

Régulation d'un GTA (Groupe Turbo-Alternateur) dans une centrale nucléaire

1. Introduction

La France produit plus de 400 TWh d'électricité à partir d'énergie nucléaire. Une centrale nucléaire contient plusieurs transformations d'énergie. On va s'intéresser à la transformation de l'énergie thermique de la vapeur d'eau du circuit secondaire en énergie mécanique de rotation de la turbine.

La zone d'étude se limitera aux vannes de régulation et de sécurité.



Centrale nucléaire

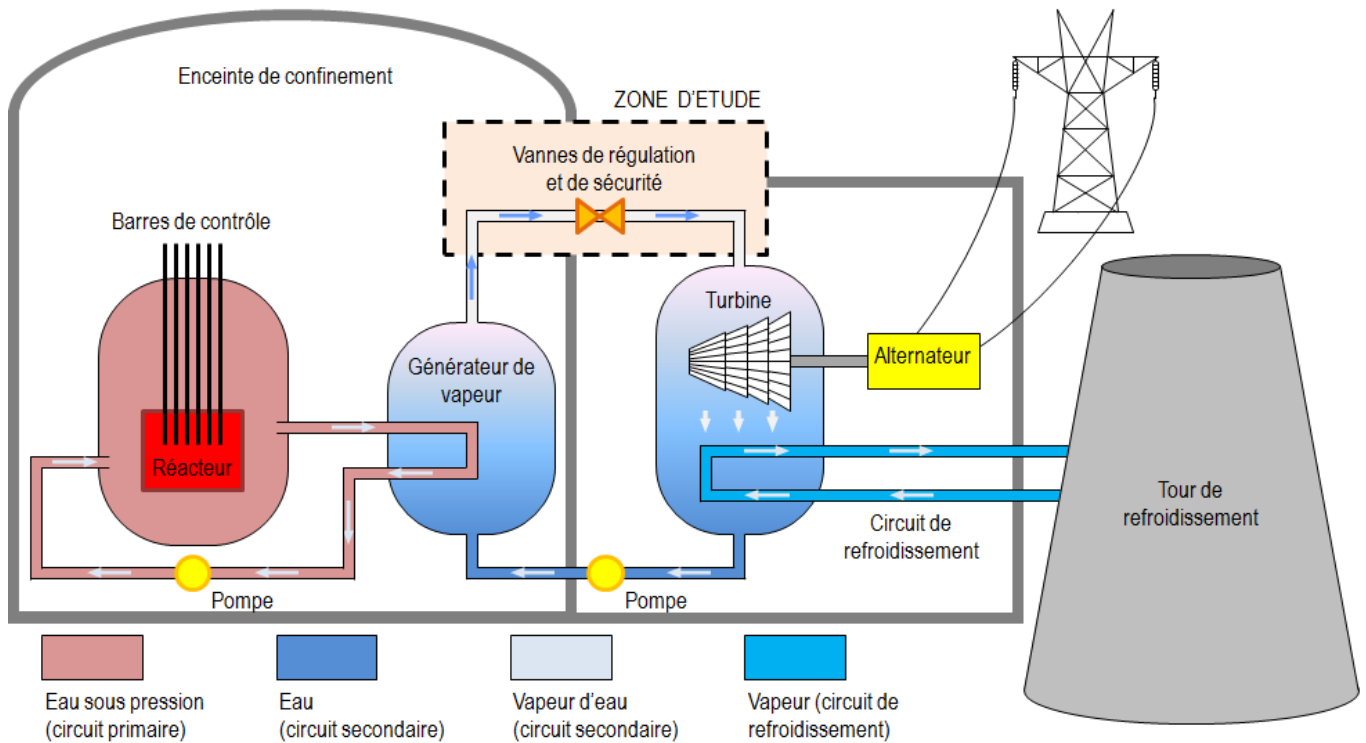


Schéma installation d'une centrale nucléaire

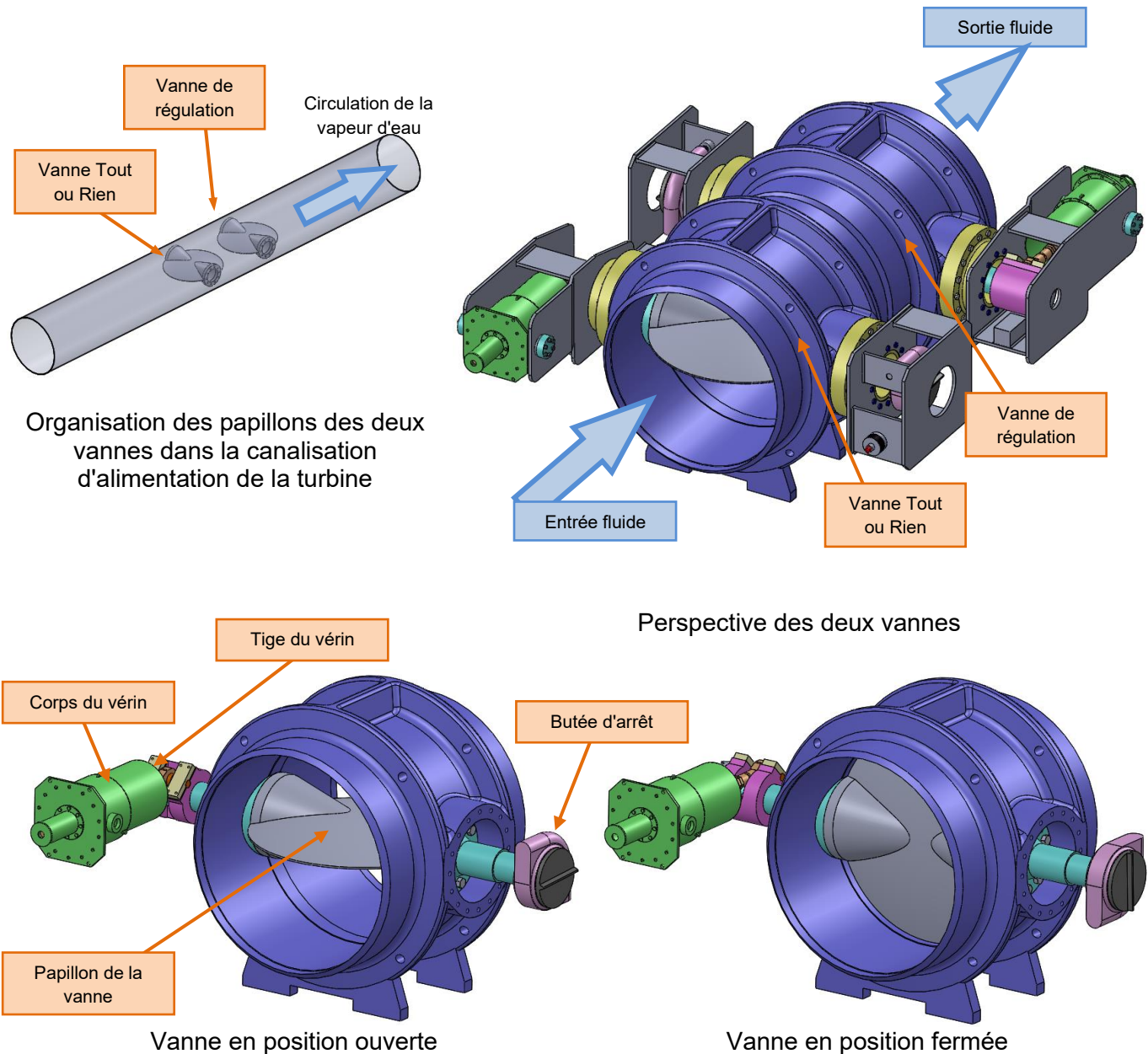


Turbine de centrale nucléaire

2. Présentation de la vanne

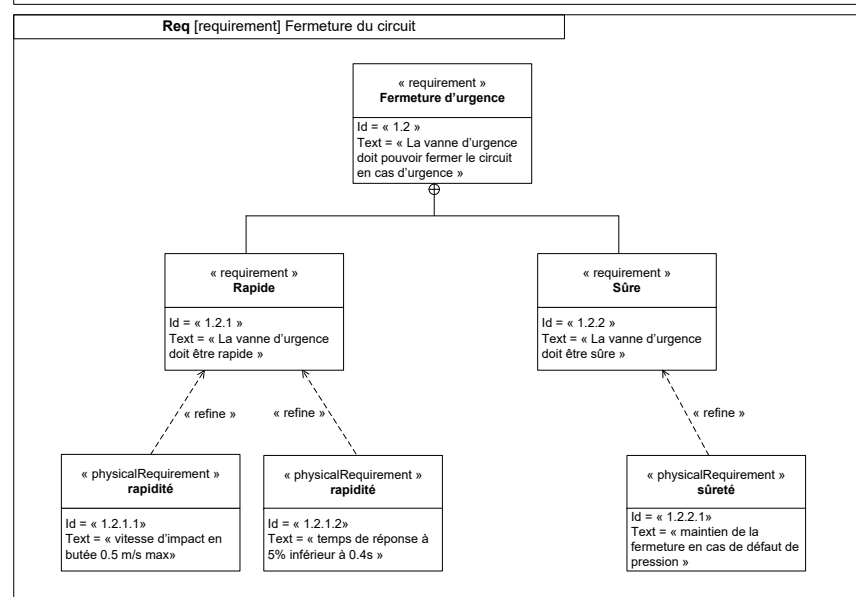
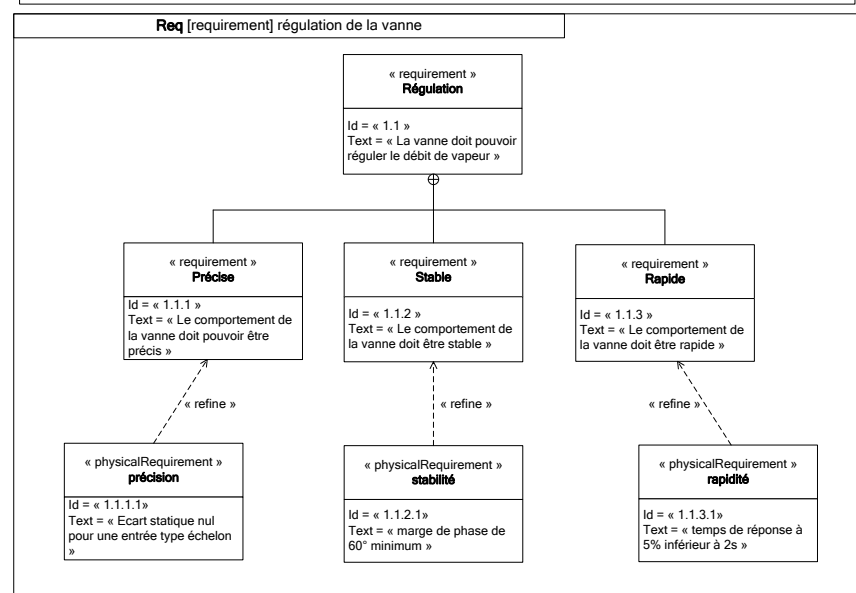
