

SYS823 – Modélisation et automatisation des procédés industriels

PROJET : MODELISATION ET CONTROLE D'UN DISPOSITIF
EXPERIMENTAL DE PLONGEE

Prof. Georges Ghazi | École de technologie supérieure (ÉTS) | Rév. 2025

Auteur(s) : Guy Gauthier
Georges Ghazi

Introduction

Dans ce projet, on vous demande de modéliser la dynamique d'un système expérimental de plongée. Le schéma du dispositif de plongée en question est illustré sur la **Figure 1**.

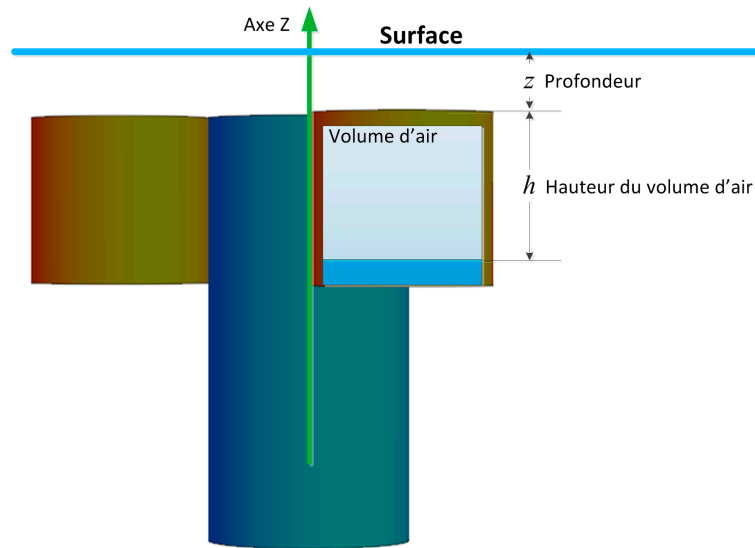


Figure 1. Schéma du dispositif de plongée

Ce dispositif utilise une bonbonne de plongée d'une capacité de 10 litres et ayant une masse à vide de 10 kg. Cette bonbonne est remplie d'air comprimé à une pression de 232 bars¹. Le volume de la bonbonne et des équipements (valves, batteries et électronique d'une masse de 2.5 kg) correspond au volume d'un cylindre de 0.8 mètre de long et de 0.19 mètre de diamètre (en bleu sur la figure).

Trois tubes (borgnes) de PVC sont répartis autour du cylindre central contenant la bonbonne (en orange sur la figure). Ce sont des tubes de format « Schedule 80 » de 6 pouces de diamètre (Diamètre intérieur de 0.145 mètre et diamètre extérieur de 0.168 mètre). L'épaisseur des bouchons à l'extrémité supérieure des tubes de PVC est de 0.012 mètre et la longueur totale des tubes est de 0.312 mètre.

I. Modélisation du système

Dans cette première partie, il vous est demandé de déterminer les équations mathématiques permettant de modéliser le comportement vertical du dispositif de plongée. Pour cela, vous pouvez considérer les paramètres suivants :

- Masse volumique de l'eau douce : 1000 kg/m^3 ;
- Masse volumique de l'air (à TPN – 20°C et 101300 Pa) : 1.293 kg/m^3 ;
- Masse volumique du PVC : 1400 kg/m^3 ;
- Masse volumique du plomb : 11350 kg/m^3 ;
- Constante des gaz parfaits R : $8.3145 \text{ J mol}^{-1}/\text{Kelvin}$;
- Accélération de la pesanteur g : 9.81 m/s^2 .

¹ **Note** : 1 bar = 100000 Pa

De plus, on suppose que le dispositif se déplace lentement, ce qui implique que le frottement hydrodynamique peut être négligé.

