

Le sujet comporte les documents suivants :

- le texte du sujet qui comprend 24 pages numérotées de 1/24 à 24/24,
- quatre documents annexes numérotés annexe 1, 2, 3 et 4,
- quatre documents réponses numérotés document réponse 1, 2, 3 et 4, qui seront à joindre à la copie.

Les calculatrices sont autorisées.

Calculatrice électronique de poche – y compris programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n°99-186 du 16 novembre 1999.

Tout document et tout matériel électronique sont interdits.

Toute documentation autre que celle fournie est interdite.

Recommandations générales.

L'épreuve se compose de 3 parties indépendantes. Dans chaque partie, certaines sous-parties sont elles-mêmes indépendantes. Les candidats sont donc invités, d'une part, à lire attentivement l'énoncé avant de commencer à composer et d'autre part, à bien répartir leur temps de composition entre les différentes parties. Pour chaque partie, il est demandé aux candidats de rédiger dans l'ordre proposé par le sujet.

Il est rappelé aux candidats qu'ils doivent impérativement utiliser les notations indiquées dans le texte ou sur les figures, et qu'ils doivent présenter les calculs clairement, dégager et encadrer les résultats relatifs à chaque question référencée dans le sujet. Tout résultat incorrectement exprimé ne sera pas pris en compte. Les candidats traceront tous les schémas ou chronogrammes qui leur permettront d'étayer leurs raisonnements.

## 1. Découverte du système.

L'étude porte sur l'un des manèges d'un parc d'attractions :

### LA MAISON HANTÉE

**Vieilles pierres, couloirs sans fin et pièges maléfiques... il faut avoir le cœur bien accroché pour s'aventurer dans ces lieux...**

Cette installation est composée de seize véhicules indépendants roulant sur une piste béton de 192 mètres.

Cette piste reçoit en son centre un rail de guidage qui fixe la trajectoire des véhicules.

Chaque voiture peut recevoir deux personnes au maximum.

Les passagers ne conduisent pas, ils sont uniquement spectateurs. Ils sont assis sur une nacelle tournante, libre en rotation.

Un système de contrepoids placé sous l'assise ainsi que l'inclinaison de la piste permettent une bonne orientation des visiteurs devant les scènes du décor.

Une voie de garage peut contenir sept véhicules permettant ainsi le délestage de la piste pour adapter le nombre de véhicules à la fréquentation.

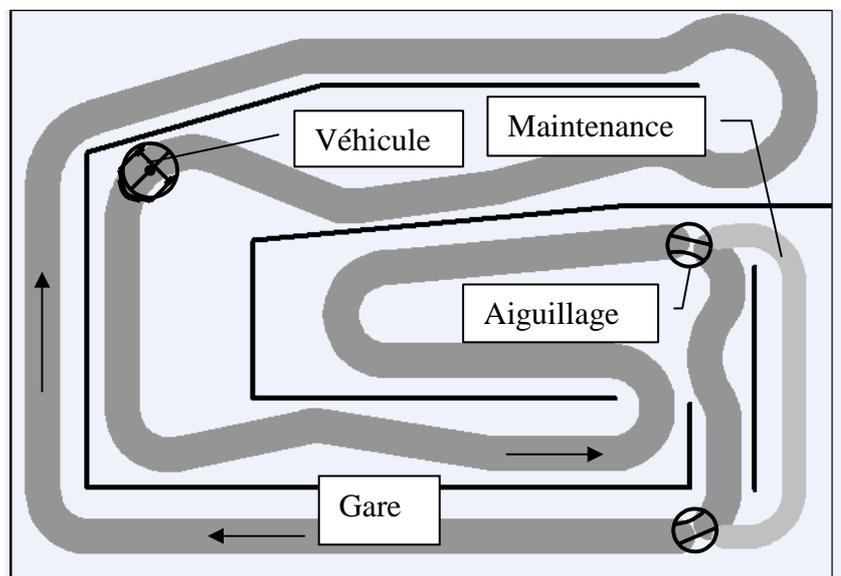


Figure 1 – Parcours du véhicule

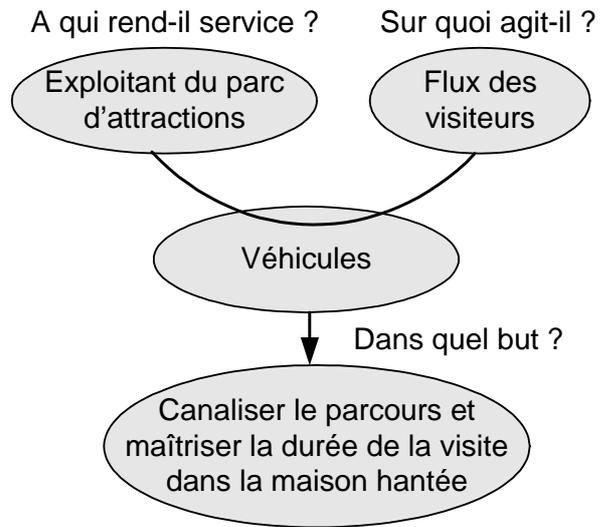
Un opérateur proche du quai d'embarquement a en charge l'exploitation, il doit gérer les flux des départs, contrôler les débarquements et surveiller l'évolution sur la piste.

### 1.1. Mise en situation.

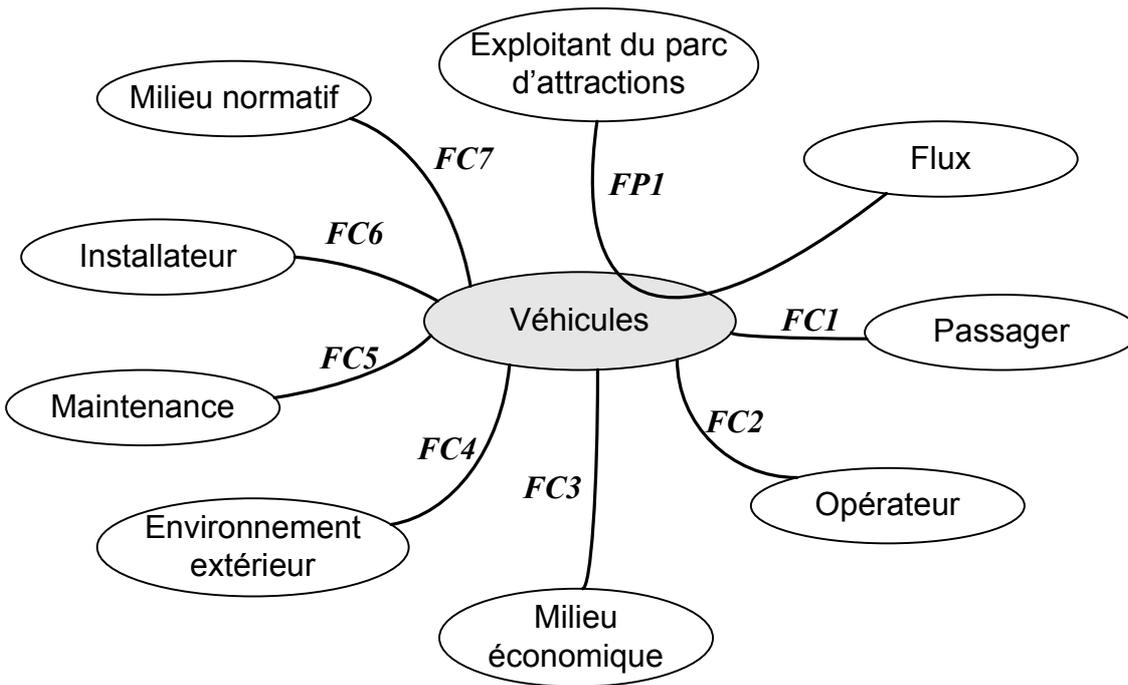
Les personnes sont transportées par un véhicule comportant 2 roues arrières et un bogie de guidage à l'avant. La roue arrière gauche est motrice.

La motorisation de chaque véhicule est assurée par un moteur à courant continu. L'énergie parvient aux moteurs par des contacts glissants placés sur le rail de guidage. L'alimentation de tous les moteurs est réalisée simultanément par une source continue unique.

### 1.2. Expression du besoin, diagramme A.P.T.E.

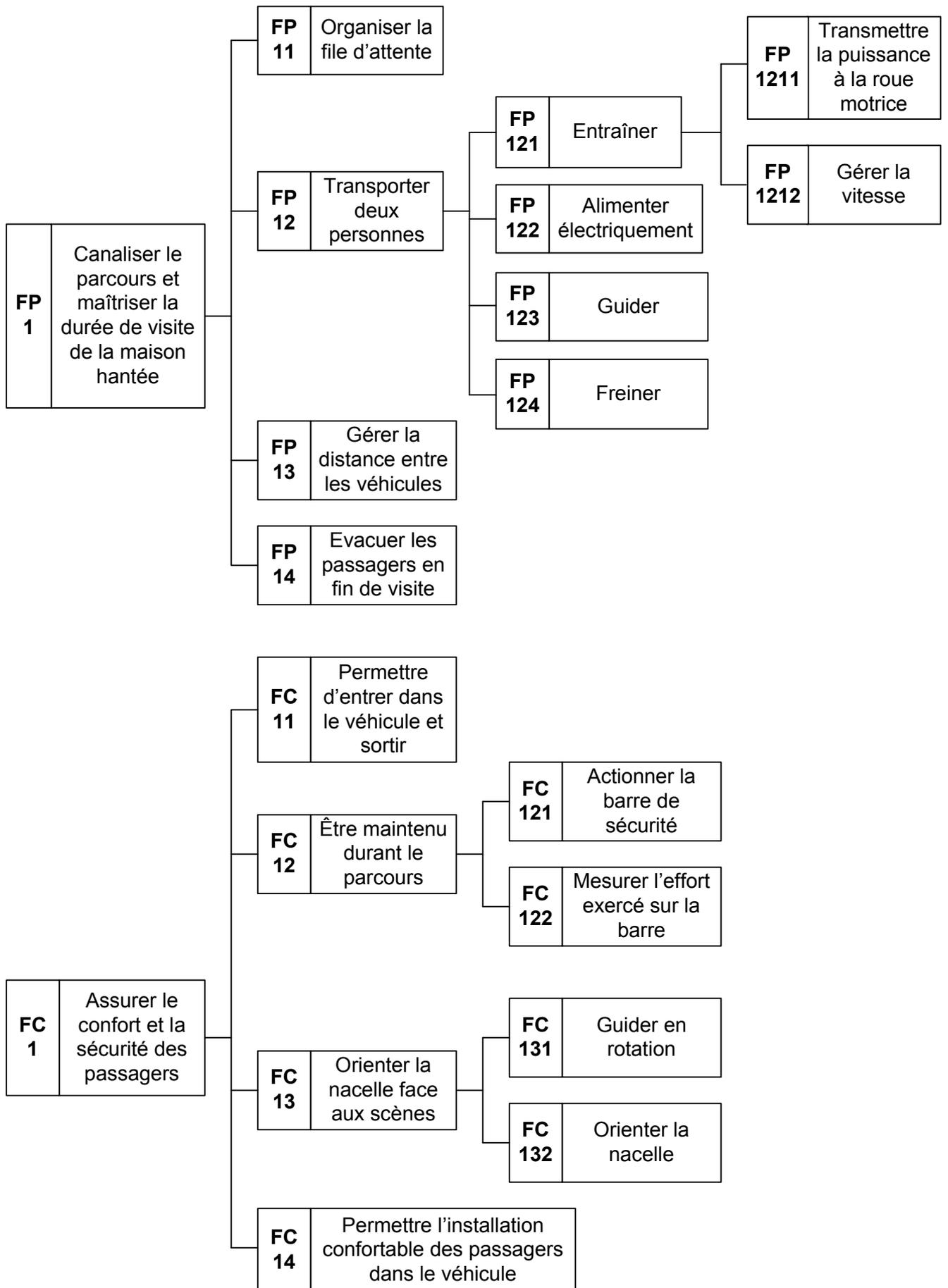


### 1.3. Fonctions de service, diagramme des interactions.



FP1	Canaliser le parcours et maîtriser la durée de la visite dans le manoir
FC1	Assurer le confort et la sécurité des passagers
FC2	Vérifier l'accès des passagers
FC3	Être rentable
FC4	Éviter la pollution sonore
FC5	Permettre une maintenance rapide
FC6	Disposer d'une plateforme stable de 1200m <sup>2</sup>
FC7	Respecter les normes en vigueur (Tüv, abréviation de Technischer Überwachungs-verein, normes allemandes)

### 1.4. Diagramme FAST partiel.



### 1.5. Cahier des charges fonctionnel partiel.

	Fonction de service	Critères d'appréciation	Niveau
<b>FP 1211</b>	Transmettre la puissance à la roue motrice	Masse à transporter  Pente	Poids à vide : $P_0=464kg$ Passagers : $Pa : 2x85kg$  Montée : 6% Descente : 7%
<b>FP 1212</b>	Gérer la vitesse	Vitesse du véhicule $V_c$  Variation de vitesse maximale tolérée  Temps d'accélération $ta$  Temps de décélération $td$  Diamètre de roue : $D_a = 2R_a$  Distance de freinage $df$	De 1 à 1,3m/s  10%  Véhicule chargé : $ta=5s$ Véhicule à vide : $ta=2s$  Véhicule chargé : $td=3s$ Véhicule à vide : $td=1,5s$  $D_a : 220$ à $250mm$  Véhicule chargé : $df=2m\pm 0,1m$ Véhicule à vide : $df=1m\pm 0,1m$
<b>FP122</b>	Alimenter électriquement	Tension d'alimentation $U_1$	Réseau EDF : 230V, 50Hz
<b>FP13</b>	Gérer la distance entre les véhicules	Nombre de véhicules  Longueur maximale de la piste  Écart minimal entre deux véhicules	16 maximum  $Lp=192m$  $1m$

Dans un premier temps l'étude portera sur l'analyse fonctionnelle.

