Concours e3a-Polytech, France

Session 2004, filière MP

Sciences industrielles de l'ingénieur

Durée : 3 heures

Ce que traite le sujet

- Analyse fonctionnelle et structure de la machine
- Déplacement du pont par rapport à la voie
- Sécurisation du positionnement selon x et y
- Montée et descente du combustible

Sujet reproduit sans retouche à partir de la page suivante.

Résumé des parties, chapitres de cours liés et autres années : prepahelp.com/annales/e3a/mp/2004/si

Prepa Help ne revendique aucun droit sur le sujet, propriété de l'organisateur du concours.

U23F

Concours ENSAM - ESTP - ECRIN - ARCHIMEDE

Epreuve de Sciences Industrielles MP

durée 3 heures

L'usage de la calculatrice est autorisé

MACHINE DE DÉCHARGEMENT ET DE CHARGEMENT DE COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE

1. PRÉSENTATION DU SYSTÈME ÉTUDIÉ

Une centrale nucléaire (voir figure 1) est composée de deux circuits, situés dans deux bâtiments séparés :

→ le circuit primaire est constitué principalement du réacteur nucléaire, des générateurs de vapeur et des pompes primaires ; il est enfermé dans une enceinte de confinement en béton

→ le circuit secondaire est constitué principalement de la turbine entraînée en rotation par la vapeur, du groupe turbo alternateur permettant la génération d'électricité et du condenseur

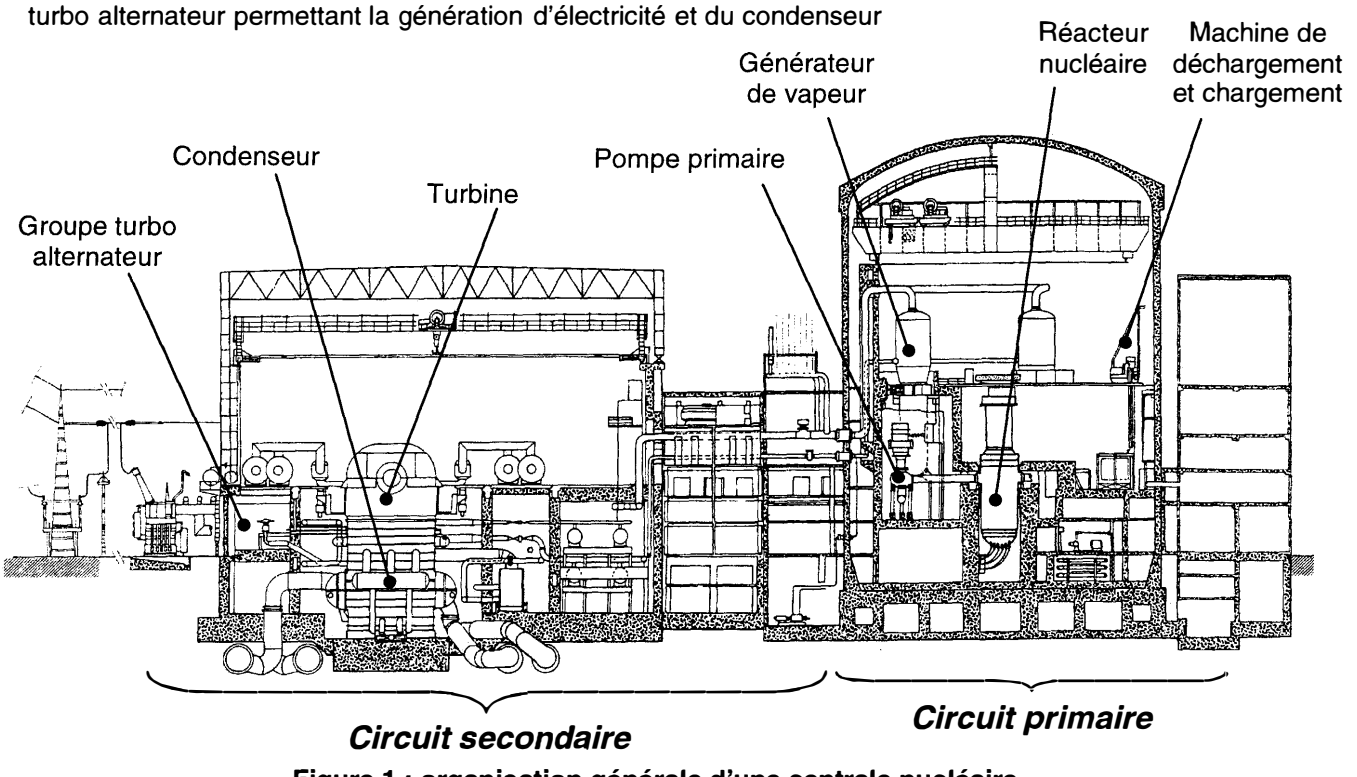


Figure 1 : organisation générale d'une centrale nucléaire

Le cœur du réacteur nucléaire (voir figure 2) contient le combustible nucléaire sous la forme de 157 assemblages combustibles tels que représentés figure 3.

Pour information, dans le réacteur étudié, ces assemblages sont constitués de 289 logements. Ceux-ci sont occupés par 264 crayons combustibles en uranium, 24 tubes guides de crayons de grappe de commande pour les manipulations et 1 tube guide d'instrumentation pour les mesures.

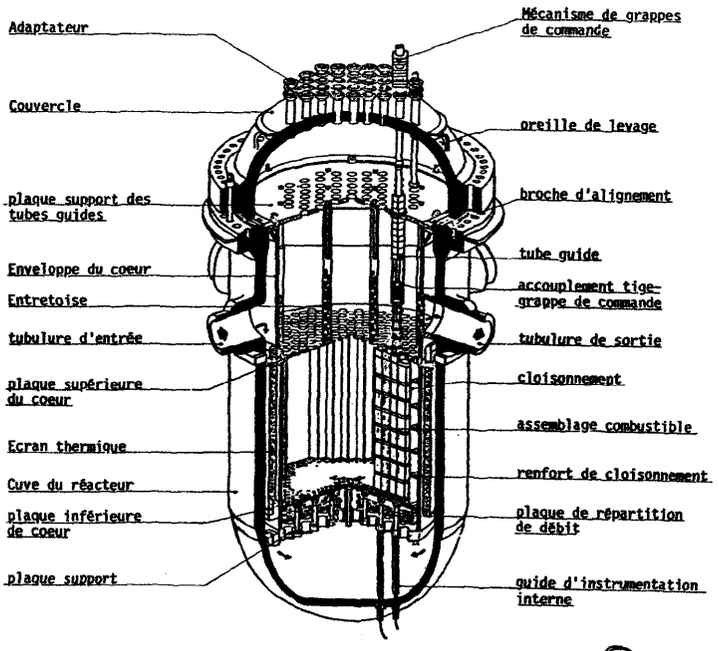


Figure 2 : le cœur du réacteur

L'assemblage combustible ainsi constitué (de masse 640 kg) forme un ensemble compact, support de manutention du combustible lors des diverses opérations de chargement ou déchargement. En effet, la gestion du combustible définit la durée de vie optimale d'un combustible dans le réacteur avec l'usure la plus homogène possible : il est donc nécessaire de pouvoir faire des arrangements et enlever le combustible usé au cours du temps. Cette opération est réalisée par une machine spéciale : la machine de déchargement et chargement, ou « M.D.C. », dont l'étude de certaines fonctionnalités vous est proposée ci-après.

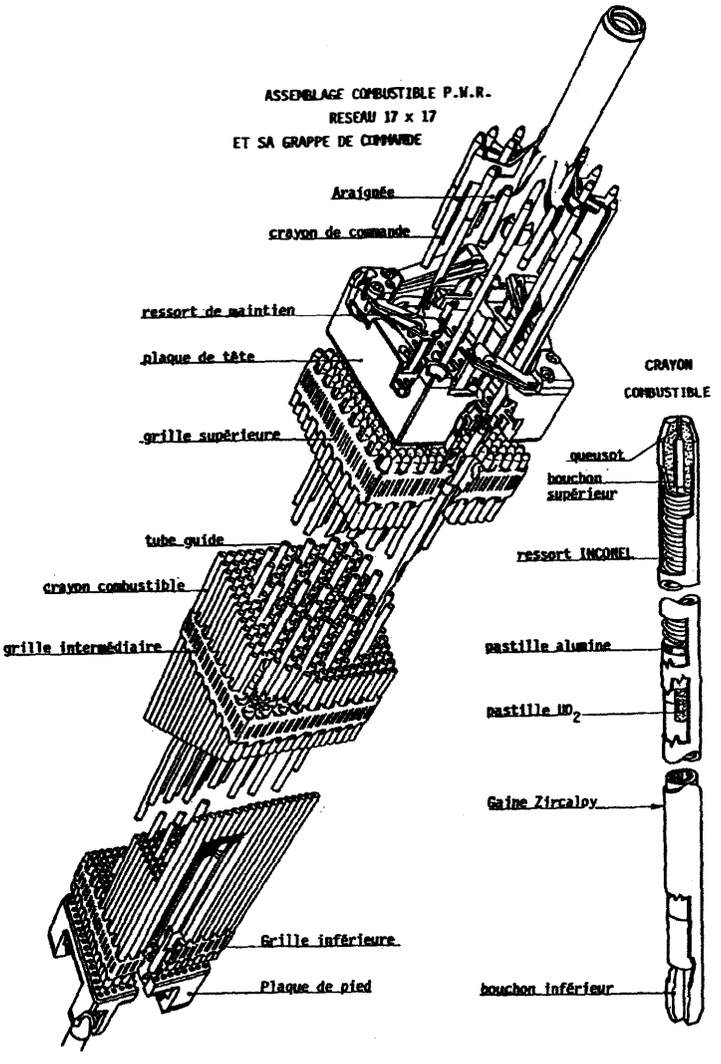


Figure 3 : l'assemblage combustible

La puissance d'un réacteur est proportionnelle au flux neutronique et au nombre de noyaux fissiles : si la distribution de matière fissile était uniforme dans le réacteur, les flux neutroniques radial et axial seraient plus importants au centre qu'à la périphérie du réacteur et il s'en suivrait une usure irrégulière du combustible.

Pour compenser un nombre de neutrons faibles en périphérie, on réalise un enrichissement variable et plus important en périphérique que dans le centre du réacteur (voir figure 4).

Sur cette figure, chaque carré correspond à un assemblage combustible comportant des crayons combustibles d'un même enrichissement. Le cœur du réacteur étudié comporte trois régions, constituées de 52 assemblages d'enrichissements faible, moyen ou fort.

