

SESSION DE 2006

**concours externe
de recrutement de professeurs agrégés**

section : génie mécanique

Composition d'automatismes industriels

Durée : 4 heures

Aucun document n'est autorisé

Moyen de calcul autorisé : Calculatrice de poche - y compris calculatrice programmable et alphanumérique - à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

Ce document comporte trois parties :

- *une présentation du sujet : 6 pages (de 1 à 6),*
- *le travail demandé (parties A et B) : 10 pages (de 7 à 16),*
- *un dossier comprenant 7 documents ressources : 7 pages*

Le candidat traitera chacune des parties (partie A et partie B) sur des copies séparées en indiquant sur chacune d'entre elles le repère de la partie traitée.

Les deux parties A et B sont indépendantes de même que la majorité des questions au sein de chacune d'entre elles. Elles peuvent donc être traitées dans un ordre quelconque, en commençant par celles qui sembleront les plus abordables par chacun des candidats, mais, bien entendu, après avoir lu la totalité du sujet.

Les candidats sont invités à formuler toutes les hypothèses qu'ils jugeront nécessaires pour répondre aux questions posées.

Si, au cours de l'épreuve, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale dans sa copie et poursuit sa composition en indiquant les raisons de son initiative.

Tournez la page S.V.P.

FABRICATION DE BOBINES D'ELECTROAIMANTS POUR MODULES DE BOITE DE VITESSES A COMMANDE SEQUENTIELLE

CONTEXTE DE L'ETUDE

Parmi les nombreuses innovations issues de la recherche dans l'industrie automobile pour améliorer les performances des motorisations et le confort des utilisateurs, la commande assistée des boîtes de vitesses semble prometteuse. En effet, nombre de constructeurs parient, à long terme, sur une répartition inversée entre boîtes à commande mécanique et boîtes à commande assistée (20 % du marché en 2010). Cette nouvelle technologie permet à une transmission manuelle de se comporter comme une transmission automatique, tout en offrant une économie de carburant accrue par rapport aux boîtes de transmission automatique traditionnelles (15 %) et les conditions d'une conduite plus confortable.

LA BOITE AUTOMATIQUE A COMMANDE SEQUENTIELLE A DOUBLE EMBAYAGE (DualTronic de BORGWARNER)

Il s'agit d'une boîte à 6 rapports en deux séries de types impairs et pairs avec un double embrayage (embrayage 1 : rapports impairs 1, 3, 5 et AR ; embrayage 2 : rapports pairs 2, 4 et 6).

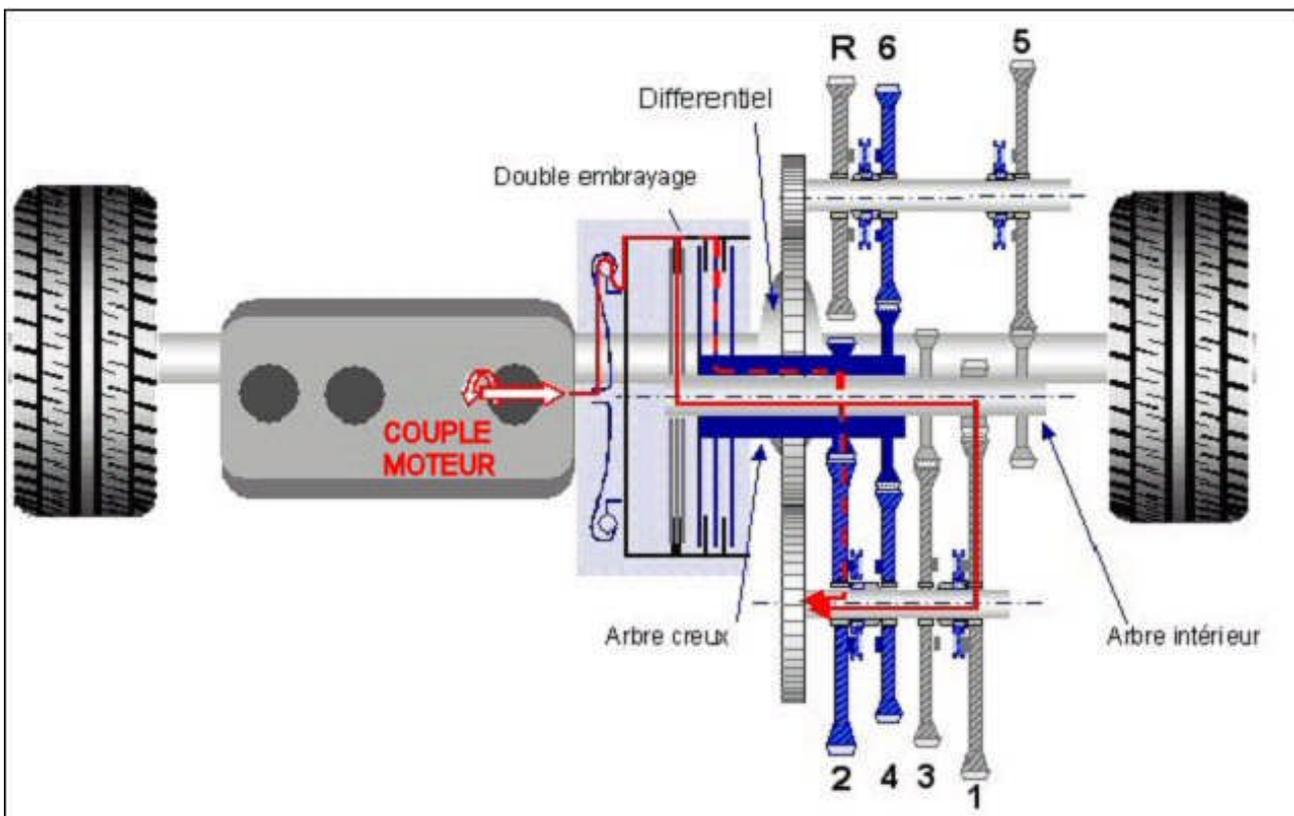


Figure 1 : Schéma simplifié d'une boîte 6 vitesses avec double embrayage

La présence du double embrayage permet de pré-positionner le rapport suivant apportant souplesse et progressivité lors des changements.

Cette boîte est pilotée à partir d'un module de commande électro-hydraulique avec une commande informatisée. Les algorithmes proposés permettent la prise en compte des divers modes de conduite, propres à chaque pays par exemple.

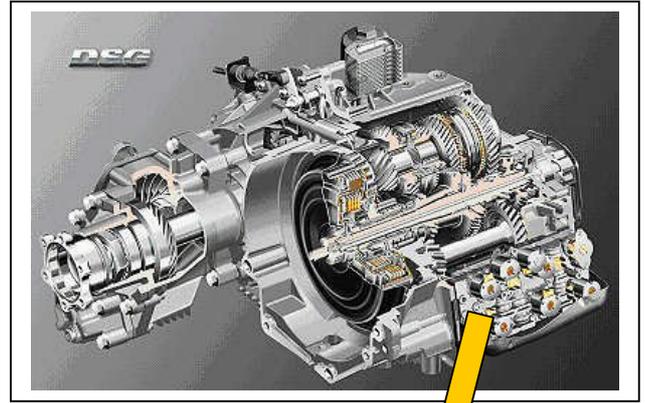


Figure 2 : Cliché d'une boîte de vitesses à commande séquentielle

LE MODULE DE COMMANDE ELECTRO-HYDRAULIQUE

Il est constitué principalement par :

- Un bloc renfermant les embrayages et le circuit hydraulique assurant les diverses commandes de passage des rapports. Ce circuit est obtenu en creux dans des flasques moulées et assemblées par vis (figure 4).
- Un ensemble électronique à logique programmée construit autour de circuits spécialisés dans un bloc moulé.
- Une nappe permettant l'établissement des diverses connexions.
- Des électroaimants permettant l'activation de clapets ou vannes (selon la fonction à assurer) pour réaliser la sélection des circuits et les actions adéquates.

