

VANNE DE RÉGULATION D'UNE CENTRALE NUCLÉAIRE

La France produit plus de 400 TWh d'électricité à partir d'énergie nucléaire. Une centrale nucléaire (figure 1) est un système complexe mettant en œuvre différents types d'énergie et de multiples asservissements. Cette étude porte sur le fonctionnement global de la centrale puis s'intéresse plus précisément à un des asservissements : la commande de la vanne de régulation de puissance vapeur.



FIGURE 1 – Photographies d'une centrale nucléaire et du rotor d'une turbine vapeur.

1 Étude globale de la centrale

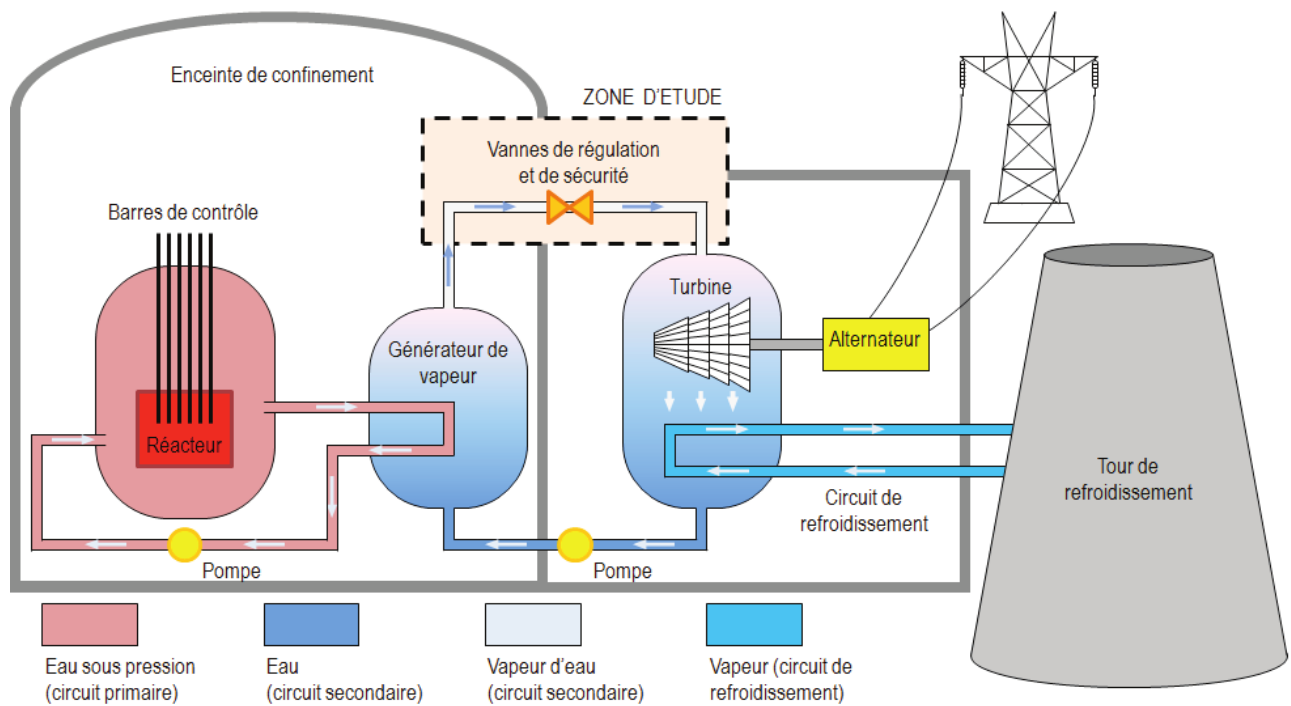


FIGURE 2 – Schéma de principe d'une centrale nucléaire.

La figure 2 montre le principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire :

- Un réacteur assure la conversion de l'énergie nucléaire en énergie thermique, captée et transportée par de l'eau maintenue liquide sous une pression de 150 bars. La puissance thermique produite par les barres d'Uranium est contrôlée par des barres de contrôle qui sont plongées entre les barres d'Uranium pour

ralentir la réaction en chaîne ou au contraire relevées pour l'accélérer. Un asservissement de position des barres de contrôle permet ainsi d'agir sur la puissance thermique produite dans le réacteur.

