A 2011 SI-MP ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES,
ECOLES NATIONALES SUPERIEURES DE L'AERONAUTIQUE ET DE L'ESPACE,
DES TECHNIQUES AVANCEES, DES TELECOMMUNICATIONS,
DES MINES DE PARIS, DES MINES DE SAINT-ETIENNE, DES MINES DE NANCY,
DES TELECOMMUNICATIONS DE BRETAGNE.
ECOLE POLYTECHNIQUE (FILIERE TSI)
CONCOURS D'ADMISSION 2011
ÉPREUVE DE SCIENCES INDUSTRIELLES
Filière : MP
SUJET MIS A LA DISPOSITION DES CONCOURS : CYCLE INTERNATIONAL, ENSTIM, INT, TPE-EIVP
Durée de l'épreuve : 3 heures
L'usage de la calculatrice est autorisé

Cet énoncé comporte 18 pages numérotées de 1 à 18 et un document annexe de 14 pages. Le travail doit être reporté sur un document-réponse de 15 pages distribué avec le sujet. Un seul document-réponse est fourni au candidat. Le renouvellement de ce document en cours d'épreuve est interdit. Pour valider ce document-réponse, chaque candidat doit obligatoirement y inscrire à l'encre, à l'intérieur du rectangle d'anonymat situé en haut de chaque copie, ses nom, prénoms (souligner le prénom usuel), numéro d'inscription et signature, avant même d'avoir commencé l'épreuve. Il est conseillé de lire la totalité de l'énoncé avant de commencer l'épreuve.

Les questions sont organisées au sein d'une progression logique caractéristique de la discipline, certaines questions étant partiellement dépendantes : Il est donc souhaitable de les traiter dans l'ordre. La rédaction des réponses sera la plus concise possible : on évitera de trop longs développements de calculs en laissant subsister les articulations du raisonnement.

Si, au cours de l'épreuve, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale sur sa copie et poursuit sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il est amené à prendre.

ETUDE D'UN ROBOT DE CONSOLIDATION DE PAROIS ROCHEUSES : LE "ROBOCLIMBER"

I. Présentation

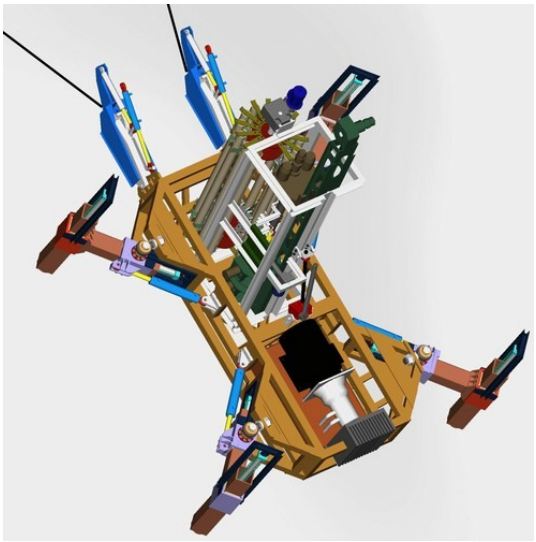
Roboclimber est un robot géotechnique utilisé pour la consolidation des talus de sols naturels ou des escarpements rocheux au dessus des routes ou des zones habitées. Il est issu d'un programme européen de recherche* et est actuellement exploité par la société italienne d'ingénierie D'Appolonia.

Lorsque des falaises ou talus menacent de s'effondrer sur des infrastructures, un des seuls remèdes consiste à consolider le versant en y forant des trous suivant un maillage régulier et à y enfoncer des pieux en acier qui structurent l'ensemble et le consolident.

Les travaux de forage sont réalisés habituellement soit par des équipes spécialisées en travaux acrobatiques encordés, soit à l'aide de plateformes élévatrices depuis le bas du versant si celui-ci est accessible.

Lorsque le site à consolider est dangereux ou difficile d'accès, le Roboclimber est utilisé car la plupart de ses actions sont automatisées, mettant ainsi à l'abri de tout risque les hommes chargés du chantier. Son utilisation réduit donc considérablement le coût d'un tel chantier.

*: en particulier le laboratoire DIMEC de l'université de Gênes (Italie).



Le Roboclimber est un robot d'environ 3 tonnes transportant une unité autonome de forage et de pose des pieux. Il utilise pour se mouvoir et assurer son équilibre lors du forage 4 pieds indépendants, ainsi que deux câbles de traction fixés en hauteur.

Le diagramme FAST recensant les principales fonctions du Roboclimber est donné en ANNEXE 1. Le présent sujet se propose de vérifier les critères de performance liés à certaines de ces fonctions.

II. Vérification des critères de la fonction FT 23 « Enfoncer les tubes de forage dans la paroi »

Le forage proprement dit consiste à enfoncer dans le sol ou la roche une succession de tubes en acier, vissés les uns aux autres, qui constituent le train de forage. Le premier tube utilisé se retrouve en tête de train et possède une tête perforante. L'enfoncement de l'ensemble du train est obtenu par l'action conjuguée d'un effort de poussée suivant l'axe de forage et d'un couple qui met en rotation le train de tubes.

Les critères géotechniques retenus pour obtenir une plage d'utilisation optimale sont précisés dans l'extrait du cahier des charges ci-dessous :

Fonction	Critères	Niveau
FT 23 « Enfoncer les tubes de forage dans la paroi »	Force de poussée	Pour une pente de 45° : F > 10 000 N Pour une pente de 80° : F > 3 000 N
	Vitesse d'avance maximale	2 $m.min^{-1}$
	Couple appliqué sur le train de tubes	C_{maxi} = 2500 N.m
	Alignement de l'axe de la foreuse avec l'axe du forage	Défaut d'alignement : $\beta_{MAX} < 6°$

Problématique : Une des difficultés liées à l'utilisation d'une plateforme mobile pour réaliser le forage réside dans l'application de l'effort de poussée qui doit être obtenu sans mettre en péril l'équilibre de la plateforme. On souhaite vérifier que le robot pourra bien fournir l'effort de poussée préconisé dans le cahier des charges.

On suppose le robot en équilibre dans la position de la figure 1 (vue de profil du robot sur la paroi).

Hypothèses :

- Le problème est supposé plan, dans le plan de la figure 1 : $(G, \vec{x}_0, \vec{z}_0)$
  - Les quatre contacts pied / paroi sont réduits à deux contacts ponctuels en A et B, on a $\overrightarrow{AB} = d\,\vec{x}$ et $\overrightarrow{BH} = -d\,\vec{x} + n\,\vec{z}$
  - Les deux câbles sont assimilés à un seul, fixé en H au robot et en K à la paroi : $\overrightarrow{HK} = -e\,\vec{x} - n\,\vec{z}$ où e, distance du robot au point d'ancrage le long de la paroi, sera prise à sa valeur minimale autorisée : $e = 2d$

- Les contacts pied / paroi sont sans frottement
- L'effort de poussée de la foreuse impose sur le train de tubes une réaction du sol modélisée par un glisseur en E : $\left\{\begin{matrix} F\vec{z} \\ \vec{0} \end{matrix}\right\}_E$. Le point E est défini par $\overrightarrow{BE} = -\frac{d}{3}\vec{x} - p\vec{z}$.
- Le poids de la plateforme et des tubes est modélisé par le glisseur : $\left\{\begin{matrix} -P\vec{z}_0 \\ \vec{0} \end{matrix}\right\}_G$ avec P=28000 N et G tel que $\overrightarrow{BG} = -\frac{d}{2}\vec{x} + n\vec{z}$
- La pente de la paroi est définie par l'angle $\alpha = (\vec{x}_0, \vec{x}) = (\vec{z}_0, \vec{z})$

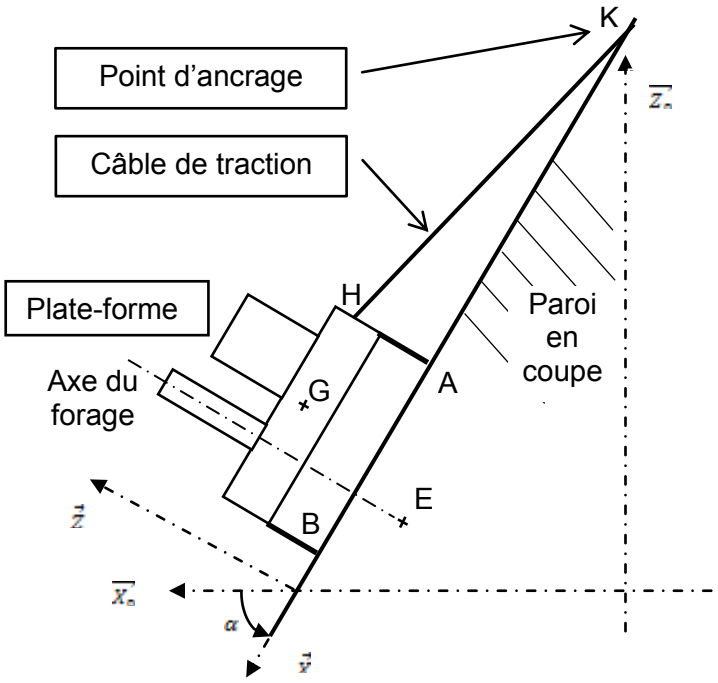


Figure 1 : Paramétrage et vue de profil du robot sur la paroi

Question 1.

En considérant l'équilibre statique de l'ensemble {plateforme + tubes}, écrire l'équation des moments au point H. En déduire la condition littérale sur F pour qu'il n'y ait pas décollement du pied en B. Faire l'application numérique. Cette valeur est-elle compatible avec le cahier des charges ? Un forage sur une paroi verticale est-il possible avec le Roboclimber ?

La foreuse est composée d'une tête multifonction qui se déplace en translation (dans l'axe du forage) sur deux rails de guidage (voir ANNEXE 2).
Elle permet de mettre en rotation le tube placé dans le mandrin : c'est l'ensemble du train de tubes qui est ainsi mis en rotation.

La tête multifonction est équipée de deux moteurs hydrauliques qui permettent via une transmission adaptée d'entrainer le train de tubes de forage en rotation à une vitesse adaptée à la dureté de la paroi à forer.

La tête multifonction est reliée aux deux rails de guidage par l'intermédiaire de 8 galets. Chacun de ces galets est légèrement bombé, ce qui permet d'envisager un contact ponctuel entre le rail et le galet, conformément au schéma cinématique ci-après :

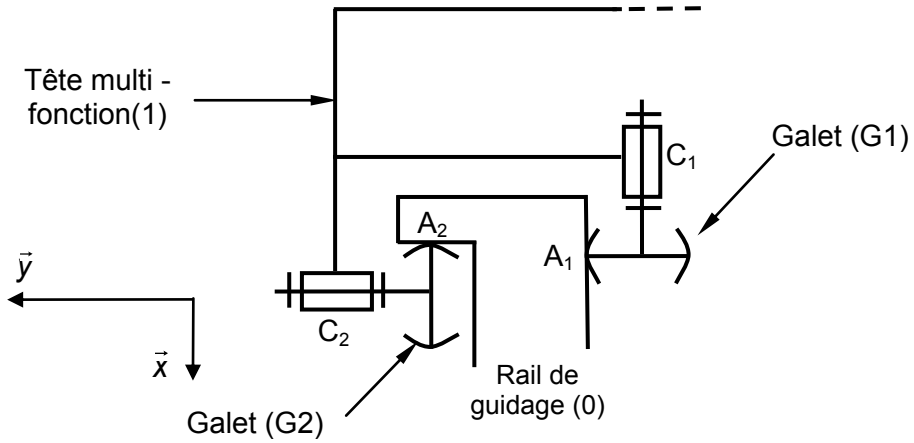


Figure 2 : Schéma cinématique d'un seul côté de la liaison tête multifonction-rail

On notera G2, G4, G6 et G8 les galets en liaison pivot d'axe (Ci, $\vec{y}$) i=2, 4, 6 et 8 avec la tête multifonction.
On notera G1, G3, G5 et G7 les galets en liaison pivot d'axe (Cj, $\vec{x}$) j=1, 3, 5 et 7 avec la tête multifonction.

Question 2.

On se propose de déterminer le degré d'hyperstatisme de la liaison équivalente entre le rail-guide (0) et la tête multifonction (1) et, pour cela :

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

b) Donner, sans calcul, le nom et les caractéristiques géométriques de la liaison équivalente entre (0) et (1).

c) Déterminer le degré d'hyperstatisme de cette liaison équivalente entre le rail-guide (0) et la tête multifonction (1).

d) Quel peut-être l'intérêt d'un tel degré d'hyperstatisme ? Sur quel critère de la fonction FT 23 a-t-il une influence ?

L'effort de poussée sur la tête multifonction est obtenu par deux vérins hydrauliques fixés à un chariot qui est en liaison glissière de direction $\vec{z}$ avec les rails de guidage (voir ANNEXE 2 et figure 3 ci-après). Une chaîne de transmission, passant par deux poulies, restitue cet effort.

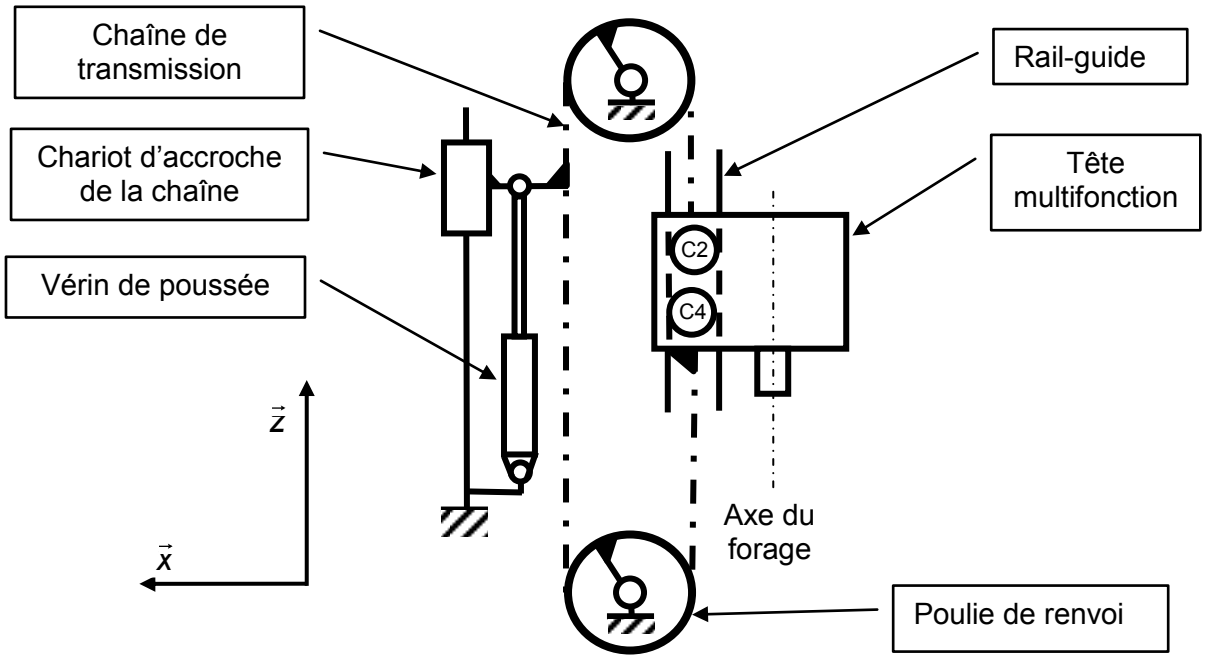


Figure 3 : Schéma cinématique

On souhaite maintenant vérifier que le critère d'alignement ne peut pas être mis en défaut par une déformation locale des matériaux au niveau des galets.

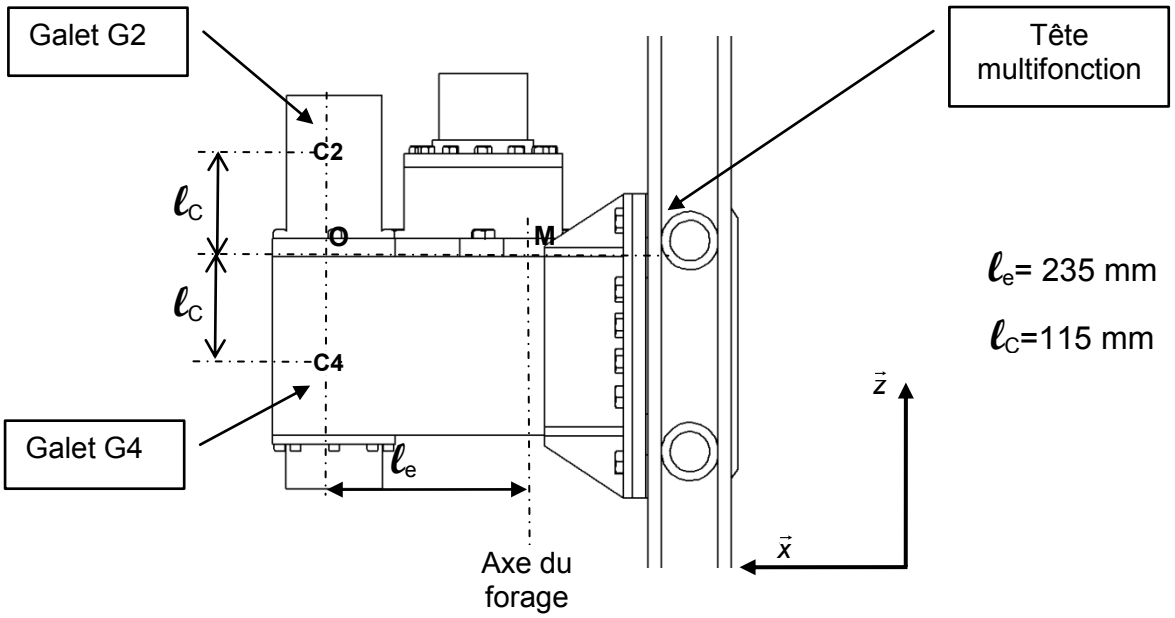


Figure 4 : Dessin de la tête multifonction

L'ensemble de la foreuse est conçue de manière à présenter une rigidité maximale, mais les galets, et en particulier leur axe en porte-à-faux, sont les éléments les moins rigides de l'ensemble : ils se déforment très légèrement lorsque l'effort de poussée est appliqué. Chaque galet est assimilé à un ressort de raideur k = $1{,}2 \times 10^7$ N.m^{-1} et de direction $\vec{x}$.

