

Séquence 2  
TD 1

# Imprimante

Dans le programme : C1-01 ; C2-03

Source : Pôle Chateaubriand Joliot-Curie

On s'intéresse au positionnement d'une tête d'impression d'une imprimante. Les principaux constituants sont illustrés figure 1.

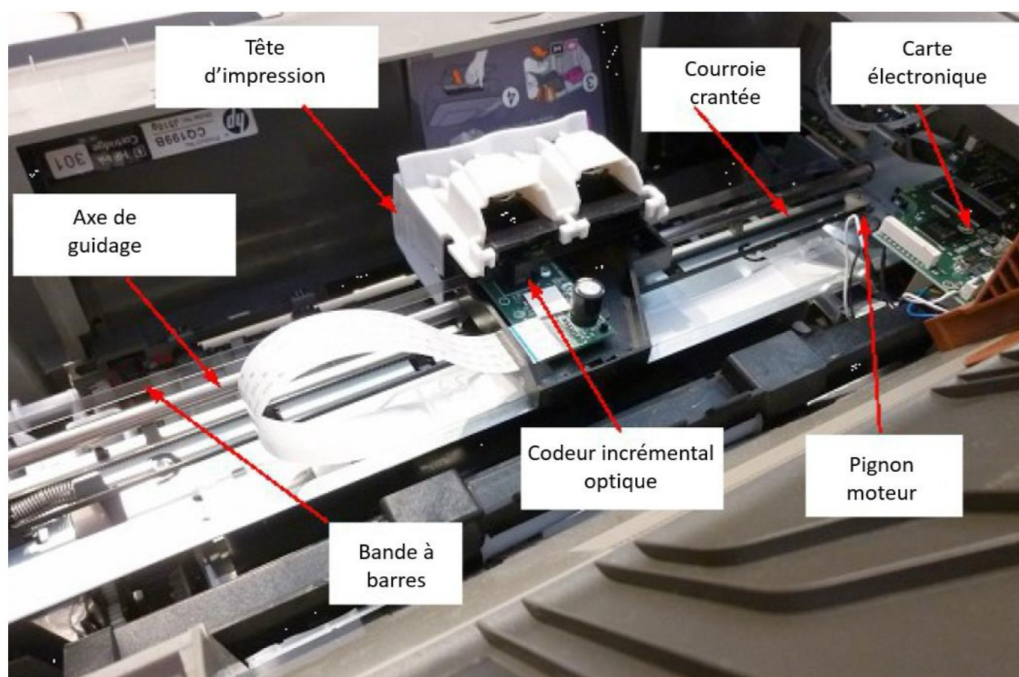


FIGURE 1 – Système d'entraînement d'une tête d'impression

Un moteur à courant continu sur l'axe duquel est fixé un pignon entraîne la tête d'impression par une courroie crantée. Le moteur est alimenté par un hacheur intégré à la carte électronique.

La mesure de la position de la tête d'impression est réalisée par un codeur incrémental optique composé d'une bande à barres sombres et claires (ou fentes) et de deux capteurs fourches optiques décalés et placés en quadrature, positionné sur le support de la tête d'impression. Les signaux délivrés par ce codeur sont transmis à la carte électronique par une nappe et sont traités par celle-ci.

Les exigences de positionnement de la tête d'impression souhaitées sont données figure 2.

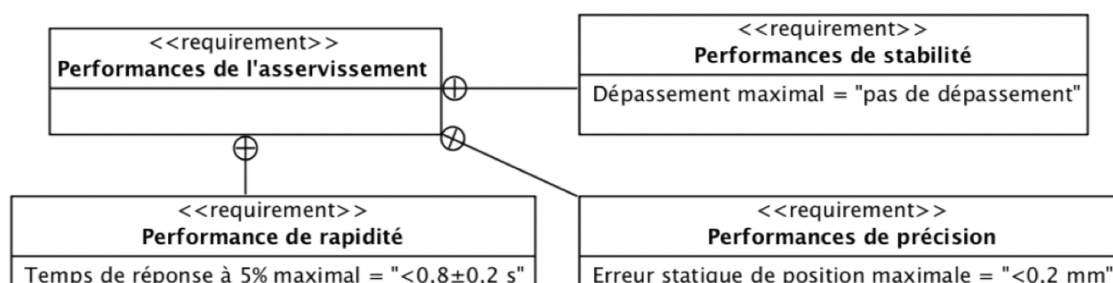
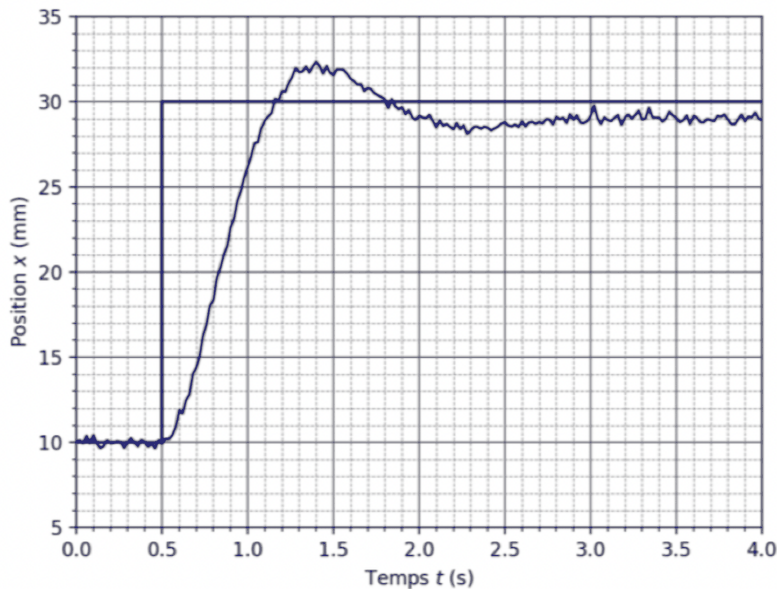