- Des pompes assurent la circulation de l'eau du circuit primaire (eau radioactive) qui sert de *fluide caloporteur* (fluide qui transporte l'énergie thermique) vers le générateur vapeur.
- Le générateur vapeur est un échangeur thermique entre le circuit primaire (radioactif) et le circuit secondaire (non radioactif). Dans le générateur vapeur, l'eau provenant de la pompe du circuit secondaire est chauffée par contact avec les canalisations du circuit primaire et s'évapore. L'énergie thermique du circuit primaire est ainsi convertie en énergie thermodynamique (enthalpie).
- La vapeur produite est envoyée vers la turbine qui convertit l'énergie thermodynamique (l'enthalpie) de la vapeur en énergie mécanique (figure 1).
- Une vanne de régulation (vanne papillon) permet de réguler le débit de vapeur transmis à la turbine, et ainsi réguler la puissance de production de la centrale. Cette vanne papillon est asservie en position angulaire. Ce contrôle de position fait l'objet d'une étude détaillée par la suite.
- La turbine entraîne un alternateur qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique alternative envoyée sur le réseau électrique. Un asservissement du courant inducteur permet le contrôle du flux magnétique dans la génératrice et ainsi le contrôle de la puissance électrique produite.
- Un circuit de refroidissement associé à une tour de refroidissement permet la condensation de la vapeur en aval de la turbine (utile pour le cycle thermodynamique de production).
- Un centre de commande de la centrale mesure la fréquence du réseau et ajuste les consignes de position des barres de contrôle, de la vanne papillon de régulation du débit vapeur et du courant inducteur de l'alternateur de façon à coordonner le flux de puissance au travers de la centrale et satisfaire aux consignes de production de puissance sur le circuit électrique et d'asservissement de la fréquence.
- Un centre national de commande (hors périmètre de la centrale nucléaire), surveille la consommation d'énergie sur le réseau et les échanges frontaliers, et envoie par télétransmission des consignes de puissance à produire à chaque centrale.

Q1 Quel est le service rendu par le système « centrale nucléaire »? Proposer quelques critères essentiels du cahier des charges et une estimation des niveaux attendus.

Q2 Proposer une représentation sous forme de diagramme ibd du fonctionnement de la centrale nucléaire.

2 Étude de la vanne de régulation

L'objet de notre étude porte sur deux vannes installées sur le circuit secondaire (figure 3). Ces deux vannes quasi identiques ont deux fonctions différentes :

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

Seule la vanne de régulation sera étudiée par la suite.

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; figure 4 à gauche) à section de passage maximale (vanne totalement ouverte; figure 4 à droite).

Le diagramme partiel des exigences (req) est donné figure 5. Le diagramme des blocs internes (ibd) de la vanne est donné figure 6. Cette vanne est commandée par une électrovanne qui distribue l'énergie hydraulique au vérin. Le vérin déplace un levier solidaire du papillon.

