

SESSION DE 1999

**concours externe
de recrutement de professeurs agrégés**

section : mécanique

épreuve d'automatique - informatique industrielle

Durée : 4 heures

Calculatrice électronique de poche - y compris programmable et alphanumérique - à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 86-228 du 28 juillet 1986.

Tout document et tout autre matériel électronique sont interdits.

Tournez la page S.V.P.



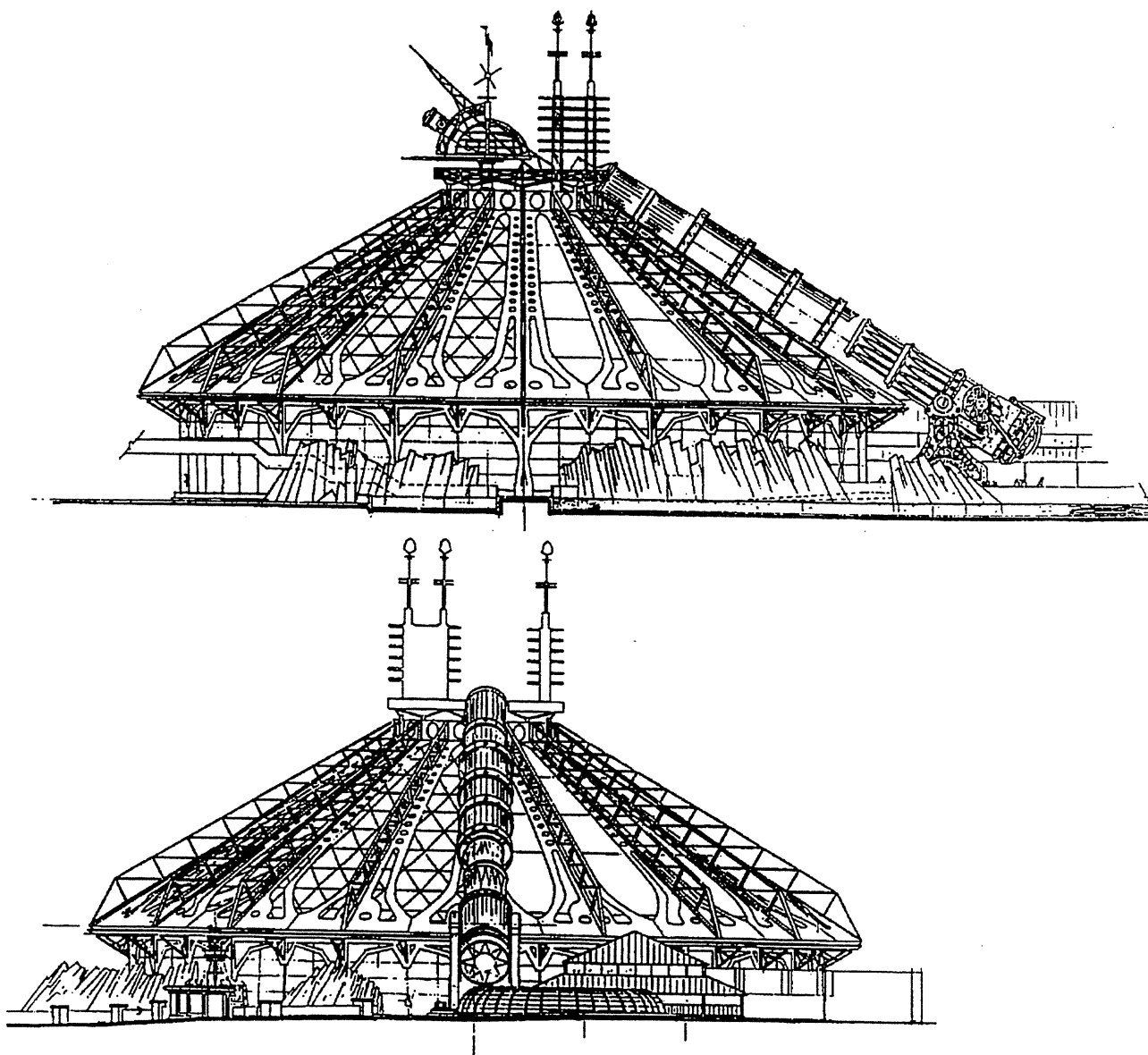
Présentation du sujet

L'attraction « Space Mountain »

Cette attraction se présente sous la forme d'un chapiteau renfermant une montagne russe à grande vitesse. Les passagers peuvent faire l'expérience d'un voyage évoquant l'histoire du roman de JULES VERNE « De la terre à la lune », grâce à de somptueux décors spatiaux. Les voitures sont sonorisées en synchronisation avec le circuit qui comporte trois renversements complets.

Le système de lancement, évoquant un canon, est en fait une catapulte à propulsion électrique de type porte-avions.

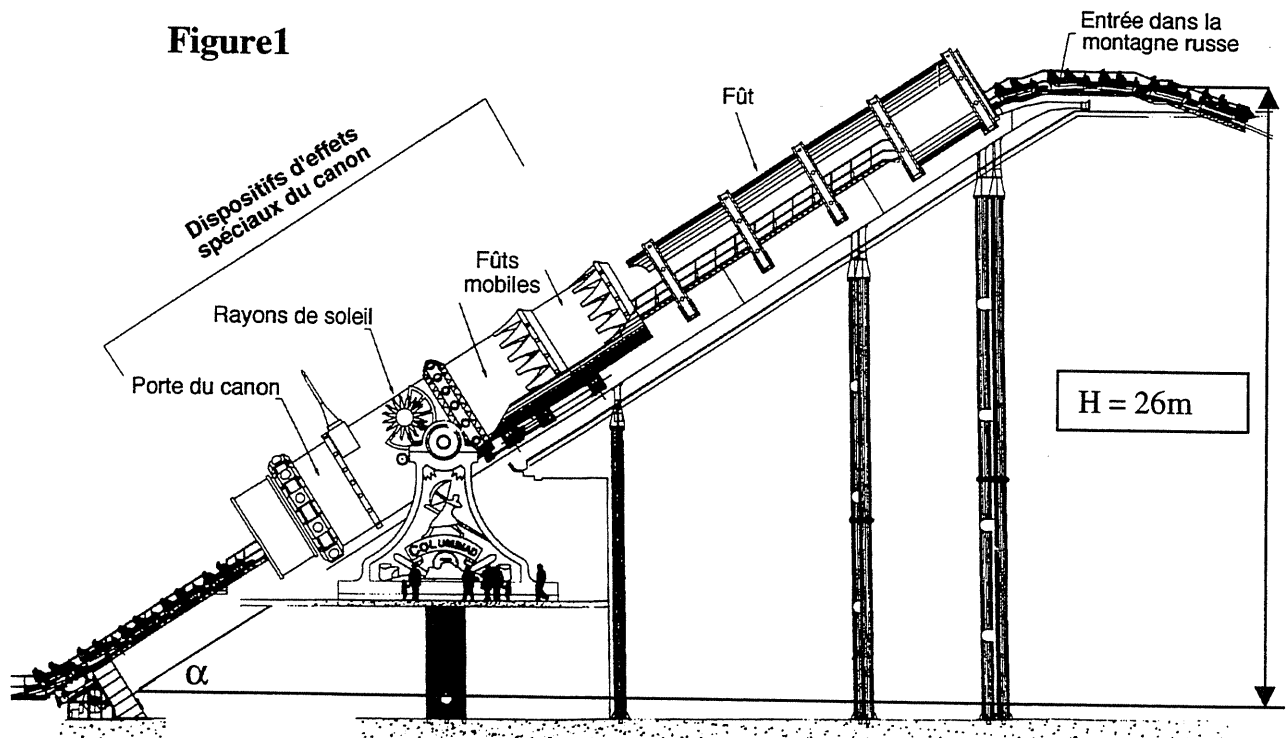
Les schémas suivants donnent un aperçu de l'ensemble.