Sous l'effet de cette déformation, la tête s'incline d'un angle β, comme le montre la figure 5, où l'angle β a été accentué pour une bonne compréhension du phénomène.

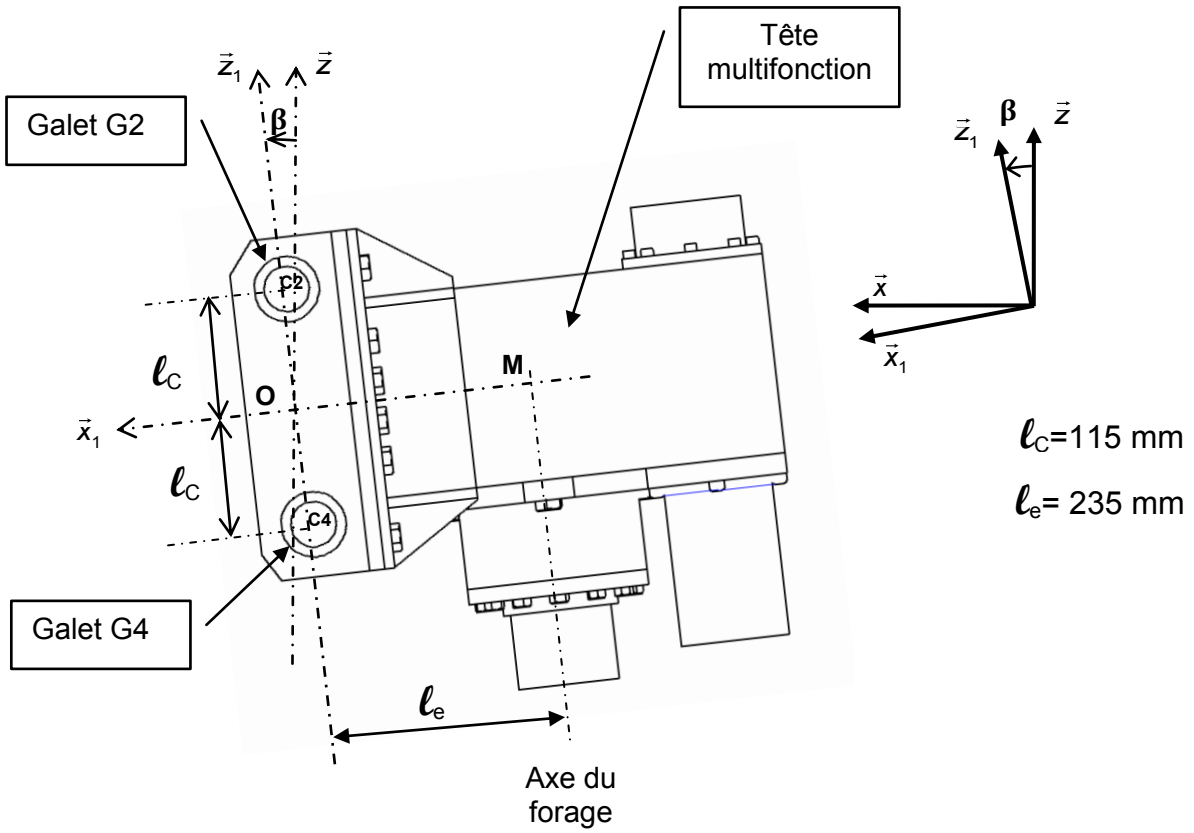


Figure 5 : Dessin de la tête multifonction inclinée

Hypothèses :

- Le problème est supposé plan, dans le plan de la figure 5 : $(O,\vec{x},\vec{z})$;
- les galets G2, G4, G6 et G8 sont donc réduits à deux : de centres C2 et C4, et dans ce cas, la raideur des galets est considérée comme double (2 k) ;
- Les liaisons pivot du mécanisme, réalisées à l'aide de roulement à billes, sont supposées sans frottement ;
- Chacun des deux vérins de poussée développe au maximum une force de 15 000 N. La chaîne est ancrée en O sur la tête multifonction ;
- Le poids de la tête multifonction est de 1300 N : il est négligé par rapport à l'effort de poussée ;
- Le moment d'inertie par rapport à l'axe $(O,\vec{y})$ de la tête multifonction est noté I_{Oy}. Il est évalué à I_{Oy} = 31 kg.m^2 ;
- Le repère $(O,\vec{x},\vec{y},\vec{z})$ lié à la plateforme est supposé galiléen et la base $(\vec{x}_1,\vec{y}_1,\vec{z}_1)$ est liée à la tête multifonction ;
- Les rails – guide, suffisamment rigides, sont considérés comme indéformables ;
- Les mouvements observés de la tête multifonction sont des rotations <u>de faible amplitude</u> autour du point O, supposé fixe. L'amplitude des rotations est noté $\beta(t)=(\vec{x},\vec{x}_1)$.

Ainsi le bilan des actions mécaniques appliquées à la tête multifonction peut être établi comme suit :

- l'effort du train de tube sur la tête $\left\{\begin{matrix}\overrightarrow{F_M}=F_M(t)\vec{z}\\ \vec{0}\end{matrix}\right\}_M$;
- l'effort du galet G2 sur la tête : $\left\{\begin{matrix}\overrightarrow{F_2}=-2k\delta_{XC2}\vec{x}\\ \vec{0}\end{matrix}\right\}_{C2}$ où δ_{XC2} est le déplacement suivant $\vec{x}$, au cours du temps, du point C2 par rapport à sa position non déformée ;
- l'effort du galet G4 sur la tête : $\left\{\begin{matrix}\overrightarrow{F_4}=-2k\delta_{XC4}\vec{x}\\ \vec{0}\end{matrix}\right\}_{C4}$ où δ_{XC4} est le déplacement suivant $\vec{x}$, au cours du temps, du point C4 par rapport à sa position non déformée ;
- l'effort de la chaîne sur la tête $\left\{\begin{matrix}\overrightarrow{F_O}=F_O(t)\vec{z}\\ \vec{0}\end{matrix}\right\}_O$.

Question 3.

Déterminer la relation entre I_{Oy}, $F_M(t)$, ℓ_e, ℓ_C, k, $\beta(t)$ et ses dérivées.

Question 4.

Déterminer l'expression de β_0, valeur de l'angle d'inclinaison de la tête lors de l'équilibre statique obtenu sous un effort de poussée constant $F_M(t)=F_{M0}=30000\ N$. Faire l'application numérique. Ce défaut d'alignement est-il compatible avec le cahier des charges ?

Lors de certains forages, on utilise en tête du train de tubes, un Marteau Fond de Trou (MFT) qui, alimenté en air comprimé depuis la plateforme, apporte un effet de percussion, c'est-à-dire des chocs périodiques qui favorisent l'avancée du train de tubes. Cet effort peut être considéré, via le train de tubes supposé rigide, comme une action extérieure appliquée sur la tête

multifonction. L'action mécanique du train de tubes sur la tête peut donc être modélisée par le torseur : $\left\{\begin{array}{c}\overrightarrow{F_M} = (F_{M0} + \delta F..(t))\vec{z}_1 \\ \vec{0}\end{array}\right\}_M$ où $\delta F_M(t)$ est la composante due au Marteau Fond de Trou.
L'inclinaison de la tête peut donc s'écrire : $\beta(t) = \beta_0 + \delta\beta(t)$.

Question 5.

Reprendre l'équation obtenue à la question 3 et donner l'équation différentielle linéaire reliant $\delta\beta(t)$ et $\delta F_M(t)$. Puis, en considérant les conditions initiales nulles, écrire la transformée de Laplace de cette équation, en déduire la fonction de transfert $\frac{\Delta\beta(p)}{\Delta F_M(p)}$, où $\Delta F_M(p)$ représente la transformée de Laplace de $\delta F_M(t)$ et $\Delta\beta(p)$ celle de $\delta\beta(t)$.

L'action du Marteau Fond de Trou $\delta F_M(t)$ peut être assimilée en première approximation à une force sinusoïdale de pulsation ω. On considère que le fonctionnement du Marteau Fond de Trou est fiable, si sa pulsation de percussion est « éloignée » de la pulsation de résonnance ω_0 du système mécanique d'un facteur 10, c'est-à-dire que l'intervalle $[0{,}1\omega_0 ; 10\ \omega_0]$ est interdit pour le choix de la pulsation du Marteau Fond de Trou.

Question 6.

Donner la plage de pulsations (ou de fréquences) de percussion interdites pour le bon fonctionnement de la foreuse.

III. Vérification des critères de la fonction FT 2211 « Saisir les tubes »

Un bras automatisé est chargé de déplacer les tubes depuis le carrousel, où ils sont stockés, vers la foreuse où ils seront assemblés au train de tubes. L'effecteur de ce bras est une pince dont on valide ici un critère fonctionnel.
La description des constituants et du fonctionnement de la pince est donnée en ANNEXE 3.
Quand la paume est en contact avec le tube, le schéma cinématique de la pince « doigts ouverts » peut être ramené à celui de la figure 6.

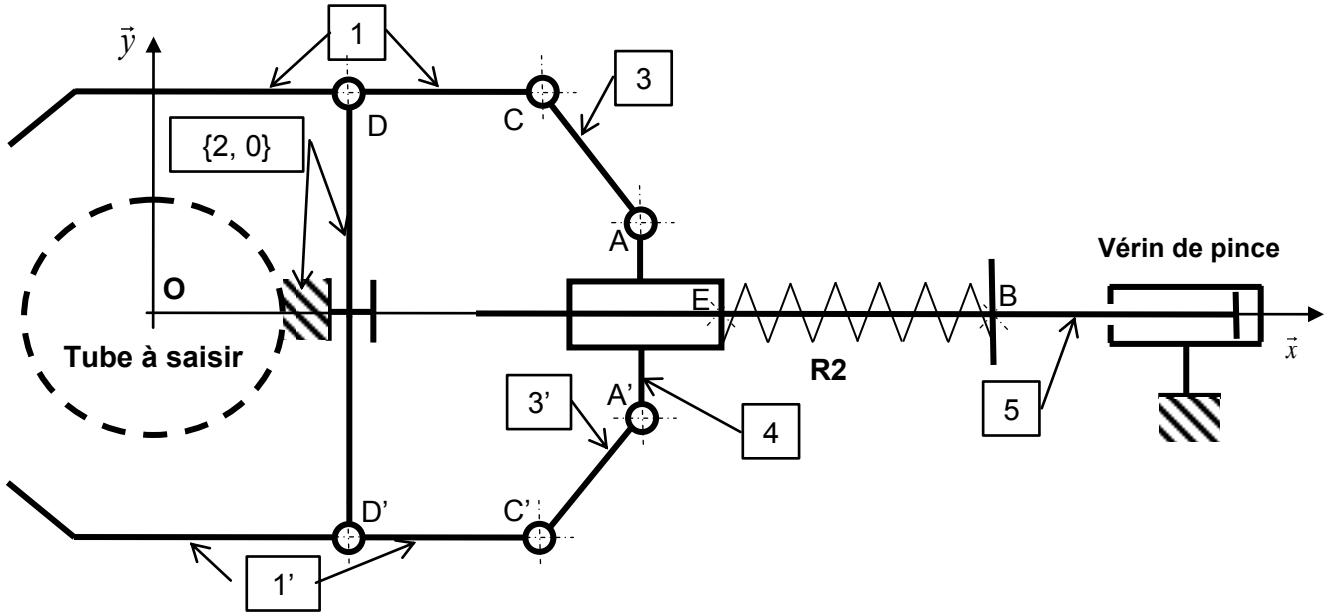


Figure 6 : Schéma cinématique de la pince : position « paume en contact avec le tube »

Pour garantir une fiabilité optimale, il a été choisi de ne munir ce dispositif à deux degrés de liberté que d'un seul actionneur : un vérin hydraulique. Ainsi, le même vérin va assurer le déplacement en translation de la pince, de façon à venir en contact avec le tube, et la fermeture/ouverture des doigts pour la saisie du tube.

Un extrait du cahier des charges relatif à la fonction « Saisir les tubes » est présenté en ANNEXE 3. On souhaite en vérifier la validité.

Lors de la phase d'avance, le ressort R2, de raideur k_2, n'est pas comprimé. On note sa longueur à vide l_{02}.

A un instant t, on note x_A l'abscisse du point A et x_B l'abscisse du point B.

Question 7.

Par des constructions géométriques sur le dessin du document-réponse, déterminer le déplacement Δx_A du point A de la position « paume en contact avec le tube » à la position « doigts fermés ».

A partir de cette position « pince fermée » (dans laquelle le ressort **R2** n'est pas encore comprimé), la tige du vérin est sortie d'une longueur supplémentaire $|\Delta x_B|$ $(\Delta x_B < 0)$, qui provoque l'effort de verrouillage des doigts sur le tube en exerçant un effort sur le coulisseau **4** décrit par le glisseur :. $\{R2 \rightarrow 4\}: \begin{Bmatrix} k_2 \Delta x_B \vec{x} \\ \vec{0} \end{Bmatrix}_E$

On fixe $\Delta x_B = -31mm$, on donne k_2=13 N.mm^{-1}.

On se place dans le cas de l'équilibre statique dans le référentiel lié au corps de la pince supposé galiléen.

On considère le problème plan et le contact doigt / tube réduit à un point.

Le poids des pièces de la pince est négligé et les liaisons articulations sont sans frottement.

Question 8.

Par une construction graphique sur le document-réponse, qui sera justifiée, déterminer la force exercée par chaque doigt sur le tube. On considère qu'aucune action extérieure n'est exercée sur le tube et que pour des raisons de symétrie, les forces de contact paume / tube et doigt / tube passent par le centre du tube.

L'extraction du tube du carrousel entraîne une action mécanique sur le tube modélisée par le glisseur : $\{carrousel \rightarrow tube\}: \begin{Bmatrix} -F\vec{x} \\ \vec{0} \end{Bmatrix}_O$ où O est le centre du tube.

Question 9.

Vérifier si le critère « Maintien de la prise lors de l'extraction d'un tube du carrousel » de la fonction FT 2211 est vérifié. On pourra s'appuyer sur des constructions graphiques effectuées sur le document-réponse et on se placera dans le cas limite où la force de contact entre la paume et le tube s'annule.

IV. Vérification des critères de la fonction FT 24 « Gérer le forage automatisé »

La Partie Commande du Roboclimber a été organisée en 3 couches hiérarchisées qui se décomposent de la manière suivante :

- -Niveau supérieur : planification des déplacements jusqu'aux différents emplacements de forages ;
- -Niveau intermédiaire : gestion du fonctionnement du forage automatisé lorsque la plateforme a établi sa position ;
- -Niveau inférieur : commande asservie de certains axes.

Chaque niveau reçoit des autorisations du niveau hiérarchique supérieur et émet des autorisations vers le niveau hiérarchique inférieur.
On étudie ici la conception du niveau intermédiaire, pour lequel le langage grafcet a été retenu comme outil de description.