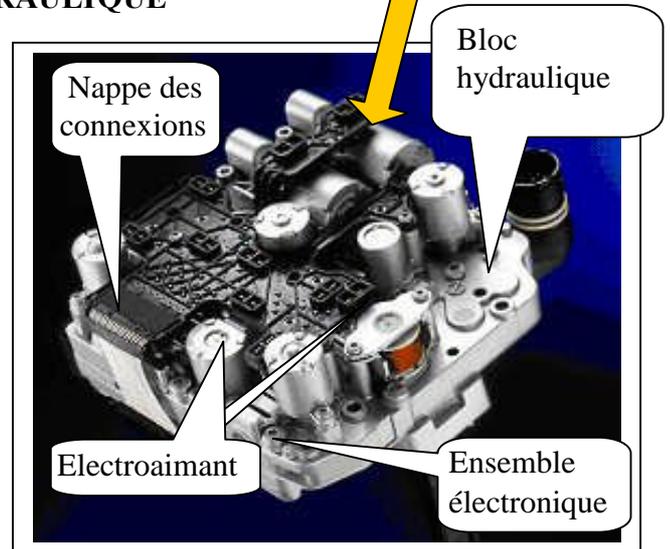


Figure 3 : Module de commande électro-hydraulique (vue générale)

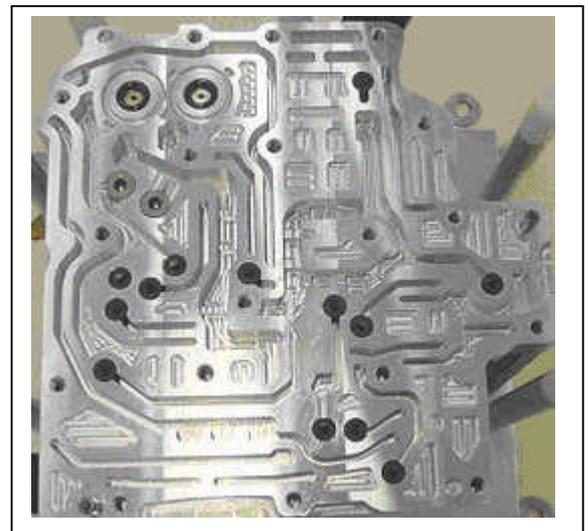
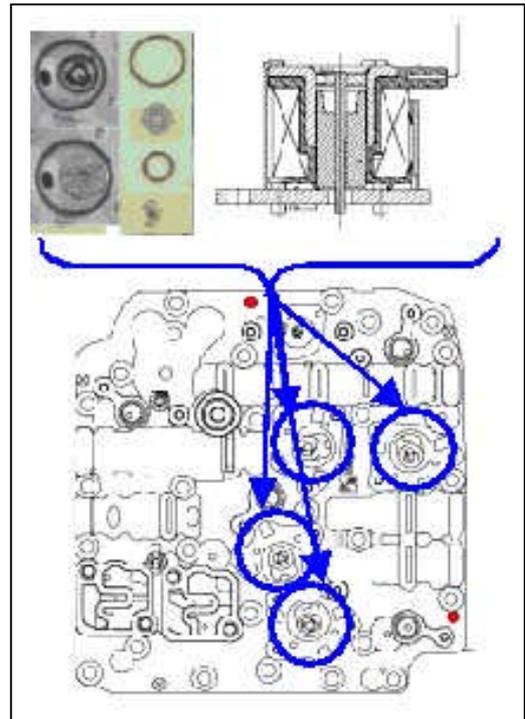


Figure 4 : Demi-flasque (vue des circuits hydrauliques).

Ces électroaimants sont au nombre de 11 par module, répartis en quatre types principaux.

Type	Nombre	Fonction
A	4	Commande des rapports impairs
B	4	Commande des rapports pairs
C	2	Commande des embrayages
D	1	Commande marche arrêt

Figure 5 : Mise en place (partielle) de clapets et solénoïdes sur le flasque externe.



ORGANISATION DE LA PRODUCTION DE MODULES (*document 1*)

Les résultats des premières expérimentations sur des modèles sportifs et hauts de gamme (Volkswagen Golf R32, Audi TT3.2), permettent d'envisager un développement significatif de ces équipements pour des véhicules plus courants et pour des conduites plus dociles.

L'accroissement de la prévision des ventes conduit à estimer une production annuelle de 500 000 boîtes, dans un premier temps, et à proposer une nouvelle organisation de la fabrication et de l'assemblage des produits.

Le document 1 montre la nouvelle organisation topo-fonctionnelle de la ligne de production d'un module. Celle-ci se caractérise principalement par :

- le passage en équipes de 3 fois 8 heures,
- l'utilisation de 3 bobineuses (une pour les bobines de type A, une pour les bobines de type B, une pour les bobines de type C et D),
- l'introduction d'un poste de contrôle du diamètre par ensemble optique,
- l'introduction de nouveaux postes de contrôle sur la machine d'insertion des cosses (des emplacements restent inoccupés dans l'attente d'un ajout éventuel de postes supplémentaires).

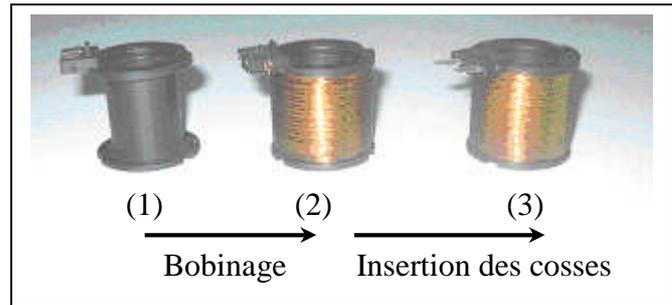
FABRICATION DES BOBINES (*documents 2 et 3*)

Les bobines des électroaimants sont des éléments essentiels qui réclament une grande qualité de fabrication avec une grande variété de réalisation des bobinages (pour tenir compte des divers types et façons de conduire).

De nombreux contrôles sont envisagés à divers stades ainsi qu'un ultime contrôle visuel par l'opérateur avant la mise en plateau.

Les bobines sont élaborées en deux phases :

- une première sur bobineuse qui réalise le solénoïde (2) sur la carcasse (1),
- une seconde sur machine-transfert qui consiste à insérer des embouts de connexion (3).



Le document 2 montre le schéma général de la ligne de fabrication :

Figure 6 : Phases principales de réalisation des bobines

- **Le poste de chargement et déchargement** : C'est un poste manuel où un opérateur met en place les carcasses, conditionnées par lot de six, sur la navette N1 et récupère en temps masqué, sur le convoyeur, les bobines réalisées avant de les inspecter visuellement et de les disposer sur un plateau.

- **La bobineuse** : C'est une tête multibroches (figure 7) mise en rotation par un moteur unique ; elle peut réaliser simultanément de 4 à 12 bobinages sur les carcasses emmanchées sur des outillages dont la queue (figure 8) est maintenue par des pinces. Le bureau d'études a retenu le principe d'un bobinage par lot de six bobines.

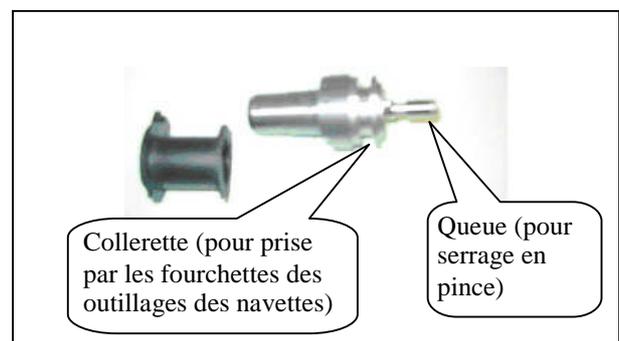
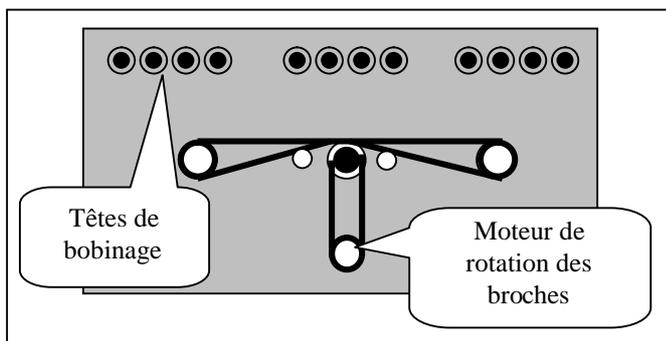


Figure 7 : Schéma simplifié de la tête de bobinage

Figure 8 : Carcasse et outillage

- **Une navette 1 (N1)** :

C'est un chariot se déplaçant en translation. Il supporte un mécanisme adapté (fourchettes) permettant les transferts et les transports d'outillages. Ce mécanisme est constitué d'autant de paires de fourchettes que de carcasses à bobiner.

La figure 9 montre un aperçu des paires de fourchettes du mécanisme d'échange des outillages (4 montrées ici pour quatre bobines). La partie motrice est située sur la partie inférieure (non visible sur le cliché).

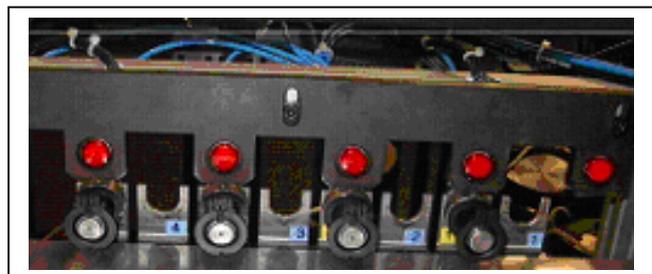


Figure 9 : Aperçu des paires de fourchettes au poste de chargement manuel (partie supérieure du chariot)

Présentation générale

Cette navette assure les transferts des outillages entre la bobineuse, le poste manuel et la navette N2.