Pour cette partie, vous devez donc :

1. Déterminer les conditions initiales du dispositif. Calculer le nombre de moles d'air initialement contenu dans la bonbonne et le nombre de moles d'air initialement contenu dans les trois tubes de PVC (dans ce dernier cas assumer que les tubes sont à pression atmosphérique : 101300 Pa). Lors de la mise en opération du dispositif, le nombre de moles de la bonbonne ira en diminuant, car à certains moments, elle se videra dans les tubes de PVC.
2. Calculez la force de gravité faisant couler le dispositif, ainsi que la force d'Archimède qui veut faire flotter le dispositif lorsque le dessus du dispositif affleure l'eau (i.e. une profondeur $z = 0$ m).

Il faut prendre en compte le volume du cylindre central contenant la bonbonne, des trois tuyaux de PVC et de l'air piégé dans ces tuyaux. Notez que lors de l'immersion, le volume complet de chaque tuyau de PVC est rempli d'air à une pression égale à la pression atmosphérique. Une fois le dispositif à l'eau, la pression hydrostatique de l'eau (P_{hyd}) donnée par la formule suivante :

$$P_{hyd} = 101300 + [\rho_{eau} \times g_0] \times z$$

vient modifier ce volume lorsque l'on enfonce le dispositif dans l'eau, car l'air se comprimerait dans les tuyaux de PVC.

Il faut tenir compte de ce changement de volume qui résultera en un changement de la hauteur h du volume d'air piégé dans les tubes de PVC (assumée égale pour les 3 tubes). À partir de la valeur obtenue, déterminer quelle quantité de plomb sera nécessaire pour assurer une flottabilité neutre ? Assumez qu'un disque de plomb est fixé au bas du cylindre central contenant la bonbonne (diamètre du disque de plomb de 0.19 mètre).

3. Obtenir l'équation (ou les équations) différentielle représentant la dynamique du dispositif en profondeur.

Indice #1 : La profondeur z aura une dynamique basée sur la loi de Newton : $\ddot{z} = \Sigma F/m$, avec ΣF la force totale subie par le dispositif et m la masse totale du dispositif (qui peut varier lentement dans le temps, car de l'air doit être évacué des trois tubes de PVC pour pouvoir plonger).

Indice #2 : Vous devez inclure des entrées commandables. Une valve retire l'air des trois cylindres de PVC, ce qui permet au dispositif de plonger. Une seconde valve vide le contenu de la bonbonne dans les tubes de PVC pour que le dispositif remonte. On peut alors définir l'équation différentielle du nombre de moles d'air dans la bonbonne (n_B) tel que :

$$\dot{n}_B = -0.0002\sqrt{P_B - P_{tube}}$$

et celle du nombre de moles d'air dans les trois tubes de PVC (n_{tubes}) comme suit :

$$\dot{n}_{tubes} = 0.0002\sqrt{P_B - P_{tube}} - 0.0002\sqrt{P_{tube} - P_{hyd}}$$

où P_B est la pression de la bonbonne, P_{tube} est la pression dans un tube de PVC, et P_{hyd} est la pression hydrostatique au-dessus du dispositif.

4. En partant de vos équations, complétez le modèle Matlab/Simulink « Model_openLoop » pour obtenir un modèle en boucle ouverte de votre système.

II. Analyse du système en boucle ouverte

Maintenant que vous avez obtenus votre modèle, vous devez réaliser une étude en boucle ouverte pour analyser l'équilibre et la stabilité de ce système. Pour cela, on vous demande :

1. Déterminer le volume d'air nécessaire dans les trois tubes de PVC pour que le dispositif reste stable à une profondeur de 2 mètres ? **Note importante** : l'air qu'il faut ajouter dans les tubes PVC doit être pris de la bonbonne d'air, et la quantité d'air dans la bobonne ne peut jamais être plus grande que la quantité initiale trouvée dans la Section I.
2. Trouver le modèle linéaire de votre système sous la forme :

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\Delta \mathbf{x} + \mathbf{B}\Delta \mathbf{u}$$

où $\Delta \mathbf{x}$ représente la variation du vecteur d'état autour de l'équilibre, et $\Delta \mathbf{u}$ est la variation du vecteur de commande autour de l'équilibre.

