

SESSION 2011

**AGRÉGATION
CONCOURS EXTERNE**

Sections : GÉNIE MÉCANIQUE / MÉCANIQUE

ÉPREUVE D'AUTOMATIQUE-INFORMATIQUE INDUSTRIELLE

Durée : 6 heures

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

L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.

Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.

De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.

NB : Hormis l'en-tête détachable, la copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.

Robot de traite automatique Astronaut A3

I. Contexte de l'étude

Aujourd'hui les défis que les producteurs laitiers doivent relever en terme de volume de production, de prix du lait, de respect des réglementations sur l'environnement, de mesures d'hygiène ou de « bonnes pratiques » envers les animaux ont induit des bouleversements dans la gestion des exploitations laitières.

Parallèlement à ces évolutions, les agriculteurs ont impulsé une dynamique nouvelle visant à améliorer leur condition de vie, à réduire la part des travaux pénibles et répétitifs et à ne plus être astreints aux traites quotidiennes. Cette volonté trouve sa justification dans le désir de disposer de plus de temps soit pour diversifier les activités de l'exploitation, soit pour profiter de plus de temps libre et ce tout en augmentant la production et la qualité des produits fournis.

Pour répondre à ces nouveaux besoins, des entreprises, dont l'entreprise Lely, ont développé des systèmes d'alimentation, de nettoyage, de pâturage automatiques et surtout de traite automatique, comme le robot de traite Astronaut A3, support de cette étude.

Une dizaine d'années après l'introduction du premier robot de traite, des études mettent en évidence une amélioration de la santé physique et psychique des producteurs laitiers, un gain de temps d'environ deux heures par jour pour un troupeau de 60 vaches laitières, temps mis à profit pour passer plus de temps en famille (84 %), pratiquer une activité de loisir (sport, culture, ...) (62%), développer une autre activité professionnelle (56%).

II. Principe général de la traite automatique

Le principe de la traite automatique est de laisser à la vache la liberté de choisir le moment où elle souhaite être traitée et donc de circuler librement dans l'exploitation.

Lorsqu'elle le décide, la vache se présente devant la porte d'entrée du box de traite amorçant ainsi le processus de traite. À l'issue de la traite, la vache sort du box et peut, selon son choix, aller se reposer, s'alimenter ou rejoindre le reste du troupeau.

Le choix d'une traite automatique réalisée par un robot de traite présente un certain nombre d'avantages et d'inconvénients décrits ci-dessous :

- les inconvénients :
 - réforme de vaches dont les caractéristiques morphologiques sont incompatibles avec la connexion des gobelets aux trayons (voir figure 1 ci-contre) ou de vaches refusant la traite automatique ;

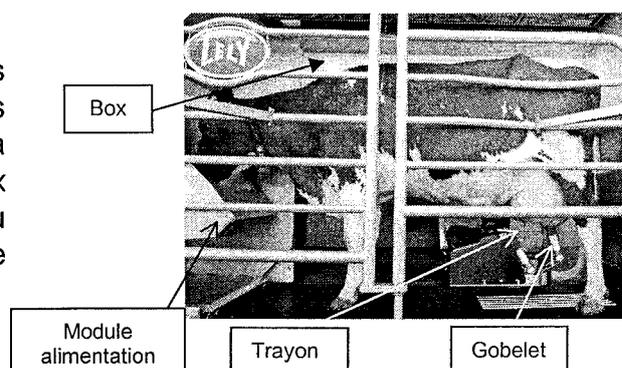


Figure 1. Vache en situation de traite

Automatique et Informatique Industrielle

- problèmes inhérents à l'introduction du robot de traite (utilisation, maintenance, entretien, réapprovisionnement consommables, échecs connexions, pannes, ...) qui peuvent pénaliser la production laitière ;
 - animaux moins habitués à être manipulés ;
 - nécessité de maintenir une activité physique pour éviter les boiteries.
- les avantages
- augmentation de 10 à 15 % de la production laitière par vache du fait de la multiplication des traites par jour (quasiment trois contre seulement deux pour les traites manuelles) ;
 - amélioration de l'état général des vaches par réduction du nombre de mammites (inflammation des trayons de la vache) ;
 - animaux plus calmes du fait de la diminution des interactions de dominance inhérentes au confinement précédent les traites manuelles ;
 - réduction du coût global d'une traite dans les pays où la main d'œuvre n'est pas bon marché, solution économiquement viable pour les exploitations familiales.

L'apport d'un robot de traite vis-à-vis des contraintes des producteurs laitiers justifie le développement rapide actuel. Plusieurs acteurs industriels se partagent le marché des robots de traite dont l'entreprise Lely, qui est aujourd'hui le leader mondial avec son nouveau robot de traite Astronaut A3.

III. Robot de traite Astronaut A3

1. Présentation

Le robot de traite Astronaut A3 est un système de traite automatique assurant, d'une part, la traite des vaches et, d'autre part, l'alimentation et le contrôle de la qualité du lait.

La figure 2 présente le robot de traite Astronaut A3, support de notre étude.

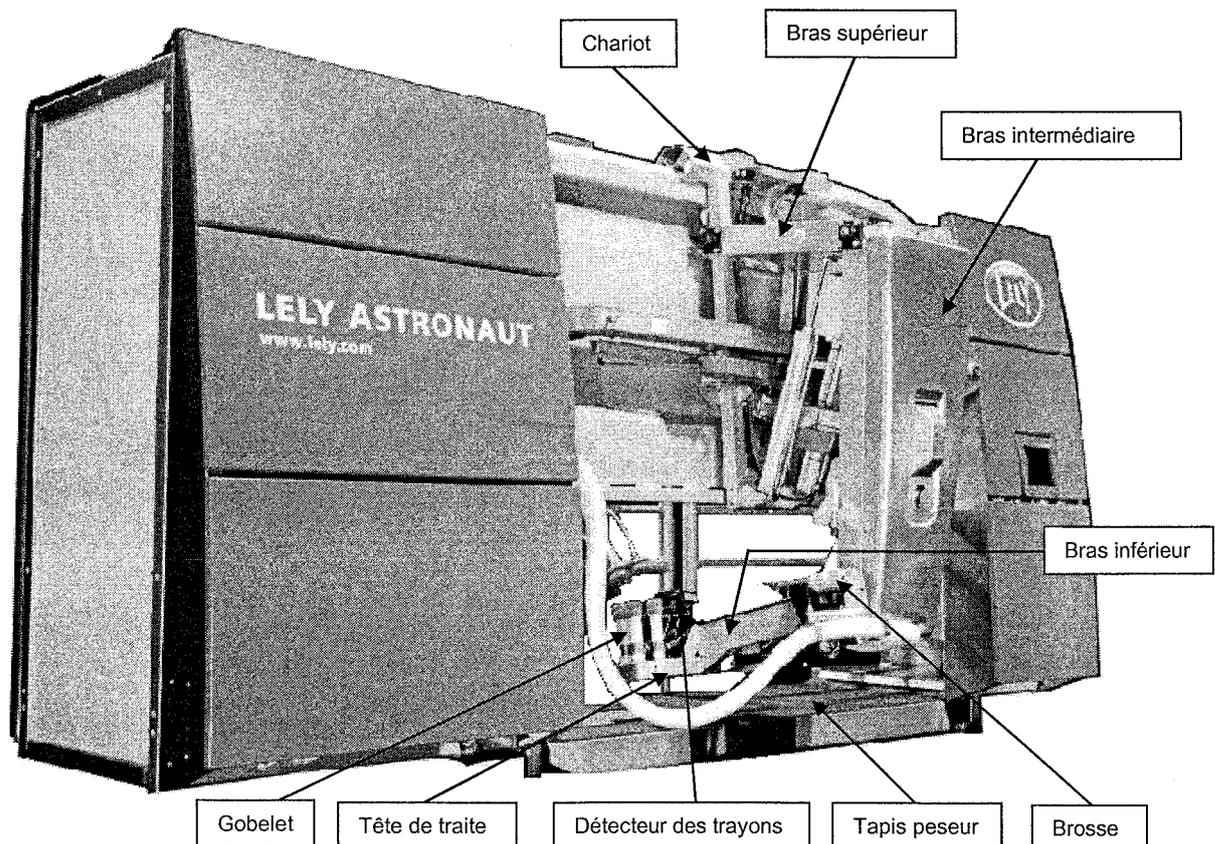


Figure 2. Robot de traite Astronaut A3

2. Structure générale

Le robot de traite Astronaut A3 est composé (voir figures 1 & 2) :

- d'un **box**, terme qui désigne la zone où est installée la vache lors d'une traite (voir figure 1 qui est la partie arrière du robot présenté figure 2). Il s'agit d'un cadre en métal équipé de deux portes, une d'entrée et une de sortie, d'une balance et d'un module d'alimentation ;
- du **bras du robot** qui assure le positionnement correct des gobelets pour leur branchement sur les trayons de la vache. Il possède trois parties élémentaires :
 - o le **chariot** qui relie le bras au box et permet des mouvements horizontaux du bras. Ce chariot est monté sur des galets qui réalisent la liaison glissière horizontale, un vérin pneumatique commande le déplacement de ce chariot. Le système de contrôle du bras est installé sur le chariot ;
 - o le **bras** qui se compose de quatre éléments :
 - le bras supérieur en liaison pivot d'axe horizontal par rapport au chariot. Deux vérins montés en parallèle entre le chariot et le bras supérieur assurent les déplacements du bras supérieur ;
 - le bras intermédiaire, lié au bras supérieur par une liaison pivot. Un vérin monté entre le bras intermédiaire et le chariot assure les déplacements du bras intermédiaire ;
 - le bras inférieur, en liaison complète avec le bras intermédiaire, qui porte le système de branchement aux trayons, le système pulsateur, le système de nettoyage (brosses) et la tête de traite ;
 - la tête de traite, constituée des gobelets et du système de détection des trayons qui détecte les positions des trayons de la vache par balayage laser 3D à triangulation. Ce système de détection indique au système de branchement aux trayons la position correcte à atteindre par les gobelets.
- d'une **interface** entre l'utilisateur et le robot sous forme d'un écran tactile, panneau de contrôle X link. Il affiche toutes les commandes et informations nécessaires au fonctionnement et à l'entretien du robot.

3. Analyse fonctionnelle partielle externe

L'environnement du robot de traite automatique Astronaut A3 est décrit par le diagramme des inter-acteurs suivant, proposé sous forme partielle (voir figure 3).

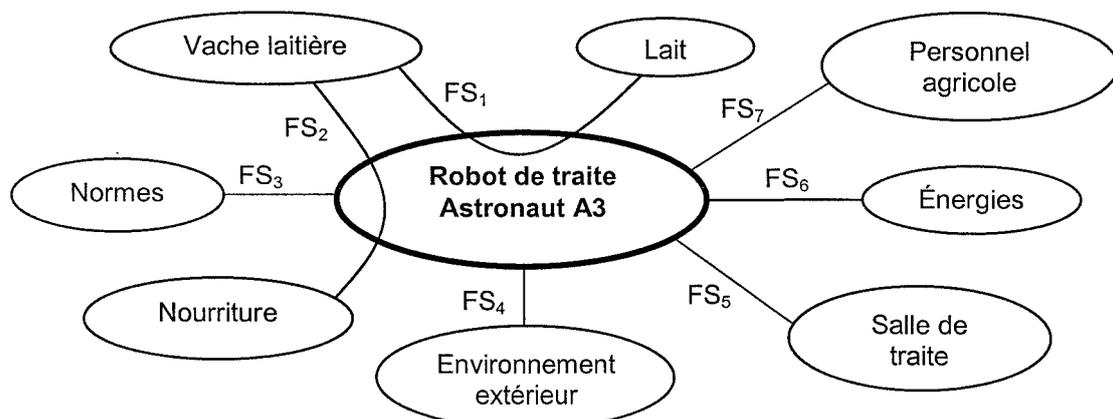


Figure 3. Diagramme partiel des inter-acteurs du bras à trois degrés de liberté

Les énoncés des fonctions de service identifiées sont les suivants :

FS_i	Énoncé de la fonction de service
FS ₁	Traire automatiquement une vache à sa demande
FS ₂	Distribuer automatiquement de la nourriture à la vache lors de la traite
FS ₃	Respecter les normes
FS ₄	Résister aux agressions de l'environnement extérieur (eau, boue, urine, ...)
FS ₅	S'adapter à la salle de traite
FS ₆	Être alimenté en énergies électrique et pneumatique
FS ₇	Permettre la communication avec le personnel agricole

Figure 4. Description des fonctions de service

IV. Enjeux liés à l'implantation d'un robot de traite dans une exploitation

La pertinence économique de l'installation d'un robot de traite automatique est directement liée, d'une part, au nombre de vaches pouvant être traitées en une journée par le robot et, donc au temps nécessaire à la réalisation d'une traite et, d'autre part, à la qualité du lait produit.

L'évaluation de la capacité de traite d'un robot Astronaut A3, préalable à toute installation d'un robot de traite dans une exploitation laitière, est proposée dans la partie I.

Deux problématiques fondamentales se dégagent alors :

- optimiser le temps nécessaire à la réalisation d'une traite ;
- assurer une production laitière abondante et de grande qualité.

L'optimisation du temps nécessaire à la réalisation d'une traite impose de remplir plusieurs fonctions telles que :

- assurer un positionnement rapide du bras du robot sous la vache ;
- garantir une connexion rapide des gobelets sur les trayons de la vache ;
- assurer une traite continue et complète indépendamment des interactions entre la vache et le robot de traite Astronaut A3.

La problématique liée à la connexion rapide des gobelets est abordée dans la partie II, celle dédiée à la réalisation d'une traite continue et complète indépendamment des interactions entre la vache et le robot de traite Astronaut A3 est abordée dans la partie III.

Pour garantir la réussite de l'installation d'un robot de traite, cette première problématique associée aux performances du bras du robot Astronaut A3 doit être couplée à une problématique dédiée à la productivité globale.

La production d'un lait de grande qualité et en quantité suffisante pour garantir la pérennité d'une exploitation impose un certain nombre de précautions :

- le nettoyage des trayons par brossage mécanique avant chaque traite, plus efficace que les simples pulvérisations d'eau afin de réduire les pathologies associées aux trayons des vaches ;
- la pulvérisation après chaque traite pour éliminer tout risque d'infection ;
- le rejet des premiers jets de lait produit par chaque trayon afin d'améliorer la qualité du lait ;
- la surveillance de la qualité du lait en continu par des mesures de conductivité et de couleur, cette surveillance permet aussi d'adapter la durée de la traite à chaque trayon.

Cette problématique dédiée à la préservation de la qualité du lait est abordée dans la partie II consacrée à la modélisation du fonctionnement propre aux opérations de connexion des gobelets et de gestions respectives des durées de traite et définition des débits de lait du robot Astronaut A3.

Travail demandé

1. Le sujet comporte quatre parties indépendantes, elles-mêmes, constituées de nombreuses questions qui peuvent être traitées séparément.

La première partie s'intéresse à la validation de l'implantation d'un robot de traite Astronaut A3 dans une exploitation agricole laitière et à la caractérisation des actions préliminaires nécessaires à la réalisation d'une traite.