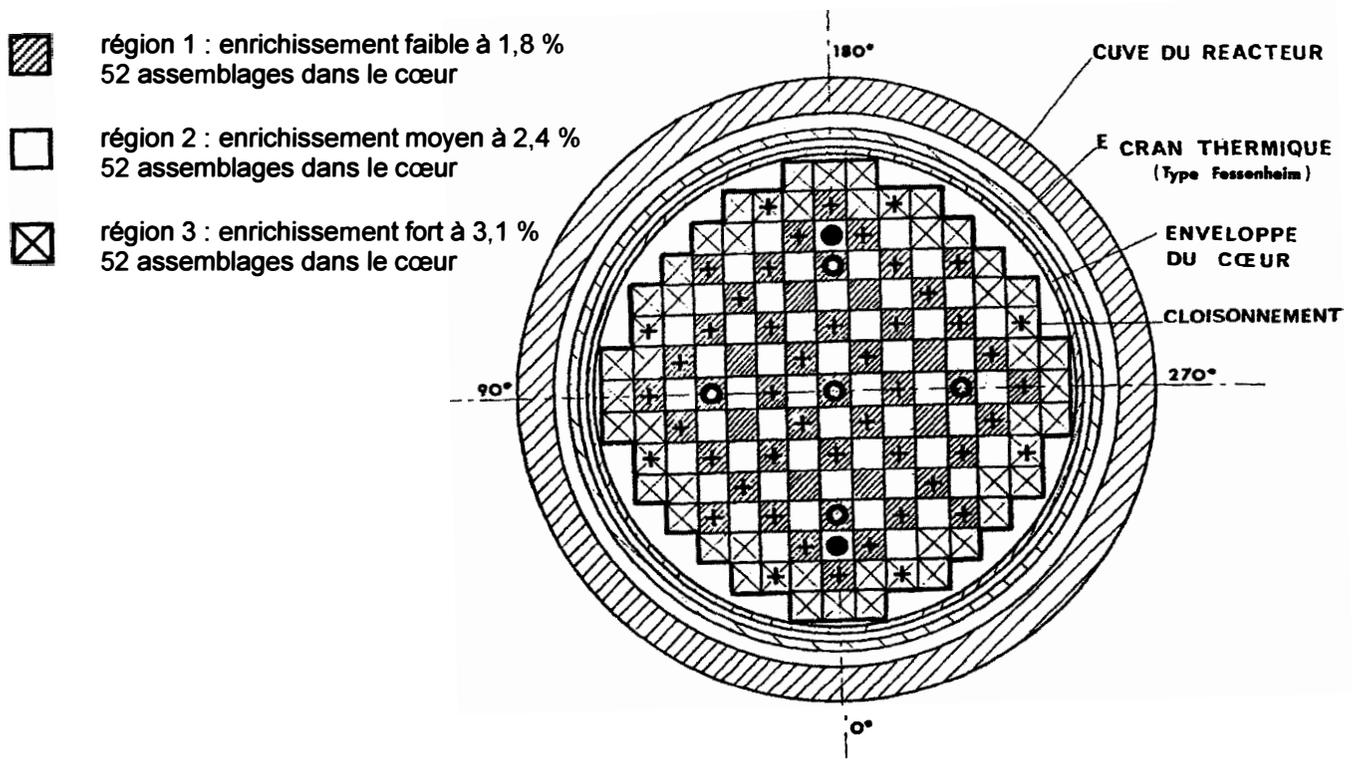


Figure 4 : organisation de l'assemblage combustible dans le cœur du réacteur nucléaire

Afin d'assurer un fonctionnement optimal du réacteur nucléaire, on adopte un renouvellement du combustible par tiers : cette opération correspond à un cycle, c'est-à-dire à la durée qui sépare deux opérations successives de transfert du combustible (déplacement et réarrangement du combustible dans le réacteur).

Cette opération s'effectue tous les ans en déchargeant le tiers du cœur correspondant à l'enrichissement le plus faible, en réarrangeant les deux–tiers restants et en apportant du combustible neuf à enrichissement fort dans les parties laissées vides.

Les principales opérations réalisées par la machine de déchargement et de chargement sont donc :

a- Décharger les assemblages combustibles de la région 1 (correspondant à l'enrichissement initial le plus faible) dans la région de stockage du combustible usé, située hors du réacteur

b- Déplacer les assemblages combustibles de la région 2 (correspondant à l'enrichissement initial moyen) dans la région 1 en les réarrangeant

c- Déplacer les assemblages combustibles de la région 3 (correspondant à l'enrichissement initial fort) dans la région 2 en les réarrangeant

d- Recharger la région 3 en assemblages combustibles neufs, d'enrichissement fort et récupérés dans la région de stockage du combustible neuf, située hors du réacteur

Q1. Chacune des trois régions du cœur comporte 52 assemblages : indiquer le nombre d'opérations élémentaires, correspond à un déplacement de combustible d'une zone à une autre, réalisées par la machine de déchargement et de chargement à chaque utilisation annuelle de ce système.

2. ÉTUDE DE LA MACHINE DE DÉCHARGEMENT – CHARGEMENT (M.D.C.)

2.1. Les principaux modes de fonctionnement

Les modes de fonctionnement de la machine de déchargement – chargement (M.D.C.) sont les suivants :

→ le mode « marche asservie » qui caractérise l'utilisation normale de la machine lors des opérations de manutention des assemblages combustibles,

→ le mode « marche manuelle » qui permet le pilotage à vue de la machine de déchargement / chargement,

→ le mode « marche manuelle de secours » qui est utilisable dans le cas d'avarie ou d'absence d'alimentation de la machine (ce mode est uniquement destiné à terminer une opération en cours pour assurer la sécurité).

Le mode « marche asservie » correspond au fonctionnement normal de la machine de déchargement – chargement. Dans ce mode, les déplacements sont assujettis au choix obligatoire d'une des séquences de fonctionnement suivantes :

- séquence « renouvellement partiel » : tous les déplacements d'axe à axe sont possibles entre le réacteur et les régions de stockage du combustible neuf et du combustible usé
- séquence « déchargement complet » : les déplacements vers le réacteur sont réalisés à vide et les déplacements depuis le réacteur sont réalisés en charge
- séquence « rechargement complet » : les déplacements vers le réacteur sont réalisés en charge et les déplacements depuis le réacteur sont réalisés à vide

L'étude proposée ici concerne uniquement la séquence « déchargement complet » du mode « marche asservie » et on va donc s'intéresser à la prise du combustible de la région 1 pour l'évacuer du réacteur vers la région de stockage du combustible usé.

Q2. Identifier les entrées et sorties du système étudié (machine de déchargement / chargement) et donner sa fonction principale dans la séquence d'étude. On pourra présenter le résultat sous la forme d'un S.A.D.T. de niveau A – 0.

2.2. Analyse fonctionnelle de la phase de déchargement

La machine de déchargement – chargement (M.D.C.), ayant pris un assemblage usé dans la région 1 du cœur du réacteur, vient le positionner verticalement sur le basculeur n° 1 (voir figure 5). Celui-ci est alors mis en position horizontale, ce qui permet l'introduction de l'assemblage dans le tube de transfert et la réception par le basculeur n° 2 horizontal. Lorsque ce dernier est vertical, la passerelle de manutention vient récupérer l'assemblage combustible et le place dans un rack de la région de stockage du combustible usé.

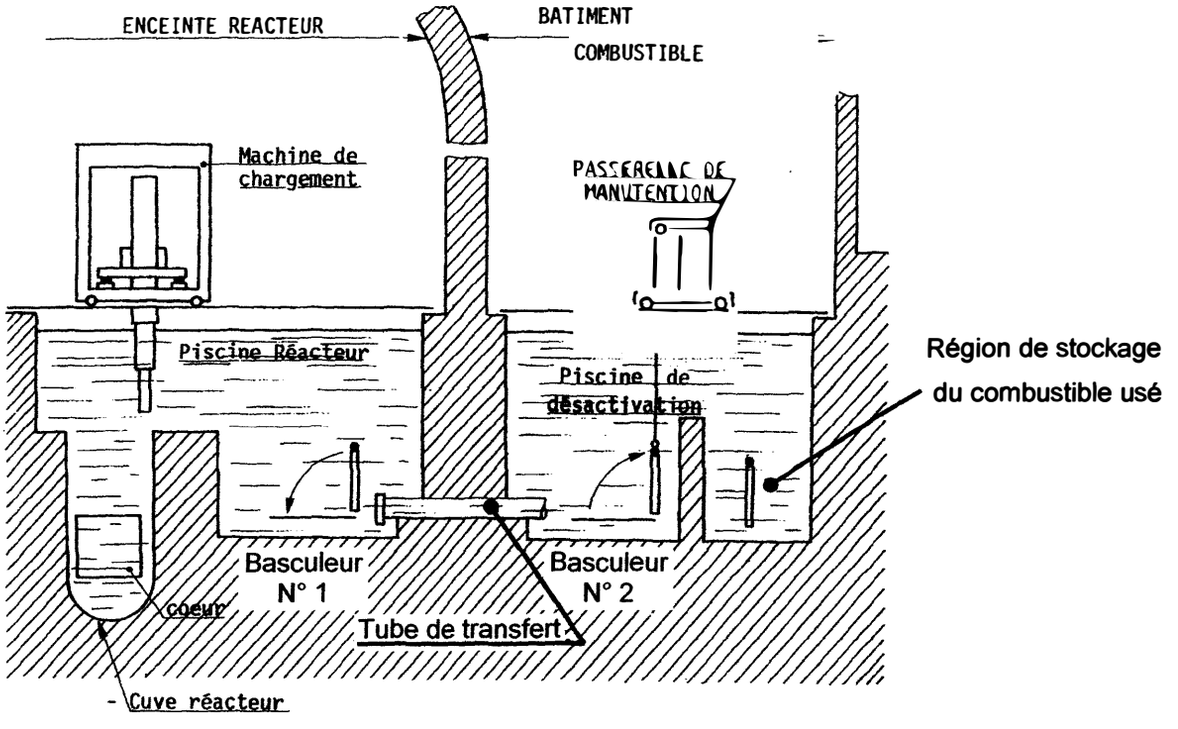


Figure 5 : le transfert du combustible

On s'intéresse à la phase de déchargement du combustible usé de la région 1 du cœur jusqu'au basculeur n° 1. Une analyse de la fonction de service FS1 correspondante donne la décomposition fonctionnelle fournie en annexe à la fin de ce sujet.

Q3. Déterminer le nombre minimum d'actionneurs nécessaires sur la M.D.C. pour réaliser la phase de déchargement étudiée.

