

composition d'automatismes industriels

Durée : 6 heures

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

Tout document et tout autre matériel électronique sont interdits.

En aucune façon, la calculatrice ne pourra posséder de données scientifiques et techniques propres au génie mécanique et à l'automatique.

Ce sujet comporte :

- 1 fascicule de 19 pages d'énoncé du problème comprenant 2 parties et 30 questions ;
- 4 documents-réponses dont deux avec des diagrammes de GANTT, un avec un GEMMA et un avec des quadrillages semi-logarithmiques.

Conseil préalable important pour les candidats :

Le présent sujet est volumineux, aussi le barème de correction tiendra compte du fait que toutes les questions ne pourront être traitées à l'intérieur du temps imparti que par des candidats particulièrement expérimentés.

Pour aider le candidat à montrer au mieux ses connaissances dans le domaine des automatismes industriels, les deux parties ont été rendues 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 par ailleurs 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.

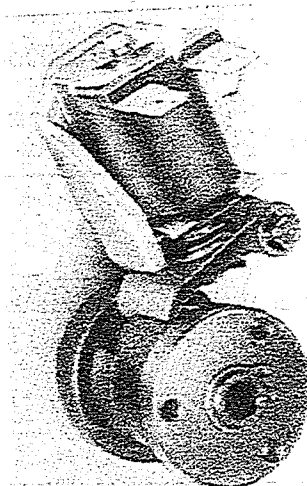
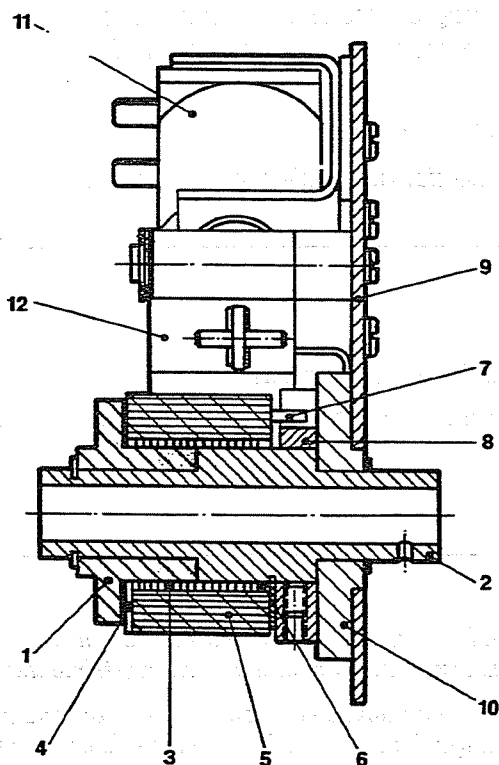
Les réponses sont à rendre sur des copies séparées pour chacune des deux parties.

Étude d'une cellule de tournage-forage robotisée.

Présentation du sujet

A Présentation du support de l'étude

Une entreprise, spécialisée dans les organes de transmission, fabrique des embrayages à ressort. Le modèle présenté à la Figure 1 est à commande électromécanique. Il comprend un arbre d'entrée 2 et un moyeu de sortie 1 libre en rotation sur l'arbre 2. Le ressort 3 comporte un ergot 4 pris dans une encoche du collier de commande 5 et un ergot 6 pris dans l'arbre 2. Le levier de commande 12 positionné par un électro-aimant 11 arrête ou libère le collier de commande 5, ce qui assure la contraction ou la rétraction du ressort 3 afin d'accoupler ou désaccoupler l'entrée de la sortie.



N°	DESIGNATION
1	Moyeu libre
2	Arbre d'entrée
3	Ressort
4	Ergot de commande
5	Collier de commande
6	Ergot de sortie
7	Goupille d'arrêt
8	Collier d'arrêt
9	Plaque de montage
10	Bague
11	Electro-aimant
12	Levier de commande
13	Butée

Figure 1 : Embrayage à ressort à commande électromécanique

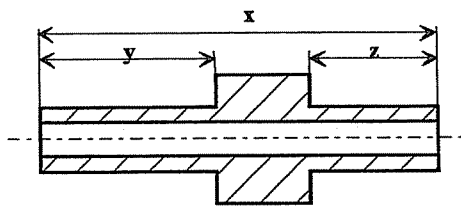


Figure 2 : Cotes de définition des variantes de moyeux

A partir d'un même diamètre de l'arbre d'entrée et du moyeu de sortie, trois couples transmissibles sont proposés, et ce, en modifiant la surface de contact ressort – moyeu. Ceci induit des variantes dimensionnelles sur l'arbre 2. Les cotes x , y , z (voir Figure 2) sont donc variables en fonction du couple souhaité. Cela constitue une famille de pièces de morphologie identique. C'est la raison qui a conduit le fabricant à opter pour une cellule flexible de production afin de répondre rapidement à la demande en lançant des petites séries.

Les deux premières phases de la fabrication de l'arbre 1 sont des phases de tournage :

Phase 10 : Tournage (TOUR1)

- usinage du diamètre extérieur et réalisation de la cote z ,
- perçage et alésage du diamètre intérieur (alésage qualité H9).

Retournement de la pièce et usinage de l'autre coté

Phase 20 : Tournage (TOUR2)

- usinage du diamètre extérieur et réalisation de la cote y .

Ces deux phases sont réalisées sur deux tours à commande numérique alimentés en pièces par un bras manipulateur robotisé, l'ensemble constituant une unité flexible de tournage (voir Figure 3).

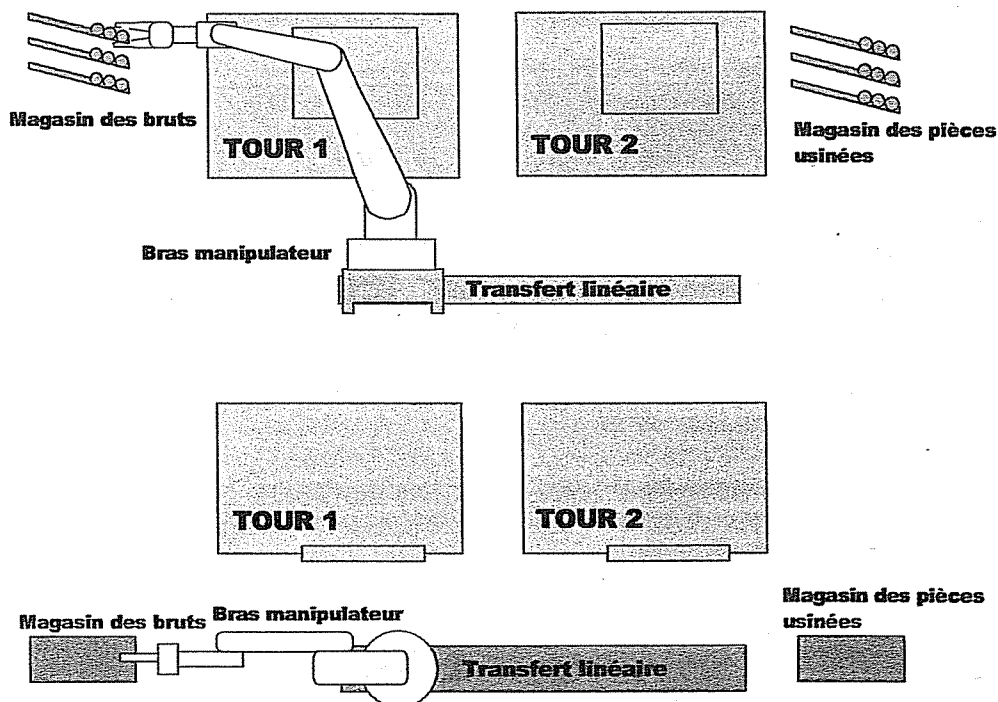


Figure 3 : Vues schématiques de l'unité flexible de tournage

L'usinage de l'alésage induit des temps de coupe importants et pénalise la productivité. De plus, la grande longueur de perçage par rapport au diamètre (jusqu'à 10 fois le diamètre) induit des cycles de déburrage. Ceci a incité le fabricant à envisager de remplacer le perçage traditionnel par une opération de forage vibratoire.

La première partie de cette épreuve est consacrée à l'étude de l'optimisation des séquences de travail de l'unité flexible.

La deuxième partie de l'épreuve est consacrée à l'étude du comportement vibratoire du système de perçage et de l'asservissement des vibrations.

I Première partie

Étude de la commande et de l'optimisation de la production de la cellule flexible de tournage

I.1 Présentation de l'étude

La cellule flexible de tournage doit usiner trois types d'arbres qui seront identifiés dans la suite du sujet par les noms "pièce A", "pièce B", "pièce C".

La cellule flexible de tournage comprend (voir Figure 4 ci-après) :

- un magasin d'alimentation en pièces brutes MB, composé de 3 goulottes superposées MBa, MBb et MBc (respectivement pour les pièces A, B, C)
- deux tours à commande numérique TOUR 1 et TOUR 2
- un magasin de pièces usinées MU, composé de 3 goulottes superposées MUa, MUb et MUC (respectivement pour les pièces A, B, C)
- un bras manipulateur robotisé BM, chargé du transport des pièces d'un poste à l'autre
- un transfert linéaire TL qui supporte le bras manipulateur et chargé de l'amener devant chaque poste.