La deuxième partie est dédiée à la modélisation du fonctionnement propre aux opérations de connexion des gobelets, de gestions des durées de traite et de circulation du lait par le robot Astronaut A3.

La troisième partie est consacrée à la problématique dédiée à la réalisation d'une traite continue et complète indépendamment des interactions entre la vache et le robot de traite Astronaut A3.

La quatrième partie est consacrée à une synthèse de l'étude menée sur le robot de traite Astronaut A3.

2. Tous les développements de calculs seront réalisés sous forme littérale avant de passer à l'application numérique. Les résultats seront encadrés sur la copie.

PREMIÈRE PARTIE

Validation de l'implantation et des mesures préliminaires à toute traite

Objectif : valider l'implantation d'un robot Astronaut A3 dans une exploitation agricole et caractériser les grandeurs préliminaires à la mise en œuvre d'une traite.

Question 1 : Établir un diagramme de type FAST décrivant les fonctions des différents composants du robot Astronaut A3. Vous vous limiterez à trois niveaux de fonctions.

1.1. Implantation du robot dans une exploitation laitière

Le robot de traite Astronaut A3 est conçu pour fonctionner 20 heures sur 24 heures. Avec ce mode opératoire, les vaches sont traitées en moyenne 2,5 fois / jour et la durée moyenne d'une traite est de 6 min.

Le fonctionnement du robot de traite Astronaut A3 du point de vue des vaches peut être décrit, à ce stade, comme une succession de traites et de nettoyages pendant lesquels le box n'est pas accessible. Ces nettoyages permettent de garantir l'hygiène de l'espace de traite et donc une grande qualité du lait.

Deux types de nettoyage sont réalisés :

- les nettoyages simples à l'eau chaude qui sont exécutés toutes les 5 traites. Ils durent 4 minutes pendant lesquelles seules les parties en contact avec le lait sont lavées ;
- les nettoyages complets qui sont exécutés toutes les 20 traites. Ils permettent le nettoyage de l'ensemble du robot avec des agents nettoyants. Ces opérations durent 10 minutes. Un nettoyage complet est effectué après les 20 heures de fonctionnement quel que soit le nombre de traites effectuées.

Question 2 : Déterminer le nombre de traites que peut effectuer le robot sur une plage d'utilisation de 20 heures. En déduire la taille maximale du troupeau lors de l'implantation d'un robot Astronaut A3.

Afin de ne pas surcharger le robot Astronaut A3 et limiter l'utilisation à une durée inférieure à 20 heures sur 24, la taille maximale du troupeau est fixée à 60 vaches par robot.

La plage de traite d'une vache s'étend tout au long de la période de lactation qui débute par le vêlage et dure environ 10 mois. La production moyenne sur une lactation est de 7 000 litres. Durant la période de lactation maximale, la production journalière maximale d'une vache peut atteindre 25 litres, soit 25 kg.

Pour des raisons physiologiques, la dépression pulsée appliquée aux trayons par le robot pour extraire le lait ne doit pas excéder 0,4 bar ce qui induit un débit maximal de lait de 3 l/min.

De façon simplifiée, le cycle de traite peut être décomposé selon les six étapes suivantes :

- arrivée de la vache et mesures préliminaires ;
- brossage et nettoyage des trayons ;
- mise en place des gobelets ;
- traite ;
- désinfection des trayons ;
- sortie de la vache.

En moyenne, l'entrée de la vache dans le box s'effectue en 30 secondes et sa sortie en 20 secondes. Le brossage et le nettoyage des trayons durent 40 secondes et la désinfection 10 secondes.

Le cahier des charges impose que la connexion des trayons soit réalisée en une minute maximum.

Question 3 : À partir de la situation décrite ci-dessus, déterminer la durée de la phase de connexion des gobelets. Le cahier des charges de la société Lely est-il respecté ?

1.2. Caractérisation des mesures préliminaires

À l'arrivée de la vache dans le box, le robot Astronaut A3 lit son code personnel enregistré dans son collier et télécharge les données concernant les dix traites précédentes :

- heure ;
- durée ;
- poids de lait obtenu ;
- caractéristiques du lait (couleur et conductivité) ;
- débit moyen de la traite.

Ces informations concernent aussi les caractéristiques physiques de la vache :

- poids ;
- position du centre de gravité ;
- position des trayons par rapport au centre de gravité ;
- quantité d'aliment absorbé et dosage.

Lors de son entrée dans le box, une série de mesures préliminaires est initiée afin de calculer la nouvelle position du centre de gravité de la vache. Cette information est alors transmise au robot qui en déduit les positions des trayons à atteindre.

Lors de la traite, la vache dans le box est placée sur un plateau peseur. Ce plateau repose sur trois capteurs de charge, 1 à l'avant : $C_{p_{av}}$, et deux à l'arrière : $C_{p_{ard}}$ et $C_{p_{arg}}$ (voir figure 5).

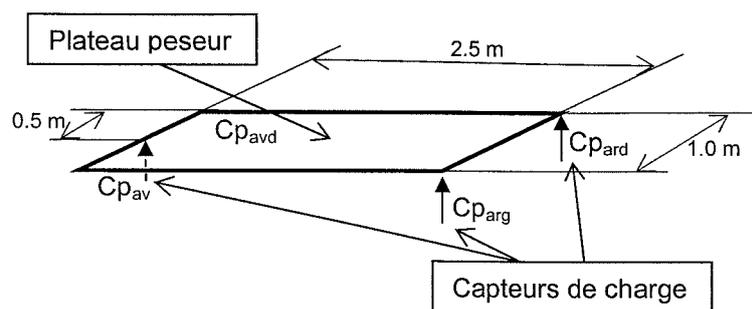


Figure 5. Structure du plateau peseur

À l'occasion de l'entrée d'une vache, le tapis peseur renvoie les mesures suivantes :

$$C_{P_{av}} = 264 \text{ daN}, C_{P_{ard}} = 108 \text{ daN}, C_{P_{arg}} = 228 \text{ daN}.$$

Question 4 : Déterminer la position du centre de gravité de la vache en projection dans le plan du plateau.

Dans un premier temps, le bras du robot place la tête de traite, support des gobelets et du système de détection des trayons (voir photo figure 6) sous la vache en avant de la mamelle.

Ce plateau est alors animé d'un mouvement vertical d'allers-retours pour la localisation des trayons. Chaque gobelet est ensuite placé sous le trayon correspondant (position approche). Un mouvement vertical permet alors au gobelet de se connecter.

La position de la tête de traite est définie par les coordonnées de son centre de gravité G_4 .

Au début de la phase de localisation des trayons ce point doit se situer à 50 mm sous l'extrémité du trayon le plus bas et à 200 mm en avant des trayons avant dans leur plan médian.

Le passage de la position basse de détection à la position approche des trayons se fait uniquement par un déplacement horizontal.

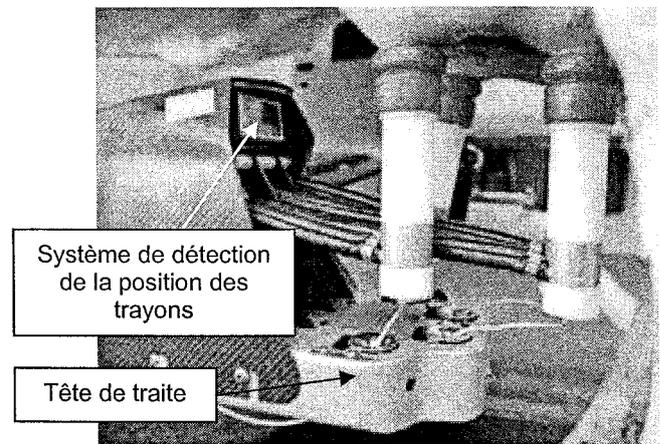


Figure 6. Plateau et gobelets en position de traite

Lorsque le bras est au repos, la position du point G_4 est donnée par la figure 7. Le point G_4 est à 300 mm du sol. Sur cette figure, les gobelets ($G_{ob_{avd}}$, $G_{ob_{avg}}$, $G_{ob_{ard}}$, $G_{ob_{arg}}$) sont représentés par rapport au point G_4 lorsque la tête de traite est horizontale.

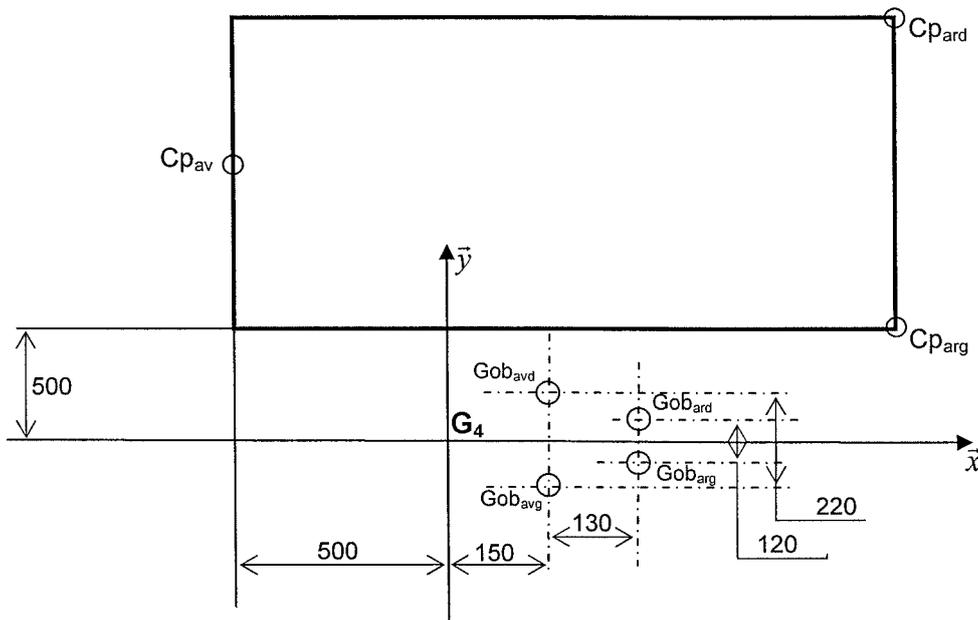


Figure 7. Position de la tête de traite et des gobelets

Les informations enregistrées à propos des quatre trayons (t_{avd} , t_{avg} , t_{ard} , t_{arg}) sont leurs coordonnées dans le plan horizontal par rapport au centre de gravité de la vache ainsi que la distance verticale de l'extrémité inférieure du trayon (h) par rapport au sol (voir tableau figure 8).

À l'occasion de la traite d'une vache, les informations suivantes associées à la position de ses trayons sont téléchargées :

	t_{avd}	t_{avg}	t_{ard}	t_{arg}
x	200	200	350	350
y	80	-80	80	-80
h	410	400	420	400

Figure 8. Coordonnées des trayons

Question 5 : Déterminer les coordonnées de la position que doit prendre le point G4 par rapport à sa position repos pour placer la tête de traite dans la position de détection des trayons.

Question 6 : En supposant que les moyennes des positions des dix dernières mesures confirment les positions actuelles, déterminer les coordonnées des 4 positions que doit prendre le point G4 par rapport à sa position d'origine pour placer chaque gobelet sous le trayon correspondant. Les calculs seront détaillés, les résultats seront présentés sous forme de tableau.

Le système de détection de la position des trayons est effectué par un balayage laser 3D à triangulation.

Question 7 : Expliquer le principe de fonctionnement de ce type de capteur.

La structure du box qui reçoit la vache (poids maxi 750 kg) ne permet pas de déplacements transversaux significatifs contrairement aux déplacements longitudinaux. Ceci impose que le bras du robot suive les déplacements de la vache afin de garantir une traite complète, sans arrachement des gobelets.

Le cahier des charges impose que le robot réagisse pour tout déplacement longitudinal supérieur à 5 cm.

Question 8 : Quelle doit être la résolution des capteurs d'effort sur le tapis peseur ? Proposer différents types de capteurs pouvant convenir à cette mesure de charge sur le tapis peseur.

DEUXIÈME PARTIE :

Gestion d'une traite automatique avec le robot Astronaut A3

Objectif : modéliser le fonctionnement propre aux opérations de connexion des gobelets, de gestion des durées de traite et de circulation du lait par le robot Astronaut A3.

2.1 Étude du cycle d'une traite La vache se présente volontairement à l'entrée du box. L'ouverture de la porte d'entrée valide l'accessibilité du robot de traite. La vache peut donc pénétrer dans le box. Comme décrit dans la partie 1, la vache est placée sur un plateau peseur. Dès que le poids détecté dépasse les 250 kg, la porte du box est refermée. La vache est alors identifiée par son collier et les données la concernant sont téléchargées. À partir de ces informations, la traite est autorisée ou non. Dans le cas où l'intervalle entre deux traites est insuffisant, la porte de sortie s'ouvre libérant la vache. Dès sa sortie du box, les portes de sortie et d'entrée sont respectivement fermée et ouverte.

Si la traite est autorisée, la vache est alors pesée. Les données sont transmises au module de calcul qui détermine :

- la quantité et le dosage de la nourriture qui sera distribuée pendant la traite ;
- la position de la vache ;
- la position des trayons ;
- la position que devra prendre le bras du robot pour commencer les opérations de traite.

Le bras est alors positionné sous la vache pour effectuer le nettoyage des trayons à l'aide de brosses (figures 9 et 10).

Chaque trayon est nettoyé indépendamment. Pour cette opération, le robot place les brosses sous un trayon. Le bras est alors animé d'un mouvement de translation vertical alternatif. Simultanément un produit de nettoyage est pulvérisé.

Les brosses sont animées d'un mouvement de rotation inverse de telle sorte que le trayon passant entre les brosses soit attiré vers le bas.

Le nettoyage terminé, les brosses sont escamotées.

Le bras se met alors en position afin de permettre au système laser de détecter la position des trayons. Pendant ces premières phases les gobelets sont escamotés. Une fois l'acquisition de la position des trayons effectuée, les gobelets sont redressés en position verticale (gobelets rétractés) et l'accrochage des gobelets peut débuter. Cette phase sera décrite plus en détail par la suite.

La fin de la traite est différenciée pour chacun des quatre trayons qui sont respectivement liés à quatre quartiers contenant le lait de la vache. Les critères d'arrêt de la traite d'un quartier seront explicités par la suite.

Lorsque la traite est terminée sur les quatre quartiers, les gobelets sont escamotés afin de procéder au rinçage des trayons.

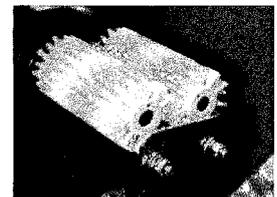


Figure 9. Brosses de nettoyage des trayons



Quartier

Figure 10. Opération de nettoyage des trayons

Automatique et Informatique Industrielle

Le rinçage terminé, le bras revient en position de rinçage des gobelets. Les gobelets, les canalisations et les brosses sont alors nettoyés puis le bras est placé en position d'attente.