**Q1** – Décrire les solutions techniques mises en œuvre pour maintenir le passager sur son siège.

**Q2** – Identifier sur le diagramme FAST le repère de la fonction correspondante.

**Q3** – Calculer la durée minimale d'un parcours complet, véhicule chargé.

La suite de l'étude portera sur les points suivants :

**FP12 : transporter deux personnes.**

L'objectif est l'amélioration de la disponibilité.

**FC1 : assurer le confort et la sécurité des passagers.**

L'objectif est l'amélioration de la sécurité.

## 2. Étude de la fonction FP12 : transporter deux personnes.

L'objectif est d'améliorer la disponibilité du manège.

L'analyse de l'activité du service maintenance fait ressortir les points suivants :

- changements fréquents des pare-chocs dus aux collisions entre véhicules,
- remplacement des moteurs (6 moteurs par saison),
- remplacement des roulements de guidage de la nacelle.

Cette étude permet d'identifier l'origine des problèmes et d'apporter des solutions pertinentes.

### 2.1. Objectif : déterminer les limites de la solution actuelle.

La structure de la nacelle et le vocabulaire utilisé sont présentés en **annexes 1 et 2**.

Données complémentaires :

- masse du véhicule et de ses passagers :  $M_t$
- vitesse maximale du véhicule :  $V_M$
- vitesse de rotation du moteur d'axe  $y$  :  $\omega_m$
- vitesse de rotation des roues arrières d'axe  $y$  :  $\omega_a$
- vitesse de rotation de l'arbre à la sortie du réducteur :  $\omega_r$
- rapport de réduction des deux pignons :  $k_e = \frac{\omega_a}{\omega_r}$
- rapport de réduction du réducteur :  $k_r = \frac{\omega_r}{\omega_m}$
- inertie des roues arrières droite et gauche autour de leur axe :  $J_{ad}$  et  $J_{ag}$
- inertie du rotor du moteur autour de son axe :  $J_m$
- rendement global de la chaîne de transmission :  $\eta$
- intensité de l'effort axial de frottement sec (Loi de Coulomb) dû au frottement des balais sur les rails :  $F_f$
- accélération de la pesanteur :  $g = 10m/s^2$
- nombre de dents du pignon 1 à la sortie du réducteur :  $Z_r$ , nombre de dents du pignon 2 sur la roue :  $Z_a$
- rayon de la roue arrière motrice :  $R_a$

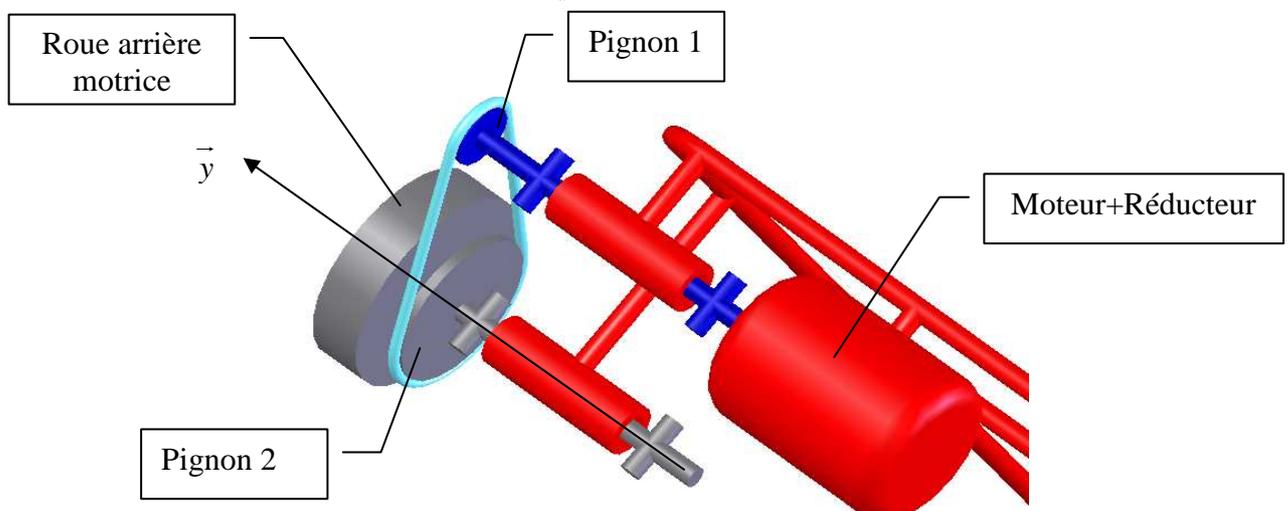


Figure 2 – Transmission du véhicule

**Q4** – Dans la phase où le véhicule monte la pente de 6% à vitesse maximale, en ligne droite, on cherche à déterminer le couple  $C_u$  que doit fournir le moteur.

**Pour répondre aux questions suivantes, donner l'expression littérale avant d'effectuer l'application numérique.**

Pour cette étude, la nacelle est considérée fixe par rapport au chariot.

a) Expliquer pourquoi la pente de 6% correspond à un angle de  $3,43^\circ$ .

b) Exprimer  $\omega_a$  en fonction de  $V_M$  et  $R_a$ ,  $\omega_r$  en fonction de  $\omega_a$ ,  $Z_r$  et  $Z_a$ ,  $\omega_m$  en fonction de  $k_r$  et  $\omega_r$  dans le cas où le véhicule est en vitesse maximale et les roues arrières usées au maximum.

c) Calculer l'inertie du rotor du moteur  $J_m$  par rapport à son axe à l'aide du modèle donné. La densité du matériau de ce rotor est  $7,8 \text{ kg} / \text{dm}^3$ .

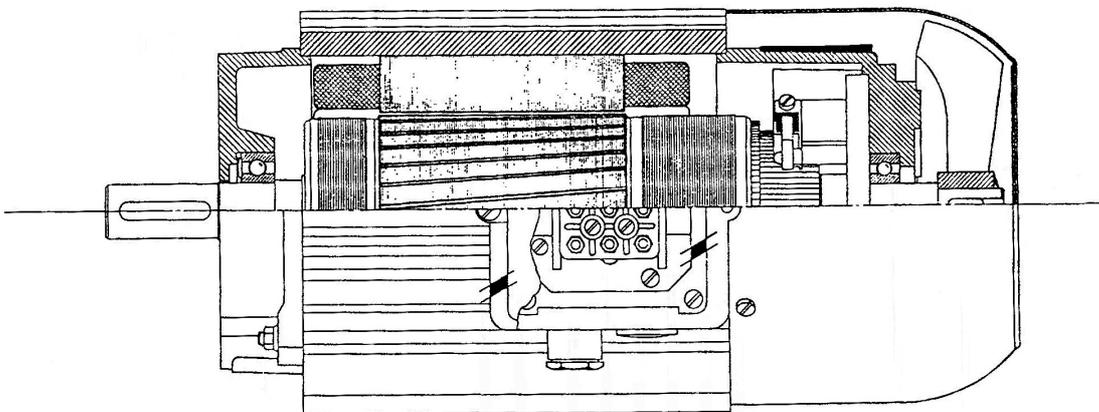


Figure 3 - Moteur

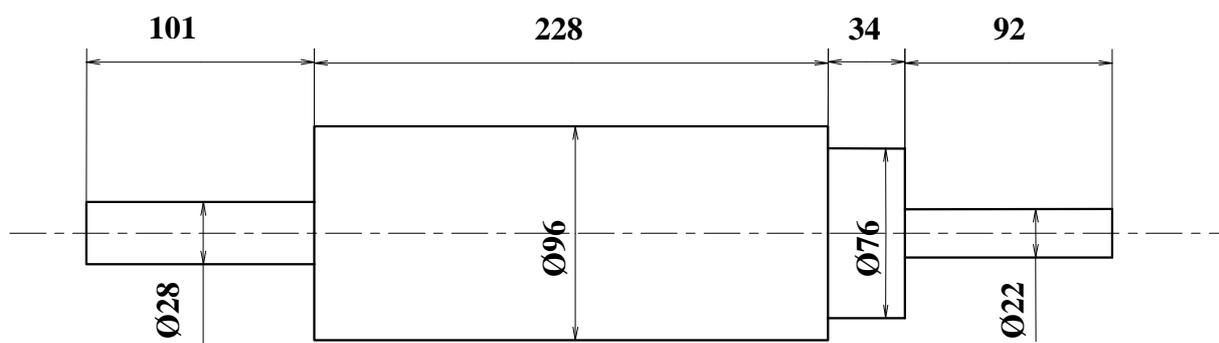


Figure 4 – Modèle simplifié du rotor (les dimensions sont données en mm)

Pour la suite du problème, on pourra considérer une valeur d'inertie du rotor du moteur  $J_m = 16.10^{-3} \text{ kg.m}^2$ .

d) Exprimer en fonction de  $\omega_m$ , l'énergie cinétique dans son mouvement par rapport à  $R_0$  de :

- l'ensemble du véhicule et des deux passagers en mouvement de translation (énergie cinétique que l'on notera  $T_1$ ),
- des deux roues arrières (notée  $T_2$ ),
- du rotor de l'arbre moteur (notée  $T_3$ ).

L'énergie cinétique des autres éléments dans leur mouvement par rapport à  $R_0$  est négligée.

- e) Exprimer l'inertie équivalente (notée  $J_{eq}$ ) de l'ensemble ramenée sur l'arbre moteur.
- f) Écrire le théorème de l'énergie cinétique sous la forme générale en identifiant clairement vos notations.
- g) Écrire le bilan des puissances sans oublier la puissance perdue par frottement au niveau des balais et les pertes liées au rendement de la transmission.
- h) Écrire le théorème de l'énergie cinétique appliqué au véhicule complet.
- i) Exprimer en fonction de  $M_t$ ,  $R_a$ ,  $k_e$ ,  $k_r$ ,  $J_{ad}$ ,  $J_{ag}$ ,  $J_m$ ,  $g$ ,  $\alpha$ ,  $\omega_m$  le couple moteur  $C_u$  dans le cas d'un modèle simplifié où les liaisons sont parfaites.
- j) Réaliser l'application numérique en considérant que la vitesse maximale est atteinte en 5s. Préciser le signe du couple  $C_u$ .

Pour les applications numériques, on prendra :

- $V_M = 1,3m/s$
- $R_a = 110mm$
- $Z_r = 17$ ,  $Z_a = 45$
- $k_r = \frac{1}{8,98}$
- $J_{ag} = J_{ad} = 25.10^{-6} kg.m^2$ ,  $J_m = 16.10^{-3} kg.m^2$

**Q5** – Dans la phase de descente à vitesse constante, en considérant un modèle simplifié où toutes les liaisons sont parfaites, calculer la valeur du couple moteur  $C_u$ . Préciser le signe de ce couple.

La prise en compte des frottements de la transmission entraîne pour la suite de l'étude que les valeurs maximales retenues pour le couple  $C_u$  à la sortie du moteur à courant continu sont de  $5Nm$  en montée et  $-2Nm$  en descente.

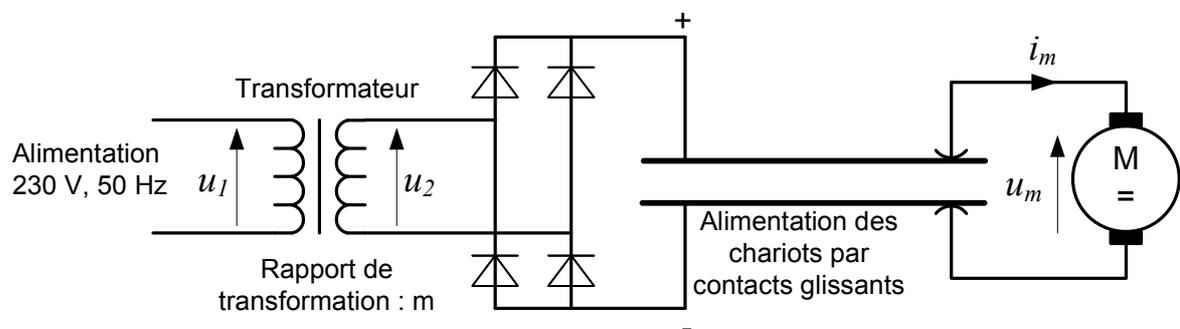


Figure 5 – Alimentation du moteur

**Q6** – Dans cette question, on cherche à déterminer le rapport de transformation  $m$  en fonction de la tension d'alimentation du moteur.

La tension nominale d'alimentation du moteur est de  $41V$ .

Notations :

$u_m$  : valeur de la tension instantanée aux bornes du moteur,

$i_m$  : valeur du courant instantané dans le moteur,

$\bar{U}_m$  : valeur moyenne de la tension  $u_m$ ,

$U_2$  : valeur efficace de la tension aux bornes du secondaire du transformateur,

$m$  : rapport de transformation du transformateur d'alimentation.

Les diodes seront considérées comme parfaites, sans tension de seuil.

a) Représenter sur le **document réponse 1** la tension d'alimentation  $u_m$  du moteur (la conduction est continue, donc le courant  $i_m$  est ininterrompu).

b) Déterminer l'expression littérale de  $\bar{U}_m$  en fonction de  $U_2$ .

c) Calculer  $U_2$  pour que  $\bar{U}_m$  soit de  $41V$ .

d) Donner la valeur numérique de  $m$ .

**Q7** – Le cahier des charges impose une variation de vitesse maximale tolérée de 10%. Nous allons vérifier ce critère d'appréciation.