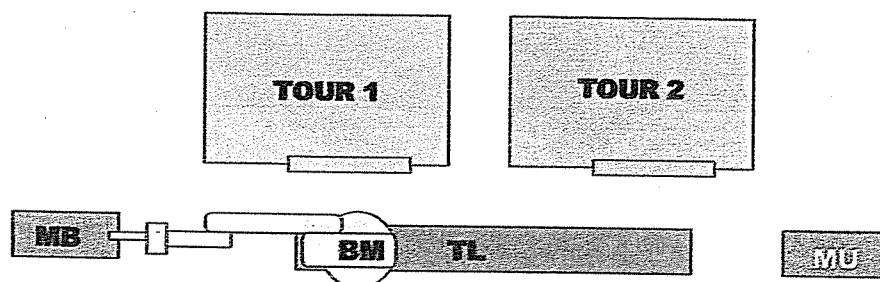


Figure 4 : Composition de la cellule de tournage.

La conception d'un tel système doit prendre en compte les contraintes de production en essayant de minimiser les temps de transfert. Cela passe par un bon agencement des différents postes, des vitesses de transfert rapides, et une bonne coordination des tâches à exécuter.

Pour cela, les concepteurs ont retenu la solution d'un bras manipulateur rapide se déplaçant d'un poste à l'autre à l'aide d'un transfert linéaire asservi.

I.2 Cycle d'usinage sur la cellule flexible

Depuis le magasin des bruts jusqu'au magasin des pièces usinées, chaque pièce suit le cycle suivant:

- prise d'une pièce dans le magasin de pièces brutes MB (MBa, MBb ou MBc) et transfert vers le TOUR 1
- usinage sur le TOUR 1
- prise de la pièce dans le TOUR 1, retournement et transfert vers le TOUR 2
- usinage sur le TOUR 2
- transfert du TOUR 2 vers le magasin de pièces usinées MU (MUa, MUb ou MUC)

L3 Gestion de l'état du stock

Le magasin de pièces usinées est constitué de trois goulottes superposées (MUa, MUb, MUC) et inclinées pour assurer la descente des pièces par gravité. L'une d'elle est schématisée Figure 5.

La dépose d'une pièce usinée est faite par le bras manipulateur à l'entrée de la goulotte et la pièce vient par gravité s'appuyer sur la précédente (ou sur une butée basse pour la première pièce). Le retrait est effectué en soulevant la pièce basse (par un autre manipulateur, hors du cadre de cette étude).

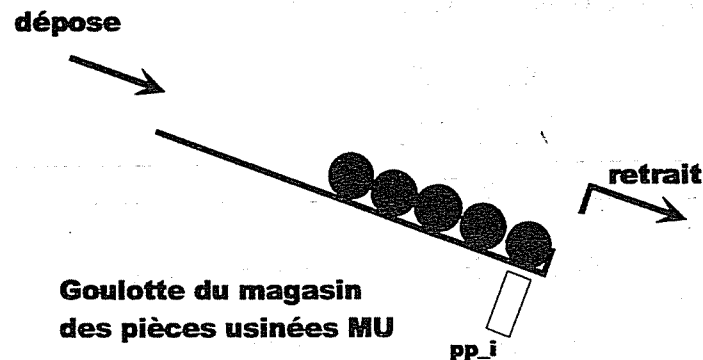


Figure 5 : Schéma d'une goulotte du magasin de pièces usinées

Nota : L'identificateur des variables est noté en gras pour les variables booléennes, en gras et italique pour les variables numériques.

Un détecteur placé en position basse (information logique "**pp_i**" avec $i = a, b$ ou c) permet d'informer la partie commande de la présence d'une pièce et, par changement d'état, du retrait d'une pièce de la goulotte. La non détection d'une pièce par le détecteur "**pp_i**" pendant une durée supérieure à 2 secondes permet d'en déduire que la goulotte correspondante est vide. L'information de dépose d'une pièce dans la goulotte est délivrée par la tâche de dépose dans la goulotte du magasin MU, à la fin de cette tâche. Cette information, élaborée par la partie commande, est notée "**fin_dép**". De plus, la partie commande élabore une information sur le type de pièce en cours d'usinage dans le TOUR 2, notée "**prod2_i**" ($i = a, b$ ou c).

Pour chaque pièce i ($i = a$ ou b ou c), l'état du stock dans chaque goulotte du magasin MU doit être connu en permanence (variable numérique "**nb_i**"). Deux niveaux du stock sont définis par la gestion de production et mis en mémoire dans le système de commande :

- le niveau de "stock mini" (valeur numérique "**st_i_mini**"). Lorsqu'il est atteint, il faut déclencher au plus tôt la production de cette pièce. A cet effet, le système de commande fournit l'information booléenne "**i_mini**" qui est vraie ($i_mini = 1$) si $nb_i \leq st_i_mini$
- le niveau de "stock maxi" (valeur numérique "**st_i_maxi**"). Lorsqu'il est atteint, il faut arrêter la production de cette pièce. A cet effet, le système de commande fournit l'information booléenne "**i_maxi**" qui est vraie ($i_maxi = 1$) si $nb_i \geq st_i_maxi$

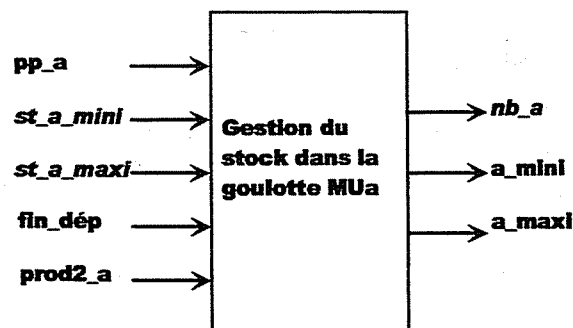


Figure 6 : Bilan des entrées sorties utilisées pour la gestion du stock pièce "a" dans la goulotte MUa

Question 1 : A partir du bilan des entrées - sorties de la Figure 6, proposer une solution, en utilisant un outil de description approprié, pour élaborer la variable numérique "*nb_a*" et les variables booléennes "*a_mini*" et "*a_maxi*".

I.4 Initialisation de la position de la table support du manipulateur par le transfert linéaire

Afin de connaître la position de la table support du manipulateur, le transfert linéaire est équipé d'un capteur incrémental à 200 points/tour, avec les sorties "voie A", "voie B", "top zéro Z".

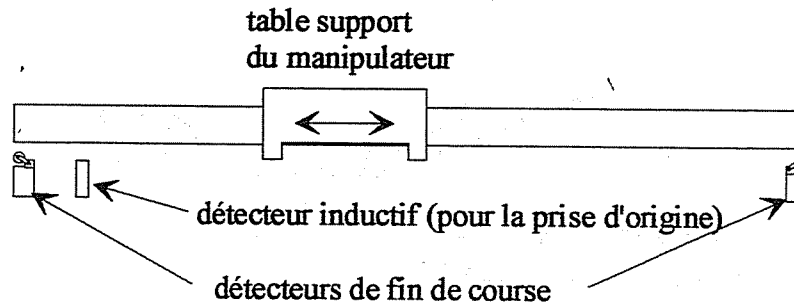


Figure 7 : Schéma du transfert linéaire

Question 2 : Décrire le principe de fonctionnement d'un capteur incrémental et le principe de détection du sens de rotation. Préciser pourquoi ce type de capteur nécessite de faire une prise d'origine machine.

La prise d'origine permet de mettre à zéro la valeur numérique "*position*". Cette prise d'origine est déclenchée par l'information "*pom*".

Le transfert linéaire est motorisé par un moteur à courant continu, avec une commande à deux sens de marche :

- déplacement vers la gauche (commande "*dépl_trans_G*"),
- déplacement vers la droite (commande "*dépl_trans_D*").

Il est équipé de 2 détecteurs de fin de course et d'un détecteur inductif de position du transfert utilisé pour la prise d'origine (voir Figure 7) :

- "*fdc_d*" : fin de course droit
- "*fdc_g*" : fin de course gauche
- "*det_po*" : détecteur position transfert

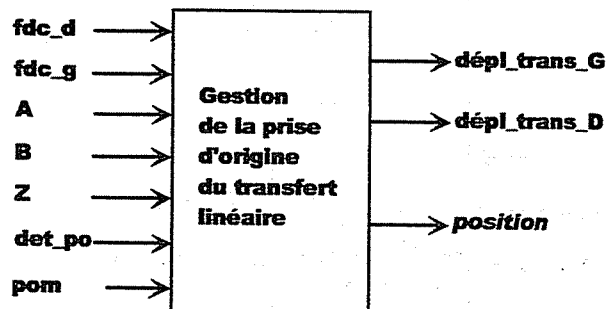


Figure 8 : Entrées-sorties utilisées pour la gestion de la prise d'origine du transfert linéaire

Question 3 : A partir des entrées - sorties définies Figure 8, décrire sous forme d'un algorithme ou d'un algorithme une procédure permettant d'effectuer cette prise d'origine.