FIGURE 2 – Diagramme des exigences relatives aux performances de l'asservissement

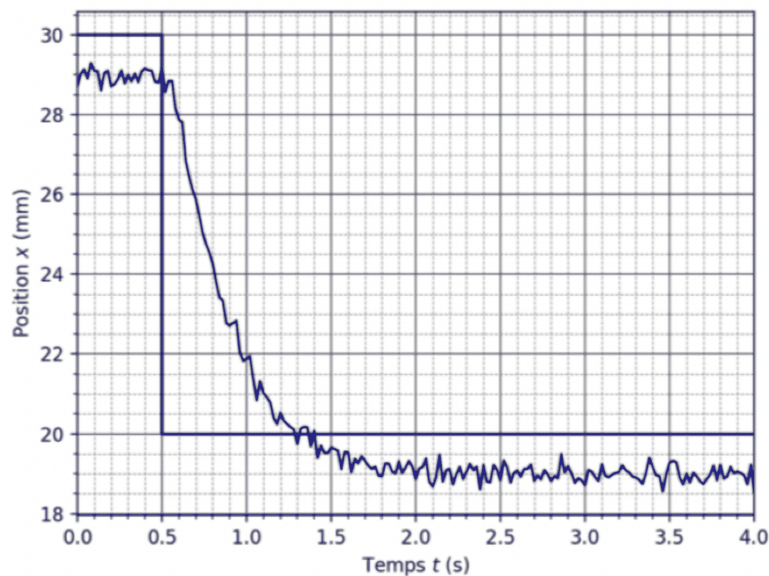
**Objectif** Vérifier quels réglages de l'imprimante permettent de respecter les exigences en termes de performances de l'asservissement.

En vue de l'amélioration des performances de positionnement de la tête d'impression, différents réglages et essais sont réalisés figure 3.

- test 1 (réglage 1) : tête d'impression au repos en position  $x = 10 \text{ mm}$ , sans erreur. Un échelon de  $20 \text{ mm}$  est imposé ;
- test 2 (réglage 2) : à partir de l'état final du premier test, les réglages sont modifiés et un échelon de  $-10 \text{ mm}$  est imposé.



*Test 1 : position mesurée de la tête d'impression*



*Test 2 : position mesurée de la tête d'impression*

FIGURE 3 – Positions mesurées de la tête d'impression — test 1 (en haut) et test 2 (en bas)

**Question 1 :** Évaluer les performances de stabilité, rapidité et précision du test 1.

**Question 2 :** Évaluer les performances de stabilité, rapidité et précision du test 2.

**Question 3 :** Conclure par rapport aux exigences.

Séquence 2  
TD 2

# Transformées de Laplace

Dans le programme : B2-04

## Fonctions de transfert

Déterminer sous forme canonique les fonctions de transfert des systèmes modélisés par les équations différentielles ci-dessous. En déduire le gain statique, la classe et l'ordre de chaque modèle.

On suppose que les conditions de Heaviside sont vérifiées (conditions initiales nulles).

**Question 1 :**  $7 \frac{ds}{dt} + 3s(t) = 5e(t)$

**Question 2 :**  $s(t) = K_1 e(t)$

**Question 3 :**  $5 \frac{d^2s}{dt^2} + \frac{ds}{dt} = 5 \frac{de}{dt} + 2e(t)$

## Théorème de la valeur finale

Soit un système de fonction de transfert  $H_1(p) = \frac{U(p)}{U_c(p)} = \frac{K_1}{1 + \tau_1 p + \frac{p^2}{\omega_2^2} + \frac{\tau_3 p^3}{\omega_2^2}}$ . On le soumet à une entrée échelon

d'amplitude  $u_c(t) = u_0 u(t)$  où  $u(t)$  est un échelon unitaire et on suppose que la réponse est stable.

**Question 4 :** En appliquant le théorème de la valeur finale, déterminer l'expression analytique de l'erreur statique de ce système.

On rajoute un intégrateur dans ce système :  $H_2(p) = \frac{1}{p} H_1(p)$ .

**Question 5 :** Que devient l'erreur statique ? Que peut-on en conclure sur la stabilité ?

Séquence 2  
TD 3

## Moteur à courant continu

Dans le programme : B2-04 ; B2-07

Source : Réplique de la mission InSight – CCINP 2019

L'étude proposée porte sur la réplique terrestre du système InSight (*Interior exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport*), projet du CNES (Centre National d'Études Spatiales) qui a pour but de déployer une station d'étude de la structure interne de la planète Mars.