Description des tâches relatives au forage automatisé :

Tâche		Description	Durée
T_A	Mettre à disposition un tube du carrousel	Le carrousel est mis en rotation jusqu'à ce qu'un tube se trouve à l'emplacement de prélèvement par le bras.	Variable (rotation d'1/16ème de tour du carrousel : 3s)
T_B	Extraire le tube du carrousel	Le bras s'allonge (3s) et la pince saisit le tube (2s) à l'emplacement de prélèvement. Puis le bras se rétracte (3s) pour autoriser la rotation éventuelle du carrousel. N.B. : on considère que, quelle que soit la rangée à atteindre, le bras met le même temps à s'allonger. Il en est de même lorsqu'il se rétracte.	8s
T_C	Apporter le tube vers la foreuse	Le bras effectue une rotation pour s'aligner avec la foreuse.	6s
T_D	Engager le tube dans le mandrin de la foreuse	Le bras s'allonge jusqu'à ce que le tube soit dans l'axe du forage. Puis, la tête de forage descend à vitesse lente et le mandrin est mis en rotation lente. La tâche se termine lorsque le tube est vissé dans le mandrin.	6s
T_E	Ouvrir la pince	Les doigts de la pince s'écartent et libèrent le tube.	2s
T_F	Mettre le bras en position initiale	Le bras est rétracté (3s), puis aligné avec l'emplacement de prélèvement du carrousel (6s).	9s
T_G	Visser le tube dans le train de forage	La tête de forage descend à vitesse lente et le mandrin est mis en rotation lente. La tâche se termine lorsque le tube est vissé dans le train de forage (ensemble des tubes déjà enfoncés dans la paroi)	3 s
T_H	Forer de la longueur du tube	Le mandrin est mis en rotation rapide et la percussion est mise en œuvre. La tête de forage descend à vitesse variable suivant la nature géologique de la paroi. Le mandrin est ensuite dévissé du tube et la tête remise en position haute.	Variable, mais supérieure à 30s

Figure 7 : Tableau de description des tâches

Le forage automatisé est organisé suivant le grafcet de principe (point de vue système) ci-après :

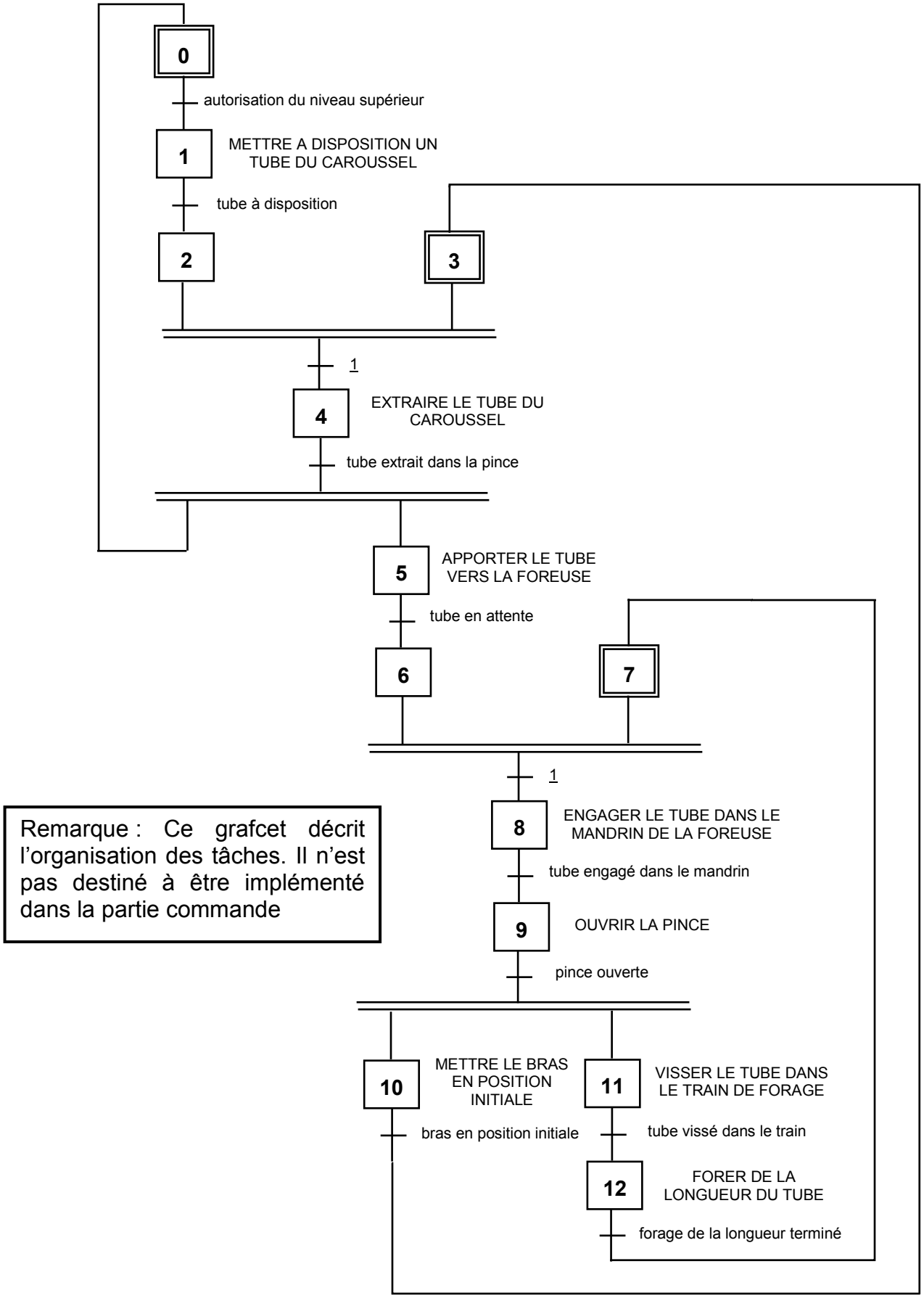


Figure 8 : Grafcet de principe (point de vue système)

Pour le « point de vue Partie Opérative », on choisit de décrire le fonctionnement précédent par des grafcets synchronisés.

Comme le montre la figure 9, le carrousel est constitué de 16 secteurs angulaires dans chacun desquels peuvent prendre place deux tubes : l'un à l'extérieur (rangée 1) et l'autre à l'intérieur (rangée 2). Deux détecteurs de type « Tout Ou Rien », solidaires de la plateforme du robot, indiquent si un tube est présent dans la rangée considérée. A cause de contraintes d'encombrement et pour protéger au maximum les détecteurs des chocs et des débris de roche, ceux-ci n'ont pas pu être fixés en vis-à-vis de l'emplacement de prélèvement.

N.B. : tpi=1 si un tube est présent rangée i, tpi=0 sinon.

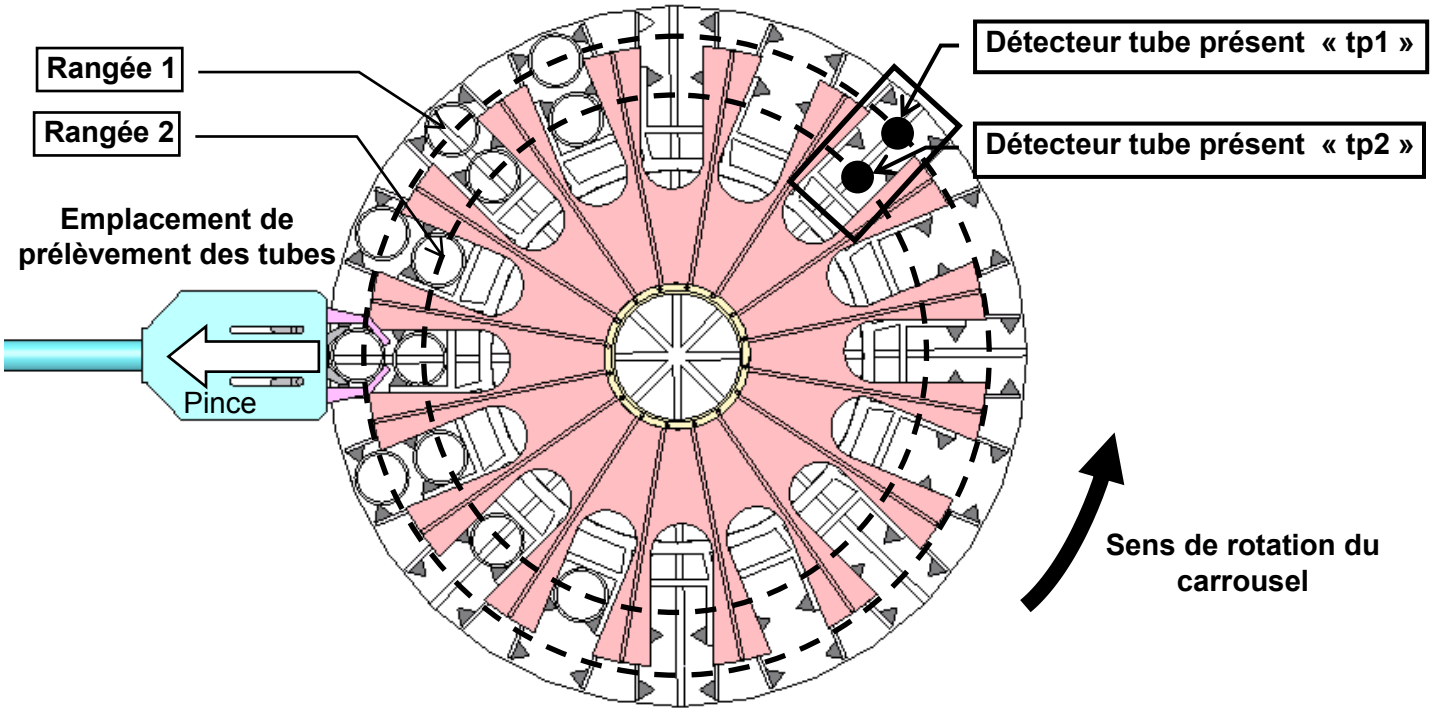


Figure 9 : Fonctionnement du carrousel

Le carrousel ne peut être mis en rotation que dans un seul sens.
« rc » est l'information booléenne issue du capteur de rotation du carrousel : à la fin de la rotation d'un seizième de tour on a : $\uparrow rc = 1$.

Les trois grafcets « point de vue partie opérative » relatifs à la tâche « Mettre à disposition un tube du carrousel » sont donnés, dans une forme incomplète, ci-dessous :

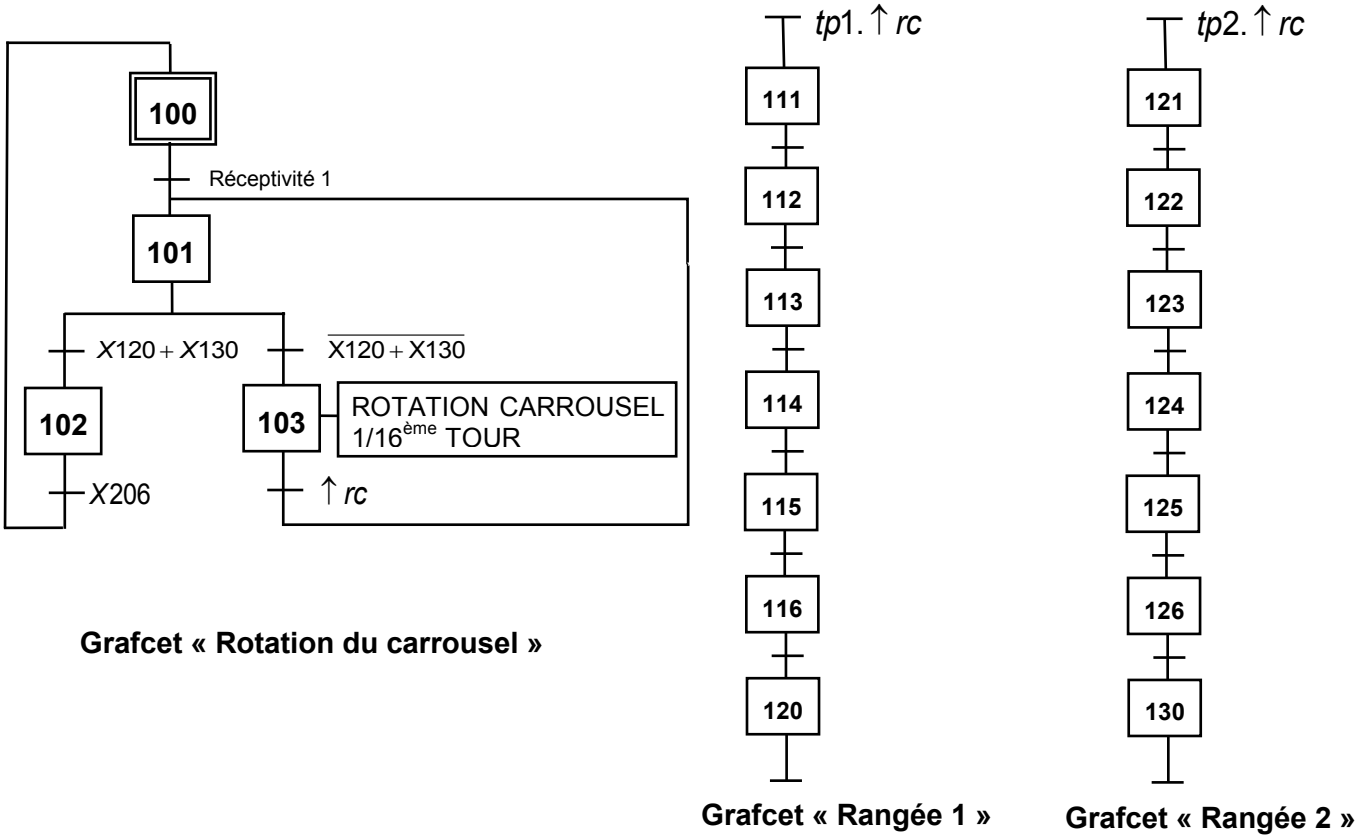


Figure 10 : Grafcets relatifs à la tâche « Mettre à disposition un tube du carrousel »

Question 10.

On considère pour cette question que la réceptivité 1 s'écrit : « demande de mise à disposition d'un tube ». Compléter les grafcets « Rangée 1 » et « Rangée 2 » de façon à ce que l'activité de l'étape 120 indique au grafcet « Rotation du carrousel » qu'un tube est présent à l'emplacement de prélèvement sur la rangée 1 et que, de même, l'activité de l'étape 130 indique qu'un tube est présent à l'emplacement de prélèvement sur la rangée 2. Pour cela :

a) Compléter les réceptivités entre les étapes 111 et 120 d'une part et 121 et 130 d'autre part.

b) Compléter les réceptivités des transitions puits.

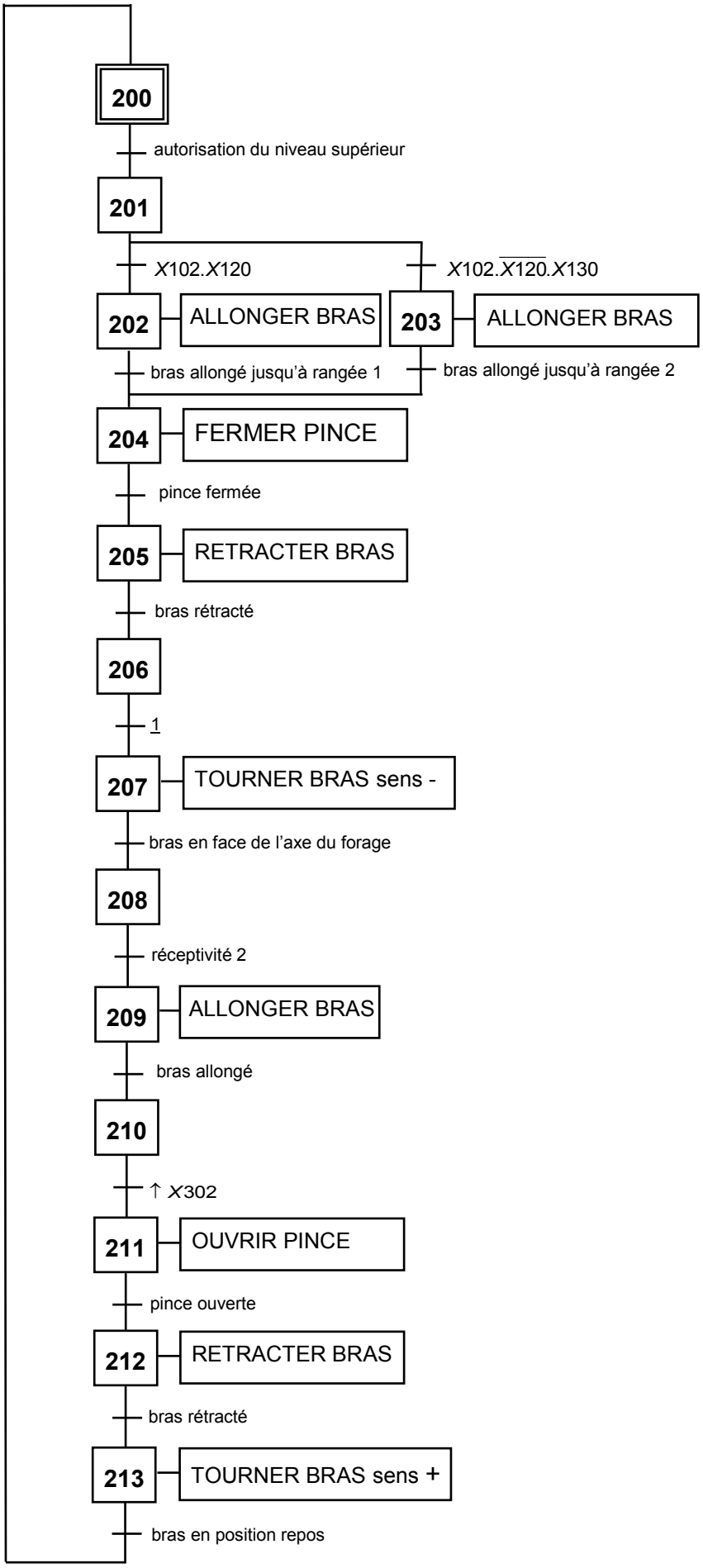


Figure 11 : Grafcet « Bras »