1.5 Gestion de production

La production est gérée à partir de l'état du stock de pièces usinées dans le magasin MU (gestion de type Kanban). Le niveau de chaque stock de pièces usinées conditionne la production de la cellule flexible, l'objectif étant de ne pas provoquer d'arrêt de la production.

L'état du stock dans le magasin de bruts conditionne en amont son approvisionnement. On supposera dans la suite de cette étude que le magasin de bruts (MB) n'est jamais vide.

Plusieurs situations peuvent se présenter pendant la production. La réaction du système est décrite ci-après :

Situation 1 : Production de la pièce i validée ($i = a$ ou b ou c) ET stock pièce i compris entre le stock mini et maxi ET stocks des autres pièces supérieurs au stock mini

Evolution 1 :

- production de la pièce i jusqu'au stock maxi de la pièce i
- puis production de la pièce dont le stock est le plus éloigné du stock maxi. Si tous les stocks des autres pièces sont au maxi, arrêt de la production sur la cellule flexible.

Situation 2 : Production de la pièce i validée ($i = a$ ou b ou c), stock pièce i compris entre le stock mini et maxi ET apparition de l'information " j_mini " ($j = a$ ou b ou c , $j \neq i$). Si deux informations de stock mini apparaissent, l'ordre d'apparition sera pris en compte.

Evolution 2 :

- terminer les pièces i en cours de fabrication, commencer la fabrication dès que possible (TOUR 1 libre) de la pièce j dont le stock mini est apparu en premier.

Situation 3 : Production de la pièce i validée ($i = a$ ou b ou c), stock pièce i inférieur au stock mini ET apparition de l'information " j_mini " ($j = a$ ou b ou c , $j \neq i$). Si deux informations de stock mini apparaissent, l'ordre d'apparition sera pris en compte.

Evolution 3 :

- poursuivre la production des pièces i en cours de fabrication jusqu'à constitution du stock mini de pièces i , puis commencer la fabrication dès que possible (TOUR 1 libre) de la pièce j dont le stock mini est apparu en premier.

Les situations 2 et 3 font apparaître des situations critiques où plusieurs stocks peuvent être au minimum. De manière automatique, le système traite les priorités dans l'ordre d'apparition de l'information de stock minimum.

Compte tenu des situations décrites précédemment et des évolutions envisagées, la partie commande détermine quelle production de pièces (a , b ou c) doit être validée (ordre " $PROD_i$ " avec $i = a$, b ou c), ou s'il convient d'arrêter la production (ordre " $ARRET_PROD$ ").

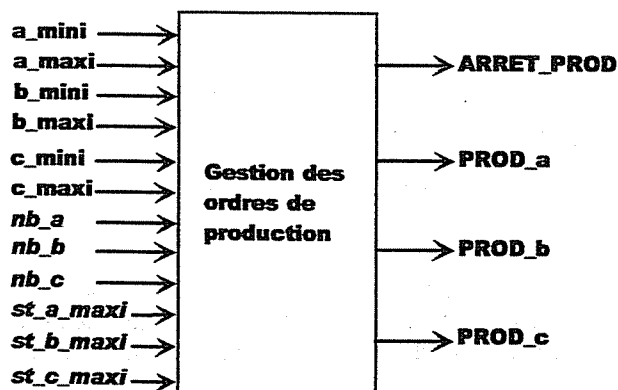


Figure 9 : Bilan des entrées – sorties pour la gestion des ordres de production

Question 4 : A partir du bilan des entrées – sorties définies à la Figure 9, décrire à l'aide d'un grafcet, pour chacune des situations (1, 2 ou 3) les évolutions possibles. En déduire le (ou les) grafcet (s) décrivant la gestion de production des pièces A, B ou C sur la cellule.

Nota : Les phases transitoires correspondant aux changements de production sont gérées indépendamment de la gestion globale de production et n'ont pas à être prises en compte dans votre analyse.

1.6 Cycle de chargement - déchargement

La Figure 10 recense tous les points de départ et d'arrivée des trajectoires du robot (trajectoires 1 à 15).

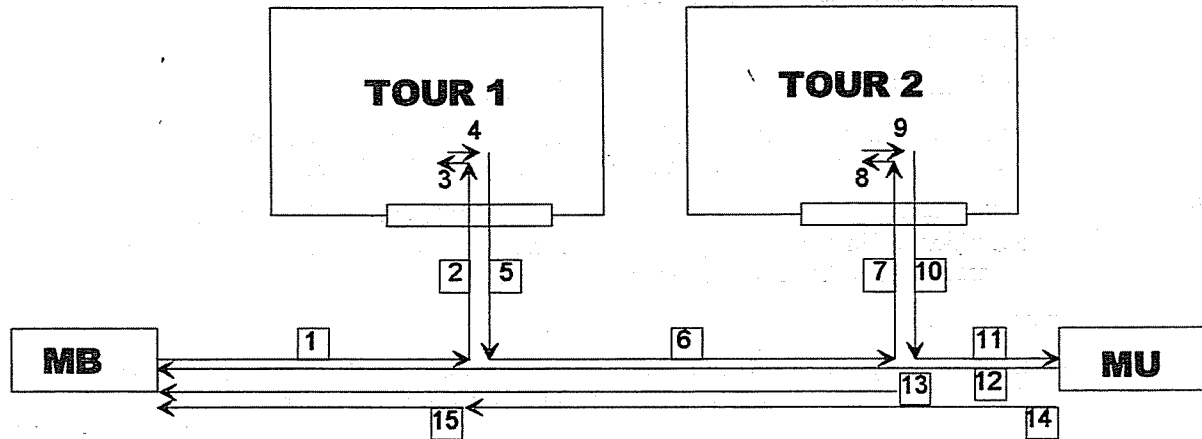


Figure 10 : Trajectoires du robot

Nota : ces trajectoires ne représentent pas la trajectoire réelle de la pince qui est optimisée en fonction de l'environnement. Les trajectoires 1 et 11, qui concernent la prise ou la dépose d'une pièce dans les goulottes des magasins, sont différentes suivant le type de production (pièce A, B ou C) car la position du magasin est différente. Les autres trajectoires sont identiques quelle que soit la pièce fabriquée.

L'analyse fonctionnelle a permis de répertorier les séquences principales. Elles sont identifiées dans le Tableau 1 de la page ci-après, avec la durée calculée ou mesurée et éventuellement la trajectoire concernée.

Ces séquences, dont certaines sont regroupées, constituent 10 tâches, identifiées T1 à T10 dans le tableau 1. Les tâches T9 (séquence 12) et T10 (séquence 15) sont exécutées uniquement en phase de démarrage ou d'arrêt de production.

Question 5 : Elaborer le grafcet de coordination des tâches (tâches décrites dans le tableau 1 ci-après) pour une production en continu de la pièce A (tâches T1 à T8), en respectant une contrainte de production dans un temps de cycle minimum, et sans préciser la situation initiale.

Question 6 : A l'aide du Tableau 1 et de la Figure 10, compléter, sur le document réponse 1, le diagramme de Gantt des séquences pour une production en continu de la pièce A (L'instant $t = 0$ correspond à la situation de démarrage de production, avec les deux tours à l'arrêt et le bras en position initiale près du magasin de bruts).

Question 7 : En déduire le temps de cycle et la cadence de production, ainsi que le taux de charge des deux tours.

