

UNITÉ DE FABRICATION DE PROFILÉS

Contexte de l'étude

Au sein du groupe international Alcan, plusieurs sites spécialisés en Europe dans les produits extrudés permettent de produire des profilés en alliages d'aluminium doux, des profils et des pièces en alliages durs ainsi que de grands profilés. Les marchés sont nombreux : bâtiment, automobile, transports de produits, applications industrielles.

Le site français concerné par l'étude produit plusieurs dizaines de milliers de tonnes de profilés dont plus de la moitié sont parachevés (traitement de surface, usinage, coupure thermique). Le sujet porte sur une unité de fabrication automatisée de profilés en alliages d'aluminium doux équipée d'une presse à filer de 4 300 tonnes.



FIGURE 1 – Exemple de profils de fenêtre.

Le filage

Le filage est une méthode de mise en forme des métaux par forgeage. Elle consiste à pousser un matériau ductile (éventuellement rendu ductile par chauffage) à travers une filière (Annexe 3).



(a) Exemple d'une filière montée vue côté alimentation du métal



(b) Exemple d'une filière montée vue côté sortie du profil

FIGURE 2 – Filière

Le matériau de base pour les filières est un acier spécial de haute qualité, travaillé à chaud. Le processus d'usinage est exigeant et demande un savoir-faire et une précision des plus élevés. Un filage d'essai est effectué avec la matrice ainsi fabriquée. Les déformations des profilés sont corrigées par une dernière rectification.

Les principales caractéristiques du procédé utilisé sont les suivantes :

- longueur des blocs d'alliage d'aluminium obtenus à partir des billettes : 600 mm à 1 400 mm,
- température du bloc introduit dans la presse : 400°C à 500°C,
- pression spécifique générée en extrémité du bloc pour le filage : 400 à 700 MPa,
- effort développé par la presse : 1 500 à 4 000 tonnes,

- diamètre du conteneur¹ : 150 à 250 mm,
- vitesse de filage du profilé obtenu : 5 à 50 m · min⁻¹,
- température du profilé en sortie de presse : 500 à 560 °C.

L'unité de fabrication

Les billettes coulées et homogénéisées constituent la base de tous les profilés. Elles sont obtenues en fonderie et elles sont stockées à l'entrée de la ligne de fabrication de profilés.

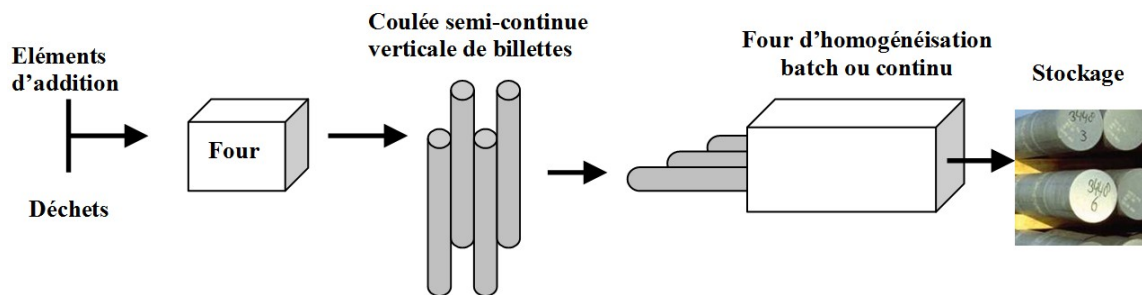


FIGURE 3 – Fonderie, fabrication des billettes

À l'entrée de la ligne de préparation des blocs et d'alimentation de la presse à filer (figure 4 et Annexe 1), les billettes sont d'abord préchauffées à une température d'environ 130°C avant d'être sciées en blocs d'une longueur qui permettra leur chargement dans la presse de filage.

Chaque bloc est alors transféré sur un chariot guidé par un convoyeur (convoyeur d'amenée). Ce chariot permet d'amener le bloc dans la zone de travail du robot portique à deux pinces indépendantes.

Chaque bloc ainsi amené est saisi par le robot portique avant d'être déposé sur le convoyeur du four 1 ou le convoyeur du four 2 selon leur disponibilité. Chaque bloc est alors chauffé à une température d'environ 500°C.

Les blocs chauffés sont ensuite rapidement transportés jusqu'à une zone tampon permettant le transfert des blocs vers un chariot d'approvisionnement de la presse à filer.

Le chariot de chargement des blocs introduit chaque bloc dans la presse à filer hydraulique de 4300 tonnes pour l'opération de filage.

A la sortie de la presse, le(s) profilé(s) obtenu(s) subit(subissent) un premier traitement thermique dans un tunnel de trempe.

Les profilés sont guidés sur une table à rouleaux et tractés par un Puller pour éviter leur déformation.

Les profilés ainsi obtenus sont encore chauds et malléables. Ils sont découpés à chaud à une longueur d'environ 50 m.

Après une opération de traction pour étirer ce long profilé, ils sont refroidis et découpés à la longueur marchande.

Enfin, ils sont déposés sur des praticables pour subir des traitements thermiques (et éventuellement des traitements de surface) avant d'être emballés et expédiés aux clients.

1. le conteneur assure le guidage du bloc de métal à filer dans la presse lors de l'opération de filage.

Recyclage

La fabrication de produits semi-finis en aluminium s'accompagne d'une perte d'environ 25% de la matière utilisée (chute des profilés, restes de billettes, culots de blocs, copeaux, etc.) qui est intégralement recyclé. L'aluminium est en effet recyclable à 100 %, avec une économie d'énergie de 95 % par rapport à celle nécessaire à la fabrication de l'aluminium primaire.

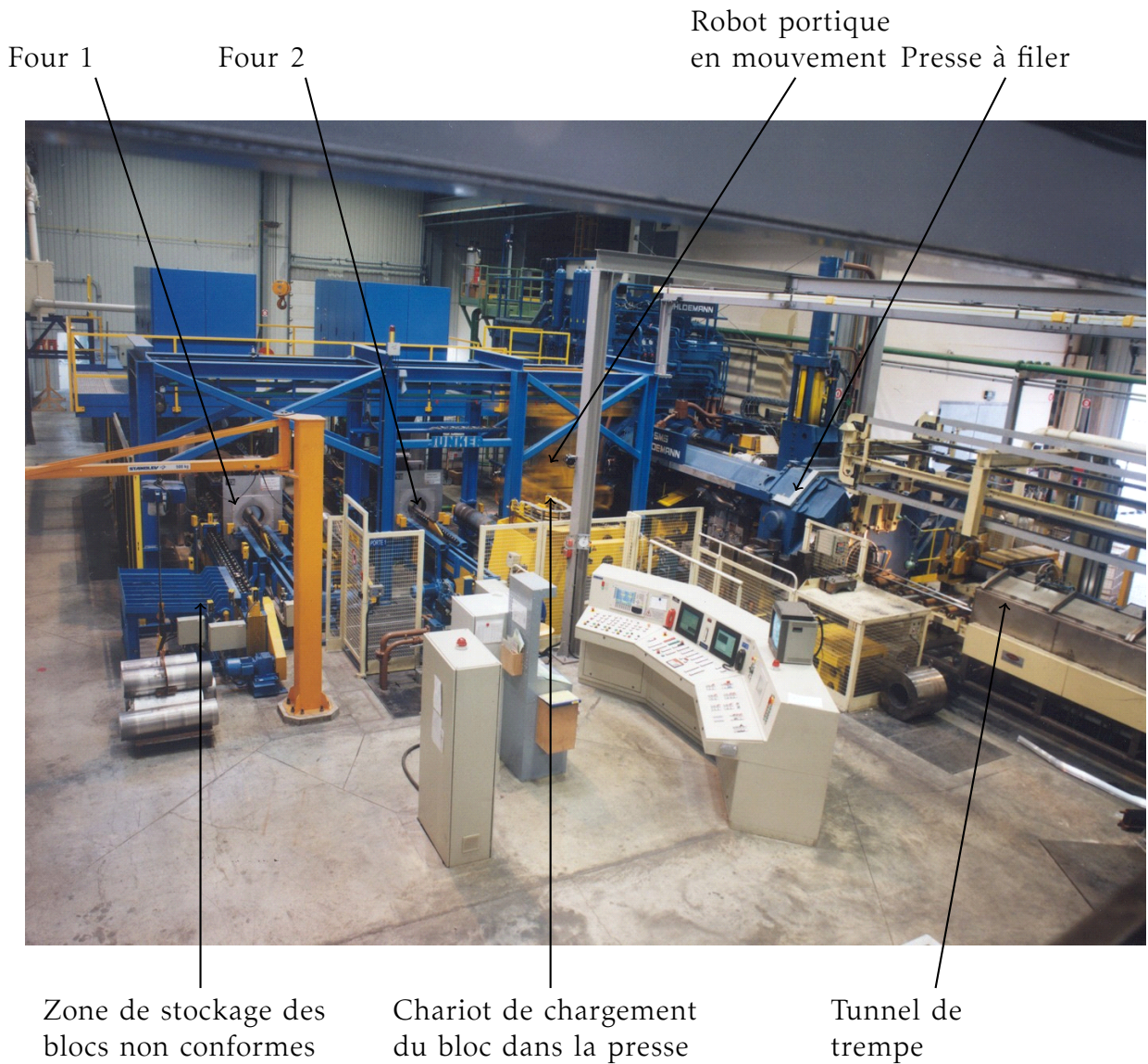


FIGURE 4 – Vue générale de la ligne de préparation des blocs et d'alimentation de la presse à filer

TRAVAIL DEMANDÉ

Remarques importantes :

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

La première partie est consacrée à l'étude du comportement séquentiel d'une partie de l'unité de fabrication des profilés, à l'étude du circuit de puissance hydraulique du vérin de la presse à filer et au passage de la spécification comportementale à la réalisation programmée (durée conseillée : 3h).

La seconde partie concerne l'étude de la commande asservie du Puller (durée conseillée : 3h).

2. Chaque partie sera traitée sur des copies séparées. Les documents réponses 1 et 2, même vierges, seront obligatoirement rendus avec les copies relatives à la seconde partie du sujet.
3. 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

Cycle de fabrication des profilés

1.1 Le filage

Pour quantifier la sévérité de filage, plusieurs coefficients peuvent être utilisés. Le rapport de filage est le coefficient de déformation le plus souvent utilisé. Il caractérise le rapport entre la surface d'une section perpendiculaire à l'axe de symétrie du bloc de métal cylindrique avant filage et la section droite du(es) profilé(s) obtenu(s) après filage.

Dans la suite de l'étude, le diamètre du bloc d'alliage d'aluminium à filer est de 250 mm. La filière permet d'obtenir simultanément deux profilés (matériau : 6351, profilé : ouvert) dont les caractéristiques sont décrites en document Annexe 2. Les dimensions retenues sont : $L = 80$ mm, $H = 18$ mm avec $E1 = E2 = E3$.

Question 1

A l'aide du document Annexe 2, les tolérances dimensionnelles étant négligées :

- préciser l'épaisseur $E1$ du profilé (avec $E1 = E2 = E3$), la valeur retenue sera le nombre entier immédiatement supérieur,
- exprimer le rapport de filage $\delta R = \frac{S}{s}$, où « S » est la section droite du bloc et « s » la section du produit filé (deux profilés dans cette étude).

L'entreprise souhaite réaliser des profilés d'une longueur comprise entre 50 m et 52 m à l'aide d'un seul bloc d'alliage d'aluminium. Une scie circulaire permet la découpe à cette longueur dans la zone du Puller. Ces grands profilés sont alors évacués latéralement sur un convoyeur, puis ils sont étirés à l'aide d'un système d'ancrage et de traction durant le refroidissement pour éviter les déformations. Une zone de 30 cm à chaque extrémité est nécessaire pour effectuer cette tâche, cette zone déformée étant découpée et recyclée par la suite.

25 profilés de longueur marchande 2 m seront obtenus après découpe à l'aide d'une scie circulaire d'épaisseur 3 mm.

Pour éviter des raccords inesthétiques, la soudure réalisée par le filage de deux blocs successifs doit se situer dans la zone d'ancrage et de traction.

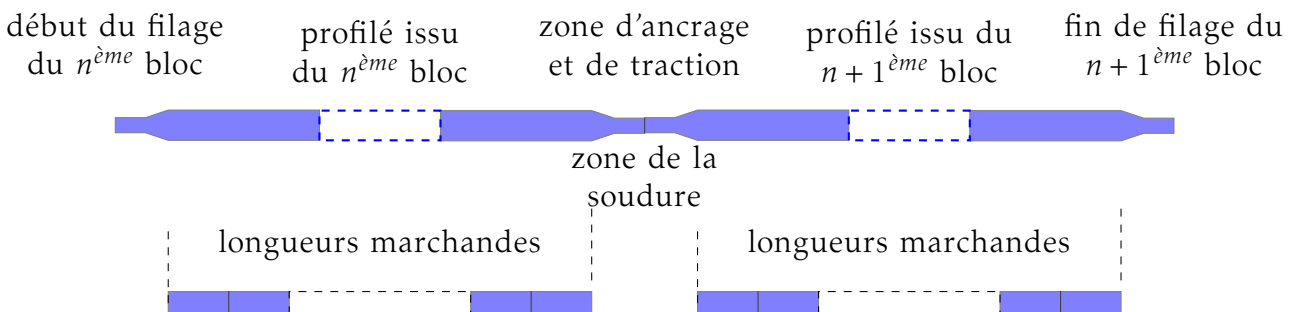


FIGURE 5 – Obtention des longueurs marchandes à partir des profilés filés

Question 2

- Compte tenu des tolérances dimensionnelles données document Annexe 2, calculer la longueur minimale du bloc nécessaire pour produire un grand profilé dans lequel pourront être découpées 25 longueurs marchandes de 2m. Le volume du culot (document Annexe 3) découpé à la fin du cycle de filage dans la presse ne sera pas pris en compte

1.2 La presse à filer hydraulique

1.2.1 Le cycle de la presse

Le cycle de la presse à filer peut se décomposer en quatre phases décrites en document Annexe 3.

Phase 1 - Changement d'outillage : Chaque changement de forme de profilé nécessite le remplacement de l'ensemble porte filière (porte filière, contre filière et filière). Le chariot de chargement du bloc (Annexe 1), le conteneur et le pilon sont alors en position reculée. L'ancien ensemble porte filière est alors déposé puis le nouvel ensemble porte filière est monté dans la presse. Si ce montage est effectué et que la température du conteneur ($T_{\text{conteneur}}$) est comprise entre 500 et 550°C, le cycle de production des nouveaux profilés peut commencer.

Phase 2 - Chargement d'un bloc à filer : Le conteneur, chauffé et maintenu à température en permanence, est avancé contre l'ensemble porte filière. Dès que le chariot de chargement d'un bloc à filer a introduit un bloc dans la presse, le bloc est introduit dans le conteneur puis le chariot recule. Le filage peut alors commencer (avance du pilon). L'introduction du bloc dans la presse et le filage sont accompagnés de la lubrification du conteneur.

Phase 3 - Filage : Le filage terminé, le pilon rentre puis le conteneur recule en position de référence.

Phase 4 - Découpe du culot : Le pilon et le conteneur reculés, la découpe du culot peut s'effectuer. Elle facilite la soudure avec le bloc suivant en garantissant un meilleur contact entre les surfaces en contact de deux blocs successifs.

Question 3

- L'information $T_{\text{conteneur}}$ étant de type analogique, quel opérateur doit être utilisé pour la rendre logique et respecter la contrainte de température extraite du cahier des charges ?
- Décrire le cycle de la presse à l'aide du langage de spécification Grafset en intégrant un changement d'outillage et en utilisant uniquement les entrées/sorties décrites en document Annexe 4. L'état initial de la partie opérative est illustré sur le document Annexe 3 par la figure associée à la phase changement d'outillage.

1.2.2 Étude du circuit de puissance du vérin hydraulique de la presse

Le circuit de puissance hydraulique du vérin de la presse est alimenté par l'intermédiaire de quatre pompes hydrauliques A4VS0 750 (Annexe 5 et Annexe 5.1) qui sont mises en

route en fonction de la puissance nécessaire au filage. Le schéma hydraulique d'une pompe est fourni en document Annexe 6, celui du vérin de presse en Annexe 7.

Le circuit hydraulique de puissance de la presse est structuré de la façon suivante :

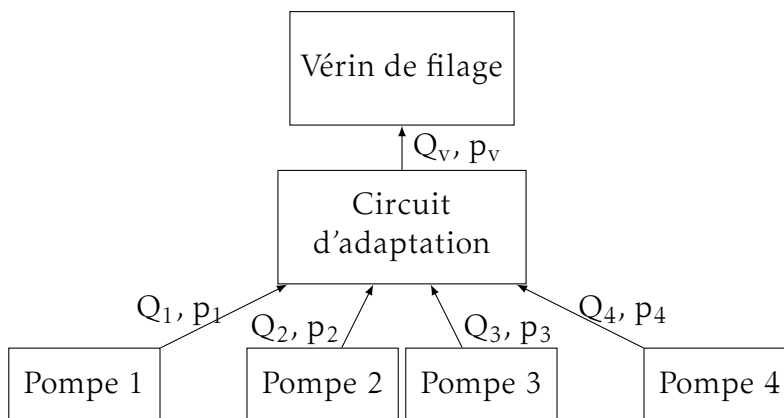


FIGURE 6 – Structure du circuit de puissance hydraulique

Question 4

- Décrire le fonctionnement de la pompe A4VS0.
- Préciser, sous la forme d'une décomposition fonctionnelle type FAST, la fonction des principaux constituants du schéma de puissance de la pompe (Annexe 6). On se limitera : au moteur, à la pompe, au vérin et à son pré-actionneur.

Le schéma de puissance de la pompe précise trois réglages usuels de celle-ci, reproduits dans le tableau 1.

Réglage	débit	pression
R1	$7251 \cdot \text{min}^{-1}$	100bar
R2	$4801 \cdot \text{min}^{-1}$	280bar
R3	$4401 \cdot \text{min}^{-1}$	305bar

TABLE 1 – Réglages de la pompe

Question 5

Compléter le tableau ci-dessous en précisant pour chacun des réglages, le débit, la pression et la puissance disponible à l'entrée du vérin de filage.

	1 pompe	2 pompes	3 pompes	4 pompes
R1				
débit				
pression				
puissance				
R2				
débit				
pression				
puissance				
R3				
débit				
pression				
puissance				

TABLE 2 – Débit, pression et puissance disponible

La force de filage permet de connaître la force nécessaire pour obtenir la déformation du bloc d'aluminium à filer. Le coefficient de frottement entre le bloc d'aluminium et la paroi du conteneur est négligé compte tenu de la lubrification et du niveau des efforts de filage.

La force de filage s'exprime de la façon suivante : $F_{filage} = \pi \cdot R^2 \cdot \rho \cdot \ln(\delta R)$

– $R = 125 \text{ mm}$: rayon du conteneur,

– $\rho = 18 \text{ daN} \cdot \text{mm}^{-2}$: résistance à la déformation de la matière à la température de formation,

– δR : rapport de filage (la valeur retenue dans cette étude est de 60).

La vitesse de filage retenue est de $20 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ (en sortie de filière).

Question 6

- Calculer l'effort de filage.
- Calculer la puissance nécessaire au filage.
- En déduire le nombre de pompes à utiliser sous une pression de 100 bar.

1.3 Gestion de l'amenée des blocs

Des billettes d'une longueur supérieure à 6 mètres sont stockées à l'entrée de l'unité de fabrication des profilés. Dès que le four de préchauffage est libre, une billette est introduite dans le four pour la préchauffer à une température d'environ 130°C . Lorsque cette température est atteinte sur l'ensemble de la longueur de la billette, celle-ci est transférée jusqu'à une position (détecteur dcb figure 7) permettant la découpe à longueur d'un bloc d'aluminium. Une scie circulaire réalise alors la coupe. Le bloc ainsi obtenu est transféré grâce au poste de découpe sur le chariot d'amenée des blocs. Cette tâche ne sera réalisée qu'à la condition où la tâche T11 : « Reculer le chariot d'amenée » est terminée. Cette information est caractérisée par la variable fin T11.

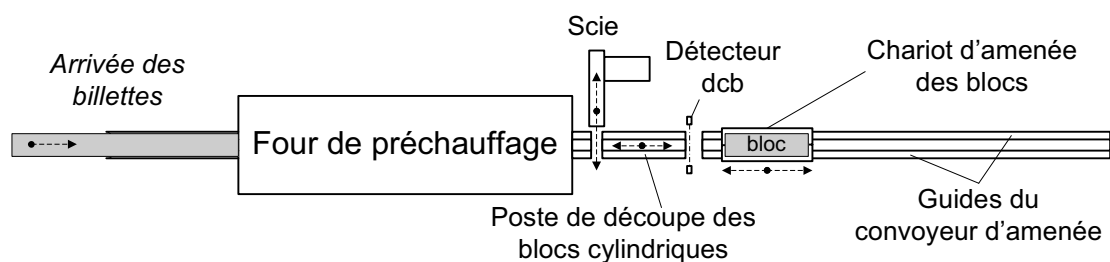


FIGURE 7 – Ensemble de préchauffage des billettes, de découpe et de transfert des blocs

La longueur des billettes permet la découpe de 6 blocs successifs. Après la découpe des 6 blocs, le résidu de coupe est transféré jusqu'à la position dcb puis évacué grâce à un robot portique non représenté sur la figure 7.

Une analyse préliminaire a permis de proposer le découpage fonctionnel décrit dans le tableau 3 page suivante.

Question 7

- Élaborer le grafcet GCamenée décrivant la coordination des tâches T1 à T6 avec un objectif d'optimisation du temps de cycle. La situation initiale ne sera pas obligatoirement précisée. Seules les entrées/sorties identifiées en document Annexe 8 et dans le tableau 3 seront utilisées.

Tâche	Intitulé
T1	Amener une billette dans le four de préchauffage
T2	Préchauffer la billette à 130°C
T3	Transférer la billette préchauffée jusqu'à dcb
T4	Scier
T5*	Transférer le bloc coupé sur le chariot d'amenée
T6	Évacuer le résidu

**cette tâche ne peut être exécutée que si la tâche T11 est terminée (fin T11)*

TABLE 3 – Découpage fonctionnel

1.4 Gestion du robot portique à deux pinces indépendantes

Le robot portique, selon la tâche à effectuer, peut se déplacer au dessus de toutes les zones de travail situées entre la zone de stockage des blocs non-conformes et le convoyeur de transfert des blocs sur le chariot de chargement. Le robot est muni de deux pinces indépendantes. Chaque pince permet de saisir et de déposer un bloc (documents Annexe 9.1 et Annexe 9.2) grâce à une translation verticale et à un mouvement d'ouverture et de fermeture.

La position de référence du robot est obtenue lorsque le robot est à l'arrêt, pince 1 au dessus du convoyeur d'amenée (Annexe 1).

Dès l'arrivée d'un bloc n transporté par le chariot d'amenée, la pince 1 peut le saisir et le déposer sur le convoyeur du four 1. À l'arrivée du bloc n+1, la pince 2 peut le saisir sur le chariot d'amenée et le déposer sur le convoyeur du four 2.

Lorsque le cycle de chauffe du four 1 est terminé, le robot saisit alors le bloc n avec la pince 1. Le cycle de chauffe du four 2 terminé, la pince 2 saisit le bloc n+1. Puis, les deux blocs chauffés à 500°C sont transférés vers le stock tampon.