Les opérations réalisées sont les suivantes :

- mise en place de 6 carcasses par l'opérateur à la station de chargement manuel dans les outillages vides,
- transfert vers la bobineuse après autorisation,
- si le cycle de la bobineuse est terminé, alors montée simultanée des 6 fourchettes dans les collerettes des outillages supportant les carcasses bobinées,
 - desserrage des pinces de la bobineuse,
 - dégagement des outillages,
 - déplacement de la navette d'une quantité correspondant à un entraxe de fourchettes,
- engagement des outillages chargés des carcasses vides dans les broches de bobinage puis serrage,
- dégagement des fourchettes.

En fin de mouvement de descente, la bobineuse peut démarrer un nouveau cycle et la navette N1 partir pour un échange d'outillages avec la navette N2. L'échange effectué, la navette N1 retourne au poste de chargement manuel.

- **Une navette 2 (N2)** : Cette navette, construite sur le même modèle que la navette N1, assure les échanges d'outillages avec la navette N1 et la machine T1. Les principales opérations sont les suivantes :

- récupération de 6 outillages avec carcasses bobinées sur la navette N1 et chargement de 6 outillages vides,
- transfert vers la machine T1 en rapide, puis en lent (AVP) pour assurer un arrêt précis en face du poste 1,
- récupération de l'outillage vide :
 - montée d'une fourchette pour s'engager dans la collerette de l'outillage, dès la rotation du plateau de T1 terminée,
 - desserrage de la pince, recul de la fourchette pour dégager l'outillage, puis descente de la fourchette,
- approvisionnement de la machine T1:
 - déplacement de la navette correspondant à l'entraxe entre une paire de fourchettes,
 - engagement de l'outillage chargé (montée, avance fourchette),
 - serrage de la pince puis descente de la fourchette vide,
- déplacement de la navette d'un pas AVP (qui peut être réalisé en temps masqué par rapport à la rotation du plateau T1) pour un nouvel approvisionnement de la machine T1 et ainsi de suite jusqu'à ce que les 6 outillages soient échangés,
- retour rapide au poste d'échange avec la navette N1 pour un nouveau cycle.

- **La machine de contrôle du diamètre du bobinage (T1)** : C'est un transfert rotatif à 4 positions qui réalise le contrôle optique du diamètre maximal du bobinage.

Cette machine reçoit, au poste 1, une bobine montée sur un outillage. Celui-ci est pris par une pince à serrage élastique (desserrage par vérin pneumatique) après que la navette N2 ait

Présentation générale

recupéré l'outillage vide. Le contrôle est réalisé au poste 2. Au poste 4, le robot R1 vient enlever le bobinage contrôlé.

- **Un robot de chargement des carcasses bobinées (R1)** : Il permet l'extraction de la bobine de la machine de contrôle (T1) et son transfert sur la machine d'insertion des cosses, lorsque le contrôle du diamètre en amont est satisfaisant ou son évacuation vers les rebuts (via une goulotte G11) dans le cas contraire.

- **Une machine d'insertion des cosses (T2)** : C'est un transfert rotatif T2 à 12 positions qui réalise la mise en place des connexions (prises vampires), le cintrage, la découpe des surplus de fils et des picots nécessaires au bobinage, le marquage et enfin 3 contrôles (hauteur des cosses, cintrage des cosses et résistance du bobinage).

- **Un robot de déchargement des bobines avec cosses (R2)** : Il permet le déchargement de la machine (T2) et la dépose sur un convoyeur à alvéoles si les contrôles précédents sont satisfaisants ou l'évacuation vers des rebuts en vue de reprises ultérieures (via les goulottes G21, G22, G23) dans le cas contraire. Le convoyeur permet de ramener les bobines vers la station manuelle.

<p>Partie A : SEQUENTIEL : SPECIFICATIONS GENERALES ET DETAILLEES</p>
--

Introduction : Les études sont limitées à la ligne de fabrication des bobines de type C et D (documents 2 et 3).

A1 : EVALUATION DES CADENCES DE FONCTIONNEMENT

Compte tenu des quantités respectives à produire, il est envisagé de travailler par campagne de 4 jours pour les bobines de type C, puis une campagne de deux jours pour les bobines de type D et ainsi de suite.

Données :

Prévision de ventes annuelles de modules	500 000
Nombre de jours travaillés par opérateur et par an (5 jours par semaine).	216,5
Temps d'ouverture par équipe (en heures)	6,80
Travail en 3 équipes	
TRS (taux de rendement synthétique)	0,8
Temps nécessaire au changement de campagne (en heures)	0,6

NB : le TRS (taux de rendement synthétique) est un indicateur de performance reflétant les trois composantes que sont : la disponibilité du moyen de production, sa performance et la qualité des produits. Il correspond à un rendement effectif de 80 % du rendement maximal théorique.

Question A1.1 :

Déterminer le temps moyen nécessaire pour produire une pièce pour satisfaire à l'exigence de production de la ligne de fabrication des bobines C et D.

L'organisation topo-fonctionnelle permet d'envisager une organisation en trois unités (document 3) :

- la cellule de contrôle formée par la navette N2 et la machine T1 à transfert rotatif (4 positions) de contrôle du diamètre maximal du bobinage,
- le robot R1, ressource partagée avec l'autre cellule,
- la cellule d'insertion des cosses formée de la machine T2 à plateau rotatif à 12 positions, du robot R2 et du convoyeur.

A2 : GESTION DU FONCTIONNEMENT DE LA CELLULE DE CONTROLE

Question A2.1 :

Compte tenu des tâches proposées document 4, élaborer le grafcet de coordination des tâches en respectant une contrainte de temps de cycle minimum.

NB : La répétition du mouvement d'avance d'un pas (6 fois) conduit à demander l'utilisation d'un compteur C.

Question A2.2 :

Evaluer, en fonction des durées précisées dans le document 5, la période nécessaire entre deux mouvements de la navette 2. Ce temps est-il compatible avec celui calculé en A1.1 ?

A3 : GESTION DU FONCTIONNEMENT DE LA CELLULE D'INSERTION DES COSSES

Cette cellule est constituée :

- d'un robot R1 (ressource partagée avec la machine de contrôle du diamètre),
- d'une machine T2 d'insertion des cosses, construite autour d'un plateau rotatif à 12 positions (document 3), mu par un moteur, et une cinématique permettant une rotation d'1/12 de tour pour passer d'un poste au suivant,
- d'un robot R2 de déchargement des bobines,
- d'un convoyeur à alvéoles.

Gestion des informations élaborées à partir des contrôles non conformes

Le tableau ci-dessous rappelle l'organisation des postes autour du plateau T2

Poste 1	Chargement d'une bobine par le robot 1 (si le diamètre contrôlé est conforme)
Poste 2	Insertion successive des deux cosses (connexions de type "vampire")
Poste 3	Contrôle de la bonne insertion des cosses (contrôle de hauteur)
Poste 4	Découpe des picots et extrémités des fils
Poste 5	Cambrage des cosses
Poste 6	Contrôle par vision du bon cambrage des cosses
Poste 7	
Poste 8	Contrôle de la résistance de l'enroulement
Poste 9	Marquage
Poste 10	
Poste 11	Evacuation de la bobine par le robot 2
Poste 12	

Toutes les positions ne sont pas utilisées du fait de l'encombrement des postes et des possibilités d'ajouter des postes supplémentaires.

Travail demandé

Une première spécification du fonctionnement de cette machine est donnée sous la forme d'un grafcet représenté partiellement (document 6). Cette spécification montre que l'ensemble des tâches (rappelées ci-dessus) s'effectue de manière classique en parallèle, hormis évidemment la rotation du plateau.

La pièce, ayant subi toutes les opérations et les contrôles ayant donné des résultats conformes, est évacuée vers le convoyeur à alvéoles par le robot 2 suite à l'activation d'une variable :

"dep_conv": dépose sur convoyeur autorisée.

En cas de contrôle négatif (pièce non conforme) à l'un des postes de contrôle, les opérations suivantes ne sont pas réalisées. L'interdiction d'effectuer les opérations est obtenue par la structure du type saut d'étapes (grafcet document 6) à partir des variables :

"IntP4" : Interdire les opérations au poste 4,

.....

"IntP9": Interdire les opérations au poste 9.

Les pièces défectueuses sont évacuées en fonction du défaut détecté, par le robot R2 vers des goulottes G21, G22, G23 selon différents cycles autorisés par l'activation des variables :

"dep_G21" : autoriser dépose de la pièce dans la goulotte G21 (résultat du contrôle des hauteurs de cosses négatif) ;

"dep_G22" : autoriser dépose de la pièce dans la goulotte G22 (résultat du contrôle du cambrage des cosses négatif) ;

"dep_G23" : autoriser dépose de la pièce dans la goulotte G23 (résultat du contrôle de la résistance négatif).

Remarque : La dépose d'une bobine par le robot 1 est nécessaire à l'évolution du cycle de la machine T2. En cas de contrôle négatif en amont (diamètre du bobinage non conforme), il conviendra d'attendre l'arrivée d'une nouvelle bobine conforme pour un chargement sur le plateau T2 puis la poursuite du cycle.

Question A3.1 (documents 6 et 7) :

Proposer, à l'aide des outils graphiques, un modèle d'élaboration des variables :

*IntP4 à IntP9 et les variables complémentées ;
dep_conv, dep_G21.*

On se limitera à la prise en compte d'un défaut constaté au poste 3.