Toutes les caractéristiques de la traite sont transmises à l'ordinateur pour mémorisation dans le dossier de la vache. La porte de sortie est ouverte. Les entrées et sorties associées au grafcet dédié au cycle de traite sont données dans le tableau de la figure 11.

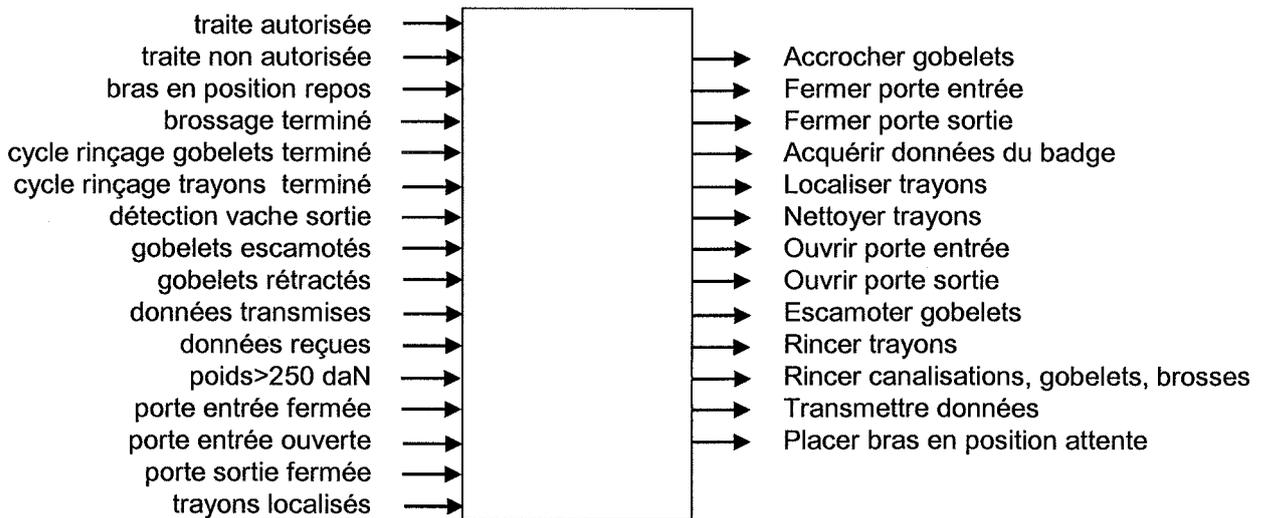


Figure 11. Tableau des entrées et sorties associés au grafcet dédié au cycle de traite

Question 9 : Construire, à partir du tableau définissant les entrées-sorties ci-dessus, un grafcet du point de vue « système » décrivant le cycle de traite. L'accrochage des gobelets sera associé à une macro-étape. Le temps d'un cycle doit être minimisé.

La validation d'une traite est obtenue lorsque la porte de sortie est refermée. Cette opération de fermeture ne doit en aucun cas être perturbée par une quelconque vache. L'utilisation de l'information transmise par le tapis peseur ou d'une temporisation liée à la vitesse de circulation de la vache ne peut garantir la condition de non interférence entre la porte de sortie et les vaches.

Question 10 : Proposer un système de contrôle de la sortie de la vache qui permettra de refermer la porte de sortie sans bloquer la vache, sans la coincer et sans que ce soit une autre vache qui déclenche ce capteur.

2.2 Étude de la connexion des gobelets

Après la localisation des trayons, le bras va connecter les gobelets aux trayons. Le cycle de connexion est le suivant :

- le bras place le premier gobelet à connecter sous le premier trayon (arrière droit, position p_1). Simultanément au mouvement de translation du gobelet devant permettre sa connexion (Appg1), une aspiration par dépression est réalisée dans le gobelet (Aspg1, la pression indiquée est alors dp_1). La connexion du gobelet est validée si la pression mesurée atteint le seuil de dépression (dp_2). Si ce seuil n'est pas atteint lors de la fin de la course de montée du gobelet (indiqué par $fcapp$), le bras se repositionne et recommence le mouvement vertical ;

Automatique et Informatique Industrielle

- afin de réduire le temps de connexion global, la connexion du gobelet 2 est réalisée sur le trayon 2 (arrière gauche : p_2) avant qu'un débit de lait dans le gobelet 1 ne soit détecté ;
- à partir du trayon 2, le robot ne passe au trayon suivant que si le trayon précédent a donné un débit de lait ;
- si un trayon n'a pas donné de lait 10 secondes après avoir été connecté (ce qui est dû généralement à un repli du trayon dans le gobelet) l'aspiration est arrêtée, le gobelet est rétracté en position repos (Retg i) et une nouvelle tentative est effectuée ;
- les gobelets peuvent avoir trois positions sur le plateau :
 - les gobelets sont escamotés pour permettre le broyage, c'est leur position quand le bras est en attente ;
 - ils sont rétractés lorsqu'ils sont prêts à être connectés (position verticale sur le plateau : Retg i) ;
 - ils sont connectés aux trayons, ils restent reliés au plateau par un lien qu'un vérin tire pour les ramener sur le plateau en position rétractée.

La figure 13 représente l'expansion incomplète de la macro-étape M50 dédiée au branchement des gobelets et de la traite de la vache.

La figure 12 décrit la mnémonique des entrées et sorties de l'automate qui gère le robot.

Entrées		Sorties	
Gobelet i en position	pi	Mettre en position gobelet i	Mpg i
Pression d'aspiration gobelet non connecté	dp1	Déclencher aspiration gobelet i	Aspg i
Pression d'aspiration gobelet connecté	dp2	Approcher gobelet i	Appg i
Gobelet i en position repos	repg i	Rétracter gobelet i	Retg i
Alarme transmise	altrans	Signal d'alarme	Alarme
Nombre de tentatives de branchement	Ni	Aspiration pulsée pour traite trayon i	Apul i
Fin de course approche des trayons	fcapp		
Information débit du trayon i	deb i		

Figure 12. Tableau des entrées et sorties associées au grafset dédié à la connexion des gobelets

Dans un premier temps, nous considérons le cycle de branchement des trayons en cours de réalisation. L'état de l'expansion de la macro-étape M50 est {54, 63, 72}.

Question 11 : Expliquer avec précision les événements qui se sont déroulés depuis le début de la macro-étape M50. Indiquer clairement l'état actuel du système.

À partir de cet état, 10 secondes se sont écoulées depuis le début de l'activation de l'étape 62.

Question 12 : Indiquer alors les différentes évolutions possibles de l'expansion de la macro-étape M50 jusqu'à atteindre la situation {54, 64, 74, 82}. Préciser clairement les occurrences qui la font évoluer et les différentes situations atteintes. Cette situation {54, 64, 74, 82} est-elle stable ?

Automatique et Informatique Industrielle

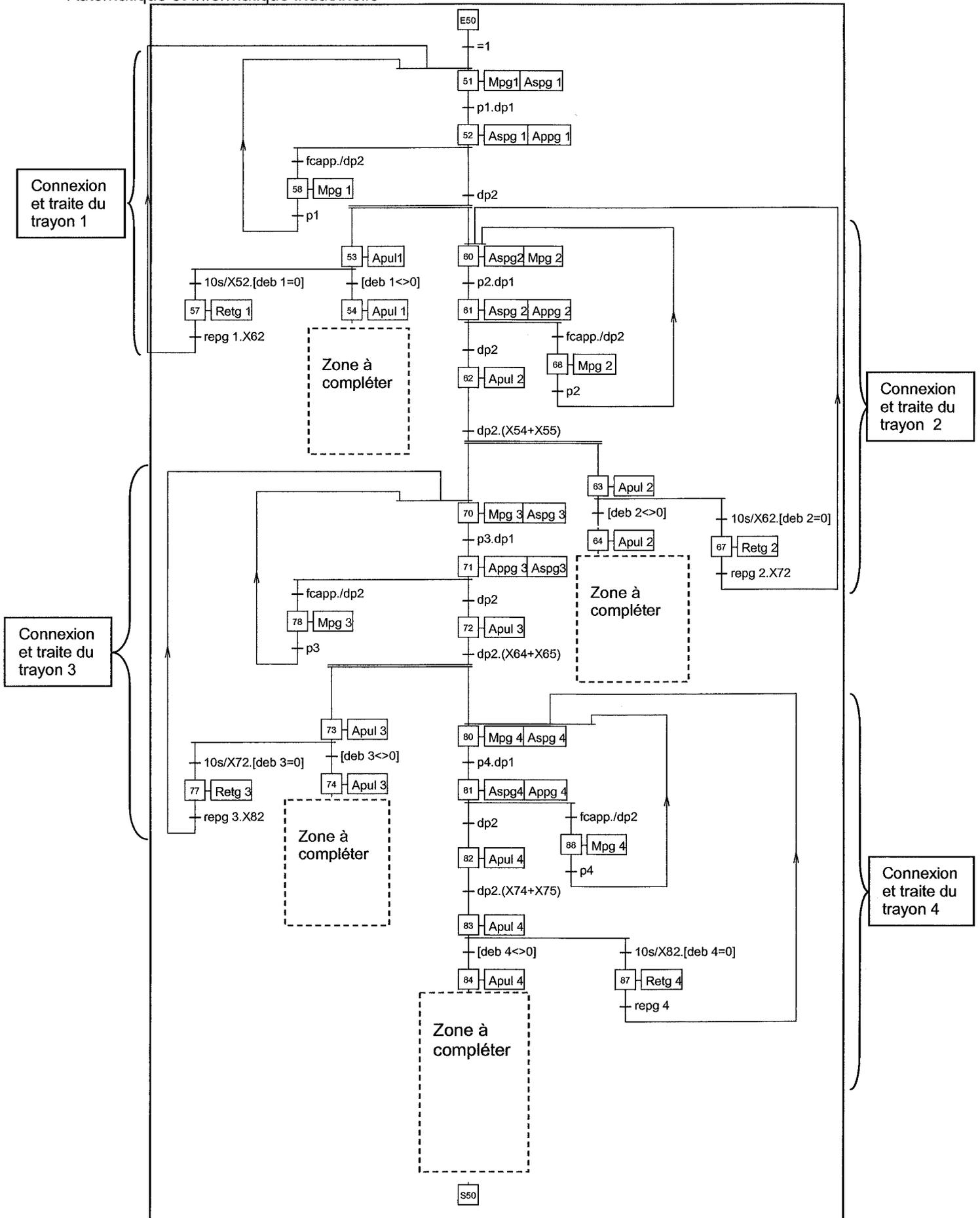


Figure 13. Expansion incomplète de la macro-étape M50

2.3. Étude de la fin de traite d'un quartier

2.3.1. Gestion de la fin de traite d'un trayon

La description du cycle de traite nécessite la modélisation des événements associés à la fin de la traite qui s'effectue de façon différenciée pour chacun des trayons.

La durée de la traite est essentiellement déterminée par la conductivité du lait récolté. Cette conductivité n'est pas la même pour chaque quartier et doit être testée pour chacun des trayons. Deux minutes après la détection d'un débit de lait, le conductimètre donne une conductivité moyenne du quartier associé au trayon i : C_{i_moy} . Cette valeur est attribuée à une variable C_i qui est alors comparée à deux seuils de conductivité :

- un seuil maximum, C_{max} ;
- un seuil minimum, C_{min} .

Une forte conductivité du lait, définie par $C_i > C_{max}$, peut être un signe précurseur de l'inflammation du quartier (mammite). Dans ce cas, le quartier doit être vidé au maximum. Le lait est conservé mais la vache est mise sous surveillance (cette particularité n'est pas prise en compte dans notre étude).

Au contraire, une faible conductivité, $C_i < C_{min}$, indique une faible quantité de matière grasse conduisant à laisser plus de lait dans la mamelle. La traite de ce quartier est alors arrêtée si le débit instantané de lait devient égal au tiers du débit moyen.

Quand la conductivité est entre ces deux seuils, $C_{min} < C_i < C_{max}$, la traite s'arrête lorsque le débit instantané est égal au débit moyen divisé par 5.

Le débitmètre fournit une information permanente du débit instantané du trayon i : $deb\ i$, et du débit moyen : $deb\ i\ moy$.

Variable de conductivité du lait du trayon i	C_i
Information débit donnée par le débitmètre du trayon i	$deb\ i$
Conductivité moyenne mesurée du lait du trayon i	C_{i_moy}
Débit moyen mesuré pour le trayon i	$deb\ i\ moy$
Indice de conductivité minimum	C_{min}
Indice de conductivité maximum	C_{max}

Figure 14. Tableau des variables de fin de traite

Question 13 : Élaborer le grafcet de gestion de la fin de traite du trayon 1 en n'utilisant que les variables et informations du tableau de la figure 14. Ce grafcet sera formé à partir de transitions source et puits. Les grafctes de fin de traite des autres trayons seront à l'image de celui du trayon 1. Préciser la numérotation adoptée pour les étapes dans chaque grafcet.

Question 14 : Compléter alors les 4 zones encadrées dans l'expansion de la macro-étape M50 de la figure 13. Préciser les choix de structure effectués.

2.3.2. Compteur des essais pour alarme

Dans la pratique, des variations de taille des trayons ou des mouvements d'excitation de la vache peuvent empêcher une connexion rapide des gobelets. Pour éviter l'inconfort de la vache, le nombre d'essais de connexion de chaque gobelet est limité à 5 tentatives. À l'issue de ces 5 essais, le système enverra une alarme et replacera le robot en situation d'arrêt d'urgence : bras dans la position d'attente et tous les gobelets déconnectés. La

Automatique et Informatique Industrielle

vache sera maintenue dans le box durant 5 minutes pendant lesquels l'agriculteur pourra intervenir. À l'issue de ce délai, la vache sera libérée. Le robot revient en attente d'une autre vache. L'agriculteur devra intervenir directement sur la vache qui n'a pas été traitée.

Question 15 : Proposer un grafet de comptage utilisant une notation indicielle qui le rend valable pour tous les gobelets. Préciser la solution utilisée pour mettre le robot dans la situation arrêt d'urgence.

2.3.3. Gestion de la circulation du lait

Une des problématiques, lors de l'implantation d'un robot de traite, est d'optimiser la production laitière. Lors de la traite, les premiers jets de lait ne sont pas de bonne qualité, ils sont donc évacués à l'égout.

La quantité de lait à éliminer pour garantir sa qualité est de 250 g par trayon. Cependant le temps nécessaire pour obtenir cette masse de lait à rejeter n'est pas identique pour chacun des trayons, interdisant l'utilisation d'une temporisation.

Afin de réduire au minimum les quantités de lait de bonne qualité rejetées, l'entreprise Lely a choisi d'utiliser l'information transmise par le débitmètre, qui détermine la masse de lait récupérée sur chaque trayon : variable m_i .

Par ailleurs, le lait produit par une vache malade ou en traitement est immédiatement évacué à l'égout.

La figure 15 donne la mnémonique et le grafet de la gestion de l'électrovanne déterminant la circulation du lait.

