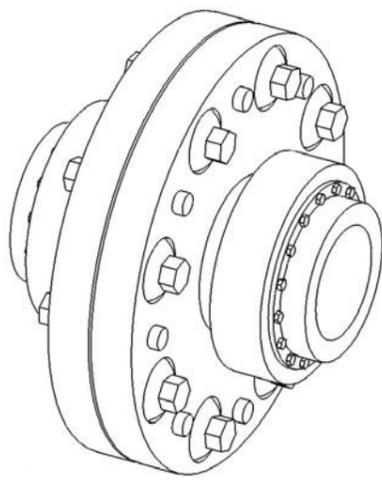
DR A2 : Relevé topographique du deuxième tronçon de la remontée du pic du Midi De Bigorre



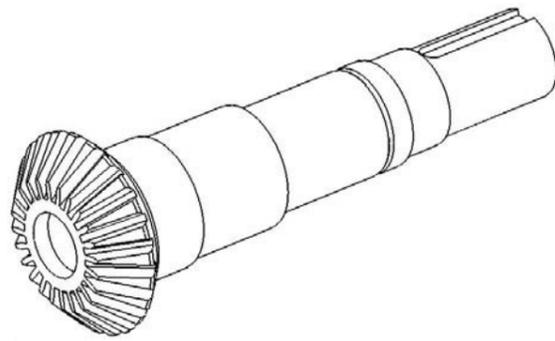
Accouplement moteur-réducteur x 1



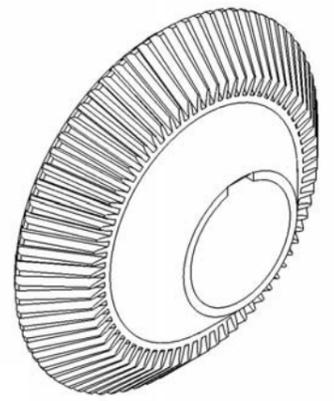
Accouplement réducteur-poulie x 1



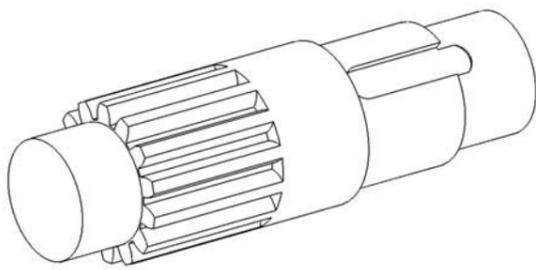
Arbre de roue conique x 1



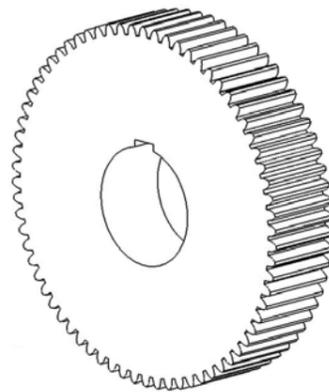
Roue conique x 1



Pignon arbre x 1



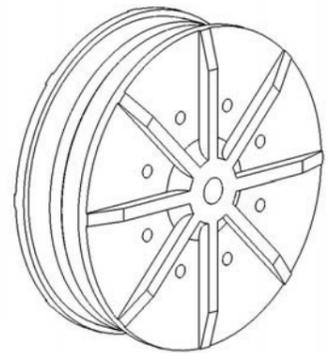
Roue à denture droite x 1



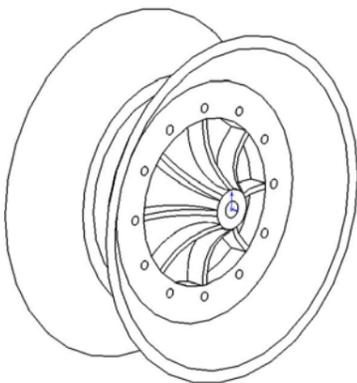