2.3. Structure de la machine de déchargement – chargement (M.D.C.)

La voie de roulement (0), constituée de deux rails parallèles fixés longitudinalement de part et d'autre de la piscine et supposés parfaitement fixes, permet de guider la machine de déchargement – chargement qui est composée des éléments suivants :

- le pont (1) est en liaison glissière de direction x par rapport à la voie de roulement (0),
- l'ensemble chariot (2) + tour (3) est en liaison glissière de direction y par rapport au pont (1),
- l'ensemble mat (4) + tube guide (5) est en liaison pivot d'axe vertical (direction z) avec la tour (3) et indexable sur trois positions
- les éléments à guider verticalement (tubes combustible, grappe contrôle, grappe bouchon et perche télescopique équipée de la caméra TV) notés (6) sont en liaison glissière de direction z avec l'ensemble mat (4) + tube guide (5).

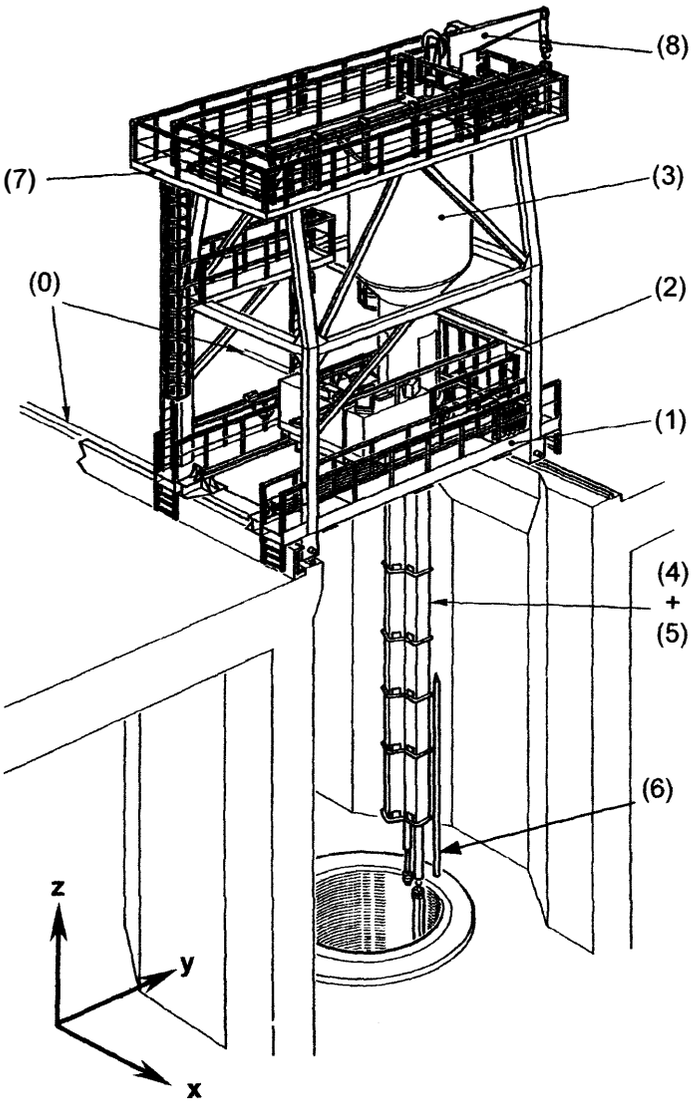


Figure 6 : Structure de la machine de déchargement et de chargement (M.D.C.)

Q4. Réaliser le schéma cinématique en perspective, en respectant l'orientation de la figure 6, de la machine de déchargement et de chargement (M.D.C.) ; il est demandé d'indiquer par des flèches les mouvements correspondant aux degrés de liberté entre les éléments constituant le système :

- **voie de roulement (0)**
- **pont (1)**
- **ensemble chariot (2) + tour (3)**
- **ensemble mât (4) + tube guide (5)**
- **éléments à lever (6).**

2.4. Étude de la fonction « Déplacer le pont par rapport à la voie » (F1111)

L'objectif de cette étude est d'analyser la structure de la liaison glissière du pont roulant par rapport à la piste de roulement.

2.4.1. La liaison pont (1) / voie de roulement (0)

Le pont 1 repose sur la voie 0 par quatre modules à galets fixés aux extrémités de sa structure (voir figure 7).

Le module avant gauche [(G1) + (G2) + (G3)] est un module galet *porteur moteur* avec guidage

Le galet *porteur moteur* (G1), en liaison sphère plan (ponctuelle) de normale $(A_1,\vec{z})$ avec le rail (0), est entraîné par un groupe motoréducteur à courant continu avec dynamo tachymétrique.

Les deux galets *suiveurs* (G2) et (G3), respectivement en liaison sphère plan (ponctuelle) de normale $(A_2,-\vec{y})$ et $(A_3,\vec{y})$ avec le rail (0), assurent le guidage latéral du pont.

Le module avant droit (G4) est un module galet *porteur moteur*

Le galet *porteur moteur* (G4), en liaison sphère plan (ponctuelle) de normale $(A_4,\vec{z})$ avec le rail (0), est entraîné par un groupe motoréducteur à courant continu avec dynamo tachymétrique.

Le module arrière gauche [(G5) + (G6) + (G7)] est un module galet *porteur suiveur* avec guidage

Le galet *porteur suiveur* (G5) est en liaison sphère plan (ponctuelle) de normale $(A_5,\vec{z})$ avec le rail (0).

Les deux galets *suiveurs* (G6) et (G7), respectivement en liaison sphère plan (ponctuelle) de normales $(A_6,-\vec{y})$ et $(A_7,\vec{y})$ avec le rail (0), assurent le guidage latéral du pont.

Le module arrière droit (G8) est un module galet *porteur suiveur*

Le galet *porteur suiveur* (G8) est en liaison sphère plan (ponctuelle) de normale $(A_8,\vec{z})$ avec le rail (0).

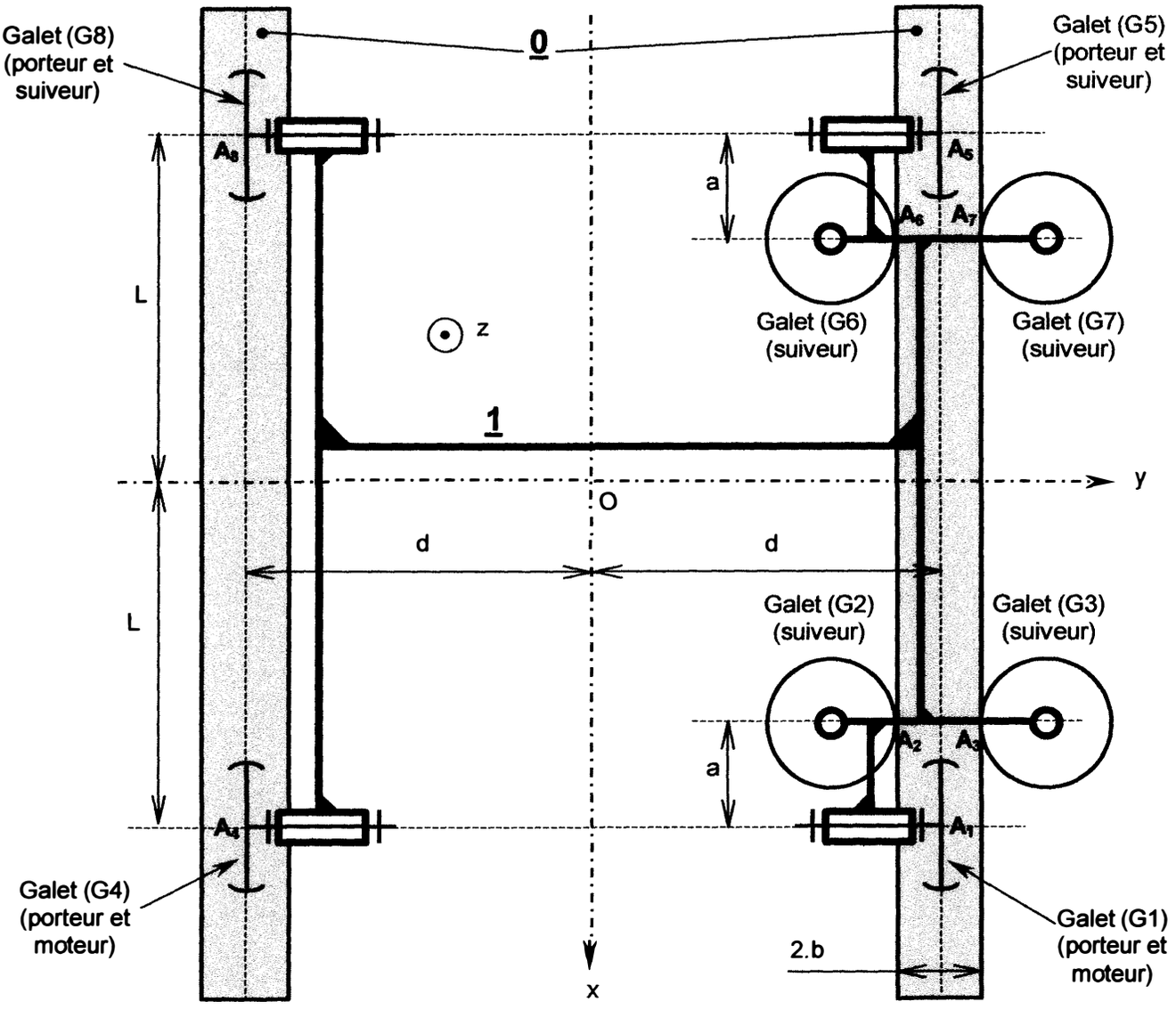


Figure 7 : la structure cinématique du guidage du pont 1 par rapport à la voie 0 (vue du dessus)

Les points A_i de contact entre les rails et les galets (Gi) sont repérés par rapport au point O comme suit :

$\overrightarrow{OA_1} = L.\vec{x} + d.\vec{y} + c.\vec{z}$ $\quad \overrightarrow{OA_2} = (L-a).\vec{x} + (d-b).\vec{y}$ $\quad \overrightarrow{OA_3} = (L-a).\vec{x} + (d+b).\vec{y}$ $\quad \overrightarrow{OA_4} = L.\vec{x} - d.\vec{y} + c.\vec{z}$

$\overrightarrow{OA_5} = -L.\vec{x} + d.\vec{y} + c.\vec{z}$ $\quad \overrightarrow{OA_6} = (-L+a).\vec{x} + (d-b).\vec{y}$ $\quad \overrightarrow{OA_7} = (-L+a).\vec{x} + (d+b).\vec{y}$ $\quad \overrightarrow{OA_8} = -L.\vec{x} - d.\vec{y} + c.\vec{z}$