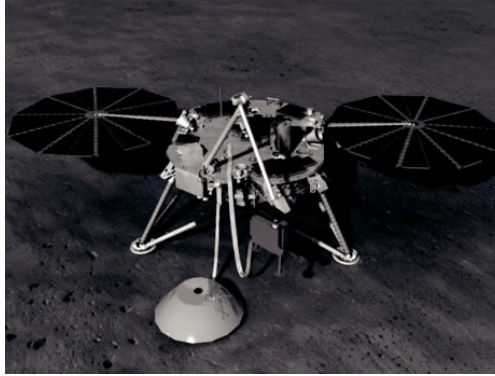


FIGURE 4 – Atterrisseur du projet InSight

Les trois pieds de ce robot ont une longueur réglable. Chacun des actionneurs électriques associés, appelé aussi vérin électrique, est mis en mouvement par un moteur à courant continu (MCC).

**Objectif** Valider les réglages de la commande des trois actionneurs linéaires associés aux pieds, afin de respecter les exigences liées à leur positionnement. La première étape (et la seule étudiée ici) consiste à modéliser les actionneurs.

### Équations du moteur à courant continu

Équation électrique :  $u(t) = e(t) + R i(t) + L \frac{di}{dt}$

Équations de couplage électro-mécanique :  $e(t) = K_e \omega(t)$  et  $C_m(t) = K_c i(t)$

Transformée de Laplace : on se place dans les conditions d'Heaviside pour l'ensemble de l'étude (conditions initiales nulles). La transformée de Laplace d'une fonction  $h(t)$  dans le domaine temporel sera notée en majuscule :  $L[h(t)] = H(p)$ .

La structure du schéma-blocs obtenue à partir du modèle de connaissance de la MCC est présentée figure 5.

**Question 1\*** : À partir des équations du moteur à courant continu, compléter sous forme littérale les schémas-blocs modélisant la MCC.

Remarque : les questions dont le numéro est suivi d'un astérisque sont des questions de concours non modifiées, directement copiées-collées depuis le sujet d'écrit source.

Le théorème du moment dynamique appliqué à l'axe de rotation du moteur donne :  $J \frac{d\omega}{dt} = C_m(t) - C_r(t) - f \omega(t)$

**Question 2\*** : Compléter le schéma-blocs.

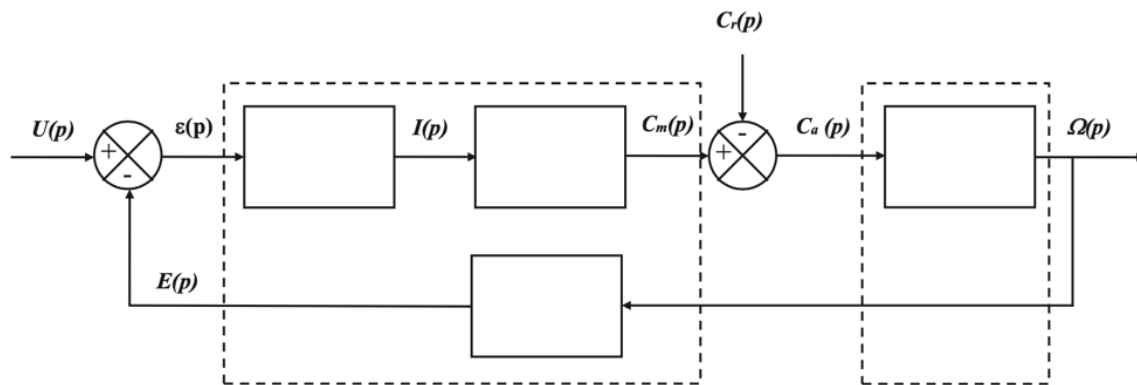


FIGURE 5 – Schéma-blocs du moteur à courant continu

On se place dans le cas particulier où  $C_r(p) = 0$ .

**Question 3** : Le schéma-blocs obtenu modélise-t-il un système asservi ?

**Question 4\*** : Donner l'expression, sous sa forme canonique, de la fonction de transfert en boucle fermée :  $F_{m1}(p) = \frac{\Omega(p)}{U(p)}$ .

On se place dans le cas particulier où  $U(p) = 0$ .

**Question 5** : Donner l'expression de la fonction de transfert en boucle fermée :  $F_{pert}(p) = \frac{\Omega(p)}{C_r(p)}$ .

**Question 6** : Donner la réponse complète du système à ses deux entrées en fonction de  $F_{m1}(p)$  et  $F_{pert}(p)$ .

Séquence 2  
TD 4

## L'inverseur de poussée eTras

Dans le programme : A3-01 ; A3-03 ; A3-04 ; A3-06 ; A3-12

Source : Concours Mines-Ponts 2024 MP

### Présentation du système

Le système étudié, appelé inverseur de poussée, est un dispositif utilisé dans le domaine de l'aéronautique commerciale ou privée permettant de contribuer au freinage d'un avion lors de sa phase d'atterrissage sur piste. Ce dispositif de freinage est intégré dans la nacelle de l'avion représentée figure 6.