Le robot exécute alors un cycle de dépose des deux blocs et revient dans la position de référence : pince 1 au dessus du convoyeur d'amenée. La(es) position(s) de dépose des blocs est(sont) définie(s) en fonction des emplacements disponibles dans le stock tampon et sur le convoyeur de transfert.

Les tâches allouées au chariot d'amenée sont réalisées en temps masqué. Pour minimiser le temps de cycle, le robot se positionne au dessus des convoyeurs sans attendre la fin des cycles de chauffe ou d'amenée d'un bloc.

Question 8

- **Élaborer le grafcet GCrobot décrivant le cycle du robot avec un objectif d'optimisation du temps de cycle et en utilisant les entrées/sorties définies sur les documents Annexe 9.1 et Annexe 9.2. La situation initiale ne sera pas obligatoirement précisée.**
- **Compte tenu du temps de chauffe de chaque four (1 ou 2) relativement important par rapport au temps d'amenée d'un bloc et au temps de transfert par le robot, proposer sous forme de phrases structurées la description d'un autre cycle possible pour le robot.**
- **Préciser les avantages de ce nouveau cycle du robot par rapport au cycle initial.**

1.5 Détection dans le stock tampon

Afin de minimiser les temps de production et de pouvoir continuer à amener des blocs chauffés lors d'arrêts de courte durée de la presse ou du chariot de chargement, un stock tampon a été prévu. Le stock tampon est constitué de quatre supports (Annexe 1), seul le convoyeur de transfert est muni de rouleaux permettant, grâce à un poussoir, de transférer le bloc vers le chariot de chargement.

Ce stock permet au maximum l'accumulation de 4 blocs chauffés en plus du bloc présent sur le convoyeur de transfert vers le chariot de chargement.

Un détecteur optique de type barrière est utilisé sur chaque support pour détecter la présence d'un bloc.

Question 9

- Expliquer le principe de fonctionnement du détecteur utilisé pour détecter la présence d'un bloc sur un support.
- Existe-t-il d'autres types de détecteurs optiques ? Auraient-ils pu convenir pour détecter la présence d'un bloc ?

Les détecteurs optiques fonctionnant dans une zone particulièrement exposée aux poussières, l'optique peut s'encrasser. Un signal de défaut est alors généré par le détecteur. Pour éviter des arrêts de production en attendant de traiter le défaut lors d'un arrêt de l'installation, l'information de présence du bloc est doublée.

Ainsi, l'information bsi (bloc présent sur le support de position i) est vraie si et seulement si :

- le détecteur optique monté sur le support dsi a détecté la présence d'un bloc durant au moins 2s et ne génère pas de signal de défaut défdsi,
- ou le robot est situé à la position ip1 au dessus du stock tampon et la pince 1 a terminé de déposer un bloc sur le support (fin T13),
- ou le robot est situé à la position ip2 au dessus du stock tampon et la pince 2 a terminé de déposer un bloc sur le support (fin T15).

L'information bsi est fausse si et seulement si :

- le détecteur optique monté sur le support dsi ne détecte plus la présence d'un bloc,
- ou le robot est situé à la position ip1 au dessus du stock tampon et la pince 1 a terminé de retirer un bloc du support (fin T12),
- ou le robot est situé à la position ip2 au dessus du stock tampon et la pince 2 a terminé de retirer un bloc du support (fin T14).

Question 10

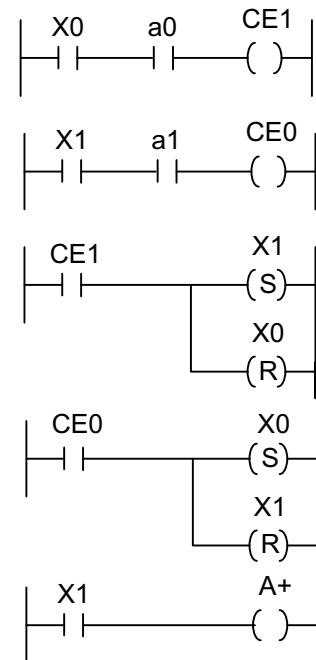
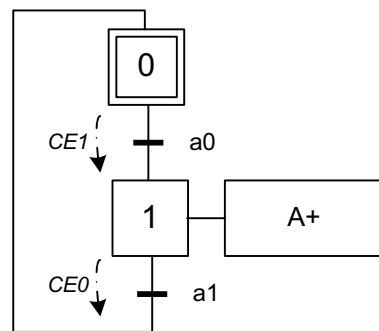
- En vue d'une implantation de la spécification comportementale dans un automate programmable, traduire les contraintes exprimées ci-dessus en logigramme ou en langage structuré.

1.6 Réalisation programmée

L'ensemble de l'unité de fabrication des profilées est commandée à l'aide d'un automate programmable conforme à la norme des langages de programmation CEI 61131-3. Le langage retenu est le langage Ladder (LD). Des extraits de la norme sont fournis en document Annexe 11 et un exemple simple est décrit figure 8.

La méthode utilisée pour implanter un grafcet dans l'automate programmable s'appuie sur le structure algorithmique bouclée suivante :

- calcul des conditions de franchissement de toutes les transitions,
- calcul de l'état de chaque étape (activation ou désactivation) en fonction des conditions de franchissement calculées précédemment,
- calcul de l'état des sorties associées aux étapes.



- X_i : variable interne logique caractérisant l'activité de l'étape i
- $CE1$: condition de franchissement de la transition suivant immédiatement l'étape $X0$
- $CE0$: condition de franchissement de la transition suivant immédiatement l'étape $X1$

FIGURE 8 – Exemple de programmation d'un grafcet.

Question 11

- Justifier l'intérêt de la structure algorithmique proposée, notamment le calcul préalable des conditions de franchissement vis à vis des règles d'évolution du Grafcet et du fonctionnement des automates programmables.

Question 12

- Élaborer en langage LD un programme d'implantation du grafcet décrivant le cycle du chariot de chargement (document Annexe 10). On pourra se limiter : au calcul de l'état des variables associées aux étapes : 100, 101, 102, 106, 107, 110, au calcul des conditions de franchissement pouvant modifier leurs états respectifs, et au calcul de l'état des sorties associées à ces étapes.
- Élaborer en langage LD un programme permettant le calcul de l'état de la variable DB.
- Proposer une solution programmée permettant d'initialiser le grafcet dès que le programmeur appuie sur un bouton poussoir à accès restreint « init ».

Deuxième partie

Étude du puller

Description

À la sortie de la filière, le profilé sort à une température d'environ 500°C et avec une vitesse \vec{v}_f pouvant varier entre $5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ et $50 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Afin que celui-ci ne se déforme pas lors du filage, un effort de traction doit lui être appliqué pendant tout le filage. Cet effort sera obtenu grâce à un système asservi appelé « puller ».

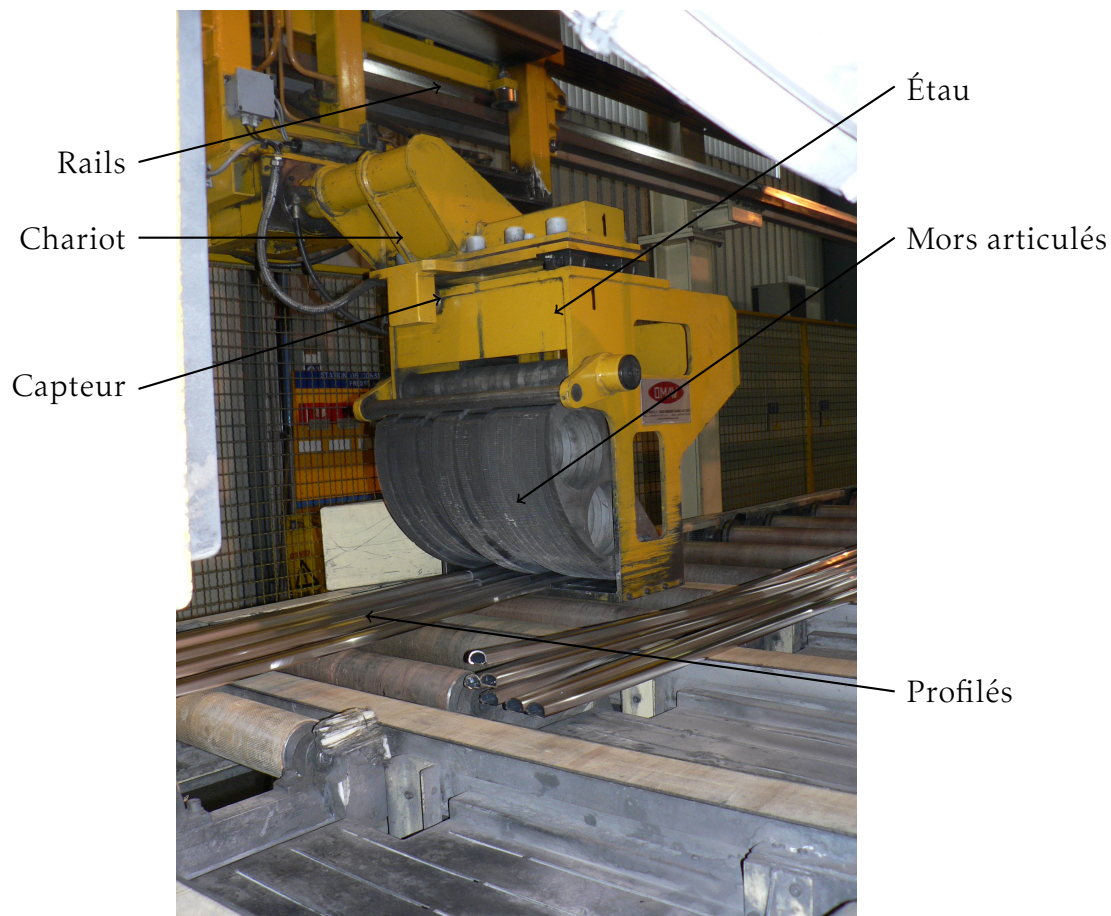


FIGURE 9 – Puller

Cette partie porte sur l'étude de l'asservissement du puller (de *to pull* tirer).

Constitution

Le puller est constitué de deux sous-systèmes identiques travaillant en alternance pour maintenir le profilé en traction pendant tout le cycle de filage.

Chaque sous-système de traction se compose (Annexe 12) :

- d'un chariot entraîné en translation par une chaîne couissant sur des rails ;
- d'un bras basculant en pivot avec le chariot ;
- d'un étau couissant légèrement par rapport au bras ;
- de mors articulés en pivot avec l'étau.

On trouve aussi :

- un moteur à courant continu Siemens 1GG5 132 (non représenté) de 16,7 kW associé à un réducteur de rapport de réduction $\lambda = 22,7$ qui entraîne la chaîne grâce à la poulie motrice ;
- deux vérins hydrauliques (non représenté) qui permettent de faire pivoter respectivement le bras support de l'étau et les mors ;
- un capteur d'effort placé entre l'étau et le bras.

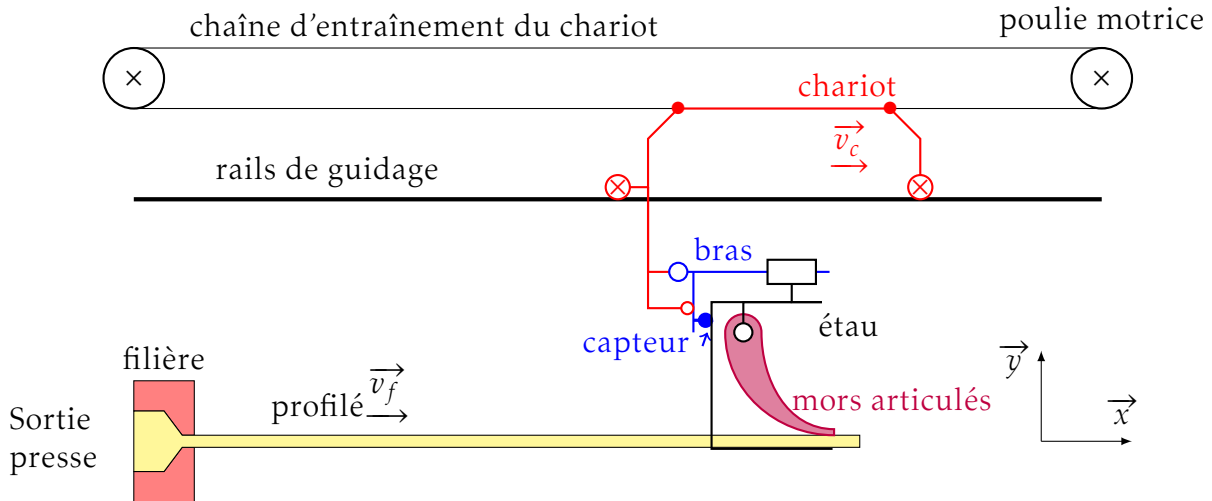


FIGURE 10 – Schéma de principe du Puller

Description du filage

Le puller comporte deux chariots travaillant en alternance (Annexe 12).

Première longueur

Début du filage : Au début du filage d'une nouvelle série de profilés, le chariot (le chariot 1 sur la figure 22 du document Annexe 12) du puller vient se placer à la sortie de la filière en position haute, puis dès que le profilé est suffisamment sorti, la presse s'arrête, l'étau pivote en position basse et les mors viennent serrer le profilé. Le profilé est mis en traction ($T_f = 2000\text{ N}$).

Filage : Le filage reprend (la matière est poussée par la presse à travers la filière), le profilé se déplace à la vitesse V_f . Pendant tout le déplacement, l'effort de traction est maintenu constant.

Découpe : La longueur de débit étant atteinte, le filage est stoppé (arrêt de la presse), le profilé est bridé puis découpé.

Evacuation : Le profilé découpé est évacué en bout de chaîne par le chariot puis transféré vers le poste de rangement (non présenté sur le schéma). Le chariot attend en position haute et en bout chaîne le cycle suivant.

Seconde longueur

Préparation : Pendant le filage de la première longueur, le second chariot se déplace (en position haute) vers le poste de découpe et attend la fin du filage de la première longueur.

Début du second filage : À la fin de la découpe, le profilé est saisi (basculement de l'étau puis serrage des mors) avant d'être mis en traction.

Filage : Le filage reprend, le profilé se déplace à la vitesse V_f . Pendant tout le déplacement, l'effort de traction est maintenu constant.

Découpe : La longueur de débit étant atteinte, le filage est stoppé, le profilé est bridé puis découpé.

Longueurs suivantes Pendant le filage d'une longueur, l'autre chariot se déplace au niveau du poste de découpe. Les deux chariots ne peuvent se croiser que si l'un est en position basse (celui qui tire) et l'autre en position haute. Dès la découpe effectuée, le filage de la nouvelle longueur redémarre pendant que la longueur précédente est évacuée. Ce cycle se répète autant de fois que nécessaire.

2.1 Modélisation

Il s'agit dans cette partie d'établir un modèle de connaissance du système asservi de traction.

Hypothèses et données complémentaires

On se place pendant la phase de filage, les mors sont serrés sur le profilé, la vitesse relative entre l'ensemble {mors, étau} et le profilé est supposée nulle. On note :

- $\vec{T}_f = -T_f \cdot \vec{x}$, l'action mécanique du profilé sur l'étau ;
- $\vec{T}_c = T_c \cdot \vec{x}$, l'action mécanique du capteur sur l'étau ;
- $\vec{v}_f = v_f \cdot \vec{x}$, la vitesse de filage du profilé imposée par la presse.
- $\vec{v}_c = v_c \cdot \vec{x}$, la vitesse de déplacement du chariot ;
- x_c et x_f respectivement la position du chariot et de l'étau.
- c_m , le couple moteur exercé sur l'arbre d'entrée du réducteur ;
- ω_m , la vitesse de rotation du moteur ;

Caractéristiques massiques et dimensionnelles :

- $m_c = 250 \text{ kg}$, masse du chariot ;
- $m_e = 200 \text{ kg}$, masse de l'étau et des mors ;
- $m_\lambda = 2,3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$, masse linéique de la chaîne (longueur totale $L_c = 210 \text{ m}$) ;
- $J_m = 0,09 \text{ kg m}^2$, moment d'inertie de l'arbre moteur ;
- J_r , moment d'inertie du réducteur ramené sur l'arbre d'entrée ;
- $R_p = 15 \text{ cm}$, rayon des roues dentées.

Question 13

- Écrire l'équation différentielle de mouvement de l'ensemble {étau + mors}.

Question 14

- Écrire l'équation différentielle de mouvement du chariot en fonction du couple moteur et de T_c , on précisera le moment d'inertie équivalent J_e en fonction des masses et inerties du mécanisme.

On note p la variable de Laplace et $\mathcal{L}x_c(t) = X_c(p)$ la transformée de Laplace de $x_c(t)$ de même :

- | | |
|----------------------------------|--|
| - $\mathcal{L}(x_f(t)) = X_f(p)$ | - $\mathcal{L}(T_c(t)) = T_c(p)$ |
| - $\mathcal{L}(v_f(t)) = V_f(p)$ | - $\mathcal{L}(c_m(t)) = C_m(p)$ |
| - $\mathcal{L}(v_c(t)) = V_c(p)$ | - $\mathcal{L}(\omega_m(t)) = \Omega_m(p)$ |

Question 15

- En déduire la relation dans le domaine de Laplace donnant $X_c(p)$ en fonction de $C_m(p)$ et $T_c(p)$. Tracer le schéma bloc correspondant.

Le capteur d'effort (Annexe 13) peut être modélisé comme un ressort de raideur k_c (fig 11) pour lequel le signal est proportionnel à la déformation.

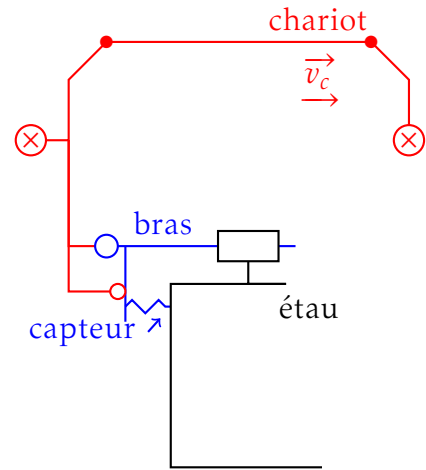


FIGURE 11 – Modélisation du capteur d'effort

Question 16

- Quelle est la technologie utilisée pour ce capteur ?

Question 17

- Déterminer la relation entre la mesure T_c de l'effort et les positions x_c et x_f . Vous préciserez toute hypothèse complémentaire.

Question 18

- Tracer le schéma bloc correspondant donnant $T_c(p)$ en fonction de $X_c(p)$ et $V_f(p)$.

Question 19

- Déduire des questions précédentes, le schéma bloc donnant $T_c(p)$ en fonction de $C_m(p)$ et $V_f(p)$.

On rappelle les équations électriques d'un moteur à courant continu

$$u = r \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} + e(t) \quad (6)$$

$$C_m = k_t \cdot i \quad (7)$$

$$e(t) = k_e \cdot \omega_m \quad (8)$$

avec $L = 11 \text{ mH}$, $R = 0,928 \Omega$ et $k_e = k_t = 1,77 \text{ SI}$.

Question 20

- À partir de ces équations et du schéma bloc précédent, mettre le schéma bloc donnant T_c en fonction de $U(p)$ et $V_f(p)$ sous la forme du schéma ci-dessous.

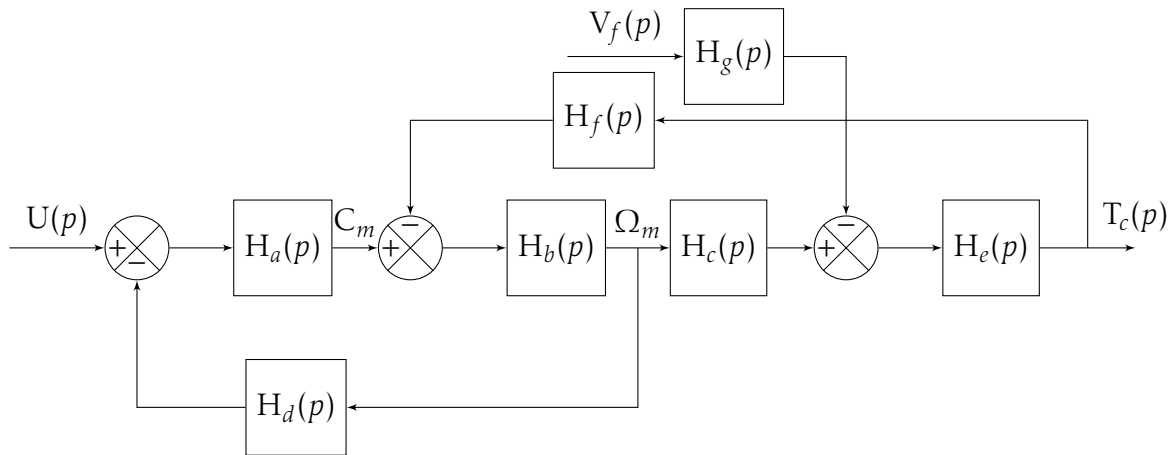


FIGURE 12 – Modèle électromécanique du puller

Question 21

- Expliciter les deux fonctions $G_1(p)$ et $G_2(p)$ telles que $T_c(p) = G_1(p) \cdot U(p) - G_2(p) \cdot V_f(p)$ en fonction des $H_i(p)$.

L’inductance d’un moteur à courant électrique est souvent négligée, nous allons maintenant préciser dans quelles limites on peut faire cette hypothèse.

Compte tenu des caractéristiques du moteur et des différents constituants, la fonction de transfert s’écrit si :

- l’inductance n’est pas négligée : $G_1(p) = G_{1a}(p) = \frac{3,19 \cdot 10^7}{110 \cdot p^3 + 5000 \cdot p^2 + 258000 \cdot p + 59500}$
- l’inductance est négligée : $G_1(p) = G_{1b}(p) = \frac{3,19 \cdot 10^7}{10 \cdot p^2 + 513 \cdot p + 119}$

La figure 13 présente les diagrammes de Bode de la fonction de transfert $G_1(p) = G_{1a}(p)$ dans le cas où l’inductance n’est pas négligée, le tableau 4 précise quelques valeurs.

Fréquence [rad/s]	0,0	0,1	0,2	0,4	0,7	1,0	2,3
Amplitude [dB]	56,0	55,0	53,0	49,9	45,3	41,8	34,7
Phase [°]	-2,9	-26,7	-45,2	-60,7	-73,8	-79,8	-87,6
Fréquence [rad/s]	3,5	10,0	23,1	35,1	48,1	53,4	100,0
Amplitude [dB]	31,1	22,2	15,7	12,7	8,9	6,9	-9,8
Phase [°]	-90,7	-100,4	-120,0	-145,6	-180,0	-192,6	-239,6

TABLE 4 – Module et argument de G_1

Question 22

- Mettre $G_{1b}(p)$ sous forme canonique préciser ces paramètres caractéristiques.

Question 23

- Tracer les diagrammes Bode de $G_{1b}(p)$ sur le Document Réponse 1. Comparer puis préciser quelles sont les hypothèses à faire si on souhaite négliger l’inductance.