Tâche	Séq.	Durée	Description de la séquence	N° trajet.
T1	2.7	2s	Depuis la position devant le TOUR 1, approcher la pince du porte-pièce	2
	D3.4	2s	Sur le TOUR 1, saisir la pièce dans le porte pièce, desserrer le porte-pièce, et dégager le bras	3 ET 4
	5.10	2s	Depuis la position devant le porte-pièce du TOUR 1, retour du bras en position d'attente devant le tour	5
T2	6	3s	Depuis la position du bras en attente devant le TOUR 1, déplacer le bras à l'aide du transfert linéaire dans la position attente devant le TOUR 2	6
T3	RP	1s	Retournement à 180° de la pièce se trouvant dans la pince du bras.	
T4	2.7	2s	Depuis la position devant le TOUR 2, approcher la pièce du porte-pièce	7
	C8.9	2s	Sur le TOUR 2, engager la pièce dans le porte pièce, serrer le porte-pièce, ouvrir la pince du bras et dégager le bras	8 ET 9
	5.10	2s	Depuis la position devant le porte-pièce du TOUR2, retour du bras en position d'attente devant le tour	10
T5	13	4s	Depuis la position attente devant le TOUR 2, déplacer le bras à l'aide du transfert linéaire vers le magasin de pièces brutes MB, et mise en position du bras manipulateur d'attente saisie pièce brute	13
	1	5s	Saisir une pièce (A ou B ou C) dans le magasin de brut MB et la transférer vers le TOUR 1 en attente d'usinage	1
	2.7	2s	Depuis la position devant le TOUR 1, approcher la pièce du porte-pièce	2
	C3.4	2s	Sur le TOUR 1, engager la pièce dans le porte pièce, serrer le porte-pièce, ouvrir la pince du bras et dégager le bras	3 ET 4
	5.10	2s	Depuis la position devant le porte-pièce du TOUR1, retour du bras en position d'attente devant le tour	5
T6	U1	A: 60s B: 58s C: 56s	Fermeture de la porte de sécurité du TOUR 1 puis usinage d'une pièce (A ou B ou C). Ouverture de la porte de sécurité en fin d'usinage	
T7	U2	A: 40s B: 42s C: 36s	Fermeture de la porte de sécurité du TOUR 2 puis usinage d'une pièce (A ou B ou C). Ouverture de la porte de sécurité en fin d'usinage	
T8	2.7	2s	Depuis la position devant le TOUR 2, approcher la pince du porte-pièce	7
	D8.9	2s	Sur le TOUR 2, saisir la pièce dans le porte pièce, desserrer le porte-pièce, et dégager le bras	8 ET 9
	5.10	2s	Depuis la position devant le porte-pièce du TOUR2, retour du bras en position d'attente devant le tour	10
	11	5s	Depuis la position attente devant le TOUR 2, déplacer le bras à l'aide du transfert linéaire vers le magasin des pièces usinées MU et déposer la pièce usinée dans une goulotte du magasin MU et dégagement du bras	11
	14	3s	Depuis la position fin de dépose dans le magasin de pièces usinées MU, retour du bras vers la position attente devant le TOUR 1	14
T9	12	5s	Depuis la position fin de dépose dans le magasin de pièces usinées MU, retour du bras à l'aide du transfert linéaire vers le magasin de pièces brutes MB, et mise en position du bras en attente de saisie pièce brute	12
T10	15	3s	Depuis la position du bras face au TOUR 1, déplacer le bras à l'aide du transfert linéaire vers le magasin de bruts MB, et mise en position du bras manipulateur d'attente saisie pièce brute	15

Tableau 1 : Identification des tâches principales et séquences associées de la cellule de tournage

1.7 Utilisation d'un bras à deux pinces pour réduire les temps de chargement – déchargement

Dans le but d'augmenter le taux de charge des tours et donc d'accroître la productivité, on envisage d'équiper le bras manipulateur de deux pinces, avec un axe de rotation supplémentaire permettant de présenter alternativement la pince A ou la pince B dans l'axe de la broche. Cela permettra d'éviter les temps d'attente sur les tours après un déchargement. Pour décharger un tour, on présente tout d'abord une pince vide dans l'axe de la broche, puis, une fois le déchargement effectué, on présente l'autre pince, munie d'une nouvelle pièce.

Il y a de ce fait deux nouvelles séquences, **PA** "Placer la pince A en position active" et **PB** "Placer la pince B en position active" (La position active correspond à la position d'utilisation possible de la pince)

Les actions "saisir pièce", "ouvrir pince", "retourner pièce de 180°" décrites dans le tableau 1 concernent uniquement la pince active. On complète le tableau 1 avec le tableau 2 ci-dessous :

Séquence	Durée	Description des séquences
PA	1s	Mettre la pince A en position active
PB	1s	Mettre la pince B en position active

Tableau 2 : Séquences supplémentaires induites par le bras à deux pinces.

Le dispositif permettant de présenter la pince A ou la pince B en position active a été étudiée de façon à ce que le mouvement puisse se faire dans chacune des circonstances suivantes :

- à l'intérieur du tour, après un déchargement du tour, c'est à dire en fin de séquence D3.4 pour le TOUR 1, et en fin de séquence D8.9 pour le TOUR 2
- lorsque le bras est en position d'attente devant un tour, c'est à dire en fin des séquences 1, 5.10, 14
- pendant l'exécution des séquences 6, 13, 15

Question 8 : Etablir les associations de séquences en fonction de la nouvelle configuration pour constituer de nouvelles tâches. En déduire le grafset de coordination des tâches pour une production en continu de la pièce A avec le bras à deux pinces, en respectant une contrainte de production dans un temps de cycle minimum, et sans préciser la situation initiale.

Question 9 : Compléter, sur le document réponse 2, le diagramme de Gantt des séquences pour une production en continu de la pièce A (L'instant $t = 0$ correspond à la situation de démarrage de production, avec les deux tours à l'arrêt, non chargés, le bras en position initiale près du magasin de bruts et la pince A active).

Question 10 : Donner le nouveau temps de cycle. En déduire la cadence pour une production exclusive de la pièce A ainsi que le nouveau taux de charge des tours. Estimer la réduction de temps de cycle que l'on peut obtenir en appliquant un procédé de perçage plus rapide.

1.8 Démarrage et Arrêt de production

La mise en référence de la partie opérative correspond à une situation où les deux tours sont vides, avec le bras manipulateur en position d'attente de chargement devant le magasin de bruts MB et toutes les prises d'origines terminées.

Question 11 : A partir d'une situation d'arrêt de production (Partie opérative et partie commande hors énergie), décrire, à l'aide du GEMMA (document réponse 3) la procédure de démarrage d'une production de la pièce i ($i = a, b$ ou c) et la procédure d'arrêt de production.

II Deuxième partie

Étude d'un procédé de forage à grande vitesse assisté par des vibrations auto-entretenues

Dans cette deuxième partie de l'épreuve, on se propose d'étudier un procédé de forage à grande vitesse assisté par vibrations. Ce procédé a été introduit dans les années 1950, en Russie, par V.N. Podouraev [POD70]. C'est un procédé bien adapté au forage profond dans les métaux durs car les vibrations provoquent la fragmentation des copeaux. Ceci facilite leur évacuation par circulation de fluide et supprime les opérations de débouillage.

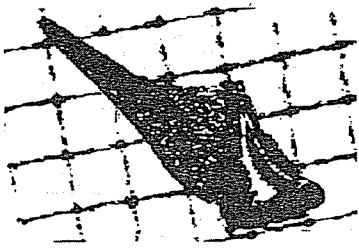


Figure 11 : Copeau typique, obtenu en forage vibratoire.

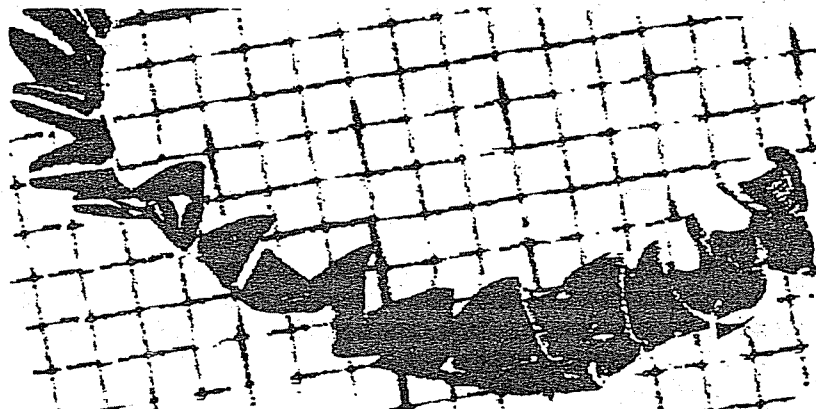


Figure 12 : Copeau obtenu par le procédé de forage traditionnel.

La Figure 11 montre la micrographie d'un copeau typique, posé sur un papier millimétré. Ce copeau a été obtenu en forage vibratoire, avec un foret à deux lèbres. La fréquence d'oscillation de la tête vibrante était égale à 1.5 fois la fréquence de rotation. L'avance était de 0.1 mm/tour. A titre de comparaison, on peut observer, sur la Figure 12, la forme des copeaux obtenue en forage traditionnel dans le même matériau. On saisit alors tout l'intérêt de l'assistance vibratoire dans le cas du forage de trous profonds.

II.1 Concept de tête auto-vibrante.

Une tête de forage auto-vibrante est constituée principalement d'une suspension élastique dans la direction de pénétration, permettant le développement de vibrations axiales. Cette suspension est rigide dans les directions radiales pour guider précisément le mouvement de pénétration. Elle est également rigide en torsion pour transmettre le couple. Elle peut être utilisée soit comme support du foret (cas de la Figure 13), soit comme support de la pièce.

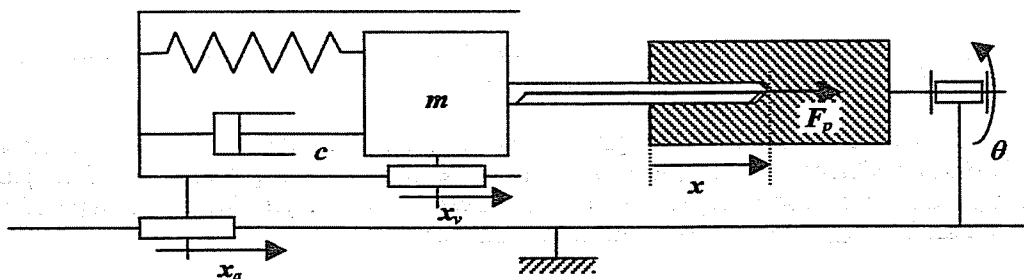


Figure 13 : Schéma cinématique du forage avec une tête auto-vibrante

" m " est la masse totale des éléments vibrants, " k " et " c " sont respectivement la raideur et le coefficient de frottement de la suspension élastique. La profondeur de pénétration " x " est à chaque instant égale à la somme du déplacement d'avance " x_a " et de l'allongement de la suspension élastique " x_v ". x_v englobe le recul sous l'effet de la force de pénétration et le déplacement vibratoire. " θ " est la position angulaire de la pièce.

