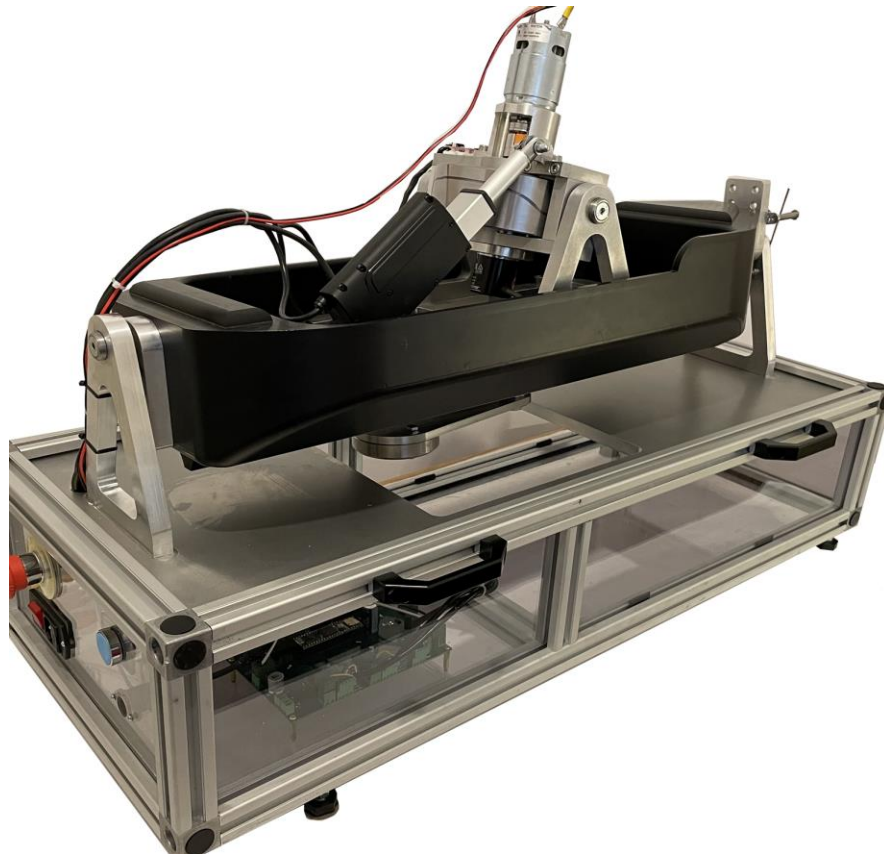


Travaux Pratiques – DYNAMIQUE DU SOLIDE

Stabilisateur Gyroscopique de Bateau



Objectifs du TP

L'activité principale de ce TP consiste à mesurer, identifier et vérifier les caractéristiques dynamiques du stabilisateur gyroscopique afin d'évaluer le couple gyroscopique pour dimensionner correctement le volant d'inertie ainsi que la motorisation du système.

1 – Présentation générale du support

Le stabilisateur gyroscopique de bateau est un système didactisé qui s'inspire de systèmes réels embarqués sur des bateaux de pêche ou de plaisance permettant de stabiliser le bateau lors des phases de mouillage (manœuvre qui consiste à immobiliser le bateau en mer, grâce à une ancre, chaîne ou cordage) permettant ainsi à l'équipage de bénéficier d'un mouvement réduit du bateau causé par la houle.

Le support pédagogique propose une solution basée sur la génération d'un couple gyroscopique à partir de la mise en mouvement d'un volant d'inertie afin de contrer le mouvement de roulis (mouvement de rotation autour de l'axe principal du bateau). L'inclinaison du bateau due au roulis est appelée gîte.