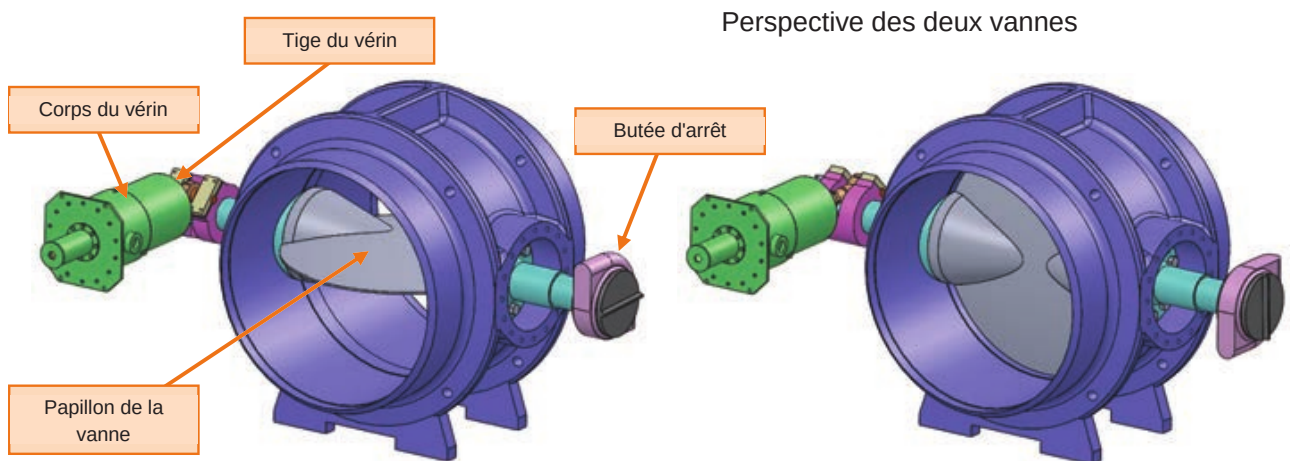
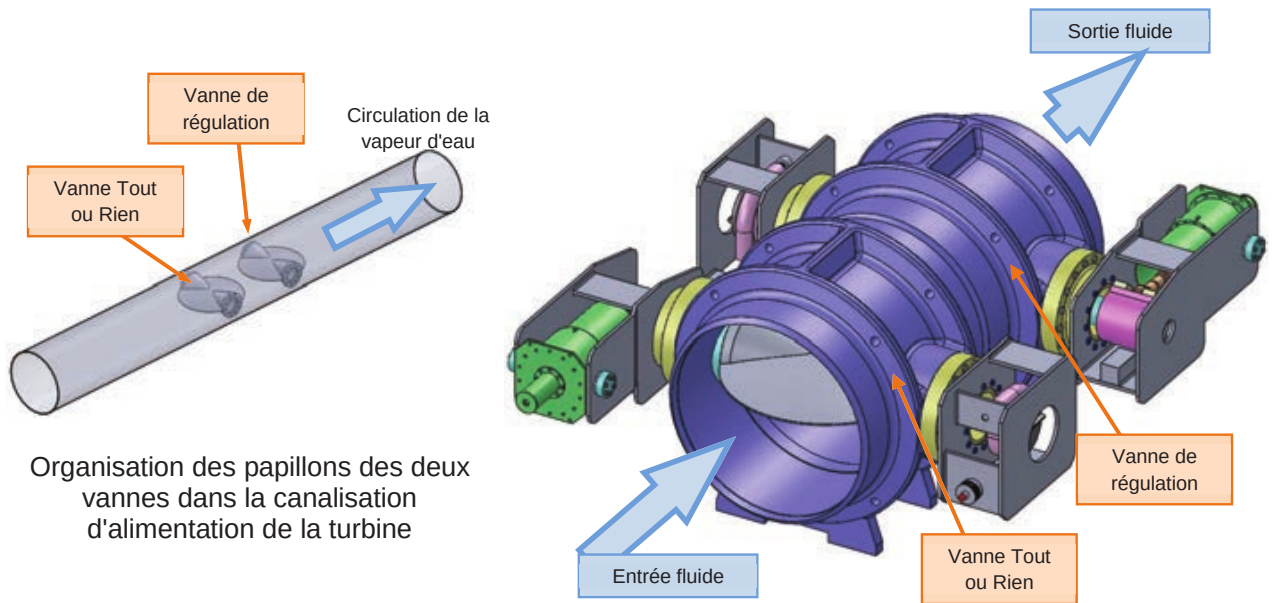


FIGURE 3 – Implantation des vannes papillon de régulation et de sécurité.

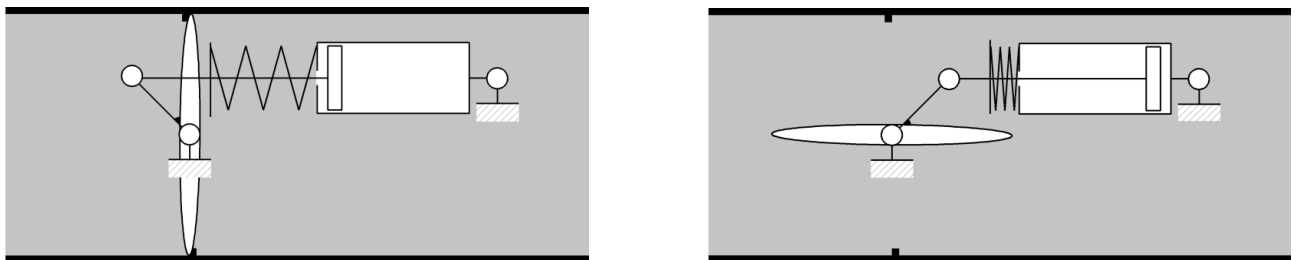


FIGURE 4 – Positions extrêmes de la vanne : à gauche en position fermée ($\theta = \pi/4$) et à droite en position ouverte ($\theta = -\pi/4$).