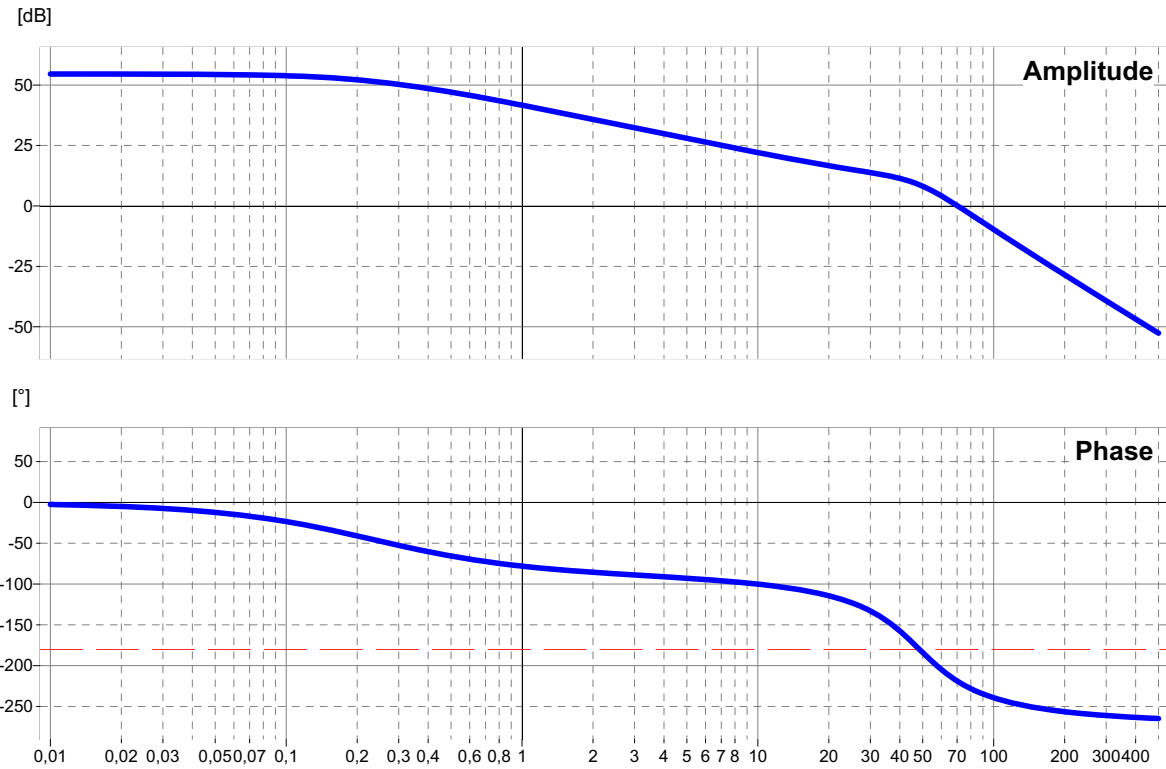


FIGURE 13 – Diagramme de Bode $G_1(p)$

2.2 Régulation de l'effort de traction

Le cahier des charges précise :

- Le puller doit assurer un effort de traction T_f pendant les différentes phases du filage :
 - maintien de l'effort à l'arrêt ;
 - montée en vitesse ;
 - filage à vitesse constante.
- L'erreur statique ε_s doit être inférieure à 100 N dans toutes les phases de fonctionnement à vitesse constante.
- La réponse temporelle ne doit pas présenter d'oscillations.

Pour cela, on choisit de mesurer l'effort T_c et de comparer celui-ci à la consigne F_c . Un régulateur permet de générer la tension de commande $u(t)$. Le schéma bloc figure 15 précise le modèle d'étude.

Pour cette partie, on choisit le modèle complet pour G_1 , les deux fonctions de transfert s'écrivent compte tenu des caractéristiques mécaniques et électriques et quelques simplifications :

$$G_1(p) \approx \frac{2,90 \cdot 10^5}{(p + 0,232) \cdot (p^2 + 45,2 \cdot p + 2330)} \quad (14)$$

$$G_2(p) \approx \frac{150000}{1 + 4 \cdot p} \quad (15)$$

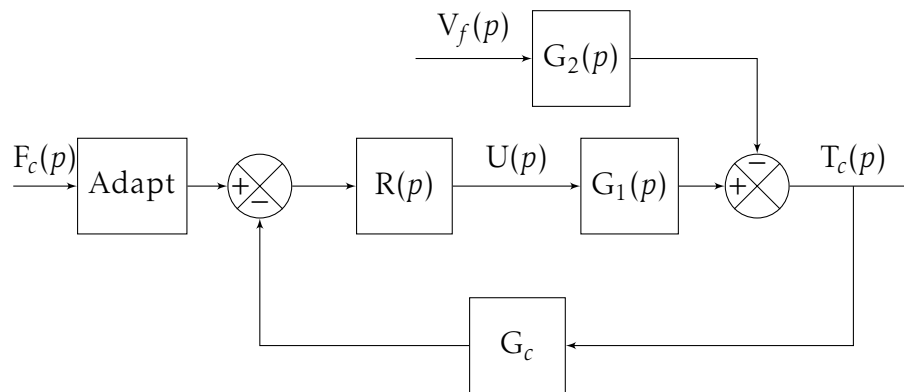


FIGURE 15 – Régulation de l'effort de traction

Le gain du capteur et du circuit associé est de $G_c = \frac{1}{1000} \text{V} \cdot \text{N}^{-1}$. Le bloc *Adapt* est un bloc d'adaptation que vous évalueriez si nécessaire.

Question 24

- Pourquoi avoir choisi de réguler T_c plutôt que T_f ? À quelles conditions ce choix est-il valide?

La consigne de traction est $F_c = 2000 \text{ N}$. Les phases de fonctionnement sont les suivantes :

1. presse à l'arrêt $v_f(t) = 0$, mise en tension $F_c = 2000 \text{ N}$;
2. rampe de vitesse $v_f(t) = a \cdot t$ avec $a = 0,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, maintien de la consigne de traction, ;
3. vitesse constante $v_f(t) = v_3$ ($v_3 = 6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$), maintien de la consigne de traction.

2.2.1 Régulation proportionnelle

On se propose de vérifier maintenant si une régulation proportionnelle permet de respecter le cahier des charges, on choisit $R(p) = R_0$, un gain constant.

On se place pendant la première phase de fonctionnement, presse à l'arrêt $v_f(t) = 0$ et $F_c = 2000 \text{ N}$.

Question 25

- Préciser la valeur du gain *Adapt*.
- Déterminer par le critère de Routh ou une autre méthode, la valeur maximale du gain R_0 pour que le système reste stable.
- Déterminer la valeur minimale du gain R_0 respectant la condition sur l'erreur statique.

On se place maintenant dans la troisième phase de fonctionnement avec une vitesse de filage vitesse constante $v_f(t) = v_3$ ($v_3 = 6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$) et le maintien de la consigne de traction $F_c = 2000 \text{ N}$.

Question 26

- Déterminer l'erreur indicielle durant cette phase de fonctionnement en fonction de R_0 , F_c et v_3 . Est-il possible alors de respecter le cahier des charges?

Question 27

- Le cahier général précise que la vitesse de filage peut varier de $5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ à $50 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, un simple correcteur proportionnel est-il toujours envisageable ?

2.2.2 Correction

On se propose maintenant d'améliorer le comportement du système en choisissant un nouveau régulateur.

$$R(p) = R_0 \left(1 + \frac{1}{T_0 \cdot p} \right) \text{ avec } T_0 = 5 \text{ s} \quad (25)$$

Question 28

- Quelles sont les caractéristiques de ce régulateur ?
- Tracer l'allure des diagrammes de Bode de $R(p)$ pour $R_0 = 1$.

Question 29

- À partir du tracé précédent et du tableau 4, tracer sur le Document Réponse 2, le diagramme de Black de la fonction de transfert en boucle ouverte du système ($V_f(p) = 0$ et $R_0 = 1$). Le système est-il stable ?

Question 30

- Déterminer l'erreur indicielle durant cette phase de fonctionnement en fonction de R_0 , F_c et v_3 . Est-il possible alors de respecter le cahier des charges avec ce régulateur ?
- La figure 18 précise l'évolution temporelle de la vitesse de filage et de la consigne de traction, reproduire cette figure sur votre copie et tracer (qualitativement) l'allure de la réponse temporelle de $T_c(t)$ et conclure.

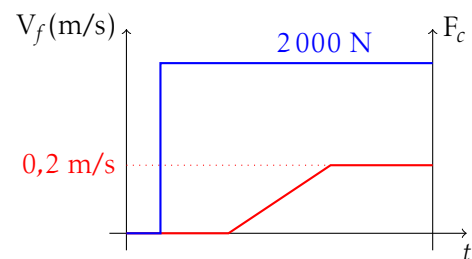


FIGURE 18 – Réponse temporelle

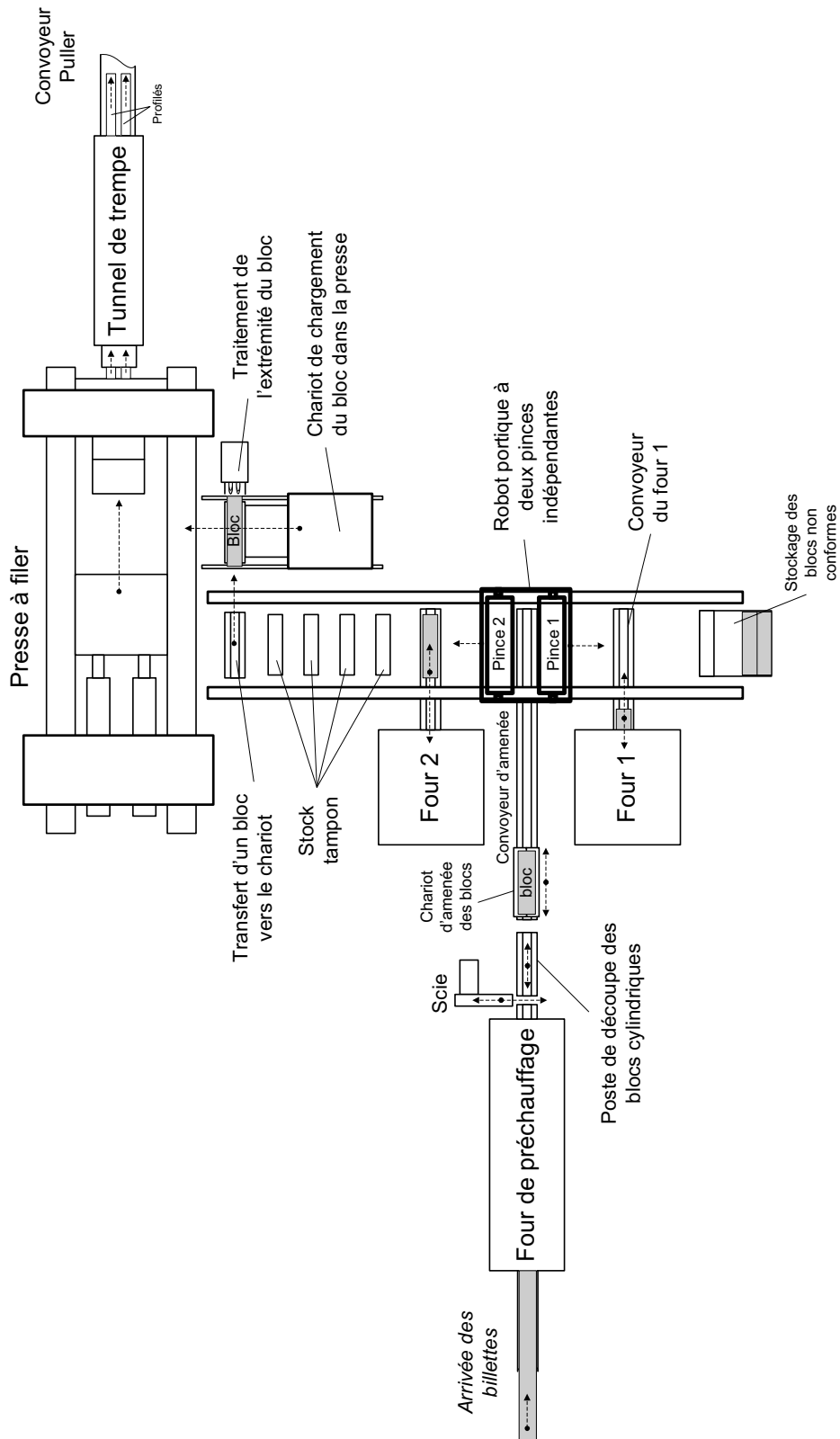
Question 31

- Proposer un critère pertinent de réglage permettant de respecter le dernier item du cahier des charges « La réponse temporelle ne doit pas présenter d'oscillations », en déduire une valeur de réglage pour R_0 .

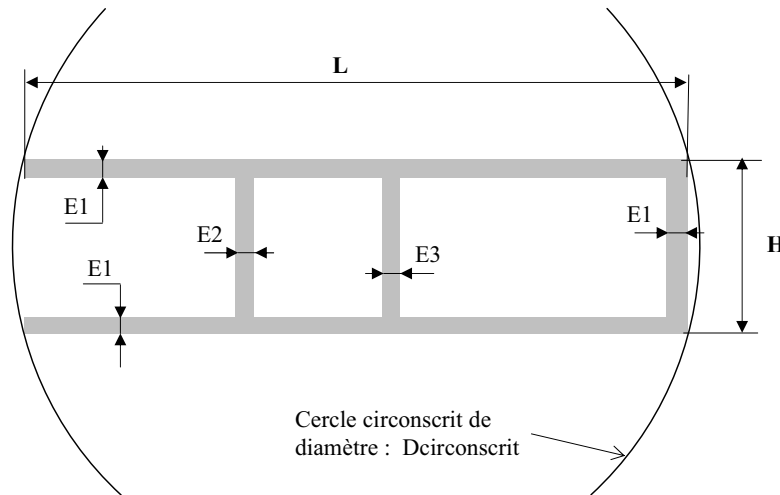
... Fin du sujet ...

Annexes

Annexe 1 Schéma d'implantation de la ligne de préparation des blocs et d'alimentation de la presse à filer



Annexe 2 Caractérisation des profilés



Valeur spécifiée H (mm)		Tolérances pour côté H
>	≤	
-	10	±0,20
10	20	±0,25
20	35	±0,30
35	50	±0,40
50	70	±0,50
70	100	±0,60
100	150	±0,80
150	200	±1,00
200	250	±1,20
250	300	±1,40

Valeur spécifiée E_p		Épaisseur E_1 (partie ouverte)	Épaisseur E_2 (partie creuse)	Épaisseur E_3 (interaiguille)
>	≤			
1	1,5	±0,15	±0,20	±0,30
1,5	2,5	±0,15	±0,25	±0,40
2,5	4	±0,20	±0,30	±0,50
4	6	±0,20	±0,40	±0,60
6	10	±0,25	±0,60	±0,80

TABLE 5 – Tolérances dimensionnelles accessibles

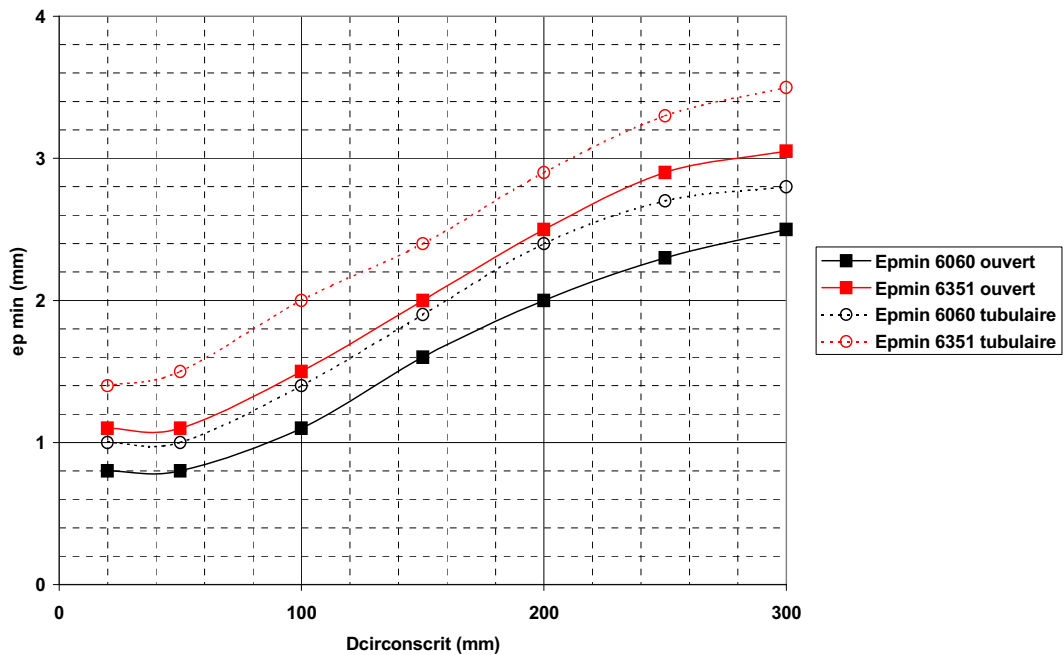


FIGURE 19 – Épaisseurs

Annexe 3 Cycle de filage

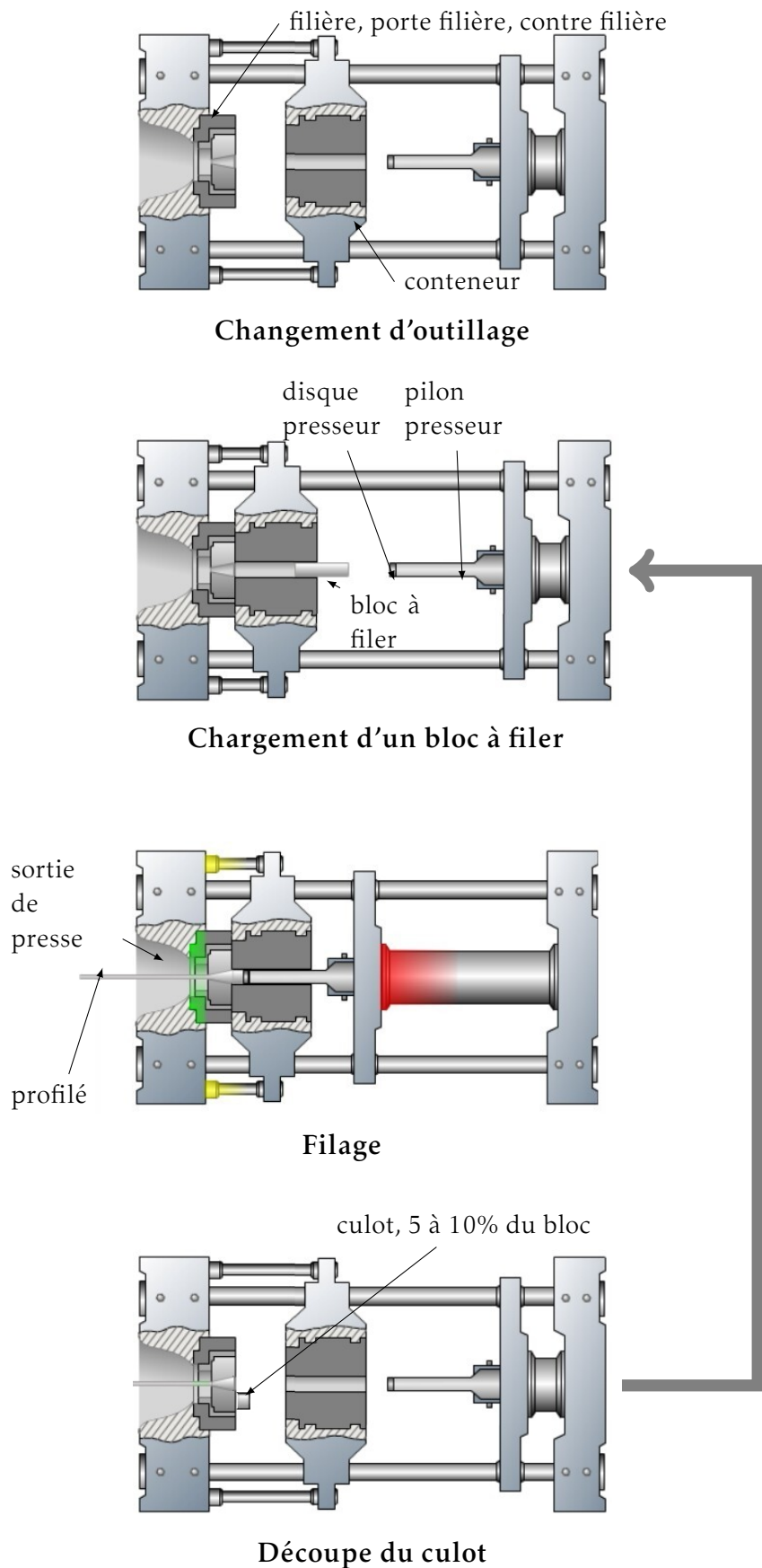
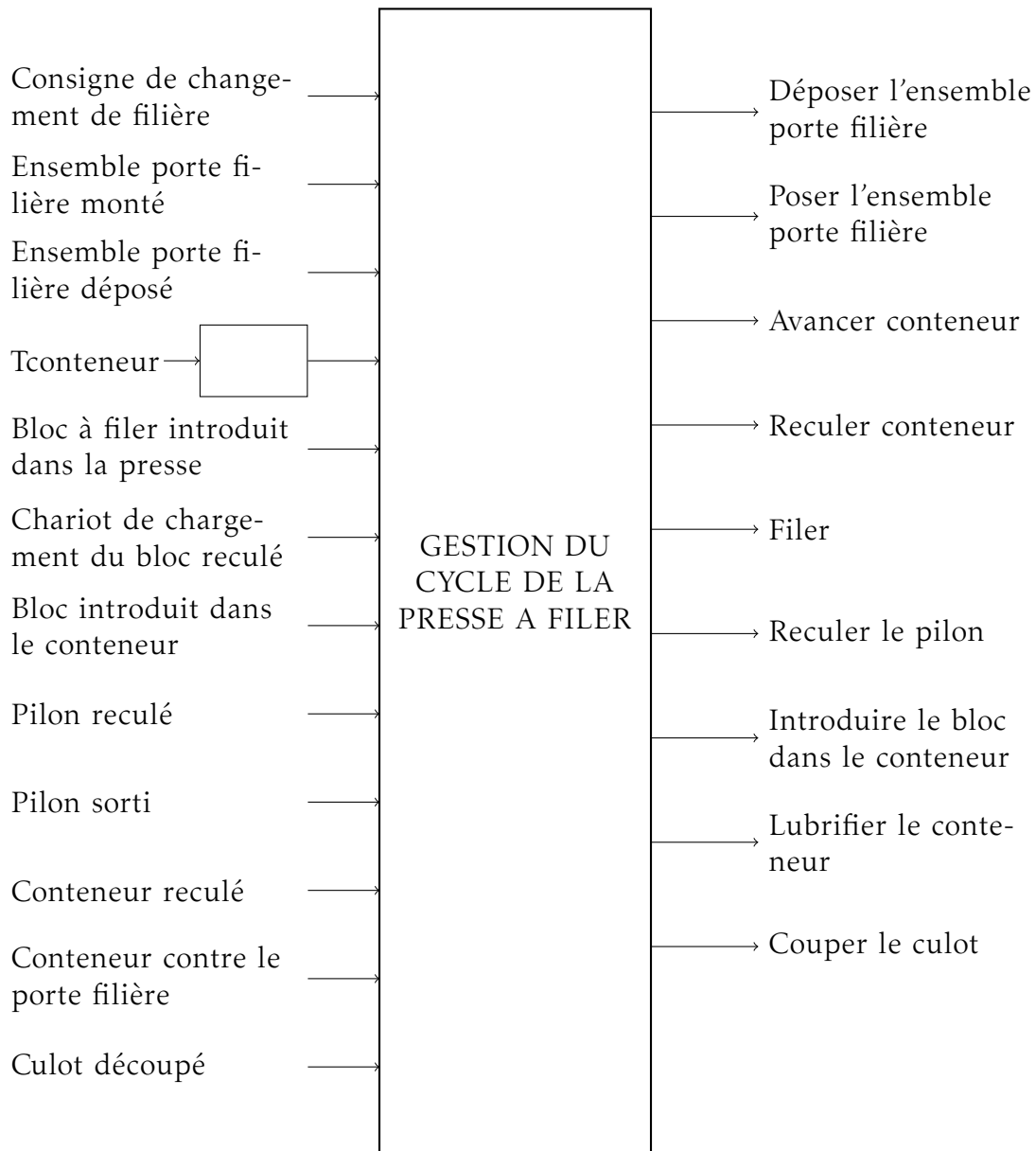


FIGURE 20 – Cycle de filage

Annexe 4 Boite fonctionnelle de caractérisation des E/S de la commande de la presse à filer



Annexe 5 Pompe hydraulique A4VS0 - 750

Rexroth
Bosch Group

Pompe à cylindrée variable A4VS0

séries 1, 2 et 3, circuit ouvert
construction à pistons axiaux et plateau incliné

calibres 40...1000

pression nominale 350 bar

pression maxi 400 bar

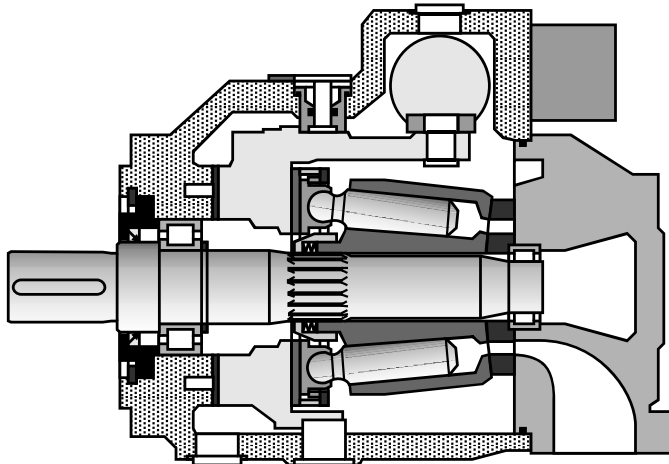
RF
92050/09.97

remplace 11.95

Haute pression

Description des dispositifs de réglage,
voir notices séparées :

RF 92055, RF 92060, RF 92064,
RF 92072, RF 92076, RF 92080



La pompe à cylindrée variable A4VS0 à pistons axiaux et plateau incliné est conçue pour les transmissions hydrostatiques en circuit ouvert.