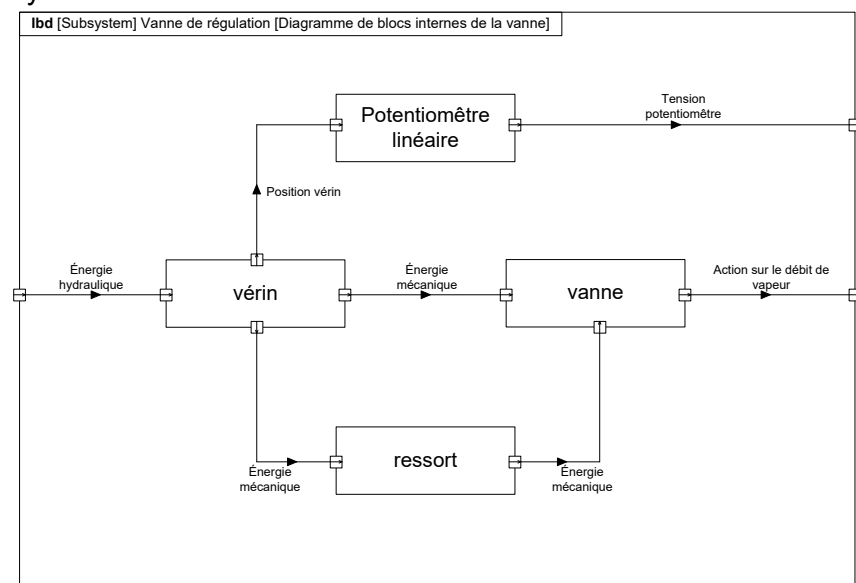
L'objet de notre étude porte sur deux vannes installées sur le circuit secondaire. Ces deux vannes quasi identiques ont deux fonctions différentes :

- vanne de régulation VI : permet de réguler le débit de vapeur et donc la fréquence de rotation de la turbine,
- vanne Tout ou Rien VM : permet de couper le circuit en cas d'alerte de sécurité.