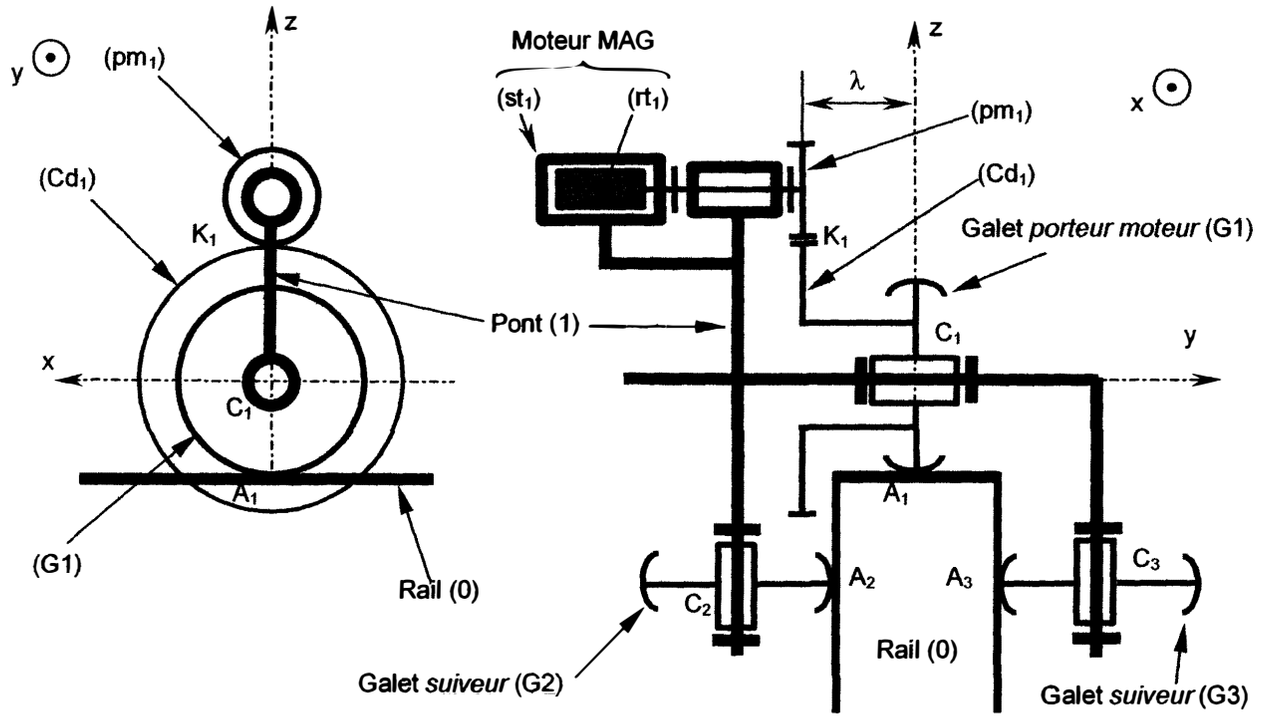


Figure 8 : module avant gauche, vu selon les normales $\vec{y}$ (à gauche) et $\vec{x}$ (à droite)

Q5. On se propose de déterminer le degré d'hyperstatisme de la liaison glissière équivalente entre la voie de roulement (0) et le pont (1) et, pour cela :

a) établir le graphe de liaisons limité aux dix solides suivants : (0), (1) et les huit galets (Gi),

b) montrer, par la méthode de votre choix, que la liaison équivalente entre (0) et (1) incluant les huit galets est une liaison glissière de direction x,

c) déterminer le degré d'hyperstatisme de cette liaison glissière équivalente entre le pont (0) et la voie (1),

d) justifier alors la nécessité du réglage de position par rapport au pont (1) de certains galets ; recopier sur votre copie et compléter le tableau ci-dessous en indiquant les galets qui devront être réglables (notés R) ou fixes (notés F) par rapport au pont, sachant que les galets (G1), (G4) et (G7) sont supposés fixes

Galet	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
Fixe/Réglable	F			F			F	

2.4.2. Étude des conditions de non-glissement

L'objectif de cette étude est de vérifier que le pont roulant ne risque pas de glisser par rapport à la voie lors d'une phase de décélération ou d'accélération. Dans toute l'étude qui suit, on considère que :

→ Le référentiel lié à la voie de roulement (0) est galiléen,

→ Les galets (Gi) sont de même rayon R_G et sont supposés de masses négligeables par rapport à celles des autres éléments

→ Le moteur avant gauche est constitué d'un stator (st_1) fixé sur le pont (1) et d'un rotor (rt_1) sur lequel est fixé un pignon moteur (pm_1) de rayon r ; les masses du rotor (rt_1) et du pignon moteur (pm_1) sont supposées négligeables par rapport à celle des autres éléments.

Les actions mécaniques exercées par le stator (st_1) sur le rotor (rt_1) sont modélisées par le torseur

$$\left\{\mathcal{T}_{st_1\to rt_1}\right\}_{C_1} = \begin{Bmatrix} \vec{R}(st_1 \to rt_1) = X_{sr}.\vec{x} + Y_{sr}.\vec{y} + Z_{sr}.\vec{z} \\ \vec{M}(C_1, st_1 \to rt_1) = L_{sr}.\vec{x} + C_m.\vec{y} + N_{sr}.\vec{z} \end{Bmatrix}_{C_1} \quad \text{avec } C_m = \text{couple du moteur}$$

→ Les actions mécaniques exercées par le pignon moteur (pm_1) agissant sur la couronne dentée (cd_1) de rayon R sont modélisées par le torseur

$$\left\{\mathcal{T}_{pm_1\to cd_1}\right\}_{K_1} = \begin{Bmatrix} \vec{R}(pm_1 \to cd_1) = T_1.\vec{x} - N_1.\vec{z} \\ \vec{M}(K_1, pm_1 \to cd_1) = \vec{0} \end{Bmatrix}_{K_1} \text{ en } K_1 \text{ tel que : } \overrightarrow{C_1K_1} = -\lambda.\vec{y} + R.\vec{z} \text{ :}$$

→ Les actions mécaniques de contact de la voie (0) sur chaque galet (Gi) au point de contact A_i sont représentées par les torseurs :

$$\left\{\mathcal{T}_{0\to G1}\right\}_{A_1} = \begin{Bmatrix} X_1.\vec{x} + Z_1.\vec{z} \\ \vec{0} \end{Bmatrix}_{A_1} \quad \left\{\mathcal{T}_{0\to G2}\right\}_{A_2} = \begin{Bmatrix} -Y_2.\vec{y} \\ \vec{0} \end{Bmatrix}_{A_2} \quad \left\{\mathcal{T}_{0\to G3}\right\}_{A_3} = \begin{Bmatrix} Y_3.\vec{y} \\ \vec{0} \end{Bmatrix}_{A_3}$$

$$\left\{\mathcal{T}_{0\to G4}\right\}_{A_4} = \begin{Bmatrix} X_4.\vec{x} + Z_4.\vec{z} \\ \vec{0} \end{Bmatrix}_{A_4} \quad \left\{\mathcal{T}_{0\to G5}\right\}_{A_5} = \begin{Bmatrix} Z_5.\vec{z} \\ \vec{0} \end{Bmatrix}_{A_5} \quad \left\{\mathcal{T}_{0\to G6}\right\}_{A_6} = \begin{Bmatrix} -Y_6.\vec{y} \\ \vec{0} \end{Bmatrix}_{A_6}$$

$$\left\{\mathcal{T}_{0\to G7}\right\}_{A_7} = \begin{Bmatrix} Y_7.\vec{y} \\ \vec{0} \end{Bmatrix}_{A_7} \quad \left\{\mathcal{T}_{0\to G8}\right\}_{A_8} = \begin{Bmatrix} Z_8.\vec{z} \\ \vec{0} \end{Bmatrix}_{A_8}$$

Q6. Justifier succinctement la forme retenue pour l'écriture des torseurs d'actions mécaniques de la voie (0) sur les galets (G1), (G2) et (G5) puis, en indiquant le système matériel isolé et le théorème utilisé, déterminer X_1 en fonction de R_G, R et T_1.

On considère maintenant l'ensemble matériel (E) constitué du pont (1), du chariot (2), de la tour (3), du mât (4), du tube guide (5) et des éléments (6) (voir figure 6).

Pour des raisons de sécurité, le centre d'inertie G_E du système matériel (E) est placé à la verticale du point O avant tout déplacement suivant la direction x et n'en bouge pas pendant tout le déplacement. Toutes les liaisons internes à l'ensemble (E) sont donc bloquées pendant tout le déplacement.

On note x l'abscisse du centre d'inertie G_E du système matériel (E) par rapport au repère galiléen.

On donne :

Solide	**Masse**	**Centre d'inertie**
Pont (1)	m_1 = 14200 kg	O
Chariot (2) + tour (3)	m_{23} = 9100 kg	O
Mat (4) + tube guide (5) + éléments (6)	m_{456} = 2000 kg	G / $\overrightarrow{OG} = -h.\vec{Z}$ (h = 5 m)
Ensemble (E)	$M = m_1 + m_{23} + m_{456}$ = 25300 kg	G_E à la verticale de O

Q7. Déterminer les expressions des actions X_1, X_4, Z_1, Z_4, Z_5 et Z_8 en fonction de M, g, c, L, h et $\ddot{x}$, en considérant que $Z_1 = Z_4$ et $X_1 = X_4$.

La décélération suivant la direction x est donnée figure 9 fournie ci-après.

À t = 0, le pont se trouve à la position $x = x_0 - 400$ (en cm).

Q8. a) Préciser, en le justifiant, la zone où le risque de glissement est le plus grand.

b) Pour les zones A et B, déterminer $\ddot{x}$ en fonction de x_0, position finale atteinte. En déduire la valeur maximale de la décélération.

Q9. Le facteur de frottement galet piste vaut f = 0,2. Les galets *porteurs moteurs* (G1) et (G4) risquent-ils de glisser sur les rails ? Conclusion.