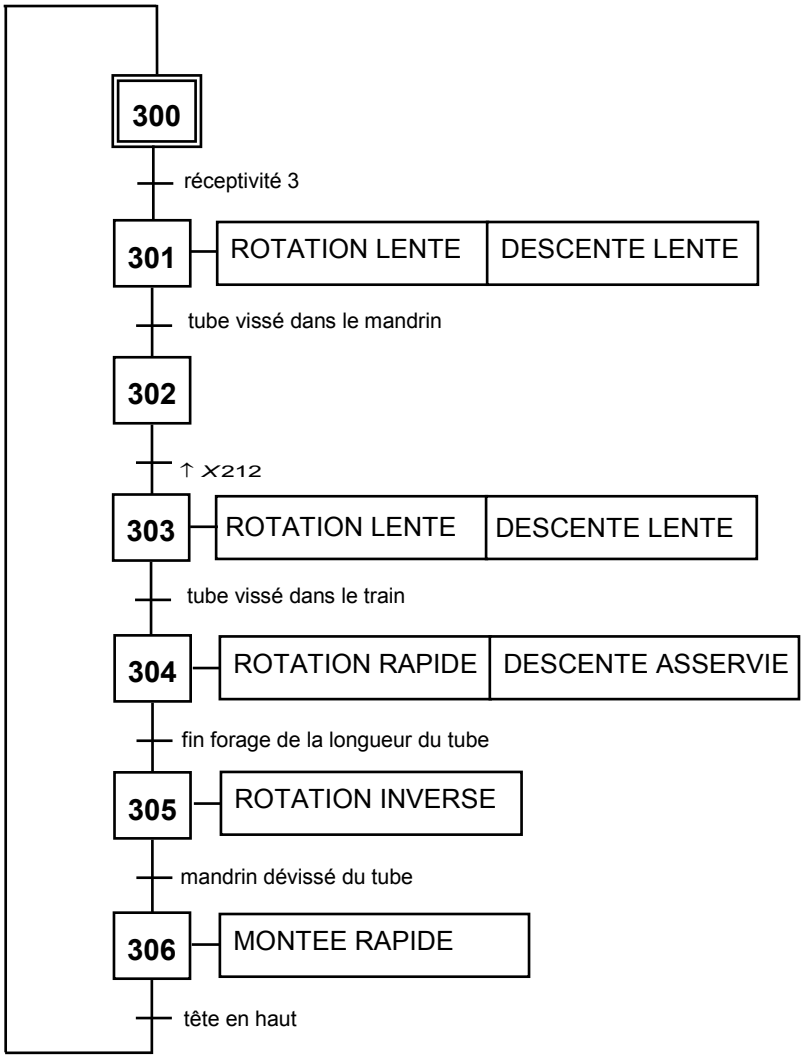


Figure 12 : Grafcet « Foreuse »

Question 11.

Donner les 3 réceptivités : « réceptivité 1 », « réceptivité 2 » et « réceptivité 3 » de façon à ce que les 5 grafcets « point de vue Partie Opérative » fonctionnent de manière synchronisée conformément au grafcet de principe. On notera que les réponses doivent être exprimées à partir des activités des étapes des grafcets « point de vue Partie Opérative ».

Question 12.

En utilisant les durées de chaque tâche données dans le « Tableau de description des tâches », compléter le chronogramme du document réponse qui décrira l'évolution suivante :

- **les grafcets sont dans leur état initial ;**
- **à t=0s, l'autorisation du niveau supérieur est émise et reste vraie ;**
- **on se place dans les hypothèses les plus favorables : le carrousel est plein de tubes, les conditions de forage sont optimales.**

La principale contrainte que le cahier des charges impose sur la conception de la partie commande est liée à la productivité, et donc au temps de cycle que l'on définira comme le temps mis entre deux vissages successifs d'un tube sur le mandrin.

Question 13.

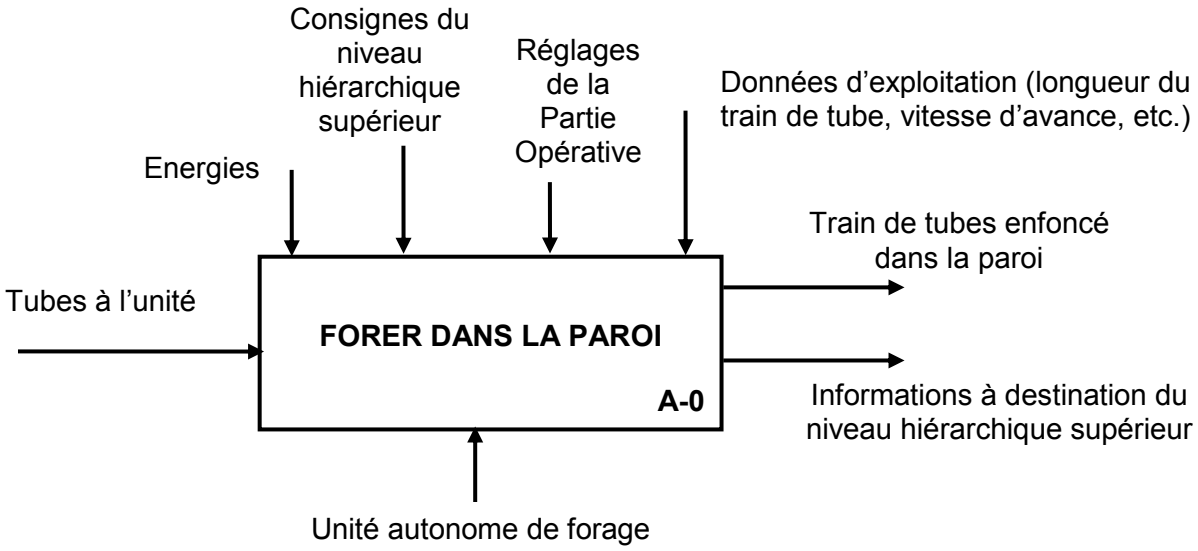
Calculer le temps de cycle en régime établi dans le meilleur des cas.

La productivité peut chuter si le carrousel possède une succession d'emplacements vides de tubes.

Question 14.

En régime permanent, si les conditions de forage sont optimales (la durée de la tâche « forer de la longueur d'un tube » vaut 30s), calculer le nombre de secteurs successifs vides du carrousel à partir duquel le temps de cycle augmente. On suppose pour cette question que la réceptivité « autorisation du niveau hiérarchique supérieur » est toujours vraie.

L'unité autonome de forage peut être décrite par le diagramme SADT A-0 suivant :



Les quatre modules constituant l'unité autonome de forage, sont :

- Le carrousel de stockage et de mise à disposition ;
- Le bras manipulateur ;
- La foreuse ;
- La partie commande.

Le fonctionnement modulaire du Roboclimber, envisagé dès le début de sa conception, impose de décliner ces quatre éléments en versions différentes et interchangeables afin d'élargir le champ des applications du Roboclimber, et donc le catalogue du fabricant. Par exemple la foreuse, qui peut équiper d'autres types de plateformes (autonomes ou non), existe en trois versions, permettant des courses et des efforts de poussée différents.

Afin de se prémunir contre les problèmes d'incompatibilité entre modules différents, la conception doit être encadrée dès l'origine par des outils de contrôle qualité, tels que ceux de l'analyse fonctionnelle.

Question 15.

Proposer un diagramme fonctionnel de type SADT de niveau A0, faisant intervenir les quatre modules ci-dessus, en définissant aussi précisément que possible les fonctions de chaque module et les flux de matières d'œuvre entrant et sortant de chacun. Compléter le document-réponse.

V. FT 12 : Positionner et stabiliser la plateforme

Cette fonction peut être décomposée en trois fonctions :
- FT 121 : Eviter le couplage entre la fréquence de percussion et les fréquences propres de la plateforme. Cette fonction ne sera pas étudiée ici.
- FT 122 : Mettre la plateforme en position parallèle à la surface forée.
- FT 123 : Maintenir la plateforme parallèle à la surface forée pour éviter de "tordre" les tubes de forage.

Cahier des charges global :

Fonction	Critères	Niveau
FT 122 : Mettre la plateforme en position parallèle à la surface forée.	Précision de la position des pieds liés aux tiges des vérins hydrauliques	Ecart statique nul par rapport à la consigne de position.
	Rapidité de l'asservissement	$T_{5\%}$ = 0.15 s
	Marges de stabilité	Marge de phase de 45° Marge de gain de 10 dB
FT 123 : Maintenir la plateforme parallèle à la surface forée.	Angle de la plateforme avec la surface à forer : θ.	< θmax = 6° ce qui correspond à un écart dynamique (dépassement) inférieur à 0,02 m.

L'attitude de la plateforme est réglée par l'intermédiaire des quatre pieds munis chacun d'un vérin hydraulique asservi en position.
La modélisation du comportement du vérin est donnée en ANNEXE 4.

Question 16.

A partir des équations de fonctionnement du système données en ANNEXE 4, compléter le schéma bloc traduisant le comportement du vérin.

Asservissement de position :

Le vérin hydraulique est placé dans une boucle d'asservissement constituée

-d'une servovalve qui fournit le débit q(t) du vérin à partir d'un signal de commande u(t)

-d'un capteur de position de fonction de transfert k_C qui fournit une tension Im(z(t)) image de la position réelle z(t)

-d'un correcteur C(p) qui élabore la commande u(t) de la servovalve à partir de l'écart obtenu entre Im(z_c(t)), image de la consigne de position, et Im(z(t)).

Im(z_c(t)) est obtenue grâce à un adaptateur A(p) situé à l'extérieur de la boucle d'asservissement.

Question 17.

Compléter le schéma bloc de l'asservissement ébauché sur le document réponse. Préciser l'expression de l'adaptateur A(p) pour que l'écart soit nul lorsque la réponse est égale à la consigne.

Question 18.

Transformer le schéma bloc de façon à avoir un retour unitaire.

Le comportement du système en poursuite est décrit par les figures en ANNEXE 5.

Question 19.

Le système est-il précis en régime permanent pour une entrée échelon ?

Question 20.

Les trois autres critères du cahier des charges sont-ils respectés ? Justifier.

Les figures de l'ANNEXE 5 font apparaître une résonance importante aussi bien en boucle ouverte qu'en boucle fermée.
Dans le cas de résonance d'un système présentant une asymptote de pente non nulle en basses fréquences le facteur de résonance est mesuré par rapport à cette asymptote pour la pulsation correspondant au gain maximum.

Question 21.

Relever les caractéristiques de la résonance, pulsation et facteur de résonance, en boucle ouverte et en boucle fermée.

La solution retenue pour atténuer cette résonance est l'utilisation d'un filtre réjecteur de fonction de transfert $C(p) = \frac{1+\frac{2\xi_1}{\omega_0}p+\frac{p^2}{{\omega_0}^2}}{1+\frac{2\xi_2}{\omega_0}p+\frac{p^2}{{\omega_0}^2}}$ avec $\xi_1 < \xi_2 < \frac{\sqrt{2}}{2}$.

Question 22.

Tracer l'allure du diagramme de Bode en gain, asymptotique <u>et</u> réel, de ce correcteur et expliquer son mode de fonctionnement.

On choisit de prendre ω_0 égal à la pulsation de résonance de la boucle ouverte et $\xi_2 = 0.5$.

Question 23.

A partir des valeurs obtenues à la Question 21, proposer une valeur numérique pour le paramètre ξ_1.

Le comportement du système ainsi corrigé est décrit par les figures en ANNEXE 6.

Question 24.

Que peut-on en conclure quant au respect des quatre critères du cahier des charges ? Justifier.

L'opération de forage est modélisée par une perturbation au niveau des actions mécaniques agissant sur les pieds.
Cet effort de forage comprend deux composantes :
- Une composante constante F_0 donnée par l'effort de poussée de la tête de forage
- Une composante liée à la percussion modélisée par des impulsions (Dirac) périodiques.

La figure en ANNEXE 7 donne la réponse du système en régulation ($z_c(t)=0$).

Question 25.

Dans le cas de la régulation proposée, le cahier des charges de la régulation est-il respecté ? Justifier.

Question 26.

Que peut-on penser de la stabilité du système vis-à-vis de la perturbation ?

a) à partir de la courbe

b) à partir des modèles de fonctions de transfert mis en place précédemment.

Fin de l'énoncé

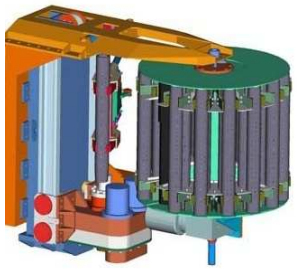
ANNEXE 1 : Description fonctionnelle

FS : STABILISER LES PAROIS SANS INTERVENTION DIRECTE DE L'HOMME

FT : ENFONCER DES PIEUX DANS LA PAROI A L'AIDE D'UN ROBOT AUTONOME

- **FT 1 SE POSTIONNER A DES EMPLACEMENTS DETERMINES SUR LA PAROI**
- **FT 2 FORER DANS LA PAROI**
- **FT 3 GERER LE FONCTIONNEMENT : ORGANISER LES DEPLACEMENTS D'UN FORAGE A L'AUTRE**

Robot marcheur à quatre pieds



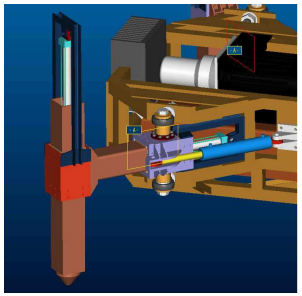
Unité autonome de forage

Partie commande de niveau hiérarchique supérieur

FT 1 SE POSITIONNER A DES EMPLACEMENTS DETERMINES SUR LA PAROI

FT 11 DEPLACER LA PLATEFORME JUSQU'A L'EMPLACEMENT DU FORAGE

FT 111 UILISER UN SYSTEME TYPE « MARCHEUR »



4 pieds à trois degrés de liberté actionnés par des vérins

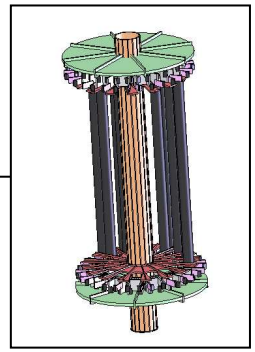
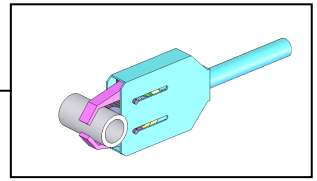
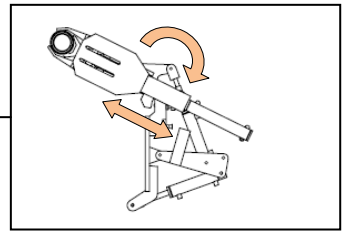
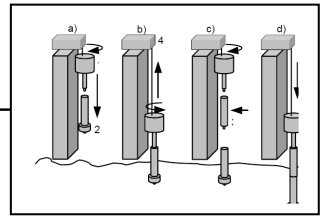
FT 112 UTILISER LES CABLES DE TRACTION

2 treuils hydrauliques

FT 12 POSITIONNER ET STABILISER LA PLATEFORME DURANT LE FORAGE

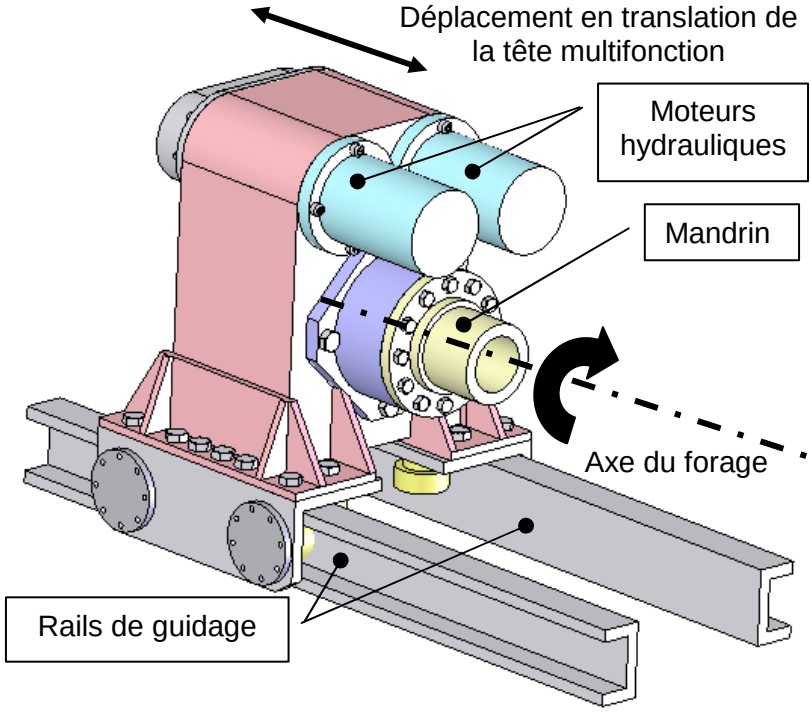
Asservissement en position des vérins hydrauliques