Le débattement angulaire de l'obturateur (papillon) est d'un quart de tour pour passer de la position section de passage nulle (vanne totalement fermée) à section de passage maximale (vanne totalement ouverte). Problématique : la fréquence du courant électrique produit par l'alternateur est liée à la vitesse de rotation de l'alternateur installé en bout d'arbre de la turbine. Cette vitesse de rotation est liée au débit de fluide circulant dans les canalisations d'alimentation de la turbine. Il est donc nécessaire de réguler ce débit. Nous allons étudier les éléments de nature à garantir cette contrainte de vitesse de rotation du GTA et son contrôle en cas d'incident en relation avec le débit de vapeur du circuit secondaire alimentant la (ou les) turbine(s).

Le diagramme partiel des exigences est donné ci-après ainsi que l'ibd (diagramme des blocs internes) du système :



3. Partie I : validation des performances de l'asservissement en position de la vanne

Le débit de vapeur alimentant la turbine est piloté par une vanne « quart de tour » (décrite précédemment) dont la position angulaire est asservie. L'objectif de cette partie est le dimensionnement du correcteur installé dans la boucle d'asservissement de la commande de position angulaire du papillon, permettant de vérifier les exigences attendues.

Etude géométrique de la vanne

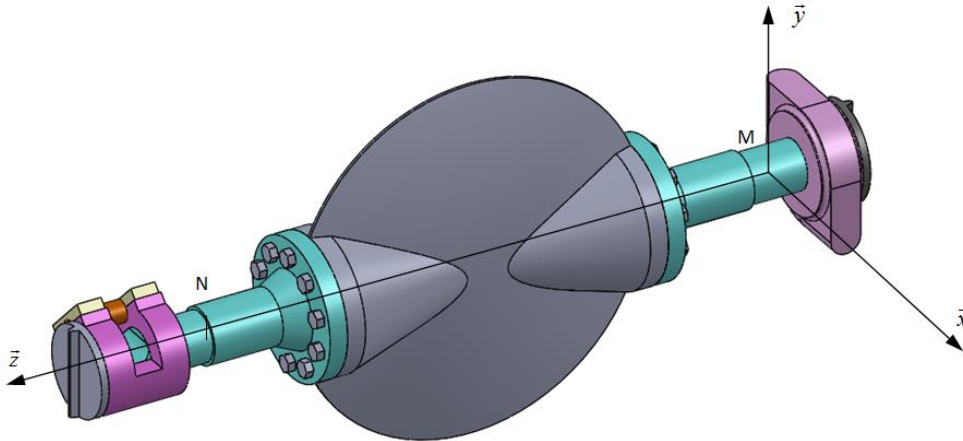


Figure 1 : papillon de la vanne

Le guidage en rotation du papillon de la vanne représentée ci-dessus par rapport au bâti est réalisé par l'intermédiaire de deux liaisons en parallèle, modélisées par :

- une liaison rotule de centre M
- une liaison sphère-cylindre (linéaire annulaire) de centre N et d'axe $(N, \vec{z})$ tel que : $\overrightarrow{MN} = n.\vec{z}$

Q-1 : Caractériser le torseur cinématique de chacune des deux liaisons.

Q-2 : Déterminer rigoureusement la liaison équivalente à ces deux liaisons en parallèle, qui permettra de modéliser la liaison globale du papillon par rapport au bâti.

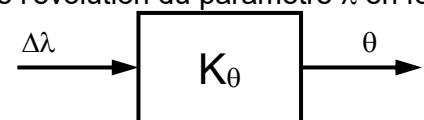
La présentation et le paramétrage du pilotage de la vanne sont fournis en annexe 1.

Q-3 : Indiquer le nombre minimum de paramètre(s) géométrique(s) qu'il faut fixer pour définir la configuration du mécanisme et indiquer la valeur de $\omega_{2/3}$. (vitesse de rotation du solide 2 par rapport au solide 3 autour de l'axe $(A, \vec{x}_3)$).