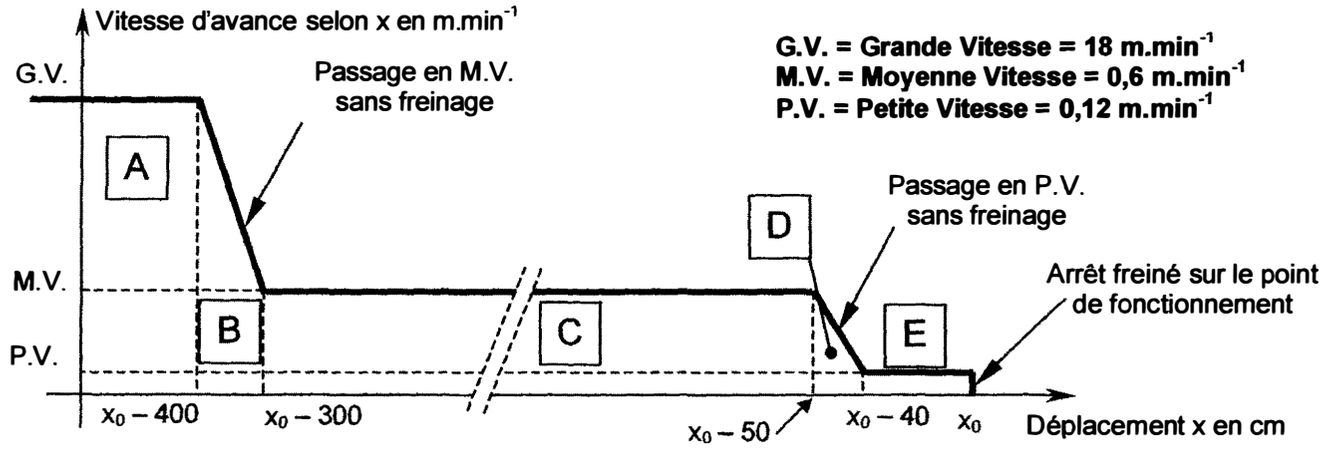


Figure 9 : Courbe de la décélération de la MDC selon la direction x

2.4.3. Gestion de la sécurisation du positionnement selon les directions x et y

Le mouvement du pont (1) sur la voie (0) (noté AV – AR, selon la direction x) et celui du chariot (2) sur le pont (1) (noté G – D, selon la direction y) sont croisés, asservis en position (par codeur optique absolu) avec boucle de retour en vitesse (par génératrice tachymétrique). Ces deux asservissements de position selon les directions x et y permettent un positionnement précis du système de levage en tout point au-dessus de la piscine. Les systèmes d'entraînement des deux mouvements sont mécaniquement semblables (support et guidage par huit galets dont deux motorisés).

En plus des différents capteurs associés aux asservissements, un système de sondes et de cames (identique pour les deux mouvements) agit de manière redondante afin de sécuriser les positions extrêmes dans les deux directions (limites de l'aire de circulation et limites des zones dangereuses) et d'assurer le suivi rigoureux de l'axe de circulation (voir figure 10 ci-contre).

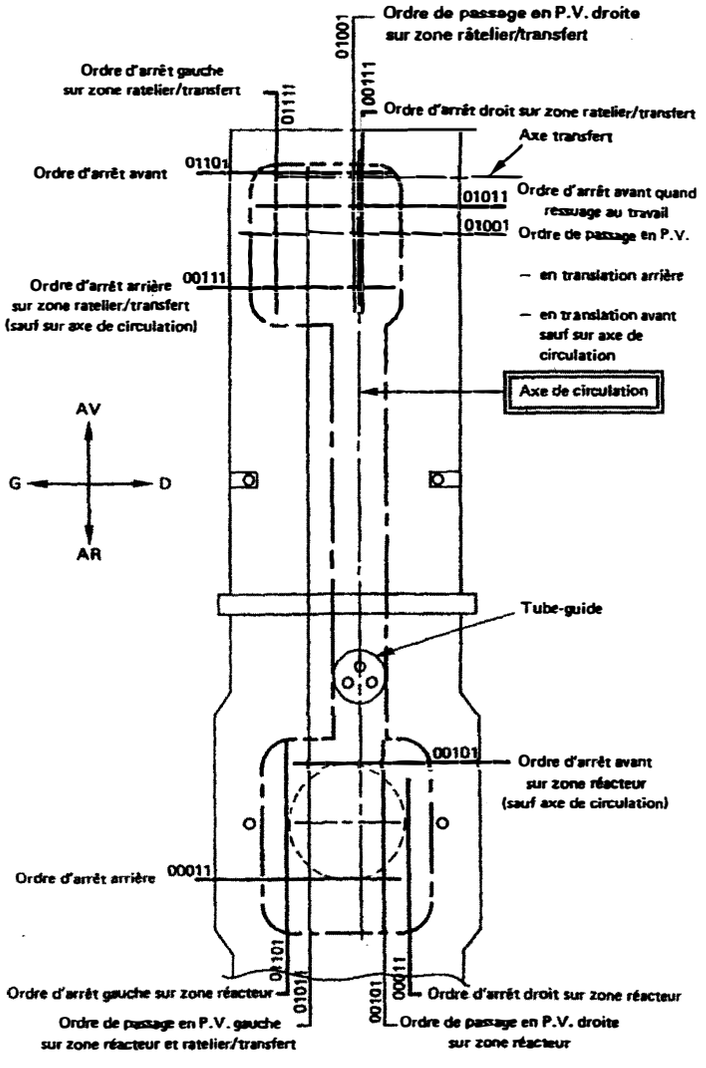
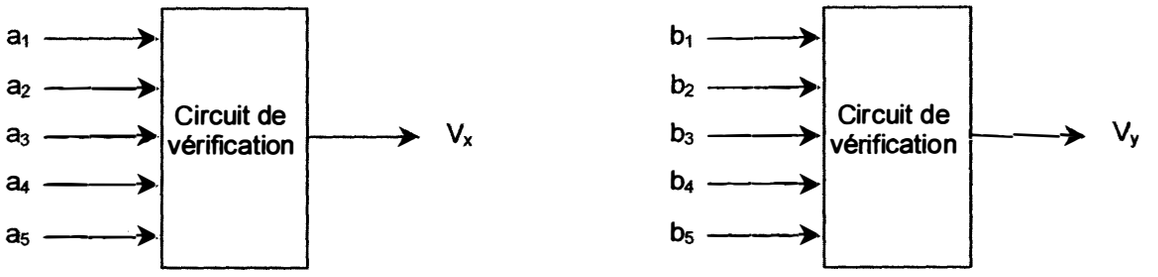


Figure 10 : codage des positions

Chacun de ces systèmes de sécurisation est constitué d'un peigne équipé de cinq détecteurs de proximité disposés côte à côte. Lors du mouvement, le peigne passe devant des cames qui définissent des points particuliers. En fonction des positions des cames, les cinq détecteurs lisent alors deux « mots binaires » de cinq bits notés $a_5a_4a_3a_2a_1$ pour la translation x et $b_5b_4b_3b_2b_1$ pour la direction y.

Pour vérifier que les informations issues de ces capteurs sont cohérentes (la présence d'un élément devant l'un des capteurs pouvant changer son état et bloquer le système complet), on insère un circuit de vérification de la conformité des informations issues des capteurs. La fonction de ce système est de vérifier que les informations reçues sont conformes à celles attendues. On aura donc, sous forme symbolique, la configuration ci-dessous pour les sorties V_X et V_Y de ces circuits :



Nota : les informations binaires a_5 et b_5, issues du cinquième détecteur dans les deux mouvements, sont utilisées en validation par l'automate et elles doivent toujours être à la valeur 0 en fonctionnement normal, comme on peut le voir sur la figure 10.

Bilan des informations en retour (voir figure 10)

→ pour le mouvement selon la direction x

a_5	a_4	a_3	a_2	a_1	Descriptif
0	0	0	1	1	Ordre d'arrêt arrière
0	0	1	0	1	Ordre d'arrêt avant sur zone réacteur (sauf sur axe de circulation)
0	0	1	1	1	Ordre d'arrêt arrière sur zone râtelier / transfert (sauf sur axe de circulation)
0	1	0	0	1	Ordre de passage en petite vitesse
0	1	0	1	1	Ordre d'arrêt avant quand ressuage au travail
0	1	1	0	1	Ordre d'arrêt avant

Toutes les autres combinaisons seront considérées comme incohérentes ($V_X = 0$).

→ pour le mouvement selon la direction y

b_5	b_4	b_3	b_2	b_1	Descriptif
0	0	0	1	1	Ordre d'arrêt droit sur zone réacteur
0	0	1	0	1	Ordre de passage en petite vitesse droite sur zone réacteur
0	0	1	1	1	Ordre d'arrêt droit sur zone râtelier / transfert
0	1	0	0	1	Ordre de passage en petite vitesse droite sur zone râtelier / transfert
0	1	0	1	1	Ordre de passage en petite vitesse gauche sur zone réacteur et zone râtelier / transfert
0	1	1	0	1	Ordre d'arrêt gauche sur zone réacteur
0	1	1	1	1	Ordre d'arrêt gauche sur zone râtelier / transfert

Toutes les autres combinaisons seront considérées comme incohérentes ($V_Y = 0$).

Q10. Déterminer, en utilisant les tableaux de Karnaugh, les expressions les plus simples possibles des fonctions de vérification $V_X(a_1, a_2, a_3, a_4, a_5)$ et $V_Y(b_1, b_2, b_3, b_4, b_5)$. On rappelle que $a_5 = b_5 = 0$.

2.4.4. Gestion de la montée / descente du combustible

Lorsque la machine de chargement se trouve à la verticale du point où doit être placé ou enlevé le combustible, on arrête les mouvements selon les directions x et y : dans tout ce qui suit, on considérera que le pont est fixe par rapport au sol au cours du temps et que le seul le mouvement de montée / descente (selon la direction z) est autorisé.

Le système de montée et descente du combustible est constitué (voir figure 13) :

- d'un tambour motorisé par un moteur à courant continu en série avec un réducteur à arbre creux,
- d'un système à moufle permettant de diviser par deux l'effort au niveau du moteur,
- d'un compensateur de charge constitué de deux vérins montés en série et qui, selon leur alimentation, permettent de déplacer légèrement le câble dans un sens ou un autre pour récupérer les éventuels blocages : en fonctionnement normal, le compensateur est sous pression, ce qui permet de considérer que le point P de sortie du compensateur est aussi un point fixe

Remarque préliminaire : dans toute l'étude, on notera en minuscule les fonctions du temps et en majuscule celles de la variable de Laplace p : ainsi, on notera par exemple B(p) = $\mathcal{L}[b(t)]$ où L est le symbole de la transformée de Laplace monolatérale d'une fonction.