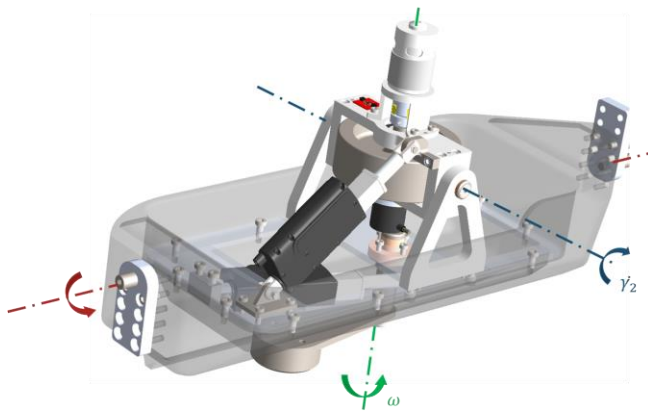


Figure 1 : Illustration du couple gyroscopique

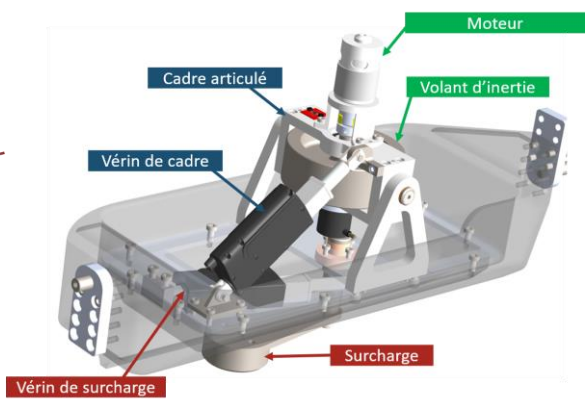


Figure 2 : Conception mécanique du support pédagogique

La Figure 1 illustre le phénomène : le volant d'inertie tourne à la vitesse ω autour de son axe de symétrie, un mouvement du cadre du volant d'inertie est imposé à la vitesse γ_2 qui permet de générer un couple gyroscopique autour de l'axe du roulis tel que $C_g = C_3 \omega \gamma_2$ avec C_3 le moment d'inertie du volant d'inertie autour de son axe de symétrie (pour un angle γ_2 très petit).

La rotation du volant d'inertie est réalisée par un moteur électrique asservi en vitesse dont le rotor est monté directement sur l'arbre du volant. La mise en mouvement du cadre est réalisée grâce à un système articulé actionné par un vérin électrique, appelé vérin de cadre, asservi en vitesse et en position. Enfin, la génération du mouvement de roulis est réalisée par une surcharge qui se déplace de part et d'autre de l'axe du bateau grâce à un système articulé actionné par le vérin électrique de surcharge asservi en position.



Identifier sur les système réel les différents constituants présentés ci-dessus.

2 – Prise de main du système – Mode automatique

Le stabilisateur de bateau se manipule grâce au logiciel **MyViz** qui permet d'imposer des commandes aux 3 chaînes d'énergie et de récupérer les informations des capteurs.

Pour la découverte du système, utiliser les tableaux de bord **Stabilisateur_PriseEnMain.json** et **Stabilisateur_Automatique.json** (voir **DOSSIER RESSOURCES** pour la première mise en route du système).

Génération du mouvement de roulis

Comme indiqué dans l'introduction, le mouvement de roulis du bateau est imposé par une **surcharge**, située en dessous du bateau, dont on impose la position via un système articulé actionné par le **vérin de surcharge**.



Dans **MyViz**, une fois le système prêt, dans le cadre **CONSIGNE SURCHARGE**, choisir un mouvement sinusoïdal avec une amplitude angulaire de 5° par exemple et laisser la fréquence par défaut.



Activer les consignes afin d'observer le comportement du bateau sous l'effet de la modification de la position de la surcharge.

Génération du couple gyroscopique

Comme indiqué plus haut, le couple gyroscopique est proportionnel à la vitesse du volant d'inertie et à la vitesse d'inclinaison du cadre articulé. Dans ce mode de fonctionnement automatique, c'est le logiciel de commande qui gère la vitesse d'inclinaison du cadre articulé grâce à une boucle d'asservissement dont la consigne est double : gîte et vitesse de gîte nulles et dont le gain peut être réglé via la variable **Gain stab** dans le cadre **STABILISATION**.



Imposer une vitesse de rotation au volant d'inertie dans le cadre **STABILISATION**.

La vitesse de sortie de tige du vérin électrique du cadre étant limitée à 10 mm/s, la génération d'un couple gyroscopique suffisamment élevé pour contrer le mouvement de roulis nécessite une vitesse de rotation du volant d'inertie supérieure à 2 000 tr/min.



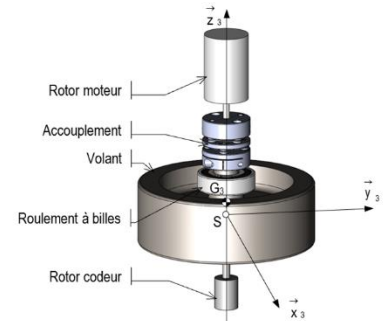
Une fois cette vitesse dépassée, imposer une valeur au **Gain stab** et observer l'effet sur la gîte du bateau. Analyser les résultats obtenus.