L'application concerne l'étude du fonctionnement et de la conception du canon-catapulte dont le schéma d'installation est donné **figure 1** suivante :

Tournez la page S.V.P.

Figure1



Extrait du cahier des charges fonctionnel du canon-catapulte

	Fonction	Critères	Niveau
FP1	Propulser en toute sécurité un train de passagers vers le point d'entrée de la montagne russe	- durée du cycle de lancement - fréquence de lancement - masse propulsée - inclinaison de la voie - maintien en position - caractérisation du cycle : . vitesse de propulsion . accélération . vitesse au point d'entrée	- 30 seconde maxi - 1 toutes les 36 s - 7 500 kg maxi - à déterminer - frein de parking - voir figure 2 - 14 m/s maxi - $8 \text{ m/s}^2 \text{ mini } \pm 1 \text{ m/s}^2$ - 4 m/s mini
FP2	Transférer un train de passager depuis l'embarquement jusqu'au point de propulsion	- durée du cycle de préparation - maintien en position	- 15 s - cames (Anti Roll Back)
FC1	Donner l'illusion d'un tir de canon par des effets spéciaux FC11 : Avancer et reculer les fûts mobiles FC12 : Mettre en mouvement la porte latérale du canon FC13 : Mettre en rotation les rayons du soleil FC14 : Émettre un nuage de vapeur FC15 : Emettre un «Bang» sonore	(durées des effets spéciaux) - durée de l'avance et du recul du canon - durée du mouvement de la porte latérale du canon - durée de rotation des rayons - durée d'émission du nuage de vapeur - durée d'émission du «Bang» sonore	- 5 s maxi - 5 s maxi - 5 s maxi - 5 s maxi - 1 s maxi
FC2	Être commandé en toute sécurité	- asservissement du propulseur . précision en vitesse . précision en accélération - asservissement de tension du câble - modes de fonctionnement	- $\pm 1\%$ - $\pm 1\%$ - auto / manuel
FC3	Etre alimenté en énergie	tension d'alimentation	700 V nominal

Description du cycle de fonctionnement

a- Opération préliminaire : chargement des passagers et aménagement du train à l'entrée du canon

Une fois chargé de ses passagers et sur ordre d'un opérateur, chaque train composé de six wagonnets quitte la station par un tronçon de voie incliné qui le conduit jusqu'au pied de la rampe de lancement. Le train est alors freiné par des patins de serrage situés entre les rails, chaque wagonnet possédant une lame centrale prévue à cet effet. Les freins sont relâchés dès que le convoi est immobilisé, ce dernier venant se bloquer par gravité sur des cames appelées ARB (Anti Roll Back) qui se coincent par paires sur la lame centrale de chaque wagonnet. Pendant ce temps, le pousseur achève sa redescente jusqu'à sa position basse, de telle manière qu'il croise le train en mouvement (la plaque d'appui située sur le troisième wagonnet s'escamote pour laisser passer le pousseur).

b- Phase 0 : Engagement du pousseur

Le cycle du pousseur débute, à partir de sa position basse, par l'accostage avec le train à la hauteur du troisième wagonnet, son aileron venant rencontrer la plaque d'appui prévue à cet effet : voir chronogramme **figure 3**. Pendant cette opération d'engagement du pousseur, qui dure 5 secondes au maximum, le train reste fixe

A la fin de l'engagement, le train est immobile en attente d'une autorisation de chargement. La durée de l'attente est notée t_0 . Des effets spéciaux sont associés à cette phase d'attente : la porte latérale du canon s'ouvre et simultanément les rayons du soleil tournent dans le sens anti-horaire.

c- Phase 1 : Chargement dans le canon

Cette phase permet un test dynamique du système de lancement : le pousseur monte le train dans le canon. Le train de passagers subit une accélération de $2,5\text{m/s}^2$ pour l'amener à une vitesse de 3m/s , vitesse qui est maintenue pendant 5s. Un freinage à décélération constante de 3m/s^2 jusqu'à la vitesse nulle termine le cycle de chargement dans le canon (voir le chronogramme « train » **figure 2**). Durant cette phase et dès que la tête du train est engagée dans le canon, la porte latérale du canon se referme (même durée que l'ouverture) et les rayons du soleil tournent dans le sens horaire. En fin de phase de chargement, une attente de durée t_4 est alors imposée avant de débiter la phase de lancement. La porte latérale du canon achève son mouvement ainsi que les rayons du soleil, avant la fin de cette phase d'attente.

d- Phase 2 : Lancement du train

Le train est lancé par l'intermédiaire du pousseur avec une accélération de 8m/s^2 jusqu'à une vitesse de 14m/s . Lorsque cette vitesse est atteinte, le pousseur se désolidarise du train (voir phase 3, **figure 3**). Le train, qui se déplace sur un axe parallèle à la surface du toit conique, termine son ascension sur sa lancée à une vitesse d'apogée de 4m/s au minimum (voir chronogramme **figure 2**). Il rentre alors dans un virage vertical pour entamer un plongeon dans la montagne russe.

Les effets spéciaux associés à cette phase débutent au moment précis du lancement : émission de jets de vapeur par des buses situées à l'embase du canon, émission sonore d'un « Bang », et recul des deux fûts mobiles du canon par un système de deux vérins hydrauliques. Dès que les fûts sont reculés ils effectuent leur retour, l'aller-retour durant 5 secondes. L'émission de vapeur cesse en fin de retour des fûts mobiles.

e- Phase 3 : Décélération du pousseur et retour en position d'origine

Le pousseur se dégage du train en freinant alors que le train poursuit sur sa lancée. Un dispositif de sécurité pour arrêter le pousseur est installé environ deux mètres avant le point limite de dégagement. Le freinage obtenu, le pousseur revient en position initiale en croisant le train suivant

à l'entrée du canon, en bas de la rampe de lancement. Le cycle complet du pousseur est représenté sur le chronogramme **figure 3**.

Remarque générale : le frein de parking lié au pousseur (voir **figure 4**) est mécaniquement actionné lorsque le pousseur n'est pas dans une phase de mouvement. Il est donc nécessaire d'émettre un ordre de déverrouillage lors des déplacements du pousseur.

Figure 2 : chronogramme "train" (phase 1 et 2 du lancement)