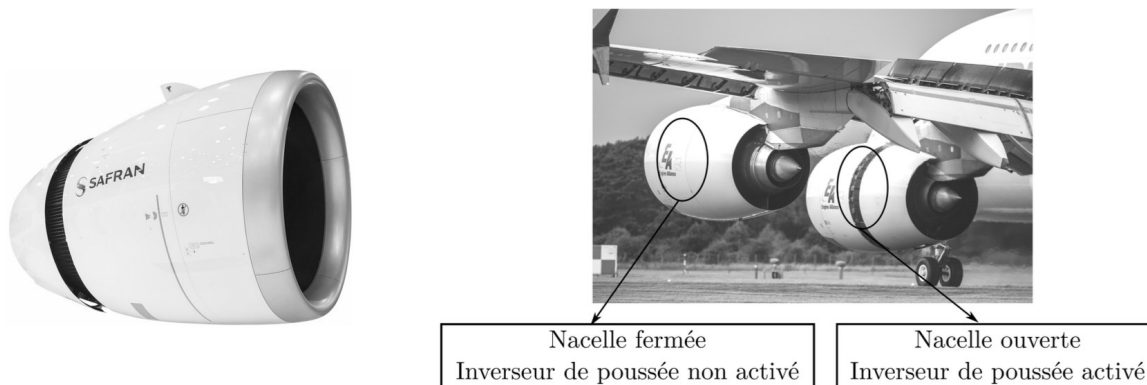


FIGURE 6 – Nacelle complète du groupe SAFRAN et mise en évidence d'un inverseur de poussée activé sur une nacelle lors d'un atterrissage

L'eTras — *Electrical Thrust Reverser Actuation System* — est le premier système de commande électrique d'inverseur de poussée, permettant ainsi de s'affranchir de la présence de circuit hydraulique dans cette zone critique du moteur.

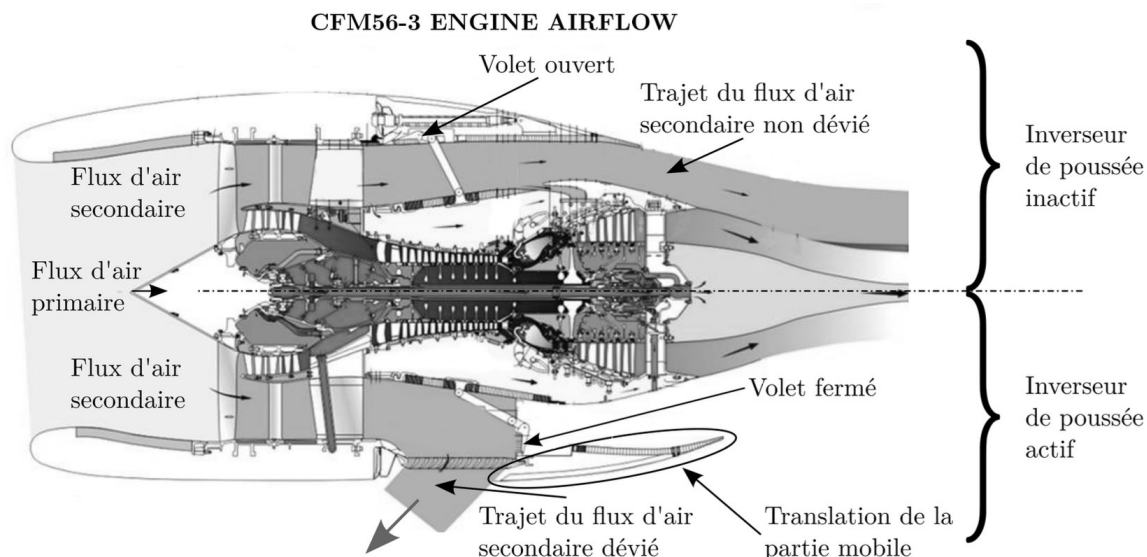


FIGURE 7 – Fonctionnement d'un inverseur de poussée, inverseur inactif (volets ouverts) sur la partie supérieure et actif (volets fermés) sur la partie inférieure

L'inverseur de poussée est utilisé sur des turboréacteurs mais n'agit que sur le flux d'air secondaire (froid). Cet inverseur de conception simple et modulable est adaptable à tout type de turboréacteur.

L'inversion de poussée est obtenue grâce à la déviation du flux d'air secondaire. En position fermée (partie haute de la figure 7), les parties fixe et mobile de la nacelle sont jointes et les volets sont intégrés dans la partie mobile. Le flux d'air secondaire s'écoule normalement.

En position ouverte, le déplacement de la partie mobile de la nacelle entraîne le déplacement des volets. Ces derniers viennent dévier le flux d'air secondaire et l'obligent à sortir par l'orifice ainsi créé par la translation de la partie mobile de la nacelle. La partie mobile, munie d'un béquet défecteur, dirige le flux vers l'avant, créant ainsi un effet de « reverse ». L'inversion ne se faisant que sur le flux secondaire, la contre-poussée devra être importante pour annuler l'effet du flux primaire qui n'est pas inversé.

### Analyse de la chaîne structurelle de l'eTras

Afin de réduire au maximum la masse embarquée dans la nacelle, un seul actionneur de 25 kW, un moteur à courant continu, est utilisé pour mouvoir la partie mobile de la nacelle. Ce moteur permet d'entraîner simultanément 4 systèmes vis-écrous transformant le mouvement de rotation du moteur en translation. Cette transmission de puissance depuis le moteur vers les systèmes vis-écrous est réalisée par l'intermédiaire de composants flexibles appelés des flex-shafts. Ces éléments flexibles permettent de transmettre la puissance mécanique tout en respectant les contraintes de masse et de géométrie de la nacelle. La figure 8 permet de visualiser l'architecture du système eTras.