Arbre de sortie du réducteur x 1



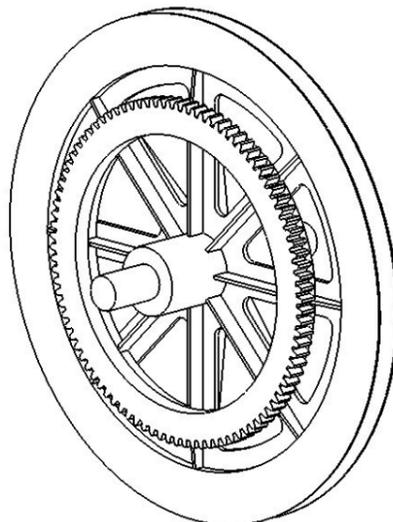
Galet de chariot x32



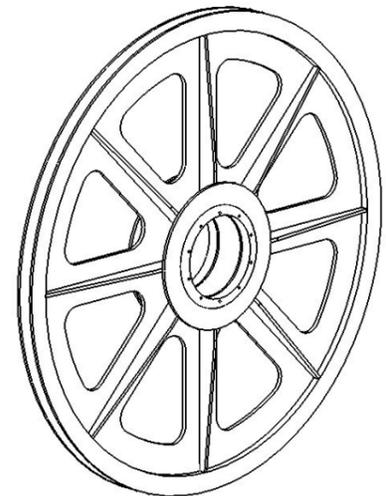
Galet x58



Poulie motrice x 1

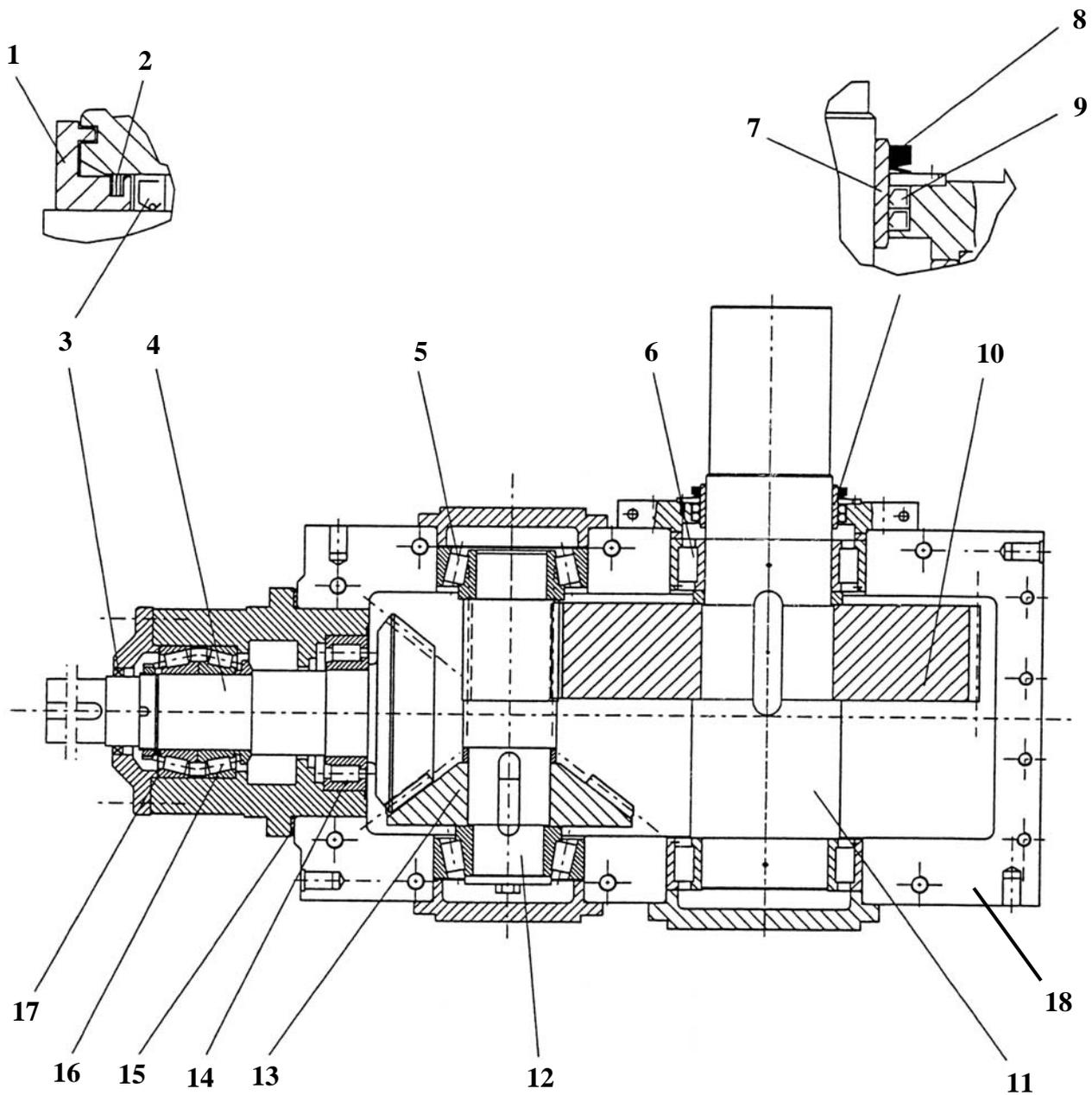


Poulie de renvoi x7

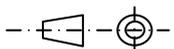


Nota : Désignation x nombre de pièces

Nom de la pièce.	Masse (kg).	Inertie autour de leur axe de rotation (kg.m ²).	Inertie de la pièce ramenée sur l'arbre moteur (kg.m ²).
Accouplement moteur/réducteur	95	1.11	