NB : Le candidat pourra utiliser des variables non recensées sur le document 7.

Partie B : ASSERVISSEMENT DE LA NAVETTE

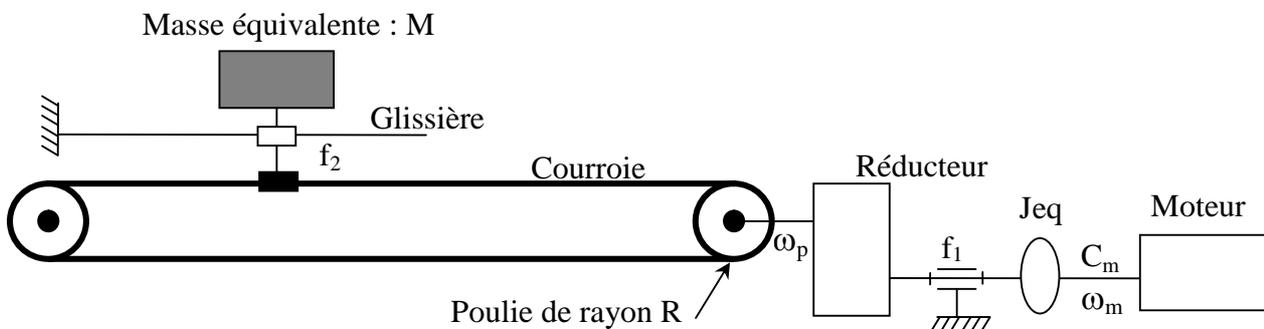
Le mouvement de la navette N1 est assuré par un variateur et un moteur synchrone à aimants permanents. Les exigences de productivité imposent des dynamiques élevées au mouvement de cette navette. L'automatisation de l'opération de bobinage impose également une grande précision dans le positionnement.

Cette partie traitera le problème de positionnement de la navette en deux étapes :

- La première étape sert à déterminer, à partir des lois physiques, un modèle de connaissance représentant le système mécanique. Ce modèle doit être aussi proche que possible du système réel. Cependant, il y aura toujours des écarts, car certains paramètres peuvent changer au cours du temps, d'autres dépendront des contraintes de la production. Par exemple, la masse de la navette dépend du nombre de bobines traitées qui peut varier entre 4 et 12.
- La deuxième étape sert à élaborer un système de commande en appliquant une méthode de placement de pôles robustes. Le développement d'une commande robuste permettra de garder des performances convenables pour l'asservissement, même en cas de perturbations ou de variation du modèle réel.

B1 : Détermination d'un modèle du système mécanique

La figure suivante représente le schéma du système de positionnement de la navette.



Asservissement de la navette

- M : Masse équivalente de la navette ;
- f_1 : frottement visqueux équivalent des éléments en rotation ;
- f_2 : frottement visqueux de la glissière ;
- V : vitesse de la navette ;
- X : position de la navette ;
- C_m : couple moteur ;
- C_p : couple poulie ;
- ω_m : vitesse de rotation du moteur ;
- ω_p : vitesse de rotation de la poulie ;
- K_r : rapport de réduction du réducteur
$$K_r = \frac{\omega_p}{\omega_m} ;$$

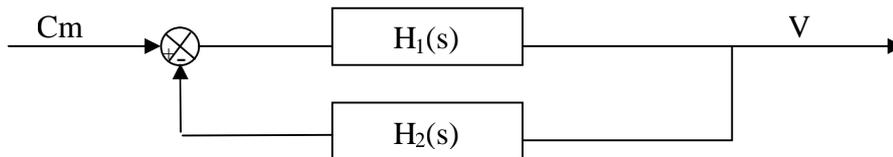
Travail demandé

- J_{eq} : moment d'inertie équivalent ramené à l'arbre moteur de l'ensemble {courroie, poulie, réducteur, arbre moteur} ;
- R : rayon de la poulie.

La courroie est considérée comme non élastique (pas d'allongement).

Question B1.1 :

Écrire les équations de la mécanique pour l'ensemble correspondant à J_{eq} et pour la masse M . Montrer que le système peut être représenté par le schéma bloc suivant :



Avec :

$$H_1(s) = \frac{K_r \cdot R}{J_{eq} \cdot s + f_1} \quad \text{et} \quad H_2(s) = K_r \cdot R (M \cdot s + f_2)$$

« s » est l'opérateur de Laplace.

Question B1.2 :

Donner l'expression de la fonction de transfert $H(s)$, avec $H(s) = \frac{V(s)}{C_m(s)}$

Mettre $H(s)$ sous la forme canonique du premier ordre et donner les expressions du gain statique A et de la constante de temps τ en fonction des différents paramètres physiques.

Application numérique :

- $J_{eq} = 0,0085 \text{ kg m}^2$
- $M = 8 \text{ kg}$
- $f_1 = 0,007 \text{ N.m/rad/s}$
- $f_2 = 110 \text{ N/m/s}$
- $K_r = 0,07$
- $R = 10 \text{ cm}$

B2 : Détermination de la boucle d'asservissement de vitesse

Le moteur synchrone est piloté par un variateur de vitesse qui élabore la consigne de couple $C_{m_réf}$. Le moteur, à l'aide de sa commande, fournit alors un couple effectif C_m . Cet ensemble peut être représenté par la fonction de transfert suivante :

$$H_m(s) = \frac{C_m(s)}{C_{m_réf}(s)} = \frac{1}{1 + \tau_m \cdot s} \quad \text{avec } \tau_m = 0,005 \text{ s}$$

Question B2.1 :

*Comparer les deux fonctions de transfert $H(s)$ et $H_m(s)$.
Donner l'expression des réponses à un échelon unité pour chacune d'elles.
Tracer l'allure de leurs réponses fréquentielles dans le diagramme de Bode.
Donner l'allure de la réponse temporelle $V(t)$ à un échelon d'amplitude C_{m_ref} .
Justifier que dans cette étude, il est possible de remplacer $H_m(s)$ par 1.*

$H_m(s)$ sera considérée égale à 1 dans la suite du sujet.

La boucle de vitesse est assurée par un variateur de vitesse qui élabore la consigne de couple C_{m_ref} à l'aide d'un correcteur proportionnel.

$$C_{m_ref} = K_p (V_{ref} - V)$$

V_{ref} est la consigne de vitesse (vitesse souhaitée).

V est la mesure de vitesse élaborée à l'aide d'un capteur placé sur l'arbre du moteur.

Question B2.2 :

*Donner le schéma bloc de la boucle d'asservissement de la vitesse.
Quelle est l'expression de la fonction de transfert $H_v(s) = V(s)/V_{ref}(s)$?
Mettre $H_v(s)$ sous sa forme canonique d'un premier ordre et donner l'expression du gain A_v et de la constante de temps τ_v en fonction de A , K_p et τ .
Déterminer la valeur de K_p , qui permet d'avoir une dynamique de la boucle fermée de vitesse ($H_v(s)$) quatre fois plus rapide que celle de la boucle ouverte.*

B3 : Détermination de la boucle d'asservissement de position

Capteur de position :

La mesure de position est réalisée par un codeur incrémental disposé sur l'axe du moteur. Ce codeur a une résolution de 200 périodes par tour.

Question B3.1 :

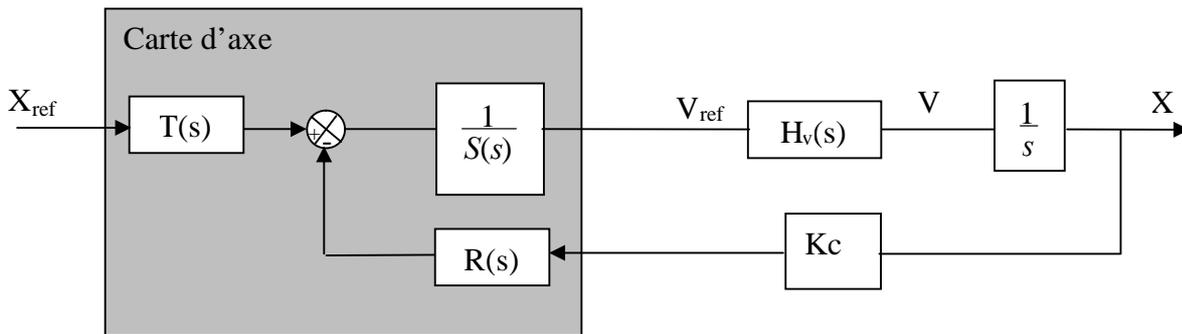
*Rappeler le principe du codeur incrémental.
Pour cette application, quelle est la résolution maximale (en tops par tour codeur) que l'on peut obtenir après le traitement des signaux de ce codeur incrémental ?
En déduire K_c , le nombre d'impulsions par mètre (pour la résolution maximale).*

Afin de garantir une constance des performances (robustesse), dans le cas où le nombre de bobines et des outillages transportés varie, une loi de commande par placement de pôles est utilisée. Les caractéristiques principales de la méthode employée sont données ci-après.

Dans cette partie, on suppose que la fréquence d'échantillonnage de la carte d'axe est suffisamment grande pour que le système soit considéré comme un système continu.