Q-4 : Etablir la fermeture géométrique afin d'explicitier la relation liant l'expression de $\lambda(t)$ avec $\overrightarrow{AB} = \lambda(t).\vec{x}_3$ en fonction des données géométriques et de l'angle $\theta(t)$. Il est préférable au préalable de construire les figures de changement de base.

Q-5 : Les deux positions extrêmes de la vanne correspondent à $\theta = \pm 45^\circ$. En déduire à l'aide de l'expression précédente la valeur précise de la course utile du vérin (en mm).

On cherche à construire un modèle linéaire de la loi entrée-sortie de ce mécanisme. A cet effet, une simulation numérique de l'équation précédente conduit au tracé de l'évolution du paramètre λ en fonction de l'angle θ fourni en annexe 2.



Q-6 : Identifier la valeur numérique du gain K_θ tel que : θ (en radian) = $K_\theta . \Delta\lambda$ (avec $\Delta\lambda$ en mm) fournissant le modèle linéarisé du mécanisme d'ouverture :

$\Delta\lambda$ caractérise la variation d'abscisse de la tige du vérin par rapport à la position centrée ($\theta = 0$).

Modèle simplifié du comportement de l'asservissement de la vanne

Pour la suite du sujet, pour toute fonction temporelle notée $f(t)$, on note $F(p)$ son image dans le domaine de Laplace et on considère que les conditions d'Heaviside sont réalisées.

Le vérin est alimenté par une électrovanne (entrée tension de commande $u(t)$, sortie débit $q(t)$ débit volumique) dont le comportement est modélisé par un gain pur de valeur K_{ev} .

La section utile du vérin est notée S .

Q-7 : Déterminer la fonction de transfert du vérin, notée $H_v(p)$ du vérin entre le débit d'alimentation $Q(p)$ et la variation $\Delta\lambda(p)$ de la tige du vérin.

La mesure de l'angle θ n'est pas réalisée directement, un potentiomètre rectiligne mesure le déplacement de la tige du vérin. Ce capteur de gain K_{capt} délivre une tension $u_\lambda(t)$ image de la position définie par $\Delta\lambda(t)$:

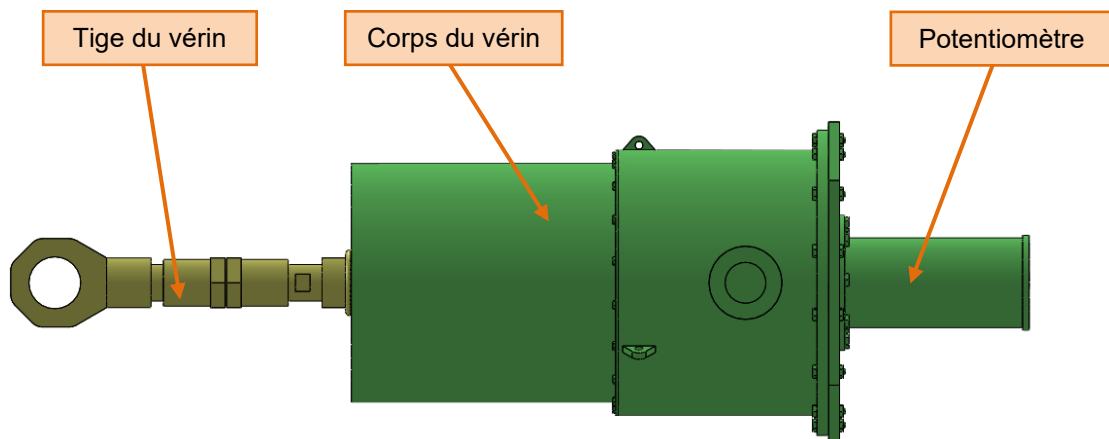


Figure 2 : vérin et potentiomètre

Le potentiomètre de comportement linéaire a une course électrique de 200 mm et est alimenté par une tension de 24V. Le signal délivré $u_\lambda(t)$ est proportionnel au déplacement et $0 \leq u_\lambda(t) \leq 24V$.



Q-8 : Déterminer la valeur numérique du gain pur du potentiomètre K_{capt} à exprimer en unité SI. Préciser l'unité de K_{capt} .

Un bloc de gain k transforme la consigne angulaire $\theta_c(t)$ (exprimée en radian) en une tension $u_c(t)$.