Un micro-contrôleur reçoit les consignes de positions du centre de contrôle de la centrale, mesure la position du vérin par l'intermédiaire du potentiomètre linéaire, et commande l'électrovanne.

Q3 Proposer une représentation de l'asservissement en position de la vanne, sous forme de chaîne d'énergie et d'information.

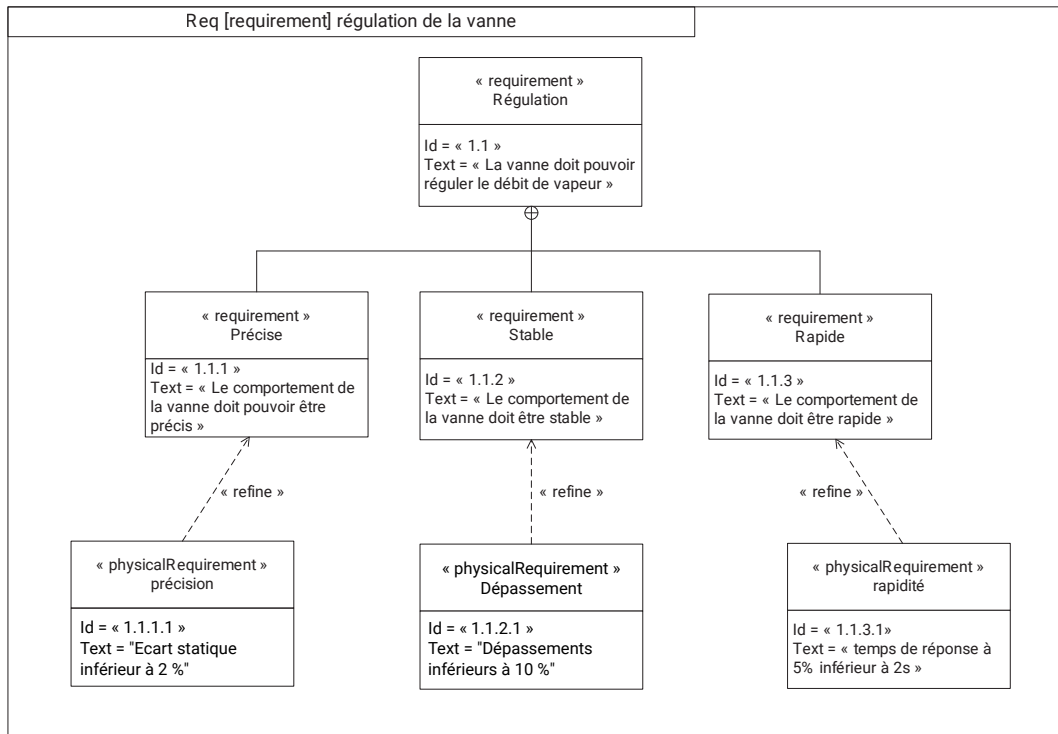


FIGURE 5 – Diagramme d'exigences partiel du système d'asservissement de la vanne

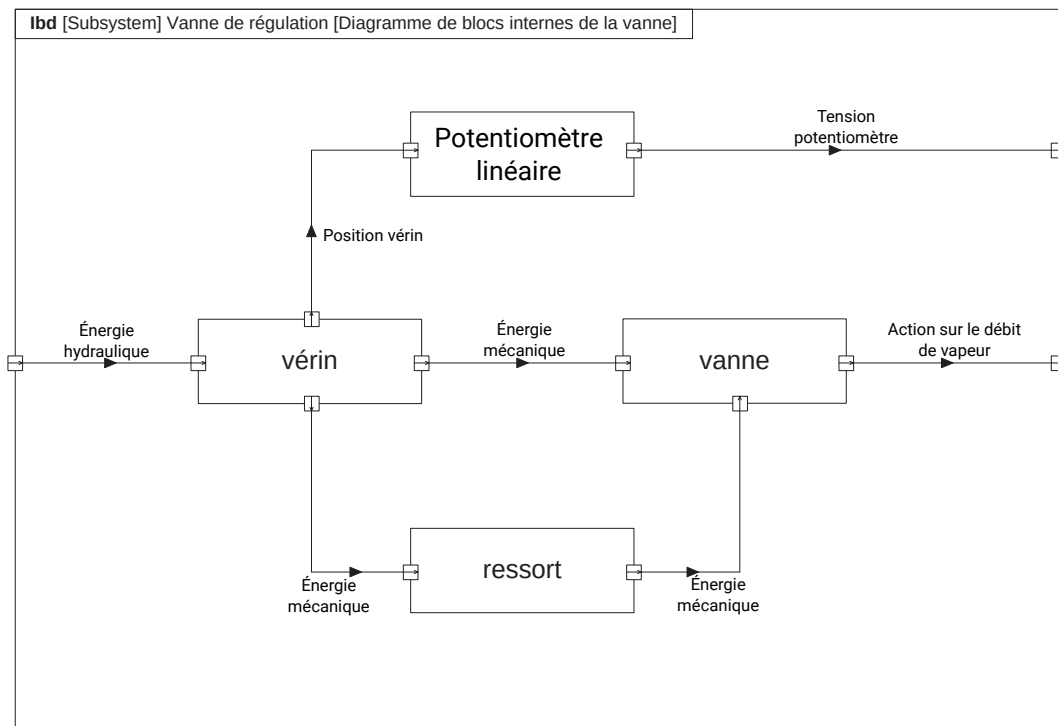


FIGURE 6 – Diagramme des blocs internes de la vanne.

2.1 Modélisation des composants

2.1.1 Électrovanne