Le modèle retenu pour le moteur (représenté par la figure 6) est le suivant :

- résistance d'induit  $R=0,17 \Omega$
- constante de fem  $K_e=0,15 V.s/rad$
- constante de couple électromagnétique  $K_c=0,15 Nm.A^{-1}$
- couple de pertes  $C_p=1Nm$
- vitesse angulaire de rotation du rotor du moteur :  $\omega_m$  (rad/s)

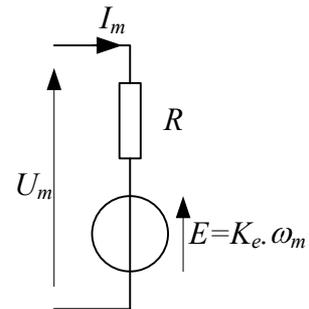


Figure 6 – Modèle du moteur

Le moteur est alimenté sous une tension constante égale à  $41V$ .

a) Exprimer le couple électromagnétique  $C_{em}$  en fonction du couple utile  $C_u$  et du couple de perte  $C_p$ .

b) Exprimer le courant moteur  $I_m$  en fonction de  $C_u$  et de  $C_p$ .

c) Quelles sont les valeurs numériques extrêmes du courant  $I_m$  ?

d) Quelles sont, dans ces conditions, les vitesses de rotation des moteurs  $\omega_m$  ?

e) Quelles sont les vitesses  $V_c$  correspondantes des véhicules ? On prendra  $R_a=110mm$ . Conclure sur la variation de la vitesse en fonction du niveau proposé par le cahier des charges fonctionnel.

f) L'alimentation du moteur est-elle réversible en courant ? Justifier. Donner la conséquence sur la vitesse du véhicule.

g) Conclure sur les causes de la fréquence des collisions entre véhicules.

## 2.2. Objectif : améliorer le convertisseur d'énergie.

Une des solutions consiste à conserver les moteurs à courant continu, à alimenter le rail en basse tension alternative et à équiper chacun des véhicules avec un convertisseur d'énergie de manière à pouvoir réguler individuellement la vitesse de chaque véhicule.

**Q8** – Proposer, sur le **document réponse 2**, le schéma de principe d'un convertisseur à base de pont tout thyristor permettant d'obtenir le fonctionnement souhaité.

La solution précédente n'a pas été retenue par le service maintenance qui a préféré remplacer pour chaque véhicule le moteur à courant continu par un moteur asynchrone triphasé associé à un variateur de vitesse (convertisseur de fréquence). La raison essentielle de ce choix est la maintenance réduite de ce type de moteur par rapport au moteur à courant continu (pas d'usure de balais, pas de court-circuit dû à la présence de poussière de carbone dans les moteurs).

## 2.3. Objectif : dimensionner la solution proposée.

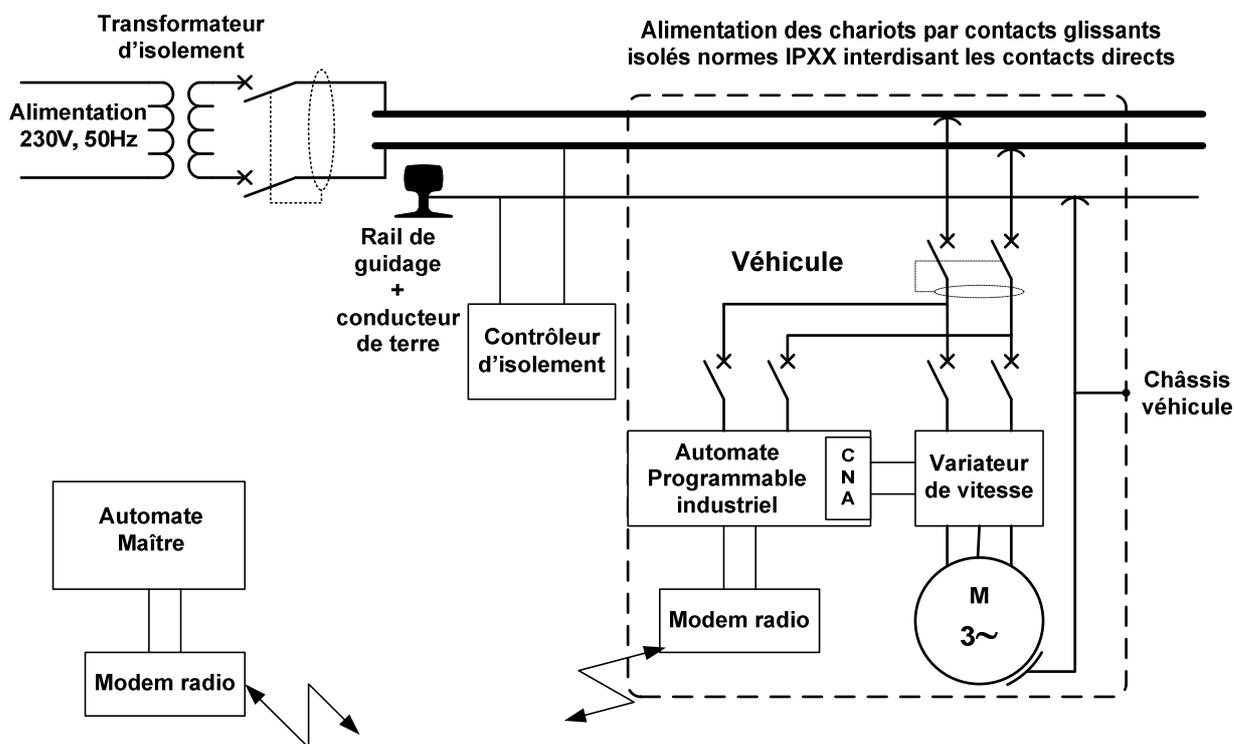


Figure 7 – Schéma de principe de l'installation

L'alimentation des véhicules se fait en 230V, 50 Hz, chaque véhicule est équipé d'un automate programmable industriel, tous les automates sont en liaison avec un automate maître fixe situé dans la station par un réseau modbus.

Les moteurs asynchrones triphasés SEW modèle DV 100 M4 sont alimentés par des variateurs de vitesse, l'entrée de consigne de ces variateurs est fournie par une sortie analogique de l'automate. La transmission mécanique est dimensionnée de manière à ce que la vitesse de translation du chariot soit de  $1,3m/s$  lorsque le moteur tourne à  $n=1400tr/min$ , le couple utile à la sortie du moteur est compris entre  $10Nm$  et  $-4Nm$ .

On s'intéresse maintenant à la fonction FP 1212 : **gérer la vitesse.**

L'objectif est ici de conclure sur la nécessité éventuelle d'équiper chaque chariot d'une régulation de vitesse sachant que la variation de vitesse maximale tolérée par le cahier des charges est de 10%.

L'expression du couple électromagnétique du moteur asynchrone en fonction du glissement déduite des propriétés du schéma équivalent monophasé est de la

$$\text{forme : } C_{em} = \frac{3U^2}{\Omega_s} \cdot \frac{R_2 \cdot g}{R_2^2 + X_2^2 \cdot g^2}$$

Avec :  $C_{em}$  : couple électromagnétique,

$U$  : valeur efficace de la tension composée,

$\Omega_s$  : vitesse angulaire de rotation du champ tournant,

$R_2$  : résistance d'une phase du rotor, ramenée au stator,

$X_2$  : réactance d'une phase du rotor ramenée au stator avec

$$X_2 = L_2 \cdot \omega, \quad \omega = 2\pi f, \quad f : \text{fréquence des courants statoriques,}$$

$$g : \text{glissement } g = \frac{\Omega_s - \omega_m}{\Omega_s}$$

$\omega_m$  : vitesse angulaire de rotation du rotor du moteur.

Le moteur est connecté en triangle.

Le couple de pertes est négligé :  $C_{em} = C_u$  (couple utile).

**Q9** – Dans la zone de fonctionnement du moteur, la caractéristique  $C_{em}=f(g)$  peut être modélisée par une droite paramétrée par  $\Omega_s$ . Il convient de déterminer l'équation de cette droite.

La caractéristique  $C_{em}=f(g)$  passe par un maximum  $C_M$  pour une valeur  $g_M$  du glissement (voir figure 8).

a) En utilisant les propriétés de la dérivée, déterminer l'expression de  $g_M$  en fonction de  $R_2$  et  $X_2$ .

b) Donner l'expression de  $C_M$  en fonction de  $U$ ,  $\Omega_s$  et  $X_2$ .

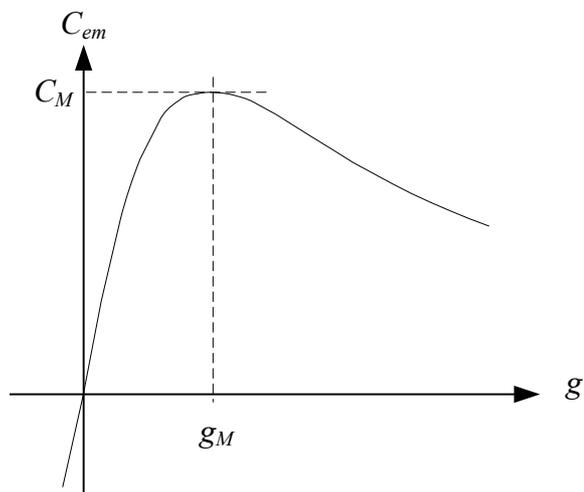


Figure 8 – Caractéristique  $C_{em}=f(g)$

c) Montrer que  $C_{em}$  peut se mettre sous la forme :

$$C_{em} = 2C_M \cdot \frac{x}{1+x^2} \quad \text{avec } x = \frac{g}{g_M}$$

Le moteur utilisé a les caractéristiques suivantes pour une alimentation à 50 Hz :

Type moteur	$P_N$ [kW]	$M_N$ [Nm]	$n_N$ [tr/min]	$I_N$ 380-415V [A]	$\cos \varphi$	$I_A/I_N$	$J_{Mot}$ [ $10^{-4}kgm^2$ ]	$M_{max}$ [Nm]
DV100M4	2,2	15	1410	4,9	0,83	5,9	53	40

$P_N$  : puissance nominale

$\cos \varphi$  : facteur de puissance

$M_N$  : couple nominal

$I_A/I_N$  : rapport entre le courant de démarrage et  $I_N$ .

$n_N$  : vitesse nominale du rotor

$J_{mot}$  : inertie du moteur

$I_N$  : courant nominal

$M_{max}$  : couple maximal

d) Exprimer la vitesse angulaire de rotation du champ tournant  $\Omega_s$  en fonction de la fréquence  $f$  des courants statoriques et du nombre de paires de pôles  $p$ .

e) En utilisant les caractéristiques du moteur et en considérant qu'en fonctionnement nominal le glissement est faible, déterminer le nombre de paires de pôles  $p$  du moteur asynchrone.

f) En utilisant le résultat de la question Q9c et les caractéristiques du moteur, calculer la valeur de  $g_M$  sachant que  $x$  est inférieur à 1.

Les résultats précédents permettent d'obtenir une expression linéarisée de la caractéristique de couple  $C_{em}=f(g)$  autour de la vitesse de synchronisme. L'expression de  $C_{em}$  devient alors :  $C_{em} = 1,65 \cdot \Omega_s \cdot g$ .

**Q10** – Nous allons déterminer la fréquence de la tension d'alimentation pour que le chariot se déplace à  $1,3m/s$ , lorsque le couple moteur est de  $10Nm$ .

a) Donner l'expression de  $C_{em}$  en fonction de  $f$ ,  $p$  et  $\omega_m$  (vitesse angulaire de rotation du rotor en rad/s).

b) Calculer la fréquence  $f$  des courants d'alimentation du moteur pour que le chariot se déplace à  $1,3m/s$  lorsque le couple moteur est de  $10Nm$ .

Le couple pouvant devenir négatif, la structure du convertisseur doit permettre cette inversion. Il faut d'abord s'assurer de la réversibilité du système utilisé.

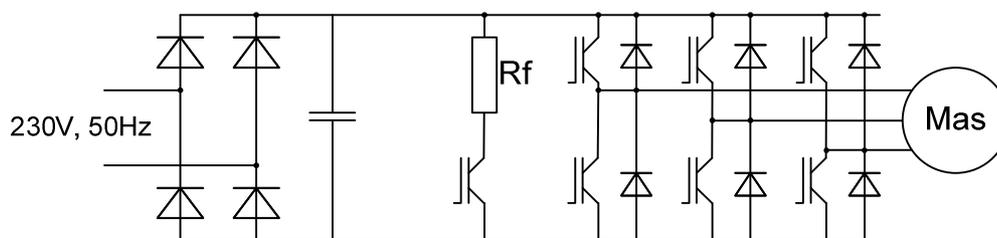


Figure 9 – Schéma de principe du convertisseur de fréquence

Les transistors sont considérés comme des interrupteurs commandés et le dispositif de commande n'est pas représenté.

**Q11** – Le schéma de principe du convertisseur de fréquence est représenté sur la figure 9. Conclure en explicitant la réponse sur la réversibilité demandée.

Le cahier des charges impose une variation de vitesse maximale tolérée de 10%. Nous allons vérifier ce critère d'appréciation sur cette nouvelle solution.

**Q12** – La fréquence des courants d'alimentation étant celle calculée à la question Q10b, calculer la vitesse de rotation du moteur lorsque le couple passe à  $-4Nm$ .

**Q13** – En considérant les variations extrêmes de la vitesse en fonction des variations du couple, conclure quant à la nécessité de réguler la vitesse.

**Q14** – Pour valider complètement cette solution, il faut vérifier que l'automate peut délivrer l'ordre nécessaire à l'obtention de cette fréquence.