Un correcteur de gain pur C amplifie l'écart entre la tension de consigne $u_c(t)$ et la tension issue du capteur et délivre la tension d'alimentation de l'électrovanne $u(t)$. Cette tension amplifiée alimente l'électrovanne de commande du vérin.

Q-9 : Construire le schéma-bloc du système avec l'entrée $\theta_c(p)$ et la sortie $\theta(p)$. On précisera pour chaque bloc, la fonction de transfert associée, sous forme littérale.

Q-10 : Déterminer la fonction de transfert (expression littérale) en boucle fermée $H(p)$ (entrée $\theta_c(p)$: sortie $\theta(p)$) à mettre sous forme canonique.

Q-11 : En déduire ses grandeurs caractéristiques (expression littérale).

Q-12 : Quelle valeur donner à k (expression littérale) pour avoir un gain statique unité de $H(p)$?

Q-13 : Conclure quant à la validation du critère de précision du diagramme des exigences.

On donne les valeurs numériques suivantes :

$S = 0,01 \text{ m}^2$ et $K_{ev} = 0,01 \text{ m}^3/(\text{s.V})$.

Q-14 : Choisir la valeur numérique du gain C permettant de vérifier les exigences de rapidité.

Modèle affiné du comportement de la vanne

On choisit d'améliorer la représentativité du modèle en réalisant un essai sur l'électrovanne seule. On impose un échelon de tension de 10V et on mesure l'évolution du débit en sortie (en m³/s). La réponse temporelle est fournie en annexe 3.

Q-15 : Identifier les paramètres caractéristiques du modèle de l'électrovanne qu'il est légitime d'identifier. Donner alors la forme de la fonction de transfert de l'électrovanne $H_{ev}(p)$.

Q-16 : Déterminer alors l'expression de la fonction de transfert en boucle ouverte de l'asservissement de la vanne, et valider l'allure du tracé dans le plan de Bode de la réponse fréquentielle fourni en annexe 4 pour un gain unitaire du correcteur : $C = 1$.

Q-17 : Montrer que le système est toujours stable et mesurer graphiquement les marges de stabilité.

Q-18 : Déterminer la valeur maximale du gain C permettant de répondre aux exigences de stabilité.

Compte tenu de l'identification de l'électrovanne et du réglage du correcteur proportionnel, la fonction de transfert en boucle fermée s'exprime sous la forme (quel que soit le résultat précédent) :

$$H(p) = \frac{1}{1 + 3 \cdot 10^{-2} \cdot p + 6 \cdot 10^{-4} p^2}$$

Q-19 : Déterminer les expressions numériques des grandeurs caractéristiques de la fonction de transfert $H(p)$.

Q-20 : A l'aide de l'abaque fourni en annexe 5 donnant le temps de réponse réduit d'un système du second ordre, vérifier la validité de l'exigence de rapidité.

Validation des exigences attendues

Q-21 : En utilisant les résultats précédents, vérifier toutes les exigences concernant la régulation de la vanne.

La vanne est mise en rotation par l'intermédiaire d'un vérin hydraulique dont le débit d'alimentation est contrôlé par une électrovanne. Le schéma ci-après fait apparaître les éléments suivants :

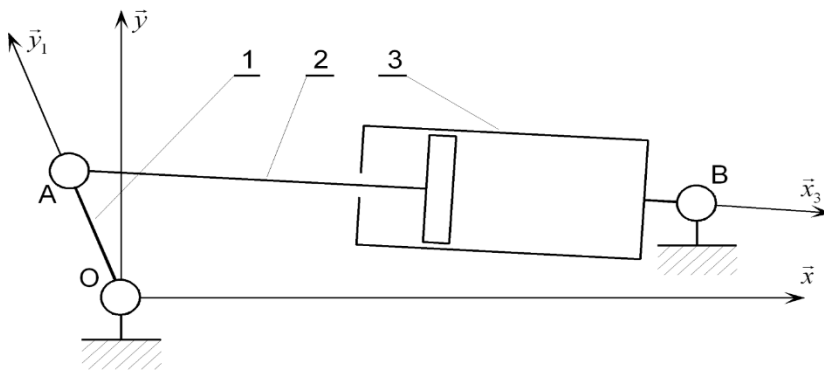
0 : bâti

1 : levier de commande solidaire du papillon

2 : tige du vérin

3 : corps du vérin

La liaison L2-3 est une liaison pivot glissant d'axe $(A\vec{x}_3)$.