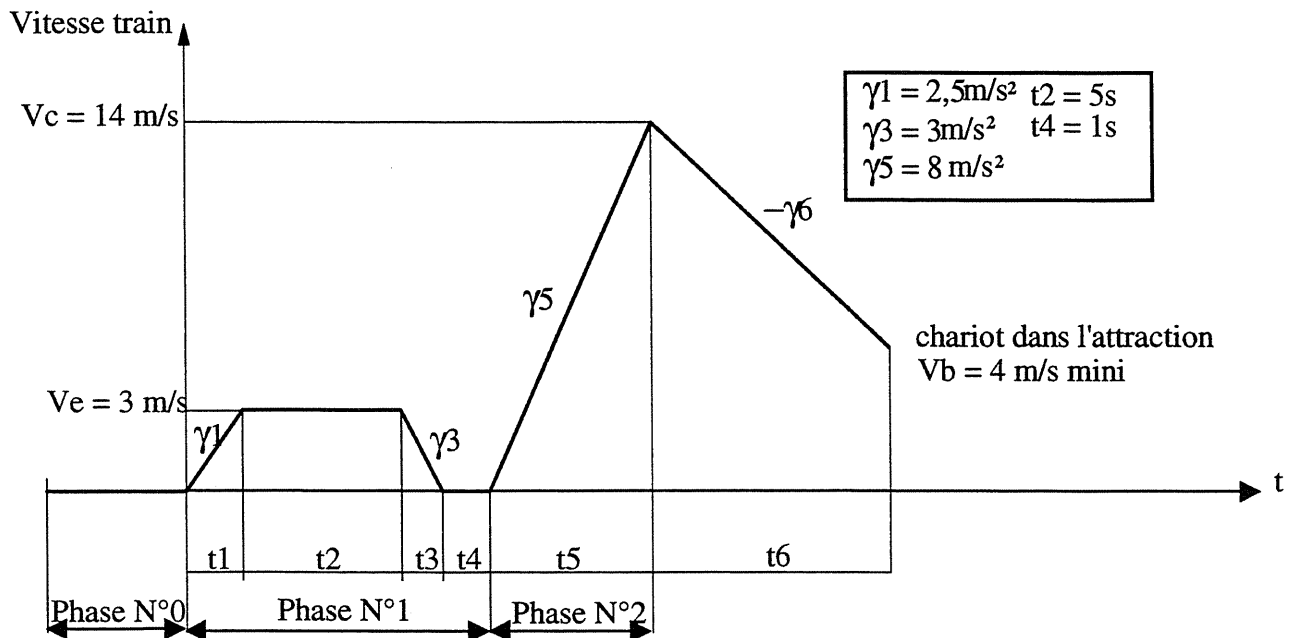
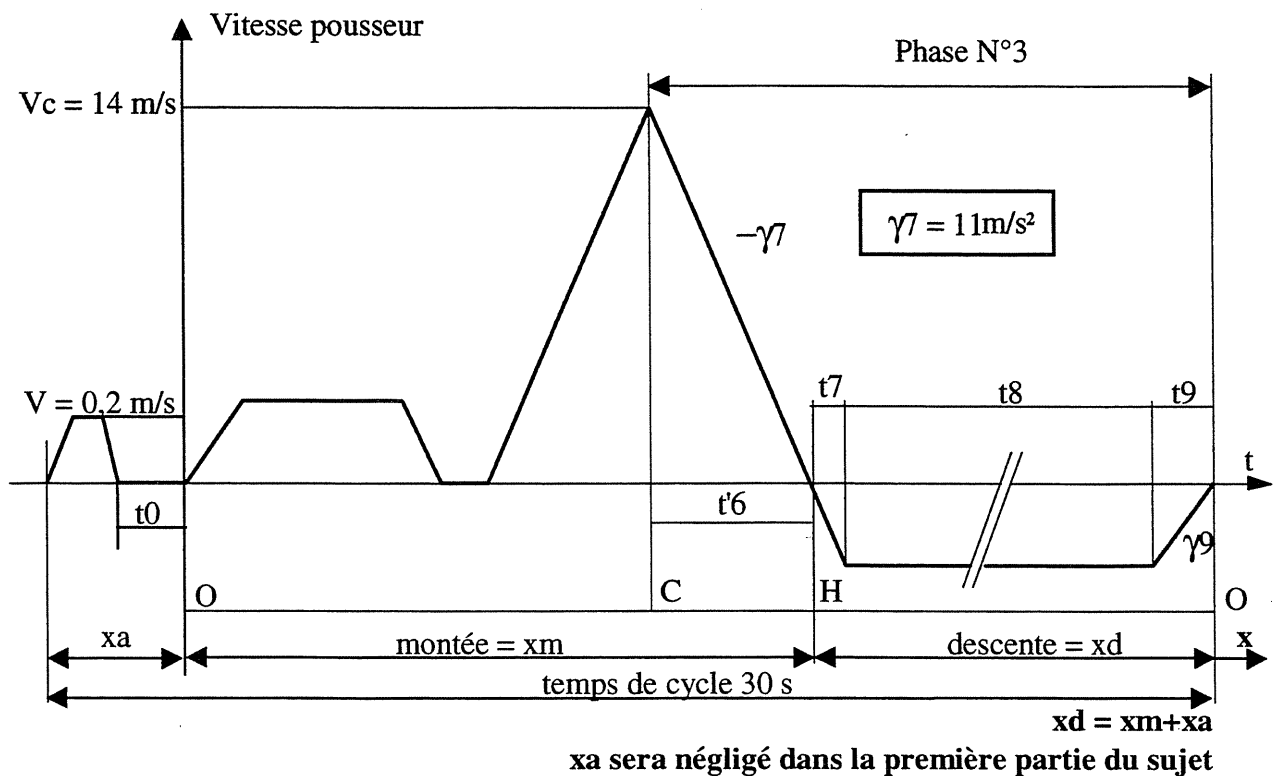


Figure 3 : chronogramme "pousseur" (phase 0 à 3)



Description du système de lancement

Le système de lancement proprement dit comporte :

- une rampe de lancement intégrée à un canon catapulte et disposée selon la génératrice du bâtiment de forme conique et de hauteur environ 30 m (dissimulant la montagne russe, plongée dans le noir, et ses dispositifs d'animation) : voir photo et **figure 1** ;
- une chaîne fonctionnelle d'entraînement du poussoir **2** (voir **figure 4**) : le poussoir est lié à un câble **3** dont le déplacement est assuré par un tambour enrouleur-dérouleur **4** (voir dessin du tambour **figure 7**) entraîné par une motorisation (**6, 7, 8**) de très forte puissance et une poulie de tête **5**,
- une chaîne fonctionnelle de tension du câble associée à la poulie de tête **5** : la tension du câble est ainsi contrôlée et asservie pendant toute la phase de lancement ;
- un frein de parking permet d'assurer le blocage du tambour d'entraînement. Ce frein est serré au repos par un système à ressorts (rondelles type « belleville »).

Figure 4 : chaînes fonctionnelles de propulsion du poussoir et de tension du câble