La plage de fréquence du variateur de vitesse est de 0 à 80Hz pour une tension de commande variant de 0 à 10V. La sortie analogique de l'automate (0 – 10V) est codée sur 12 bits.

a) Établir la relation entre la fréquence du variateur  $f_v$  et la sortie analogique de l'automate  $U_c$ .

b) Donner la valeur de  $U_c$  pour que le moteur tourne dans les conditions fixées précédemment.

c) Quelle est la valeur du mot de commande automate  $M_c$  correspondant ?

**Q15** – Conclure quant aux avantages et aux inconvénients de l'utilisation des moteurs asynchrones.

#### **2.4. Objectif : proposer une amélioration du montage des roulements de guidage de la nacelle de manière à minimiser la maintenance.**

La liaison pivot entre le chariot et la nacelle est représentée en **annexe 3**.

La masse des passagers est de 170kg, la masse de la nacelle est de 100kg. Le centre de gravité de la nacelle est déporté vers l'arrière par addition d'un contrepoids afin de faciliter son mouvement de rotation.

**Q16** – Déterminer la position du centre de gravité (noté CDG) de la partie supérieure du chariot (Passagers+Nacelle+Contrepoids) par rapport à l'axe de rotation (voir figure 10).

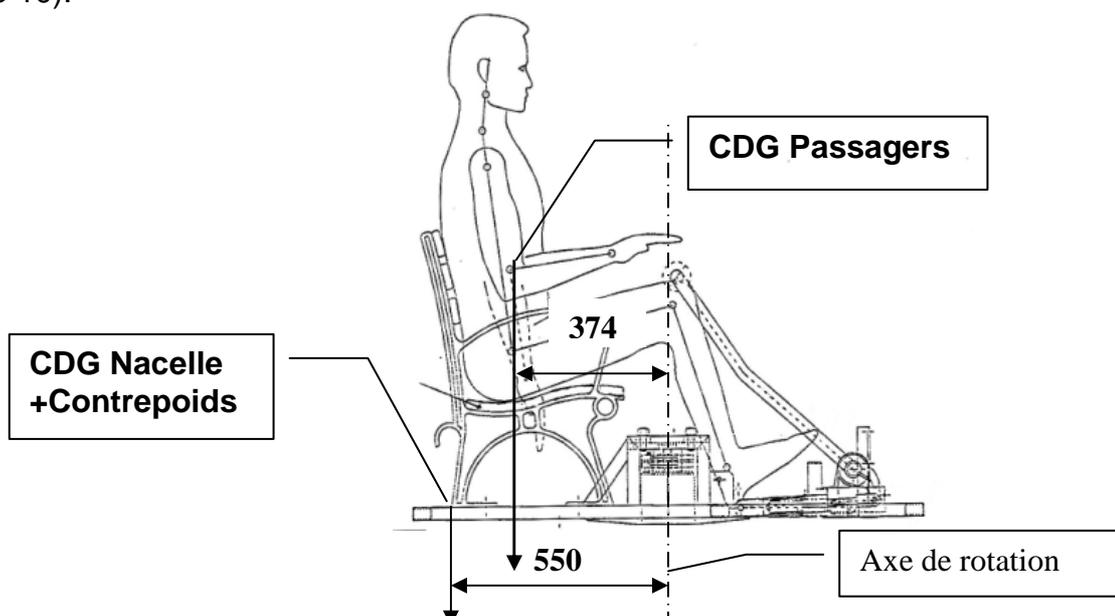


Figure 10 – Position des centres de gravité. Les grandeurs sont en mm

**Q17** – Un ressort de traction est attaché à la nacelle et au chariot. Sa longueur libre est  $l_0 = 420mm$ . Sous un effort  $F$  de 120N, sa longueur est  $l = 500mm$ .

Exprimer la caractéristique de raideur  $k$  du ressort en fonction de  $F$ ,  $l$  et  $l_0$ .

**L'étude du comportement dynamique** de la nacelle pour son orientation étant relativement complexe, on utilise un logiciel de simulation. Il faut alors identifier certains paramètres nécessaires à la construction du modèle.

Ce modèle est décrit sur le **document réponse 3**.

**Q18** – Renseigner sur ce document le tableau regroupant les différents paramètres qui seraient nécessaires à la réalisation de cette étude par simulation numérique.

**Q19** – L'**annexe 3** décrit la liaison pivot entre nacelle et chariot. Afin de calculer les efforts sur les roulements, on propose le modèle cinématique figure 11. Justifier le modèle retenu. Donner les torseurs **statiques** correspondants sachant que la liaison pivot est d'axe  $(B, \vec{z})$ . On écrira les torseurs sous la forme suivante :

$$\{T_{i \rightarrow j}\} = \begin{Bmatrix} X_{Ai \rightarrow j} & L_{Ai \rightarrow j} \\ Y_{Ai \rightarrow j} & M_{Ai \rightarrow j} \\ Z_{Ai \rightarrow j} & N_{Ai \rightarrow j} \end{Bmatrix}_{(x, y, z)}^A$$

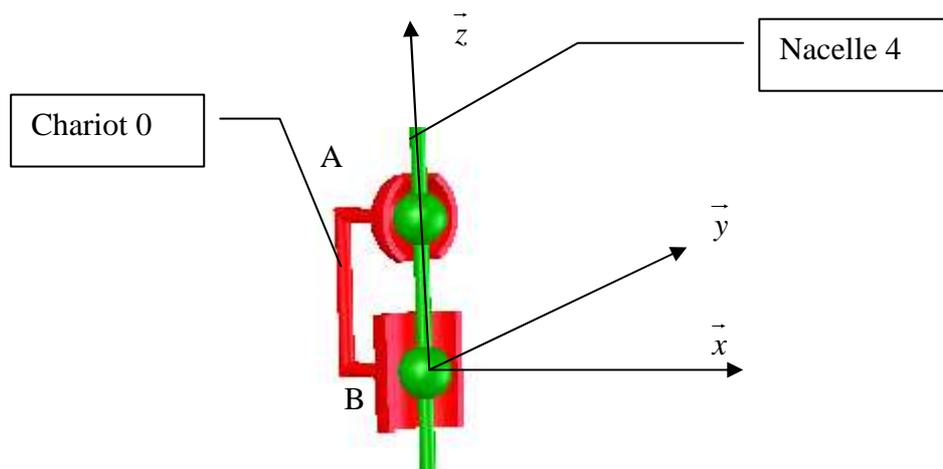


Figure 11 - Modèle de la liaison pivot chariot-nacelle

Suite à la détérioration rapide des roulements dans la liaison pivot chariot-nacelle, on se propose de calculer **en statique** les efforts dans les roulements. Un opérateur exerce à l'arrêt un effort sur la nacelle afin de tourner celle-ci de  $90^\circ$  par rapport au chariot.

**Q20** – Exprimer en fonction de  $l_0$  (longueur à vide) du ressort ainsi que de sa caractéristique de raideur  $k$ , l'effort  $F$  créé par ce ressort.

**Q21** – Effectuer l'application numérique avec  $k = 2N/mm$  et  $l_0 = 420mm$ .

a) Lorsque la nacelle est tournée de  $90^\circ$  par rapport au chariot. (position de la figure 12 qui permet aux passagers de regarder les décors situés le long du parcours).

b) Lorsque la nacelle et le chariot sont alignés.

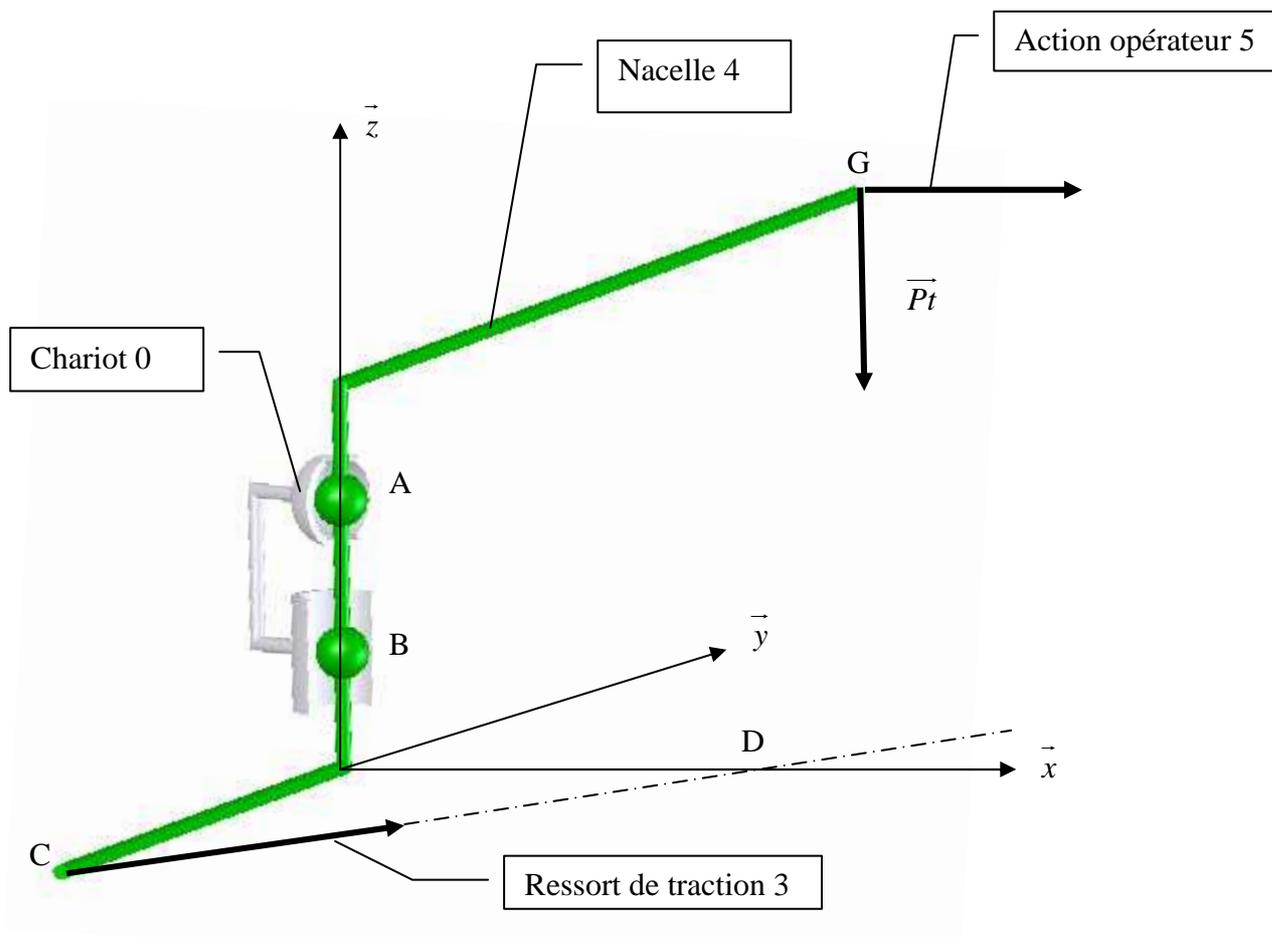


Figure 12 – Modèle de la nacelle pour l'étude statique

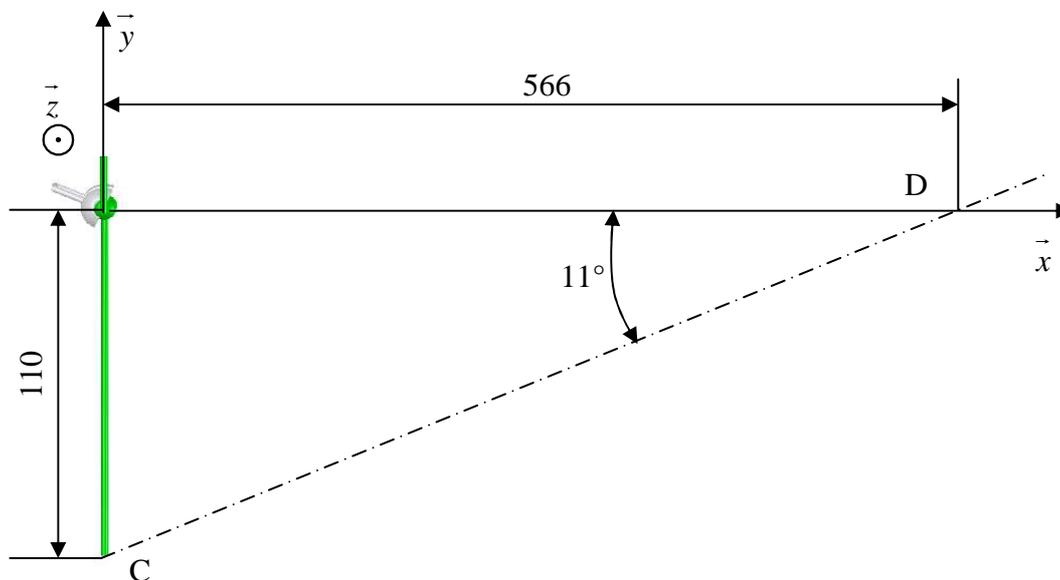


Figure 13 – Vue de dessus du modèle précédent

c) Dans la position où la nacelle est tournée de 90° par rapport au chariot (voir figures 12 et 13), isoler la nacelle (4) et donner sous forme littérale tous les torseurs correspondants aux actions extérieures. On appellera  $\|\vec{F}\|$  la norme de l'action du ressort sur la nacelle.