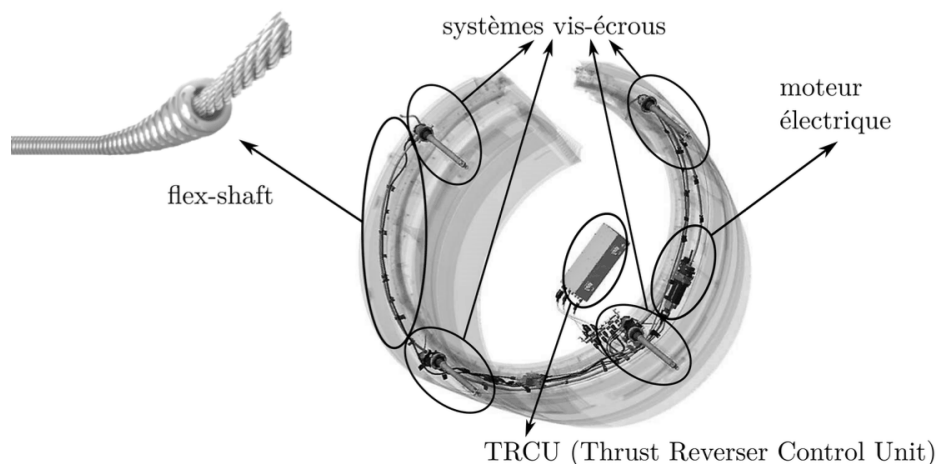


FIGURE 8 – Principaux constituants de la chaîne de puissance de l'eTras

Le moteur est contrôlé par un composant nommé TRCU (*Thrust Reverser Control Unit*) contenant une électronique de puissance. Ce TRCU permet de transformer la tension électrique alternative de valeur efficace 115 V à fréquence variable (entre 360 Hz et 800 Hz) issue de la génératrice entraînée par le turboréacteur en une tension électrique continue de 24 V. Afin de modifier le chemin du flux secondaire, la rotation de chaque volet est synchronisée au déplacement de la nacelle par une chaîne cinématique.

Un codeur incrémental est utilisé pour mesurer à tout instant la position angulaire du rotor du moteur. Pour vérifier le bon synchronisme des 4 systèmes vis-écrous, un capteur de type RVDT (*Rotary Variable Differential Transformer*) est monté sur les 4 vis. L'ensemble de ces informations est traité par le calculateur de l'inverseur de poussée.

**Question 1\*** : À partir de la description de la chaîne structurelle de l'eTras, compléter la chaîne de puissance et d'information ci-dessous.

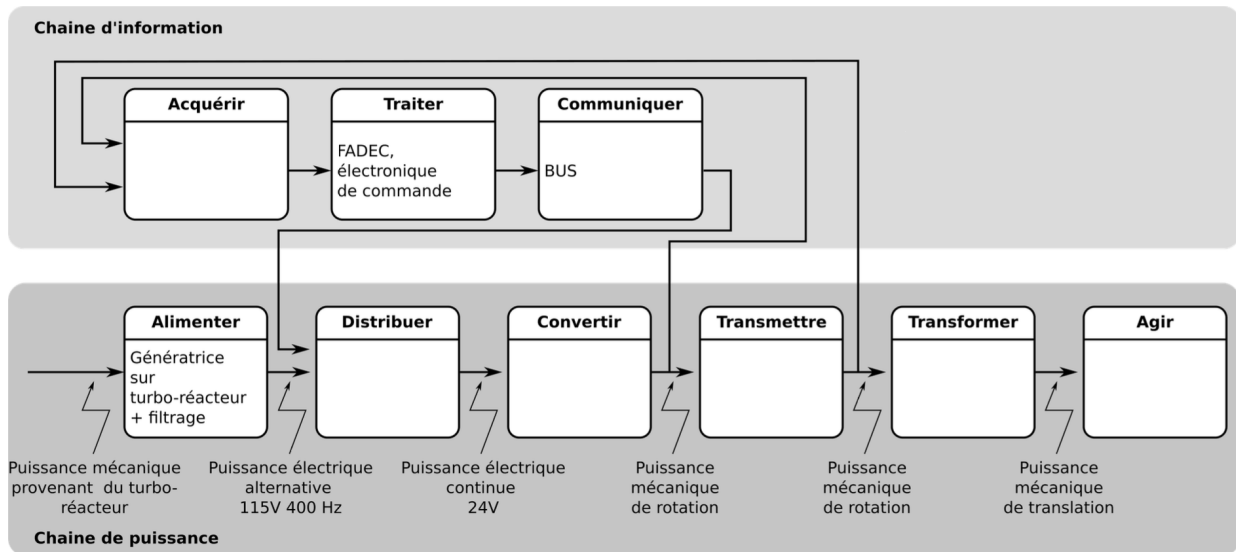


FIGURE 9 – Chaînes de puissance et d'information de l'eTras à compléter

La description suivante permet de proposer une première modélisation du système.