Le modèle de l'électrovanne est identifié sur une courbe de réponse (modèle de comportement) : à partir de la situation de repos (fermée), un échelon de tension de 11 V est appliqué sur l'entrée de la vanne. Une mesure de

débit est réalisée et la courbe obtenue est donnée figure 7. On remarque que la vanne ne réagit pas instantanément.

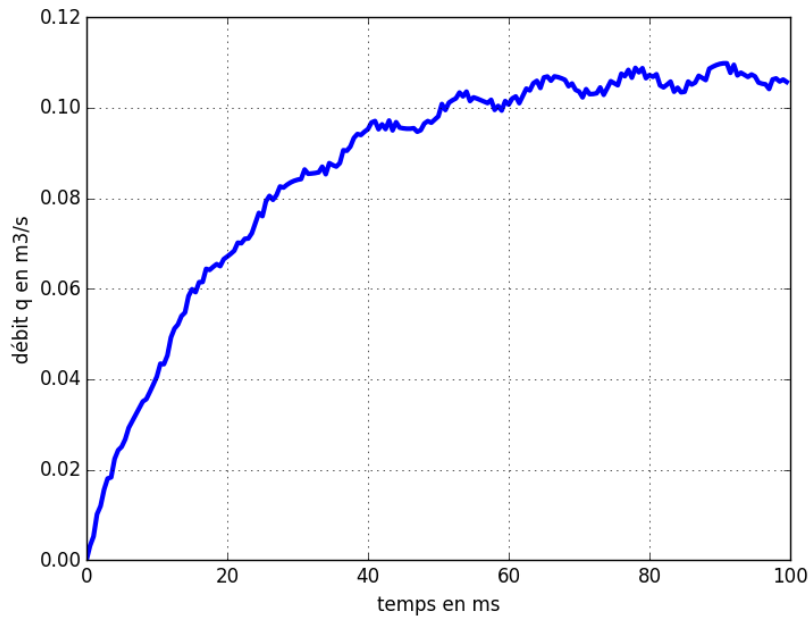


FIGURE 7 – Courbe de débit mesuré en sortie de l'électrovanne pour une commande de 11 V.

Q4 Déterminer le temps de réponse à 5% t_r de l'électrovanne.

Q5 Déterminer le gain statique K_{ev} de l'électrovanne, c'est-à-dire le rapport sortie sur entrée après convergence de la sortie.

Le temps de réponse sera négligé par la suite et le comportement de l'électrovanne sera simplement modélisée par la constante K_{ev} .