3 – Modélisation du volant d'inertie

Afin de dimensionner (ou valider) la motorisation du système, il est nécessaire de connaître la répartition des masses en mouvement. On propose donc ici de déterminer les caractéristiques de l'opérateur d'inertie du volant d'inertie.



Vérifier que les dimensions de l'esquisse sont conformes aux dimensions réelles du volant d'inertie. Par un croquis du bras dessiné à main levée, indiquer les dimensions des principaux volumes ainsi que leur position relative.



On propose une modélisation du volant d'inertie selon une décomposition en solides élémentaires :

- 3 cylindres



En utilisant la modélisation simplifiée précédente, calculer le moment d'inertie du volant d'inertie autour de l'axe de rotation.



Évaluer grossièrement l'inertie I_{zz} du volant d'inertie par rapport à son axe. Les dimensions utiles seront relevées sur le système réel ou dans le **DOSSIER TECHNIQUE**.



Relever la masse, la position du centre de gravité, ainsi que les coefficients de la matrice d'inertie du volant d'inertie, issus d'un calcul effectué par SolidWorks disponible dans le **DOSSIER TECHNIQUE**.



Justifier rigoureusement la forme de la matrice d'inertie.



Quel(s) coefficient(s) de la matrice d'inertie interviendra(ont) pour dimensionner le moteur ?



Proposer et mettre en œuvre si possible une démarche permettant de déterminer expérimentalement le moment d'inertie du volant d'inertie par rapport à son axe de rotation.



L'objectif pour le groupe est de comparer pour l'inertie du volant d'inertie, les résultats obtenus à partir des mesures expérimentales et ceux obtenus par les calculs analytiques et par la simulation numérique. Calculer les écarts et estimer d'où ils peuvent provenir.

4 – Influence d'un couple gyroscopique

Observations expérimentales

On cherche ici à identifier le comportement du bateau lorsqu'il est soumis à la seule influence du couple gyroscopique.

Pour cela, on utilisera le tableau de bord **CoupleGyroscopique.json**. Afin de faciliter l'étude, **la surcharge restera dans l'axe du bateau (position initiale)**.

Comme identifié plus haut, le couple gyroscopique dépend de 3 paramètres : l'inertie du volant, sa vitesse de rotation (ω en rad/s ou N en tr/min) et sa vitesse d'inclinaison $\dot{\gamma}_2$, qui correspond à la vitesse d'inclinaison du cadre.

Nous allons ici étudier l'influence de ces deux vitesses sur le comportement dynamique du bateau en utilisant le protocole d'essais suivant :

1. Activer les consignes
2. Imposer une vitesse d'inclinaison du cadre de $-6^\circ/\text{s}$ afin de mettre le cadre en position extrême
3. Imposer une vitesse au volant et un temps de mesure de 60 s.
4. Une fois la vitesse de consigne du volant atteinte, imposer une vitesse d'inclinaison du cadre $\dot{\gamma}_2$
5. Une fois le cadre en position extrême, attendre la stabilisation du bateau **(cela peut être visuellement à partir de la courbe de l'angle du roulis)**
6. Imposer alors une vitesse d'inclinaison opposée $-\dot{\gamma}_2$ pour que le cadre revienne dans sa position initiale



Réaliser un essai pour $N = 1\,500\text{ tr/min}$ et $\dot{\gamma}_2 = 6\text{ deg/s}$.



Enregistrer les données de mesures en cliquant sur **Enregistrer**.



Tracer (bouton **Tracer**) les évolutions temporelles de l'angle de roulis et de la vitesse d'inclinaison du volant et observer le comportement du bateau durant les 3 phases (étapes 4, 5 et 6).



Identifier pour cet essai, les phases de régime transitoire et de régime permanent du comportement en roulis du bateau. Analyser les résultats obtenus.



Refaire les manipulations précédentes pour des vitesses de $N = 1000 \text{ tr/min}$ et $N = 500 \text{ tr/min}$.



Quelles différences observe-t-on ? Expliquer.