Modèle cinématique du pilotage de la vanne.

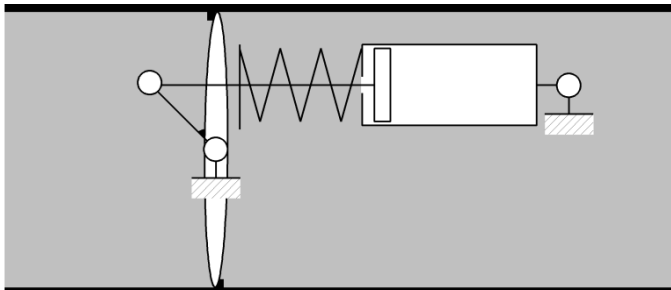
On définit les repères suivants :

$R_0 : (O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ lié au bâti 0,

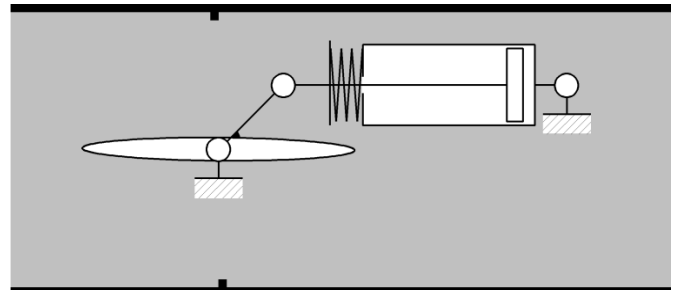
$R_1 : (O, \vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z})$ lié au levier 1 tel que : $\overrightarrow{OA} = e \cdot \vec{y}_1$ et $\theta(t) = (\vec{x}, \vec{x}_1) = (\vec{y}, \vec{y}_1)$.

$R_3 : (B, \vec{x}_3, \vec{y}_3, \vec{z})$ lié au corps du vérin 3 tel que : $\overrightarrow{OB} = L \cdot \vec{x} + d \cdot \vec{y}$, $\beta(t) = (\vec{x}, \vec{x}_3) = (\vec{y}, \vec{y}_3)$ et $\overrightarrow{AB} = \lambda(t) \cdot \vec{x}_3$