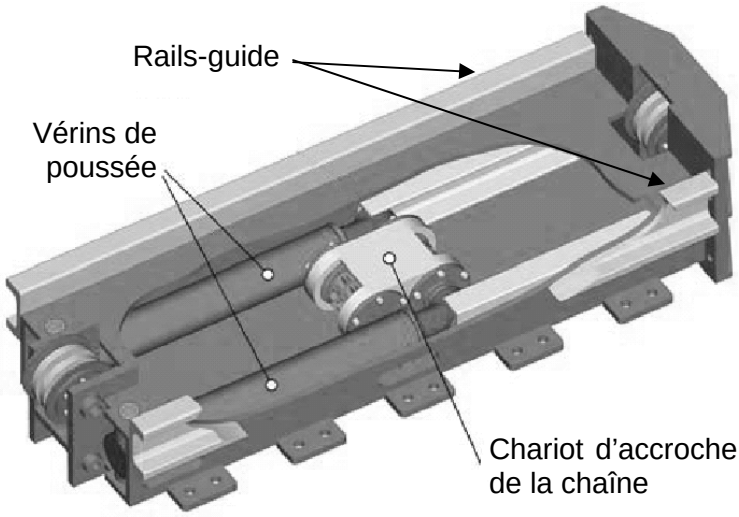
FT 2 FORER DANS LA PAROI

- **FT 21 STOCKER ET METTRE A DISPOSITION LES TUBES DE FORAGE**
  - 
  - Carrousel de stockage des tubes
- **FT 22 ASSEMBLER LES TUBES DE FORAGE**
  - **FT 221 DESTOCKER LES TUBES DE FORAGE**
    - **FT 2211 SAISIR LES TUBES**
      - 
      - Pince
    - **FT 2212 DEPLACER LES TUBES**
      - 
      - Bras à deux degrés de liberté
  - **FT 222 VISSER LES TUBES DE FORAGE ENTRE EUX**
- **FT 23 ENFONCER LES TUBES DE FORAGE DANS LA PAROI**
  - 
  -
  - Foreuse hydraulique
- **FT 24 GERER LE FORAGE AUTOMATISE**
  - Partie commande embarquée de niveau hiérarchique intermédiaire

ANNEXE 2 : Unité de forage

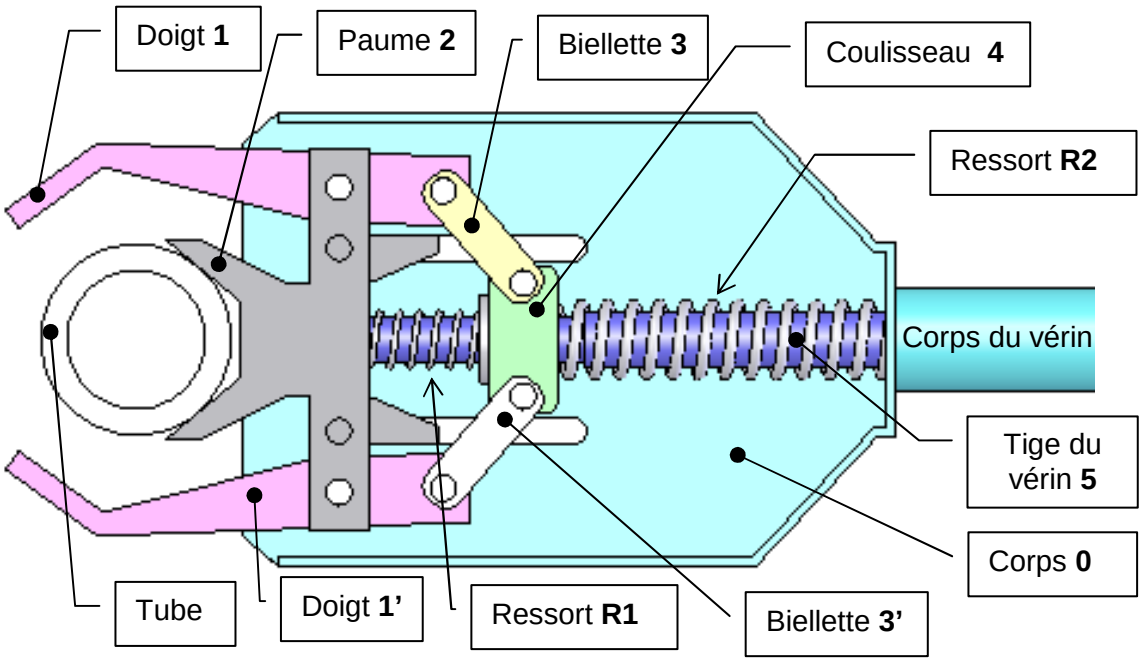
Unité de forage





Rails de guidage et vérins de poussée

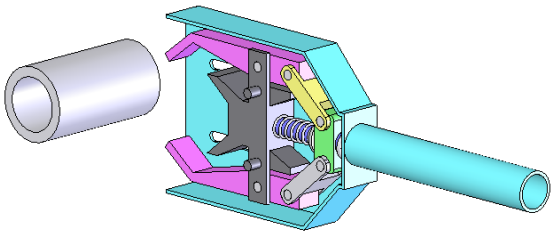
ANNEXE 3 : Pince



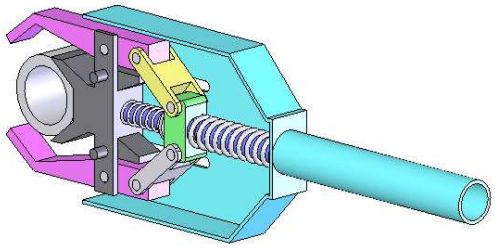
Description de la pince

La saisie d'un tube est décrite par les quatre positions successives ci-dessous :

Position rétractée
(doigts ouverts)



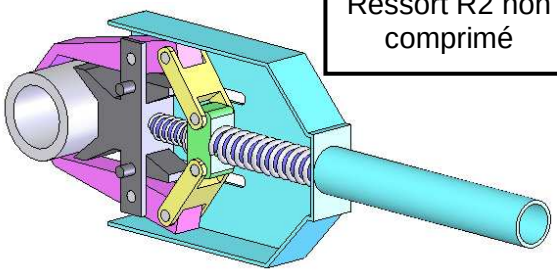
Paume en contact avec le tube
(doigts ouverts)



Lors de la phase d'avance de la pince jusqu'au contact avec le tube, l'ensemble des pièces se déplace par rapport au corps en translation rectiligne en gardant les doigts en position ouverte.

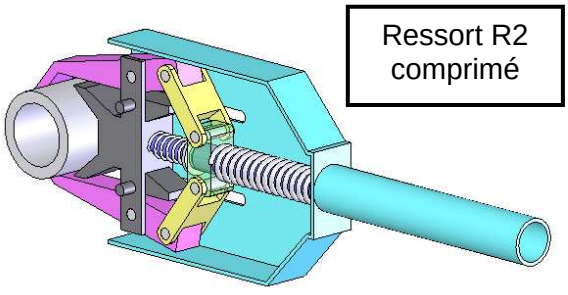
Doigts fermés

Ressort R2 non comprimé



Pince verrouillée

Ressort R2 comprimé

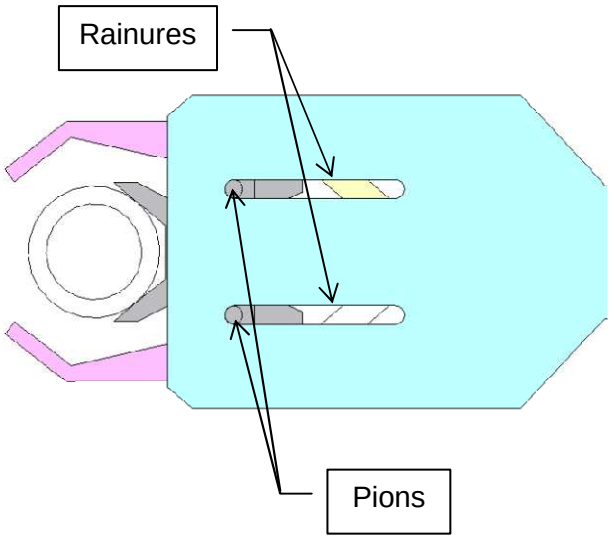


La tige du vérin continue son mouvement de sortie, ce qui provoque la translation du coulisseau et la fermeture des doigts grâce aux deux biellettes **3** et **3'**articulées sur le coulisseau **4** et sur les doigts **1** et **1'**.
Pour garantir la fermeté de la prise, la tige du vérin continue de sortir de façon à comprimer le ressort de verrouillage **R2** : la pince est alors en position verrouillée.

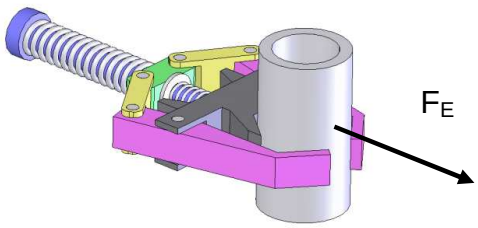
La dépose du tube se fait dans l'ordre inverse. Le ressort R1, de faible raideur n'a pour seule fonction que de maintenir les doigts ouverts lors de la phase d'approche : son rôle est négligé dans la suite.

Remarque :

Des rainures parallèles sont réalisées dans le corps : des pions liés au coulisseau s'y déplacent assurant ainsi la liaison glissière entre les deux pièces.
On notera que lorsque la paume arrive en contact avec le tube, les pions de guidage arrivent en butée à l'extrémité des rainures parallèles.



Extrait du cahier des charges :

FT 2211	Critère	Niveau	Illustration
Saisir les tubes	Maintien de la prise lors de l'extraction d'un tube du carrousel : - force de maintien exercée par le barillet sur le tube : F_E. - coefficient de frottement du contact tube/doigt : f	F_E = 500 N f= 0,3	
	D'autres critères ont été définis, mais ne sont pas étudiés ici.		

ANNEXE 4

Modélisation simplifiée de la servovalve

La servovalve est modélisée par un gain pur k_{sv}.

Modélisation simplifiée du vérin hydraulique

Données :

- S : surface utile du piston
- B : module de compressibilité du fluide utilisé
- q(t) : débit entrant et sortant du vérin
- V_1 et V_2 : volumes des deux chambres du vérin. On prendra par la suite $V_1 = V_2 = V$.
- $p(t) = p_1 - p_2$: différence des pressions dans les chambres du vérin
- z(t) : déplacement de la tige par rapport à la position d'équilibre

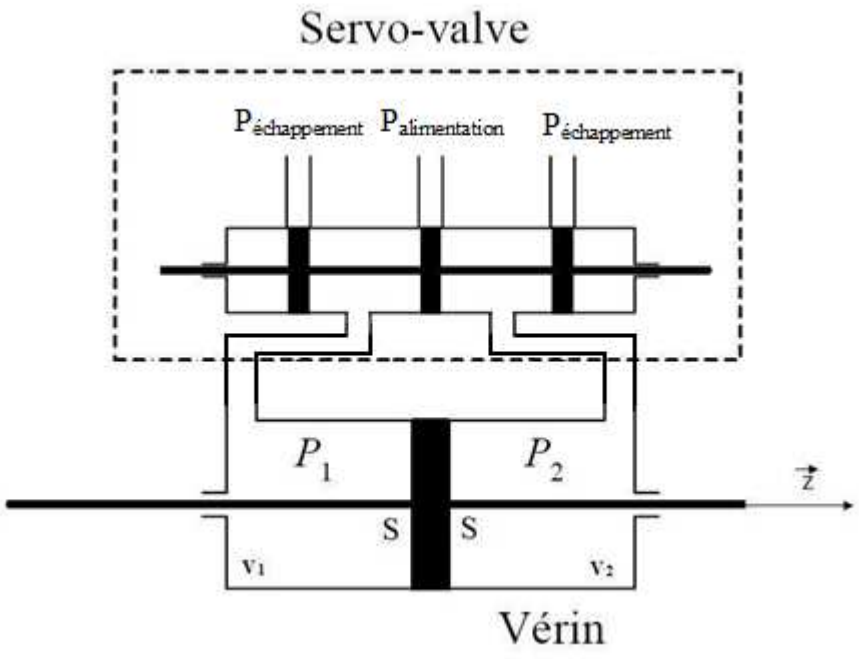
Equations de fonctionnement

- Bilan des débits : $q(t) = S\frac{dz}{dt} + \frac{V}{2B}\frac{dp}{dt}$
- Equation de mécanique (théorème de la résultante dynamique appliqué à l'équipage mobile) :

$$M\frac{d^2z}{dt^2} = -kz(t) - \mu\frac{dz}{dt} + p(t).S + F_{forage}$$

Le pied sort jusqu'à venir en contact avec le sol, contact détecté par un capteur d'effort situé sous le pied. L'asservissement des déplacements de la tige du vérin entre en jeu à ce moment là.