L'asservissement de la montée et descente de la charge se fait suivant le schéma bloc avec boucle tachymétrique représenté figure 11 :

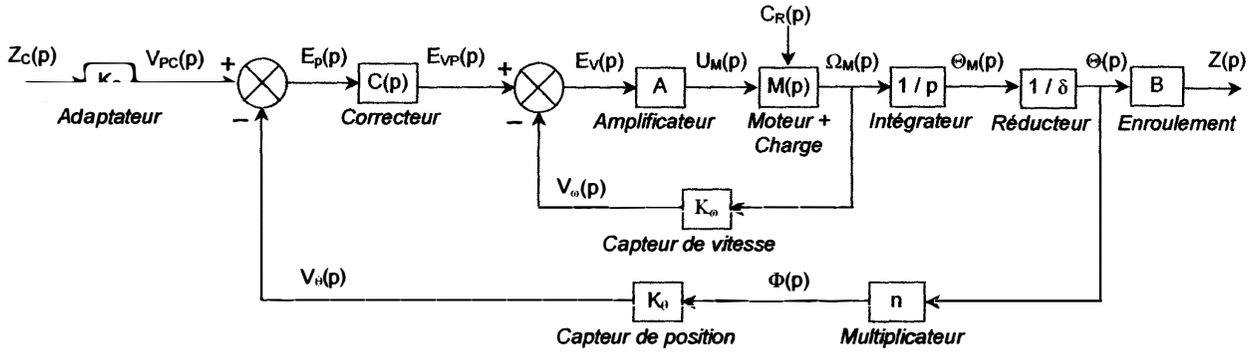


Figure 11 : asservissement de position avec boucle tachymétrique

- $Z_C(p) = \mathcal{L}[z_C(t)]$ est la transformée de la hauteur de consigne z_C
- $Z(p) = \mathcal{L}[z(t)]$ est la transformée de la hauteur réelle atteinte z
- $C_R(p) = \mathcal{L}[c_R(t)]$ est le couple résistant rapporté à l'arbre moteur et il correspond à la charge à monter
- K_C est le gain du boîtier adaptateur : **à déterminer**
- A est le gain de l'amplificateur (réglable) qui alimente le moteur (sans unité) : **à déterminer**
- K_ω est le gain du capteur de vitesse : $\mathbf{K_\omega = 6\ mV.s.rad^{-1}}$
- K_θ est le gain du capteur de position : $\mathbf{K_\theta = 1\ mV.rad^{-1}}$
- $1 / \delta$ est le gain du réducteur à arbre creux placé entre le moteur et le tambour : δ **= 350**
- n est le gain du multiplicateur de vitesse entre le tambour et le capteur de position : **à déterminer**

La partie « Moteur + Charge » peut se modéliser sous la forme de la figure 12 :

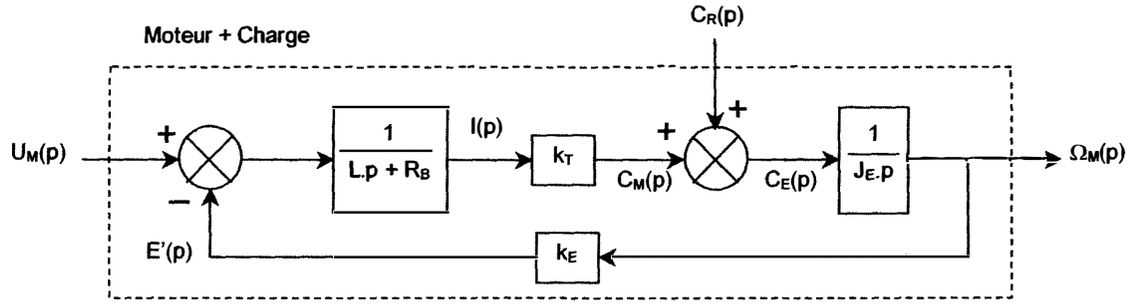


Figure 12 : schéma fonctionnel du moteur

L est l'inductance de l'induit : **L = 3,6 mH** R_B est la résistance du bobinage : $\mathbf{R_B = 0,71\ \Omega}$

k_T est la constante de couple : $\mathbf{k_T = 0,254\ N.m.A^{-1}}$ k_E est la constante de f.c.e.m. : $\mathbf{k_E = 0,254\ V.s.rad^{-1}}$

J_E est le moment d'inertie équivalent rapporté à l'arbre moteur (en $kg.m^2$) : **à déterminer**

2.4.4.1. Détermination du moment d'inertie équivalent J_E et du couple résistant $c_R(t)$

Pour déterminer ces valeurs, nous allons étudier le mouvement de montée d'une charge par le système à mouffle (voir figure 13). On rappelle que, pendant la phase de montée, le pont est supposé parfaitement fixe par rapport au sol : le repère lié au pont est donc supposé galiléen.

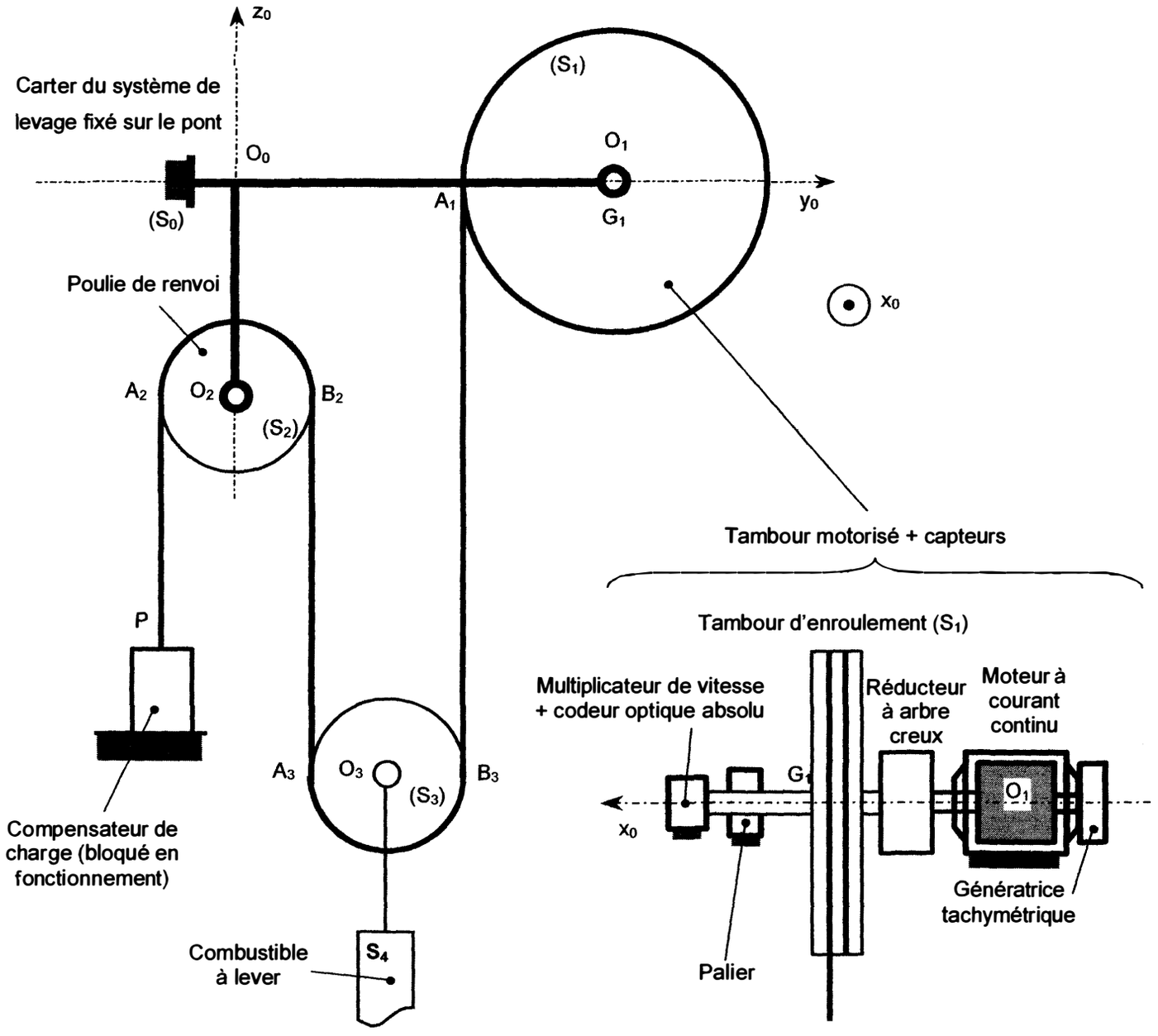


Figure 13 : schéma du système de levée

Paramétrage du problème

- Le repère $R_0(O_0, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$ lié au carter du système de levage (S_0), fixé sur le pont, est supposé galiléen
- On fixe le stator du moteur d'entraînement sur (S_0) en un point O_1 tel que $\overrightarrow{O_0O_1} = -d.\vec{x}_0 + a.\vec{y}_0$; le rotor (Rot) du moteur d'entraînement est en liaison pivot d'axe $(O_1, \vec{x}_0)$ avec le stator fixé sur le carter (S_0) : sa masse est M_R et son moment d'inertie par rapport à l'axe $(O_1, \vec{x}_0)$ est J_R ; on lui associe le repère $R_R(O_1, \vec{x}_0, \vec{y}_R, \vec{z}_R)$ tel que $(\vec{y}_0, \vec{y}_R) = (\vec{z}_0, \vec{z}_R) = \theta_M$. Les actions mécaniques exercées par le stator du moteur sur le rotor sont modélisables par le torseur :

$$\left\{\mathcal{T}_{\text{stator}\to\text{rotor}}\right\}_{O_1} = \left\{\begin{array}{l}\vec{R}(\text{stator}\to\text{rotor}) = X_{st}.\vec{x}_0 + Y_{st}.\vec{y}_0 + Z_{st}.\vec{z}_0 \\ \vec{M}(O_1, \text{stator}\to\text{rotor}) = C_m.\vec{x}_0 + M_{st}.\vec{y}_0 + N_{st}.\vec{z}_0\end{array}\right\}_{O_1} \quad \text{avec } C_m = \text{couple du moteur}$$