Accouplement réducteur/poulie	818	57.8	Calculer ces inerties en utilisant le tableau excel fourni
Arbre de roue conique (4)	69	0.18	
Roue conique (13)	57	1	
Pignon arbre (12)	65	0.17	
Roue à denture droite (10)	388	25.3	
Arbre de sortie du réducteur (11)	310	1.9	
Galet de chariot	58	1.4	
Galet	42	1.4	
Poulie motrice	5000	5382	
Poulie de renvoi	887	583	
Arbre moteur+induit	220	9.54	



Echelle : 1/11

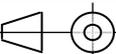


Format : A4

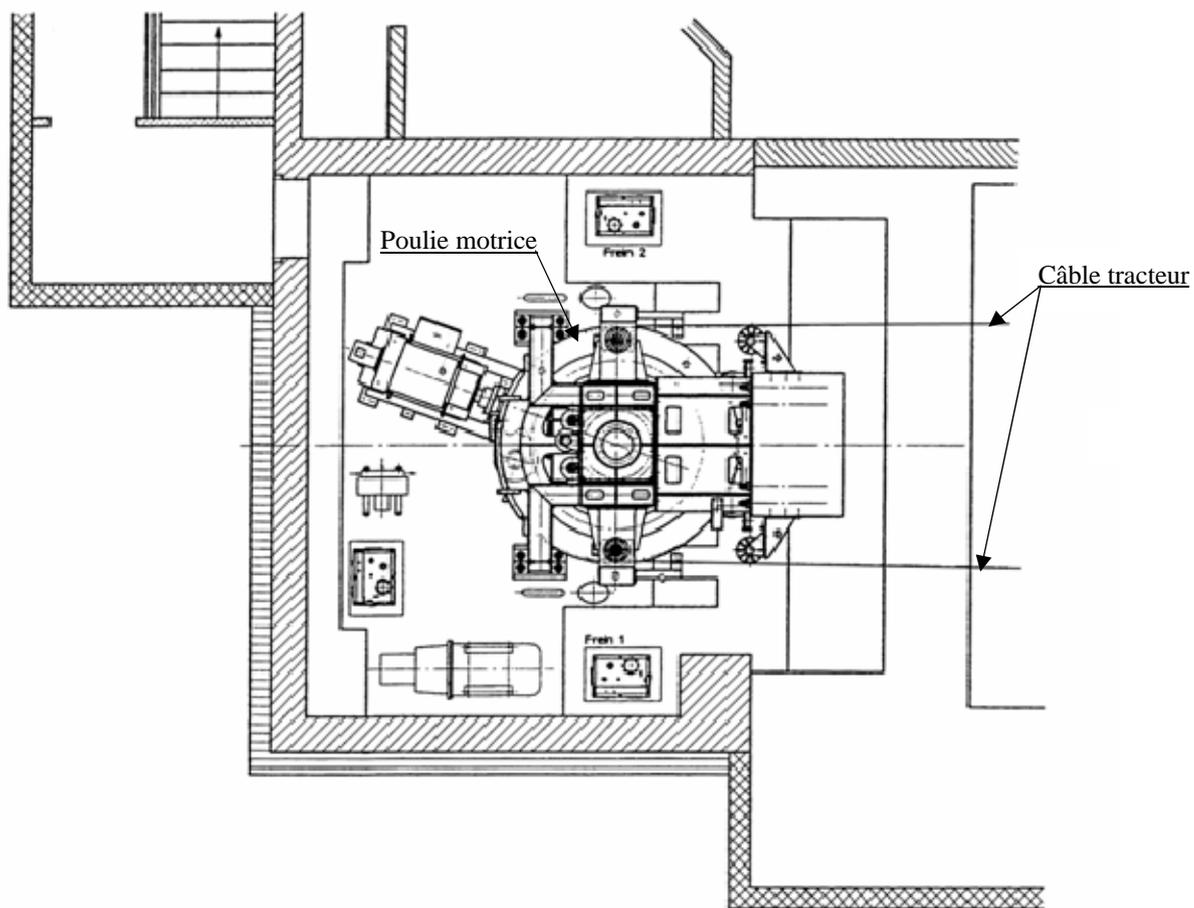
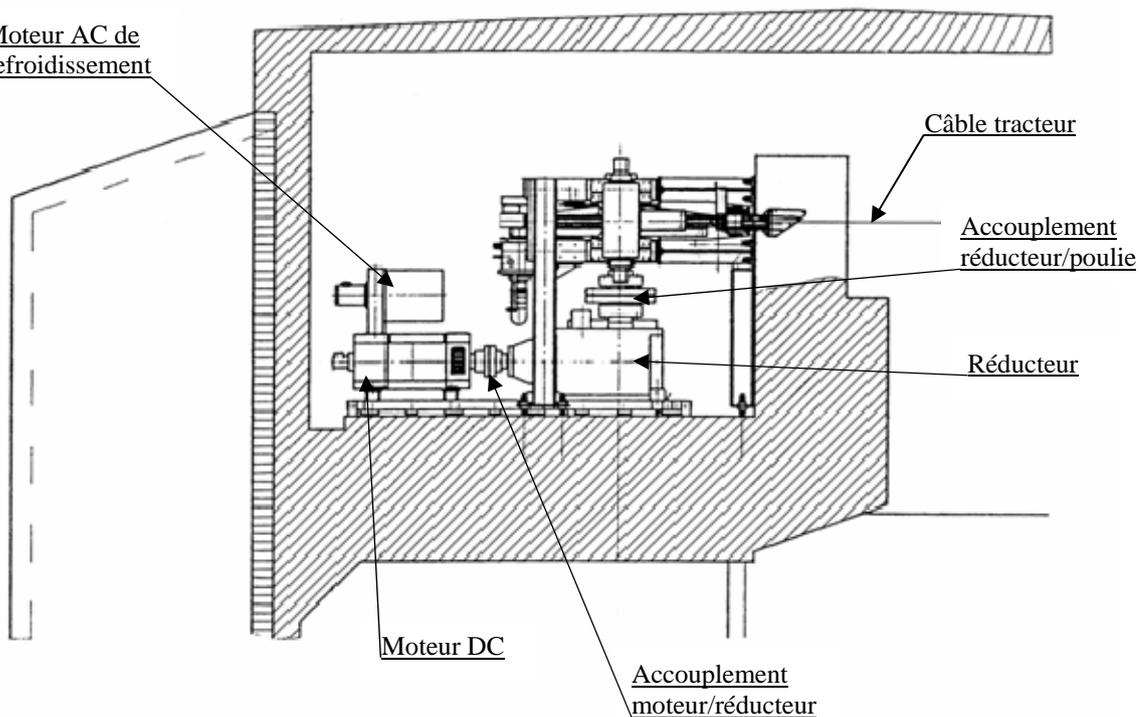
Réducteur FLENDER