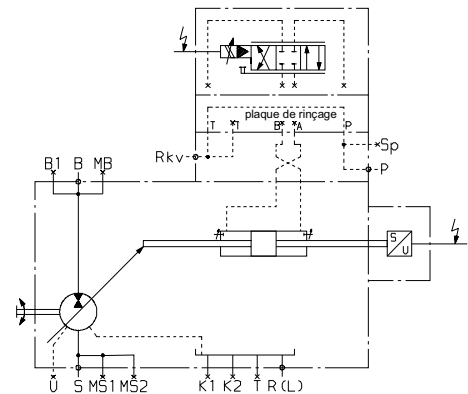
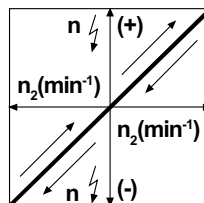
Le débit est proportionnel à la vitesse d'entraînement et à la cylindrée. Le réglage du plateau incliné permet une modification en continu du débit.

- construction à plateau incliné, distribution par lumières
- cylindrée réglable en continu
- bonne caractéristique d'aspiration
- pression nominale admissible 350 bar
- faible niveau sonore
- grande longévité
- capacité de charge radiale et axiale de l'arbre
- puissance massique élevée
- construction modulaire
- temps de réglage courts
- possibilité de prise de force et de pompe combinée
- indicateur de position de la pompe
- position de montage indifférente
- possibilité d'utilisation avec fluide HF, avec réduction des caractéristiques

Aperçu des dispositifs de réglage

Régulation de vitesse, secondaire, DS1

La régulation DS1 agit sur l'unité secondaire de façon à ce que le couple de rotation nécessaire pour atteindre la vitesse désirée soit disponible. Ce couple est proportionnel à la cylindrée, donc à l'angle d'inclinaison de la pompe, le circuit ayant une pression déterminée.



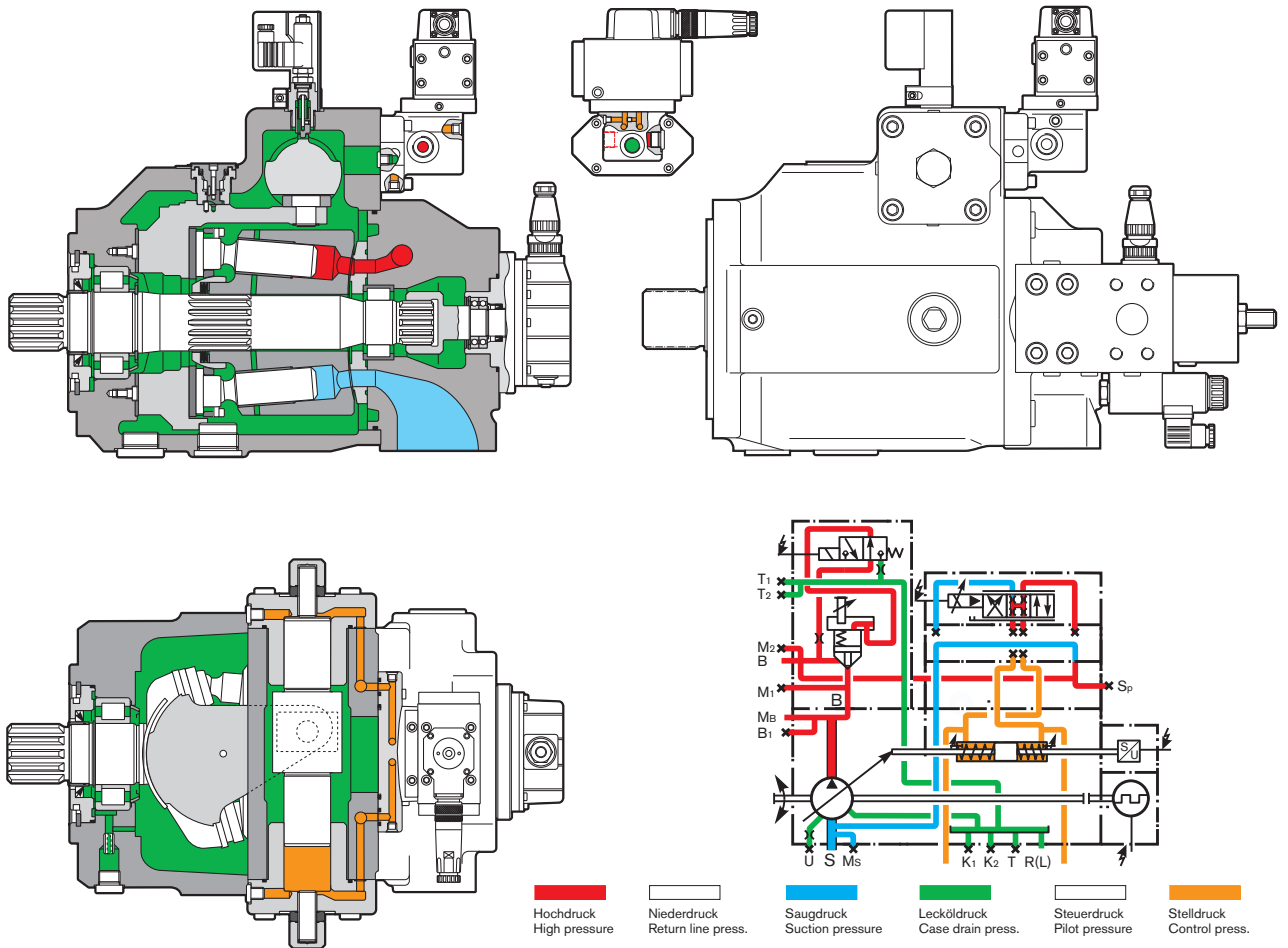
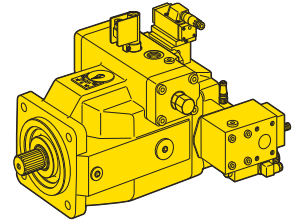
Annexe 5.1 Circuit hydraulique interne de la pompe A4VS0

A4VS0 ... DS1

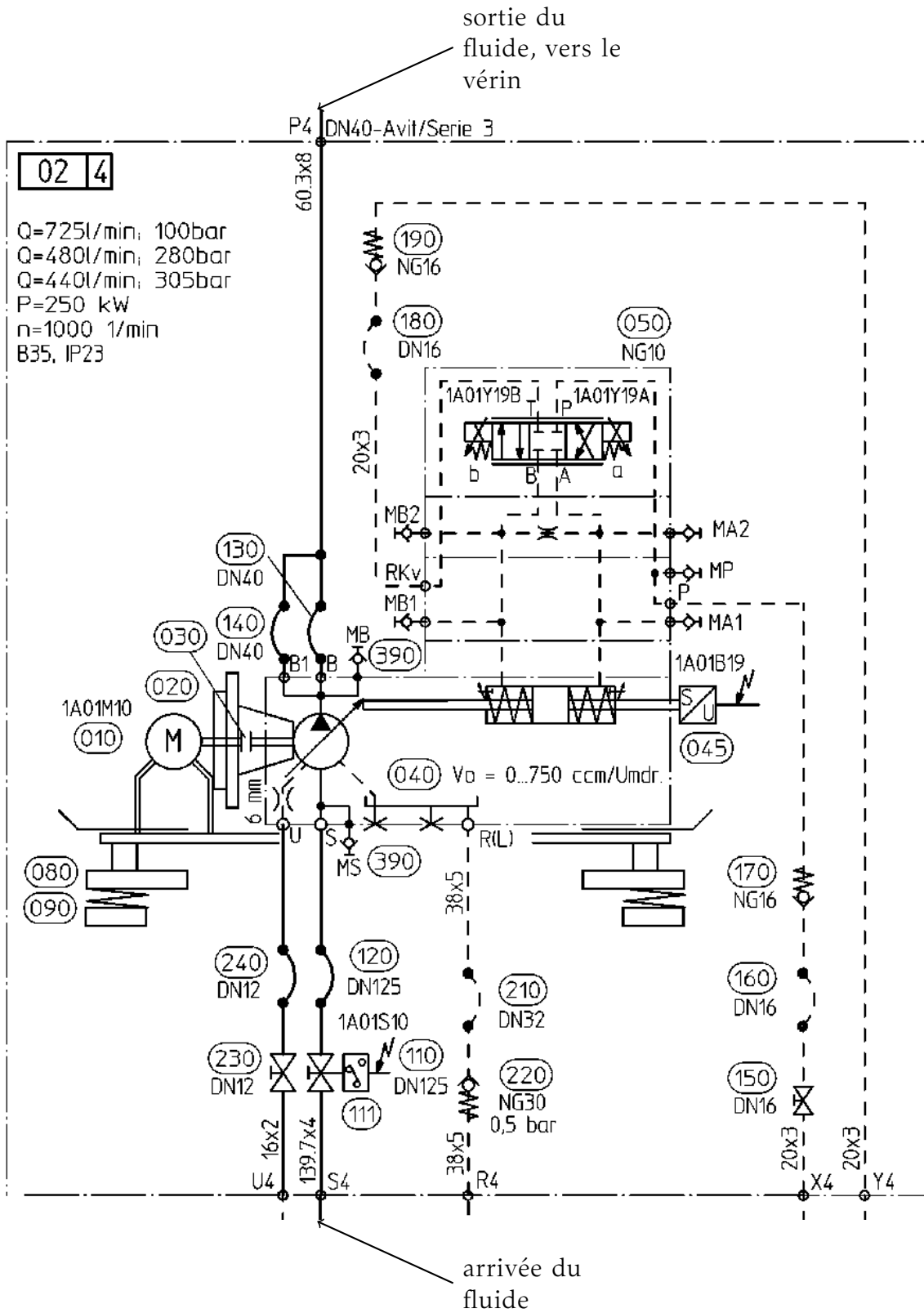
Baureihe / Series 30

Verstellpumpe
Variable displacement pump

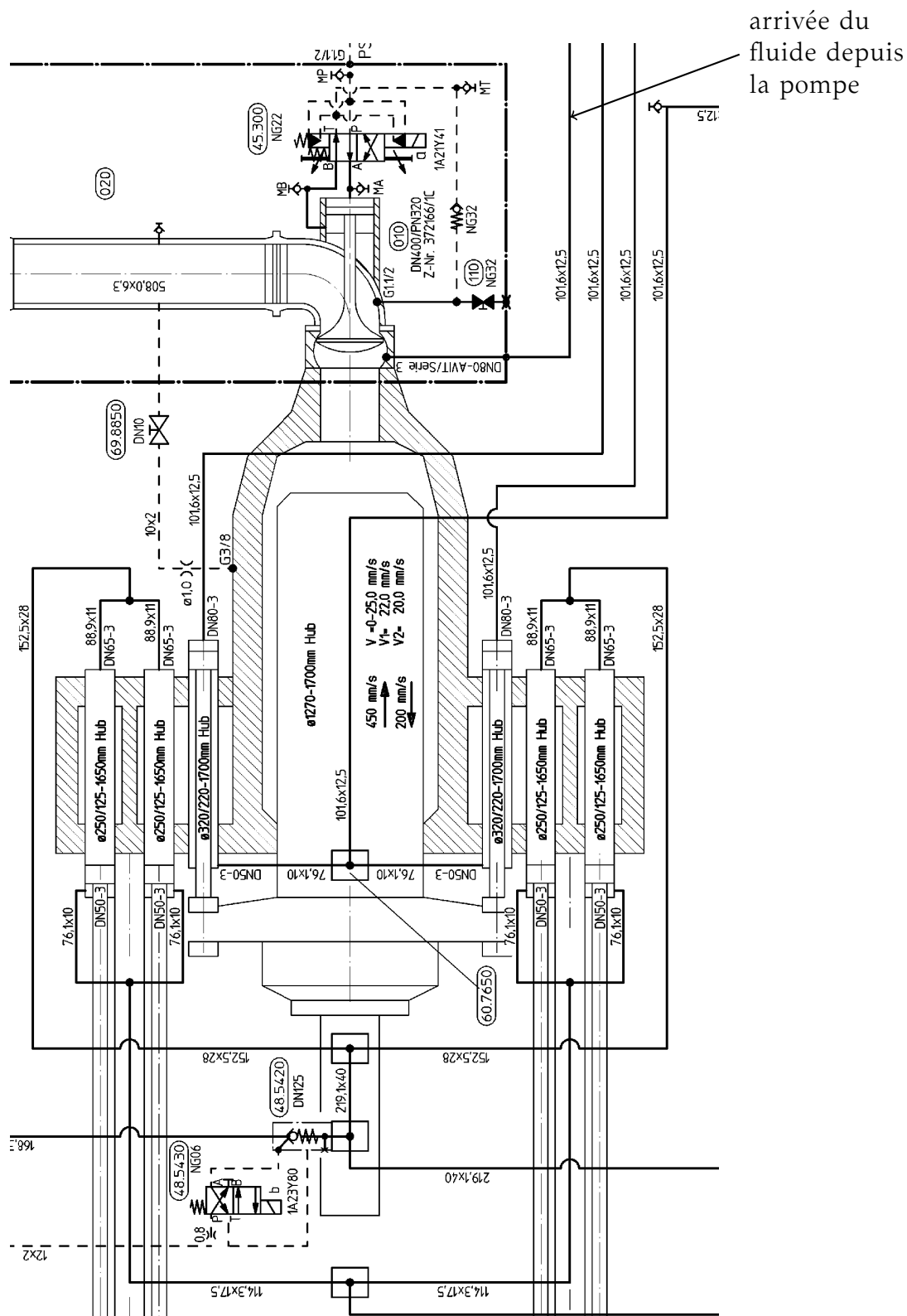
Rexroth
Bosch Group



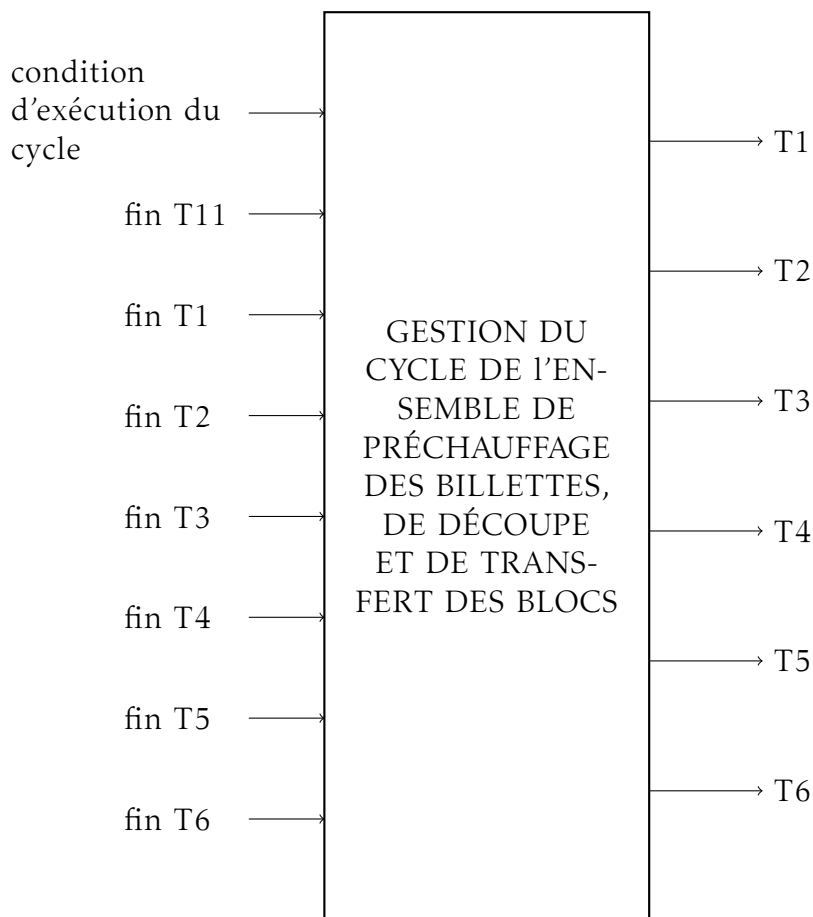
Annexe 6 Schéma hydraulique de la pompe A4VS0



Annexe 7 Schéma hydraulique du vérin de presse



Annexe 8 Boite fonctionnelle de caractérisation des E/S de la commande de l'ensemble de préchauffage des billettes, de découpe et de transfert des blocs



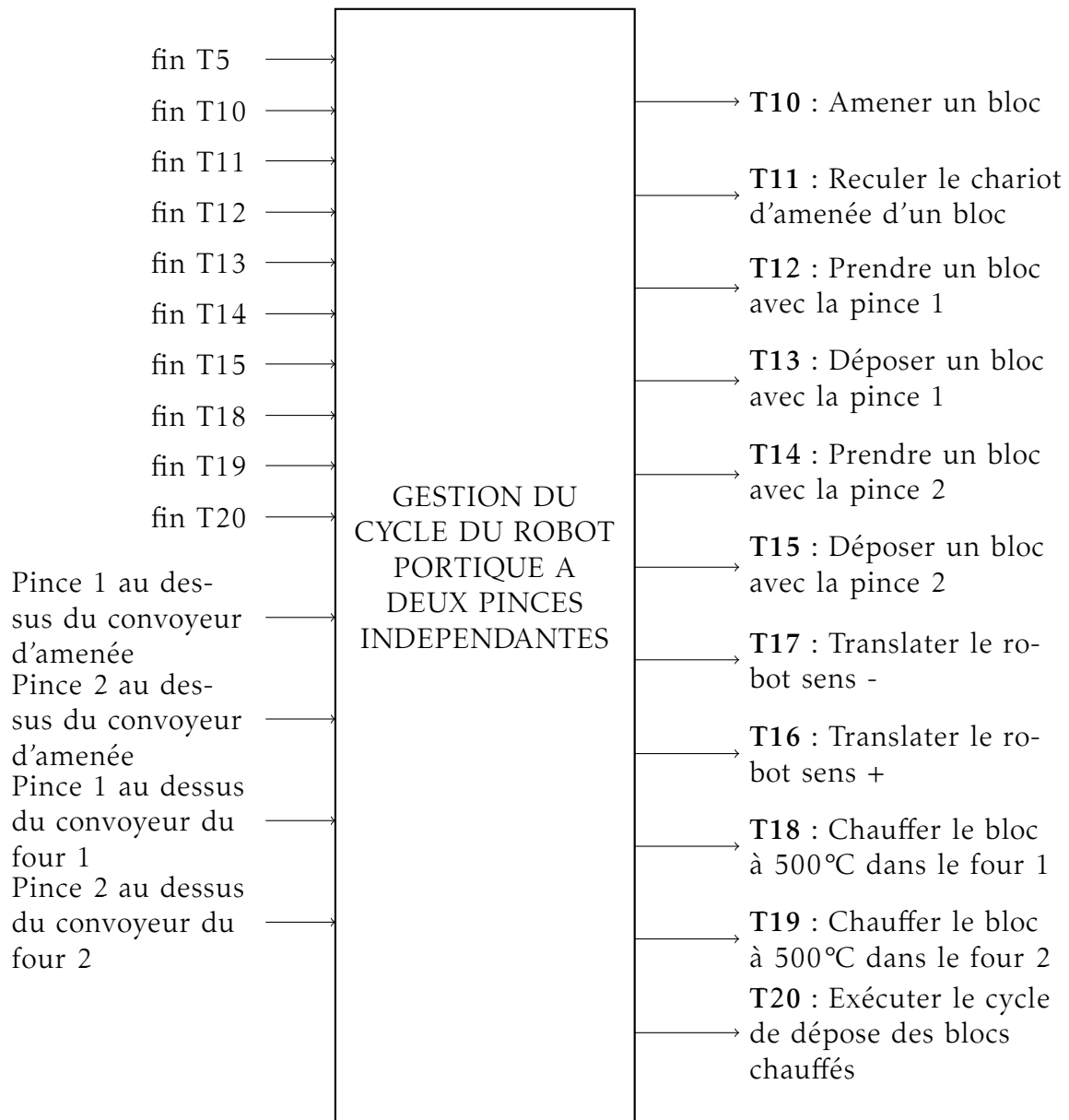
Information	Description
Fin T11	Le chariot d'amenée des blocs est revenu vide en position de référence à l'extrémité des guides près du poste de découpe
Fin T1	La billette est dans le four et la porte d'entrée du four est fermée
Fin T2	La température de l'ensemble de la billette a atteint 130°C (le four maintient cette température)
Fin T3	La billette a atteint la position dcb
Fin T4	La scie est revenue en position de référence après sciage de la billette
Fin T5	Le poste de découpe a complètement terminé de transférer le bloc sur le chariot d'amenée
Fin T6	Le résidu a été évacué

TABLE 6 –

En sortie T_i signifie « exécuter la tâche T_i ».

Annexe 9 Robot portique

Annexe 9.1 Boite fonctionnelle de caractérisation des E/S de la commande du robot portique à deux pinces indépendantes



Remarques :

- Fin T5 : Le poste de découpe a complètement terminé de transférer le bloc sur le chariot d'amenée.
- Tâches T16 et T17 - Translation du robot : le sens + caractérise un déplacement du robot dans le sens « stock des blocs non conformes vers stock tampon ». Le sens - caractérise un déplacement dans le sens inverse.