Lors de la rotation du foret, le mouvement vibratoire axial imprime une ondulation du fond de trou. Celle-ci provoque en retour une variation cyclique de l'épaisseur du copeau. Ceci induit une variation des efforts de coupe qui excite et entretient les vibrations. Ces vibrations sont qualifiées de "vibrations de régénération de la surface" en raison de l'influence de trace de la coupe précédente. La théorie en a été faite par MERRITT [MER65].

II.2 Modèle dynamique du système pièce – outil – machine.

Les vibrations apparaissent spontanément pour certaines fréquences de rotation du foret, dès lors qu'il existe une résonance de l'ensemble "Pièce – Outil – Machine" bouclé via les efforts de coupe (Figure 14). L'étude du comportement de ce système bouclé relève des méthodes générales de l'automatique.

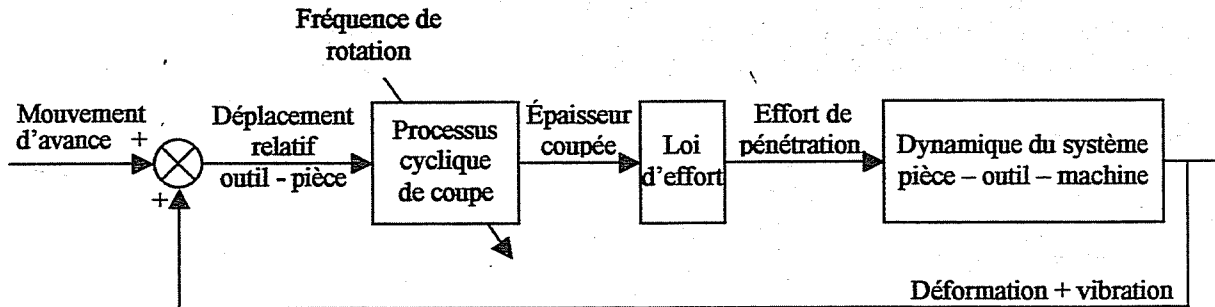


Figure 14 : Interaction dynamique entre le système pièce – outil – machine et la coupe

Lorsqu'une tête auto-vibrante est montée sur une machine, elle fait partie intégrante du système pièce – outil – machine. La raideur de la suspension élastique et la masse de la partie vibrante sont très inférieures aux raideurs et masses du reste du système. Il est donc possible de considérer le reste du système comme étant infiniment rigide. Ainsi, en première approximation, le comportement dynamique du système pièce – outil – machine se résume à celui de la tête auto-vibrante.

II.3 Étude détaillée de la formation du copeau.

L'épaisseur coupée " $e(t)$ " varie sous l'effet des vibrations. Cette épaisseur est la somme des épaisseurs coupées par chaque lèvre du foret. " l " désignera le nombre de lèvres du foret (dans notre cas, $l = 2$). Le foret est supposé être en bon état, avec des lèvres symétriques par rapport à l'axe de rotation. Dans ces conditions, chaque lèvre coupe la même épaisseur de matière " $e_l(t)$ ", égale à $e(t)/l$. L'avance par tour est désignée habituellement par " f ". L'avance par lèvre, égale à f/l , sera désignée par " f_l ". L'intervalle de temps séparant le passage de deux lèvres consécutives sur une même position angulaire sera désignée par " τ_l ". Le nombre d'oscillations du mouvement vibratoire pendant la durée τ_l sera désigné par " n " (ce n est généralement pas un nombre entier).

II.3.1 Variation de l'épaisseur coupée par une lèvre dans le cas de la coupe continue.

Dans le cas de vibrations de faible amplitude, la coupe est continue. L'épaisseur coupée par une lèvre $e_l(t)$ dépend de la position axiale $x(t)$ à cet instant et de la position axiale lors du passage de la lèvre précédente :

$$e_l(t) = x(t) - x(t - \tau_l) \quad (1)$$

Question 12 : A partir de l'équation (1), établir la fonction de transfert $H_{coupe}(s)$ donnant l'épaisseur totale coupée " $E(s)$ " par les lèvres du foret en fonction de la position axiale " $X(s)$ ".

On fait l'hypothèse d'un mouvement vibratoire quasi-sinusoidal. Cette hypothèse se justifie par la résonance mécanique de la tête auto-vibrante qui n'est pas amortie lorsque l'énergie apportée par auto-excitation équilibre l'énergie perdue par frottement. Ainsi, moyennant un choix convenable de l'origine des temps, on peut écrire : $x(t) = x_0 + f_l t / \tau_l + a \sin(2\pi n t / \tau_l)$, " a " étant l'amplitude des oscillations.

Question 13 : Dans cette hypothèse et à partir de l'équation (1), établir l'expression de l'épaisseur $e_l(t)$ coupée par une lèvre en fonction de a , f_l , τ_l et n . Montrer que la coupe est continue si la condition ci après est satisfaite :

$$a |\sin(\pi n)| < f_l / 2 \quad (2)$$

II.3.2 Présentation de quelques cas d'interaction coupe – vibration.

Cas de la coupe continue.

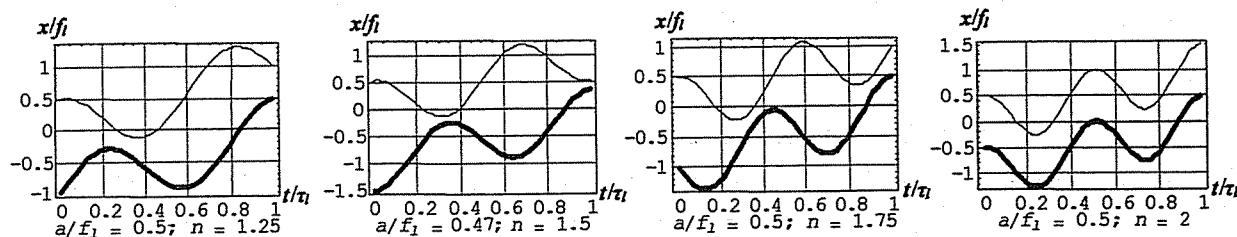


Figure 15 : Divers cas d'interaction en coupe continue

La Figure 15 montre quatre cas de coupe continue. La courbe en trait épais représente la position relative de la surface formée par le passage de la lèvre précédente. La distance verticale entre les deux courbes représente l'épaisseur relative coupée.

1. Dans le premier cas, $n = 1,25$. La coupe est en retard d'un quart de période par rapport à la précédente. L'épaisseur coupée est maximale lorsque le foret avance et minimale lorsqu'il recule. L'effort de coupe varie en opposition avec la vitesse du mouvement vibratoire et agit comme un amortisseur.
2. Dans le deuxième cas, $n = 1,5$. La coupe est en opposition par rapport à la précédente. L'épaisseur coupée est maximale lorsque le foret est le plus en avant et minimale lorsqu'il est le plus en arrière. L'effort de coupe est opposé au déplacement vibratoire et a le même effet qu'un ressort.
3. Dans le troisième cas, $n = 1,75$. La coupe est en avance d'un quart de période par rapport à la précédente. L'épaisseur coupée est maximale lorsque le foret recule et minimale lorsqu'il avance. L'effort de coupe varie en concordance avec la vitesse du mouvement vibratoire et apporte de l'énergie aux vibrations en agissant comme un amortisseur négatif.
4. Dans le quatrième cas, $n = 2$. La coupe est en phase avec la précédente. L'épaisseur coupée est constante. Les efforts de coupe sont constants. Ils n'agissent pas sur les vibrations.

Question 14 : Parmi les quatre cas détaillés ci-dessus, quel est celui qui permet d'obtenir des vibrations auto-entretenues ? Justifier la réponse.

Cas de la coupe discontinue.

Dans le cas de vibrations de forte amplitude, la coupe est discontinue (Figure 16). L'épaisseur coupée ne peut pas devenir négative mais, lorsqu'elle s'annule, l'outil laisse en place ce qui résultait d'une coupe antérieure.

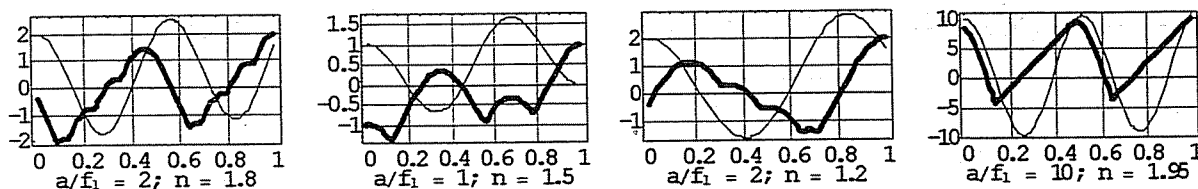


Figure 16 : Différents cas de coupe discontinue

II.4 Loi de coupe approchée.