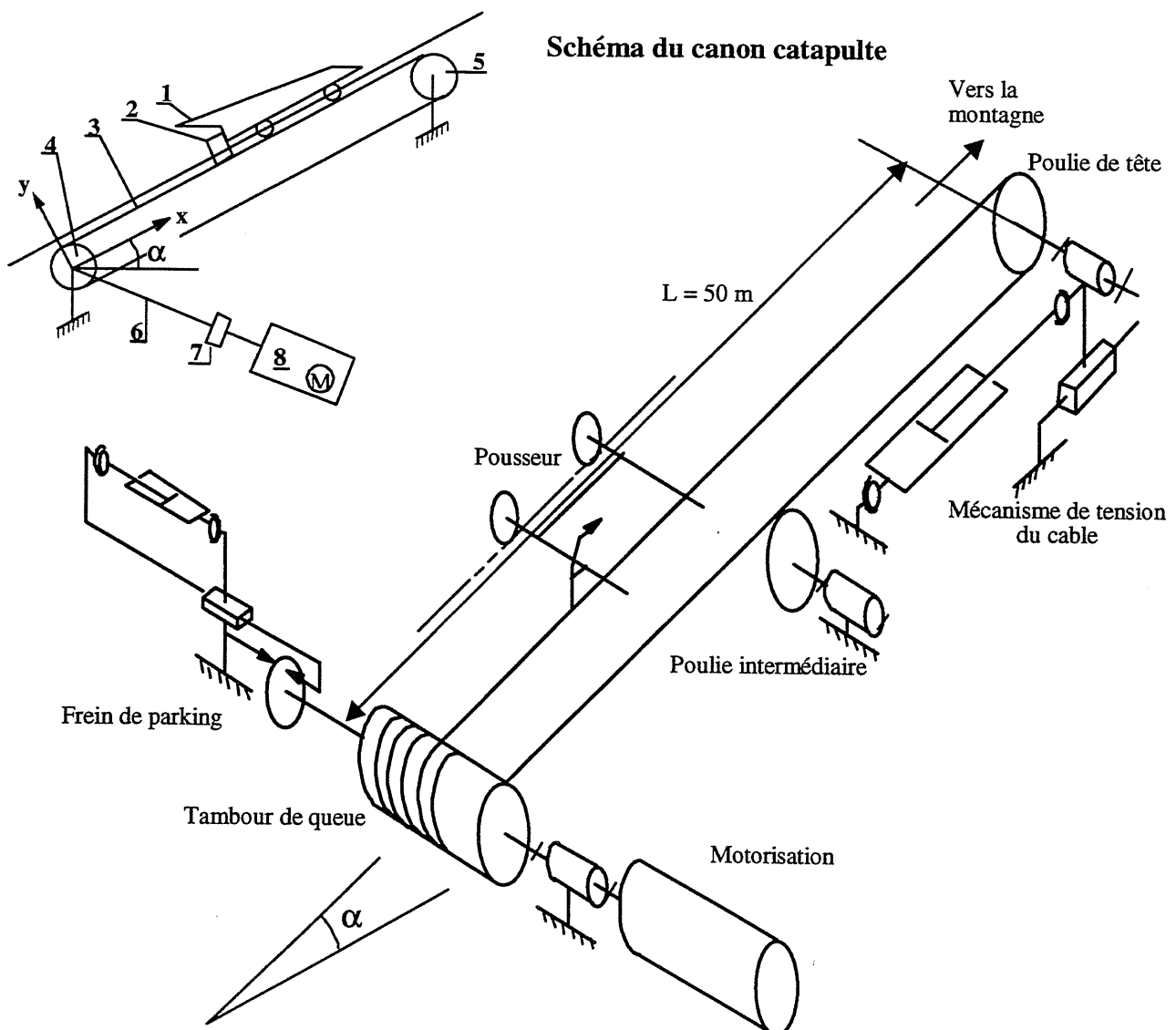


Figure 5 : synoptique général simplifié de la commande

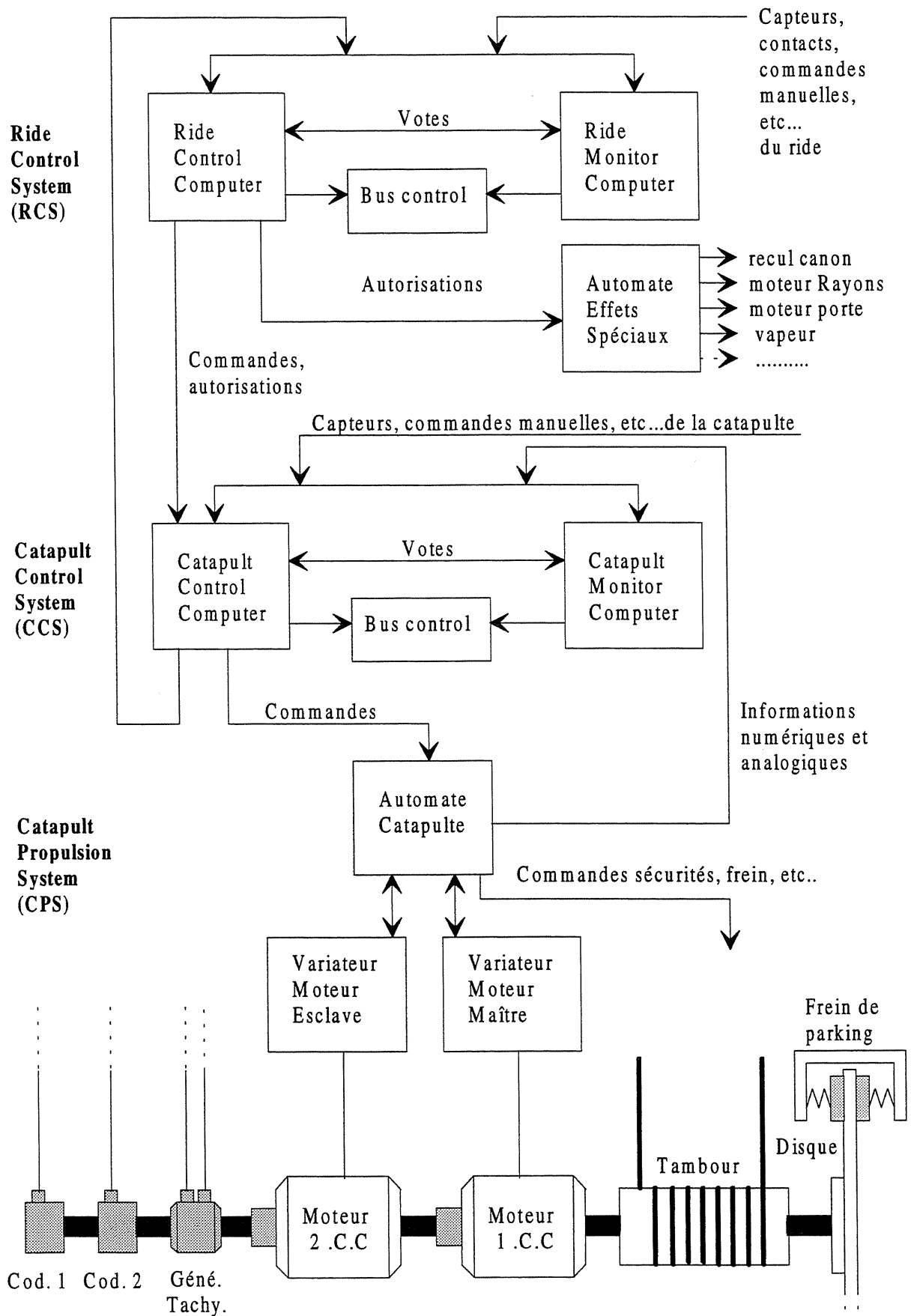
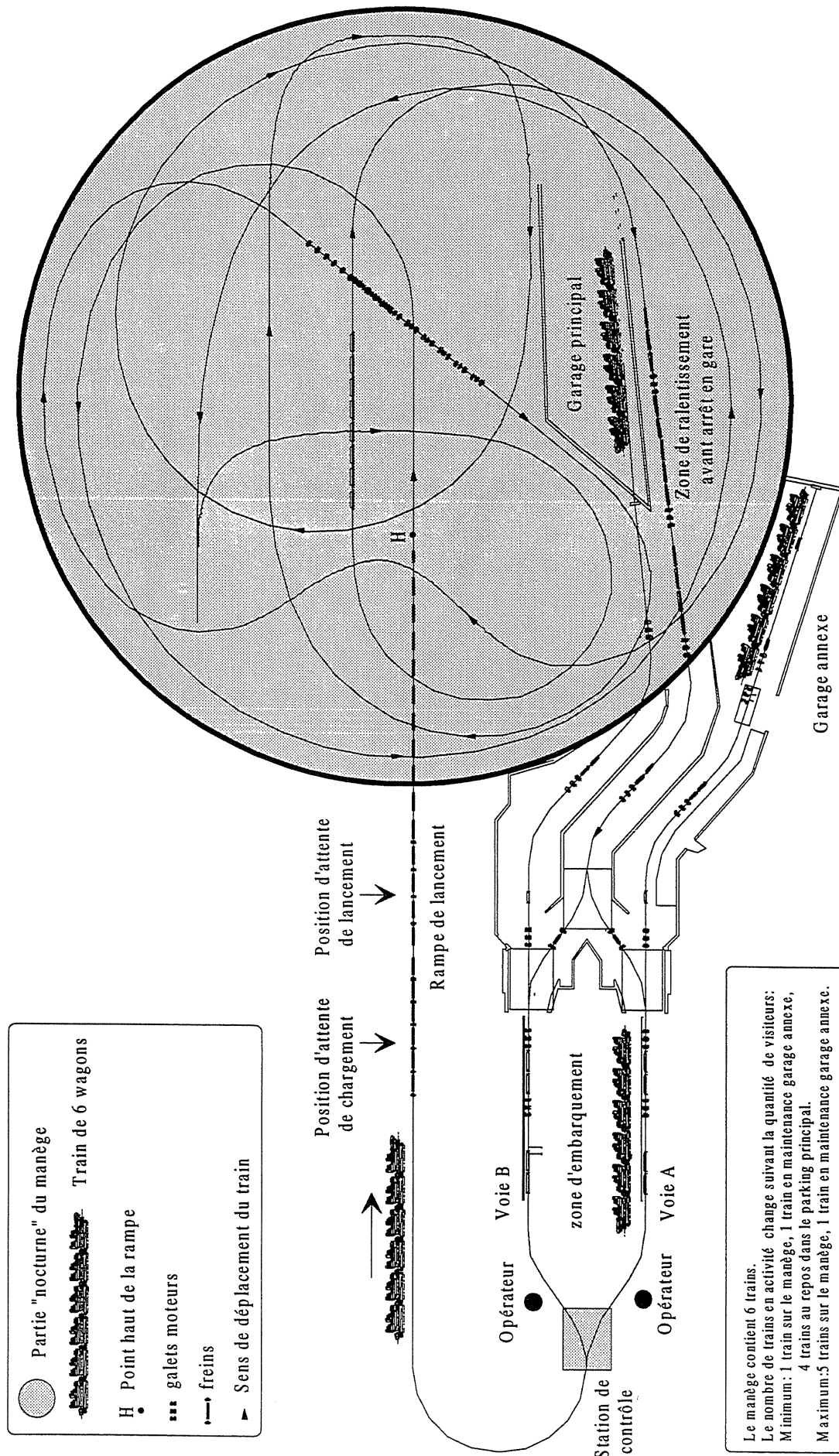