3. En se basant sur le résultat obtenu à la question précédente, que pouvez-vous dire sur la stabilité de système ?
4. Réaliser trois simulations sur **10 secondes** avec votre modèle Simulink montrant :
 - i. l'évolution du système à d'équilibre ;
 - ii. l'évolution du système s'il est perturbé de 1 cm vers le haut ;
 - iii. l'évolution du système s'il est perturbé de 1 cm vers le bas.
5. Expliquez physiquement ce qu'il se passe pour justifier ce comportement.

III. Conception d'un contrôleur

Pour terminer, on vous demande de concevoir un contrôleur pour commander la profondeur du dispositif de plongée. Votre contrôleur devra être constitué de trois boucles :

- i. Une boucle interne de stabilisation ;
- ii. Une boucle de contrôle pour commander la vitesse verticale du dispositif ;
- iii. Une boucle externe pour contrôler la position (i.e., profondeur) du dispositif.

Vous êtes libre d'utiliser les techniques de contrôle que vous souhaitez. Néanmoins, il faut utiliser au moins une technique de contrôle moderne, et une technique de contrôle classique.

Votre contrôleur final devra satisfaire aux conditions suivantes :

- i. Garantir la stabilité du système en boucle fermée ;
- ii. Permettre un contrôle de vitesse du dispositif avec un dépassement maximal inférieure à 5%, et un temps de réponse de l'ordre de 2 secondes pour commander une vitesse de +/- 0.05 m/s.

- iii. Permettre un contrôle de la position avec un dépassement faible et un temps de réponse de l'ordre de 4 secondes pour commander une variation de 0.1 m.

Note # 1 : la vitesse de descente ou de montée du dispositif ne peut pas excéder ± 0.05 m/s. Vous devez donc ajouter un saturateur pour limiter la référence en vitesse dans votre architecture de contrôle.

Note #2 : vous devez ajouter une logique pour contrôler correctement l'ouverture et la fermeture des valves. Il est impératif de prendre en considération que les variables de commande ne peuvent pas avoir de valeur négative ! En effet, on ne peut jamais remplir la bonbonne d'air. De même, le remplissage des tubes PVC ne peut se faire qu'en transférant l'air de la bonbonne vers les tubes.

Pour cette partie, vous devez démontrer l'efficacité de votre contrôleur avec trois simulations :

- i. Une première simulation montrant le système allant de 2 à 2.05 m ;
- ii. Une deuxième simulation montrant le système allant de 2 à 1.95 m.
- iii. Une troisième simulation montrant le système allant de 2 à 5 m.

Dans les trois cas, vous devez mettre les graphiques en fonction du temps de la position du dispositif, de la vitesse du dispositif, des commandes sur les valves, de la quantité de mole dans la bonbonne et dans les tubes (ou dans un tube).

Remise et rapport

Le livrable du projet est un rapport (uniquement le rapport !). Aucun code Matlab ou modèle Simulink n'est demandé. Le rapport ne devra pas dépasser 10 pages, et devra être sous la forme d'un article de conférence type IEEE en deux colonnes. Un gabarit est fourni sur Moodle, néanmoins, les étudiant.e.s sont libres de choisir un autre gabarit deux colonnes. De même, l'éditeur (i.e., Word, Page, ou Latex) est libre au choix des étudiant.e.s.

Le rapport engage la responsabilité de ses auteurs. Ces derniers sont responsables de l'information donnée et, le cas échéant, des décisions qui sont prises par l'autorité sur la base des données fournies dans le rapport. Un bon rapport porte un regard critique sur les résultats obtenus et conclut sur la qualité et l'exploitabilité du travail rendu.

Les auteurs du rapport doivent donc manifester une grande intégrité professionnelle. Ils/Elles doivent rapporter les faits en toute impartialité, objectivement. Les données qu'ils/elles exposent doivent être rigoureusement vérifiées. Les propositions et les conclusions qu'ils/elles formulent doivent être soigneusement étudiées et pensées. Son seul but doit être l'efficacité et l'exactitude.