L'opérateur agit suivant l'axe  $\vec{x}$ . On prendra  $g = 10m/s^2$

$$\overrightarrow{AG} \begin{vmatrix} 0 \\ 439 \\ 290 \end{vmatrix} \quad \overrightarrow{AB} \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ -109 \end{vmatrix} \quad \overrightarrow{AC} \begin{vmatrix} 0 \\ -110 \\ -221 \end{vmatrix}$$

d) Écrire les éléments de réduction de l'ensemble des torseurs au point A.

e) Avec  $\|\vec{F}\| = 320N$ , on trouve  $X_{A0 \rightarrow 4} = 34,65N$ ,  $Y_{A0 \rightarrow 4} = -10811,57N$  et  $Z_{A0 \rightarrow 4} = 2700N$ . La formule sur le calcul de la durée de vie des roulements est

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^n \text{ avec } P = F_r + Y_1 F_a \text{ si } \frac{F_a}{F_r} \leq e \text{ et } P = 0,67 F_r + Y_2 F_a \text{ si } \frac{F_a}{F_r} > e.$$

Il est demandé :

- d'expliciter les termes  $L_{10}, C, P, n, F_a$  et  $F_r$
- de préciser l'unité pour  $L_{10}$ ,
- de calculer la durée de vie du roulement à rotule sur rouleaux, en tenant compte des données constructeur.

Dimensions d'encombrement			Charges de base		Vitesses de base		Désignation	Coefficients de calcul			
d	D	B	C(dyn)	$C_0$ (stat)	Graisse	Huile		e	$Y_1$	$Y_2$	$Y_0$
mm			N	N	tr/min		-	-			
60	110	28	140000	173000	4300	5300	22212E	0,24	2,8	4,2	2,8

**Q22** – La solution adoptée par le constructeur ne donne pas satisfaction malgré les résultats théoriques donnés par les calculs. Les roulements sont détériorés rapidement. On propose sur le **document réponse 4** une nouvelle solution basée sur l'utilisation de roulements différents.

a) Préciser le type de roulements utilisés, ainsi que la nature du montage.

b) Compléter la nouvelle solution en réalisant ensemble des arrêts, forme axe et boîtier, étanchéité.

c) Préciser sur votre dessin les ajustements qui vous semblent nécessaires au bon fonctionnement.

### 3. Amélioration de la sécurité.

Le service maintenance a décidé d'améliorer la sécurité en agissant sur les points suivants :

- régularité de l'espacement entre les véhicules,
- vérification de la résistance des barres de sécurité,
- mesure des efforts exercés sur la barre de sécurité.

### 3.1. Étude de la fonction principale FP13 : gérer la distance entre véhicules.

Sur la solution actuelle, un capteur de proximité gère les collisions de manière très imparfaite (non détection dans les virages).

Il a été décidé d'évaluer la position des véhicules sur la piste en utilisant un codeur incrémental fixé sur la roue arrière motrice.

Ce codeur (voir ci-contre) est constitué d'un disque de comptage fixé sur la roue sur lequel sont pratiqués un certain nombre de dents, 2 détecteurs de proximités fixés sur le châssis envoient à l'automate une impulsion à chaque passage d'une des dents.

Les impulsions sont comptées par l'automate. La présence de deux capteurs permet de discriminer le sens de rotation.



Figure 14 - Roue arrière motrice

L'automate choisi par l'exploitant possède des mots de comptage  $M_i$  codés sur 13 bits et la fréquence de comptage est limitée à  $5kHz$ .

Il faut prévoir la fabrication en sous-traitance des disques de comptage et vérifier la compatibilité avec l'automate et la conformité avec le cahier des charges.

On rappelle les données suivantes :

- le diamètre minimal des roues est de 220mm,
- la longueur de la piste est de 192m.

**Q23** – Il est nécessaire de déterminer d'abord le nombre maximal de dents des disques de comptage pour définir des plans de fabrication.

- Donner la valeur maximale en base 10 du mot automate  $M_i$ .
- Déterminer le nombre de tours de roue nécessaire pour parcourir la longueur totale de la piste.
- Déterminer le nombre maximal de dents que devrait posséder la roue pour ne pas dépasser la capacité automate.
- Proposer un procédé de fabrication pour les disques de comptage.

**Q24** – La solution retenue pour des raisons de réalisation est de 19 dents.

La vitesse maximale du véhicule est de  $1,3m/s$ .

- Donner la distance minimale  $d_{min}$  parcourue entre 2 fronts montants d'un des détecteurs de proximités (résolution).

b) En déduire la fréquence maximale  $f_{max}$  des signaux à l'entrée de l'automate.

Dans l'automate du véhicule, le mot  $M_1$  contient sa position actuelle, le mot  $M_2$  contient la position du véhicule précédent.

c) Quelle relation entre les mots  $M_1$  et  $M_2$  doit être implantée dans l'automate pour vérifier que les deux véhicules respectent l'écart minimal de 1m prévu par le cahier des charges.

d) Conclure sur le nombre de dents du disque, la compatibilité avec l'automate et le respect de la distance minimale.

### 3.2. Étude de la fonction complémentaire FC12 : être maintenu durant le parcours.

L'annexe 4 présente le système de verrouillage de la barre de sécurité.

**Q25** – La figure 15 représente le schéma cinématique du mécanisme permettant le verrouillage de la barre de sécurité. P, Q, R et S représentent le centre des liaisons. Tracer le graphe des liaisons en précisant pour chacune leurs caractéristiques géométriques (centre, direction) ainsi que leurs degrés de liberté.

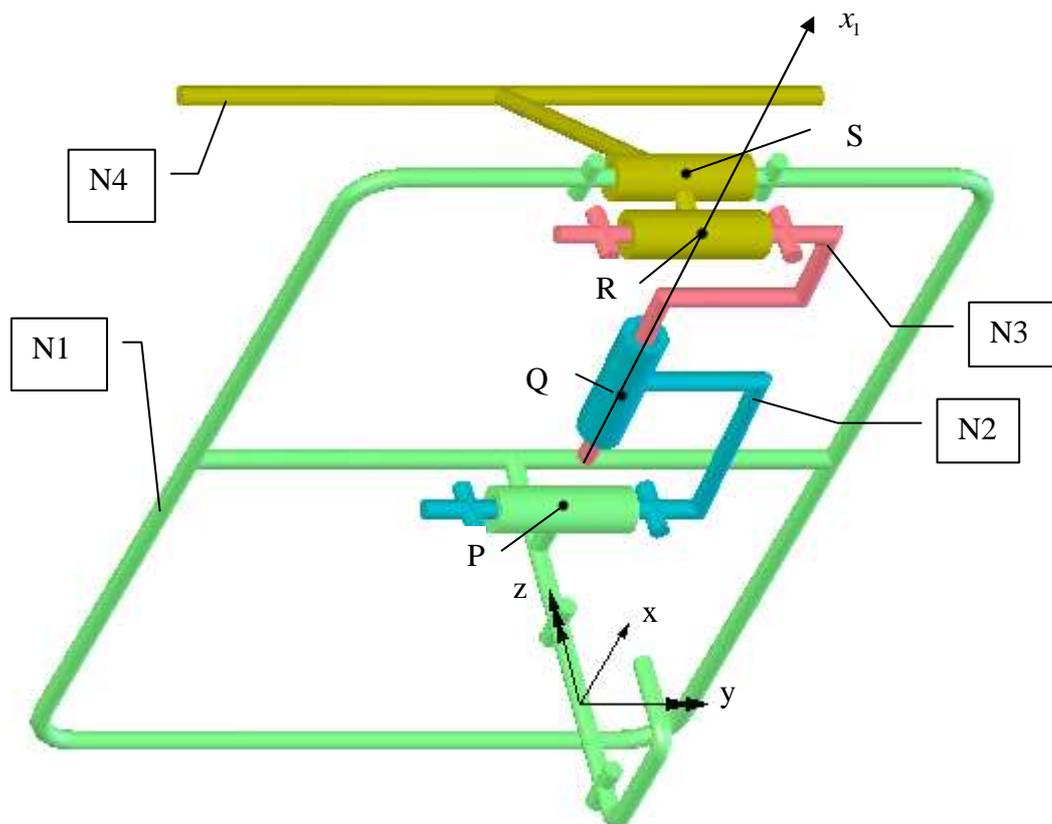


Figure 15 - Schéma cinématique du mécanisme permettant le verrouillage de la barre de sécurité

**Q26** – Déterminer le degré d'hyperstatisme de ce mécanisme.

**Q27** – À partir de votre résultat, préciser les conditions géométriques qu'il faut imposer au coulisseau N2 pour que le système fonctionne correctement.

Reproduire à main levée le dessin du coulisseau en y indiquant l'ensemble de ces conditions.

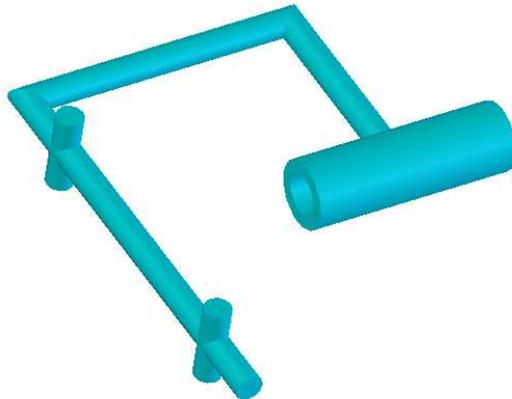


Figure 16 – Dessin du coulisseau

**Q28** – Préciser les spécifications géométriques de cotation ISO (Cotation GPS) qui permettraient de traduire ces conditions sur le dessin de définition du coulisseau.

**Q29** – Proposer au moins une solution permettant de rendre ce système isostatique, en conservant la liaison pivot glissant qui participe au verrouillage de la barre de sécurité.

**L'annexe 4** décrit la liaison entre la barre de sécurité et l'arbre de manœuvre qui est réalisée par clavetage. La partie suivante consiste à vérifier si les clavettes résistent à un freinage brusque. Dans ce cas, les passagers provoquent sur la barre un effort  $\vec{F}_f$  de module 156N.

**Q30** – Les **deux** clavettes sont en acier C35 qui a une limite minimale apparente d'élasticité  $R_{e\min} = 335MPa$  et une résistance pratique au glissement  $R_{pg} = 80MPa$ .

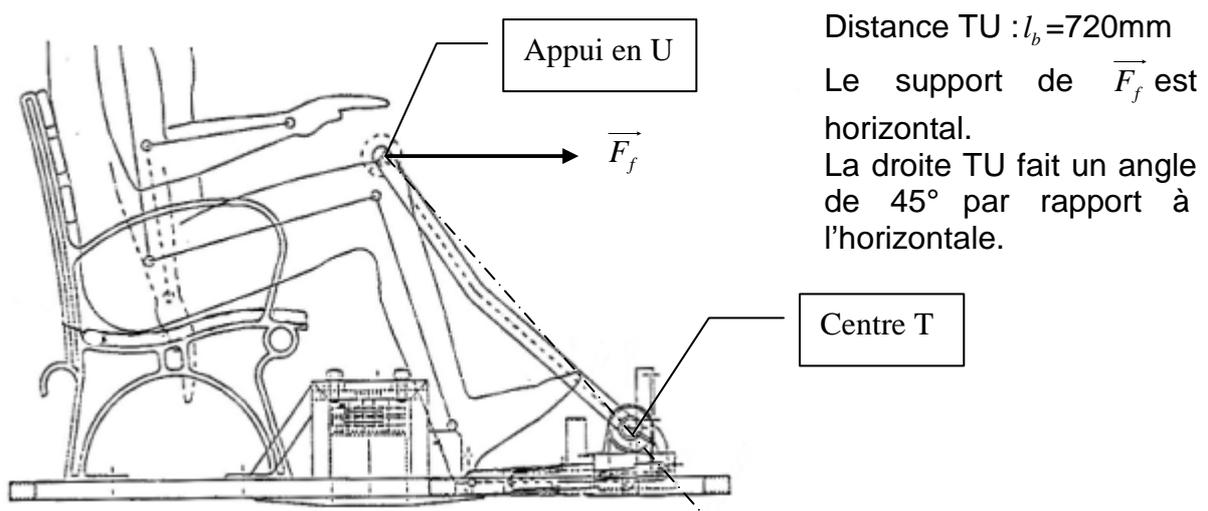


Figure 17- Effort dû aux passagers U sur la barre de sécurité

Les contraintes tangentielles dans les clavettes sont nommées  $\tau$ .

a) Déterminer littéralement le couple  $C_p$  exercé par les passagers sur la barre de manœuvre lors de ce freinage brusque. À l'aide des grandeurs précédentes, effectuer l'application numérique.

b) Par sécurité, on considère que le couple  $C_p$  qui est supporté par les clavettes est de 90Nm. La longueur d'une clavette est nommée  $l_c$ . Soit T l'effort tranchant sur une clavette. Après avoir précisé les hypothèses de calcul, donner littéralement la formule qui permet de déterminer la longueur des clavettes par un calcul de résistance au cisaillement. Effectuer l'application numérique.

c) La pression de matage du matériau constituant la clavette est  $p_{ad} = 30\text{Mpa}$ . Déterminer littéralement puis numériquement la longueur  $l_c$  de la clavette après avoir précisé les hypothèses de calculs. Les clavettes utilisées actuellement sur la nacelle ont une longueur de 50mm. Justifier le choix du constructeur.

### 3.3. Étude de la fonction complémentaire FC122 : mesurer l'effort exercé sur la barre.

En fonctionnement normal, l'effort exercé sur la barre doit être compris entre 5N et 100N. Si l'effort est inférieur, la barre n'est pas correctement en place (actionneur défectueux). Si l'effort est supérieur, la cause est soit un ralentissement trop brutal, soit une action volontaire des passagers. Dans tous les cas, l'opérateur doit être prévenu de l'incident. L'exploitant se propose d'implanter un capteur à base de jauges de contrainte sur la barre à l'endroit où la contrainte est la plus forte (voir figure 18).