2.1.2 Vérin

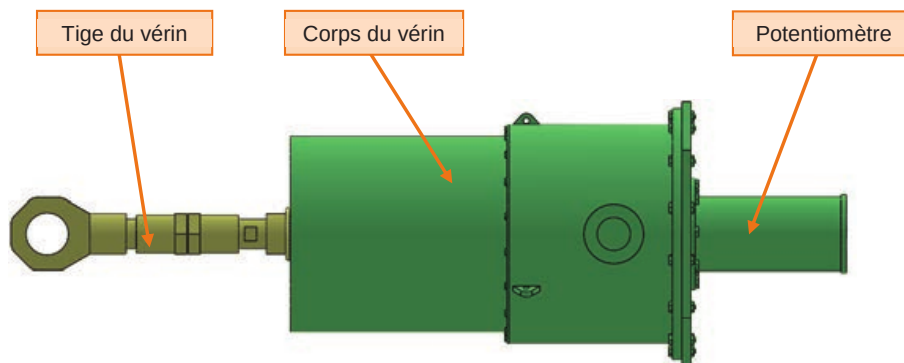


FIGURE 8 – Vérin de commande de la vanne

Le vérin est décrit figure 9. Il s'agit d'un vérin simple effet, où un ressort assure le retour en position fermée (exigence de sécurité en cas de rupture d'alimentation en énergie hydraulique) et où l'huile sous pression permet de contrôler la position du vérin et donc l'ouverture de la vanne.

Le diamètre interne du corps de vérin est $D = 12$ cm tandis que le diamètre de la tige est de $d = 4$ cm.

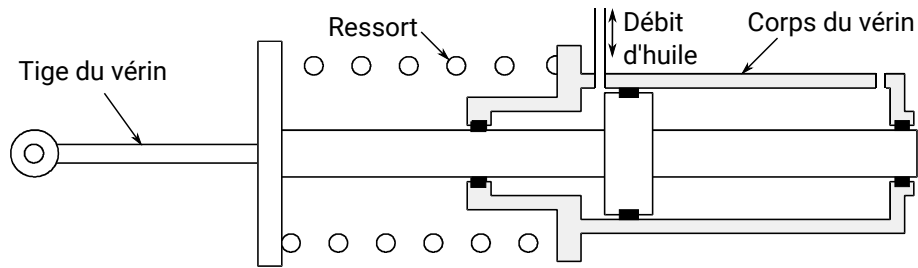


FIGURE 9 – Plan du vérin simple effet.

Q6 Déterminer la relation entrée-sortie du vérin, liant la vitesse V de la tige du vérin au débit q d'huile.

2.1.3 Mécanisme d'entraînement du papillon

Le déplacement du vérin assure la mise en rotation du papillon de la vanne. La figure 4 montre le papillon dans les deux positions extrêmes, totalement fermé et totalement ouvert.

Le schéma cinématique figure 11 montre l'architecture du mécanisme d'entraînement où :

- 0 est le bâti,
- 1 est le levier de commande solidaire du papillon,
- 2 est la tige de vérin,
- 3 est le corps de vérin.

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 $\vec{OA} = e \vec{y}_1$ et $\theta(t) = (\vec{x}, \vec{x}_1) = (\vec{y}, \vec{y}_1)$;
- $R_3(O, \vec{x}_3, \vec{y}_3, \vec{z})$ lié au corps du vérin 3 tel que $\vec{OB} = L \vec{x} + h \vec{y}$, $\vec{AB} = \lambda(t) \vec{x}_3$ et $\beta(t) = (\vec{x}, \vec{x}_3) = (\vec{y}, \vec{y}_3)$;
- $L = 865 \text{ mm}$, $h = 96 \text{ mm}$ et $e = 136 \text{ mm}$.

Q7 Indiquer les angles θ et β sur la figure. Dessiner les figures de changement de base.

Q8 Écrire la relation vectorielle de fermeture géométrique, puis projeter cette équation dans la base (\vec{x}, \vec{y}) .

Q9 Éliminer le paramètre β de façon à obtenir une unique relation liant λ et θ .

Un tracé sur Python de la relation précédente a permis d'obtenir la courbe figure 10. La loi étant presque linéaire, un modèle simple sous la forme $\theta = K_m \lambda + \text{Cste}$ est adopté.

Q10 Déterminer à partir de la courbe une valeur numérique pour la constante K_m .