Figure 6 : vue d'ensemble du circuit (ride) en projection plane



Première partie

Etude de la motorisation de la catapulte

Cette partie est rédigée obligatoirement sur une copie séparée

1-1 Architecture de l'attraction

La forme générale retenue pour l'attraction est celle d'un cône de hauteur totale estimée à environ 30 mètres avec une disposition du canon selon une génératrice.

L'ensemble des données nécessaires à l'étude est fourni dans le dossier de présentation.

1-1-1 Déterminer l'angle maximal d'inclinaison α (voir figures 1, 2 et 4) permettant d'atteindre une vitesse minimale de 4 m/s en haut de rampe, juste avant basculement dans la montagne russe. Le candidat fera toutes les hypothèses nécessaires au calcul qu'il justifiera.

1-1-2 Déterminer la fréquence de rotation maximale du moteur ($R_{\text{tambour moteur}} = 0,5 \text{ m}$).

1-2 Ralentissement et retour du poussoir

À partir des données fournies dans le chronogramme figure 3.

1-2-1 Evaluer la course totale de montée. En déduire une justification de la forme extérieure du tambour (voir figure 7 page suivante).

1-2-2 Déduire du résultat précédent une estimation de la vitesse du retour V_r du poussoir pour respecter le temps de cycle.

1-3 Prédétermination du moteur

À partir des données du schéma de la figure 4 et des valeurs numériques suivantes :

1-train : masse en charge : $m_c = 7\,500 \text{ kg}$ maxi ; masse à vide : $m_v = 5\,500 \text{ kg}$

2-poussoir : $m_2 = 900 \text{ kg}$; $V_r = 6,5 \text{ m/s}$; $\alpha = 32^\circ$; $\gamma_g = 6,5 \text{ m/s}^2$

3-câble : $\mu = 5,8 \text{ kg/m}$

4-tambour moteur : $m_4 = 2\,500 \text{ kg}$; $J_4 = 600 \text{ kg.m}^2$; $R_4 = 0,5 \text{ m}$

5-poulie de tête : $m_5 = 120 \text{ kg}$; $J_5 = 22 \text{ kg.m}^2$; $R_5 = 0,5 \text{ m}$

6-arbres de liaison : $J_6 = 150 \text{ kg.m}^2$

7-accouplement : $J_7 = 14 \text{ kg.m}^2$

8-motorisation : J_8 fonction de la motorisation

Donnée complémentaire : effort de résistance à l'avancement dû aux frottements du train dans ses guidages : $F_f = 0,1 \text{ N/kg}$.

- 1-3-1 Déterminer le couple dynamique moteur dans chacune des phases de fonctionnement.
- 1-3-2 En déduire le couple dynamique moteur maxi et le couple dynamique moteur équivalent (couple quadratique moyen) pour l'ensemble des phases.
- 1-3-3 Choisir une solution de motorisation parmi les moteurs de grande puissance dont les caractéristiques sont données dans le tableau ci-dessous :

Caractéristiques	moteur NP710KX8	moteur NP560KX6
U induit	700 V	700 V
Nn	275 tr/min	275 tr/min
Pn	1300 Kw	825 Kw
Cn	44,1 KN.m	28,5 KN.m
Inertie	610 kg.m ²	218 kg.m ²
Masse	15 850 kg	9 330 kg
Cdmaxi/Cn	2,1	2,1

Vérifier la solution en prenant cette fois en compte les termes d'inertie introduits par la motorisation et conclure.

- 1-3-4 Estimer la vitesse maxi et l'accélération maxi compte tenu du choix de la motorisation. Comparer au cahier des charges fonctionnel initial et conclure.

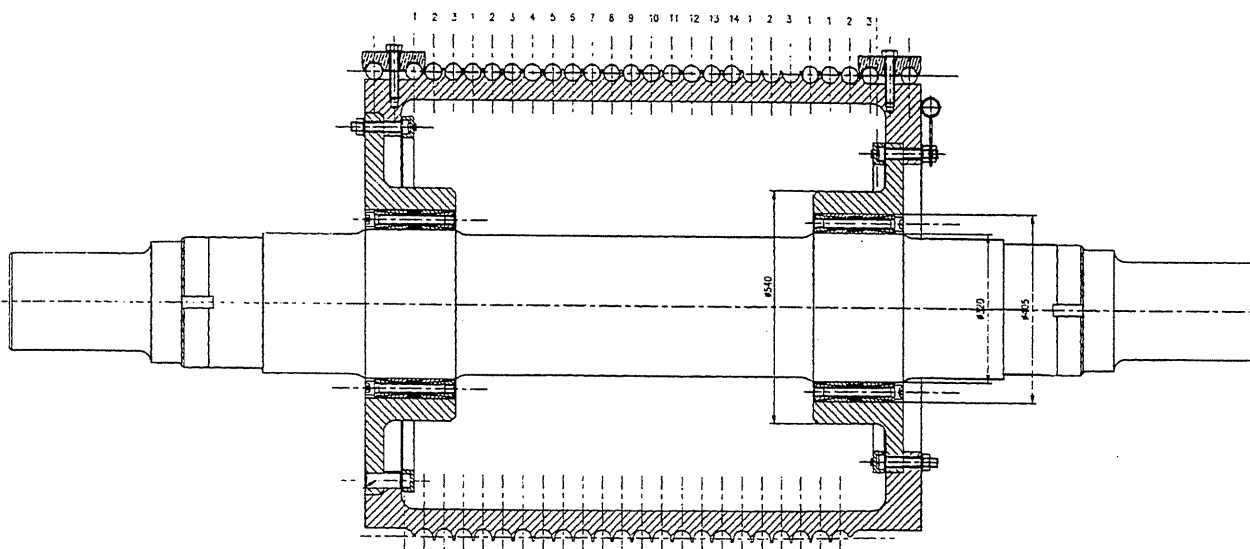


Figure 7 : dessin d'ensemble du tambour moteur

Deuxième partie

Etude du cycle de lancement

Cette partie est rédigée obligatoirement sur une copie séparée

2-1 Grafcet de fonctionnement normal

Le synoptique général simplifié de la commande est donné **figure 5**. Cette commande est organisée en trois niveaux hiérarchiques:

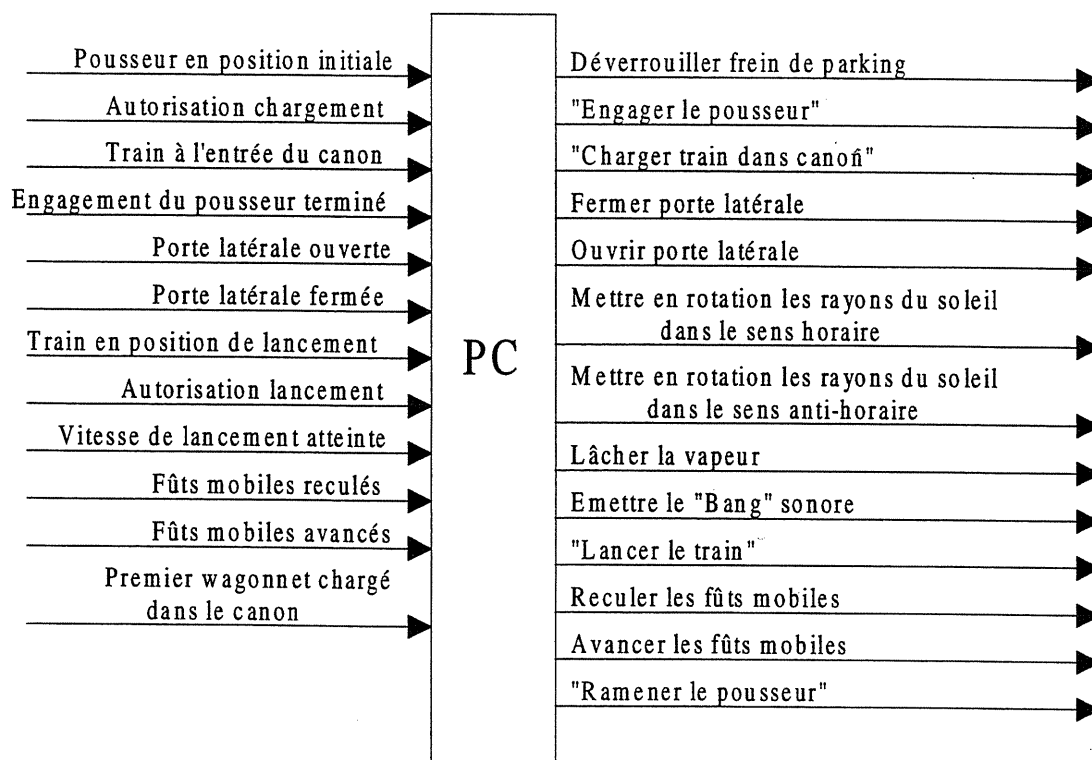
* Niveau RCS : deux automates programmables ALLEN-BRADLEY (~1000 entrées sorties chacun) sur bus avec procédure de vote et un automate de commande des effets spéciaux SIEMENS S100 (~100 entrées-sorties).

* Niveau CCS : deux micro-ordinateurs VME 80486 avec procédure de vote.

* Niveau CPS : un automate programmable TELEMECANIQUE TSX107 (~200 entrées-sorties) avec cartes analogiques et deux variateurs de forte puissance TELEMECANIQUE RECTIVAR 84

Nous allons nous intéresser plus particulièrement à la commande de la catapulte et des effets spéciaux. On se reportera au dossier de présentation pour la description du fonctionnement. Les dispositifs relatifs à la phase préliminaire (Amenage du train, freinage par les patins et retenue par ARB) ne sont pas étudiés. Il en va de même pour le mécanisme de tension du câble au niveau de la poulie de tête.

A partir de la caractérisation des entrées sorties ci-dessous, établir le grafcet point de vue procédé du fonctionnement normal. Les ordres indiqués entre guillemets seront considérés comme relatifs à des macros étapes dont on ne demande pas ici l'expansion.



2-2 Etude du temps de cycle : chronogramme

Durant le temps de cycle, il est nécessaire de faire descendre les passagers du train qui arrive en station, puis de faire monter les suivants. Ces deux opérations prennent environ une minute alors que l'intervalle de temps maximal autorisé entre deux lancements est de 36 secondes, ce qui conduit à une impossibilité. La solution retenue consiste à utiliser alternativement deux voies A et B dans la gare, le train $i+1$ étant en cours de déchargement voie A, pendant que le train i est prêt à partir voie B. De ce fait, les trains se succèdent, le train i étant amené à l'entrée du canon dès que la place est libre, c'est-à-dire à la fin du chargement du train $i-1$ dans le canon (voir **figure 6** dossier de présentation). Pour cette question on se placera dans le cas d'utilisation maximale de la capacité du manège soit cinq trains sur le manège.

D'autre part, et pour des raisons de sécurité, il est indispensable que les trains ne se suivent pas de trop près dans le manège (un écart inférieur ou égal à 20 secondes déclenche un arrêt d'urgence de l'ensemble du manège).

Ces deux raisons (confort et sécurité) conduisent à accroître le temps de cycle actuel (30s) et à choisir le temps de cycle maximal autorisé par le cahier des charges, soit 36 secondes : les opérateurs disposent alors de 72 secondes pour faire descendre les passagers et monter les suivants. La remise en cause des phases dynamiques du cycle étant hors de question, il sera nécessaire de jouer sur les temps d'attente en les équilibrant au mieux.

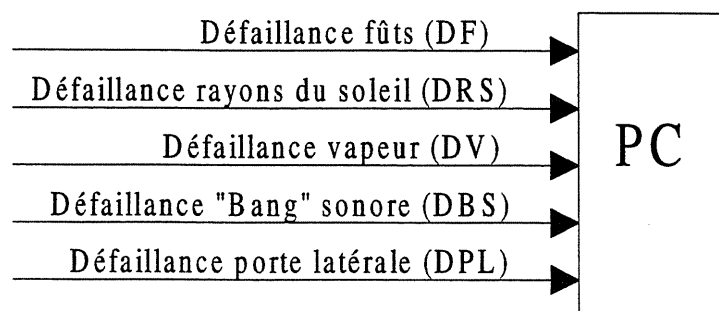
Compléter le chronogramme du document réponse DR1 afin d'obtenir un temps de cycle de 36 secondes. Les durées des différentes opérations seront choisies à leur valeur maximale si elles sont extraites du cahier des charges et arrondies à la seconde près si elles proviennent du calcul. Le candidat pourra fixer (ou modifier) à sa convenance les valeurs des temps d'attente. Les événements logiques pris en compte dans le cycle seront notés comme indiqué en haut et à droite sur le document réponse DR1.

Remarque : la notation + correspond à une rotation dans le sens horaire.

2-3 Sûreté de fonctionnement

La défaillance de l'un ou l'autre des effets spéciaux n'est pas un phénomène rare, eu égard aux conditions d'utilisation. Dans ce cas, on désire que le manège ne soit pas immobilisé. On passe donc dans un mode de fonctionnement dégradé, le cycle se déroulant sans l'effet spécial en panne.

2-3-1 En utilisant les entrées supplémentaires fournies ci-après, modifier le grafcet de fonctionnement normal de telle manière que l'on puisse procéder à des lancements en mode dégradé.