La loi de coupe définit l'effort de pénétration exercé par l'outil sur la matière en fonction des paramètres de coupe, des caractéristiques de l'outil (géométrie, type d'affûtage, revêtement, état d'usure...), du matériau coupé et de la lubrification.

II.4.3 Effort de pénétration en l'absence de vibration.

L'effort de pénétration est difficile à modéliser précisément. De nombreux auteurs ont proposé des modèles mathématiques basés soit sur une étude physique de la formation des copeaux, soit sur des analyses expérimentales. Des essais systématiques ont été conduits par le CETIM pour divers matériaux et divers types d'affûtage du foret. Ils ont montré qu'un simple modèle du type de celui de Merchant [MER45] est suffisant pour représenter les résultats de ces essais. L'effort de pénétration s'écrit alors :

$$F_p = K_f D f \quad (3)$$

" F_p " est la force de pénétration (en Newton), " f " l'avance par tour (en mm), " D " le diamètre du trou (en mm). " K_f " un paramètres dépendant du couple outil/matière, de la lubrification, du type d'affûtage et de l'état d'usure des lèvres du foret. Compte tenu du matériau dur usiné, de l'outil utilisé et de la lubrification appliquée, la valeur qui convient est :

$$K_f = 1000 \text{ N/mm}^2 \quad (4)$$

II.4.4 Modèle de la loi d'effort de pénétration en régime vibratoire.

Une analyse fine de la dynamique de la coupe, a été conduite par ALBRECHT [ALB60][ALB65]. Dans le cadre de ce problème, on fait l'hypothèse d'un comportement quasi-stationnaire de la coupe. Ainsi, le modèle de la loi d'effort est semblable au modèle sans vibration et s'obtient en remplaçant l'avance par l'épaisseur coupée :

$$F_p(t) = K_f D e(t) \quad (5)$$

Question 15 : A partir de l'équation (5), établir la fonction de transfert $H_{effort}(s)$ donnant l'effort de pénétration " $F_p(s)$ " en fonction de l'épaisseur totale " $E(s)$ " coupée par les lèvres du foret.

II.5 Comportement dynamique de la tête auto-vibrante pendant la coupe.

On fait l'hypothèse simplificatrice d'un foret rigide, tant en torsion qu'en flexion et en compression, ce qui permet de restreindre l'étude à un mouvement unidimensionnel (direction axiale).

Remarques sur cette hypothèse : a) L'angle de torsion n'est pas négligeable, mais le temps de relaxation de la torsion, résultant du frottement et du coefficient de raideur, est grand devant la période des oscillations. Dans ces conditions, l'angle de torsion reste quasiment constant et n'interagit donc pas avec le mouvement vibratoire. b) La flexion n'affecte la coupe qu'à l'amorce du forage, ensuite, le foret est guidé par les parois du trou. c) La compression est faible devant l'avance et devant l'amplitude des vibrations.

Question 16 : A partir de la Figure 13, établir la fonction de transfert $H_{tête}(s)$ donnant l'allongement de la suspension élastique " $X_v(s)$ " en fonction de l'effort de pénétration " $F_p(s)$ ".

On se place dans le cas de la coupe continue. Le schéma fonctionnel décrivant le comportement de la tête auto-vibrante est celui de la Figure 17. Il est conforme au schéma bloc de la Figure 14.

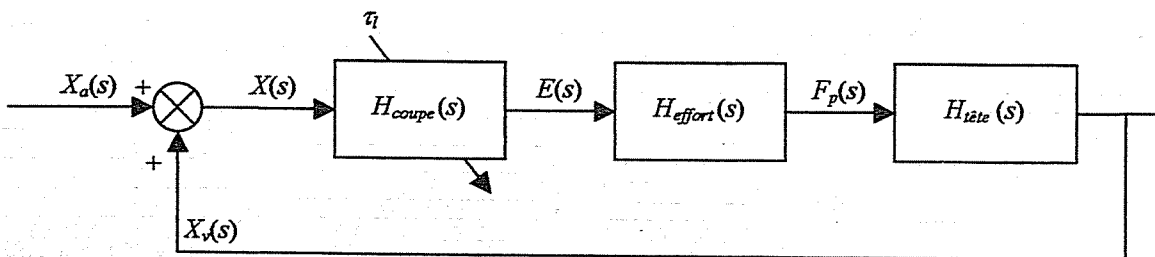


Figure 17 : Schéma fonctionnel du système Pièce - Outil - Machine en interaction avec la coupe

Question 17 : Déterminer la fonction de transfert du système bouclé et montrer que, si on pose $K_f D l = K$, cette fonction de transfert peut se mettre sous la forme suivante :

$$\frac{X_v(s)}{X_a(s)} = \frac{-K/(ms^2 + cs + k)}{1/(1 - e^{-s\tau_1}) + K/(ms^2 + cs + k)} \quad (6)$$

II.6 Étude la stabilité du système Pièce - Outil - Machine pendant la coupe.

Pour étudier la stabilité de ce système, il est possible d'appliquer le critère de Nyquist simplifié (ou critère du revers). Pour cela, il faut remplacer la variable symbolique " s " dans la fonction de transfert (6) du système bouclé par $j\omega$, afin d'obtenir une fonction de transfert complexe :

$$\frac{X_v(\omega)}{X_a(\omega)} = \frac{-K/(-m\omega^2 + jc\omega + k)}{1/(1 - e^{-j\omega\tau_1}) + K/(-m\omega^2 + jc\omega + k)} \quad (7)$$

Question 20 : Calculer les limites ψ_1 et ψ_2 des plages d'instabilité dans le cas des valeurs numériques données à droite de la Figure 18. Montrer que les cinq premières plages d'instabilité sont celles données par le Tableau 3.

Question 21 : On adopte une fréquence de rotation de la broche voisine de la borne supérieure de la deuxième plage ($v_{22} = 100$ tours par seconde). Comment les oscillations de la tête auto-vibrante se comportent-elles lorsque la fréquence de rotation " v_r " est : a) légèrement inférieure à v_{22} ; b) égale à v_{22} ; c) légèrement supérieure à v_{22} .

Question 22 : Définir une stratégie de commande basée sur la variation de la fréquence de rotation et permettant l'amorçage des vibrations au début du forage, puis la stabilisation de l'amplitude des vibrations lorsque celle-ci atteint un niveau suffisant pour provoquer la fragmentation des copeaux.

Question 23 : En remarquant que les plages 3 et 4 ainsi que 4 et 5 et les suivantes se recouvrent, expliquer pourquoi seules les fréquences de rotation voisines de 14000, 9000, 6000, 4200 et 3800 tours par minute permettent de stabiliser le niveau des vibrations.

II.7 Étude des comportements non stationnaires, dans le cas de petites oscillations.

Il s'agit maintenant de cerner ce qui se passe en régime variable, lorsque la fréquence de rotation est voisine d'une fréquence d'équilibre pour laquelle l'amplitude des oscillations est constante. Le but est de faire la synthèse d'un asservissement de l'amplitude des vibrations.

Lorsque la fréquence de rotation de la broche s'écarte d'une fréquence d'équilibre, les oscillations ne sont plus stationnaires. Le comportement en régime transitoire de la tête auto-vibrante est représenté par la fonction de transfert (6). On réduit cette fonction de transfert à une forme fractionnelle simple dont on égale le dénominateur à zéro, ce qui donne :

$$m s^2 + c s + k + K = K e^{-s\tau} \quad (10)$$

Question 24 : Expliquer pourquoi l'équation (10) est identique à l'équation caractéristique qui aurait pu être trouvée à partir de l'équation différentielle du système bouclé pièce - outil - machine. (On a donc établi l'équation caractéristique de ce système sans avoir explicité son équation différentielle).

Ainsi, si on pose $s = \alpha + j \omega$, l'équation caractéristique (10) permet d'établir qu'en régime transitoire, la solution générale de l'équation différentielle du système est de la forme $x_r(t) = x_{r0} + e^{\alpha t} (a \cos(\omega t) + b \sin(\omega t))$.