2.1.4 Capteur potentiométrique

Un capteur potentiométrique linéaire fixé à la tige de vérin permet de mesurer la position du vérin. La résistance de $1 \text{ k}\Omega$ couvre une longueur de 200 mm et est soumise à ses extrémités à une différence de potentiel de 5 V . Un curseur lié à la tige de vérin se déplace sur cette résistance et renvoie un potentiel variable entre 0 et 5 V . Un convertisseur analogique numérique (CAN) sur 10 bits entre 0 et 5 V numérise ce potentiel pour le micro-contrôleur.

Q11 Proposer une valeur numérique pour le gain K_p modélisant le capteur potentiométrique.

Q12 Proposer une valeur numérique pour le gain K_{CAN} modélisant le convertisseur analogique numérique.

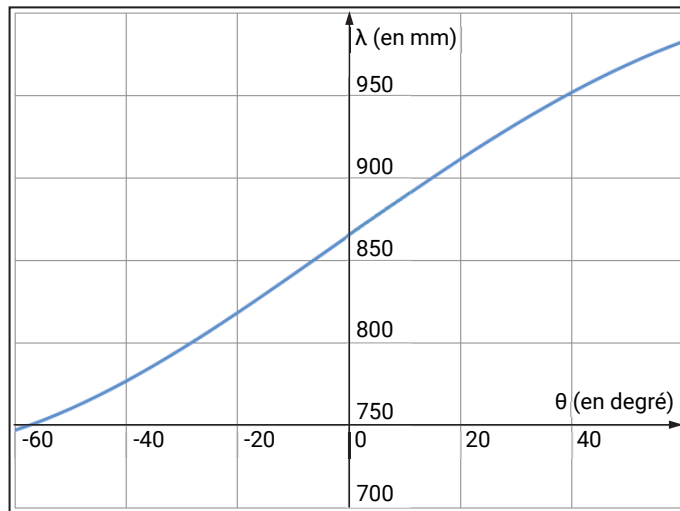


FIGURE 10 – Tracé de la loi géométrique liant λ et θ .

2.2 Modélisation et simulation globale de la vanne asservie

2.2.1 Élaboration du modèle

Un modèle acausal de la vanne asservie est partiellement proposé figure 12.

Q13 Compléter le modèle en indiquant les liens entre composants.

2.2.2 Mesure des performances sur les résultats de simulation

Afin de prévoir les performances de la vanne, le modèle précédent est simulée avec pour sollicitation d'entrée une consigne de position angulaire de 10° . La courbe figure 13 est obtenue.

Q14 Le système est-il stable? (justifier)

Q15 Le système respecte-t-il le critère de précision du cahier des charges? (justifier)

Q16 Le système respecte-t-il le critère de temps de réponse du cahier des charges? (justifier)

Q17 Le système respecte-t-il le critère de dépassement du cahier des charges? (justifier)