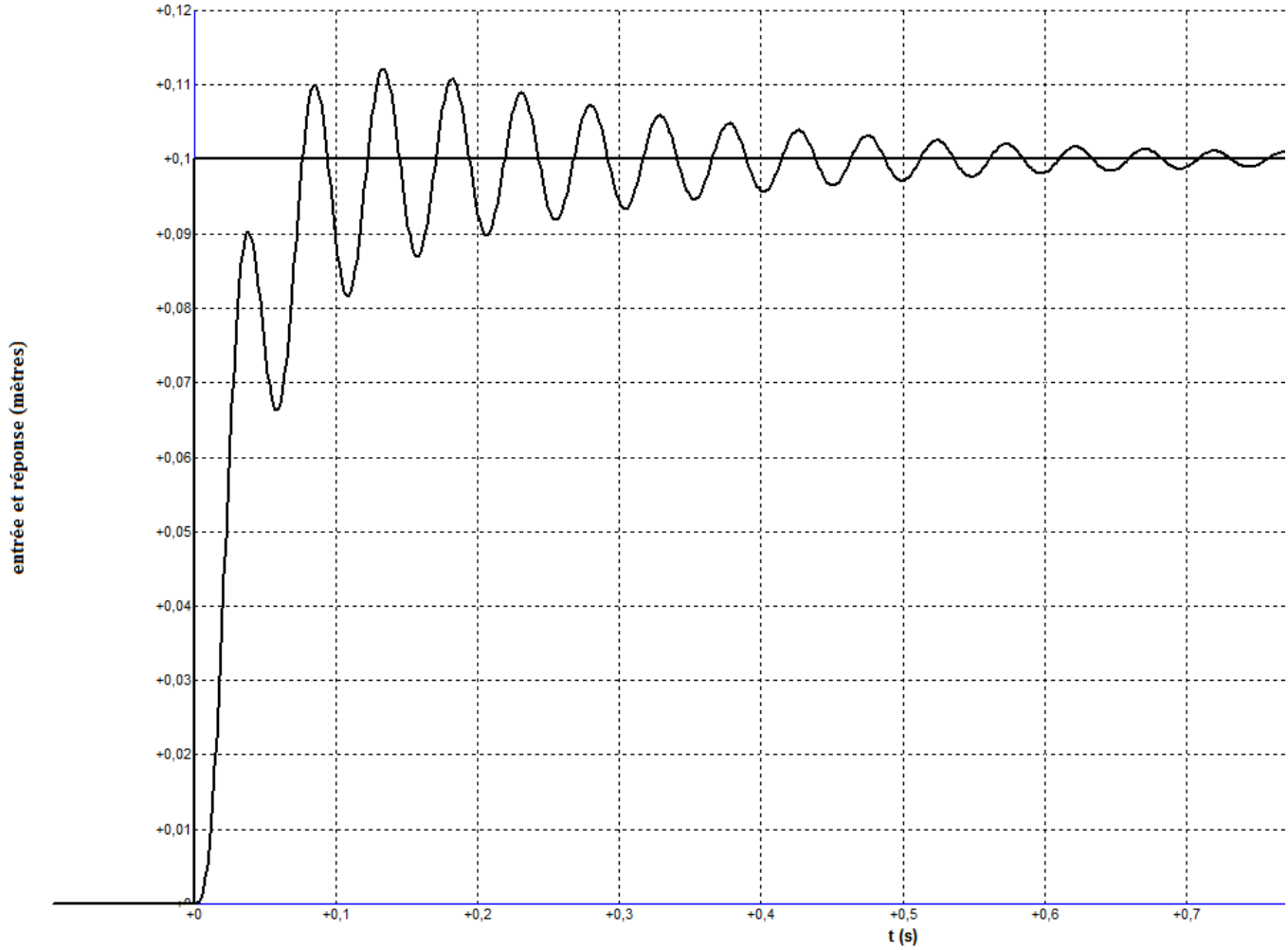
Schéma



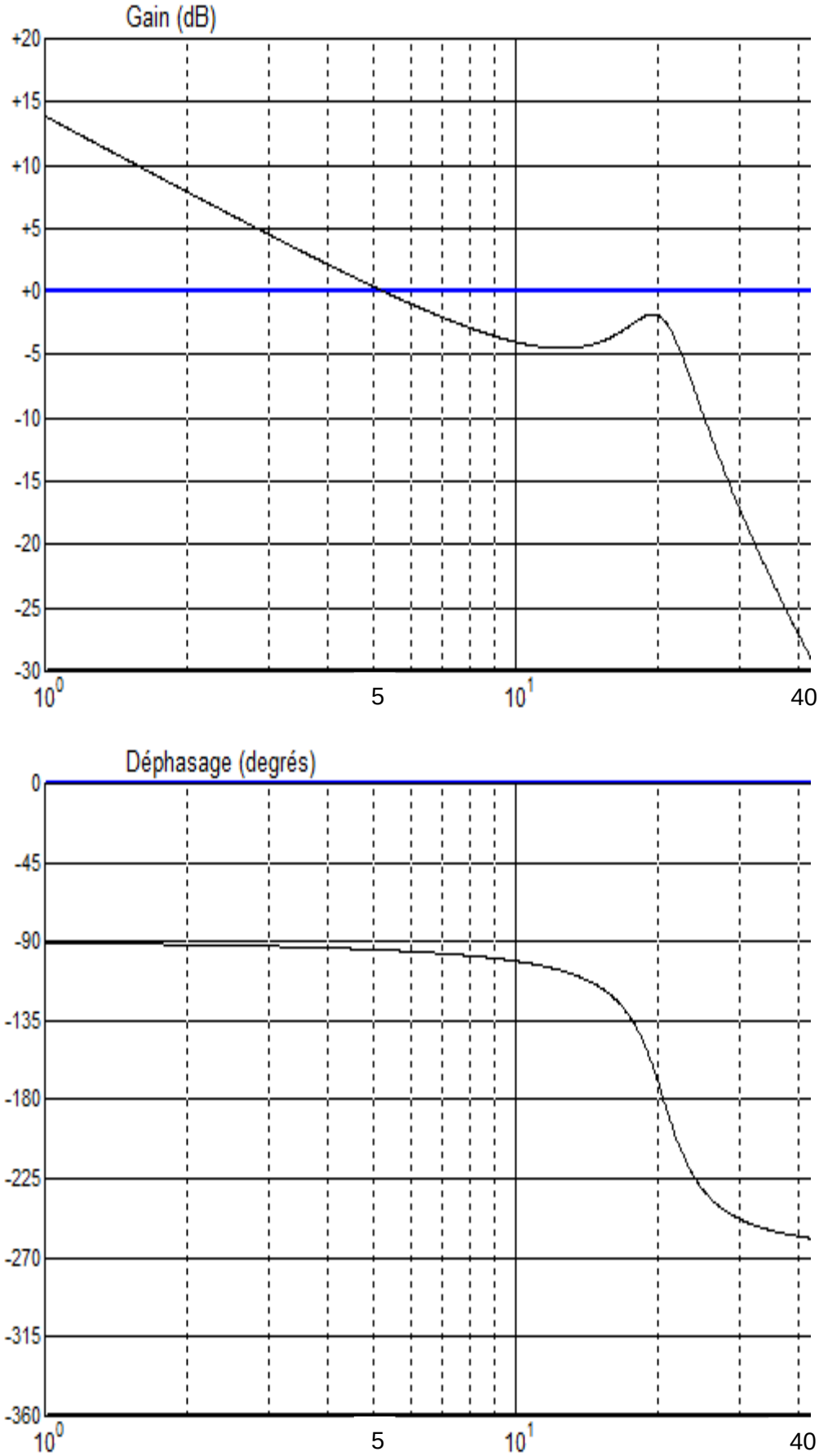
ANNEXE 5

Comportement du système asservi non corrigé en poursuite :

1 - Réponse indicielle du système non corrigé :
Le signal d'entrée a une amplitude égale à 0,1 m.

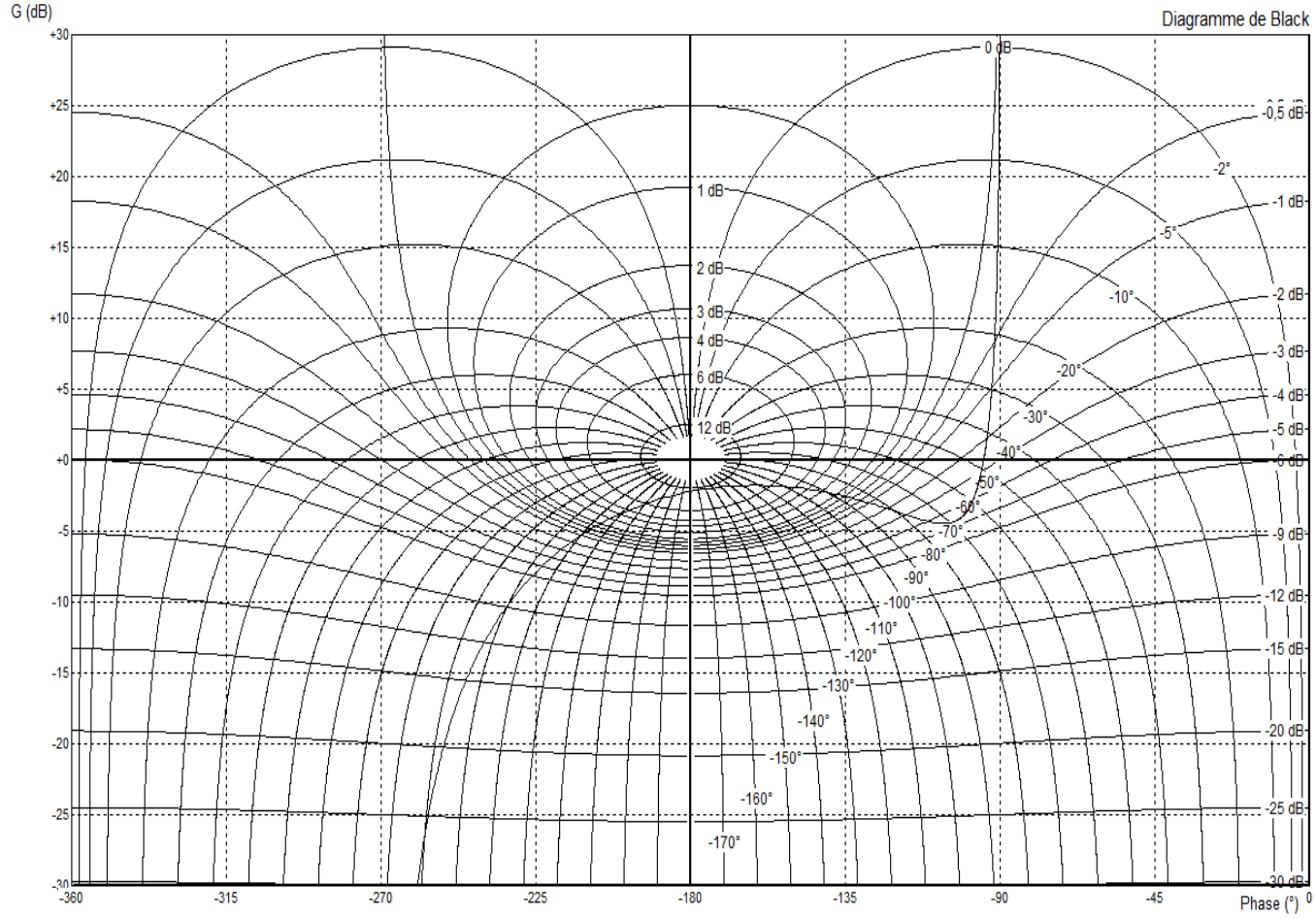


2 - Diagramme de Bode de la boucle ouverte non corrigée.

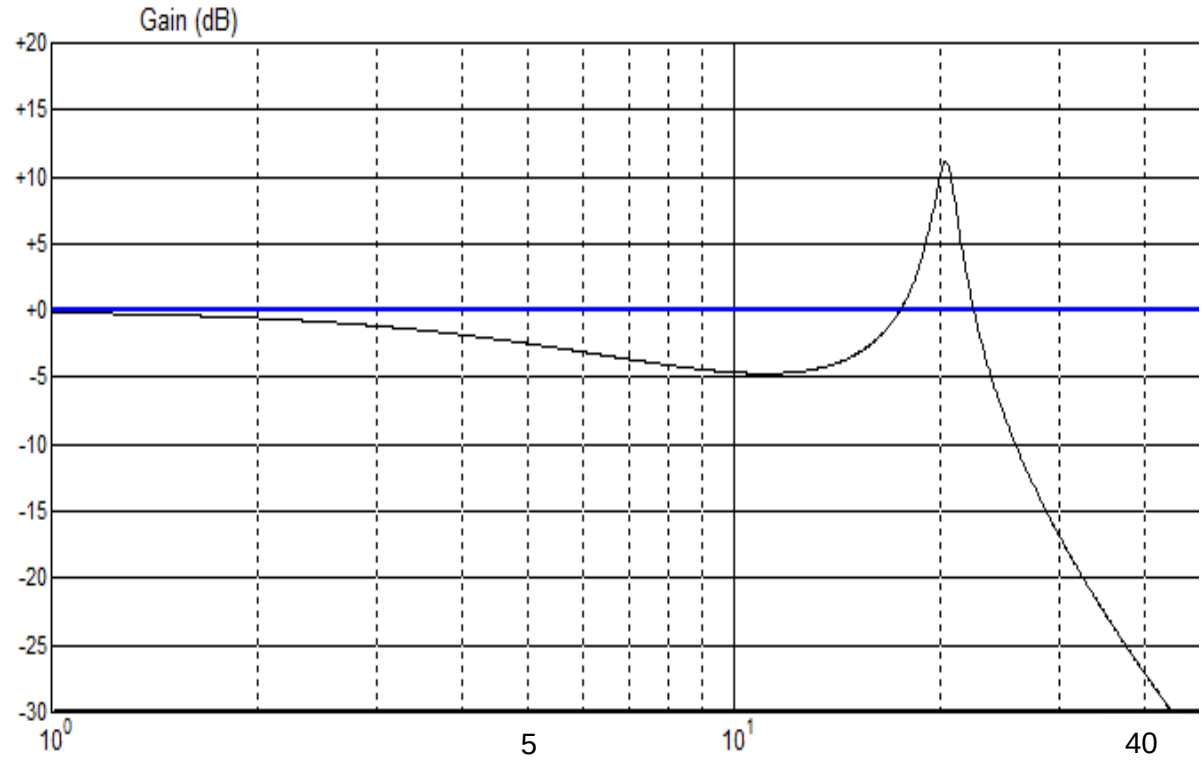


<u>NB : Dans les diagrammes de Bode, les abscisses sont données en Hz. ($\omega = 2\pi.f$)</u>

3 - Diagramme de Black de la boucle ouverte non corrigée.



4 - Diagramme de Bode en gain de la réponse fréquentielle (en boucle fermée) du système non corrigé.



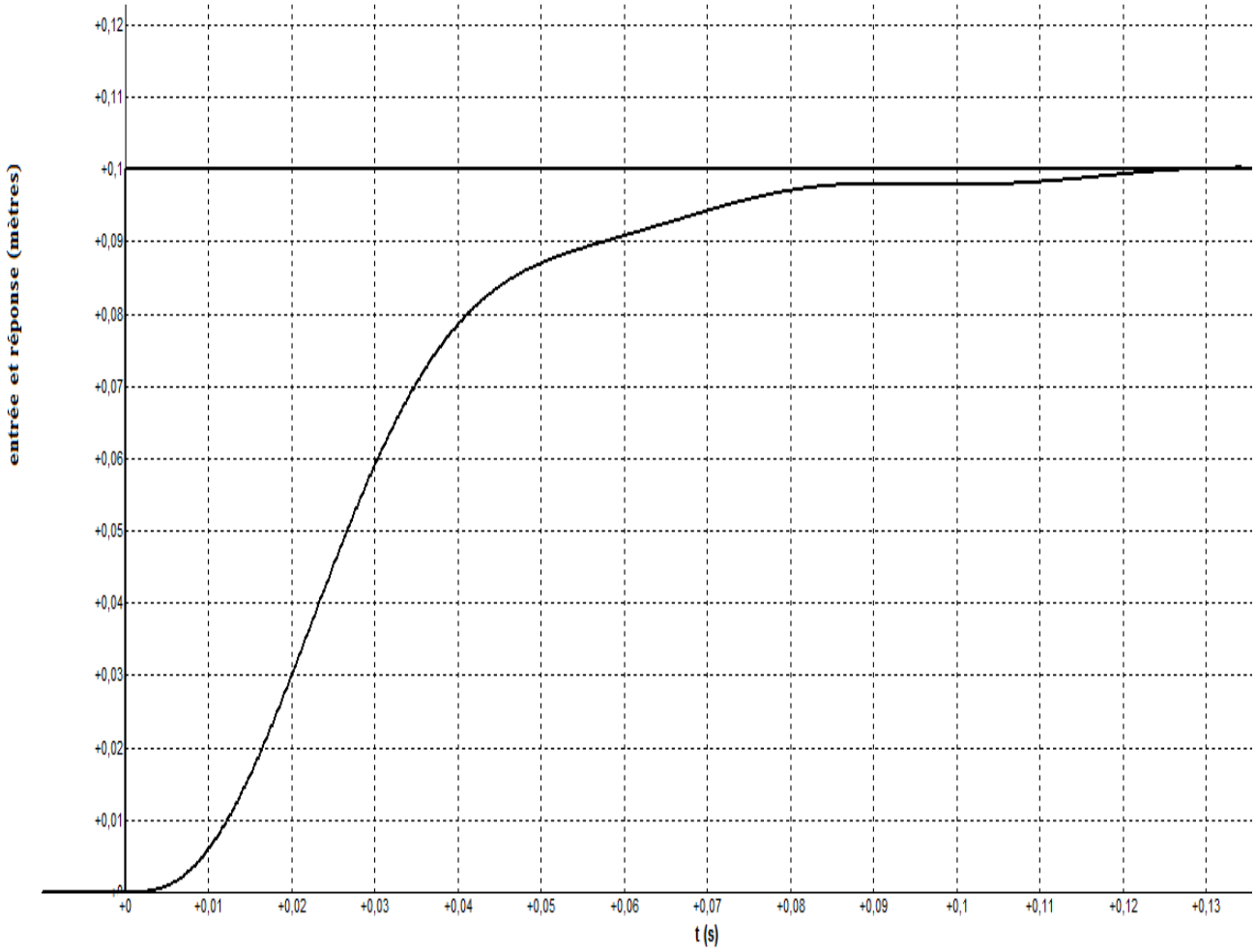
NB : Dans les diagrammes de Bode, les abscisses sont données en Hz. ($\omega = 2\pi.f$)

ANNEXE 6

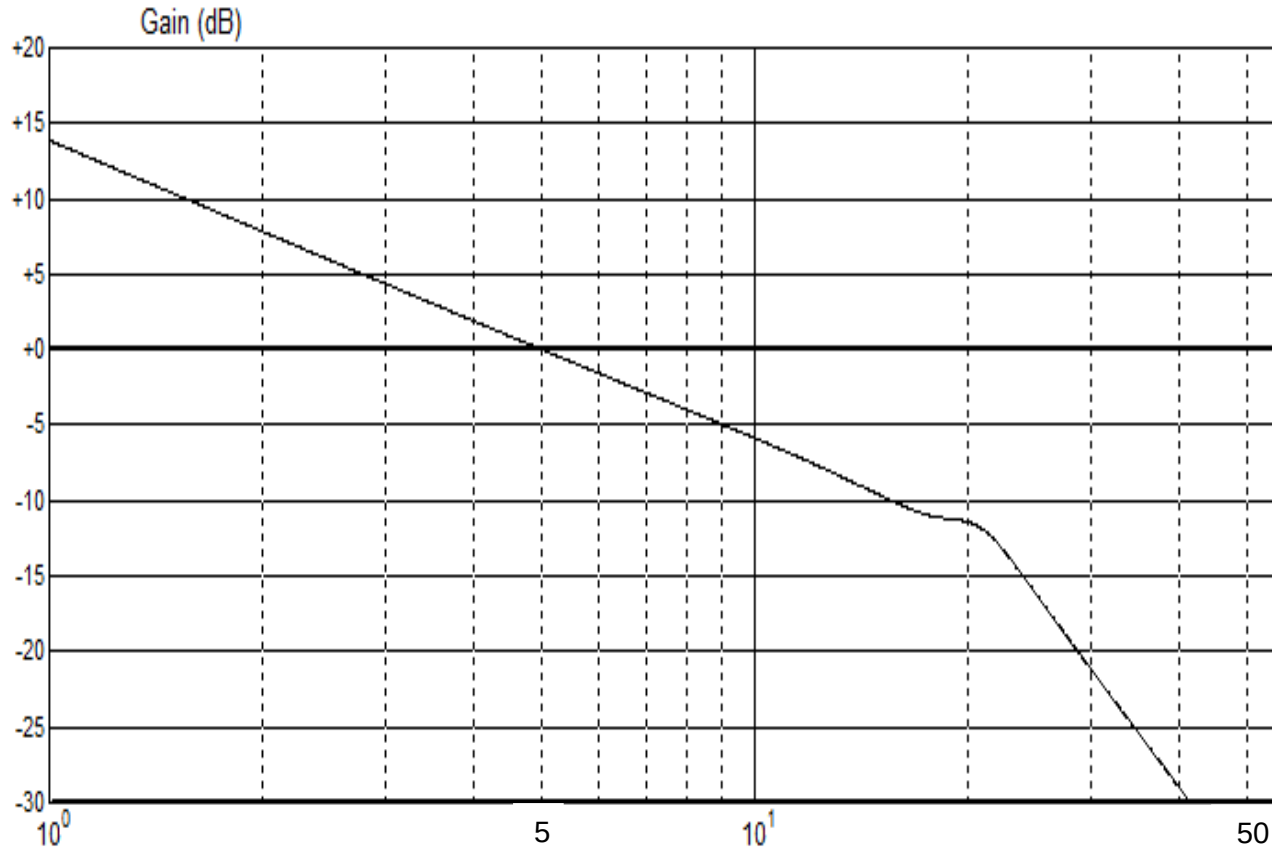
Comportement du système corrigé en poursuite :