En régime d'oscillations stabilisées, on a $\alpha = 0$ et l'équation (10) se réduit à :

$$-m \omega^2 + j c \omega + k + K = K e^{-j\omega\tau} \quad (11)$$

En régime variable, α est différent de 0 et l'amplitude croît ou décroît exponentiellement suivant le signe de α . La résolution de l'équation (10) dans le cas général étant très compliquée, on se contente d'une résolution approchée, valable au voisinage d'une solution stationnaire. Les valeurs des variables seront notées avec l'indice "e" lorsqu'elles correspondent à une solution stationnaire. On désigne par v_r , la fréquence de rotation de la broche et v_e la fréquence de rotation donnant un régime d'oscillation permanent. On a alors $\omega_e = \omega(v_e)$ et $\alpha_e = \alpha(v_e)$, avec $\alpha_e = 0$ car, pour un régime stationnaire, les oscillations ont une amplitude constante. Ensuite, pour un régime proche de cette solution stationnaire, on développe ω et α au premier ordre :

$$\omega(n_1) \approx \omega_e + \frac{d\omega}{dv_r} (v_r - v_e) \quad (12)$$

$$\alpha(v_r) \approx \frac{d\alpha}{dv_r} (v_r - v_e) \quad (13)$$

Question 25 : En se servant de l'équation (10), calculer dans le cas général $ds/d\tau$, puis ds/dv_r . Montrer ensuite qu'au voisinage d'un régime stationnaire tel que $\alpha = 0$, on a :

$$\frac{ds}{dv_r} \approx \frac{l(\omega\tau)^2 K e^{-j\omega\tau}}{2m\omega^2 - j c \omega - j \omega \tau_1 K e^{-j\omega\tau}} \quad (14)$$

La poursuite des calculs étant compliquée dans le cas général, on restreint l'étude au cas particulier de la pulsation ω_2 définie Figure 18, de l'application numérique définie à droite cette figure et du mode vibratoire $i = 2$ et $n = 1.75$. Ce mode correspond au 3^{ème} cas de la Figure 15. Selon le Tableau 3, v_r se situe au voisinage de $v_{22} = 100$ tours/seconde.

Question 26 : Montrer que, dans ces conditions, on a :

$$\frac{d\omega}{dv_r} \approx 17.2 \quad (15)$$

$$\frac{d\alpha}{dv_r} \approx -1.23 \quad (16)$$

L'évolution de l'amplitude des oscillations est donnée par :

$$a(t) = x_0 e^{\alpha t} \quad (17)$$

Ceci veut dire que l'amplitude des oscillations satisfait l'équation :

$$\frac{da(t)}{dt} = \alpha a(t) \quad (18)$$

L'équation différentielle donnant la variation de l'amplitude est donc, en combinant (13), et (16) et (18) :

$$\frac{da(t)}{dt} \approx -1.23(v_r - v_c) a(t) \quad (19)$$

L'amplitude $a(t)$ étant supposée proche de l'amplitude désirée a_d , on peut faire l'approximation $a(t) \approx a_d$, ce qui donne :

$$\frac{da(t)}{dt} \approx -1.23 a_d (v_r - v_c) \quad (20)$$

Cette équation correspond au schéma fonctionnel suivant :

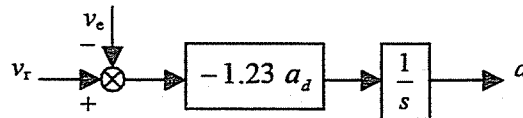


Figure 19 : Schéma fonctionnel équivalent à l'équation (20)

II.8 Asservissement de l'amplitude vibratoire.

L'étude précédente montre qu'il est possible de faire varier l'amplitude des oscillations en ajustant la fréquence de rotation de la broche. Le schéma d'asservissement de l'amplitude est le suivant :

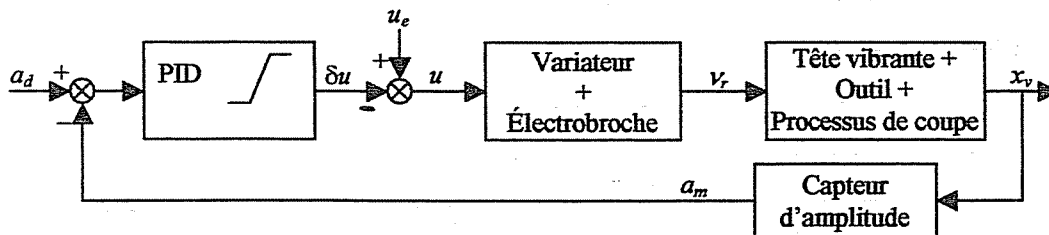


Figure 20 : Schéma bloc de l'asservissement de l'amplitude des oscillations

Le PID est de type analogique. Il traite des signaux électriques. L'amplitude désirée et l'amplitude mesurée sont représentées par des tensions analogiques désignées par a_d et a_m . Pour rester dans le cadre de l'hypothèse de faibles variations autour du point d'équilibre, l'action du PID est limitée de telle sorte que la fréquence de rotation ne puisse varier que de 10% de part et d'autre de la fréquence d'équilibre. On note " K_P ", le gain de l'action proportionnelle, " T_I ", la constante de temps de l'action intégrale, et " T_D ", la constante de temps de l'action dérivée. Le gain de l'action dérivée est limité à 10 dans les hautes fréquences.

Dans sa bande linéaire, le PID a comme fonction de transfert :

$$F(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + \frac{T_D s}{1 + T_D s / 10} \right) \quad (21)$$

L'ensemble variateur + électrobroche se comporte comme un système du premier ordre de constante de temps $\tau_b = 0.02$ s et de gain $k_b = 40$ (tours/seconde)/Volt.

Le capteur d'amplitude se comporte comme un filtre passe-bas du premier ordre, de constante de temps $\tau_m = 0.02$ s et de gain $k_m = 10$ Volt/mm.

L'avance est fixée à 0.1 mm/tour. Afin de garantir la fragmentation des copeaux, l'amplitude désirée des oscillations est celle qui correspond à la limite de la coupe continue donnée par l'équation (2).

Question 27 : Compte tenu de toutes ces considérations, établir le schéma fonctionnel du système d'asservissement de l'amplitude vibratoire. Dans quelles conditions ce schéma peut-il se réduire au schéma simplifié de la Figure 21 ?

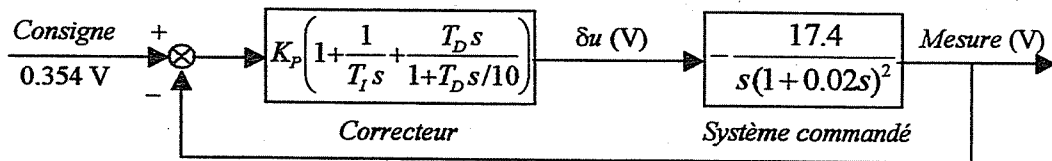


Figure 21 : Schéma fonctionnel réduit de l'asservissement de l'amplitude des oscillations

On étudie tout d'abord un asservissement proportionnel, sans action intégrale ni dérivée, ce qui correspond à des réglages du PID tels que $T_I = \infty$ et $T_D = 0$.

Question 28 : En utilisant le document réponse 4, tracer les diagrammes de Bode du système en boucle ouverte. Discuter du choix de K_p relativement à la stabilité, à la précision et à la rapidité de l'asservissement. Déterminer une valeur de K_p permettant d'obtenir une marge de phase suffisante et préciser la bande passante de l'asservissement ainsi réalisé.

Les performances obtenues avec un simple asservissement proportionnel étant insuffisantes, on applique un asservissement de type PID, avec $K_p = 2.75$, $T_I = 0.15$ s, $T_D = 0.02$ s. Les diagrammes de Bode du système en boucle ouverte et avec le correcteur PID en cascade sont donnés Figure 22.

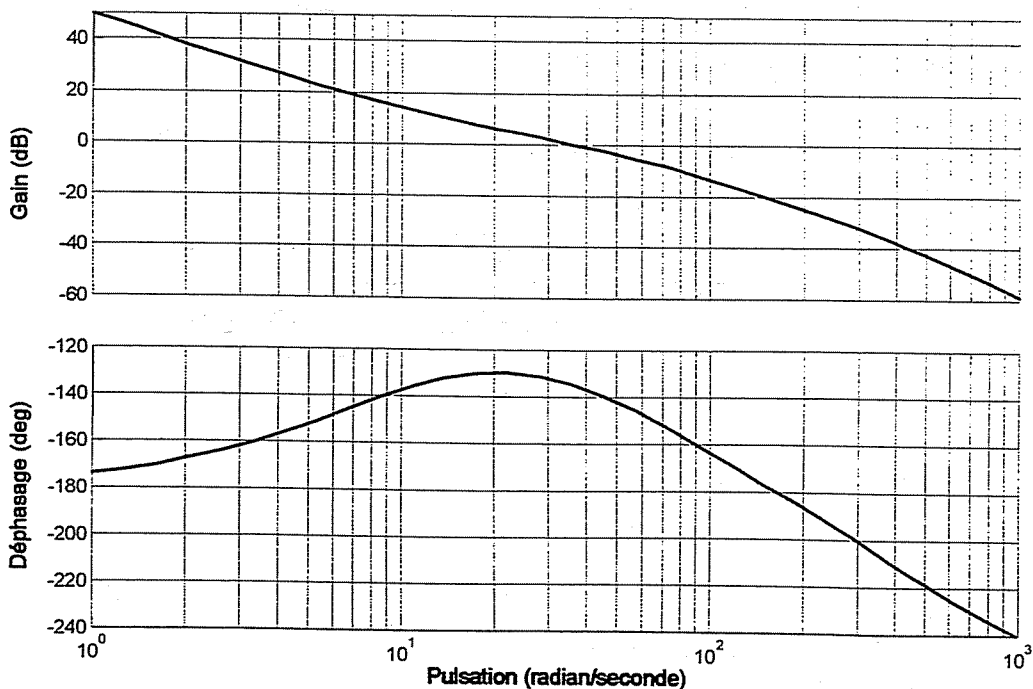


Figure 22 : Diagrammes de Bode en boucle ouverte de l'ensemble correcteur + système commandé

Question 29 : Justifier l'allure des diagrammes de Bode donnés Figure 22. Déterminer les marges de gain et de phase ainsi que la bande passante du système en boucle fermée. Discuter et chiffrer les améliorations apportées par ce correcteur PID par rapport à un simple correcteur proportionnel.