Description de la méthode de placement de pôles :

La boucle d'asservissement de position est assurée par une carte d'axe (en grisé). Le schéma bloc de l'asservissement est le suivant :



$H_v(s)$ est la fonction de transfert du premier ordre établie dans la question B2.2.

La structure proposée comporte trois fonctions de transfert ($R(s)$, $S(s)$ et $T(s)$) à déterminer afin d'obtenir le comportement souhaité. $R(s)$ et $S(s)$ seront choisies de telle manière à placer les pôles de la boucle fermée. Quant à $T(s)$, elle servira à ajuster le gain de l'asservissement.

Le problème méthodologique consiste à déterminer un placement convenable des pôles de la boucle fermée, en vue de concilier au mieux les exigences de performances et de robustesse.

La méthode utilisée comporte les cinq étapes suivantes :

- **Etape 1** : détermination de deux polynômes $A(s)$ et $B(s)$ respectivement le dénominateur et le numérateur de la fonction de transfert en boucle ouverte.
- **Etape 2** : détermination des degrés des deux polynômes $R(s)$ et $S(s)$ du régulateur recherché. Ceci permet de déduire le degré du polynôme $P(s)$ dénominateur de la boucle fermée et donc le nombre de pôles à placer.
- **Etape 3** : Choix des pôles (racines de $P(s)$). Pour cela deux paramètres, T_0 et T_c , seront introduits et qui caractériseront la dynamique et la robustesse de l'asservissement.
- **Etapes 4** : Par identification, on détermine les coefficients des deux polynômes $R(s)$ et $S(s)$.
- **Etapes 5** : détermination de $T(s)$ de telle manière à avoir un gain égal à 1 pour l'asservissement.

Application de la méthode de placement de pôles :

Etape 1 : détermination de A(s) et B(s)

A(s) et B(s) sont respectivement le dénominateur et le numérateur de la fonction de transfert en boucle ouverte :

$$\frac{B(s)}{A(s)} = \frac{H_v(s).K_c}{s}$$

Question B3.2 :

*Déterminer les deux polynômes A(s) et B(s). En déduire Na et Nb, respectivement les degrés des polynômes A(s) et B(s).
Déterminer la fonction de transfert Hx(s)=X(s)/Xref(s).*

Etape 2 : détermination des degrés de R(s) et de S(s) et du nombre de pôles à placer.

Soit Nr le degré de R(s) et Ns le degré de S(s). Nr est choisi égal à Ns.

On alors : **Nr=Ns**

Soit P(s) le dénominateur de Hx(s) et Np son degré. Le placement des pôles de l'asservissement revient à fixer les racines, et donc les coefficients, du polynôme P(s).

NB : On adoptera la notation : p_i coefficient de s^i du polynôme P(s)

Donc : $P(s) = p_0 + p_1 s + p_2 s^2 + \dots + p_i s^i + \dots$

De même : $R(s) = r_0 + r_1 \cdot s + r_2 \cdot s^2 + \dots + r_i \cdot s^i + \dots$

et $S(s) = s_0 + s_1 \cdot s + s_2 \cdot s^2 + \dots + s_i \cdot s^i + \dots$

Question B3.3 :

Montrer que pour pouvoir déterminer les coefficients des polynômes R(s) et S(s) d'une manière unique, il est nécessaire que les degrés Np, Ns et Nr vérifient les relations : $Nr = Na - 1$ et $Np = 2 \cdot Na - 1$

Combien de racines du polynôme P(s) faut-il alors placer?

Etape 3 : Choix des pôles (racines de P(s))

La méthode pour le placement des pôles consiste à factoriser le polynôme P(s) en un facteur dominant F(s) et un facteur auxiliaire C(s) : $P(s) = F(s).C(s)$

On admettra que la "robustification" résulte de l'application des trois principes suivants :

- Déterminer F(s) de sorte que : $|F(j\omega)| \geq |A(j\omega)|$
- Choisir F(s) « proche » de A(s)
- Choisir C(s) « proche » de B(s)

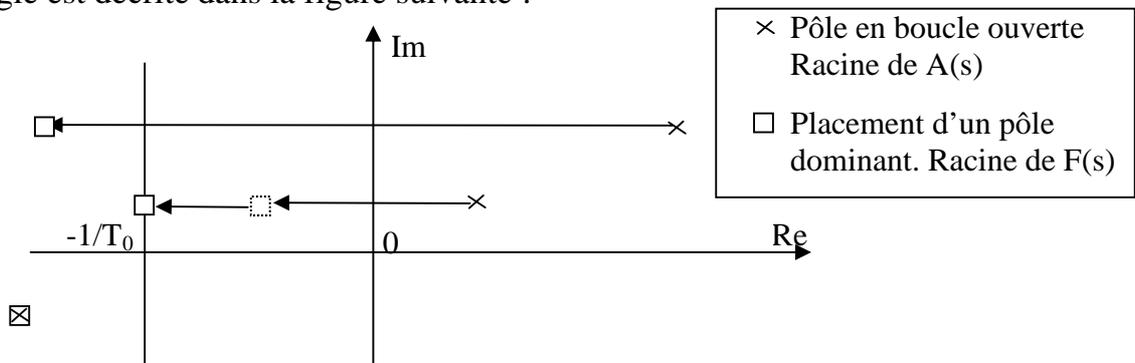
Travail demandé

Choix de $F(s)$: Pour choisir $F(s)$ « proche » de $A(s)$, on procède de la manière suivante :

- Le degré de $F(s)$ est égal à N_a .
- Les racines de $A(s)$ à parties réelles positives sont remplacées par leur opposées.
- On projette sur la verticale d'abscisse $(-1/T_0)$ les racines de $A(s)$, à parties réelles négatives, situées à droite de cette droite (voir figure ci-dessous). Le paramètre T_0 sert à régler la proximité de $F(s)$ avec $A(s)$ et caractérisera la robustesse de la commande.
- $F(s)$ est normalisé (c'est-à-dire que le coefficient du degré le plus élevé est égal à 1).

Les racines de $F(s)$ sont appelées pôles dominants. La robustesse ainsi induite aura pour prix une perte de performance en régulation.

Cette stratégie est décrite dans la figure suivante :

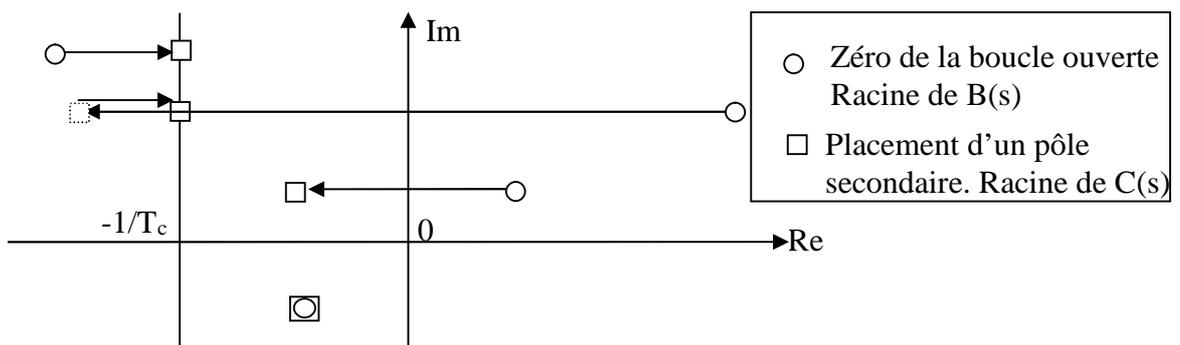


Choix de $C(s)$: Pour choisir $C(s)$ « proche » de $B(s)$, on procède de la manière suivante :

- Le degré de $C(s)$ est égal ou supérieur, si nécessaire, à N_b .
- Les racines de $C(s)$ à parties réelles positives sont remplacées par leurs opposées.
- On projette sur la verticale d'abscisse $-1/T_c$ les racines de $B(s)$ situées à gauche de cette droite (voir figure suivante). Le paramètre T_c sert à régler la proximité de $C(s)$ avec $B(s)$. Ce paramètre caractérisera la sensibilité de l'asservissement aux bruits (filtrage).
- Si le degré de $C(s)$ est inférieur au degré requis, alors on complète par autant de facteurs $(1+s T_c)$ que nécessaire.
- On impose $C(0) = B(0)$.

Les racines de $C(s)$ sont appelées pôles secondaires.

Cette stratégie est décrite dans la figure suivante :



Le placement des pôles dépend donc du choix des deux valeurs T_0 et T_c . L'expérience montre qu'il faut toujours respecter $T_c \ll T_0$, et qu'il est convenable de choisir $T_0 = \alpha T_c$ avec $\alpha = 5$. α est appelé « *facteur de restauration* ».

Avec cette méthode, le facteur T_0 se présente comme étant le seul paramètre de réglage.

Dans la suite du problème, on prendra $T_0 = \tau/4$.

Question B3.4 :

Montrer que l'application de la stratégie de détermination de $F(s)$ et de $C(s)$ assure que l'asservissement est stable et que la première condition de robustesse $|F(j\omega)| \geq |A(j\omega)|$ est vérifiée.