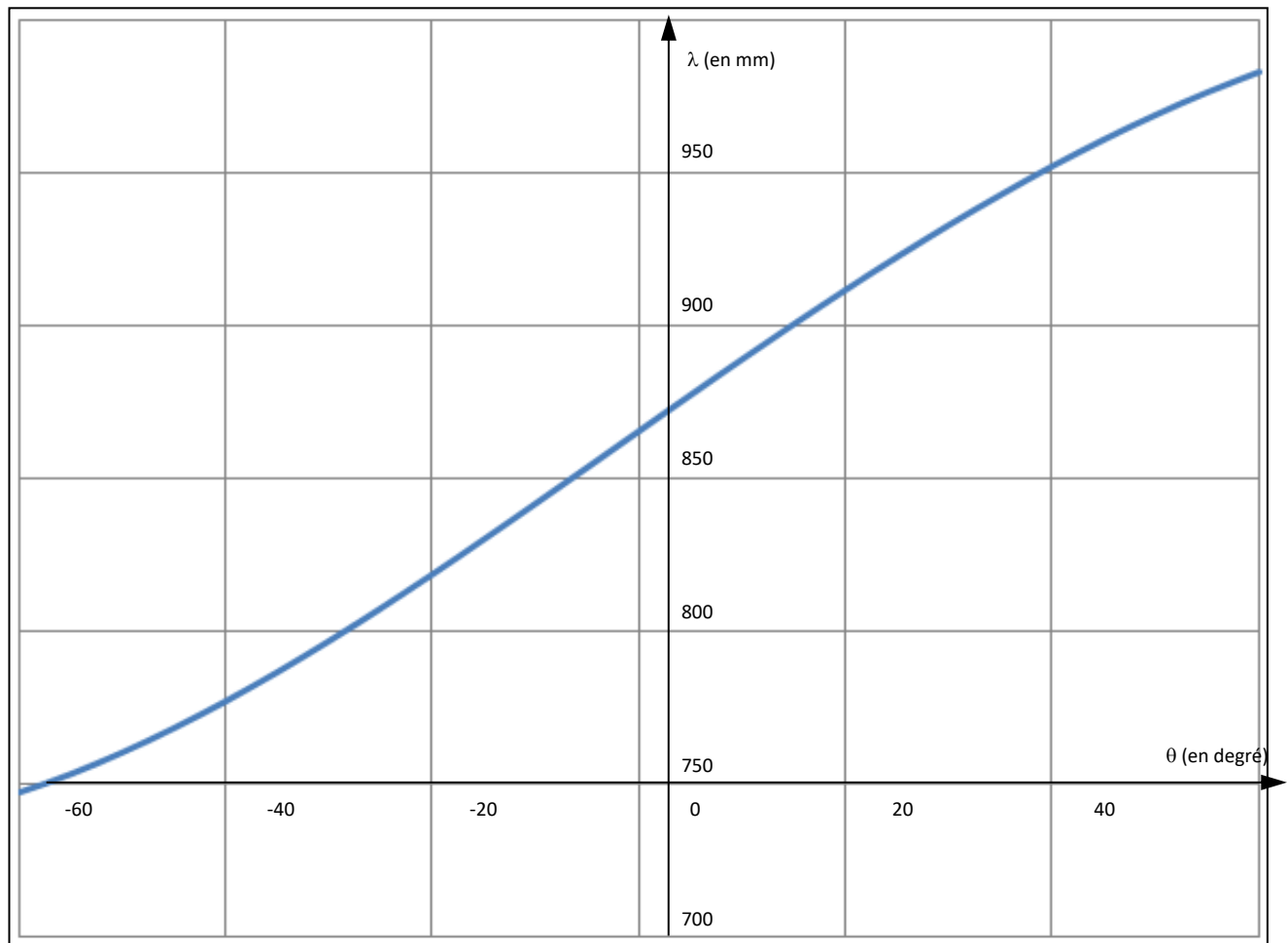
$L = 864,8 \text{ mm}$ $d = 96 \text{ mm}$ $e = 135,8 \text{ mm}$



Vanne en position fermée ($\theta = +\frac{\pi}{4}$)



Vanne en position ouverte ($\theta = -\frac{\pi}{4}$)



Annexe 3 : réponse temporelle de l'électrovanne (temps en ms)

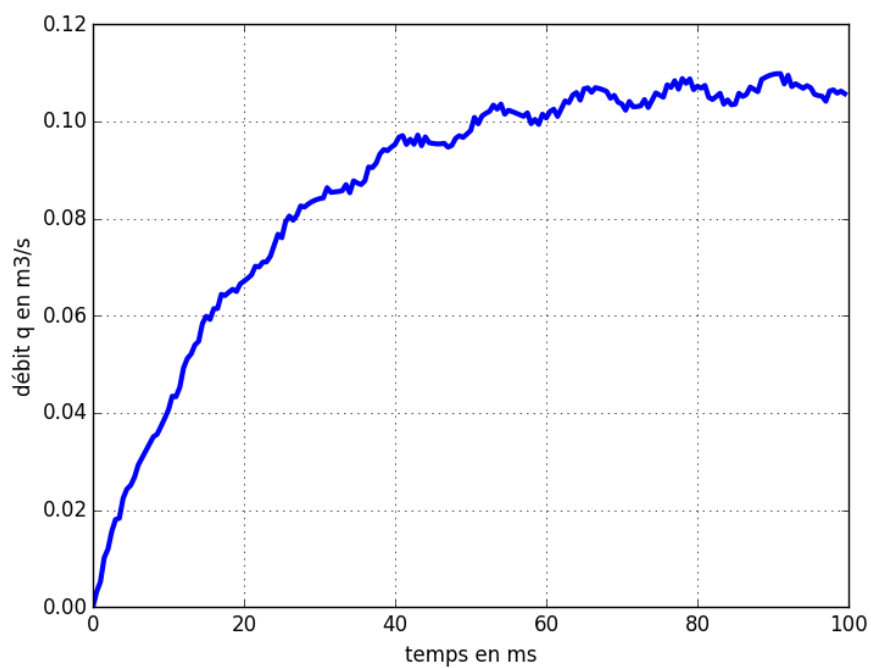


Diagramme de Bode