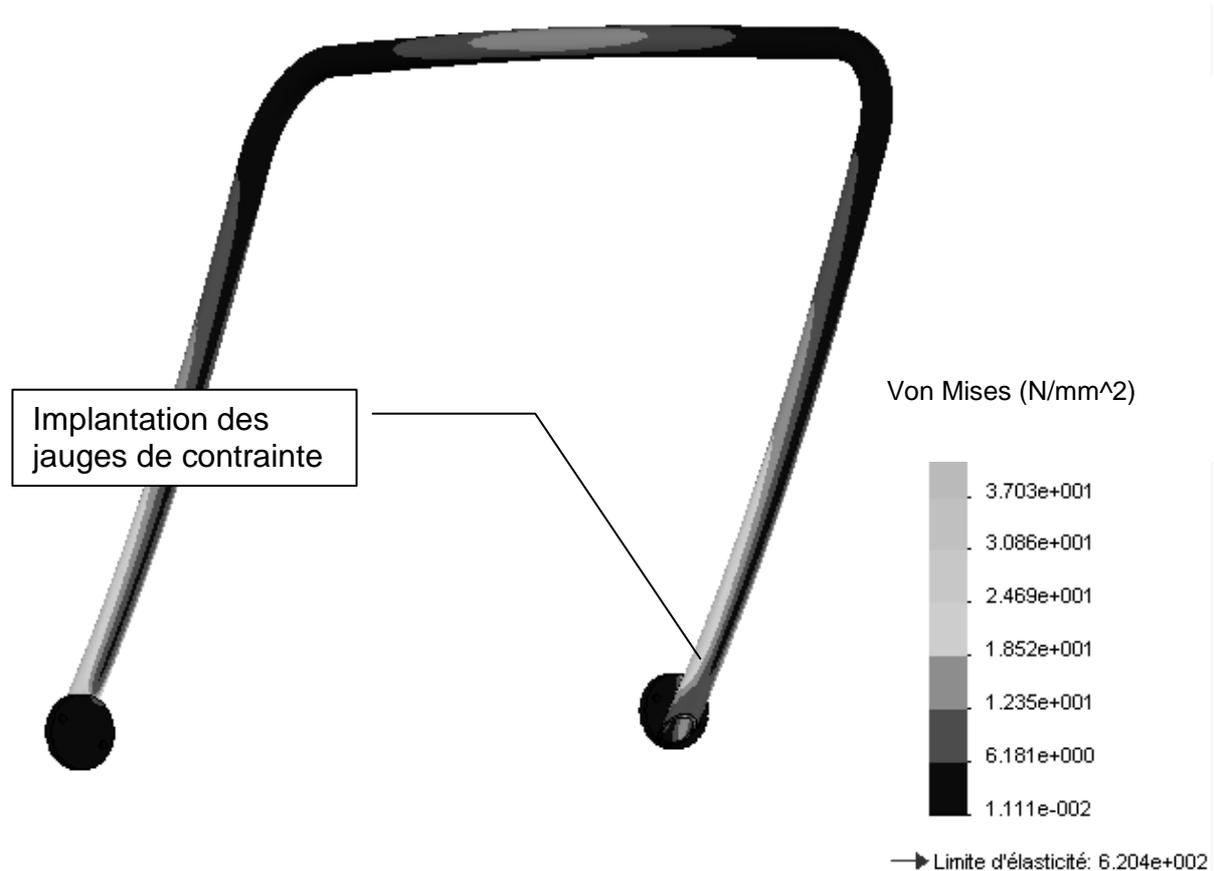


Figure 18 – Implantation des jauges de contrainte



Le schéma interne de l'amplificateur est le suivant (figure 21) :

Les amplificateurs opérationnels sont supposés idéaux et fonctionnent tous en régime linéaire.

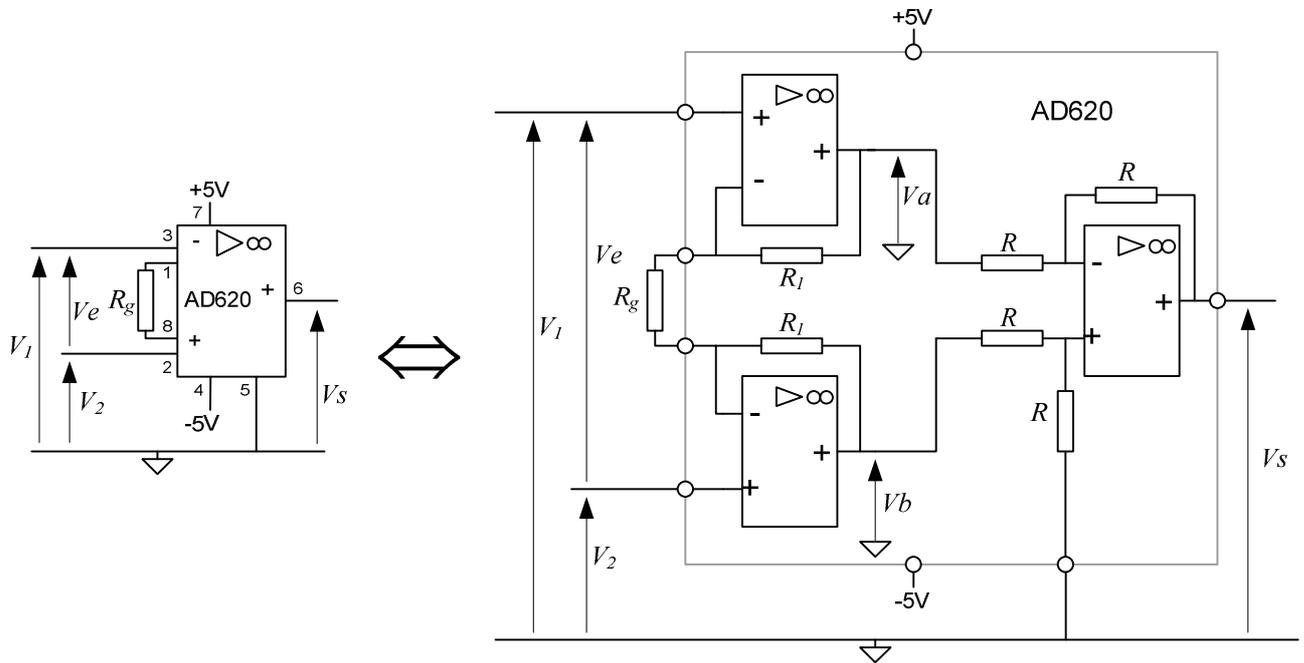


Figure 21 – Schéma interne de l'amplificateur

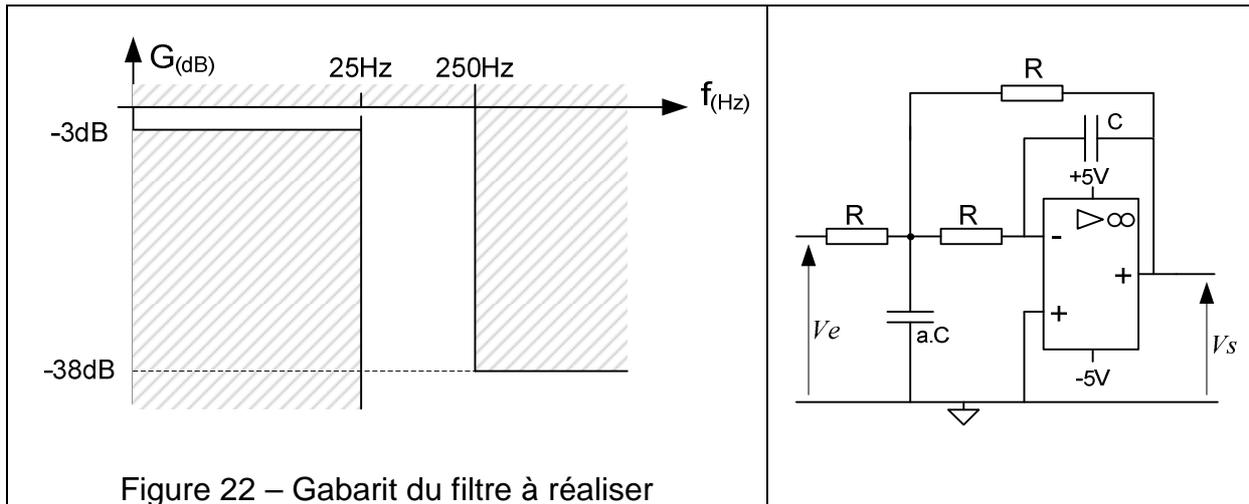
**Q31** – Le but est ici de déterminer la valeur de la résistance  $R_g$  de manière à respecter la contrainte de 5 incréments par newton.

- Déterminer la relation entre  $V_s$ ,  $V_a$  et  $V_b$ .
- Déterminer la relation entre  $V_a$ ,  $V_1$  et  $V_2$  puis entre  $V_b$ ,  $V_1$  et  $V_2$ .
- Déduire des deux questions précédentes la relation entre  $V_s$ ,  $V_1$  et  $V_2$ .
- Sachant que  $R_i = 24700\Omega$ , déterminer la valeur de  $R_g$  pour obtenir 5 incréments par newton.
- Le constructeur de l'amplificateur AD 620 propose la relation suivante pour calculer le gain :  $R_g = \frac{49,4k\Omega}{G-1}$  avec  $R_g$  en  $k\Omega$  et le gain  $G = \frac{V_s}{V_e}$ , conclure quant à la valeur de la résistance  $R_g$  obtenue.
- Vérifier que la solution choisie est compatible avec les caractéristiques de l'automate.

### 3.3.2. Étude du filtre.

La fréquence d'échantillonnage du convertisseur analogique numérique est de  $500\text{Hz}$ . Le théorème de Shannon impose que le signal à convertir ne doit pas contenir de fréquences supérieures à  $250\text{Hz}$ . Le filtre utilisé est donc un filtre passe-bas qui doit présenter une atténuation assez rapide (ordre élevé) pour être efficace. Le filtre choisi, d'ordre 8 est réalisé par la mise en cascade de 4 filtres d'ordre 2. La suite concerne l'étude d'un de ces filtres d'ordre 2.

**Q32** – Détermination des caractéristiques du filtre.



L'amplificateur opérationnel est supposé idéal et fonctionne en régime linéaire.

a) Déterminer l'expression littérale de la fonction de transfert harmonique de ce filtre en fonction de  $R$ ,  $C$ ,  $a$ ,  $\omega$ .

b) Mettre cette fonction de transfert sous la forme : 
$$\underline{H}_{(j\omega)} = \frac{K}{1 + \frac{1}{Q} \cdot \frac{j\omega}{\omega_0} + \left(\frac{j\omega}{\omega_0}\right)^2}$$

Le gain du filtre doit être le plus constant possible pour les basses fréquences, puis présenter une décroissance très rapide lorsque la fréquence du signal devient proche de  $250\text{ Hz}$ . Un facteur de qualité  $Q = \frac{1}{\sqrt{2}}$  est un bon compromis pour respecter ces deux critères.

c) Déterminer la valeur de  $a$  pour obtenir un facteur de qualité  $Q = \frac{1}{\sqrt{2}}$ .

d) Déterminer la valeur du produit  $RC$  pour que la fréquence de coupure à  $3\text{dB}$  soit de  $25\text{Hz}$ .

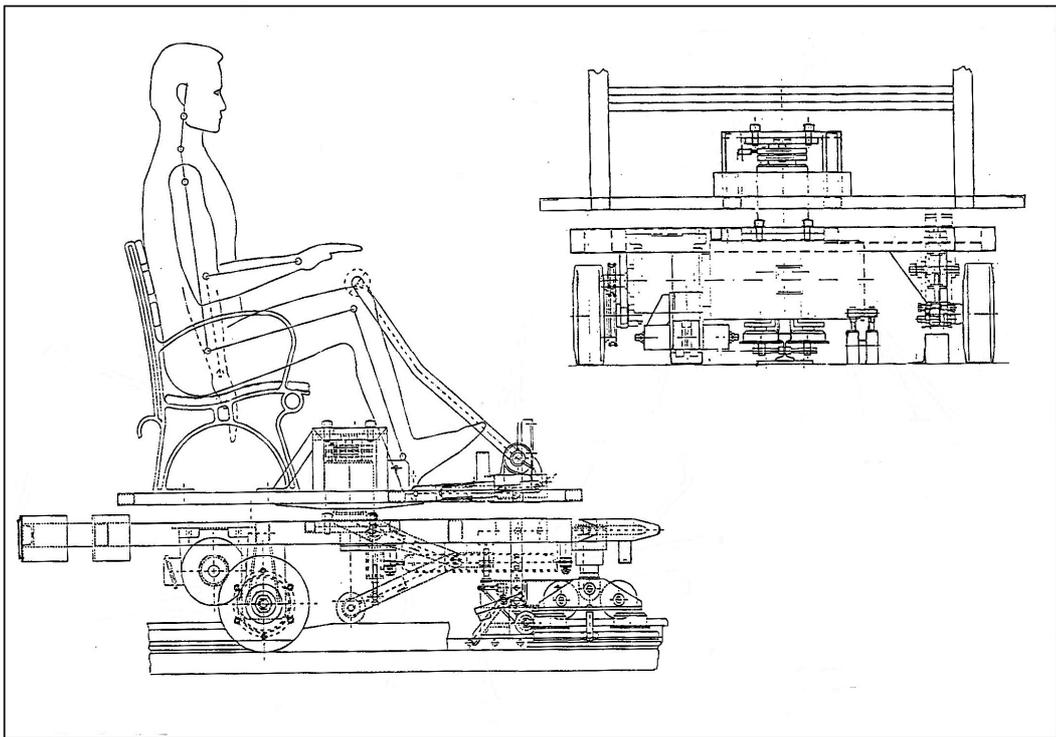
e) Calculer le gain à  $250\text{Hz}$  et conclure sur le respect du gabarit.