Annexe 9.2 Tâches associées au cycle du robot portique

Tâche	Intitulé	Commentaire
T10	Amener un bloc	Le chariot d'amenée amène le bloc sous la zone de prise du robot portique
T11	Reculer le chariot d'amenée d'un bloc	Le chariot d'amenée revient vide en position de référence (près du poste de découpe)
T12	Prendre un bloc avec la pince 1	La pince 1 descend, saisit le bloc sur le chariot d'amenée et remonte
T13	Déposer un bloc avec la pince 1	La pince 1 descend le bloc sur un convoyeur ou sur une zone tampon, libère le bloc et remonte
T14	Prendre un bloc avec la pince 2	
T15	Déposer un bloc avec la pince 2	
T16	Translater le robot sens +	Le robot translate dans le sens « stock des blocs non conformes vers stock tampon »
T17	Translater le robot sens -	Le robot translate dans le sens « stock tampon vers stock des blocs non conformes »
T18	Chauffer le bloc à 500°C dans le four 1	Le convoyeur du four 1 introduit le bloc dans le four, le four chauffe le bloc à 500°C et le bloc est ramené à sa position de départ
T19	Chauffer le bloc à 500°C dans le four 2	
T20	Exécuter le cycle de dépose des blocs chauffés	Le robot translate jusqu'au stock tampon, exécute le cycle de dépose des blocs et revient dans la position : pince 1 au dessus du convoyeur d'amenée. La(es) position(s) de dépose des blocs est définie en fonction des emplacements disponibles dans le stock tampon et sur le convoyeur de transfert

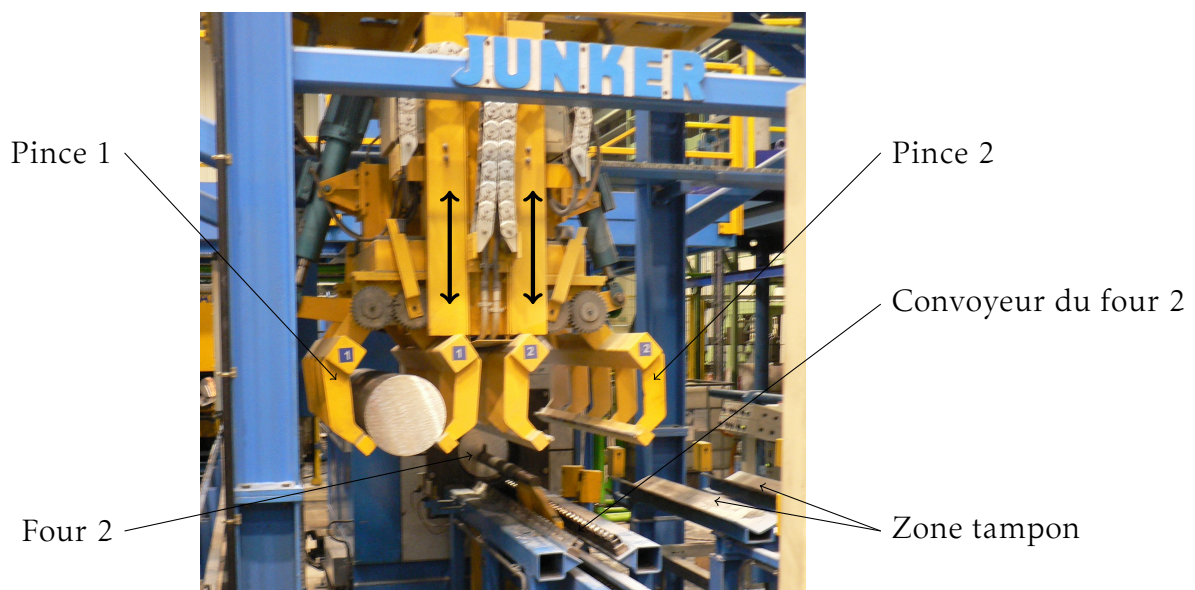
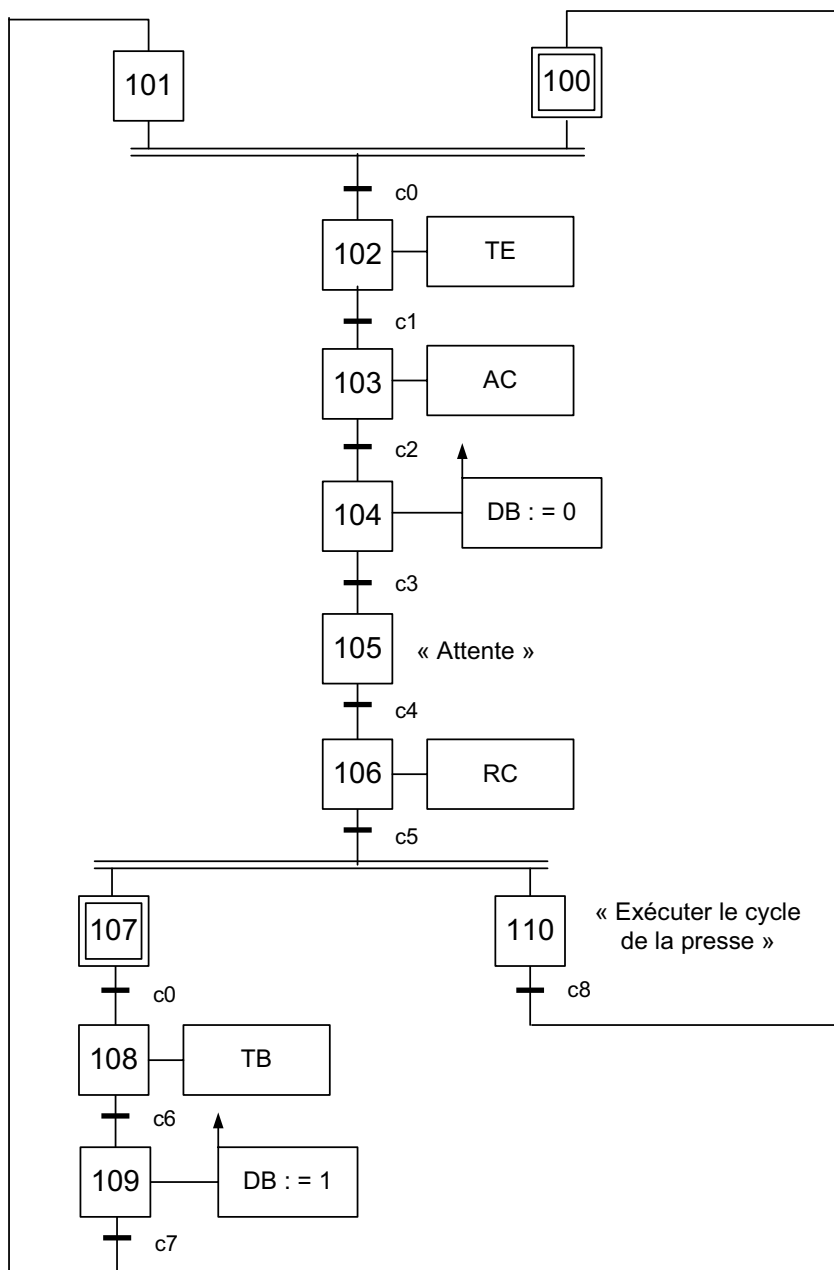


FIGURE 21 – Robot portique à deux pinces indépendantes

Annexe 10 Cycle du chariot de chargement



Variable d'entrée	Description	Variable de sortie	Description
c0	Conditions de départ de cycle	TE	Traiter l'extrémité du bloc
c1	L'extrémité du bloc est traitée	AC	Avancer le chariot
c2	Le chariot est avancé, le bloc est dans la presse	DB	Variable affectée à la valeur 1 pour brider le bloc, affectée à la valeur 0 pour le débrider
c3	Le bloc est bridé	RC	Reculer le chariot
c4	Le bloc a été introduit dans le conteneur	TB	Transférer un bloc sur le chariot
c5	Le chariot est reculé		
c6	Le bloc est transféré sur le chariot		
c7	Le bloc est bridé		
c8	Le cycle de la presse est terminé		

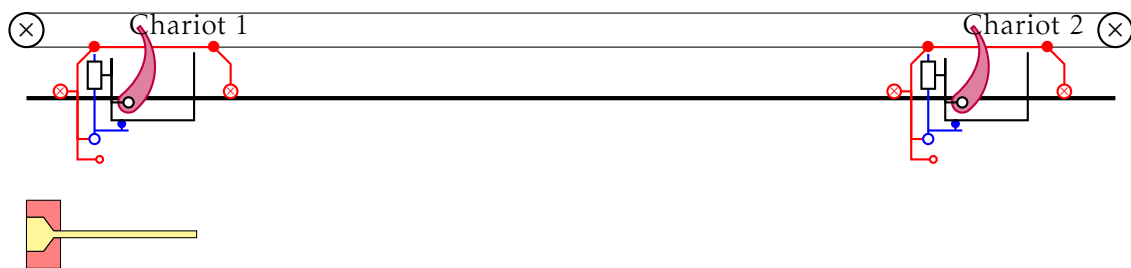
Annexe 11 Extrait de la norme CEI61131-3

Static contacts		(Contacts)
No.	Symbol	Description
1	*** - -	Normally open contact (Contact NO) The state of the left link is copied to the right link if the state of the associated Boolean variable (indicated by "***") is ON. Otherwise, the state of the right link is OFF.
3	*** - / -	Normally closed contact (Contact NF) The state of the left link is copied to the right link if the state of the associated Boolean variable is OFF. Otherwise, the state of the right link is OFF. Transition-sensing contacts
5	*** - P -	Positive transition-sensing contact (Contact front montant) The state of the right link is ON from one evaluation of this element to the next when a transition of the associated variable from OFF to ON is sensed at the same time that the state of the left link is ON. The state of the right link shall be OFF at all other times.
7	*** - N -	Negative transition-sensing contact (Contact front descendant) The state of the right link is ON from one evaluation of this element to the next when a transition of the associated variable from ON to OFF is sensed at the same time that the state of the left link is ON. The state of the right link shall be OFF at all other times.
Momentary coils		(Bobines monostables)
No.	Symbol	Description
1	*** -()-	Coil (Bobine) The state of the left link is copied to the associated Boolean variable and to the right link.
2	*** -(/)-	Negated coil (Bobine active au repos) The state of the left link is copied to the right link. The inverse of the state of the left link is copied to the associated Boolean variable, that is, if the state of the left link is OFF, then the state of the associated variable is ON, and vice versa.
Latched Coils		(Bobine bistable)
3	*** -(S)-	SET (latch) coil (Mise à 1) The associated Boolean variable is set to the ON state when the left link is in the ON state, and remains set until reset by a RESET coil.
4	*** -(R)-	RESET (unlatch) coil (Mise à 0) The associated Boolean variable is reset to the OFF state when the left link is in the ON state, and remains reset until set by a SET coil.

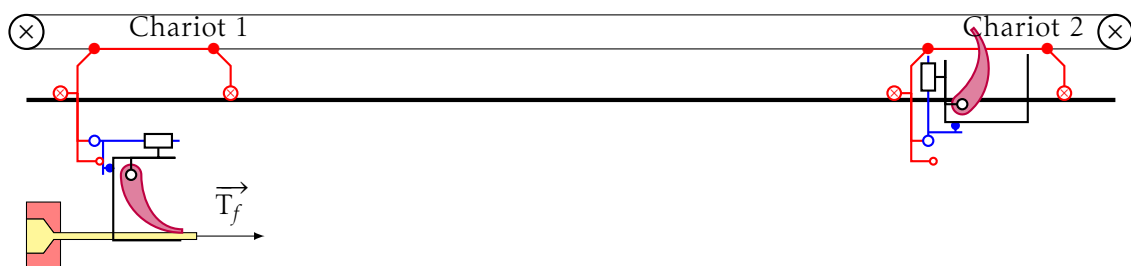
TABLE 7 – Contacts et bobines

Annexe 12 Fonctionnement du puller

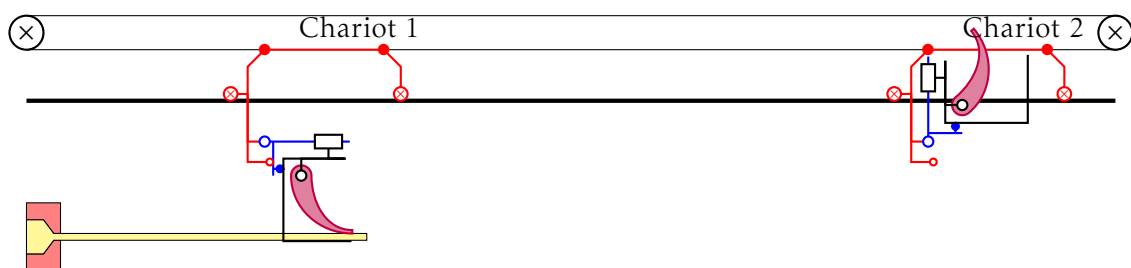
Étape 1 : Début du filage



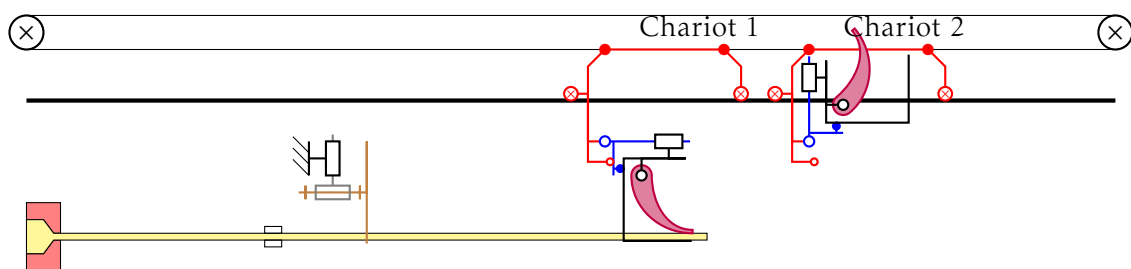
Étape 2 : Prise du profil et mise en traction



Étape 3 : Filage, profil en traction



Étape 4 : Longueur de filage atteinte, découpe



Étape 5 : Évacuation du premier profilé - Prise du second profilé

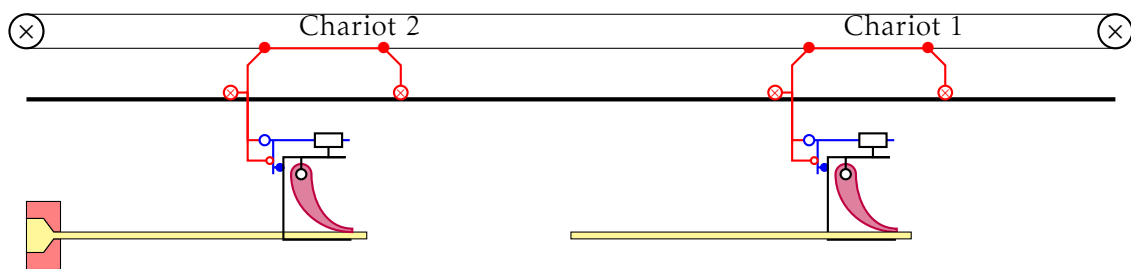


FIGURE 22 – Cycle de fonctionnement du Puller



Annexe 13 Capteur d'effort

CELLE DI CARICO A COMPRESIONE / TRAZIONE

COMPRESSION / TENSION LOAD CELLS

CL

LISTINO PREZZI

CL Kg 500 *, 1000 *, 2000 *	Euro 500,00
CL Kg 5000 *, 10000 *	Euro 600,00
CL Kg 20000, 30000, 60000	Euro 900,00
CL Kg 100000	Euro 1800,00
CL Kg 150000	Euro 1900,00
CL Kg 200000	Euro 2200,00
Versione ATEX  II 1 G  II 2 D (ATEX version)	Euro 10,00
CERTIFICATO DI RIFERIBILITA' SIT (COMPRESIONE)	Euro 50,00

Realizzate in accordo alle norme OIML R60. *Manufactured according to OIML standards R60.*



- ESECUZIONE IN ACCIAIO INOX 17-4 PH
- BIDIREZIONALE A TRAZIONE E COMPRESIONE
- CLASSE DI PRECISIONE < +/- 0,10 %
- GRADO DI PROTEZIONE IP 67 (* IP 68 saldata)
- STAINLESS STEEL 17-4 PH CONSTRUCTION
- BIDIRECTIONAL TENSION AND COMPRESSION
- ACCURACY CLASS < +/- 0,10 %
- PROTECTION RATING IP 67 (* IP 68 welded)

	Kg 500	Kg 5000	Kg 20000			
	Kg 1000 Kg 2000	Kg 10000	Kg 30000 Kg 60000	Kg 100000	Kg 150000	Kg 200000
A	85	94	136	175	213	254
B	99	109	164	219	249	299
C	38	44	70	94	140	170
D	73	79	106	129	176	210
E	M20 x 1,5	M24 x 2	M48 x 3	M64 x 4	M72 x 4	M90 x 6
F	2	2	5	5	5	5
G	2	2	2	3	3	3
H	30	35	50	70	70	80
I	8,5	8,5	16,5	25,5	25,5	25,5 (12 fori /holes)
Peso kg Weight	1,1	1,4	5	11	16	26

Dimensions (mm)

CARATTERISTICHE

TECHNICAL FEATURES

ERRORE COMBINATO SENSIBILITA' EFFETTO DELLA TEMPERATURA SULLO ZERO EFFETTO DELLA TEMPERATURA SUL FONDO SCALA COMPENSAZIONE TERMICA CAMPO DI TEMPERATURA DI LAVORO CREEP A CARICO NOMINALE DOPO 30 MINUTI TENSIONE DI ALIMENTAZIONE MAX TOLLERATA RESISTENZA DI USCITA RESISTENZA D'INGRESSO BILANCIAMENTO DI ZERO RESISTENZA D'ISOLAMENTO CARICO STATICO MASSIMO CARICO DI ROTTURA in % sul FONDO SCALA DEFLESSIONE A CARICO NOMINALE	< +/- 0,10 % 2 mV/V +/- 0,3 % 0,005 % / °C 0,005 % / °C - 10°C / + 50°C - 20°C / + 70°C 0,03 % 15 Volt 700 Ohm +/-5 700 Ohm +/-20 +/- 0,5 % > 5.000 MOhm 150 % > 300 % 0,3 mm	COMBINED ERROR SENSITIVITY TEMPERATURE EFFECT ON ZERO TEMPERATURE EFFECT ON SPAN COMPENSATED TEMPERATURE RANGE OPERATING TEMPERATURE RANGE CREEP AT NOMINAL LOAD IN 30 MINUTES MAX SUPPLY VOLTAGE WITHOUT DAMAGE OUTPUT RESISTANCE INPUT RESISTANCE ZERO BALANCE INSULATION RESISTANCE MECHANICAL LIMIT IN SERVICE DESTRUCTIVE LOAD DEFLECTION AT NOMINAL LOAD
---	---	--

CAVO

CABLE

LUNGHEZZA	5 m	LENGHT	5 m
DIAMETRO	5 mm	DIAMETER	5 mm
FILI CONDUTTORI	6 x 0,14 mm ²	CORES	6 x 0,14 mm ²

	SCHERMO	SHIELD
	+ SEGNALE (VERDE)	+ SIGNAL (GREEN)
	+ ALIMENTAZIONE (ROSSO)	+ EXCITATION (RED)
	+ SENSE (BLU)	+ SENSE (BLUE)
	- SEGNALE (BIANCO)	- SIGNAL (WHITE)
	- ALIMENTAZIONE (NERO)	- EXCITATION (BLACK)
- SENSE (MARRONE)	- SENSE (BROWN)	