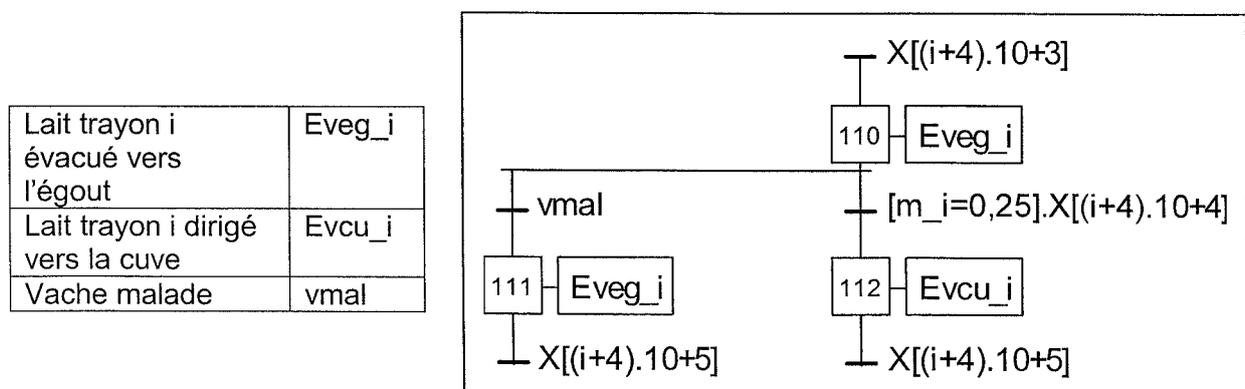
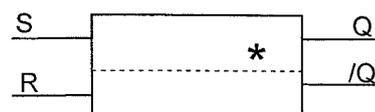


Figure 15. Grafet et mnémonique de la gestion de la circulation du lait

La commande du robot de traite est assurée par un automate programmable industriel. Elle pourrait être réalisée en logique câblée sur des circuits intégrés. Dans ce cas, il faudrait réaliser les logigrammes des différents grafet.

On rappelle le symbole d'une bascule RS (mémoire) avec mise à 1 prioritaire ci-dessous.

S commande la mise à 1, R la mise à 0.
Q est l'état de la mémoire.



Question 16 : Expliquer pourquoi il faut utiliser des bascules à enclenchement prioritaire pour décrire un grafet par logigramme.

Question 17 : Réaliser le logigramme du grafet de gestion de circulation du lait pour le trayon 1.

TROISIÈME PARTIE

Synthèse d'une loi de commande

Objectif : synthétiser une loi de commande assurant l'asservissement et la régulation de la position du chariot 1 lors d'une traite et, ce quelles que soient les interactions entre la vache et le robot de traite Astronaut A3.

Cette partie se décompose en trois études devant permettre d'atteindre l'objectif décrit ci-dessus.

La caractérisation des performances du robot de traite Astronaut A3 impose l'élaboration d'un modèle de simulation afin de décrire le fonctionnement du robot Astronaut A3. Ce modèle de simulation est basé sur la construction d'un modèle de connaissance.

3.1. Construction d'un modèle de connaissance

L'annexe 1 regroupe les documents décrivant la structure, le graphe des liaisons et des efforts, la modélisation cinématique, le paramétrage cinématique du bras du robot Astronaut A3.

L'établissement de ce modèle de connaissance nécessite, d'une part, la description du comportement dynamique du robot à l'aide d'équations différentielles décrivant les différents mouvements du bras du robot de traite Astronaut A3 et, d'autre part, l'écriture des relations liant les tensions d'alimentation des servo-distributeurs et les déplacements des tiges des différents vérins.

Expression des relations géométriques liant les paramètres géométriques associés au robot de traite Astronaut A3

Question 18 : Établir les relations géométriques liant le centre de gravité G_4 de la tête de traite 4 défini par les coordonnées (x_{G4}, y_{G4}, z_{G4}) , les paramètres géométriques x , θ_{21} et θ_{32} et les longueurs L_2 , L_3 et L_4 .

Lors d'une traite, le bras du robot de traite Astronaut A3 est dans une position particulière conduisant aux conditions décrites ci-dessous :

- les mouvements de la vache induisent des variations des angles θ_{21} et θ_{32} autour de cette position initiale faibles, permettant de faire l'approximation :

$$\begin{aligned} \cos \theta_{21} &\approx 1 & \cos \theta_{32} &\approx 1 \\ \sin \theta_{21} &\approx \theta_{21} & \sin \theta_{32} &\approx \theta_{32} \end{aligned}$$

- dans cette position, les angles θ_{51} et θ_{61} prennent respectivement les valeurs particulières θ_{510} et θ_{610} .

Hypothèses supplémentaires :

- la rotation des vérins 5 et 6 est négligée ;
- les vitesses de sortie de tige s'écrivent $\vec{V}_{D50} = \dot{y}_5 \vec{y}_5$ et $\vec{V}_{E60} = \dot{y}_6 \vec{y}_6$;
- les masses respectives m_5 et m_6 des vérins 5 et 6 sont considérées comme négligeables devant celle des pièces 1, 2, 3 et 4.

Automatique et Informatique Industrielle

Question 19 : Établir la relation géométrique permettant de définir la longueur $L_5(t)$ en fonction des paramètres géométriques θ_{21} , θ_{510} et des longueurs l_2 et L_{50} où L_{50} correspond à la longueur L_5 lorsque le robot de traite automatique Astronaut A3 est en position de traite initiale.

Question 20 : À partir des hypothèses définissant les conditions de traite, en déduire une relation entre la course des vérins 5, définie par $y_5(t) = L_5 - L_{50}$, la longueur l_2 et l'angle θ_{21} . Expliciter clairement la (ou les hypothèses) permettant d'écrire cette relation.

Question 21 : En déduire la relation entre la course du vérin 6, définie par $y_6(t) = L_6 - L_{60}$, la longueur l_3 et l'angle θ_{32} où L_{60} correspond à la longueur L_6 lorsque le robot de traite automatique Astronaut A3 est en position de traite initiale.

Équations différentielles décrivant le comportement dynamique du robot de traite Astronaut A3

Les hypothèses, introduites ci-dessus, restent valables et sont complétées par l'hypothèse suivante :

les vérins 1, 5 et 6 sont commandés séparément.

Question 22 : Proposer une démarche de résolution permettant d'écrire les expressions des actions mécaniques $F_{V_1/1}$, $F_{V_5/2}$, $F_{V_6/3}$ associées aux différents vérins 1, 5 et 6.

La méthode et les outils utilisés sont laissés à l'initiative du candidat qui veillera à préciser clairement les hypothèses, l'ensemble isolé, le principe et/ou le théorème à utiliser (avec éventuellement le point de calcul) et la direction de projection pour chacune des trois actions mécaniques à caractériser.

Question 23 : Écrire l'équation différentielle liant l'effort $F_{V_1/1}(t)$ développé par le vérin V_1 , la position de la tige du vérin 1, $x(t)$ et ses dérivées successives, une perturbation extérieure $F_p(t)$, la masse équivalente M_{1Equ} , à définir en fonction de m_1, m_2, m_3 et m_4 , et le coefficient de frottement visqueux f_{10} .

Question 24 : Écrire l'équation différentielle liant l'effort $F_{5/2}(t)$ développé par les vérins V_5 , la course des vérins 5, $y_5(t)$ et ses dérivées successives, la masse équivalente M_{5Equ} et le coefficient de frottement visqueux équivalent b_{5Equ} à définir en fonction des différents paramètres $A_2, A_3, A_4, m_2, m_3, m_4, L_2, L_3, L_4, l_2$ et b_{21} .

Automatique et Informatique Industrielle

Quelles que soient les réponses obtenues aux questions précédentes, le système d'équations différentielles retenu pour la suite est le suivant :

$$\begin{cases} M_{1\text{Equ}} \ddot{x}(t) + f_{10} \dot{x}(t) = F_{V_{1/1}}(t) - F_p(t) \\ M_{5\text{Equ}} \ddot{y}_5(t) + b_{5\text{Equ}} \dot{y}_5(t) = F_{V_{5/2}}(t) + F_{0\ V_{5/2}} - \left(\left(\frac{m_2}{2} + m_3 + m_4 \right) L_2 - m_4 L_4 \right) \frac{g}{l_2} \\ M_{6\text{Equ}} \ddot{y}_6(t) + b_{6\text{Equ}} \dot{y}_6(t) = F_{V_{6/3}}(t) + F_{0\ V_{6/3}} + \frac{m_4 g L_4}{l_3} \end{cases}$$

Question 25 : Justifier, en précisant la démarche retenue, la nouvelle écriture du système d'équations différentielles décrivant le comportement dynamique du robot de traite :

$$\begin{cases} M_{1\text{Equ}} \ddot{x}(t) + f_{10} \dot{x}(t) = F_{V_{1/1}}(t) - F_p(t) \\ M_{5\text{Equ}} \ddot{y}_5(t) + b_{5\text{Equ}} \dot{y}_5(t) = F_{V_{5/2}}(t) \\ M_{6\text{Equ}} \ddot{y}_6(t) + b_{6\text{Equ}} \dot{y}_6(t) = F_{V_{6/3}}(t) \end{cases}$$

Question 26 : Après avoir explicité les transformées de Laplace des équations différentielles données précédemment, construire les schémas bloc associés aux trois équations différentielles.

Modélisation du comportement des systèmes électropneumatiques

Le système d'équations différentielles décrivant le comportement dynamique du robot de traite Astronaut A3 fait apparaître les efforts développés par les vérins 1, 5 et 6.

Les différents vérins implantés sur le robot de traite Astronaut A3 sont dotés d'un système électropneumatique dédié à la commande des vérins.

Afin d'obtenir un modèle complet liant les tensions d'alimentation des servo-distributeurs aux coordonnées de la tête de traite 4, il est nécessaire de modéliser le comportement de ces systèmes électropneumatiques.

Chacune des différentes chaînes électropneumatiques destinées à mouvoir le robot de traite Astronaut A3 est constituée (figure 16) :

- d'une alimentation en air comprimé commune qui délivre la pression P_s ;
- de deux servo-distributeurs ;
- d'un vérin pneumatique linéaire ;
- de capteurs ;
- d'une carte électronique.

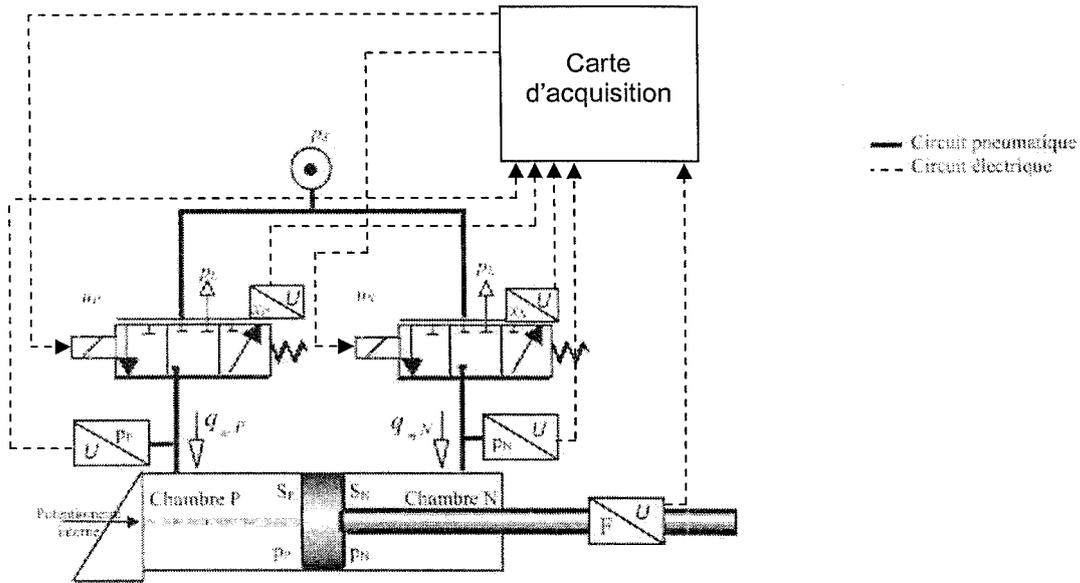


Figure 16. Description de la structure d'une des chaînes électropneumatiques

L'annexe 2 regroupe les informations permettant de définir les caractéristiques de chacun des éléments constituant la chaîne électropneumatique.

L'obtention du modèle de connaissance associé au système électropneumatique nécessite de modéliser le comportement :

- thermodynamique de chacune des chambres pneumatiques de volume variable ;
- électromécanique du servo-distributeur.

La figure 17 présente le modèle non linéaire décrivant le comportement du système électropneumatique sous forme d'un schéma bloc pour une évolution de la pression dans les chambres du vérin considérée comme polytropique.

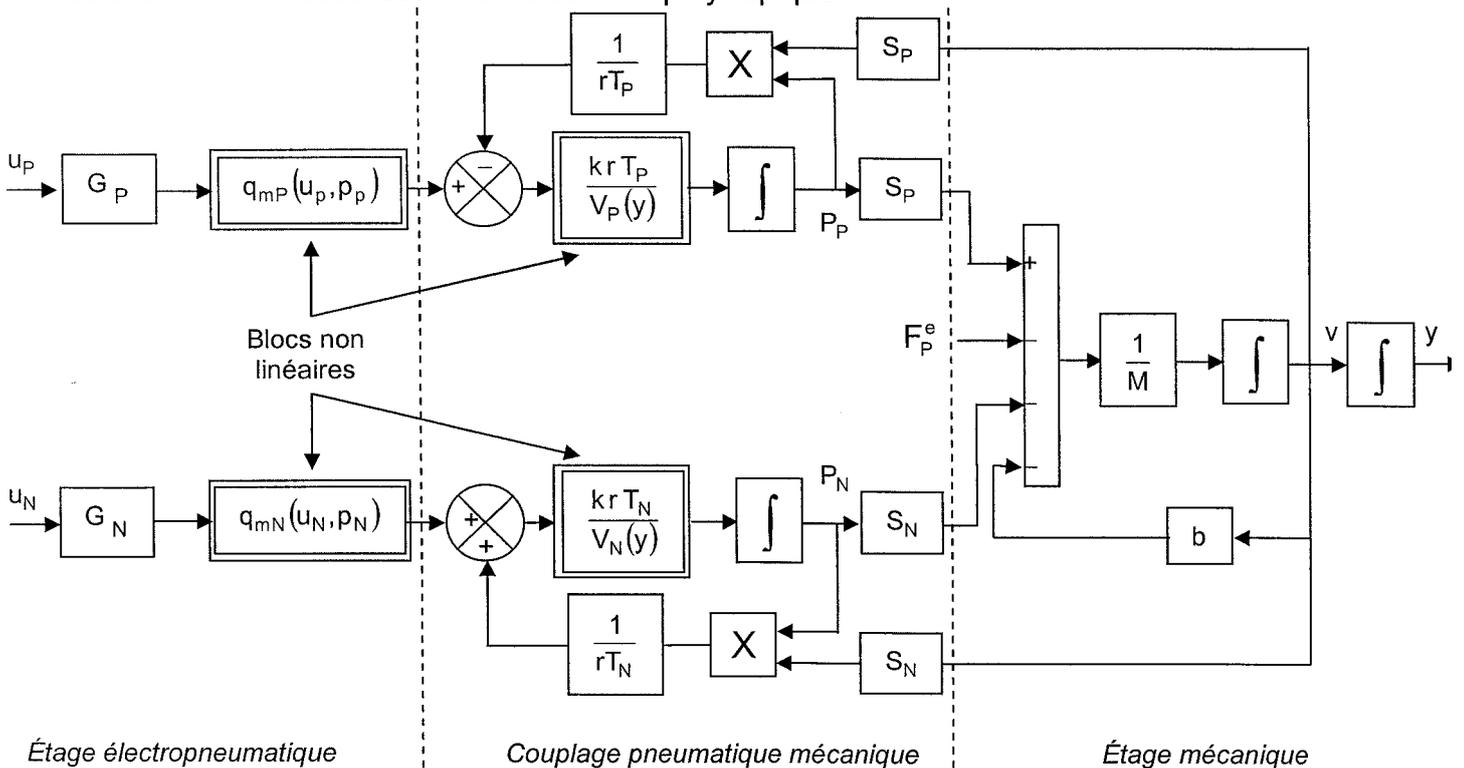


Figure 17. Schéma bloc décrivant le comportement non linéaire du système électropneumatique

Automatique et Informatique Industrielle

Le tableau de la figure 18 décrit les différentes variables et constantes introduites dans le schéma bloc de la figure 17 :

r	Constante des gaz parfaits
k	Coefficient polytropique, $k = 1,2$
v	Vitesse de déplacement de la tige de vérin
i	Indice définissant les chambres du vérin : P ou N
p_i	Pression dans la chambre i
T_i	Température dans la chambre i
$V_i(y)$	Volume de la chambre i pour une position y du vérin
S_i	Section du piston associée à la chambre i
$q_{mi}(u_i, p_i)$	Débit massique de compressibilité dans la chambre i
M	Masse en déplacement
b	Coefficient de frottement visqueux
F_p^e	Effort extérieur

Figure 18. Données liées au modèle non linéaire associé au système électropneumatique

La présence de comportements non linéaires tel que celui du débit massique en fonction de la tension de commande et de la pression dans la chambre ne permet pas, dans un premier temps, d'utiliser les outils de synthèse des lois de commande propres aux systèmes linéaires, continus et invariants.