Question B3.5 :

En appliquant la méthode décrite ci-dessus, proposer un placement pour chacune des racines du polynôme $P(s)$.

Donner les coefficients f_i et c_i des polynômes $F(s)$ et $C(s)$.

Donner les coefficients p_i du polynôme $P(s)$.

NB : On adoptera la notation : p_i coefficient de s^i .

$$\text{Donc : } P(s) = p_0 + p_1 s + p_2 s^2 + \dots + p_i s^i + \dots$$

Question B3.6 :

Ecrire le système d'équations qui permet de déterminer les coefficients r_i et s_i des polynômes $R(s)$ et $S(s)$.

Résoudre le système.

On prendra $T(s)$ sous forme d'une constante.

Question B3.7 :

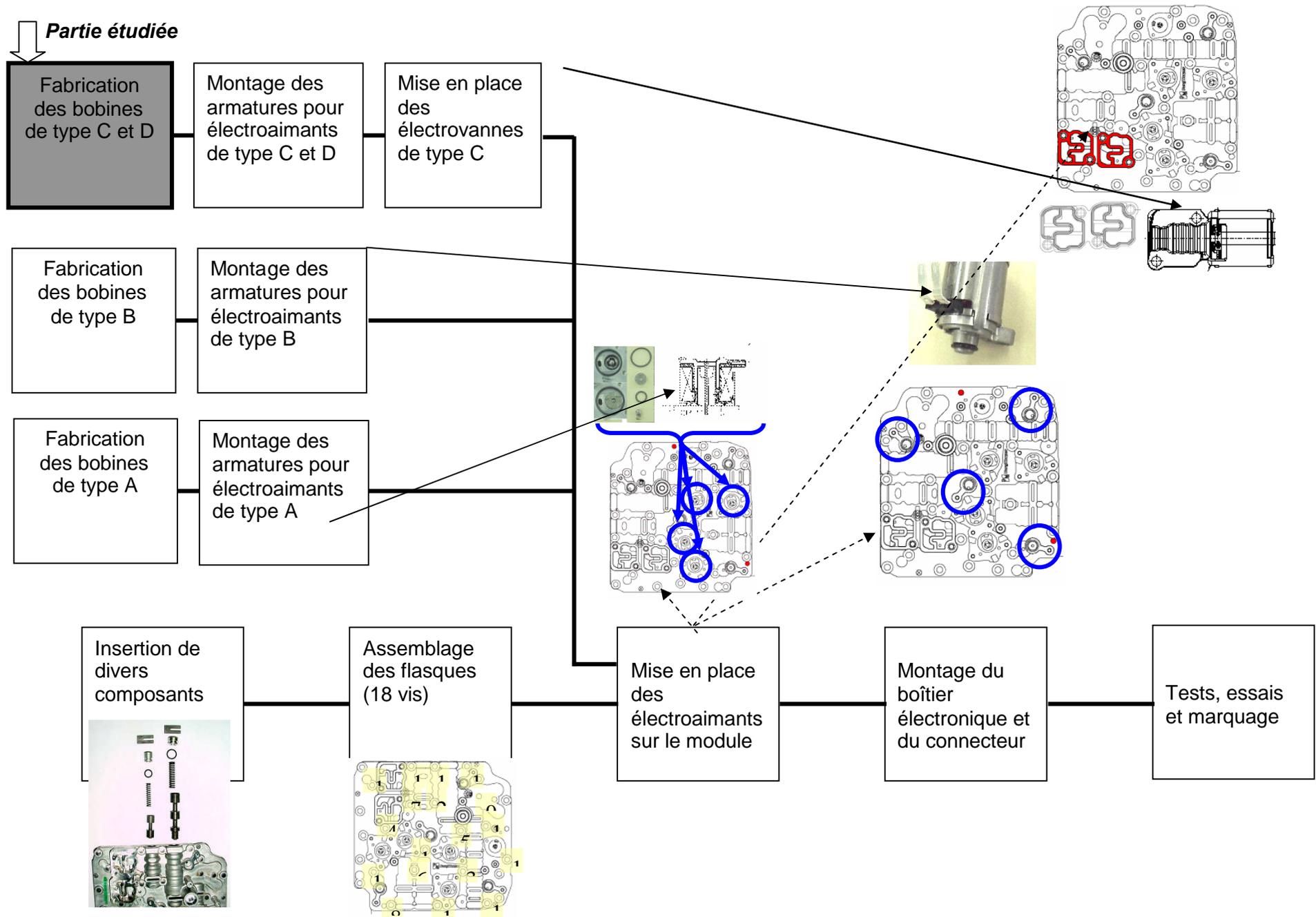
Déterminer cette constante de manière à ce que le gain statique de $\frac{X(s)}{X_{ref}(s)}$ soit égal à 1.

Question B3.8 :

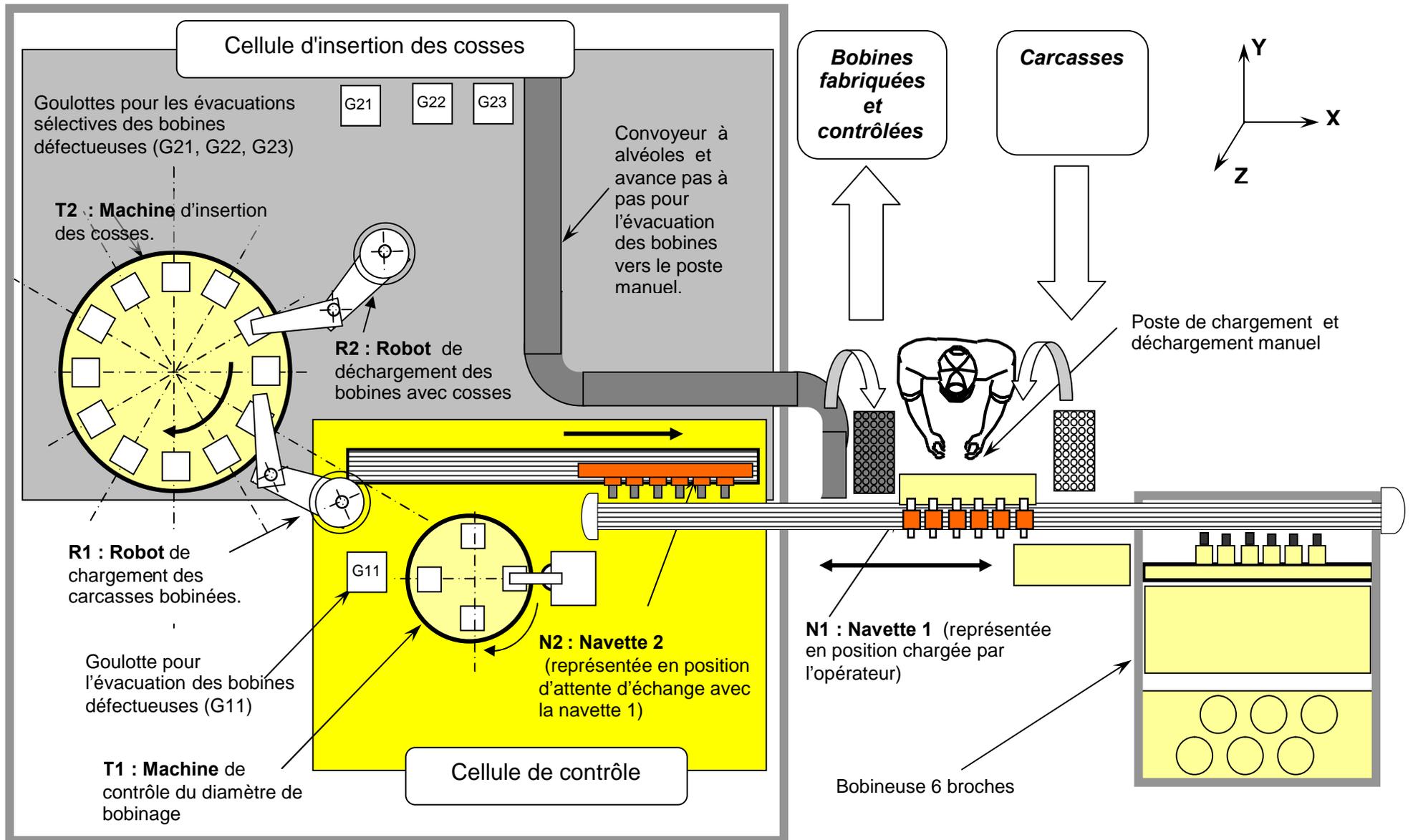
Montrer que la fonction $R(s)/S(s)$ peut être remplacée par un régulateur PD série

avec filtre dont la fonction de transfert est : $A_p \left(1 + \frac{sT_d}{1 + \tau_d s} \right)$.