Documents Réponses

Document Réponse 1 Diagrammes de Bode

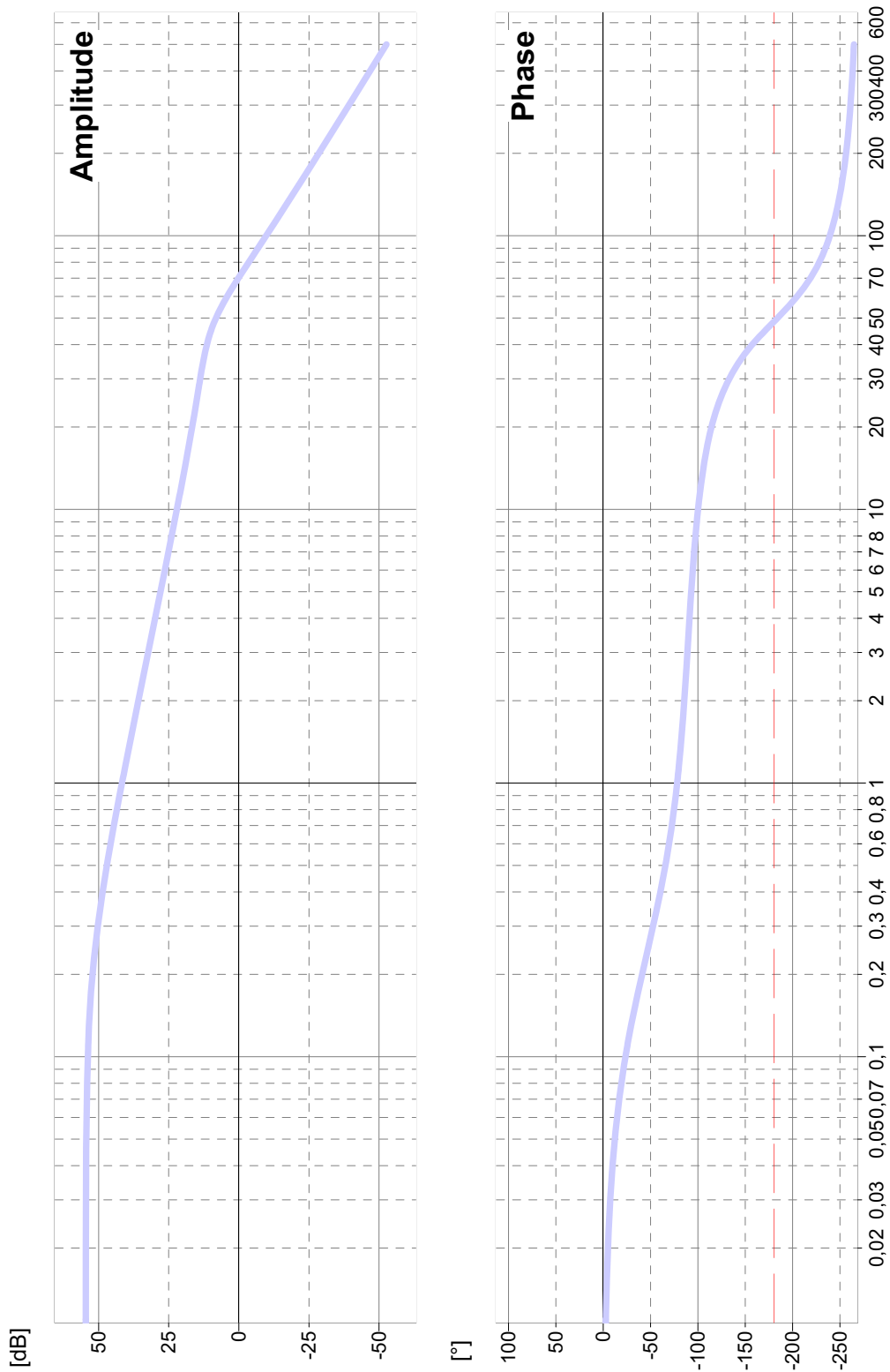


FIGURE 23 – Diagrammes de Bode

Document Réponse 2 Diagramme de Black

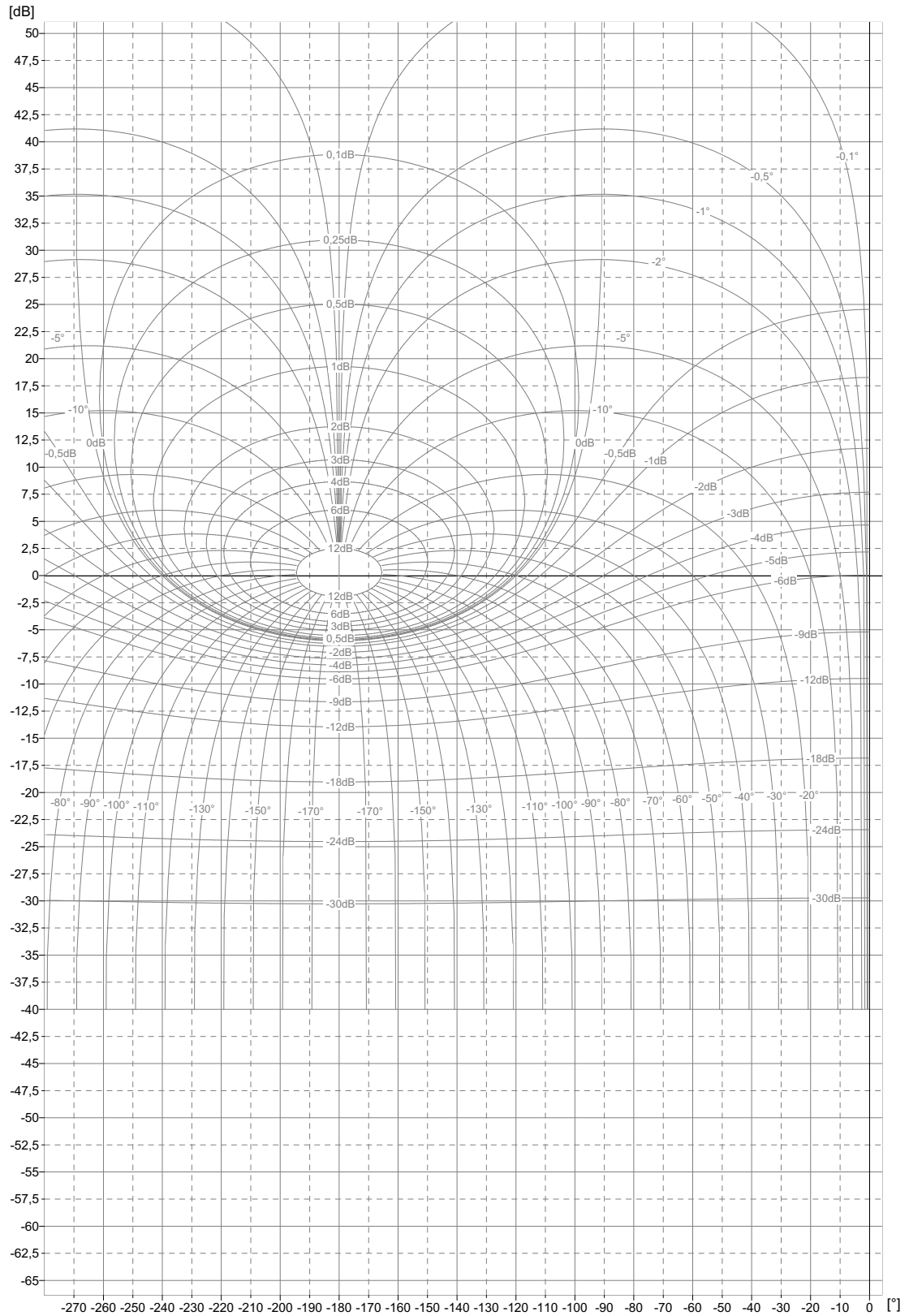


FIGURE 24 – Diagrammes de Black

ÉLÉMENTS de CORRIGÉ

Cycle de fabrication des profilés
Épreuve d'automatique et d'informatique industrielle
Jean-Jacques Duméry et Robert Papanicola

Q- 1

Le diamètre circonscrit est de $\sqrt{80^2 + 18^2} = 82 \text{ mm}$

Après lecture de la courbe annexe 2, l'épaisseur E_1 est donc de 2 mm

$$S = \pi \cdot \frac{250^2}{4}$$

$$s = 2 \cdot (80 \cdot 2 \cdot 2 + (18 - 2 - 2) \cdot 3 \cdot 2) = 808 \text{ mm}^2$$

$$\delta R = \frac{S}{s} = 60,75$$

Q- 2

Compte tenu des tolérances dimensionnelles, s devient :

$$s_{maxi} = 2 \cdot (80 \cdot 2 \cdot 2,15 + (18 - 2 \cdot 2,15) \cdot 2,15 + (18 - 2 \cdot 2,15) \cdot 2,25 + (18 - 2 \cdot 2,15) \cdot 2,40) = 874 \text{ mm}^2$$

$$\delta R_{mini} = 56,14$$

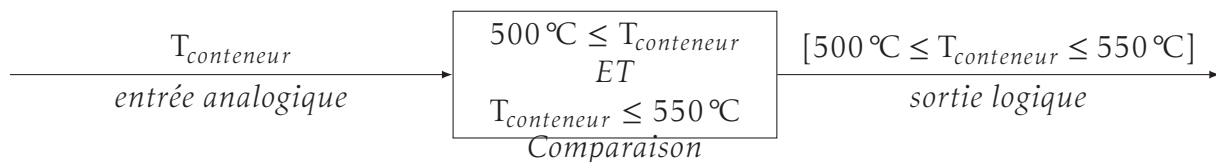
$$(\text{Longueur du bloc}_{mini}) \cdot S = (\text{Longueur du profilé}) \cdot s_{maxi}$$

$$\text{Longueur du bloc}_{mini} = \frac{\text{Longueur du profilé}}{\delta R_{mini}} = \frac{25 \cdot 2 + 26 \cdot 0,003 + 2 \cdot 0,3}{56,14}$$

$$\text{Longueur du bloc mini} = 0,903 \text{ m}$$

Q- 3

Il faut réaliser une comparaison :



En respectant le bilan d'entrées/sorties données dans l'annexe 4, le cycle de la presse est le suivant :

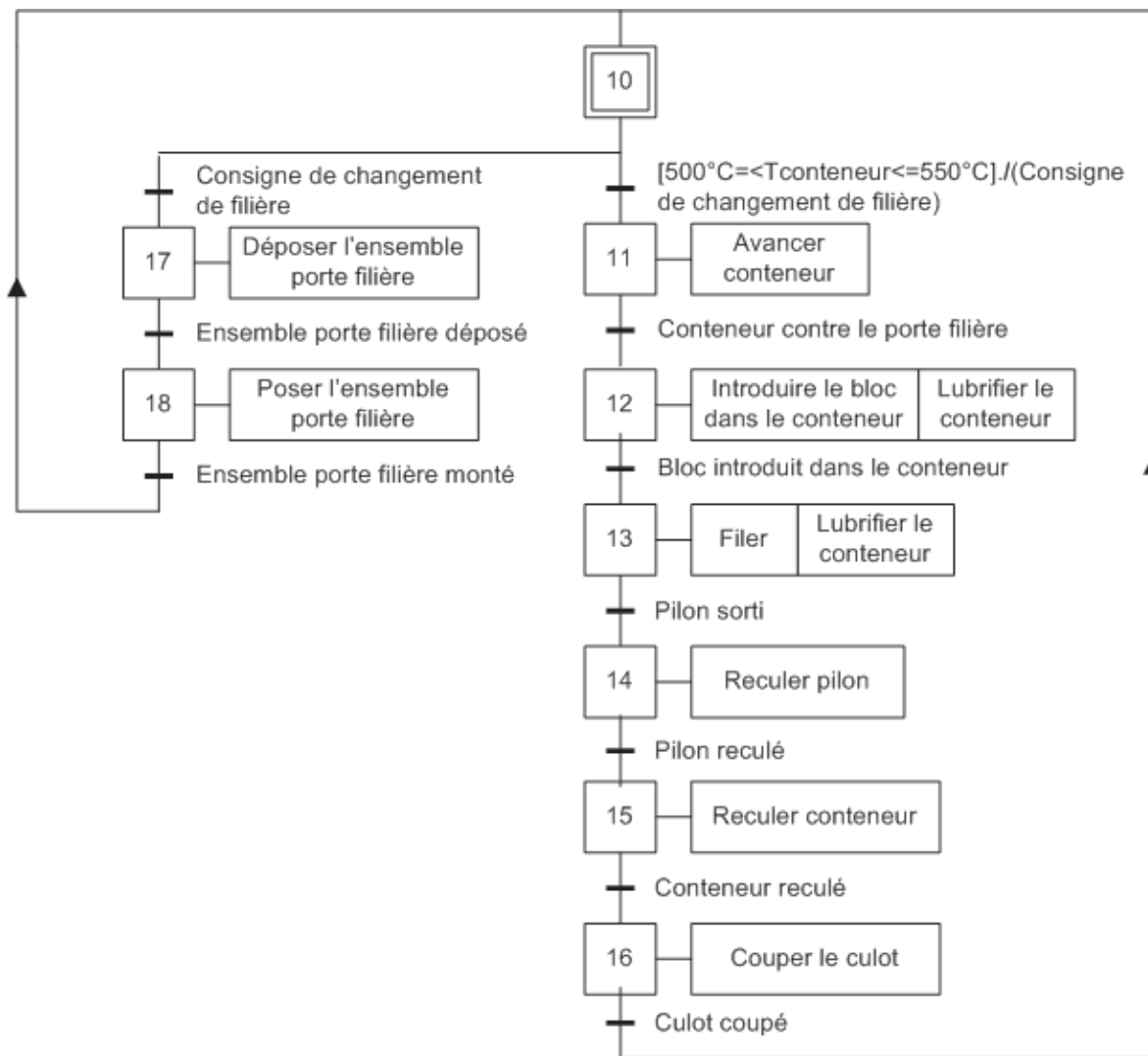


FIGURE 6 – cycle de la presse

Q- 4

L'actionneur linéaire placé en partie supérieure de la pompe manœuvre le plateau de la pompe pour l'incliner par rapport à l'axe principal. Lorsque le plateau est perpendiculaire à l'axe du barillet le débit est nul. Lorsque le plateau est incliné, les pistons ont un mouvement de translation alternative par rapport au barillet, ce qui provoque l'aspiration et le refoulement de l'huile. L'aspiration et le refoulement se fait par un jeu de lumières réalisées dans un distributeur à glace placé à l'extrémité du barillet.

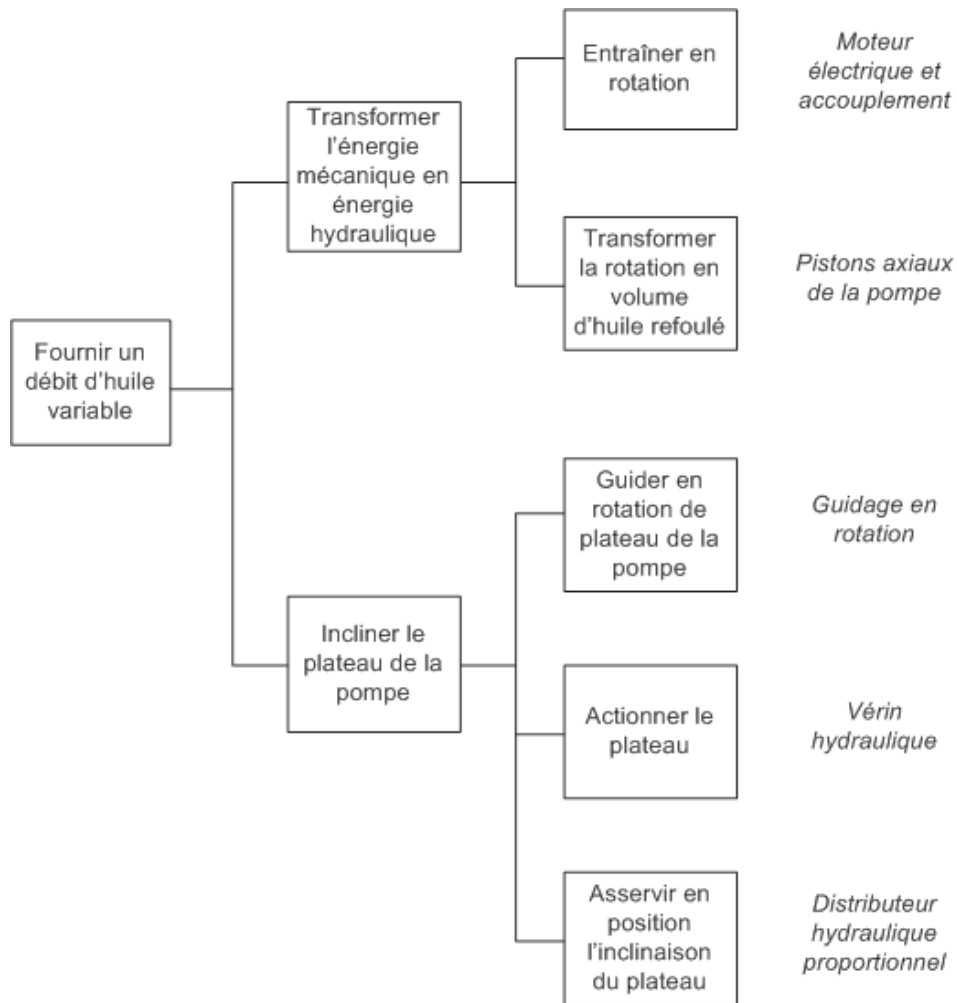


FIGURE 8 – Décomposition fonctionnelle

Q- 5

		1 pompe	2 pompes	3 pompes	4 pompes
R1	débit	725 L/min	1450	2175	2900
	pression	100 bar	100	100	100
	puissance	120 kW	240	360	480
R2	débit	480 L/min	960	1440	1920
	pression	280 bar	280	280	280
	puissance	224 kW	448	672	896
R3	débit	440 L/min	880	1320	1760
	pression	305 bar	305	305	305
	puissance	224 kW	447	671	895

TABLE 2 – Débit, pression et puissance disponible

Q- 6

$$F_{filage} = \pi \cdot 125^2 \cdot 180 \cdot \ln(60) = 36,2 \times 10^6 \text{ N}$$

$$P = F_{filage} \cdot v$$

$$P = F_{filage} \cdot \frac{20}{60 \cdot \delta R}$$

$$P = 201 \text{ kW}$$

Choix de 2 pompes (241 kW)

Q- 7

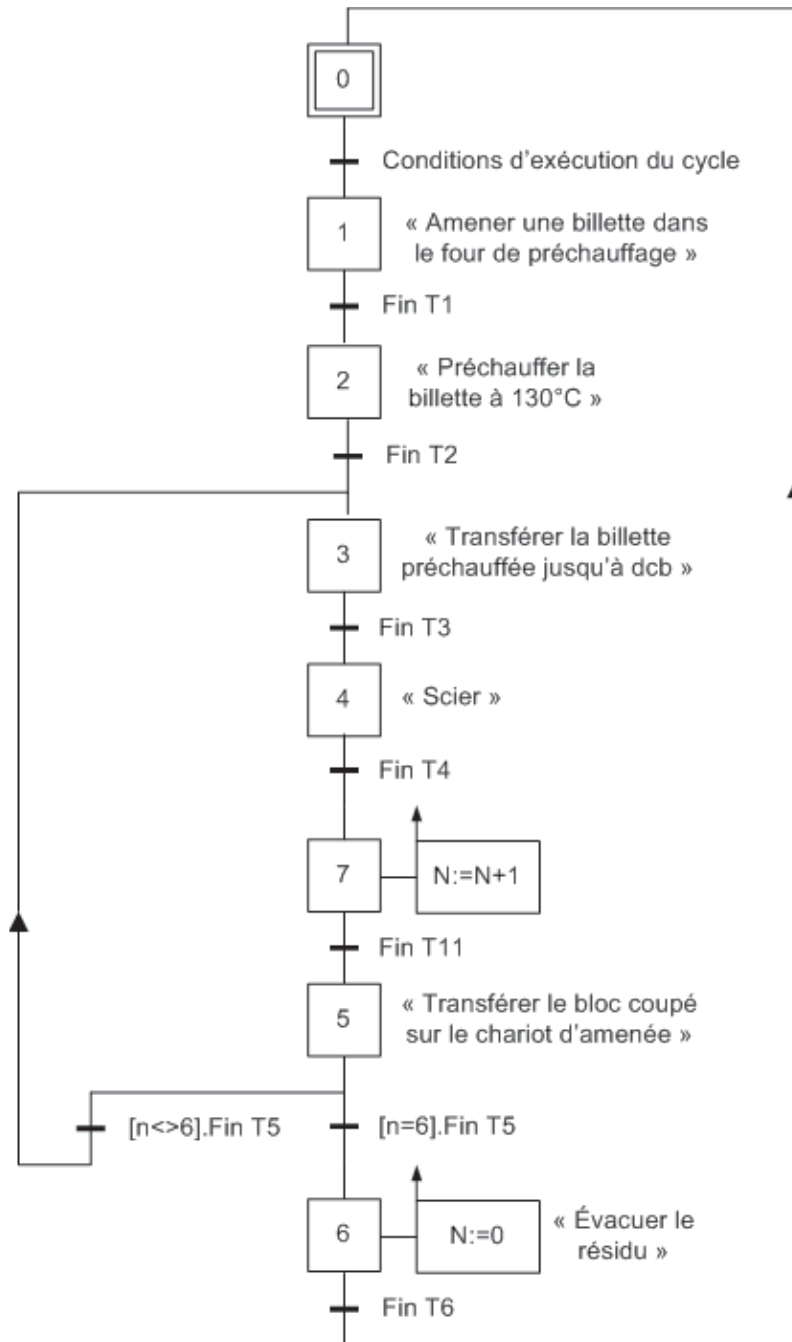


FIGURE 10 – grafset GCamenée

Q- 8

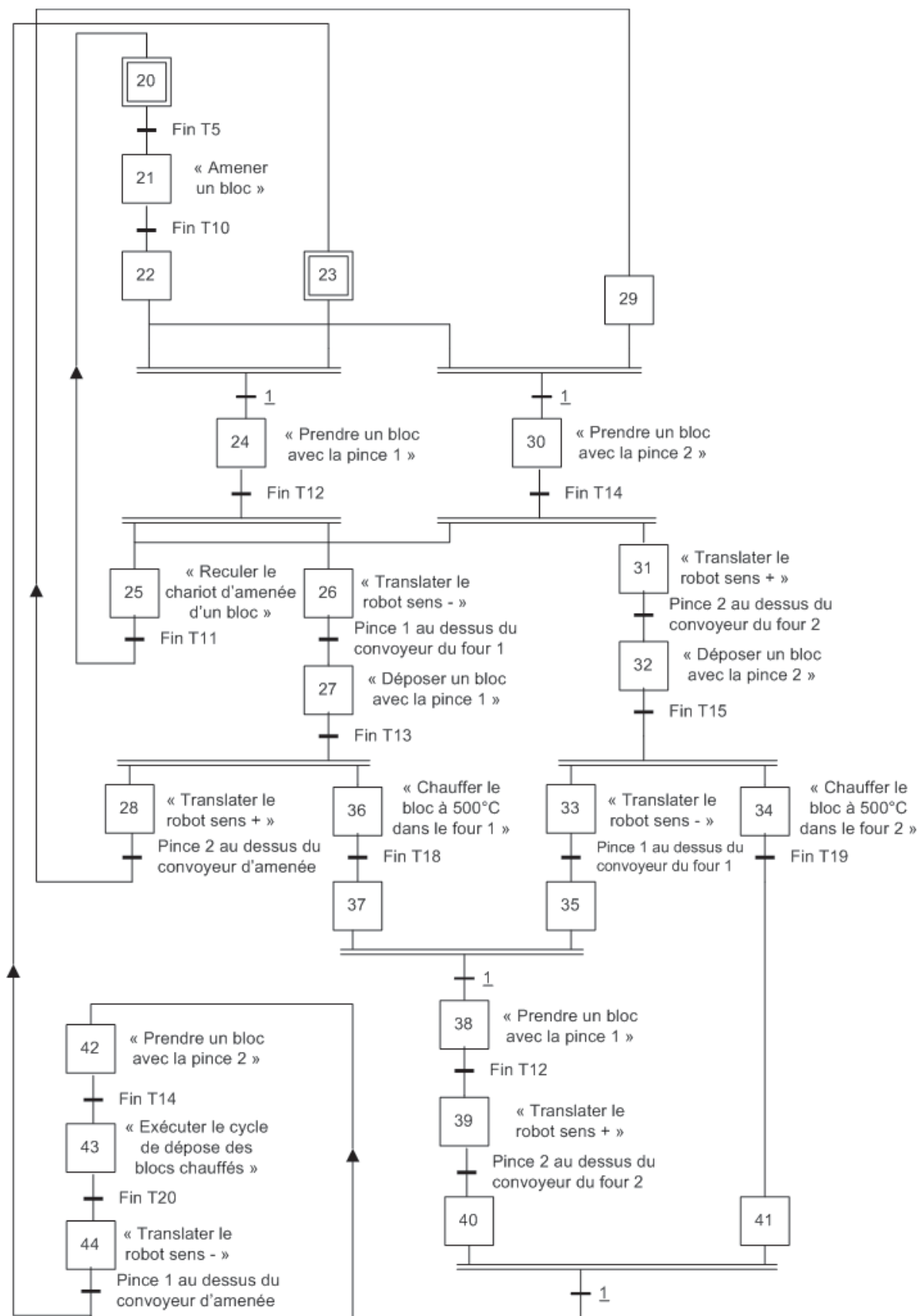


FIGURE 11 – grafset GC robot

Un autre cycle où le robot se présenterait systématiquement au dessus de chaque convoyeur de four avec un bloc à chauffer pourrait être imaginé. Cela permettrait de réaliser dans la même séquence une prise du bloc chauffé avec une pince et une dépose d'un bloc à chauffer avec l'autre pince. Dans ce cycle, le robot prend un bloc avec la pince 2, se dirige vers le four 1, fait un cycle de prise et dépose complet, puis effectue la tâche T20. Ensuite, le robot prend un bloc avec la pince 2, se dirige vers le four 2, fait un cycle de prise et dépose complet, puis effectue la tâche T20. Dans ce principe de fonctionnement, les fours n'attendent jamais le robot, ils fonctionnent sans discontinuer.

Q- 9 Dans le cas de la barrière simple utilisée dans l'application (émetteur/récepteur) : l'émetteur et le récepteur sont dans deux boîtiers différents montés en vis-à-vis. Le bloc est détecté dès qu'il coupe le faisceau optique.

Il est possible aussi d'utiliser une barrière réflex où émetteur et récepteur sont dans le même boîtier, la lumière émise étant renvoyée par un réflecteur.

Le détecteur direct où émetteur et récepteur sont dans le même boîtier et où la lumière émise est réfléchiée par l'objet nécessite des objets suffisamment réfléchissants.