Dans l'optique de synthétiser les lois de commande destinées à la commande du robot de traite Astronaut A3 à l'aide de ces outils, il est nécessaire de construire un modèle linéaire décrivant le comportement du système électropneumatique.

Hypothèses :

- la pression source est identique pour les deux servo-distributeurs ;
- les températures dans les deux chambres sont considérées comme égales à la température source T_s ;
- les dynamiques de positionnement des tiroirs des servo-distributeurs sont considérées comme négligeables devant la dynamique de positionnement du vérin ;
- les servo-distributeurs sont supposés identiques et symétriques. L'influence des différences de qualité d'usinage, des caractéristiques des électroaimants, des raideurs des ressorts est négligée ;
- les commandes appliquées aux servo-distributeurs P et N seront de signe opposé ;
- les frottements secs sont négligés.

Ces hypothèses permettent de simplifier le modèle complet mais ne permettent pas de rendre ce modèle linéaire.

Un modèle linéaire autour d'un point de fonctionnement est alors établi à l'aide de la méthode dite « du linéarisé tangent ». Cette méthode se décompose en deux étapes distinctes :

o **Première étape : détermination de l'état d'équilibre du système non linéaire étudié**

La position d'équilibre du système électropneumatique est alors déterminée et est définie par :

- y^e : position du vérin à l'équilibre ;
- u^e : tension associée ;

Automatique et Informatique Industrielle

- p_P^e, p_N^e : pressions à l'équilibre dans les chambres P et N ;
- v^e : vitesse à l'équilibre ($v^e = 0$) ;
- $V_P(y^e) V_N(y^e)$: volumes des chambres P et N pour $y = y^e$ avec $V_P(y^e) = V_N(y^e) = V(y^e)$.

o **Seconde étape : écriture d'une approximation linéaire du modèle non linéaire**

Au voisinage de ce point d'équilibre, une approximation de l'évolution du système électropneumatique est effectuée en utilisant un développement en série de Taylor de la fonction non linéaire après le changement de variables :

$$\begin{cases} \delta p_P = p_P - p_P^e & : \text{variation de pression chambre P} \\ \delta p_N = p_N - p_N^e & : \text{variation de pression chambre N} \\ \delta v = v - v^e & : \text{variation de vitesse} \\ \delta y = y - y^e & : \text{variation de position} \\ \delta u = u - u^e & : \text{variation de tension} \end{cases}$$

Cette méthode aboutit à la construction du schéma bloc de la figure 19 où $U(p)$, $\Delta P_P(p)$, $\Delta P_N(p)$, $V_Y(p)$ et $Y(p)$ représentent respectivement les transformées de Laplace des variables $\delta u(t)$, $\delta p_P(t)$, $\delta p_N(t)$, $\delta v(t)$ et $\delta y(t)$ et où G_{ui} et C_{Pi} sont respectivement les coefficients de sensibilité du débit par rapport à la commande et les coefficients de sensibilité du débit par rapport à la pression pour la chambre i.

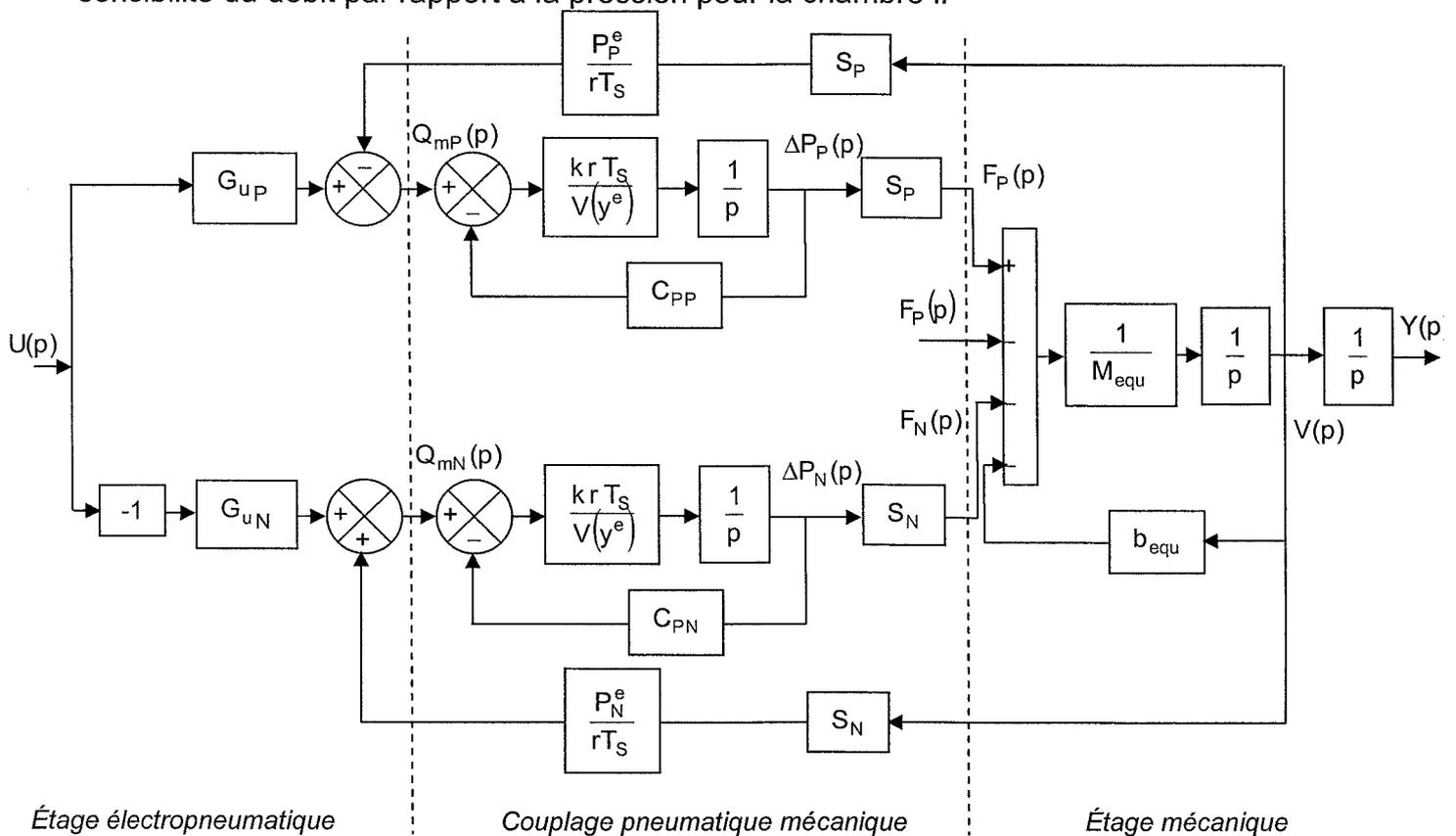


Figure 19. Schéma bloc associé au modèle linéaire décrivant le comportement du système électropneumatique

La fonction de transfert $G(p) = \frac{Y(p)}{U(p)}$ associée au schéma bloc de la figure 19 conduit à un modèle du troisième ordre.

Automatique et Informatique Industrielle

À ce stade de l'étude et, en première approximation, les hypothèses suivantes sont introduites :

Hypothèses :	Conséquences :
Le vérin est symétrique	$S_P = S_N = S$
Les frottements secs sont négligés	$P_P^e = P_N^e = P^e$
Les deux servo-distributeurs sont strictement identiques	$G_{uP} = G_{uN} = G_u, C_{PP} = C_{PN} = C_P$

Question 27 : Simplifier le schéma bloc donné figure 19 et écrire la fonction de transfert $\frac{V(p)}{U(p)}$ pour $F_p(p) = 0$ sous la forme $\frac{K_u}{Ap^2 + Bp^2 + C}$ où les termes A, B, C et K_u seront explicités. En déduire la fonction de transfert $\frac{Y(p)}{U(p)}$.

Question 28 : Écrire la fonction de transfert $P(p) = \frac{V(p)}{F_p(p)}$ pour $U(p) = 0$ sous la forme $\frac{1+Dp}{Ap^2 + Bp + C}$ où le terme D sera explicité. En déduire la fonction de transfert $\frac{Y(p)}{F_p(p)}$.

Question 29 : Montrer que le modèle complet associé à la chaîne de transmission dans la direction \vec{x} peut se mettre sous la forme du schéma fonctionnel donné figure 20 où les termes $F_1(p)$, $G_1(p)$ et $H_1(p)$ seront explicités.

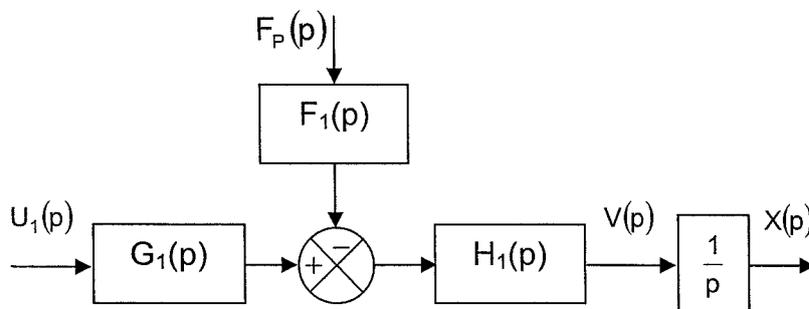


Figure 20. Schéma bloc associé au modèle de comportement dynamique du chariot 1

3.2. Choix d'une architecture de commande compatible avec les spécifications du cahier des charges

La suite de l'étude s'intéresse à la synthèse de la loi de commande destinée à la commande en asservissement et en régulation du chariot 1.

Cette étude se justifie par la nécessité, d'une part, d'asservir la position de la tête de traite 4 lors des déplacements de la vache dans le box, et, d'autre part, de rendre le fonctionnement du bras du robot de traite insensible aux perturbations extérieures.

Lors d'une traite, la vache dispose, du fait de la structure du box, d'une certaine liberté de mouvement selon la direction \vec{x} , ce qui induit qu'à chaque instant la position des trayons de la vache varie d'où la nécessité d'adapter la position de la tête de traite 4. De plus le positionnement de la tête de traite 4 sous la vache l'expose occasionnellement à des coups de patte générant des modifications de la position de la tête de traite 4.

Question 30 : À partir de l'analyse du processus de traite, justifier le fait qu'une commande en chaîne directe ne permette pas d'atteindre le niveau de performances attendu. Plusieurs justifications, pouvant conduire à cette conclusion, sont attendues.

Question 31 : Proposer, sous forme d'un schéma bloc le plus complet possible, une architecture de commande permettant d'atteindre les objectifs en terme d'asservissement et de régulation.

L'architecture de commande retenue pour la synthèse de la loi de commande appliquée au chariot 1 est décrite figure 21.

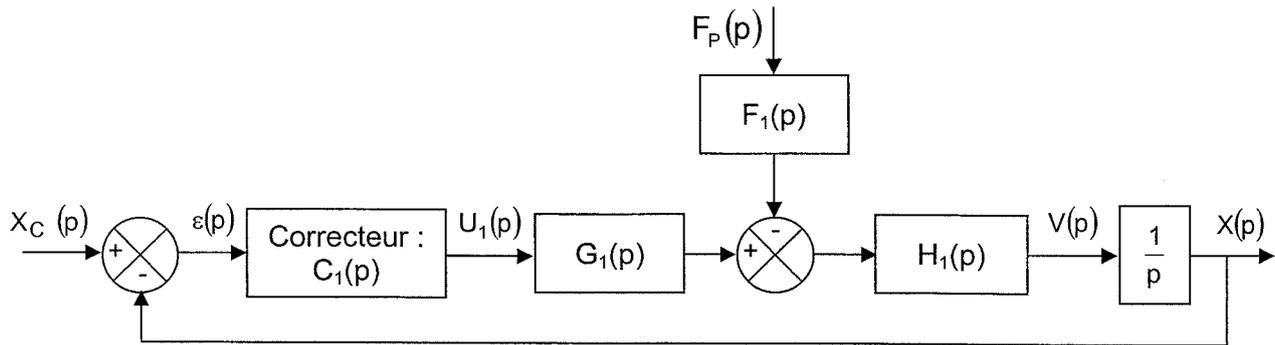


Figure 21. Architecture de commande retenue

3.3. Synthèse de la loi de commande dédiée à l'asservissement et à la régulation de la position du chariot 1

Cahier des charges : Le cahier des charges partiel décrivant les performances associées au chariot 1 est le suivant :

Fonction	Critères	Niveaux et éventuelle flexibilité
FS ₁	Axe N° 1 (translation du chariot 1 par rapport au bâti)	
	Débattement linéaire assuré par le vérin 1	2 m
	Stabilité de l'axe	$M_\phi > 60^\circ$
	Amortissement de l'axe	Aucun dépassement transitoire permis
	Précision de positionnement de l'axe	Erreur (*) inférieure à 1% en régime stationnaire et en réponse à un échelon
	Rapidité de l'axe	Pulsation au gain unité : $\omega_u = 10 \text{ rad.s}^{-1}$

(*) différence entre la sortie et l'entrée

3.3.1. Synthèse d'un correcteur à action proportionnelle

La première étude proposée s'intéresse à la synthèse d'un correcteur à action proportionnelle défini par $C_1(p) = K_1$.