Document DT A2

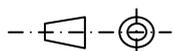
Plan d'ensemble

36				
35				
34				
32				
31				
30				
29				
28				
27				
26				
25				
24				
23				
22				
21				
20				
19				
18	18	Carter	C30	
17	1	Cale de réglage		
16	2	Roulement à rouleaux cylindriques		
15	1	Bague d'ajustage		
14	1	Roulement à rouleaux cylindrique		
13	1	Roue conique	C40	Z ₁₃ =74
12	1	pignon arbre	C40	Z ₁₂ =14
11	1	Arbre de sortie	C30	
10	1	Roue à denture droite	C40	Z ₁₀ =70
9	2	Joint à lèvres	NBR	TYPE A
8	1	Joint à lèvres à frottement axial V,230A	NBR	V-Ring
7	1	Bague de frottement		
6	2	Roulement à rouleaux cylindriques		
5	2	Roulement à rouleaux coniques		
4	1	Arbre de roue conique	C40	Z ₄ =24
3	1	Joint à lèvres	NBR	TYPE A
2	3	Garniture de friction		
1	1	Anneau porte lamelles	C22	
Rep	Nb	Désignation	Matière	Obs
Type B 2SV		Réducteur FLENDER		
				
A4		DOCUMENT DT A3		

Moteur AC de refroidissement



Echelle : non spécifiée



Format : A4

Salle des machines du Pic du Midi

Document DT A4

Plan d'ensemble