Q- 10

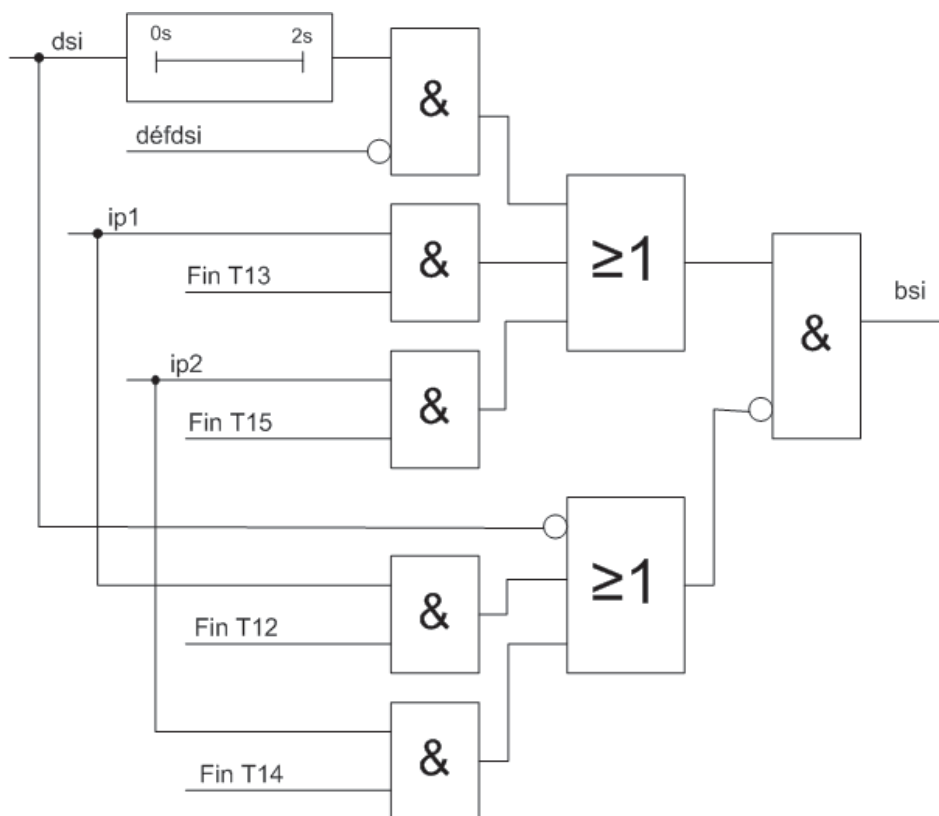


FIGURE 12 – Logigramme

Q- 11

Cette structure du programme permet d'éviter les évolutions fugaces (états instables), une étape pouvant être activée et désactivée lors de la même scrutation du programme. Il s'agit également de

respecter la règle 4 d'évolution du Grafcet portant sur les franchissements simultanés de transitions.

Q- 12

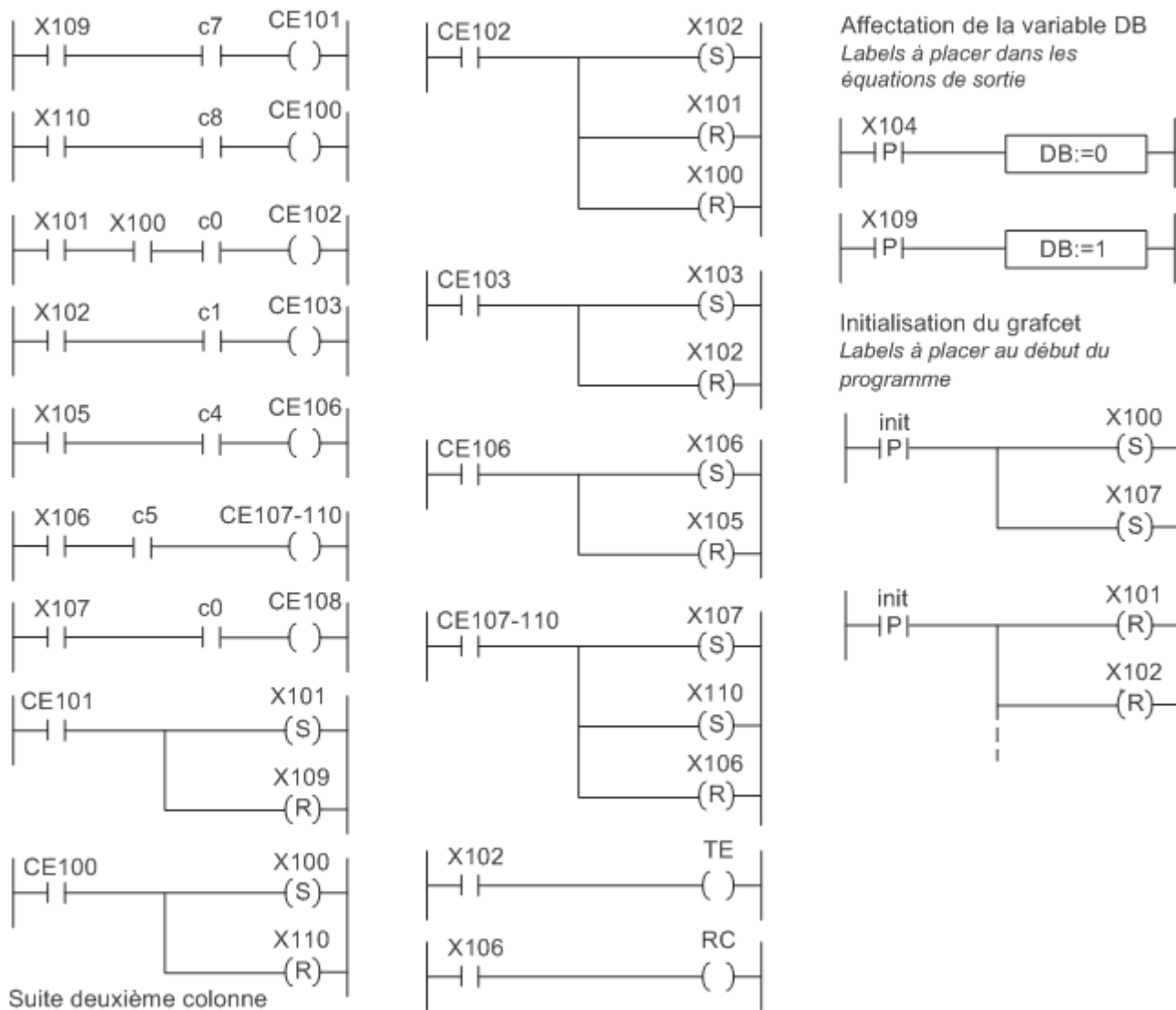


FIGURE 14 – schéma ladder

Q- 13 On isole l'ensemble {étai + mors}. On écrit théorème de la résultante dynamique en projection suivant l'axe (O, \vec{x}) ce que donne :

$$m_e \cdot \ddot{x}_f = T_c - T_f \quad (1)$$

Q- 14 On isole maintenant tout l'ensemble mobile hormis l'étai et les mors, et on applique le théorème de l'énergie cinétique.

Déterminons dans un premier temps l'énergie cinétique E_c

$$E_c = \frac{1}{2}J_m \cdot \omega_m^2 + \frac{1}{2}J_r \cdot \omega_m^2 + \frac{1}{2}M_{ch} \cdot v_c^2 + \frac{1}{2}M_c \cdot v_c^2$$

$$\text{avec } v_c = \frac{R_p}{\lambda} \omega_m$$

$$E_c = \frac{1}{2}J_m \cdot \omega_m^2 + \frac{1}{2}J_r \cdot \omega_m^2 + \frac{1}{2}M_{ch} \cdot \left(\frac{R_p}{\lambda} \omega_m\right)^2 + \frac{1}{2}M_c \cdot \left(\frac{R_p}{\lambda} \omega_m\right)^2$$

$$E_c = \frac{1}{2} \left(J_m + J_r + M_{ch} \cdot \frac{R_p^2}{\lambda^2} + M_c \cdot \frac{R_p^2}{\lambda^2} \right) \omega_m^2 \quad (2)$$

d'où

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} J_e \cdot \omega_m^2 \right] = C_m \cdot \omega_m - T_c \cdot v_c$$

$$J_e \cdot \omega_m \cdot \dot{\omega}_m = C_m \cdot \omega_m - T_c \cdot v_c$$

$$J_e \cdot \dot{\omega}_m = C_m - T_c \cdot \frac{R_p}{\lambda} \quad (3)$$

que l'on peut aussi écrire en fonction de v_c

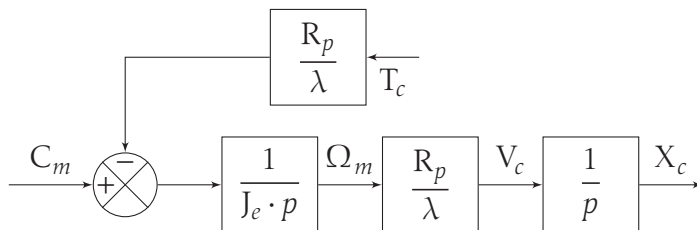
$$J_e \cdot \frac{\lambda}{R_p} \dot{v}_c = C_m - T_c \cdot \frac{R_p}{\lambda} \quad (4)$$

puis de x_c

$$J_e \cdot \frac{\lambda}{R_p} \ddot{x}_c = C_m - T_c \cdot \frac{R_p}{\lambda} \quad (5)$$

$$(6)$$

Q- 15

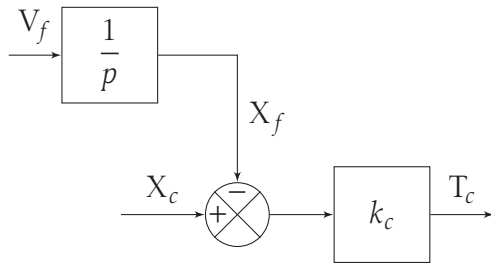


Q- 16 Capteur à jauge de contrainte

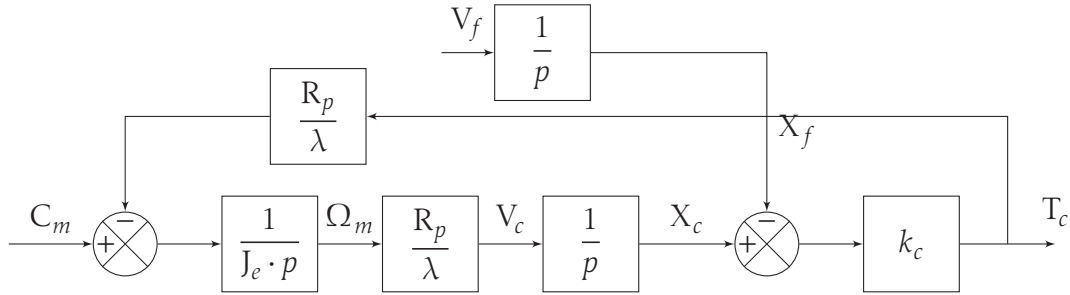
Q- 17 L'effort T_c est proportionnel à la déformation, si on suppose que à l'instant initial les positions relatives du chariot et de l'étai sont telles que $x_c = x_f = 0$ alors pendant le déplacement.

$$T_c = -k_c (x_f - x_c)$$

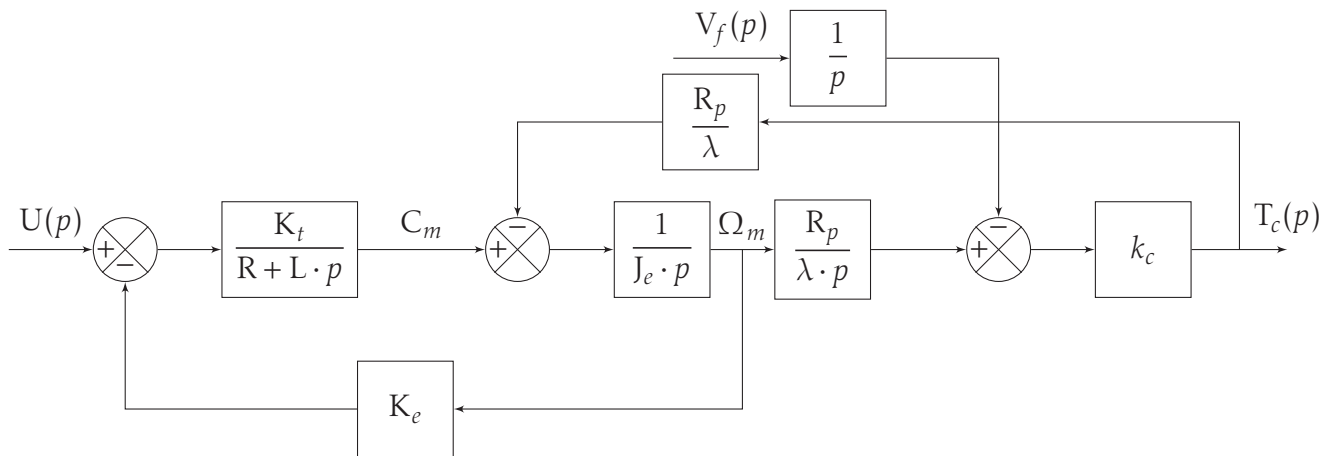
Q- 18



Q- 19



Q- 20



Q- 21

$$T_c(p) = H_e \cdot (H_c \cdot \Omega_m(p) - H_g \cdot V_f(p)) \quad (10)$$

$$\Omega_m(p) = H_b \cdot (H_a \cdot (U(p) - H_d \cdot \Omega_m(p)) - H_f \cdot T_c(p)) \quad (11)$$

$$d'o\grave{u} \Omega_m(p) = H_b \cdot \frac{H_a \cdot U(p) - H_f \cdot T_c(p)}{1 + H_b \cdot H_a \cdot H_d} \quad (12)$$

en substituant dans la première relation :

$$T_c(p) = H_e \cdot \left(\frac{H_c \cdot H_b \cdot (H_a \cdot U(p) - H_f \cdot T_c(p))}{1 + H_b \cdot H_a \cdot H_d} - H_g \cdot V_f(p) \right) \quad (13)$$

finalement

$$T_c(p) = \frac{H_a \cdot H_b \cdot H_c \cdot H_e}{1 + H_a \cdot H_b \cdot H_d + H_b \cdot H_c \cdot H_e \cdot H_f} \cdot U(p) - H_e \cdot H_g \frac{1 + H_a \cdot H_b \cdot H_d}{1 + H_a \cdot H_b \cdot H_d + H_b \cdot H_c \cdot H_e \cdot H_f} \cdot V_f(p) \quad (14)$$

Q- 22

On identifie à un second ordre $H_2(p) = \frac{K}{1 + 2\frac{z}{\omega_n} \cdot p + \frac{p^2}{\omega_n^2}}$ et on obtient $K \approx 535$, $\omega_n \approx 3,45 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$

et $z \approx 7,43$.

La fonction de transfert peut donc être mise sous la forme d'un produit de deux premiers ordres : $H_2(p) \approx \frac{535}{1 + 4,31 \cdot p + 0,0085 \cdot p^2} \approx \frac{535}{(1 + 0,02 \cdot p)(1 + 4,3 \cdot p)}$

Q- 23

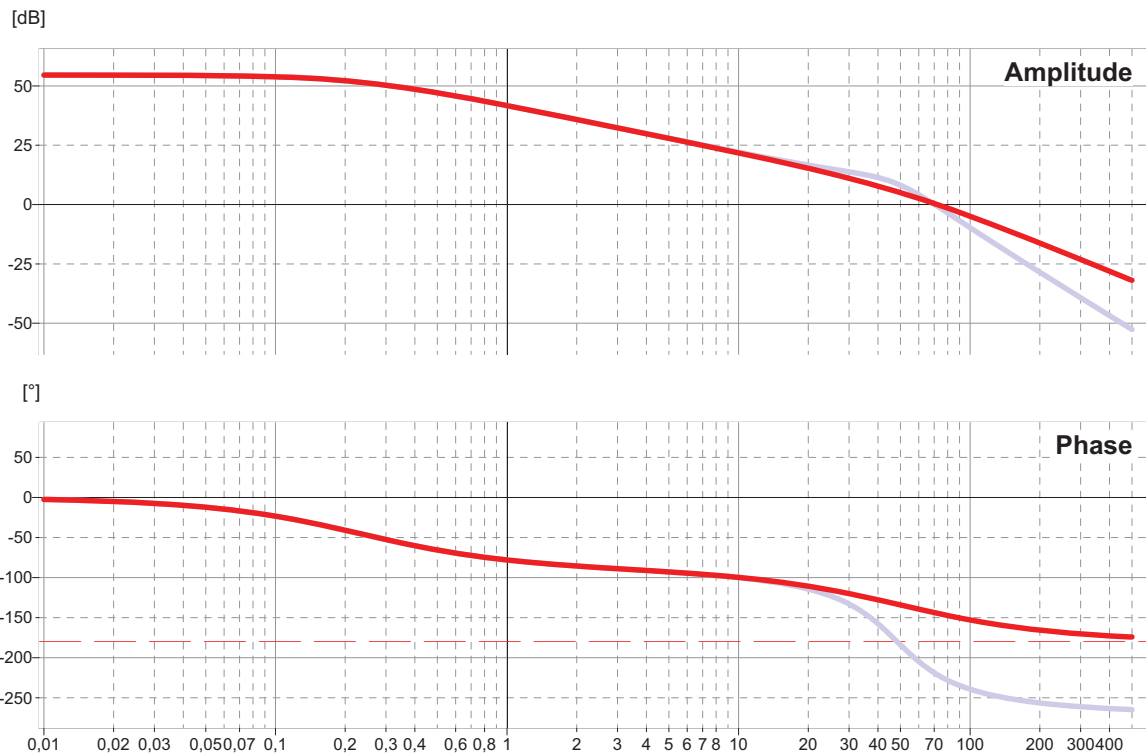


FIGURE 20 – Diagramme de Bode $G_1(p)$

On constate sur la représentation de Bode que les deux lieux sont relativement semblable jusqu'à environ $20 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$, au delà, le modèle du troisième ordre tend vers -270° alors que l'autre ne tend que vers -180° .

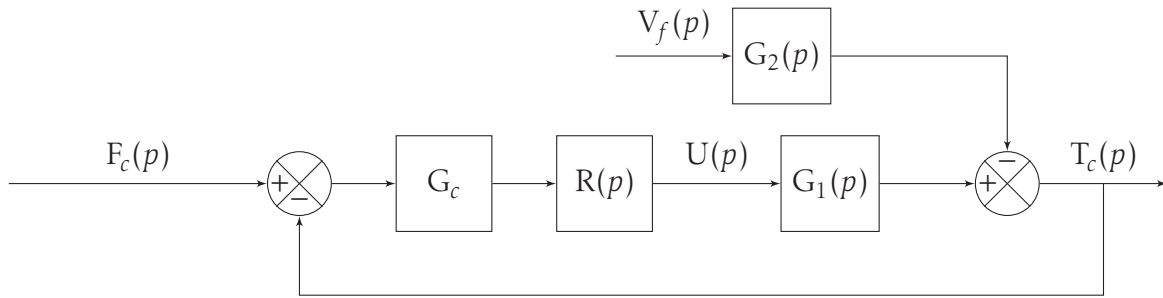
La modélisation par le modèle du second ordre ne sera donc possible que si le domaine de fréquence du système à étudier est inférieur à $\frac{10}{\pi} \approx 3 \text{ Hz}$ et que le gain de boucle ne soit pas trop important. Le risque d'instabilité est certainement ce qui va le plus limiter cette modélisation, en effet, une système du second ordre boucle avec uniquement un correcteur proportionnel ne sera jamais instable, alors que le système du troisième ordre lui peut être instable.

Remarque : les deux réponses sont acceptées, seule la qualité de justification est évaluée.

Q- 24 Le modèle proposé ne régule pas l'effort de traction mais la mesure de cet effort, ces deux efforts ne sont identiques que dans des phases de fonctionnement à vitesse constante (Cf équation du PFD sur l'étau).

Q- 25 Le gain du bloc Adapt doit être le même que G_c afin que la comparaison soit valide.

Il est judicieux ici de mettre le schéma sous la forme d'un schéma à retour unitaire. le schéma devient donc :



Il est nécessaire de vérifier si le système proposé est stable.

On peut soit faire une étude graphique, soit à partir du critère de Routh

Calculons dans un premier temps la FTBO puis la FTBF pour $V_f(p) = 0$

$$BO(p) = G_c \cdot R_0 \cdot G_1(p)$$

$$BO(p) = \frac{2,90 \cdot 10^5 \cdot R_0}{(p + 0,232) \cdot (p^2 + 45,2 \cdot p + 2330)} \quad (17)$$

$$BF(p) = \frac{BO(p)}{1 + BO(p)}$$

$$BF(p) = \frac{1450 \cdot R_0}{5 \cdot p^3 + 226 \cdot p^2 + 11695 \cdot p + 2330 + 1450 \cdot R_0} \quad (18)$$

Le critère de Routh nous permet de déterminer la valeur limite de R_0

$$\begin{vmatrix} 5 & 11695 & 0 \\ 226 & 2330 + 1450 \cdot R_0 & 0 \\ \frac{1315710 - 3625 \cdot R_0}{113} & 0 & 0 \\ 2330 + 1450 \cdot R_0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Le système est stable si tous les termes de la première colonne sont positifs c'est à dire $R_0 < 363$.

Posons $R_0 < 363$. Nous pouvons alors appliquer le théorème de la valeur finale pour déterminer l'erreur statique $\epsilon_s = F_c(p) - T_c(p) = \lim_{t \rightarrow \infty} (\epsilon(t)) = \lim_{p \rightarrow 0} (p \cdot \epsilon(p))$.

$$\epsilon(p) = F_c(p) - T_c(p) = F_c(p) - BO(p) \cdot \epsilon(p) + G_2(p) \cdot V_f(p)$$

$$\epsilon(p) = \frac{1}{1 + BO(p)} F_c(p) + \frac{G_2(p)}{1 + BO(p)} \cdot V_f(p)$$

$$\epsilon_s = \lim_{p \rightarrow 0} \left(p \cdot \left(\frac{1}{1 + BO(p)} F_c(p) + \frac{G_2(p)}{1 + BO(p)} \cdot V_f(p) \right) \right) \quad (19)$$

avec dans la première phase $V_f = 0$ et $F_c(p) = \frac{2000}{p}$

$$\begin{aligned}\epsilon_s &= \lim_{p \rightarrow 0} \left(p \cdot \frac{1}{1 + \text{BO}(p)} F_c(p) \right) = \lim_{p \rightarrow 0} \left(p \cdot \frac{1}{1 + G_c \cdot R_0 \cdot G_1(p)} F_c(p) \right) \\ \epsilon_s &= \lim_{p \rightarrow 0} \left(p \cdot \frac{1}{1 + G_c \cdot R_0 \cdot G_1(p)} \frac{2000}{p} \right) = \lim_{p \rightarrow 0} \left(\frac{2000}{1 + G_c \cdot R_0 \cdot G_1(p)} \right)\end{aligned}\quad (20)$$

$$\epsilon_s = \lim_{p \rightarrow 0} \left(\frac{2000}{1 + \frac{2,90 \cdot 10^5 \cdot R_0}{(p + 0,232) \cdot (p^2 + 45,2 \cdot p + 2330)}} \right) = \frac{466000}{233 + 145 \cdot R_0}\quad (21)$$

Finalemment pour respecter le cahier des charges il faut : $\frac{466000}{233 + 145 \cdot R_0} < 100$ d'où $R_0 = 30,5$.
 R_0 doit être tel que $30,5 \leq R_0 < 363$.