3.3.1.1. Rejet des perturbations

Question 32 : À partir du schéma-bloc proposé figure 21 et des expressions de $F_1(p)$, $G_1(p)$ et $H_1(p)$, exprimer la fonction de sensibilité vis-à-vis de la perturbation définie par $\frac{X(p)}{F_P(p)}$ en fonction de A, B, C, D, K_u et K_i .

Question 33 : Proposer un modèle mathématique pour $F_P(p)$ modélisant un coup de patte subi par la tête de traite 4.

Question 34 : Un correcteur à action proportionnelle de gain K_1 permet il d'annuler les effets de la perturbation vis-à-vis de la position de la tête de traite ?

3.3.1.2. Étude en asservissement

Les figures 22 et 23 présentent respectivement le comportement fréquentiel de la boucle ouverte et l'évolution de la position du chariot 1 pour un échelon de position de 0,01 m pour $C_1(p)=K_1=1$.

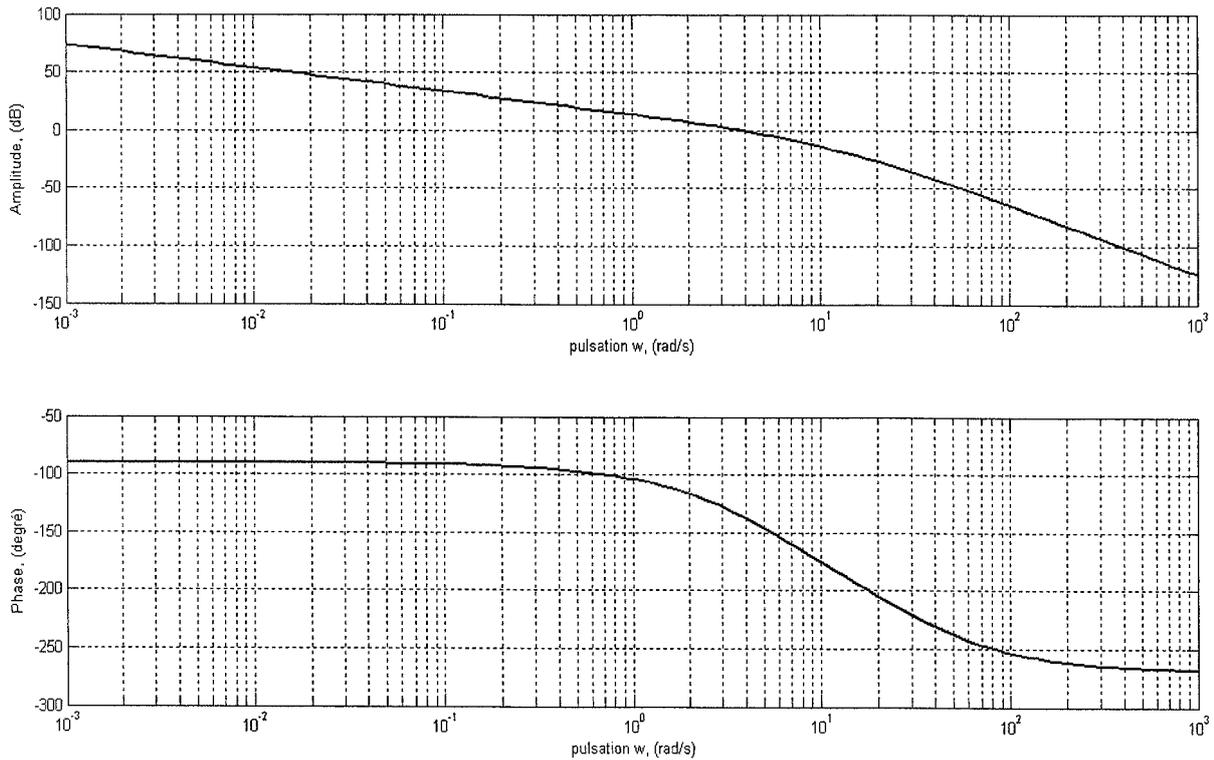


Figure 22. Diagramme de Bode de la boucle ouverte $\frac{X(p)}{\varepsilon(p)}$ avec le correcteur $C_1(p)=K_1=1$

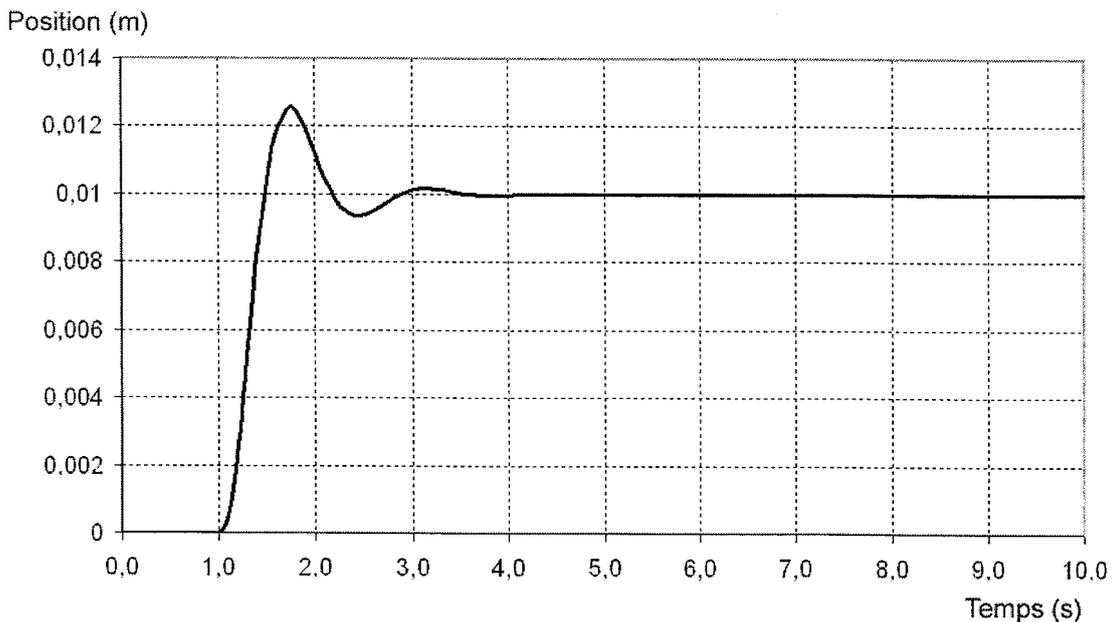


Figure 23. Évolution de la position du chariot 1 pour un échelon de position de 0,01 m avec $C_1(p)=K_1=1$

Question 35 : Le correcteur à action proportionnelle de gain unitaire permet-il de respecter les spécifications du cahier des charges ?

Question 36 : Déterminer la valeur de K_1 permettant de respecter la spécification de rapidité. En déduire la valeur de la marge de phase $M\phi$. Tracer l'allure de l'évolution de la position du chariot 1 pour la valeur de K_1 trouvée.

Question 37 : Au vu des résultats précédents, est-il possible de valider le choix d'un correcteur à action proportionnelle ? Si non, quel type de correcteur faudrait-il implanter pour améliorer les performances du bras du robot de traite Astronaut A3 ? Justifier votre réponse.

3.3.2 Synthèse d'un correcteur à actions proportionnelle-dérivée

La seconde étude proposée s'intéresse à la synthèse d'un correcteur à action

proportionnelle-dérivée défini par $C_2(p) = K_2 \frac{1 + \frac{p}{\omega_b}}{1 + \frac{p}{\omega_h}}$.

3.3.2.1. Étude en asservissement

Question 38 : À partir des spécifications de rapidité et de stabilité imposées par le cahier des charges, déterminer les paramètres K_2 , ω_b et ω_h .

Les figures 24 et 25 proposent respectivement le diagramme de Bode de la boucle ouverte corrigée et l'évolution de la position du chariot 1 avec le correcteur à action proportionnelle-dérivée synthétisé ci-dessus.

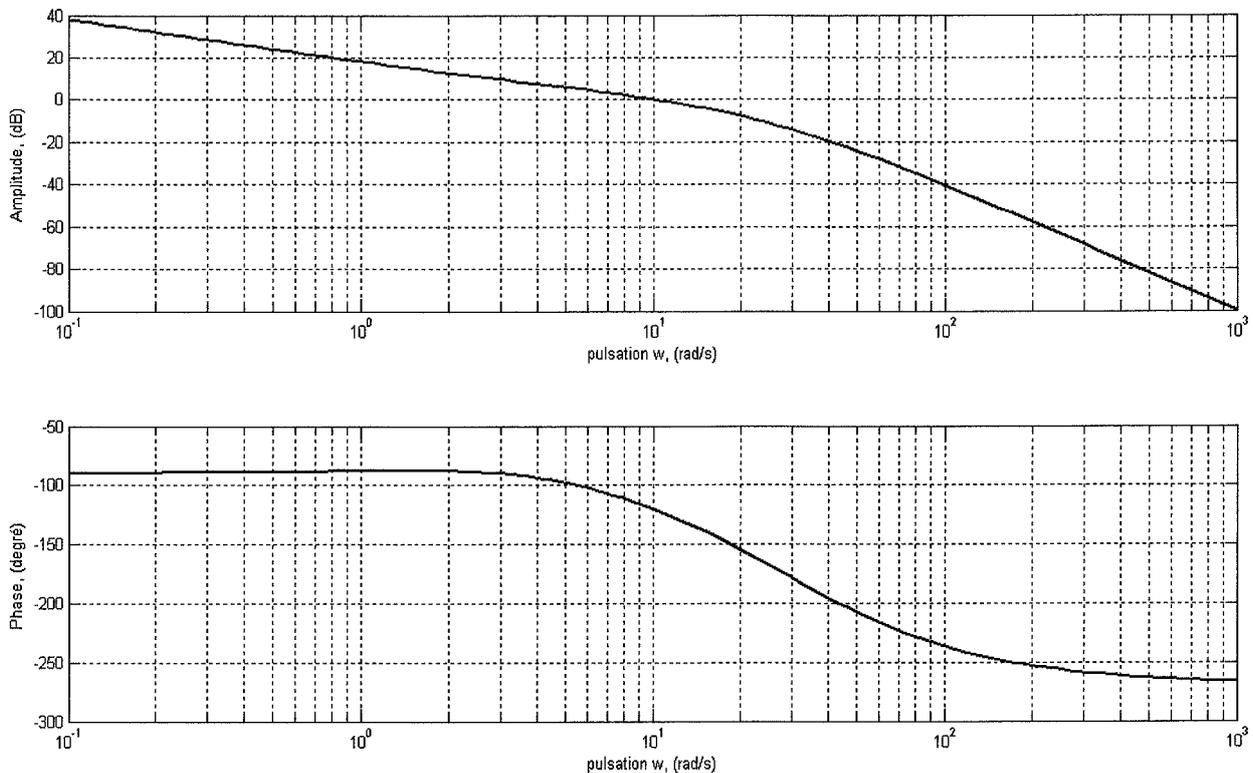


Figure 24. Diagramme de Bode de la boucle ouverte corrigée avec le correcteur à action proportionnelle-dérivée $C_2(p)$

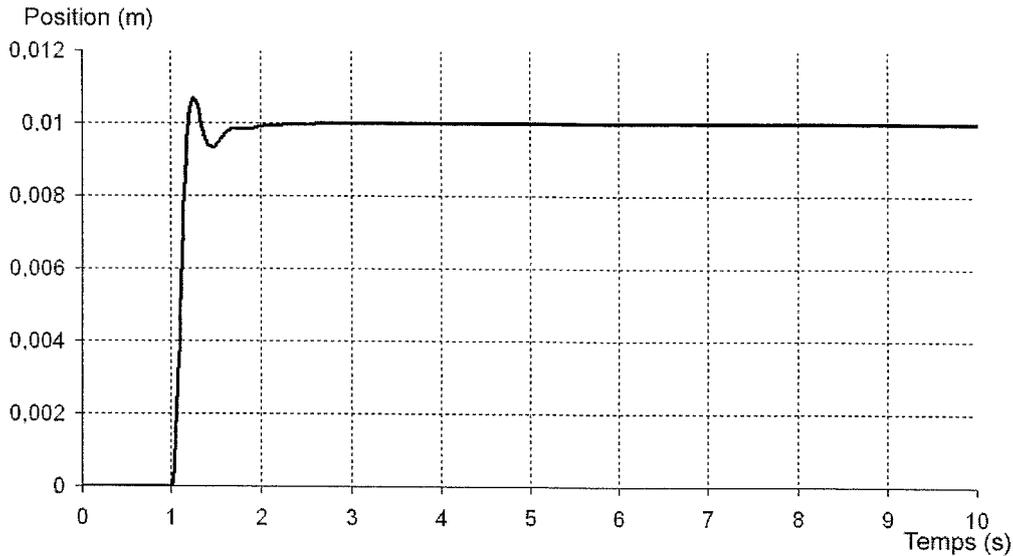


Figure 25. Évolution de la position du chariot 1 pour un échelon de position de 0,01 m avec le correcteur à action proportionnelle-dérivée $C_2(p)$

Question 39 : Au vu des résultats précédents et des spécifications du cahier des charges, est-il possible de valider le correcteur à action proportionnelle-dérivée $C_2(p)$?

3.3.2.2. Rejet des perturbations

Lors de la traite, des mouvements intempestifs peuvent conduire la vache à heurter la tête de traite 4. La figure 26 présente l'évolution de la position de la tête de traite 4 soumise à un coup de patte modélisée par une force de 100 N.

Question 40 : Quel est l'impact de ce coup de patte sur la traite d'une vache sachant qu'un trayon mesure entre 5 et 10 cm ? Quel type d'action faudrait-il prévoir au niveau du grafcet décrivant la connexion des gobelets ?