Modélisation du comportement en roulis du bateau

Le paramétrage utilisé dans la modélisation est donné dans la modélisation du **DOSSIER RESSOURCES** et la géométrie et propriétés des masses des éléments est disponible dans le **DOSSIER TECHNIQUE**.



A partir du modèle dynamique simplifié (**DOSSIER RESSOURCES**), faire le bilan des actions mécaniques extérieures qui s'appliquent sur l'ensemble en mouvement (bateau 1, cadre 2, volant 3 et surcharge 4).

Pour étudier le comportement en roulis du bateau, il convient d'appliquer le principe fondamental de la dynamique à l'ensemble en mouvement {bateau+cadre+volant+surcharge} par rapport au référentiel fixe galiléen (bâti).

On souhaite écrire l'équation scalaire du théorème du moment dynamique au point O en projection sur l'axe \vec{x}_1 .



Justifier le choix de cette équation parmi les 6 données par le Principe Fondamental de la Dynamique.

Simplification dans le cas du régime permanent en roulis

Les différents mouvements du système (rotation du volant par rapport au cadre, du cadre par rapport au bateau et du bateau par rapport au bâti), rend le calcul du moment dynamique relativement complexe.

On se propose donc de faire l'étude **en régime permanent en roulis du bateau**.

Sous cette hypothèse, on considère donc que l'angle de roulis du bateau est constant (proche de 0°) et donc $\dot{\gamma}_1 = \ddot{\gamma}_1 = 0$.

On rappelle que la **surcharge 4 reste immobile par rapport au bateau 1**.



Que devient alors le moment dynamique $\delta_{O,(1+4)/0}$?

De plus, devant les efforts générés par le volant d'inertie, on considère que **l'inertie du cadre en mouvement génère des actions mécaniques négligeables**, ainsi $\vec{\delta}_{O,2/0} = \vec{0}$

Sous toutes ces hypothèses, l'équation du moment dynamique en O projeté sur \vec{x}_1 devient :

$$\vec{\delta}_{O,3/0} \cdot \vec{x}_1 = \vec{M}_{O,pes \rightarrow (1+2+3+4)} \cdot \vec{x}_1$$



Déterminer l'expression du moment dynamique au point O du mouvement du volant 3 par rapport au référentiel 1 (ou 0 puisqu'en régime permanent le bateau est fixe par rapport au bâti 0) en projection sur \vec{x}_1 .



Déterminer l'expression du moment au point O des actions mécaniques de la pesanteur.

Le couple gyroscopique correspond finalement au couple généré par l'effet dynamique de l'inclinaison du volant en rotation, ainsi $C_{gyro} = C_3 \dot{\gamma}_2 \dot{\gamma}_3 \cos \gamma_2$

Exploitations des mesures

Évaluation du couple gyroscopique

Le script python fournit (*identification_couple_gyroscopique.py*) permet d'évaluer le couple gyroscopique à partir d'un essai expérimental (réalisé par l'équipe **EXP**) en calculant le moment des actions mécaniques de la pesanteur sur l'ensemble en mouvement à partir des hypothèses établies précédemment.



Copier le fichier de mesure (enregistré par l'équipe **EXP**) dans le même dossier que le script python et modifier le nom du fichier csv à ouvrir en renseignant celui qui correspond au fichier de mesure.



Exécuter le programme et analyser la courbe obtenue (on pensera à n'étudier que la partie « intéressante de la courbe »).

Validation des hypothèses (régime permanent)

Afin de valider les (nombreuses) hypothèses faites pour identifier le couple gyroscopique, nous allons utiliser son expression $C_{gyro} = C_3 \dot{\gamma}_2 \dot{\gamma}_3 \cos \gamma_2$ et vérifier si la seule constante C_3 , moment d'inertie du volant autour de son axe de rotation, correspond bien à la valeur théorique : $0,0125 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$.



Compléter le programme python afin de tracer l'évolution temporelle de C_3 et valider le protocole expérimental d'identification du couple gyroscopique.



Comment est déterminé le couple gyroscopique sur le système ?



Vérifier cette hypothèse en complétant le programme python afin d'ajouter le couple gyroscopique proposé au tracé du couple gyroscopique MyViz.

6 - Validation



L'objectif pour le groupe est de comparer pour les couples transmis, les résultats obtenus à partir des mesures expérimentales et ceux obtenus par les calculs analytiques et par la simulation numérique. Calculer les écarts et estimer d'où ils peuvent provenir.