Afin de contrôler le moteur de l'inverseur de poussée, la consigne de position angulaire du moteur, notée  $\theta_c$ , est adaptée en une consigne numérique, notée  $N_c$ . Cette consigne est comparée à l'information issue du codeur incrémental positionné sur le moteur, notée  $N_m$ . L'écart  $\epsilon$  entre ces deux signaux est corrigé par l'intermédiaire d'un correcteur associé au TRCU dont la sortie est une tension de commande, notée  $U_m$ , pour le moteur. La position angulaire en sortie du moteur, notée  $\theta_m$ , est alors transmise via le système de transmission de puissance (le flex-shaft). En sortie du flex-shaft, la position angulaire  $\theta_f$  est transmise aux dispositifs vis-écrous permettant de transformer le mouvement de rotation du flex-shaft en un mouvement de translation de l'écrou, notée  $\lambda_v$ , sur lequel est fixée la partie mobile de la nacelle. Enfin, un ensemble cinématique, comportant les volets, permet de synchroniser la rotation  $\theta_b$  de ces derniers avec la translation de la partie mobile de la nacelle. Lors de la phase de reverse, des actions mécaniques perturbatrices importantes agissent sur le moteur à travers la chaîne cinématique.

**Question 2\*** : À partir de la description de la modélisation de la chaîne d'asservissement, compléter le schéma-blocs fonctionnel ci-dessous.

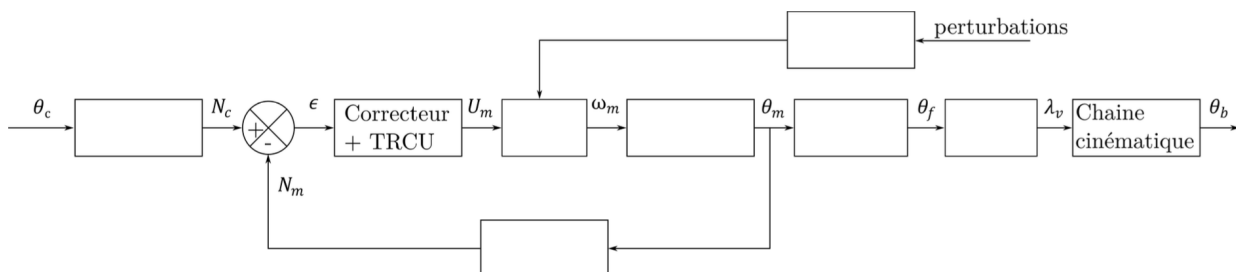


FIGURE 10 – Schéma-blocs fonctionnel de l'eTras à compléter

Séquence 2  
TD 5

## Robot Delta

Dans le programme : B2-04 ; B2-07

Source : D. Defauchy

Le robot Delta présenté figure 11 est étudié dans le contexte d'une chaîne d'emballage de flacons de parfum.

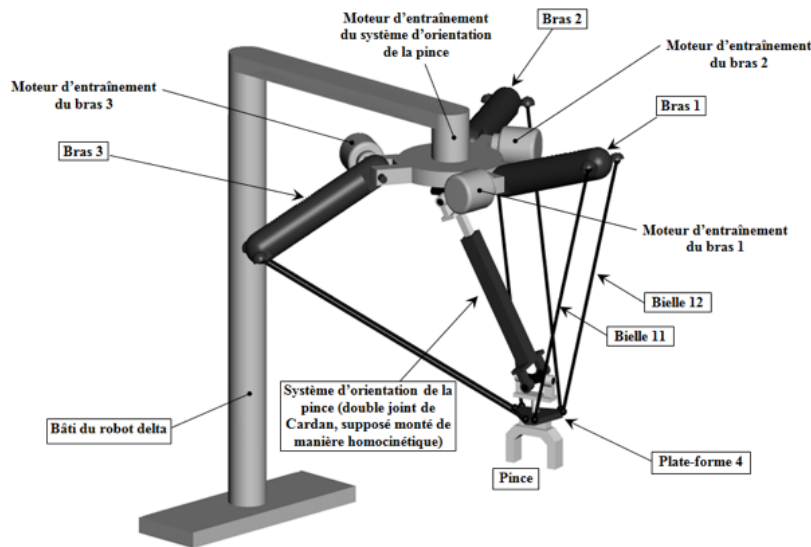


FIGURE 11 – Robot Delta

**Objectif** Le cahier des charges impose le critère de précision suivant associé au positionnement angulaire des flacons : erreur statique relative inférieure à 1 %. On propose de vérifier si ce critère est bien respecté par le système de positionnement.

Afin d'assurer un bon positionnement angulaire de la pince, la commande de sa rotation est asservie de la façon suivante :

- La consigne de position  $\theta_{PC}$ , entrée par l'utilisateur grâce à une interface graphique (lors des réglages) ou imposée par la partie commande (lors des cycles de travail), est transformée en une tension  $V_{PC}$  grâce à un convertisseur qui sera assimilé à un système de gain pur  $K_C$  (en  $V/rad$ ).
- La vitesse de rotation  $\omega_M$  (en  $rad/s$ ) et l'angle de rotation  $\theta_M$  (en  $rad$ ) de l'arbre moteur sont mesurés par un codeur incrémental, monté directement sur l'arbre moteur, qui délivre une information numérique. Celle-ci est alors transformée par une carte de conversion numérique-analogique (C.A.N.) supposée linéaire, en deux tensions  $V_\omega$  et  $V_\theta$  telles que : pour la vitesse,  $V_\omega = K_\omega \omega_M$  ; pour l'angle,  $V_\theta = K_\theta \theta_M$ .
- La tension  $V_\theta$  (image de la rotation  $\theta_M$  du moteur) est soustraite à la tension  $V_{PC}$  pour donner la tension  $\varepsilon_P$ .
- Cette tension  $\varepsilon_P$  est modifiée par un correcteur de fonction de transfert  $C(p)$  pour donner la tension  $\varepsilon_{VP}$ .
- La tension  $V_\omega$  (image de la vitesse de rotation  $\omega_M$  du moteur) est soustraite à la tension  $\varepsilon_{VP}$  en sortie du correcteur pour donner la tension  $\varepsilon_V$ .