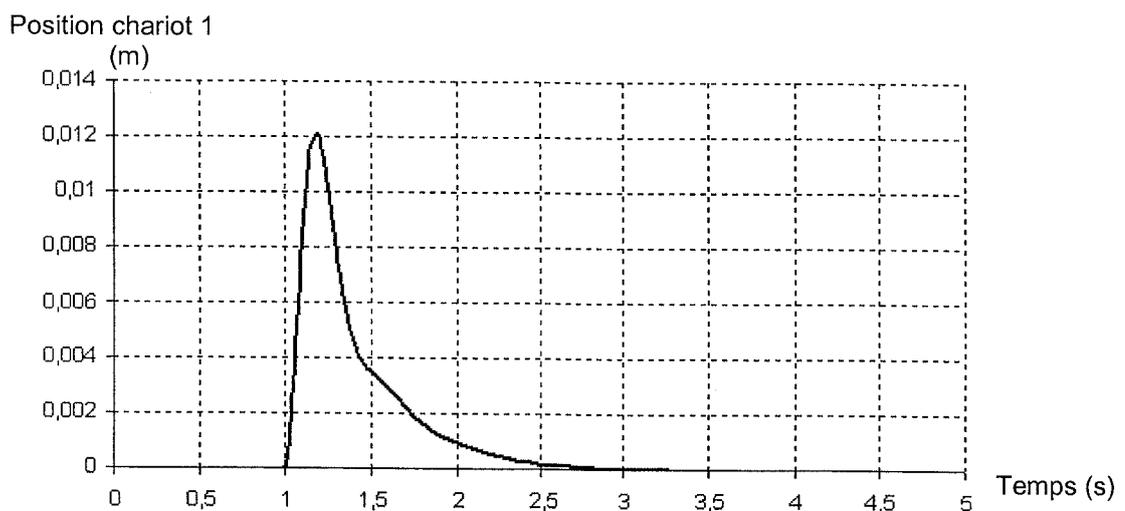


Figure 26. Évolution de la position de la tête de traite 4 sous l'action d'un coup de patte appliqué à $t=1s$

Question 41 : Quelle(s) solution(s) technologique(s) permettrai(ent) de limiter l'influence de ce coup de patte ?

Automatique et Informatique Industrielle

Pour obtenir une arrivée en position sans dépassement de la tête de traite, il est nécessaire d'introduire un retour en vitesse et un retour en accélération. La figure 27 décrit la structure de commande avec trois boucles de retour.

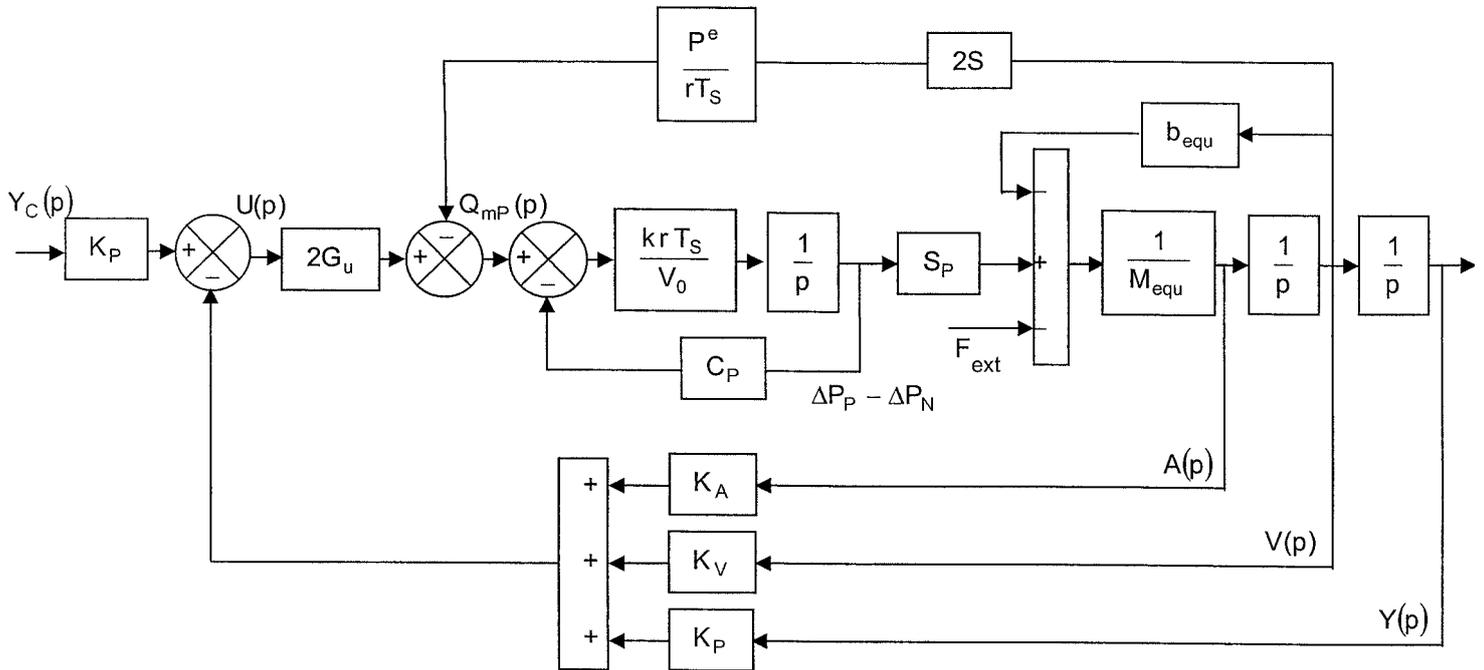


Figure 27. Schéma bloc associé à la commande avec trois boucles de retour

Ces deux boucles supplémentaires permettent d'inverser la tension de commande suffisamment tôt assurant une arrivée dans la position désirée sans dépassement.

À l'aide de cette architecture de commande présentée ci-dessus où les gains K_A , K_V et K_P valent respectivement $2 \text{ V}/(\text{m}/\text{s}^2)$, $50 \text{ V}/(\text{m}/\text{s})$ et $200 \text{ V}/\text{m}$, le comportement en position du chariot 1 est décrit par la figure 28 pour un échelon de position de $0,01 \text{ m}$.

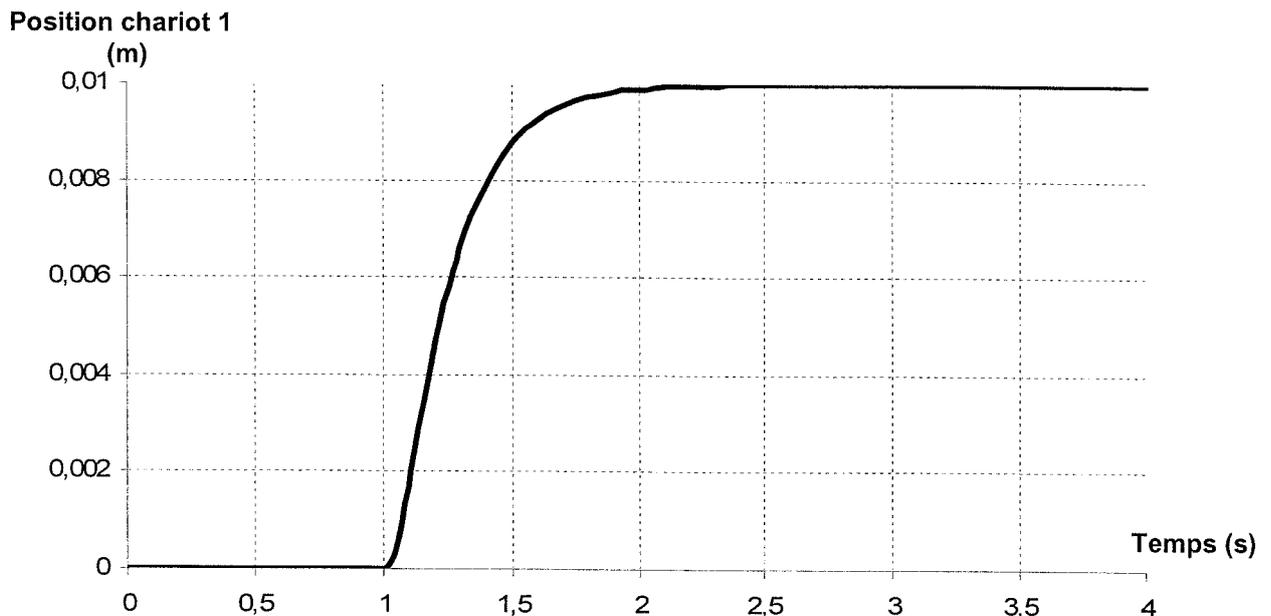


Figure 28. Évolution de la position du chariot 1 pour un échelon de position de $0,01 \text{ m}$

Question 42 : Cette commande permet elle de respecter les critères de performances définis par le cahier des charges ?

QUATRIÈME PARTIE

Synthèse de l'étude menée sur le robot Astronaut A3

Question 43 : Proposer une synthèse décrivant et justifiant la démarche mise en œuvre dans le questionnement de ce sujet pour répondre à la problématique globale de la pertinence économique de l'installation d'un robot de traite automatique.

Une réponse utilisant un outil de la communication technique (par exemple organigramme) est attendue.

Annexe 1 : Paramétrage et schématisation du robot de traite Astronaut A3

Le « graphe des liaisons et des efforts » (ou « graphe d'analyse ») du modèle mécanique du robot de traite Astronaut A3 est présenté figure A.1.1 :

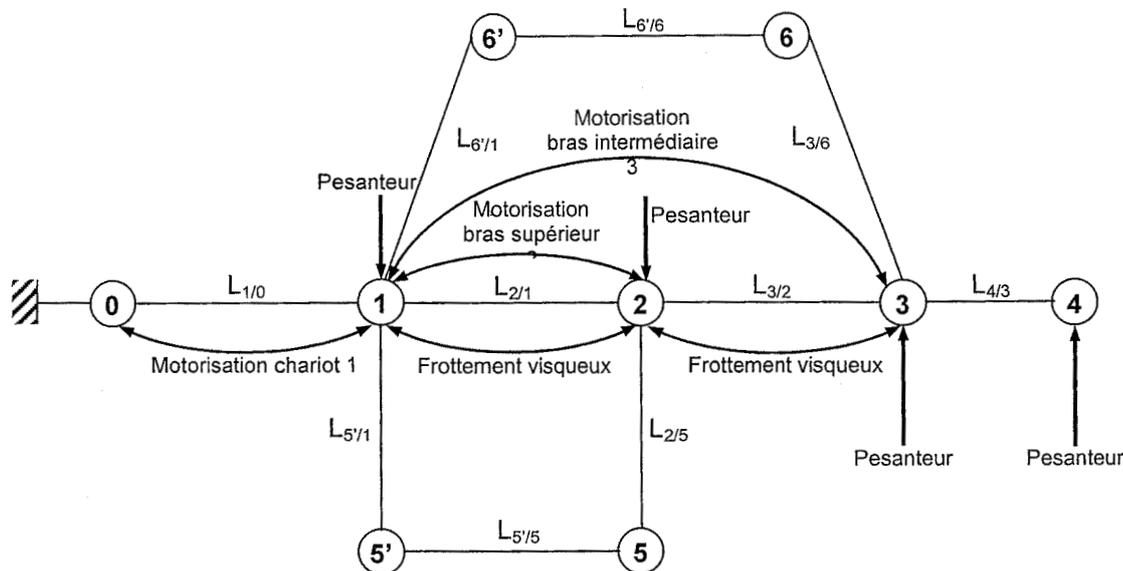


Figure A.1.1. Graphe des liaisons et des efforts de la modélisation mécanique du robot de traite Astronaut A3

$L_{1/0}$: liaison glissière de direction \vec{x}_0	$L_{2/1}$: liaison pivot d'axe (A, \vec{x}_0)	$L_{3/2}$: liaison pivot d'axe (B, \vec{x}_0)
$L_{5/1}$: liaison pivot d'axe (F, \vec{x}_0)	$L_{5/5}$: liaison pivot glissant d'axe (D, \vec{y}_5)	$L_{5/2}$: liaison pivot d'axe (D, \vec{x}_0)
$L_{6/1}$: liaison pivot d'axe (H, \vec{x}_0)	$L_{6/6}$: liaison pivot glissant d'axe (E, \vec{y}_6)	$L_{6/3}$: liaison pivot d'axe (E, \vec{x}_0)
$L_{4/3}$: liaison encastrement		

Figure A.1.2. Tableau récapitulatif des liaisons

Description des actionneurs :

	Effort développé (N)	Pression (Pa)	Débit massique (kg/s)
Motorisation chariot 1 : Vérin V_1	$F_{V_1/1}(t)$	P_1	q_{m1}
Motorisation bras supérieur 2 : Vérins V_5	$F_{5/2}(t) = F_{V_5/2}(t) + F_{0V_5/2}$	P_5	q_{m5}
Motorisation bras intermédiaire 3 : Vérin V_6	$F_{6/3}(t) = F_{V_6/3}(t) + F_{0V_6/3}$	P_6	q_{m6}

Figure A.1.3. Efforts développés par les vérins

Les efforts $F_{0V_5/2}$ et $F_{0V_6/3}$ correspondent aux efforts de maintien nécessaires pour s'opposer à l'action de la pesanteur. Les efforts $F_{V_5/2}(t)$ et $F_{V_6/3}(t)$ correspondent aux efforts à générer pour déplacer la tête de traite, avec pour $t \leq 0$ s, $F_{V_5/2}(t) = F_{V_6/3}(t) = 0$ N.

Modélisation des frottements visqueux :

	L_{10}	L_{21}	L_{32}
Coefficient de frottement visqueux	f_{10} (N.s.m ⁻¹)	b_{21} (N.m.s.rad ⁻¹)	b_{32} (N.m.s.rad ⁻¹)

Figure A.1.4. Coefficients de frottement visqueux associées aux liaisons L_{10} , L_{21} et L_{32}

Modélisation des perturbations extérieures :

	Vache/Chariot 1
Perturbation extérieure	$F_P(t) (N)$

La figure A.1.5 présente le schéma cinématique du bras du robot de traite Astronaut A3 et introduit les paramètres angulaires nécessaires à son étude.