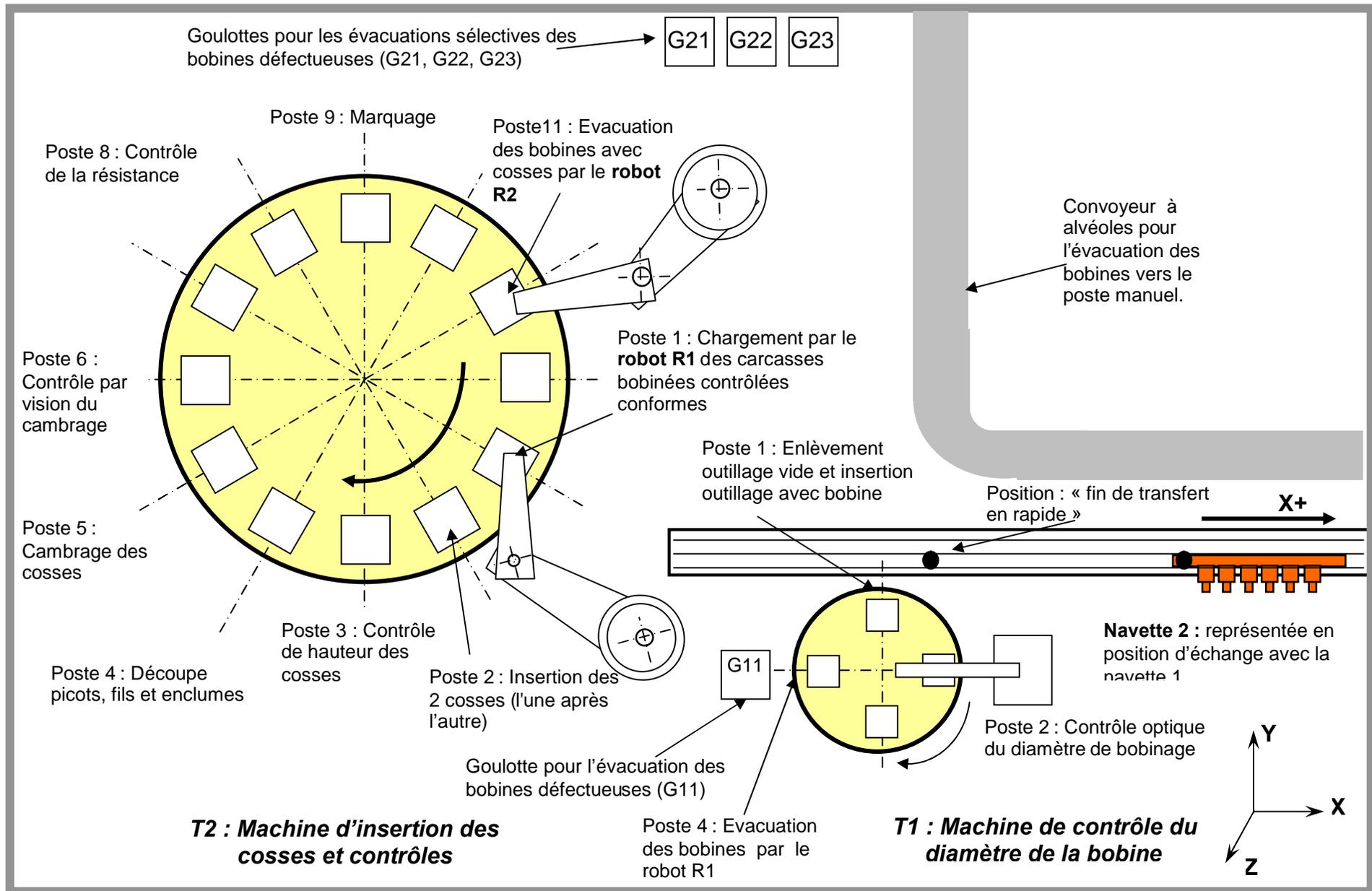
Donner les valeurs des paramètres du régulateur PD.



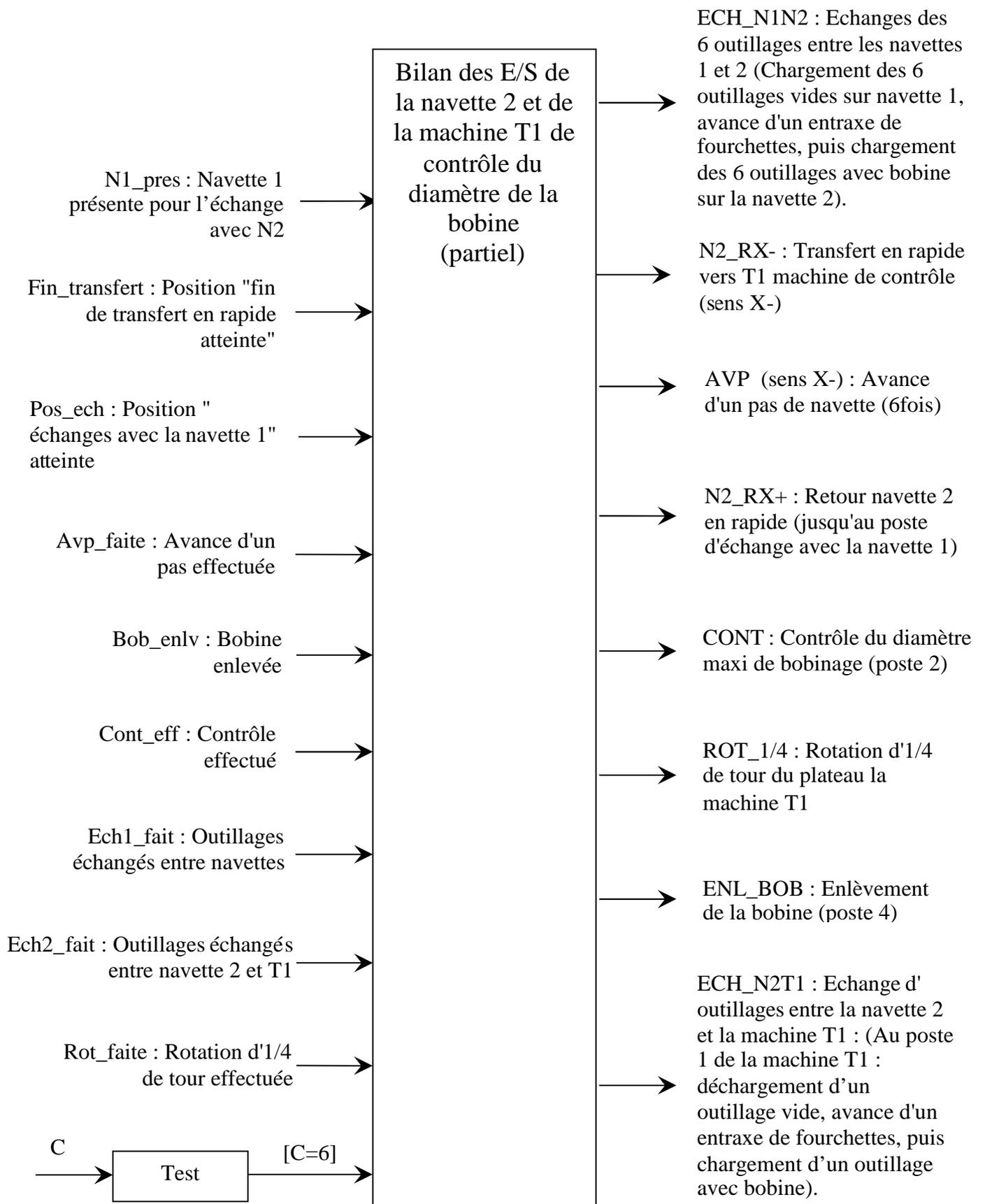
Document 1 : Organisation générale du processus d'assemblage du module de commande



Document 2 : Schéma général de la ligne de fabrication des bobines



Document 3 : Cellule de contrôle des bobines et d'insertion des cosses



Les actions précisées ici intègrent nombre d'actions composantes non détaillées pour des raisons de simplification.