- Cette tension  $\varepsilon_V$  est amplifiée par un amplificateur (hacheur) de gain pur  $G$  pour donner la tension d'alimentation du moteur  $U_M$ . Le moteur tourne alors à la vitesse angulaire  $\omega_M$  telle que  $\Omega_M(p) = M(p) U_M(p)$ .
- La rotation  $\theta_{EC}$  de la pièce d'entrée du double joint de Cardan, obtenue à l'aide du réducteur de vitesse fixé sur l'arbre moteur, est telle que  $\theta_{EC} = \lambda \theta_M$ .
- Le double joint de Cardan est homocinétique et a pour fonction de transfert  $R(p) = 1$  (l'entrée est l'angle  $\theta_{EC}$  et la sortie est  $\theta_{SC} = \theta_P$ , où  $\theta_P$  est la rotation de la pince fixée par encastrement sur la pièce de sortie du double joint de Cardan).

**Question 1 :** Compléter le schéma-blocs donné figure 12 en indiquant :

- les noms des composants sous les blocs ;
- les fonctions de transfert associées dans les blocs ;
- les variables (flux) sur chaque flèche.

On donne :  $M(p) = \frac{K_M}{1+\tau_M p}$  et  $C(p) = K_{cor}$ .

**Question 2 :** Déterminer la fonction de transfert  $H_1(p) = \frac{\Omega_M(p)}{E_{VP}(p)}$ .

**Question 3 :** Redessiner le schéma-blocs en remplaçant la boucle interne par  $H_1(p)$ . Calculer la fonction de transfert globale  $H(p) = \frac{\theta_P(p)}{\theta_{PC}(p)}$  sous forme canonique.

**Question 4 :** Vérifier le critère de précision du cahier des charges.

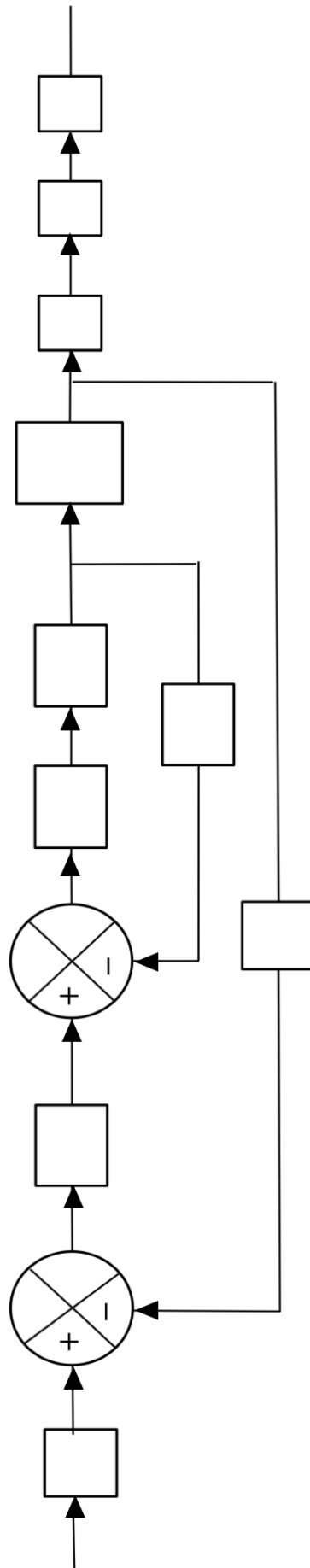


FIGURE 12 – Schéma-blocs à compléter

Séquence 2  
TD 6

## Algèbre de schéma-blocs

Dans le programme : B2-07

Source : Vuibert 2021

Pour chaque question, on utilisera la méthode la plus efficace possible :

- méthode algébrique (en « lisant » le schéma-blocs pour exprimer les relations entre les grandeurs d'entrée et de sortie) ;
- manipulation du schéma-blocs (« algèbre des schéma-blocs ») pour le simplifier jusqu'à obtenir un format plus simple permettant de déterminer la fonction de transfert.