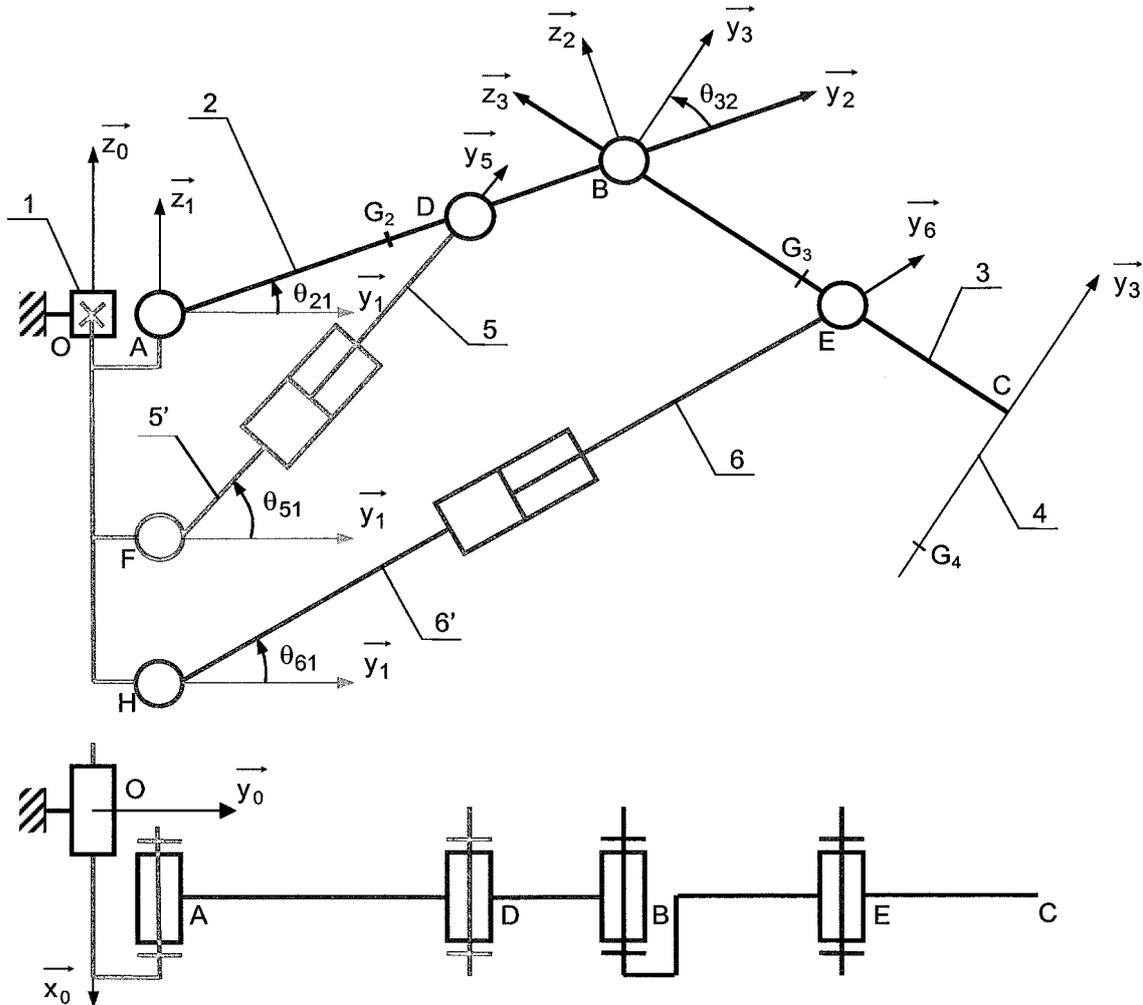


Figure A.1.5. Schéma cinématique associé au bras du robot Astronaut A3

Paramétrage géométrique :

- $R_0 = (O, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$, repère lié au bâti du robot de traite et supposé « galiléen » ;
- $R_1 = (A, \vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1)$, repère lié au chariot 1 tel que $\vec{OA} = x\vec{x}_0$;
- $R_2 = (A, \vec{x}_2, \vec{y}_2, \vec{z}_2)$, repère lié au bras supérieur 2 tel que $\theta_{21} = (\vec{y}_1, \vec{y}_2) = (\vec{z}_1, \vec{z}_2)$;
- $R_3 = (B, \vec{x}_3, \vec{y}_3, \vec{z}_3)$, repère lié au bras intermédiaire 3 tel que $\theta_{32} = (\vec{y}_2, \vec{y}_3) = (\vec{z}_2, \vec{z}_3)$;
- $R_5 = (F, \vec{x}_5, \vec{y}_5, \vec{z}_5)$, repère lié aux vérins 5 tel que $\theta_{51} = (\vec{y}_1, \vec{y}_5) = (\vec{z}_1, \vec{z}_5)$;
- $R_6 = (H, \vec{x}_6, \vec{y}_6, \vec{z}_6)$, repère lié au vérin 6 tel que $\theta_{61} = (\vec{y}_1, \vec{y}_6) = (\vec{z}_1, \vec{z}_6)$.

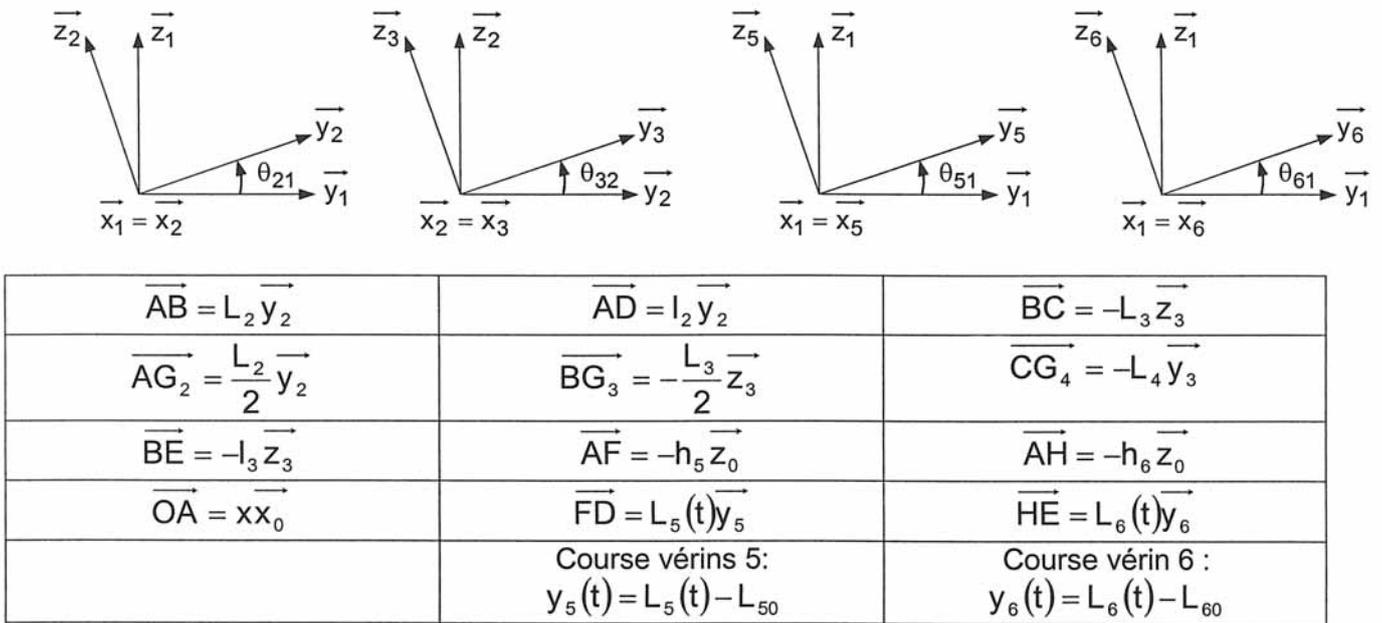


Figure A.1.6. Paramétrage géométrique dédié à l'étude du robot Astronaut A3

Caractéristiques massiques et inertielles des solides constituant le bras du robot de traite Astronaut A3:

Chariot 1	Masse : m_1	
Bras supérieur 2	Masse : m_2	Matrice d'inertie : $\bar{J}(2, G_2) = \begin{pmatrix} A_2 & 0 & 0 \\ 0 & B_2 & 0 \\ 0 & 0 & C_2 \end{pmatrix}_{B_2}$
Bras intermédiaire 3	Masse : m_3	Matrice d'inertie : $\bar{J}(3, G_3) = \begin{pmatrix} A_3 & 0 & 0 \\ 0 & B_3 & 0 \\ 0 & 0 & C_3 \end{pmatrix}_{B_3}$
Tête de traite 4	Masse : m_4	Matrice d'inertie : $\bar{J}(4, G_4) = \begin{pmatrix} A_4 & 0 & 0 \\ 0 & B_4 & 0 \\ 0 & 0 & C_4 \end{pmatrix}_{B_3}$
Vérins 5	Masse : m_5 , négligeable	
Vérin 6	Masse : m_6 , négligeable	

Figure A.1.7. Caractéristiques massiques et inertielles des solides constituant le bras du robot Astronaut A3

Annexe 2 : Systèmes électropneumatiques

La figure A.2.1 décrit la structure de la chaîne électropneumatique implantée sur le robot de traite Astronaut A3.

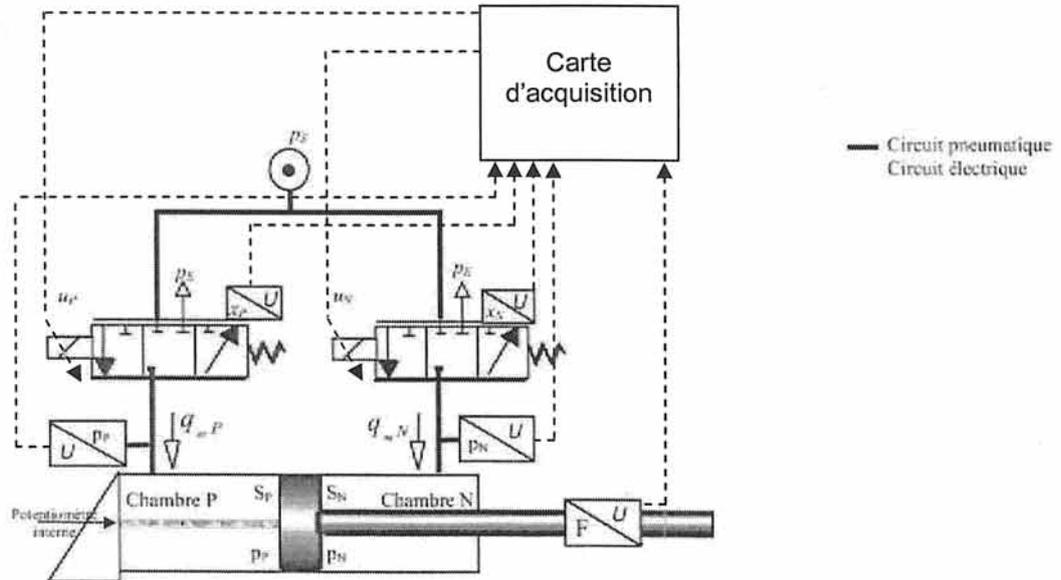


Figure A.2.1. Structure de la chaîne électropneumatique

Chaîne d'alimentation en air comprimé :

L'air comprimé délivré aux servo-distributeurs est généré par un compresseur. Le détendeur permet de fixer la pression de service à 7 bar. Le réservoir permet d'avoir une pression constante.

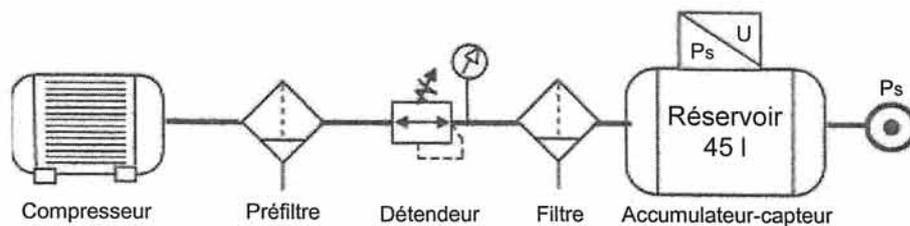


Figure A.2.2. Génération de la pression de service

Servo-distributeurs :

Les deux servo-distributeurs, qui alimentent les chambres du vérin, sont de type 3 orifices / 3 positions pour régulation de débit. Ils sont constitués d'un distributeur pneumatique équipé d'un tiroir chemise appairé, d'un électro-aimant proportionnel qui commande directement le déplacement du tiroir et d'un capteur de position.

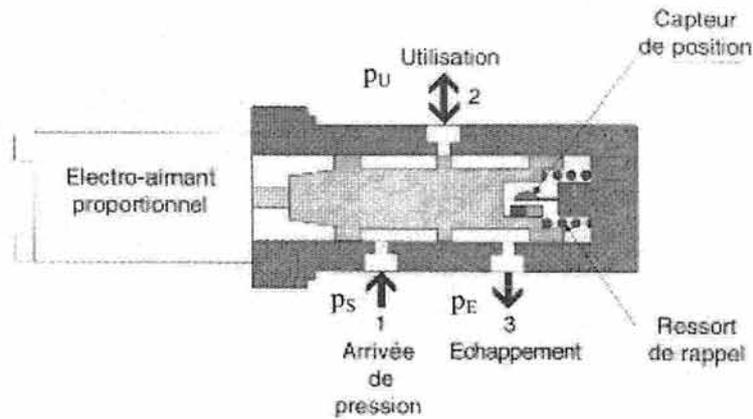
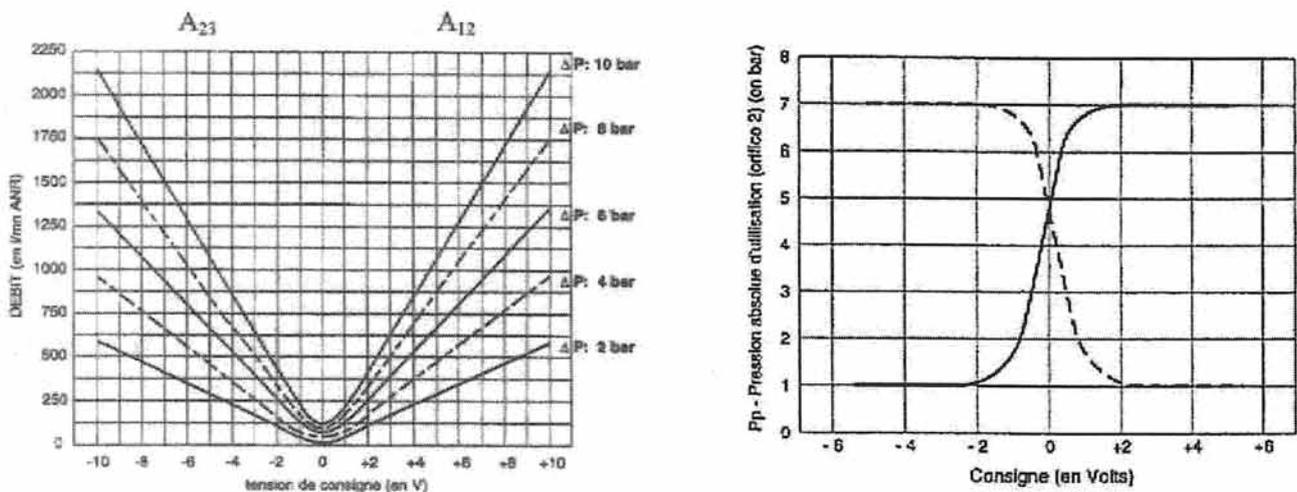


Figure A.2.3. Schéma de principe d'un servo-distributeur

Les servo-distributeurs délivrent un débit en fonction de la commande électrique et des rapports de pression amont/aval au niveau des orifices.

Afin de décrire le comportement de ces éléments, les constructeurs fournissent les courbes de gain en débit pour des pressions source de 2, 4, 6, 8 et 10 bar et une pression d'échappement constant et égale à la pression atmosphérique et de gain en pression à débit nul.



Courbe du gain en débit

Courbe du gain en pression à débit nul

Figure A.2.4. Courbes du gain en débit et du gain en pression

Caractéristiques :

Pression maxi admissible	10 bar
Signal de consigne	± 10 V
Débit pour $p_S=7$ bar et $p_U=p_E$	0.03 kg/s
Débit de fuite maxi $p_S=7$ bar et $p_U=p_E$	0.001 kg/s
Température du fluide	5 à 40° C
Bande passante à -3 dB	170 Hz à 50% d'amplitude
Temps de réponse mécanique	5 ms à 50% d'amplitude
Tension d'alimentation	24 V
Courant maxi	1.25 A
Puissance maxi	30 W

Figure A.2.5. Caractéristiques des servo-distributeurs