Q- 26

Nous avons vus précédemment que

$$\epsilon_s = \lim_{p \rightarrow 0} \left(p \cdot \left(\frac{1}{1 + \text{BO}(p)} F_c(p) + \frac{G_2(p)}{1 + \text{BO}(p)} \cdot V_f(p) \right) \right)\quad (22)$$

ce qui donne en fonction de R_0 , F_c et v_3 .

$$= \lim_{p \rightarrow 0} \left(p \cdot \left(\frac{1}{1 + G_c \cdot R_0 \cdot G_1(p)} F_c(p) + \frac{G_2(p)}{1 + G_c \cdot R_0 \cdot G_1(p)} \cdot V_f(p) \right) \right)\quad (23)$$

$$= \lim_{p \rightarrow 0} \left(p \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{2,90 \cdot 10^5 \cdot R_0}{(p + 0,232) \cdot (p^2 + 45,2 \cdot p + 2330)}} F_c(p) \right) \right)\quad (24)$$

$$+ \lim_{p \rightarrow 0} \left(p \cdot \left(\frac{\frac{150000}{1 + 4 \cdot p}}{1 + \frac{2,90 \cdot 10^5 \cdot R_0}{(p + 0,232) \cdot (p^2 + 45,2 \cdot p + 2330)}} \cdot V_f(p) \right) \right)$$

avec $F_c(p) = \frac{2000}{p}$ et $V_f(p) = \frac{v_3}{p}$

$$\epsilon_s = \frac{233}{233 + 145 \cdot R_0} \cdot F_c + \frac{33555915}{233 + 145 \cdot R_0} \cdot v_3\quad (25)$$

Compte tenu des valeurs numériques, pour respecter le cahier des charges, il faut $R_0 \approx 230$. Cette valeur est compatible avec le critère de stabilité, il est donc théoriquement possible de fonctionner avec un correcteur proportionnel.

Q- 27 Respecter toute la gamme de vitesse, nécessite de choisir une valeur de R_0 trop importante pour que le système reste stable, il est donc nécessaire de prévoir une correction de type P.I, voire P.I.D en amont de la perturbation afin d'améliorer la précision sans dégrader la stabilité.

Q- 28 On reconnaît pour $R(p)$, un correcteur de type P.I. En rajoutant une intégration dans

la boucle, il permet d'annuler l'erreur statique pour les phases à perturbation de vitesse constante. pour la phase en rampe de vitesse, l'erreur devient constante. Le défaut principal de ce régulateur est d'augmenter l'instabilité s'il est mal réglé.

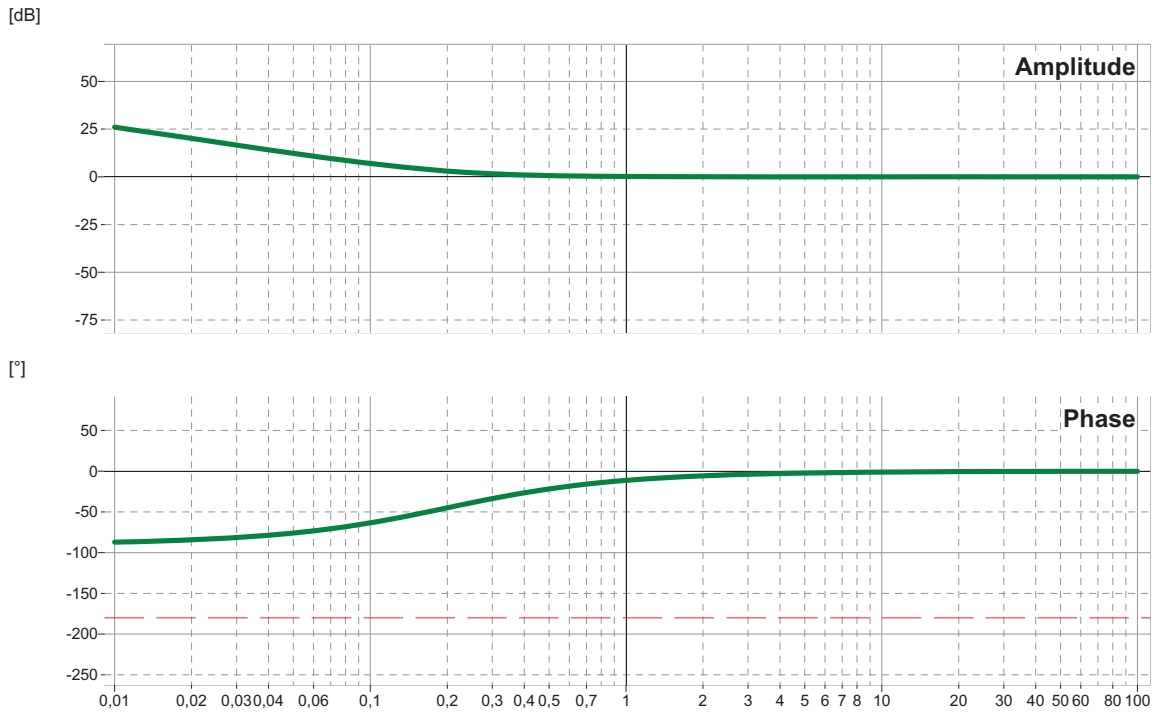


FIGURE 22 – Diagramme de Bode correcteur $R(p)$

Q- 29 Diagramme de Black

La marge de gain est très importante, la marge de phase est $\approx 90^\circ$.
Le système est stable.

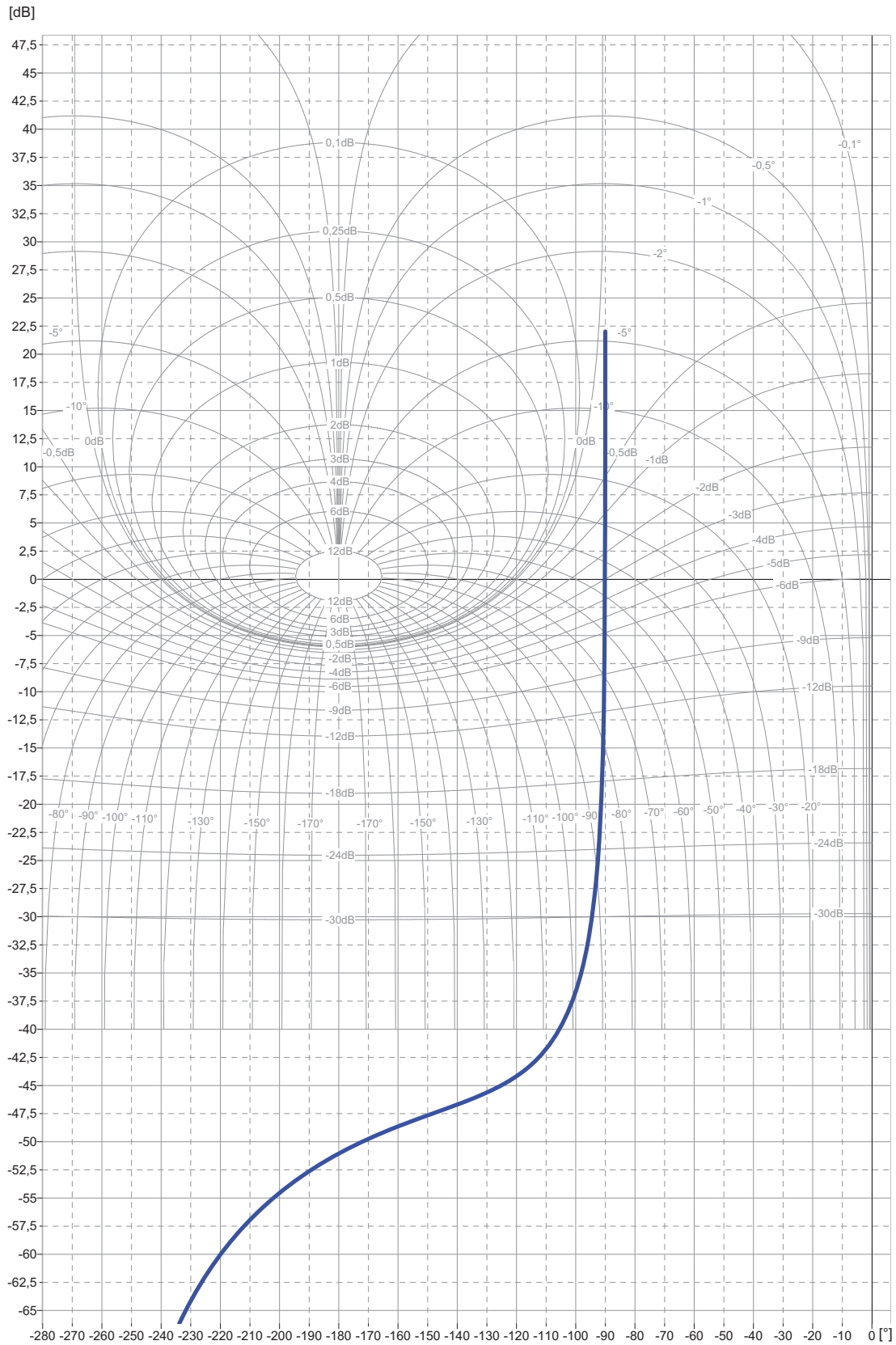
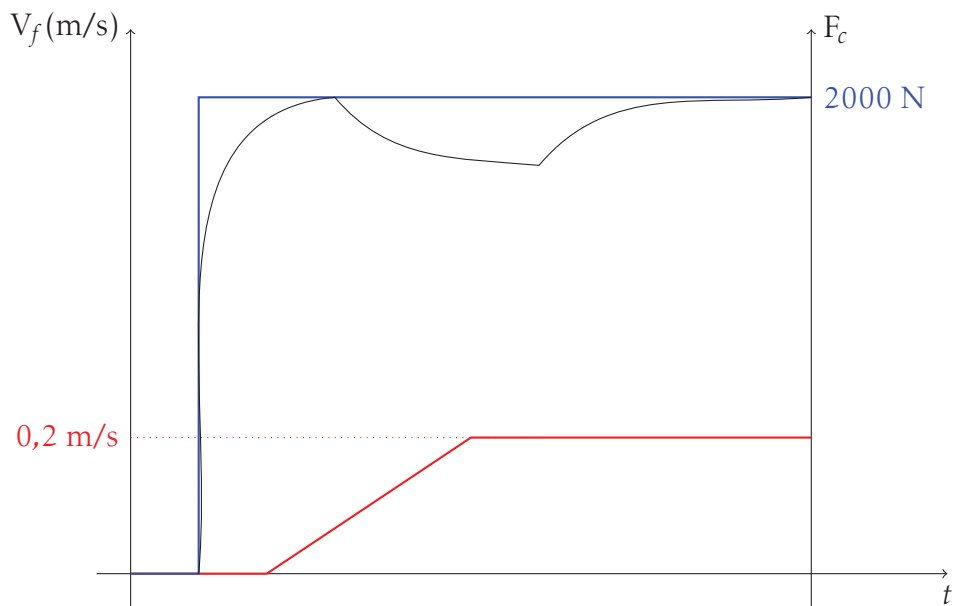


FIGURE 23 – Diagramme de Black FTBO corrigée ($R_0 = 1$)

Q- 30 Le correcteur P.I placé avant la perturbation permet d'annuler l'erreur indicielle pour une perturbation constante (ici la vitesse de filage V_f).



Q- 31

« La réponse temporelle ne doit pas présenter d'oscillations »

Il n'y a pas de lien direct entre la réponse fréquentielle et la réponse temporelle mais nous savons malgré tout que si le lieu de Black de la FTBO tangente une des courbes de Hall, la FTBF présentera une résonance. Il semble donc pertinent de choisir comme première étape du réglage de remonter le lieu de Black au maximum, sans quelle soit tangente à aucune courbe de Hall puis de vérifier expérimentalement le comportement.

On peut par exemple remonter le lieu de black d'environ +40 dB soit $R_0 = 10^{\frac{40}{20}} = 10^2 = 100$.

On pourra aussi si cela ne suffit rajouter un correcteur à avance de phase pour faire en sorte que la marge de phase soit supérieure à 90° .

RÉSULTATS ET COMMENTAIRES

Philippe TAILLARD - Khalid KOUIS

Résultat global de l'épreuve

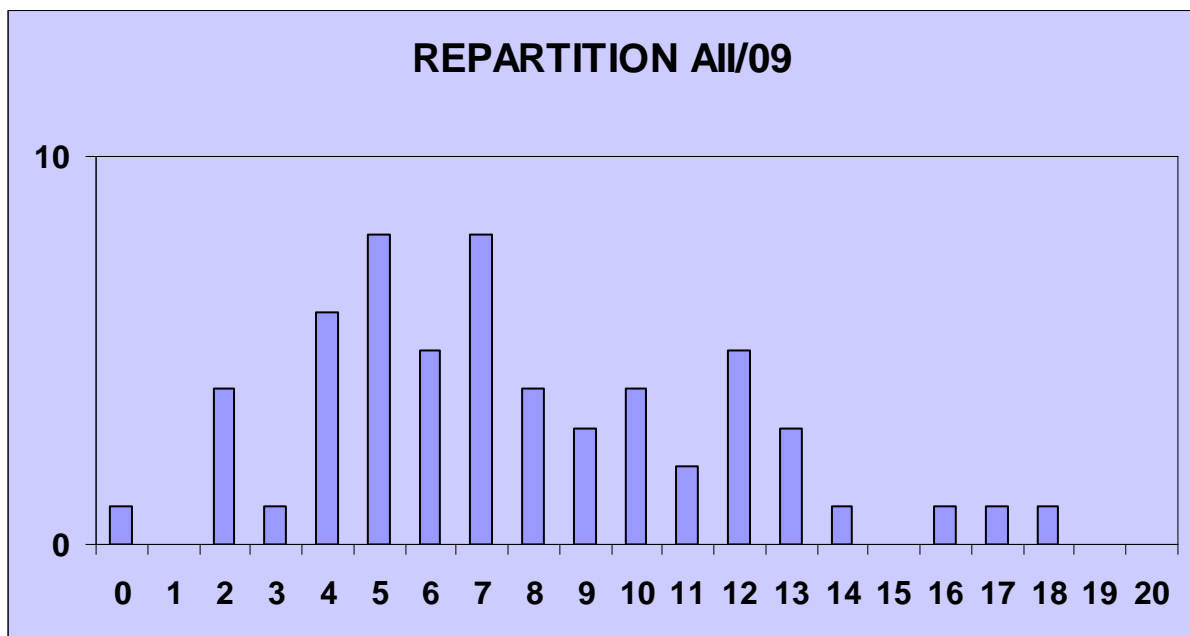
L'analyse des notes montre que les candidats ayant bien réussi ($\text{note} \geq 10$) ont composé dans les deux parties de l'épreuve. A l'inverse, des candidats brillants dans l'une des parties ayant fait l'impasse sur autre partie, obtiennent au final un résultat médiocre.

La moyenne de l'épreuve est de **7,2**.

La note mini est **0**.

La note maxi **17,85**.

L'écart type est de **3,98**.



Partie A : cycle de fabrication de profilés

Question 1

Pour cette question traitée par tous, les candidats ont fréquemment commis deux erreurs : oubli de tenir compte des deux profilés dans le calcul de la section filée (mauvaise lecture de la question en page 5) et confusion entre le diamètre du bloc brut et le diamètre circonscrit du profilé (mauvaise lecture de l'annexe 2). *Taux de réponse 66%*.

Question 2

Pour ce calcul de longueur du bloc mini – traité par une grande majorité – il fallait prendre en compte les pertes de matière, et considérer les dimensions maximales du profilé. La principale erreur rencontrée a été au niveau de la tolérance dimensionnelle des épaisseurs. *Taux de réponse 42%*.

Question 3

La première partie de cette question (traitement du signal du capteur de température) a été traitée très inégalement. Il y a eu peu de réponses précises.

Pour le grafcet du cycle de la presse, le séquençement des opérations n'a pas posé de problème. Par contre le choix de séquences – changement d'outillage et production normale – avec la divergence en OU du cycle, a posé beaucoup de difficultés à bon nombre de candidats. *Taux de réponse 66%*.

Question 4

L'explication littérale du fonctionnement de la pompe à débit variable n'a pas posé de problème particulier. *A contrario*, la description fonctionnelle de type FAST a été peu et mal traitée. De toute évidence l'outil FAST est très mal maîtrisé par les candidats de génie mécanique. La réponse attendue à cette question était cependant générale et indépendante de la résolution du problème d'automatisme. *Taux de réponse 33%*.

Question 5

Cette question très simple a permis à beaucoup de candidats de glaner le maximum de points. Les erreurs les plus fréquentes ont été de sommer les pressions des pompes montées en parallèle ou d'unité dans les calculs de puissances. *Taux de réponse 47%*.

Question 6

Cette question aisée a été traitée par tous, avec néanmoins une erreur classique commise par 50% des candidats : prise en compte de la vitesse de sortie du profilé pour calculer la puissance d'entrée... *Taux de réponse 48%*.

Question 7

Cette question classique qui ne présentait pas de difficulté particulière n'a pas majoritairement été bien traitée. Très peu de candidats ont su décrire la reprise de séquence (faire tant que $n < 6$) avec l'usage d'une variable interne de comptage. *Taux de réponse 40%*.

Question 8

Cette question n'était pas aisée. La description du cycle du robot donne lieu à un grafcet complexe nécessitant une bonne maîtrise de l'outil Grafcet. Seul 10% des candidats l'a traitée de manière satisfaisante.

Par contre la réflexion demandée pour l'amélioration du cycle a été majoritairement bien menée. Cela signifie que le problème d'automatisation a été bien appréhendé par tous les candidats qui ne maîtrisent pas suffisamment l'outil Grafcet pour aboutir dans l'analyse fonctionnelle de l'automatisme séquentiel. *Taux de réponse 22%*.

Question 9

Cette question aisée a été assez bien traitée. *Taux de réponse 50%*.

Question 10

Cette question a révélé que les candidats ne connaissent pas l'outil logigramme ou n'ont pas l'habitude de le manipuler. Certains ont répondu, soit avec des équations logiques, soit avec des schémas à contact (en schéma Ladder). *Taux de réponse 20%*.

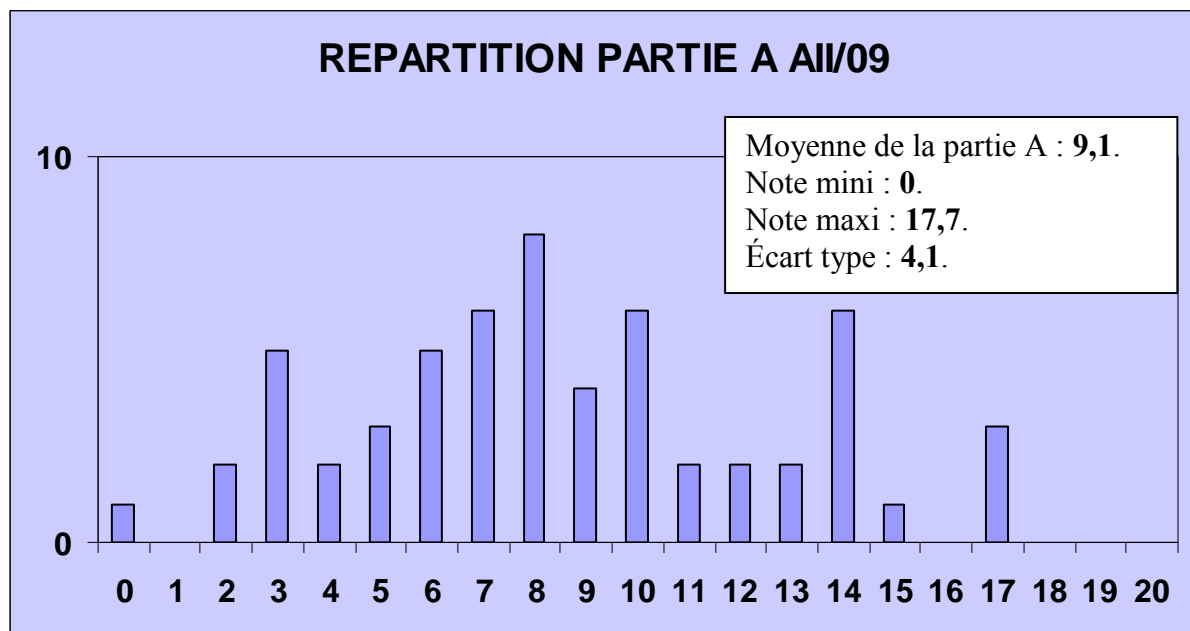
Question 11

Cette question de connaissance générale indépendante du problème à résoudre a été peu abordée. *Taux de réponse 17%*.

Question 12

Cette dernière question de programmation n'a été abordée que par 50% des candidats. Pour ce travail classique d'interprétation logique du modèle Grafcet il était donné beaucoup d'éléments essentiels à sa résolution dans l'énoncé qui permettait à non spécialiste de répondre. *Taux de réponse 23%*.

Il apparaît nettement que les candidats ont su appréhender les caractéristiques et la problématique de l'automatisation de cette unité de fabrication, mais sont pénalisés par la non maîtrise des outils de description fonctionnelle de base que sont le FAST, le Grafcet, et le logigramme. Les réponses aux questions 4, 8 et 10 en font la démonstration. Les candidats ont expliqué littéralement le fonctionnement de la pompe sans être capable d'en faire le FAST, ils ont proposé des améliorations du cycle de robot sans l'avoir décrit par Grafcet, enfin ils ont répondu avec des schémas à contacts ou équations logiques ou en langage structuré là où il était demandé du logigramme.



Partie B : étude du Puller

Cette partie traitait du problème d'asservissement de l'effort de traction pour le filage des profilés. Ce système, appelé « puller » dans le sujet, était constitué d'un moteur à courant continu, d'un vérin pour la saisie des profilés et d'un capteur d'effort. Les questions étaient partagées en deux sous-ensembles :

- Un premier sous-ensemble de 11 questions, dont le but était de proposer un modèle de connaissance du système d'asservissement de l'effort de traction, à partir des lois physiques et de la structure mécanique.
- Un deuxième ensemble de 7 questions, dont le but était d'étudier les performances d'un correcteur proportionnel puis d'un correcteur proportionnel-Intégral pour l'asservissement.

La répartition des notes (sur 20), présentée ci-dessous, montre que plus de la moitié des candidats ne l'a presque pas abordée. Le niveau global des candidats pour la partie asservissement reste encore très faible. Les difficultés concernent aussi bien les aspects modélisation de systèmes réels que les aspects étude des performances de modèles d'asservissement fournis.

Partie « modélisation »

Les questions de 13 et 14 permettaient de poser les équations mécaniques qui régissaient le mouvement du chariot. 40% des candidats a traité ces deux questions.

Les questions de 15 à 20 consistaient à construire le modèle de la boucle d'asservissement de l'effort de traction. Seulement un tiers des candidats a traité convenablement ces questions même si un pourcentage plus important a répondu correctement à la question 16 sur la technologie employée pour le capteur d'effort.

Les questions de 21 à 23 consistaient à simplifier le modèle de la boucle d'asservissement et pouvaient être traitées d'une manière indépendante. Un nombre plus important de candidats a répondu correctement à ces questions.

Partie « régulation de l'effort de traction »

Les sept questions de cette partie, même s'ils étaient très classiques dans leur forme et dans leur niveau de difficulté, n'ont été traitées que par une dizaine de candidats. Ce qui est très décevant et montre, encore une fois, que la grande majorité des candidats passe à côté des enjeux principaux de la partie asservissement.