**Q33** – Le parc d’attractions envisage de construire un nouveau manège.

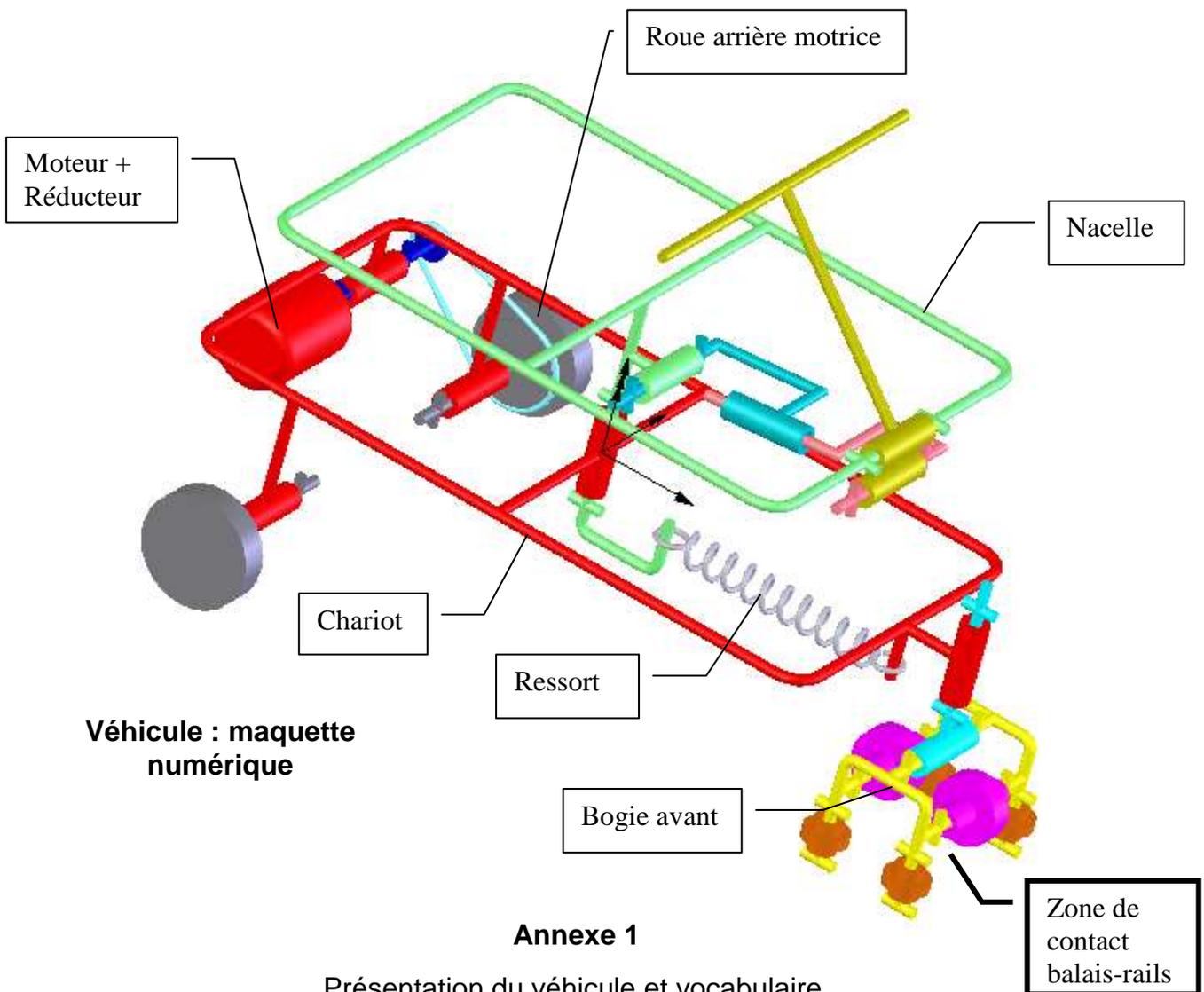


Figure 24 – Projet de nouveau manège

Proposer un schéma de principe d’une structure de commande plus moderne utilisant les bus de terrain qui simplifierait le câblage entre les différents composants de ce système (automate, variateur, capteurs, modem radio).