La Figure 23 montre le démarrage et la stabilisation des oscillations du système en boucle fermée. Les conditions opératoires sont les suivantes :

- L'instant initial est celui de l'entrée en contact de l'outil avec la pièce à percer.
- À l'instant initial, la fréquence de rotation de la broche et la vitesse d'avance sont établies à 90% des vitesses de travail.
- À l'instant initial, il n'y a pas de recul ni de vibration de la tête vibrante.

La stabilisation de l'amplitude résulte de l'ajustement de la fréquence de rotation de la broche par le correcteur PID. Quatre phases sont délimitées sur la Figure 23.

Question 30 : Expliquer soigneusement, phase par phase, l'allure des évolutions de l'amplitude des oscillations et de la fréquence de rotation de la broche. Que penser du temps de montée des oscillations ? Est-il compatible avec l'objectif de fragmentation des copeaux pour le forage de trous profonds ?

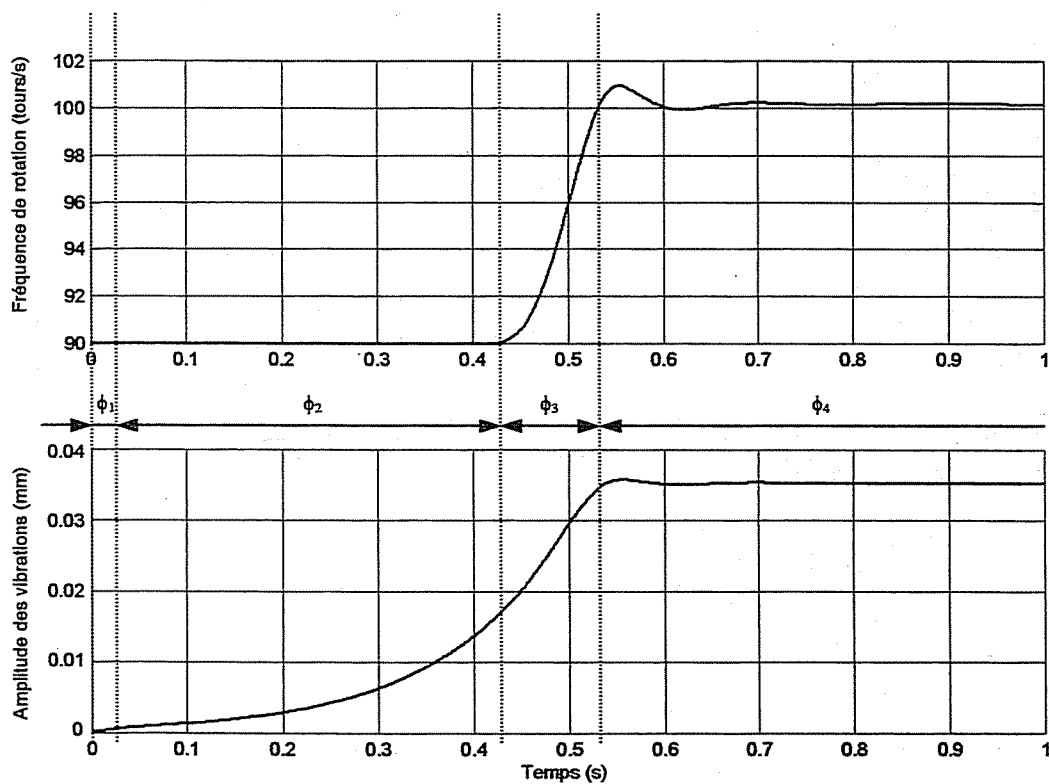
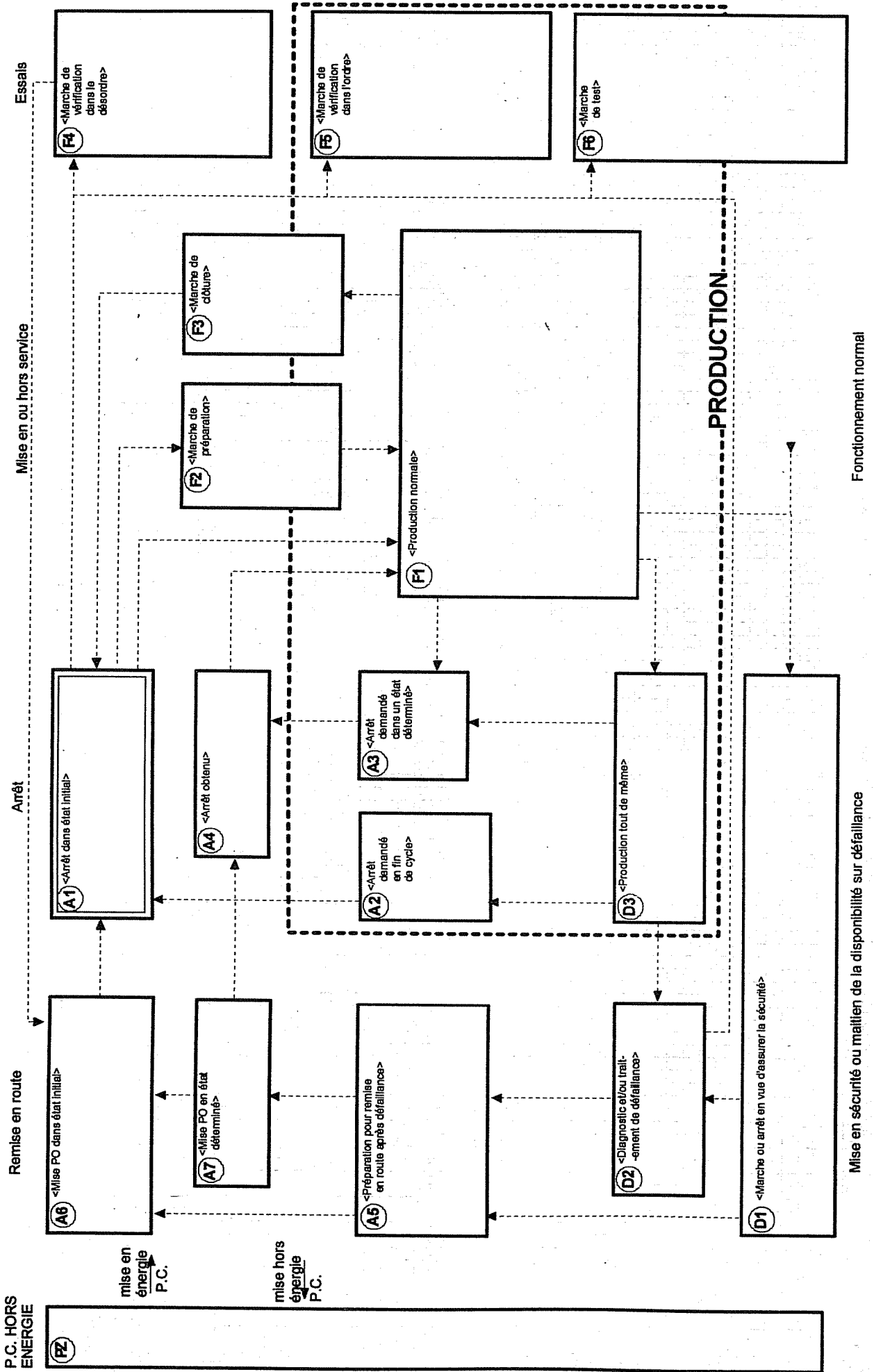


Figure 23 : Démarrage et stabilisation de l'amplitude des oscillations

Bibliographie.

- [ALB60] ALBRECHT P. *New developments in theory of the metal cutting process*. Transactions of the ASME, November 1960, pp. 348-358.
- [ALB65] ALBRECHT P. *Dynamics of the metal cutting process*. Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, November 1965, pp. 429-435.
- [MER45] MERCHANT E. *Mechanics of the metal cutting process*. Journal of Applied Physics, 1945, vol. 16, No. 5, pp. 267-275.
- [MER65] MERRITT H. E. *Theory of self-excited machine tools chatter*. Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, November 1965, pp. 447-454.
- [POD70] PODOURAEV V.N. La coupe avec vibrations. Moscou, Machinostroénié, 1970, 351 p. (en russe).

DOCUMENT REPONSE 3



GEMMA Cellule flexible de Tournage

Fonctionnement normal

Mise en sécurité ou maintien de la disponibilité sur défalliance

DOCUMENT REPOSE 4