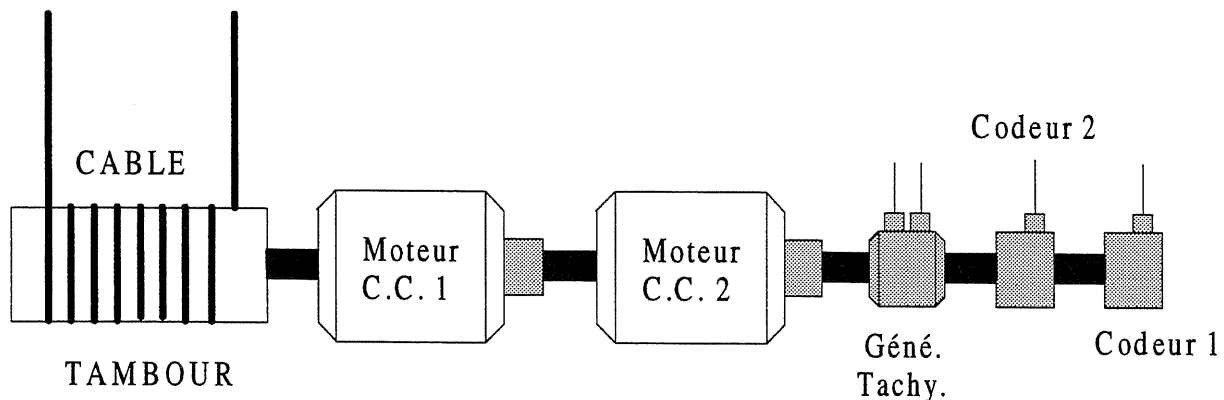
2-3-2 Discuter de la pertinence de l'utilisation de tout ou partie de ces informations de défaillance dans ce cas précis.

Troisième partie

Asservissement

Cette partie est rédigée obligatoirement sur une copie séparée

L'entraînement du tambour est obtenu par l'association de deux moteurs montés en tandem selon le schéma ci-dessous.



M1 et M2 sont des moteurs à courant continu à excitation séparée, de forte puissance et d'inertie réduite. Le courant d'excitation étant constant, on utilisera le modèle classique, linéaire et continu du moteur à courant continu. La position et la vitesse sont contrôlées par :

- * une génératrice tachymétrique à deux enroulements séparés ;
- * deux capteurs incrémentaux C1 et C2.

On note :

- * u_1 et u_2 les tensions respectives des moteurs M1 et M2 ; i_1 et i_2 les courants respectifs ;
- * C_{m1} et C_{m2} les couples moteurs ;
- * e_1 et e_2 les forces contre-électromotrices (f_{cem}) ; K_{e1} et K_{e2} les constantes de f_{cem} ; K_{t1} et K_{t2} les constantes de couple ;
- * R_1 , R_2 les résistances et L_1 , L_2 les selfs respectives des moteurs M1 et M2 ;
- * J_{eq} l'inertie équivalente de l'ensemble de la transmission (moteurs, tambour, câble, poussoir et train), ramenée à l'arbre moteur, avec J_{ev} l'inertie équivalente à vide et J_{ec} l'inertie équivalente en charge. On donne $J_{ev} = 3100 \text{ kg.m}^2$ et $J_{ec} = 3600 \text{ kg.m}^2$;
- * C_r le couple résistant ramené au moteur.

3-1 Modélisation électromécanique de la motorisation à deux moteurs

Dans toute cette question 3-1, on suppose l'arbre moteur et le câble indéformables, on néglige les effets de l'asservissement de tension du câble sur la poulie de tête et on néglige les pertes dans la transmission.

3-1-1 Mise en équations

- Ecrire le système d'équations (temporelles puis opérationnelles après transformation de Laplace) régissant le comportement de cette motorisation à deux moteurs.*
- En déduire le schéma fonctionnel **détaillé** de la motorisation.*
- Exprimer la relation de transfert de la motorisation $\omega = f(U_1, U_2, Cr)$ en fonction des paramètres des moteurs.*
- Evaluer le couple Cr_v (à vide) et le couple Cr_c (en charge), en fonction des données de la question 1-3.*

3-1-2 Commande en chaîne directe

Pour cette question et pour toute la suite du problème, on retiendra :

$Cr_v = 17000 \text{ m.N}$ et $Cr_c = 22200 \text{ m.N}$.

On suppose dans un premier temps les deux moteurs strictement identiques et commandés par une même tension commune U .

On donne:

- * $K_{e1} = K_{e2} = 22 \text{ V/rd/s}$
- * $K_{t1} = K_{t2} = 22 \text{ mN/A}$
- * $R_1 = R_2 = 0,03 \Omega$
- * $L_1 = L_2 = 7,2 \cdot 10^{-4} \text{ H}$
- * $U_{1\max} = U_{2\max} = 700\text{V}$

- Montrer que la relation de transfert se simplifie. Représenter le schéma fonctionnel équivalent et montrer que la motorisation est équivalente à un moteur unique dont on précisera les paramètres.*
- Après avoir mis la relation de transfert sous forme canonique standard, donner les expressions de ses paramètres caractéristiques.*
- Application numérique à vide et en charge. Commenter les résultats*

3-1-3 Performances de la commande en chaîne directe

- Le système étant soumis à un échelon de tension de valeur maximale, calculer la vitesse limite théorique ω_∞ en régime permanent et en charge, en tenant compte du couple résistant. Effectuer l'application numérique. Commenter vis-à-vis du cahier des charges.*
- En utilisant le diagramme de la **figure 8**, déterminer la valeur de l'accélération moyenne du train en charge en négligeant C_r . Effectuer l'application numérique. Commenter vis-à-vis du cahier des charges.*

Tournez la page S.V.P.

- c) Estimer les caractéristiques de la réponse à une rampe de tension en charge en négligeant C_r . Effectuer l'application numérique pour $\gamma = 8\text{m/s}^2$.

3-2 Commande asservie en vitesse du pousseur

Par construction, les paramètres des moteurs ne peuvent être égaux : un déséquilibre entre les deux moteurs va se produire au détriment du couple global. Pour s'affranchir de ce problème, on utilise un montage particulier avec un variateur maître et un variateur esclave associés respectivement au moteur 1 et au moteur 2. Un câblage adéquat ainsi qu'un étalonnage des paramètres des variateurs lors de l'installation permettent de faire fonctionner l'ensemble comme s'il s'agissait d'un moteur unique (défini en 3-1-2a) et de son variateur. Dans toute la suite du sujet, on utilisera le modèle linéaire et continu d'un ensemble classique variateur + moteur à courant continu équivalent.