- Entre le rotor (Rot) du moteur d'entraînement et le tambour moteur (S_1) se trouve un réducteur à arbre creux (Red), supposé de masse négligeable, de rapport de réduction 1 / δ (rappel : δ = 350) et de rendement mécanique unitaire.
- Le tambour moteur (S_1) est de rayon R_1, de masse M_1, de centre de gravité G_1 tel que $\overrightarrow{O_0G_1} = a.\vec{y}_0$ et de moment d'inertie J_1 par rapport à l'axe $(G_1,\vec{x}_0)$. On lui associe le repère $R_1(G_1,\vec{x}_0,\vec{y}_1,\vec{z}_1)$ tel que $(\vec{y}_0,\vec{y}_1) = (\vec{z}_0,\vec{z}_1) = \theta$
- La poulie de renvoi (S_2) est en liaison pivot d'axe $(O_2,\vec{x}_0)$ tel que $\overrightarrow{O_0O_2} = -b.\vec{z}_0$ avec le carter (S_0) du système de levage ; comme le compensateur de charge est bloqué par rapport au carter, la poulie de renvoi (S_2) est immobile par rapport au repère galiléen
- La poulie de moufle (S_3) est de rayon R_3, de masse M_3, de centre d'inertie O_3 et de moment d'inertie J_3 par rapport à l'axe $(O_3,\vec{x}_0)$. On lui associe le repère $R_3(O_3,\vec{x}_0,\vec{y}_3,\vec{z}_3)$ tel que $(\vec{y}_0,\vec{y}_3) = (\vec{z}_0,\vec{z}_3) = \varphi$
- La charge (S_4) est liée par une liaison pivot d'axe $(O_3,\vec{x}_0)$ à la poulie de moufle (S_3) ; on suppose que, pendant les phases de mouvement, elle reste parfaitement verticale ; sa masse est M_4 et son centre d'inertie G_4 est situé à la verticale du point O_3

Données complémentaires

- L'accélération de la pesanteur est $\vec{g} = -g.\vec{z}_0$
- Toutes les liaisons sont supposées parfaites
- Le câble est de masse négligeable, inextensible et il n'y a pas de glissement entre le câble et les poulies
- Les brins A_1B_3 et A_3B_2 sont supposés parallèles et verticaux
- On pose : $z(t) = \overrightarrow{O_0O_3}.\vec{z}_0$

Q11. Par la méthode de votre choix, déterminer les deux relations liant $\dot{z}$, $\dot{\varphi}$ et R_3 d'une part et $\dot{z}$, $\dot{\theta}$ et R_1 d'autre part. En déduire le gain B de l'enroulement (voir figure 11).

On note (S) l'ensemble {tambour (S_1), poulie de renvoi (S_2), poulie de moufle (S_3), charge (S_4), rotor (Rot), câble et réducteur à arbre creux (Red)}. Le moment d'inertie équivalent rapporté à l'arbre moteur de l'ensemble S en mouvement par rapport au repère galiléen R_0 est noté J_E et est défini par $2.T(S/R_0) = J_E.\dot{\theta}_M^2$ où $T(S/R_0)$ est l'énergie cinétique galiléenne du système matériel S.

Q12. Déterminer J_E en fonction de J_R, J_1, J_3, R_1, R_3, M_3, M_4 et δ.

Q13. Exprimer $c_R(t)$ en fonction de M_3, M_4, g, R_1 et δ par application du « Théorème de l'Énergie – Puissance » à l'ensemble matériel S.

Pour toute la suite du problème, on prendra **J_E = 0,003 kg.m^2** et **c_R = 1,5 N.m**.

Remarque : ces deux valeurs ont été obtenues en utilisant les formules précédentes et en prenant un coefficient de sécurité permettant de surévaluer le couple résistant rapporté à l'arbre moteur

2.4.4.2. Validation du choix du moteur dans le cas d'une phase de montée de charge

On donne (voir figure 14) la courbe d'évolution de la vitesse de montée lors d'une phase d'accélération. La phase de décélération est identique et symétrique.

Cette phase se décompose en six zones, correspondant à des accélérations ou des vitesses constantes :

- entre t = 0 et t = t_1 : accélération constante $\ddot{z} = a = 0{,}01$ m.s^{-2}
- entre t = t_1 et t = t_2 : stabilisation pendant 5 s à la vitesse de $\dot{z}$ = 0,6 m.min^{-1} = 0,01 m.s^{-1}
- entre t = t_2 et t = t_3 : accélération constante $\ddot{z} = a = 0{,}01$ m.s^{-2}
- entre t = t_3 et t = t_4 : stabilisation pendant 5 s à la vitesse de $\dot{z}$ = 2,4 m.min^{-1} = 0,04 m.s^{-1}
- entre t = t_4 et t = t_5 : accélération constante $\ddot{z} = a = 0{,}01$ m.s^{-2}
- après t = t_5 : stabilisation à la vitesse de $\dot{z}$ = 6 m.min^{-1} = 0,1 m.s^{-1} jusqu'à la phase de décélération

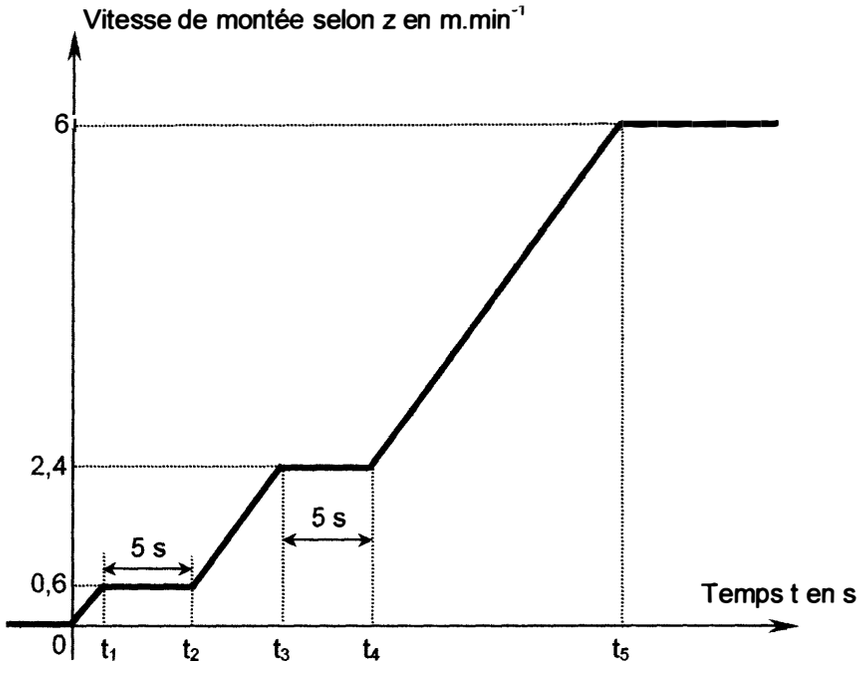


Figure 14 : graphe d'évolution de la vitesse de montée de la charge

On rappelle que :

- le rapport de réduction est $1 / \delta$ avec $\delta = 350$
- le moment d'inertie rapporté à l'arbre moteur est $J_E = 0{,}003$ kg.m^2
- le couple résistant est $c_R = 1{,}5$ N.m.

On donne de plus le rayon du tambour : $R_1 = 0{,}15$ m.

Q14. À partir de la courbe fournie figure 14 et des données ci-dessus, tracer la courbe d'évolution du couple moteur $c_M(t)$ au cours du temps lors de la phase de montée de la charge.

Q15. Le moteur choisi RS510L convient-il, sachant que tous les points de fonctionnement obtenus doivent se trouver dans sa zone de résistance thermique indiquée sur la figure 15 ?

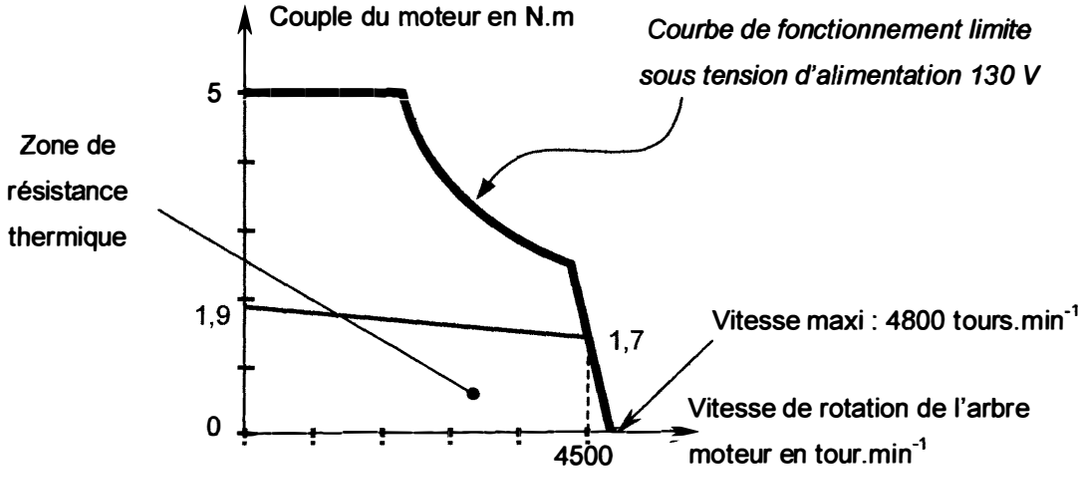


Figure 15 : courbe de fonctionnement du moteur choisi

2.4.4.3. Étude de la boucle interne

On peut montrer, à partir du schéma de la figure 12, qu'il est possible d'écrire :

$$\Omega_M(p) = \frac{k}{k^2 + J_E.p.(L.p + R_B)} U_M(p) + \frac{L.p + R_B}{k^2 + J_E.p.(L.p + R_B)} C_R(p) \quad \text{avec } k = k_E = k_T$$

On adopte maintenant le schéma équivalent suivant pour la boucle interne du schéma d'asservissement (voir figure 11) : cette boucle interne est d'entrée $E_{VP}(p)$ et de sortie $\Omega_M(p)$.

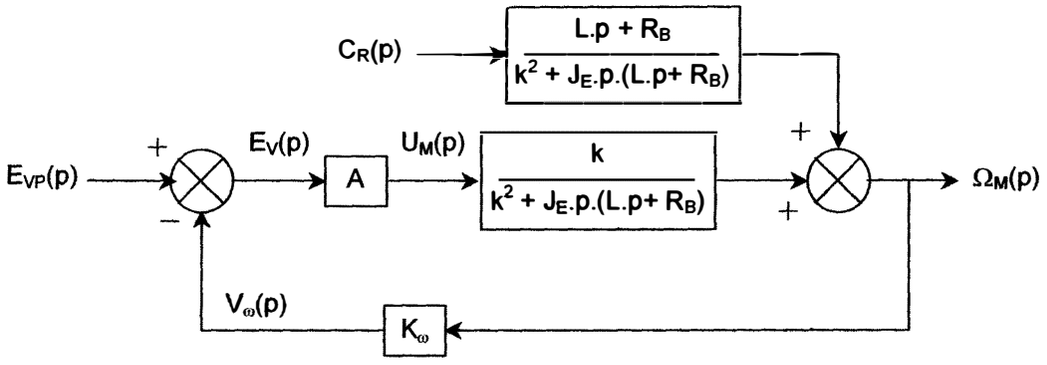


Figure 16 : boucle interne de l'asservissement

Q16. Déterminer, en fonction de A, K_ω, k, J_E, L et R_B les deux fonctions de transfert $G_1(p)$ et $G_2(p)$ telles que : $\Omega_M(p) = G_1(p) . E_{VP}(p) + G_2(p) . C_R(p)$.