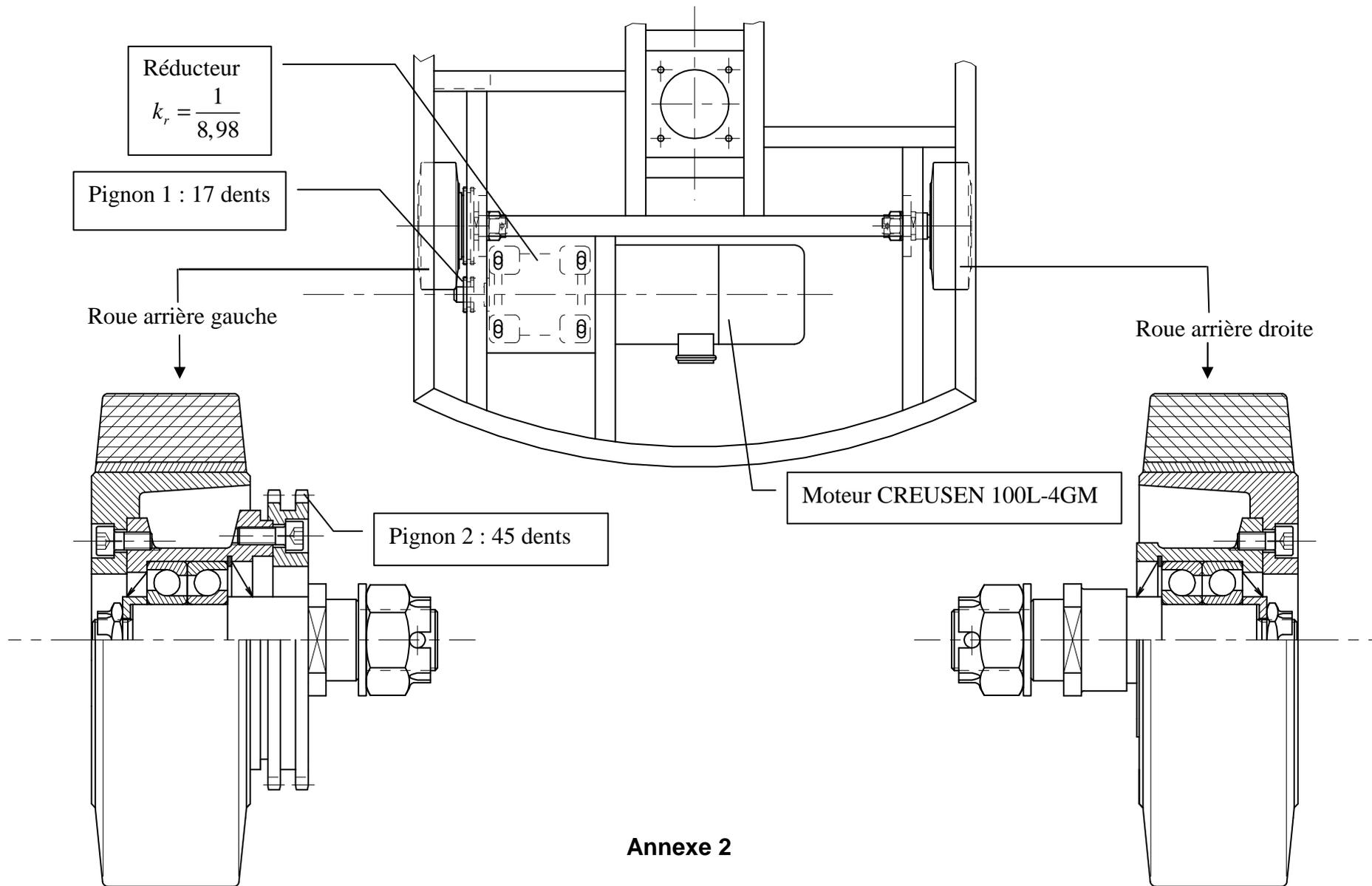
**Véhicule : document constructeur**



**Véhicule : maquette numérique**

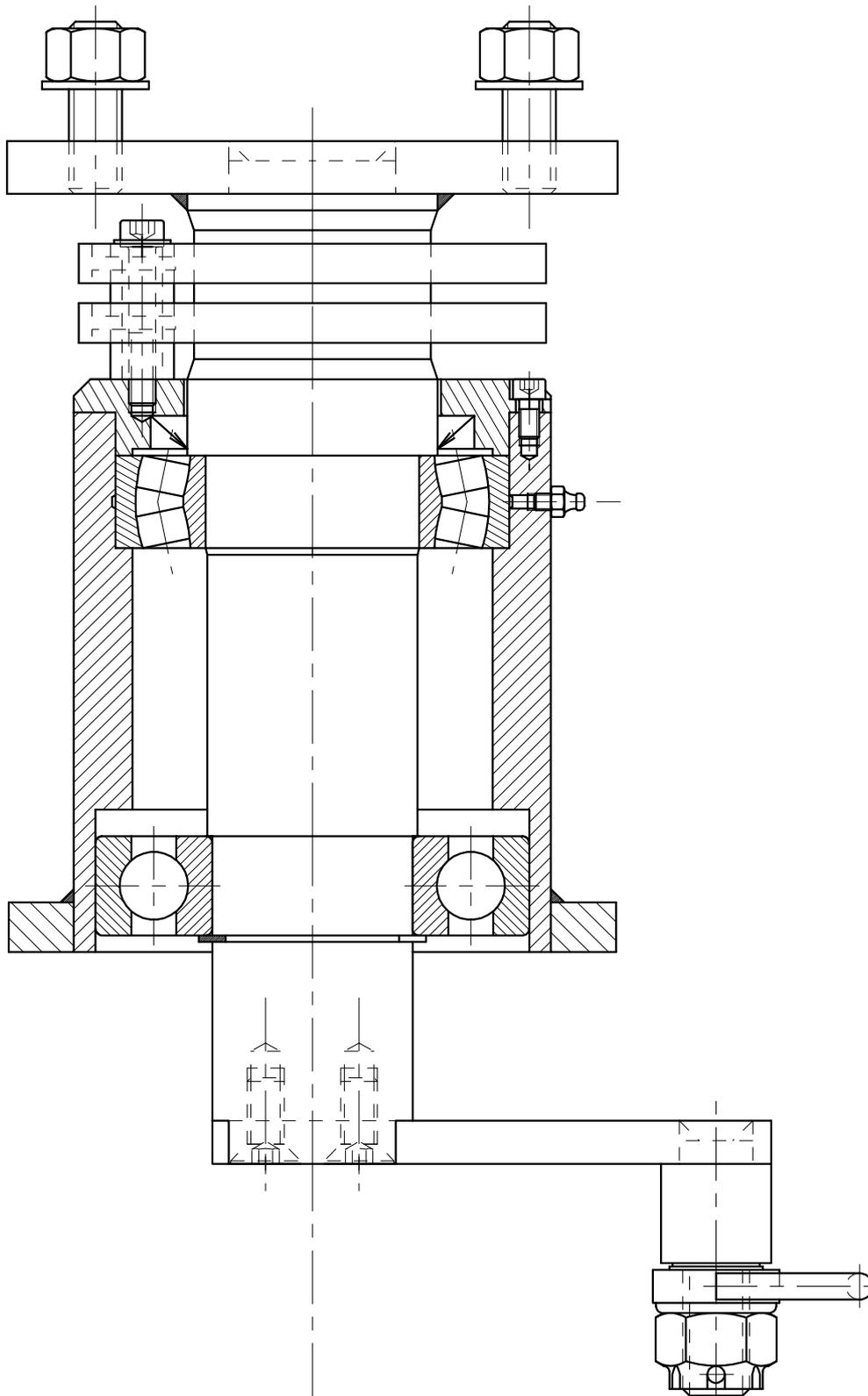
**Annexe 1**

Présentation du véhicule et vocabulaire



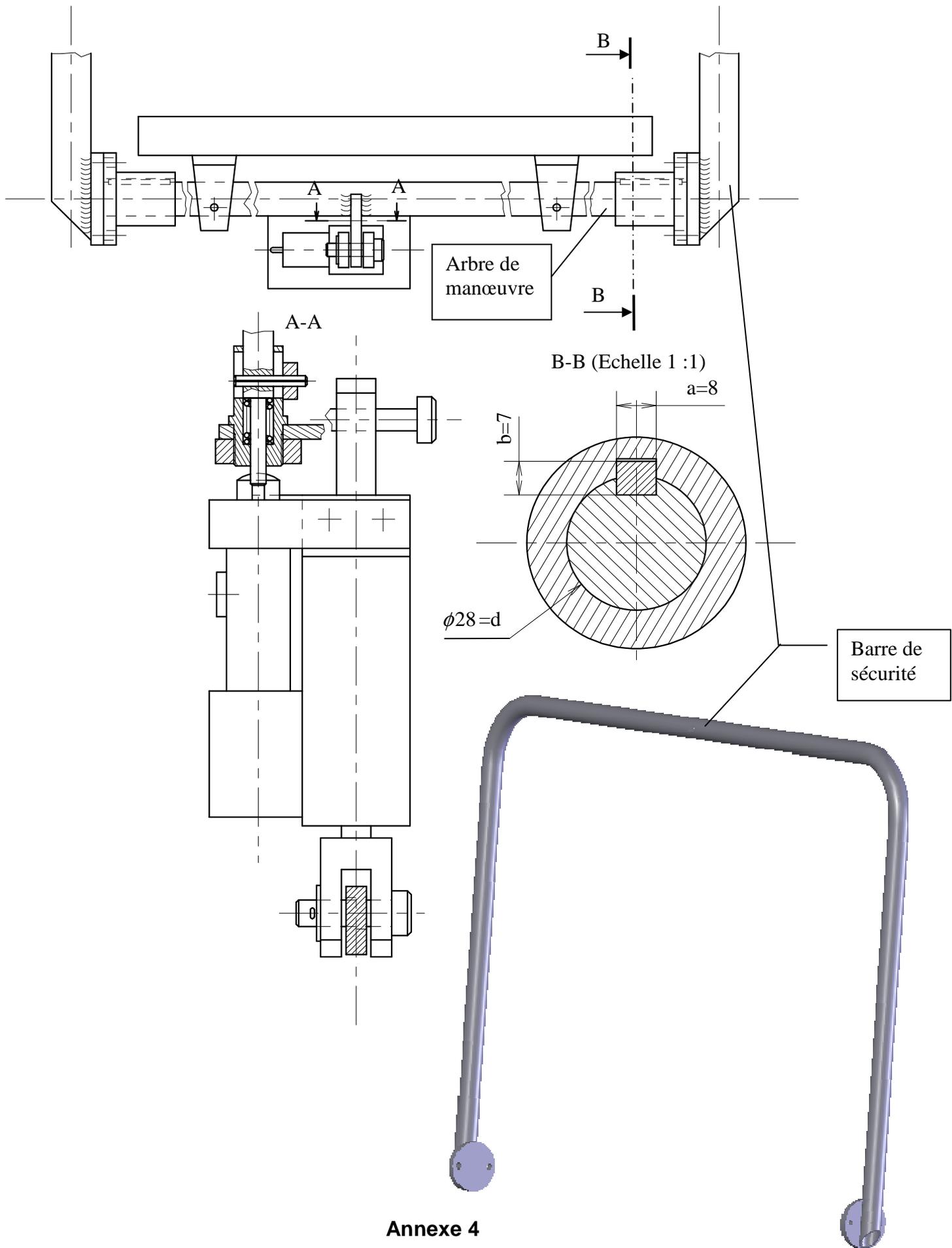
**Annexe 2**

Vue de dessus de l'arrière du chariot, nacelle et carters enlevés



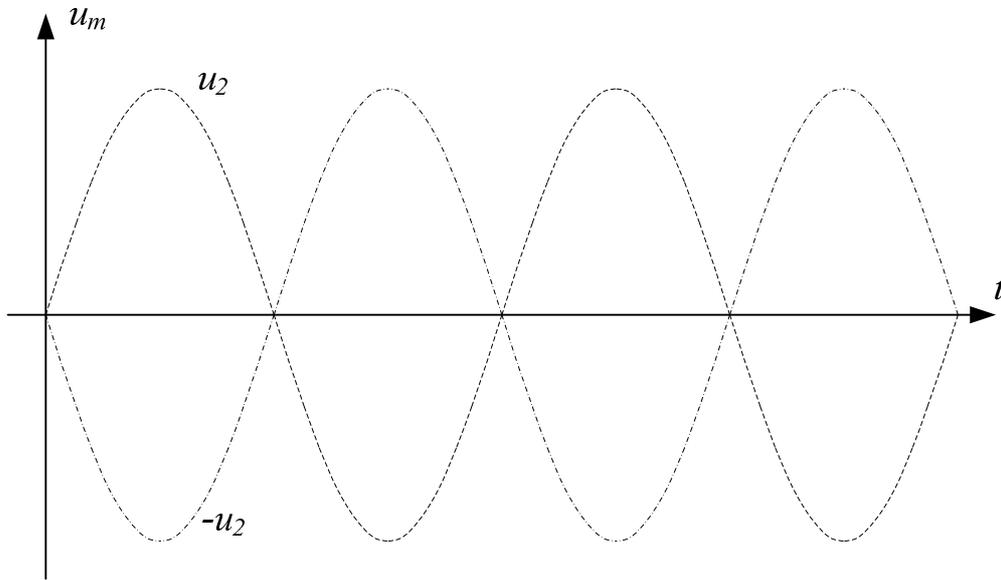
### Annexe 3

Liaison pivot entre le chariot et la nacelle

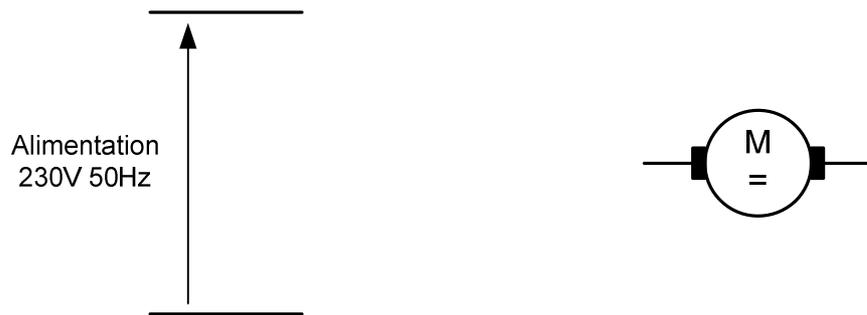


**Annexe 4**

Système de verrouillage de la barre de sécurité

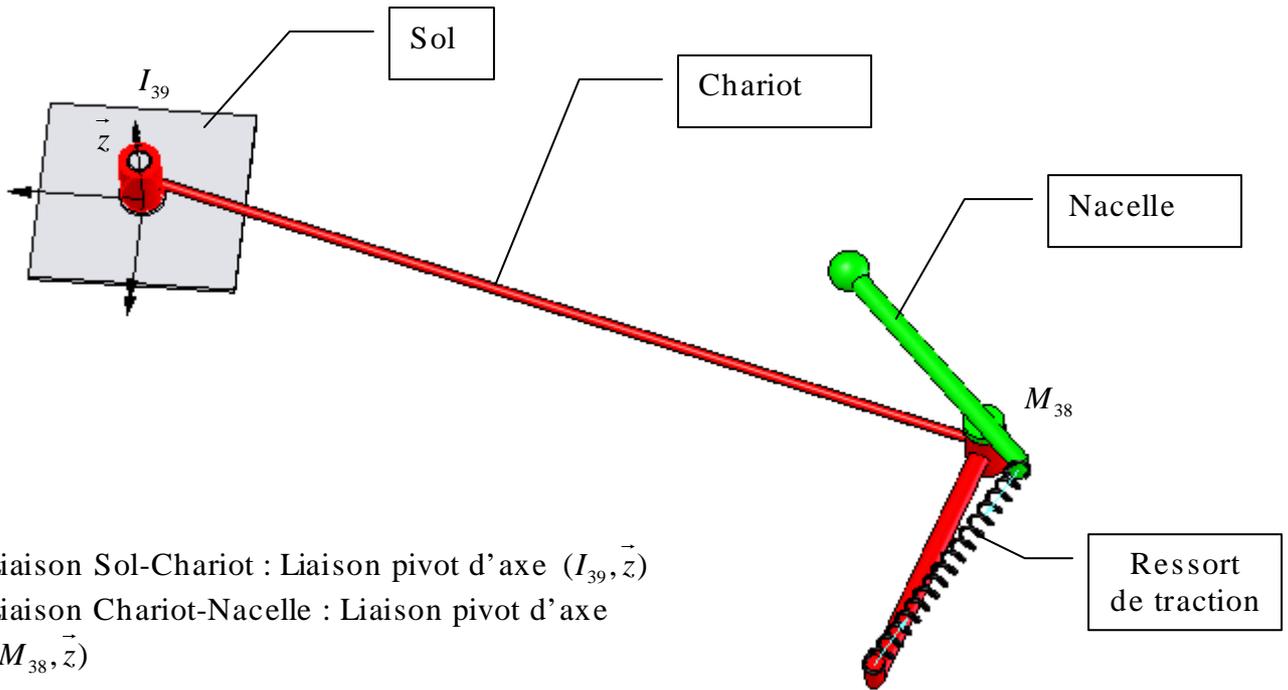
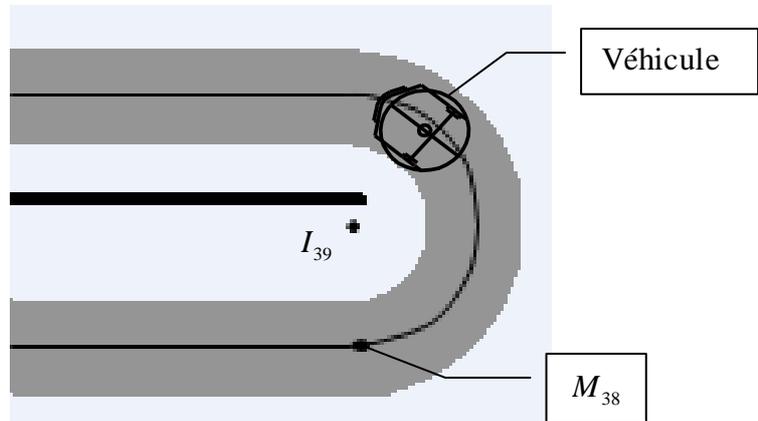


**Document réponse 1**  
Tension d'alimentation du moteur



**Document réponse 2**  
Schéma de principe du convertisseur

La distance mesurée sur le dessin donne  
 $I_{39}M_{38} = 16mm$   
 L'échelle du dessin lors de la mesure est de  
 1 :110

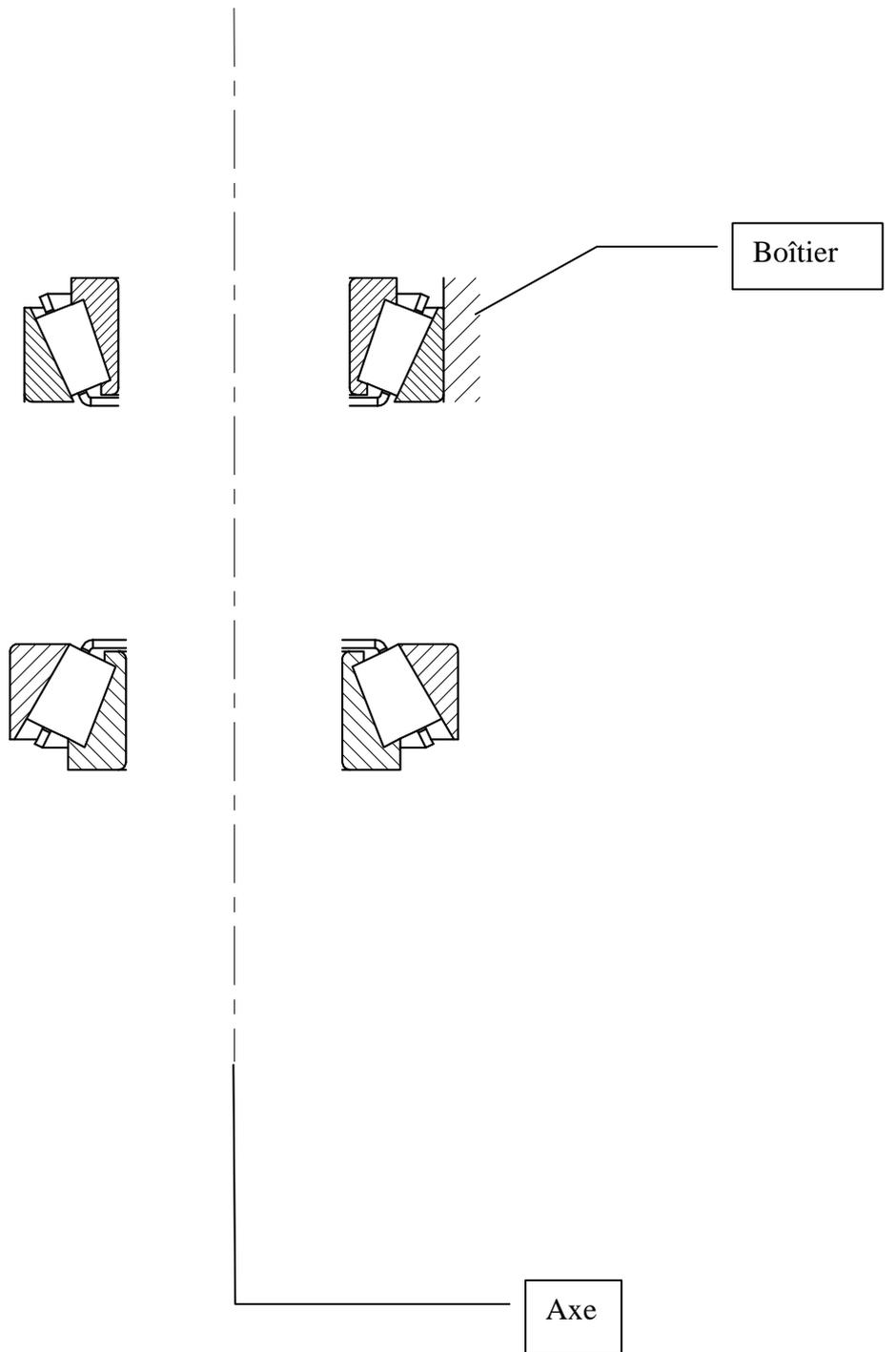


Liaison Sol-Chariot : Liaison pivot d'axe  $(I_{39}, \vec{z})$   
 Liaison Chariot-Nacelle : Liaison pivot d'axe  
 $(M_{38}, \vec{z})$

Distance $I_{39}M_{38}$ à l'échelle1.	
Valeur numérique de la raideur $k$ du ressort en $N/mm$ .	
Masse de la nacelle chargée de deux passagers.	
$\ \Omega_{chariot/sol}\ $ en $rad/s$ si la vitesse est de $1,3m/s$ dans cette phase.	
Décrire le principe selon lequel la nacelle est mise en rotation par rapport au chariot.	

### Document réponse 3

Tableau des paramètres nécessaires à l'utilisation d'un logiciel de simulation



**Document réponse 4**

Nouvelle solution de liaison pivot entre nacelle et chariot