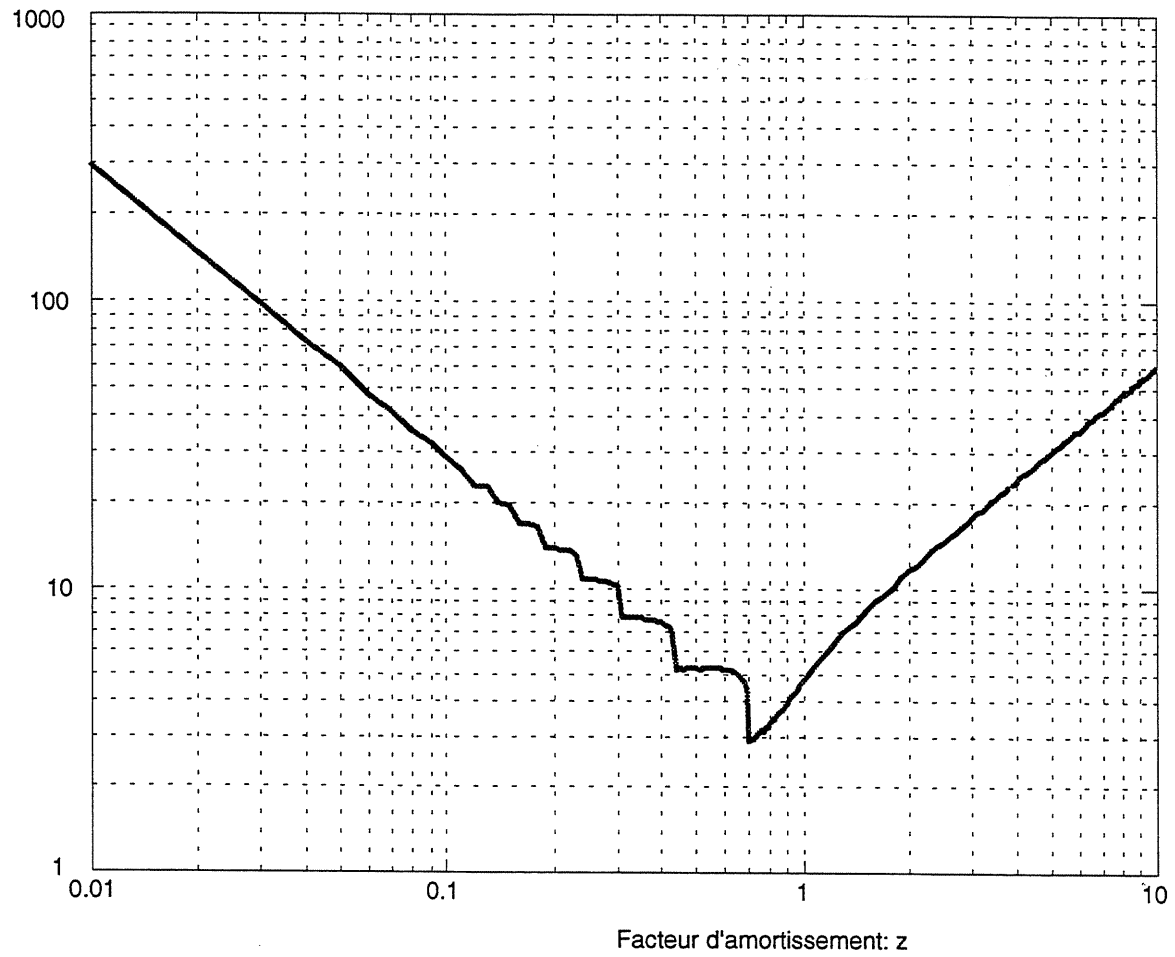
3-2-1 Structure de l'asservissement de vitesse

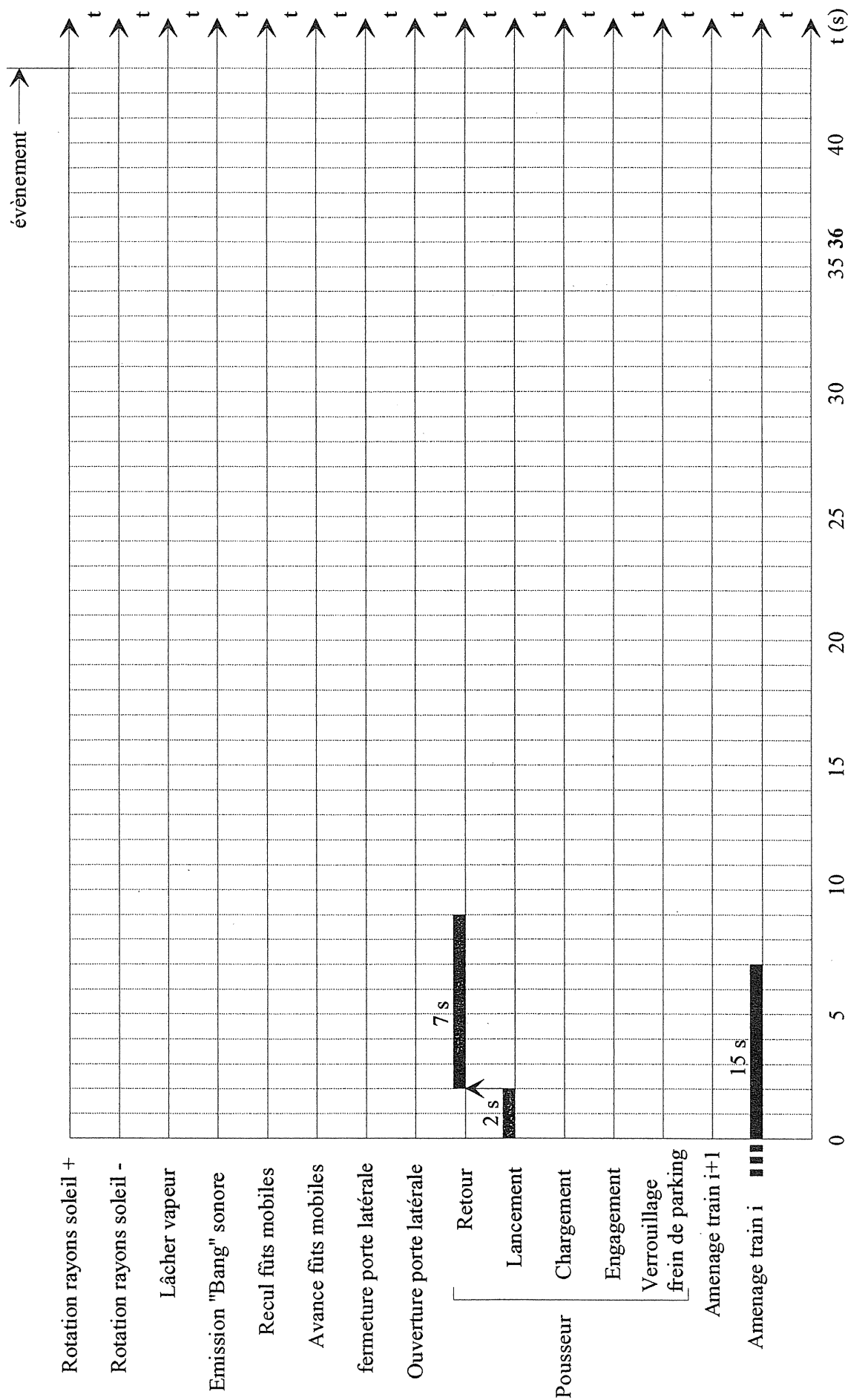
On considère le moteur équivalent asservi en vitesse, à retour unitaire, et dont le réglage est effectué au moyen d'un correcteur proportionnel intégral de fonction de transfert $\frac{K_i(1+T_i p)}{T_i p}$

- a) Préciser quels peuvent être les rôles respectifs des trois capteurs (génératrice tachymétrique à deux enroulements et codeurs). On prendra en compte le fait que les technologies actuelles permettent l'obtention d'une image de la vitesse à partir d'un codeur incrémental (tachy-codeur), les variateurs utilisés possédant des entrées analogiques et numériques.
- b) Représenter le schéma fonctionnel de l'asservissement.
- c) Donner, sous forme littérale et **canonique**, la relation de transfert de l'asservissement de vitesse $\Omega(p) = f[\Omega_c(p), C_r(p)]$. On prendra un retour unitaire.

3-2-2 Performances de l'asservissement de vitesse

- a) A partir de la relation de transfert précédente, déterminer la précision du système sur un échelon unitaire en entrée et sur un échelon unitaire en perturbation.
- b) Sachant que le variateur utilisé délivre une tension maximale de 700 Volts (tension de saturation), comparer la rapidité du système asservi en vitesse avec celle du système en chaîne directe (question 3-1-2b). Conclusion quant à la loi de commande retenue.
- c) Déterminer la condition sur K_i et sur T_i pour que le système soit stable.
- d) Conclure sur les intérêts et les inconvénients éventuels d'un asservissement de vitesse comparativement à un asservissement de position pour ce type d'application. Le candidat est invité à remettre en cause les hypothèses de la question 3-1.

Figure 8 : temps de réponse réduit des systèmes du second ordre.temps de réponse réduit: $Tr.wn$ 



DOCUMENT REPOSE DRI