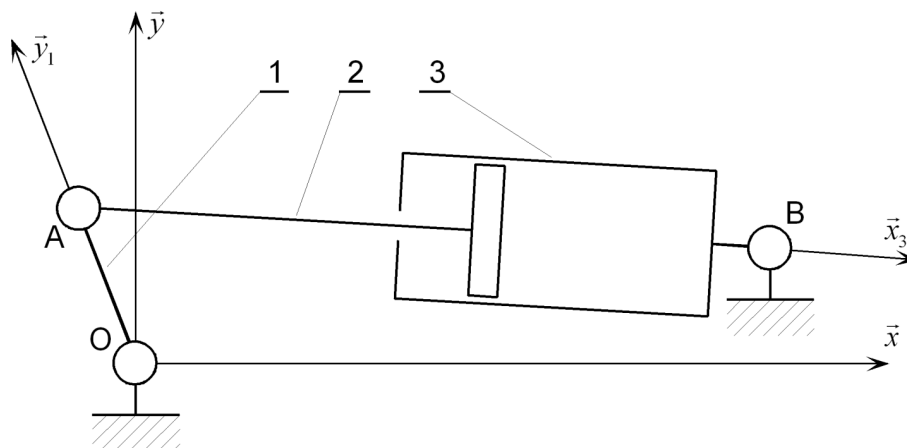


FIGURE 11 – Modèle cinématique du pilotage de la vanne

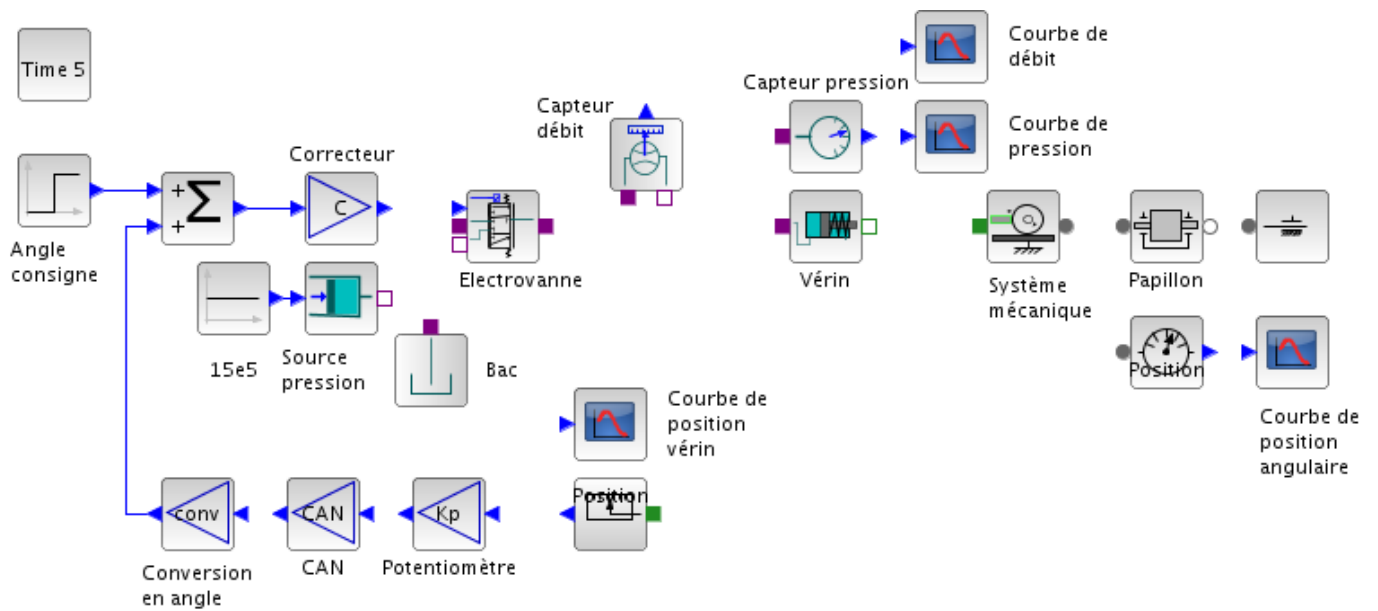


FIGURE 12 – Modèle acausal à compléter.

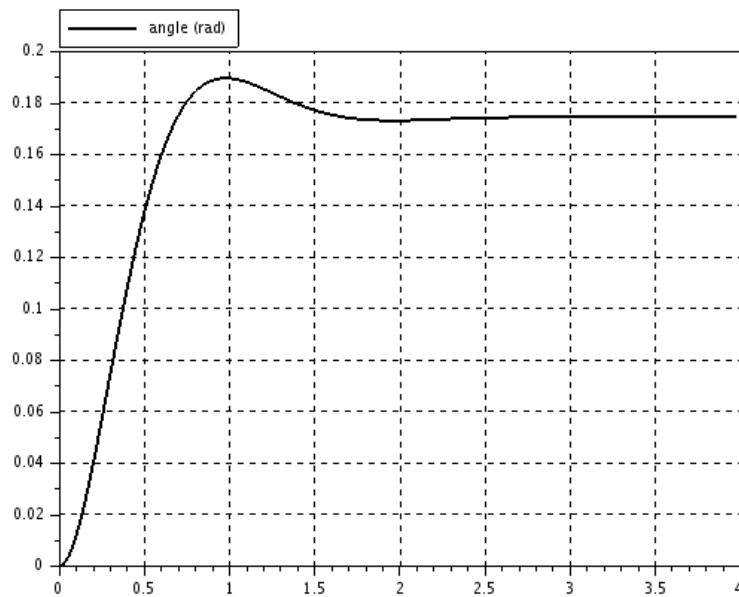


FIGURE 13 – Courbe d'évolution de l'angle du papillon pour une consigne de 10°, en fonction du temps (en s).