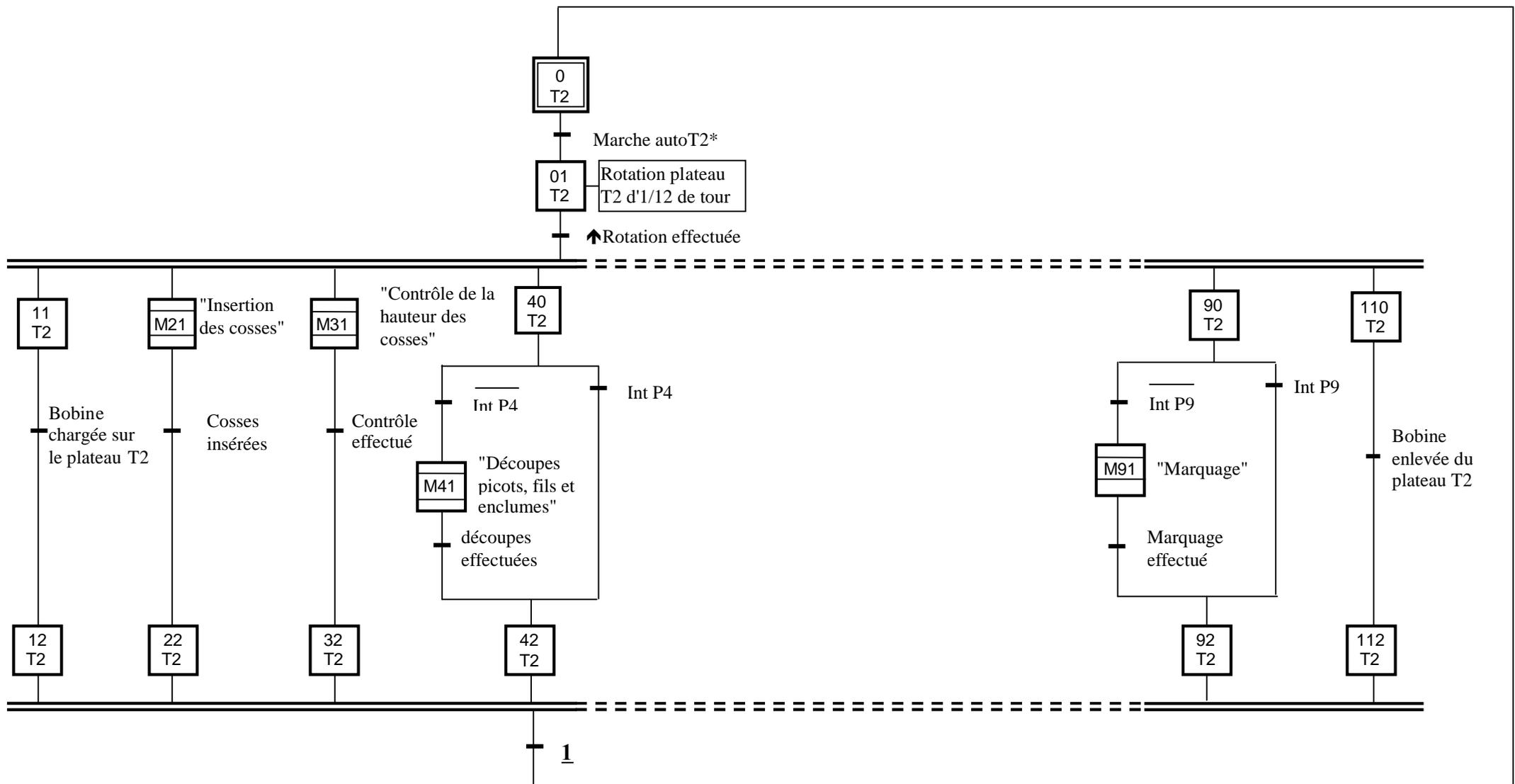
Document 4 : Bilan des E/S de la navette 2 et de la machine de contrôle du diamètre de la bobine.

Données complémentaires : durées des principales actions

Moyens	Fonctions techniques principales	Durée (s)
Bobineuse	- Réaliser un bobinage de n spires sur 6 carcasses	40
N1 : Navette 1	- Transférer les carcasses vides vers la bobineuse (sens X+);	1
	- Echanger les 6 outillages avec carcasses bobinées et les 6 outillages avec carcasses vides avec la bobineuse (déchargement machine et chargement);	5
	- Transférer les carcasses bobinées vers position d'échange avec la navette2 (sens X-);	2
	- Transférer les outillages chargés sur la navette 2* ;	2,5
	- Retourner à la station de chargement manuel (sens X+).	1
N2 : Navette 2	- Transférer les outillages vides sur la navette 1 ;	2,5
	- Transférer vers T1 : machine de contrôle optique du diamètre (sens X-), position "fin de transfert" ;	2
	- Avancer d'un pas (sens X-);	0,5
	- Prendre outillage vide au poste 1 (T1) puis déposer outillage chargé avec une bobine ;	5
	- Retourner chariot en position d'attente de la navette 1 (sens X+).	2
T1 : Machine transfert 1	- Contrôler le diamètre du bobinage ;	6
	- Desserrer la pince (et serrer), temps de réponse ;	0,5*
	- Faire tourner d'un quart de tour.	1
R1 : Robot 1	Enlever la bobine contrôlée de T1 et charger la machine d'insertion des cosses (T2) si le contrôle du diamètre est OK sinon évacuer la bobine contrôlée défectueuse	2 (autres temps non donnés)
T2 : Machine transfert 2	Mettre en place des cosses, cambrer les cosses, découper picots et embouts et effectuer divers contrôles	**
R2 : Robot 2	Evacuer les bobines contrôlées conformes sur le convoyeur Sinon les évacuer vers les caisses spécifiques du défaut.	**
Convoyeur	Transférer les bobines avec cosses et contrôlées conformes vers le poste de travail manuel.	**
Station de chargement manuel	Charger la navette 1 en carcasses vides ; Réceptionner les bobines avec cosses, les contrôler et les mettre en barquettes.	24

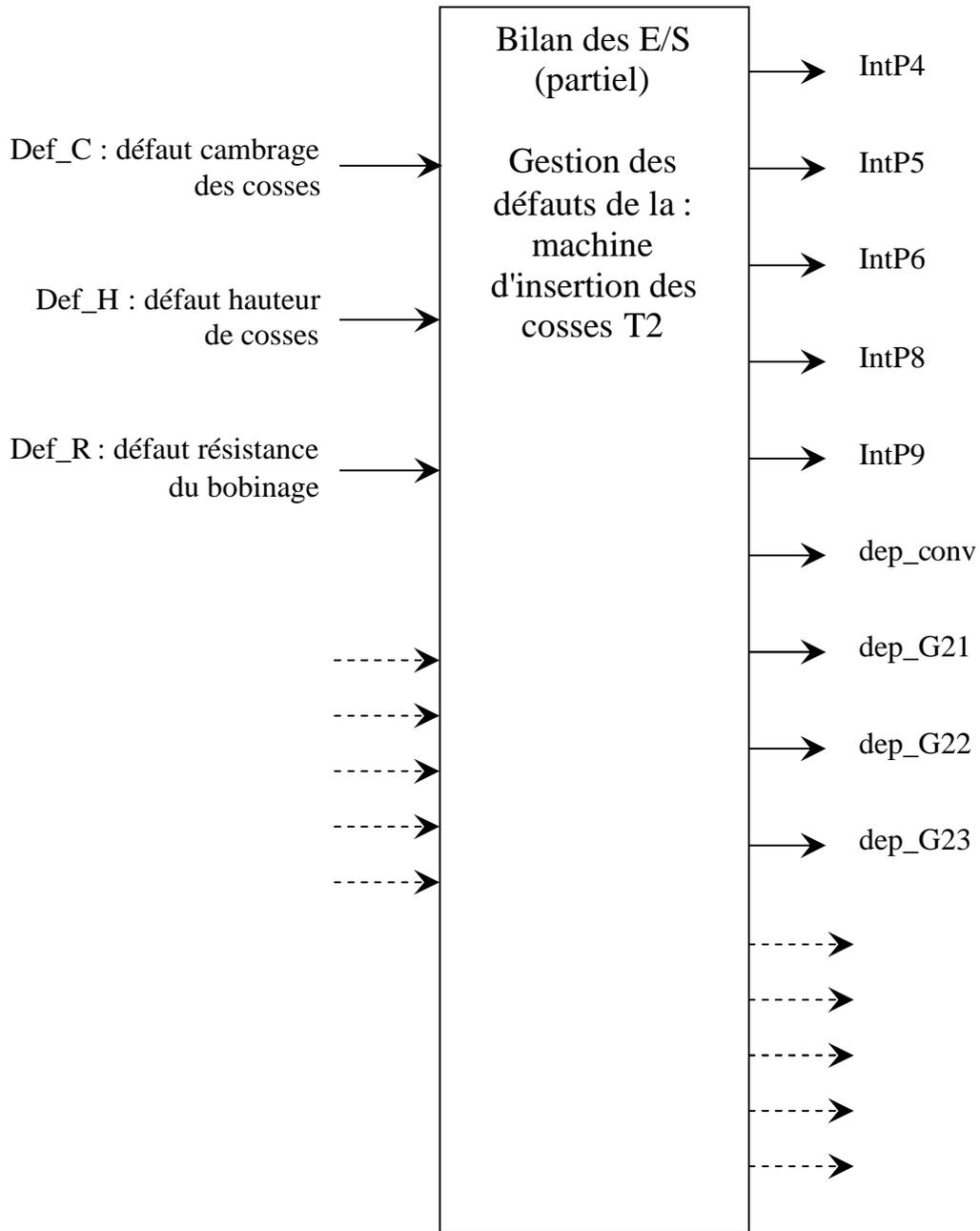
* : durée intégrée dans les 5 s «prendre outillage vide.....outillage chargé avec une bobine ainsi que l'avance d'un entraxe de fourchettes».

** : durées non spécifiées mais qui ne pénalisent pas le fonctionnement des autres équipements.



Marche autoT2 : condition générique regroupant l'ensemble des conditions et consignes de marche en automatique.

Document 6 : Coordination des tâches "machine d'insertion des cosses"



Bilan (partiel) des E/S du module de gestion des défauts