On suppose pour la question ci-après que la perturbation est absente c'est-à-dire que $C_R(p) = 0$.

Q17. Déterminer l'expression puis la valeur numérique du gain A pour que la réponse de la boucle interne soit la plus rapide possible, sans oscillation, pour une entrée en échelon de tension de commande d'amplitude e_0 : $e_{VP}(t) = e_0.u(t)$ avec u(t) = fonction échelon unitaire.

2.4.4.4. Détermination du rapport de réduction et de la précision de mesure sur la position z

Le débattement selon la direction z est de 5,06 m et on souhaite avoir une précision de ± 5 mm sur la position atteinte. Pour mesurer la position, le capteur de position utilisé est de type absolu sur 16 tours à 1024 positions de mesure par tour (soit 16384 positions de mesure en tout). On souhaite utiliser toute la plage de mesure de ce capteur. On rappelle que le rayon du tambour est $R_1 = 0,15$ m.

Q18. Déterminer la valeur maximale de n respectant les conditions précédentes (n est le gain du multiplicateur de vitesse : voir figure 11).

On prend maintenant n = 1 (pas de multiplicateur de vitesse).

Q19. Déterminer la précision de la mesure selon la direction z avec cette configuration ; conclure en comparant la précision obtenue et la précision souhaitée dans le cahier des charges (voir ci-dessus). Expliquer la ou les raison(s) qui ont poussé les concepteurs à faire un tel choix.

Après prise en compte de tous les résultats précédents, on obtient alors le schéma suivant :

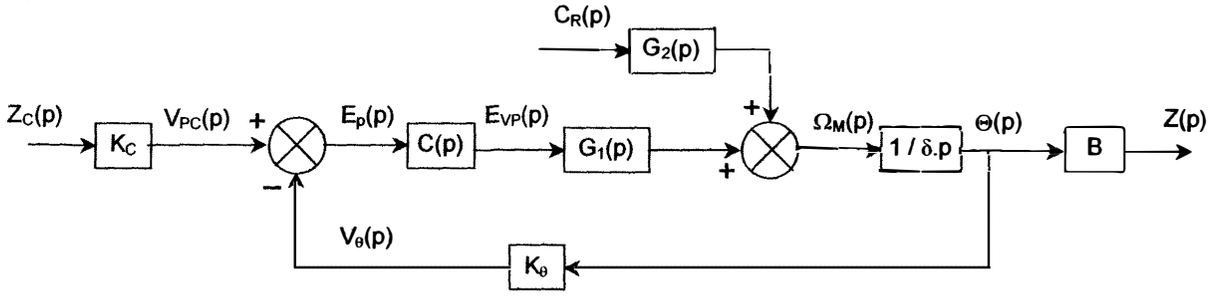


Figure 17 : asservissement de position de la charge

Pour assurer une commande simple, on souhaite que, lorsque la hauteur réelle z(t) est égale à la hauteur de consigne $z_C(t)$, la tension $e_p(t)$ en sortie du comparateur soit nulle.

Q20. Déterminer l'expression de K_C en fonction de K_θ et B puis en fonction de K_θ et R_1. Effectuer l'application numérique, sachant que $K_\theta = 1$ mV.rad^{-1} et $R_1 = 0,15$ m.

2.4.4.5. Prise en compte des perturbations

Pour être précis en position quelle que soit la perturbation, on choisit maintenant un correcteur contenant un terme intégral placé en amont de la perturbation.

Q21. Justifier ce choix. Quel est le défaut principal de ce type de correction ? Justifier succinctement.

Dans le cas très particulier étudié (perturbation constante et connue), il est inutile, voire dangereux au vu du contexte (déplacement de combustible nucléaire), d'agir de cette façon : en effet, il suffit de prendre en entrée une consigne légèrement supérieure à celle qui est attendue (voir schéma d'asservissement figure 17).

La valeur de B a été calculée à la question Q11

Les expressions de $G_1(p)$ et $G_2(p)$ ont été obtenues à la question Q16

L'expression de A (apparaissant dans les expressions précédentes) a été calculée à la question Q17.

La valeur de K_C a été obtenue à la question Q20.

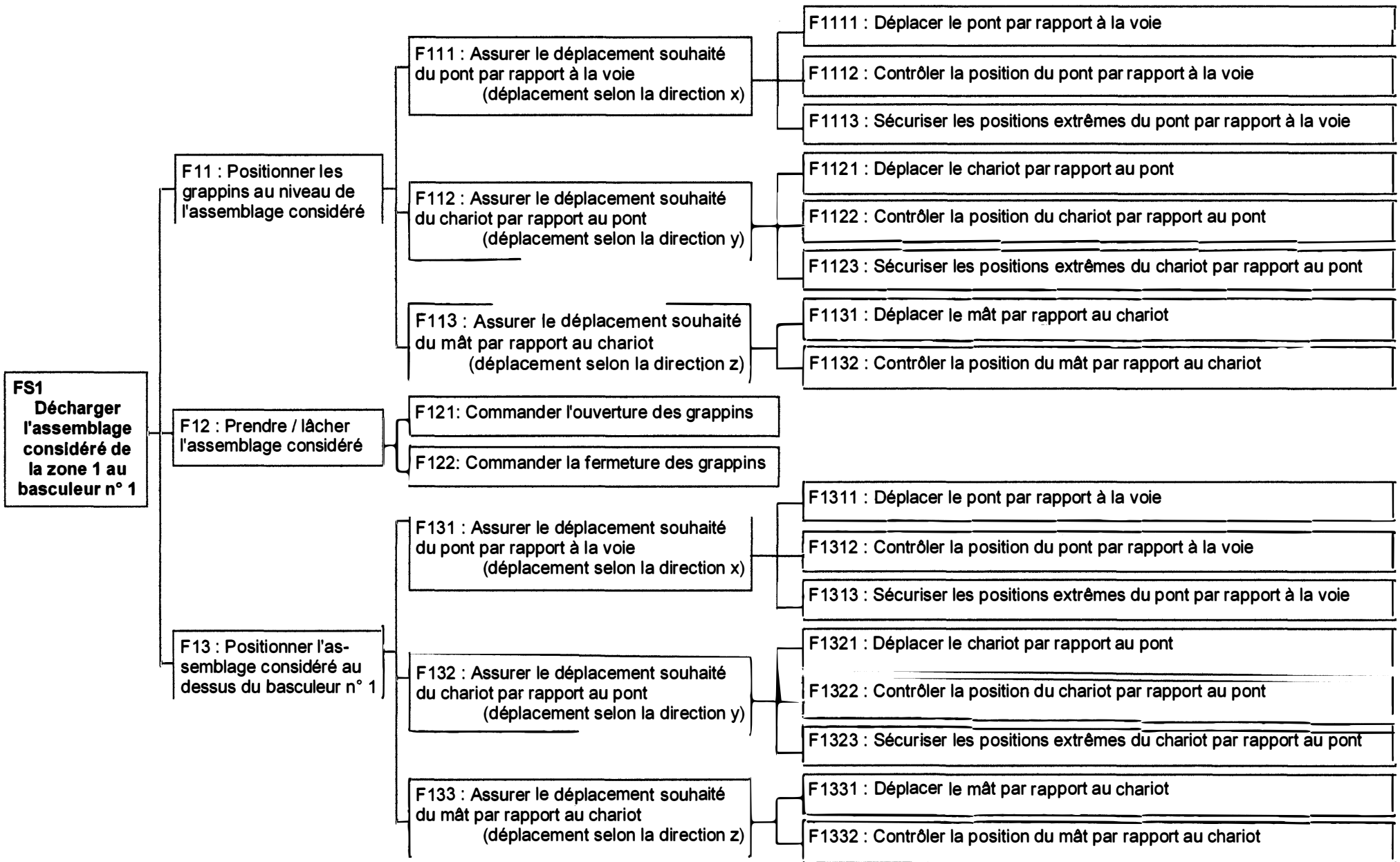
On rappelle par ailleurs que $\delta = 350$, $K_\theta = 1$ mV.rad^{-1} et $c_R = 1,5$ N.m.

Q22. Déterminer l'expression puis la valeur de la variation de consigne Δz_C qu'il faut rajouter en entrée pour que le système perturbé et non corrigé (C(p) = 1) reste précis.

Le système asservi non corrigé mais piloté avec une consigne adaptée permettrait théoriquement d'atteindre la position demandée avec la précision nécessaire. Cependant, une correction plus étudiée sera nécessaire afin d'assurer les performances attendues malgré les perturbations non prises en compte ici, en particulier la déformation des câbles et les bruits de l'alimentation électrique. Ces dernières, aléatoires pour la déformation et cycliques pour les bruits, auront besoin d'être corrigées par une correction robuste.

– Fin –

ANNEXE : décomposition fonctionnelle de la fonction de service FS1 de la machine de déchargement et chargement



Travailler les chapitres de ce sujet

Prepa Help suit le programme de MP chapitre par chapitre : cours détaillé, méthodes, pièges, exercices et problèmes corrigés pas à pas, tirés des concours. L'essai gratuit donne accès aux chapitres offerts de ta filière, sans carte bancaire.

Chapitres liés à ce sujet

- Ingénierie système : besoin, exigences et diagrammes SysML
- Modélisation des liaisons, graphe des liaisons et schéma cinématique
- Chaînes de solides : liaisons équivalentes, mobilité et hyperstatisme
- Dynamique des systèmes de solides : principe fondamental, stratégie d'isolement, équilibrage
- Modélisation des actions mécaniques : modèles local et global, frottement, torseurs des liaisons
- Cinétique : torseurs cinétique et dynamique, énergie cinétique, inertie équivalente
- Énergétique : puissances, théorème de l'énergie cinétique, rendement
- Modélisation des systèmes asservis : structure, SLCI, transformée de Laplace, schéma-blocs

Ouvrir l'essai gratuit

Scanne le code ou clique sur le bouton.

prepahelp.com/#essai

Une question sur le concours ou sur ta filière : **écrire sur WhatsApp**

Les autres années et épreuves : prepahelp.com/annales/e3a/mp