**Question 1 :** Calculer la FTBF associée à chacun des trois schémas-blocs ci-dessous.

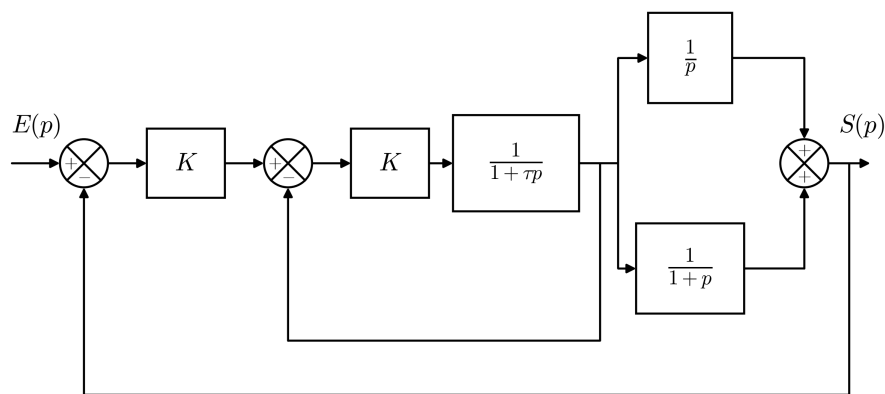


FIGURE 13 – Premier schéma-blocs

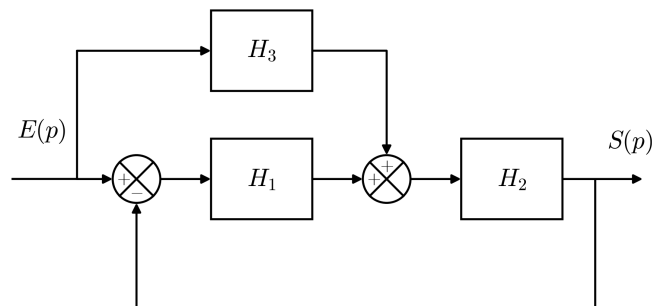


FIGURE 14 – Deuxième schéma-blocs

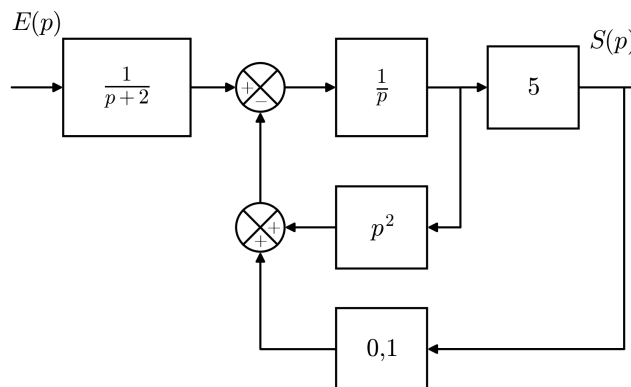


FIGURE 15 – Troisième schéma-blocs

**Question 2 :** Réduire le schéma-blocs ci-dessous sous la forme proposée et préciser les expressions de  $F(p)$  et  $G(p)$ .

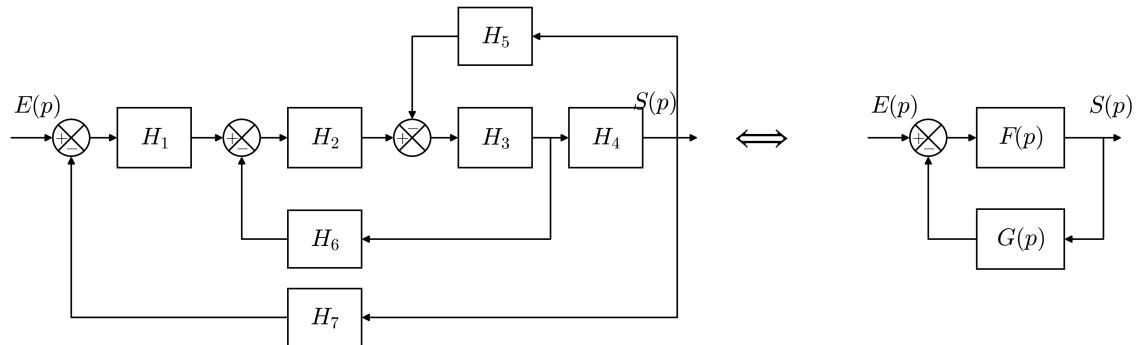


FIGURE 16 – Schéma-blocs à réduire et forme réduite attendue

**Question 3 :** Manipuler le schéma-blocs ci-dessous pour faire apparaître une FTBO :  $H_{BO} = \frac{M(p)}{\varepsilon(p)}$ .

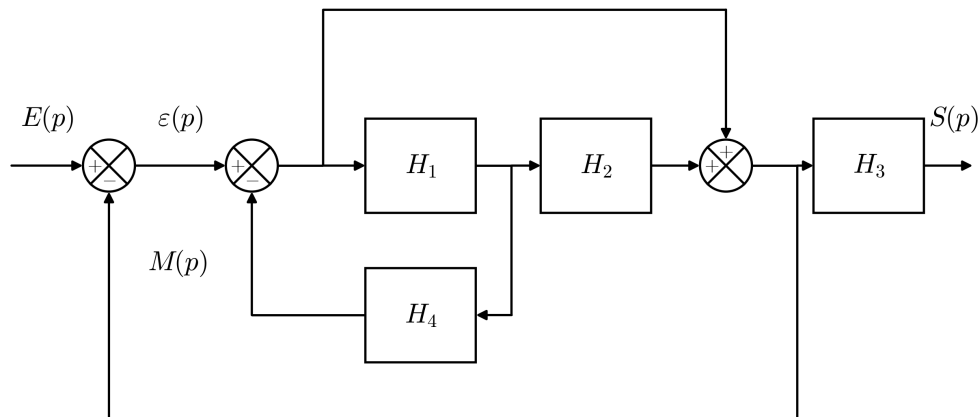


FIGURE 17 – Schéma-blocs à manipuler