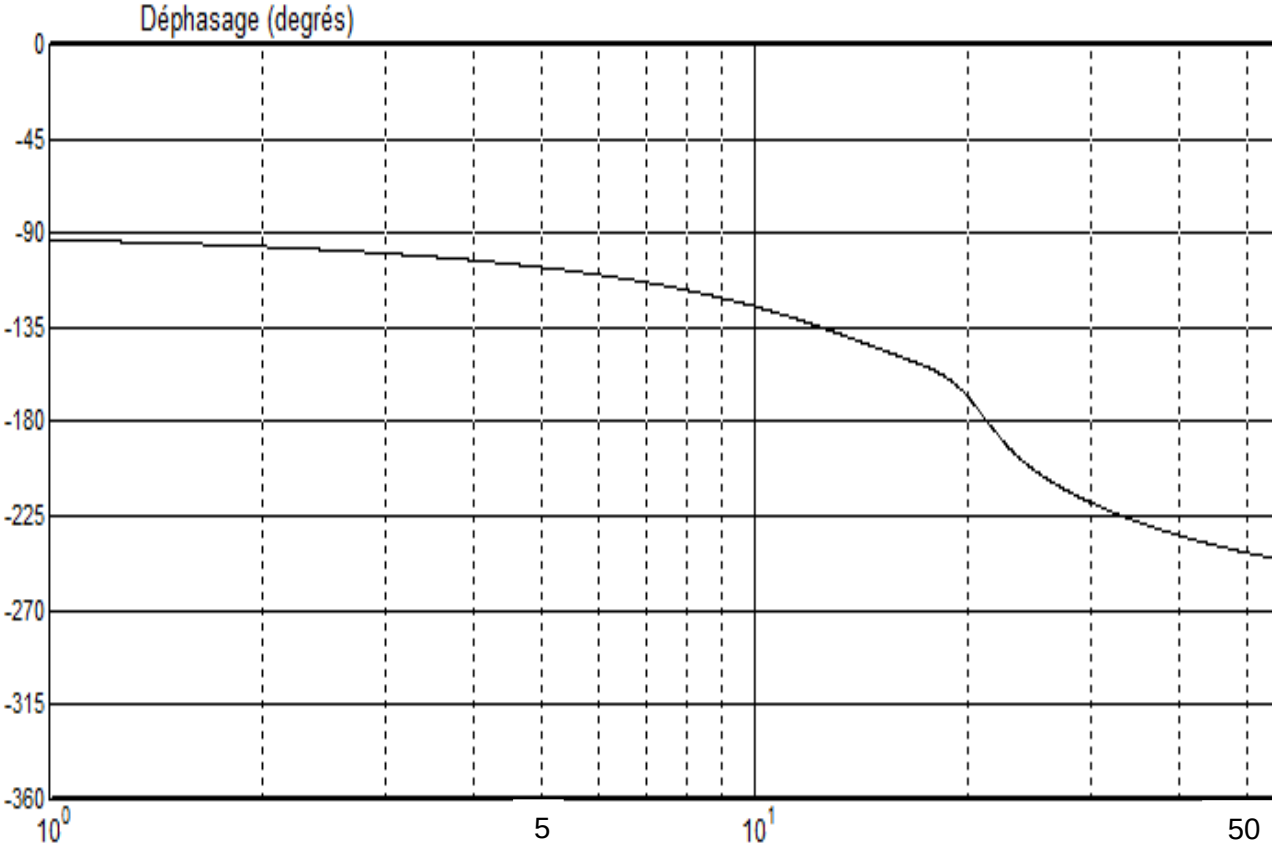
1 - Réponse indicielle du système corrigé :

Le signal d'entrée a une amplitude égale à 0,1 m.



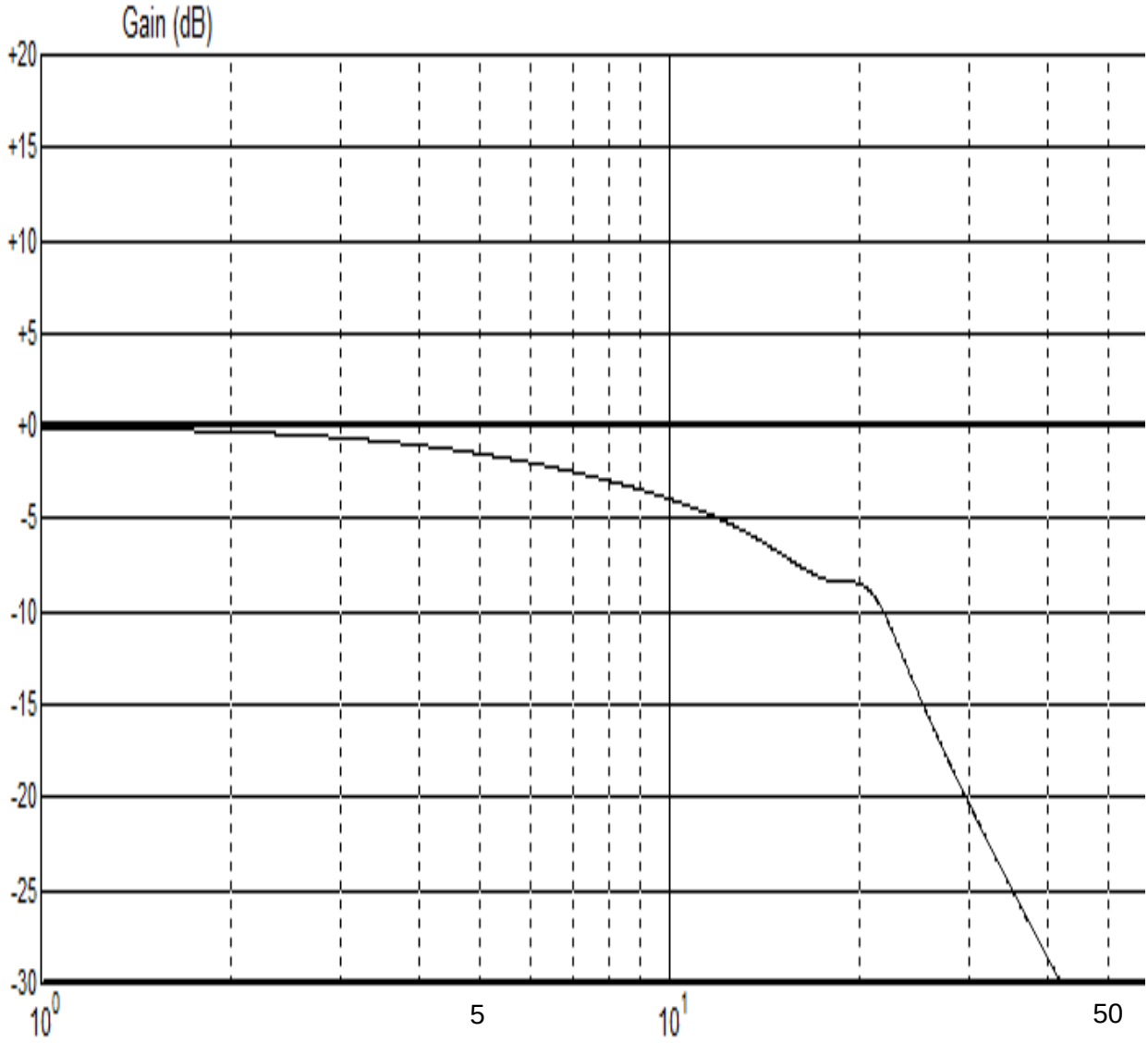
2 - Diagramme de Bode de la boucle ouverte corrigée.





NB : Dans les diagrammes de Bode, les abscisses sont données en Hz. ($\omega = 2\pi.f$)

3 - Diagramme de Bode en gain de la réponse fréquentielle (en boucle fermée) du système corrigé.

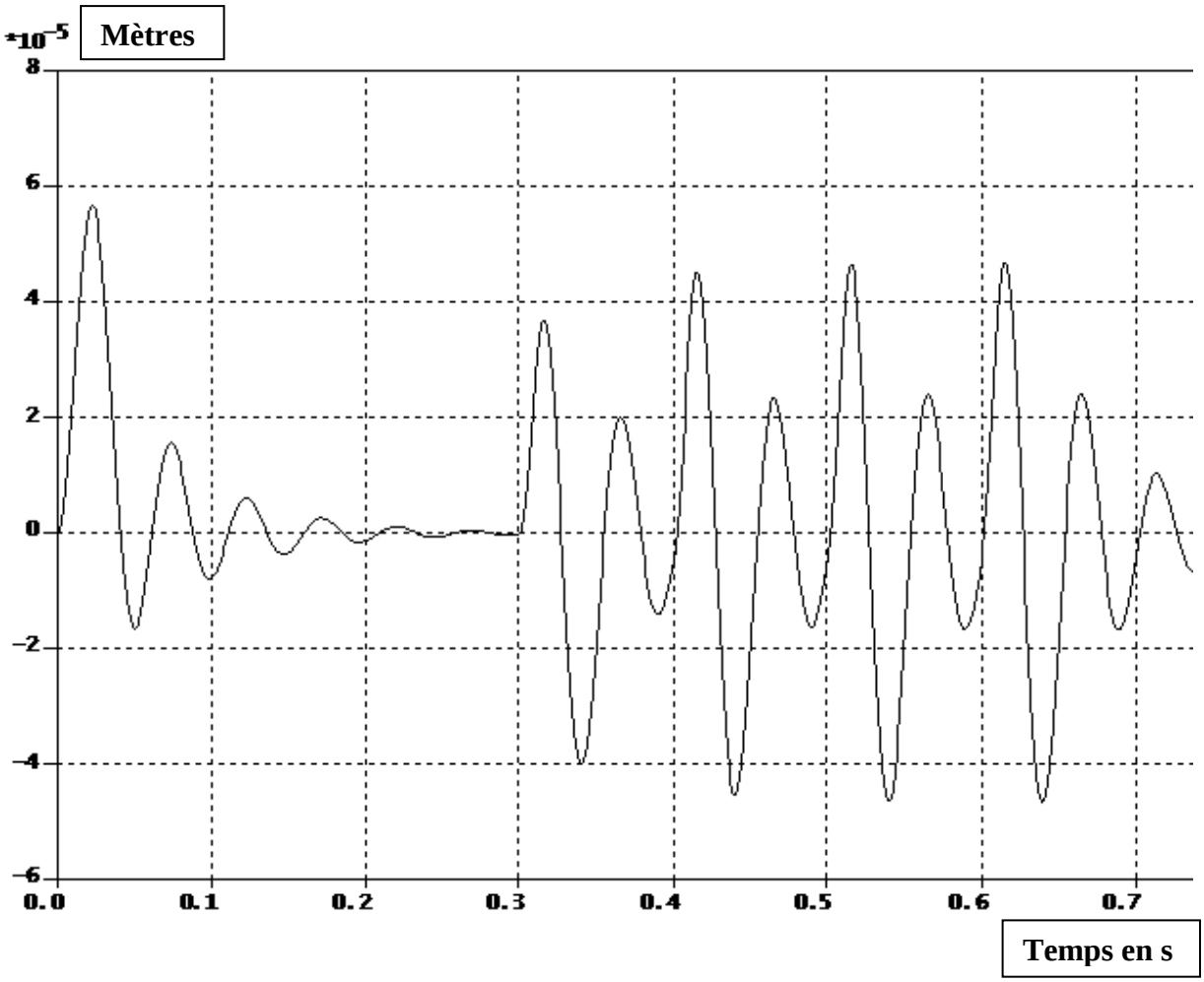


NB : Dans les diagrammes de Bode, les abscisses sont données en Hz. ($\omega = 2\pi.f$)

ANNEXE 7

Comportement du système corrigé en régulation :

1 - Réponse du système corrigé à une perturbation due à l'effort de forage :



La sortie sur l'axe des ordonnées est donnée en mètres avec un coefficient 10^{-5}.

Dans l'intervalle [0 ; 0,3] seconde, seul l'effort de poussée de la tête intervient.

A partir du temps t = 0,3 s, la percussion entre en fonctionnement.

DANS L'ESPACE REPONSE RESERVE A CHAQUE PARTIE
le candidat identifiera clairement le numéro de la question à laquelle il répond.

II - VERIFICATION DES CRITERES DE LA FONCTION FT 23 « ENFONCER LE TRAIN DE TUBES »

Question 1 : Equilibre statique de l'ensemble {plateforme + train de tubes}

Tournez la page S.V.P.

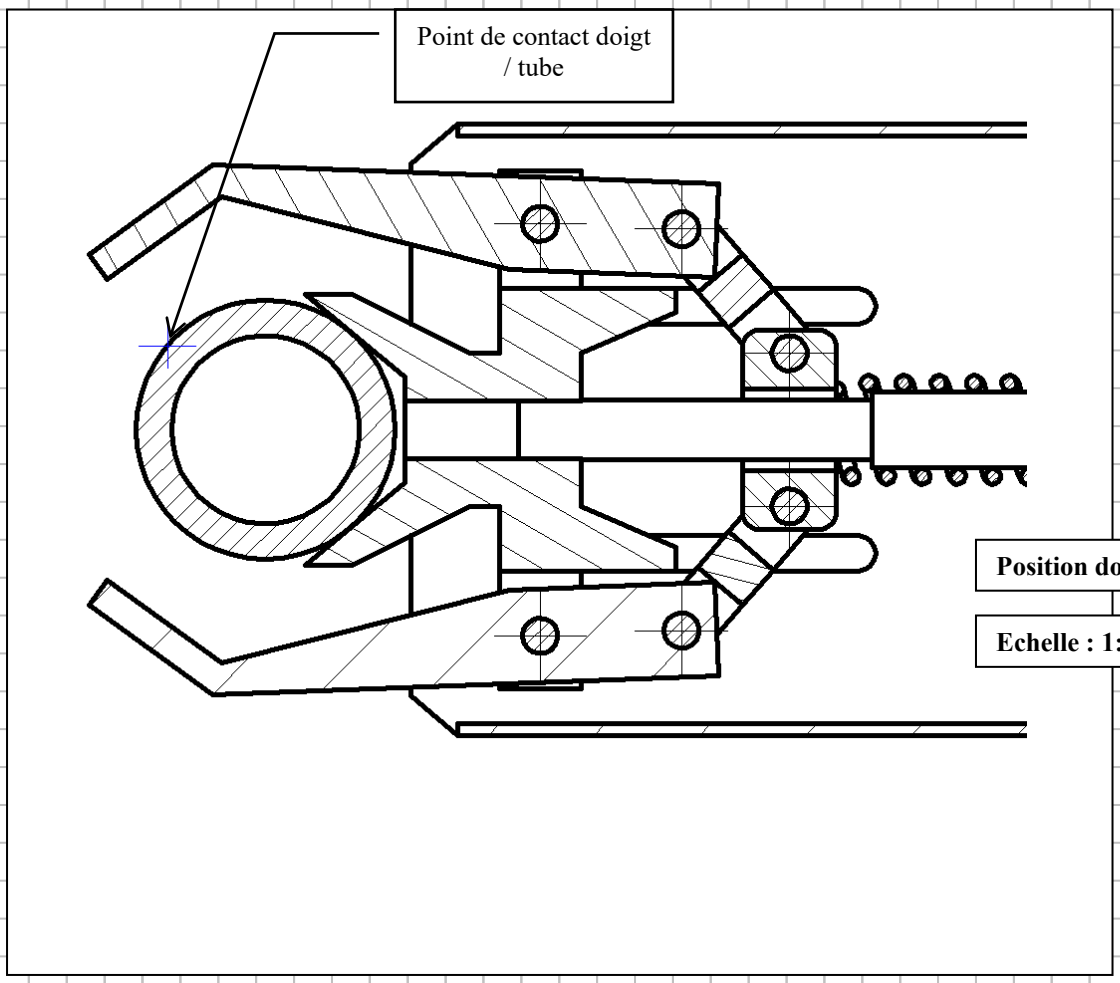
Question 2 : Degré d'hyperstatisme de la liaison entre le rail-guide (0) et la tête multifonction

Questions 3 et 4 : Défaut d'alignement

Questions 5 et 6 : Plage de pulsations (ou de fréquences) de percussion interdites

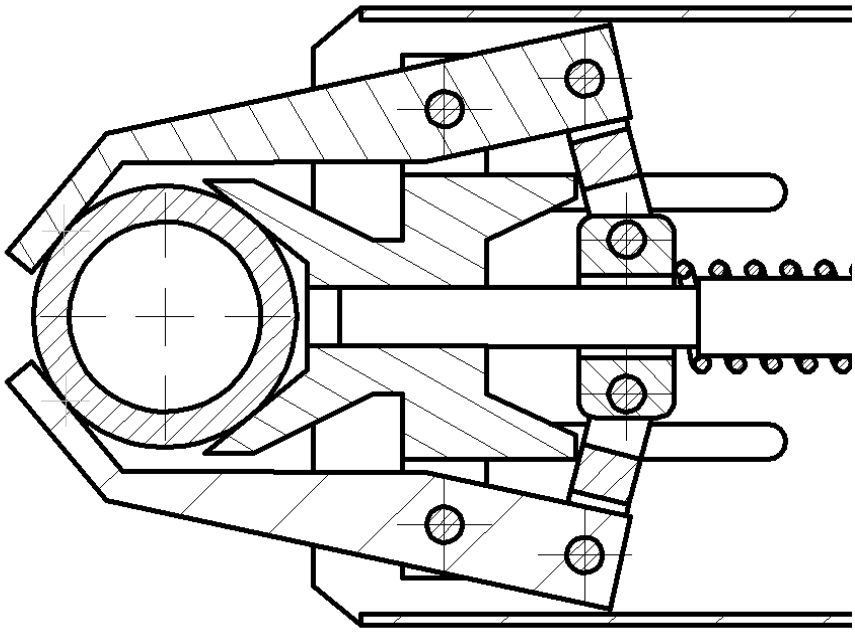
III - VERIFICATION DES CRITERES DE LA FONCTION FT 2211 « Saisir les tubes »

Question 7 : Déplacement Δx_A

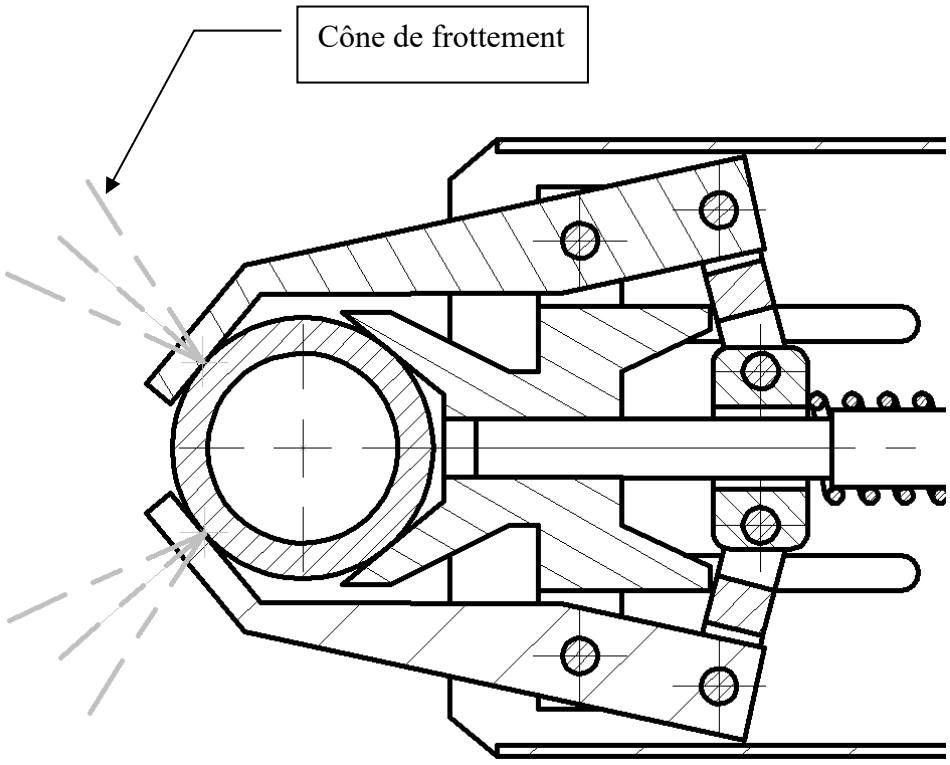


Question 8 : Force exercée par chaque doigt sur le tube (figure page suivante)

Echelle conseillée : 1cm ↔ 100N

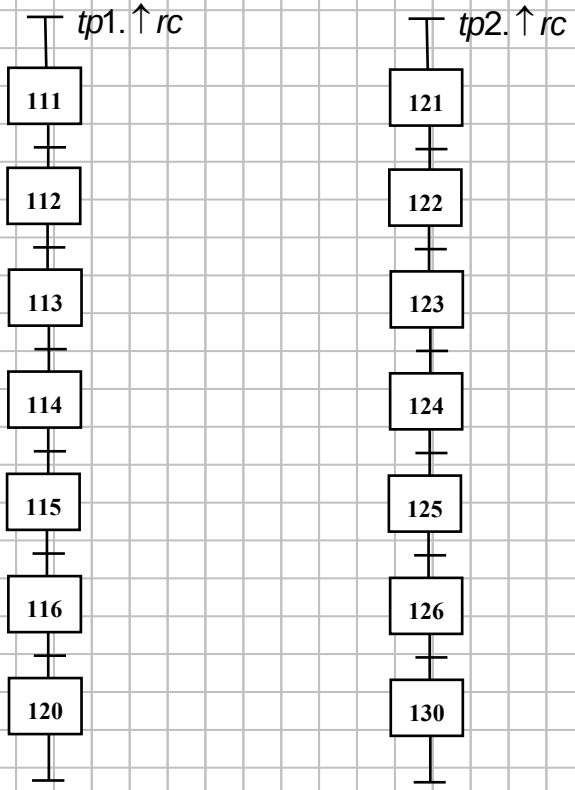


Question 9 : Vérification du critère « Maintien de la prise lors de l'extraction (…) »



IV - Vérification des critères de la fonction FT 24 « Gérer le fonctionnement du forage automatisé »

Question 10 : « Mettre à disposition un tube du carrousel »



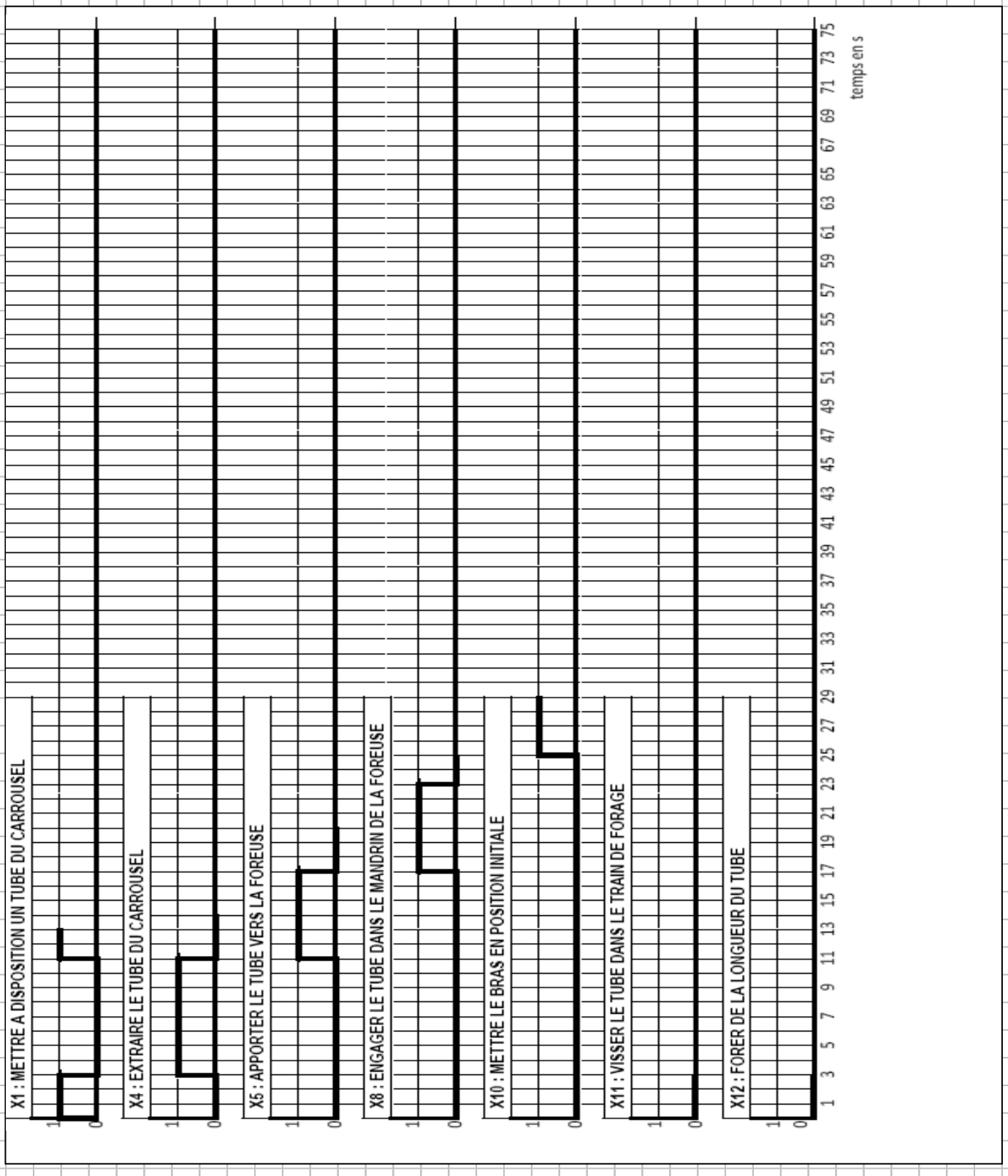
Question 11 : Synchronisation

Réceptivité 1 : _____

Réceptivité 2 : _____

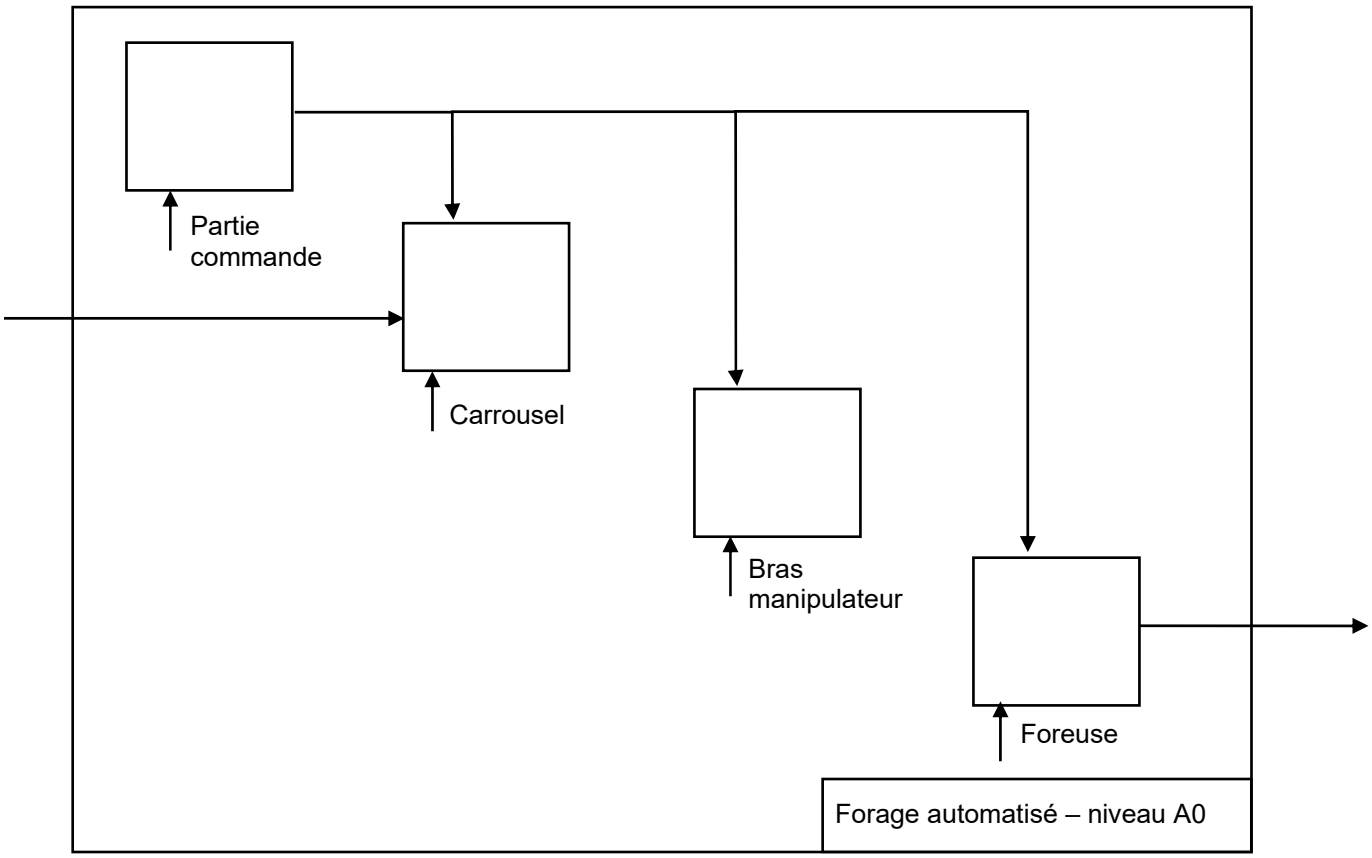
Réceptivité 3 : _____

Question 12 : Chronogramme



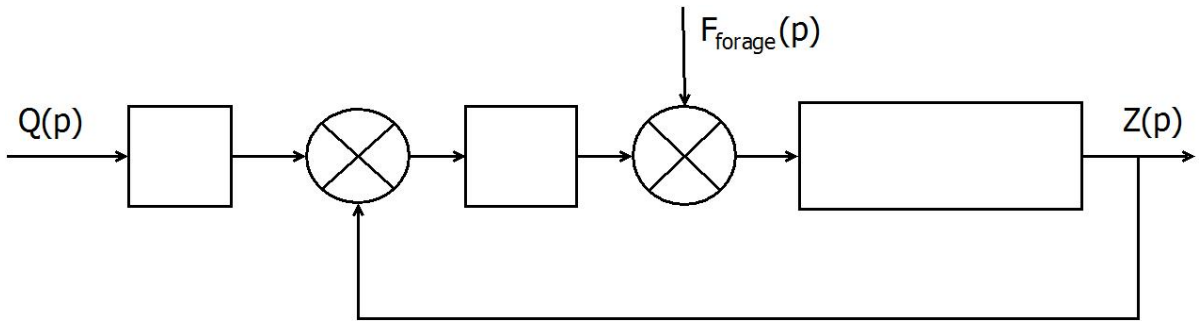
Question 13 : Temps de cycle
Question 14 : Secteurs vides

Question 15 : SADT niveau A0

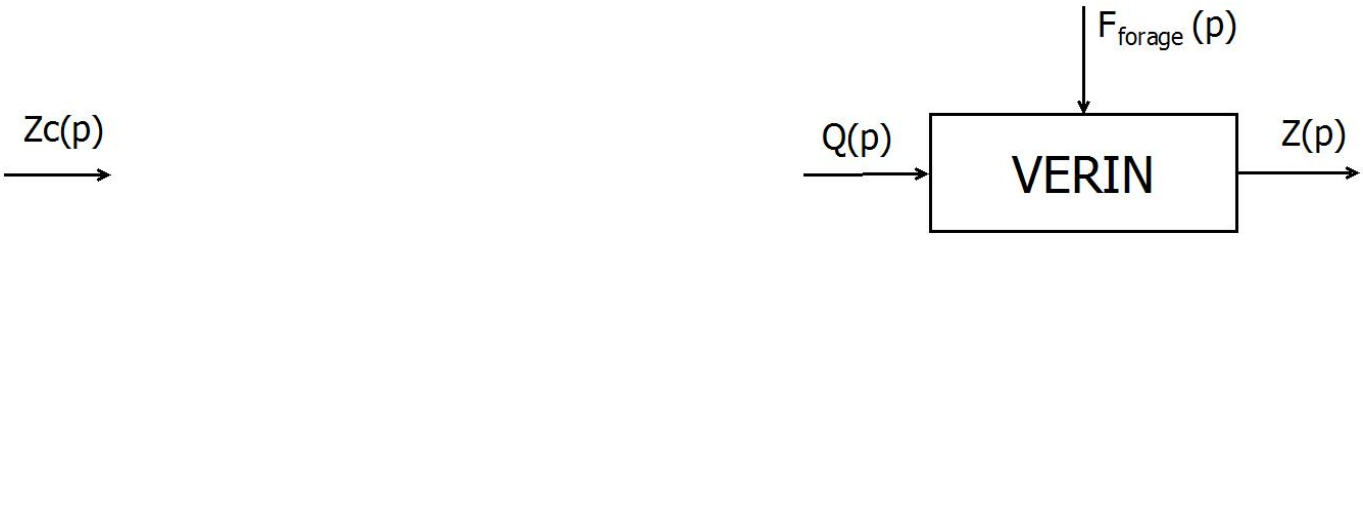


V - FT 12 POSITIONNER ET STABILISER LA PLATEFORME

Question 16 : Schéma bloc Vérin



Question 17 : Schéma bloc de l'asservissement



Question 18 : Schéma bloc à retour unitaire

Questions 19 et 20 : Respect du cahier des charges

Question 21 : Caractéristiques de résonance

Questions 22 et 23 : Correcteur

Question 24 : Respect du cahier des charges en poursuite

Questions 25 et 26 : Respect du cahier des charges en régulation