

Étude d'un système d'aide à la navigation pour voilier

DOSSIER D'ÉTUDE



Présentation de l'épreuve

Cette épreuve, d'une durée totale de 4 heures, **n'est pas une épreuve écrite** : il n'est donc pas demandé de rédiger un compte-rendu.

Pendant toute la durée de l'épreuve, il ne faut pas hésiter à faire appel à un examinateur en cas de problème technique.

Présentation de l'épreuve et consignes

Cette épreuve s'articule en **quatre parties** clairement identifiées dans le texte.

Consignes pour la première partie

La 1^{ère} partie, d'une durée de 45 minutes à 1 heure, a pour objectif de s'approprier le support et la problématique de l'étude.

À la fin de cette première partie, un exposé d'une durée maximale de 5 minutes est demandé.

Cet exposé doit permettre de présenter le support et la problématique et mettre en évidence l'écart existant entre les performances attendues du support et des performances mesurées.

Lors de la présentation, il n'est pas demandé de présenter les réponses aux activités proposées obligatoirement dans l'ordre de l'étude.

Un échange avec l'examineur suivra l'exposé.

Consignes pour la deuxième partie

Cette 2^e partie, d'une durée maximale de 1 heure, est réalisée en autonomie à partir d'objectifs clairement indiqués.

Les activités proposées dans cette 2^e partie s'inscrivent dans la suite de celles de la première partie, ne sont pas totalement guidées et doivent être partiellement développées à l'initiative du candidat. Il est donc demandé, dans cette 2^e partie

- de construire une solution sur le problème de modélisation proposé ;
- et/ou d'imaginer des procédures permettant de construire ou de valider le modèle.

À l'issue de cette partie, un exposé d'une durée maximale de 5 minutes est demandé.

Un échange avec l'examineur suivra l'exposé.

Consignes pour la troisième partie

Pendant cette 3^e partie, une extension du modèle ébauché pendant la 2^e partie sera mise en œuvre. Les activités proposées permettront de :

- vérifier les performances attendues d'un système complexe ;
- construire et valider, à partir d'essais, des modélisations d'un système complexe ;
- et prévoir des performances d'un système complexe en vue d'imaginer et choisir des solutions d'évolution répondant à un besoin exprimé.

Durant cette partie, il est demandé de préparer les réponses aux activités proposées en suivant l'ordre imposé et les indications du texte.

Durant cette étude, l'examineur passera très régulièrement pour des échanges en vue de valider l'avancement des activités proposées.

Consignes pour la quatrième partie

Au cours de l'interrogation, des éléments seront fournis pour permettre de construire une synthèse finale quel que soit le nombre d'activités abordées.

Quel que soit l'état d'avancement, les 30 dernières minutes de l'épreuve sont consacrées à la

dernière partie visant à l'élaboration de la synthèse finale.

Cette synthèse de fin d'épreuve, d'une durée maximale de 3 minutes, doit être globale. Elle est présentée pendant le dernier quart d'heure de l'épreuve et doit permettre de :

- conclure quant à la problématique abordée dans le TP ;
- préciser la ou les démarche(s) adoptées pour répondre au problème posé ;
- et montrer votre capacité à utiliser les résultats obtenus (simulés ou mesurés) pour décider et choisir une évolution technique en rapport avec un cahier des charges.

Consignes générales

Lors de cette épreuve, les qualités de la prestation orale et de l'autonomie sont évaluées.

Pour illustrer la présentation, des dessins, schémas et graphes élaborés avec soin pourront être utilisés.

Il est conseillé de faire, au fur et à mesure de l'avancement, des copies d'écran des mesures obtenues pour les insérer dans un document numérique à sauvegarder régulièrement : pour ce faire, les suites LibreOffice et/ou Microsoft Office sont disponibles.

Démarche d'ingénieur

Durant cette épreuve, le candidat sera amené à s'inscrire dans la démarche de l'ingénieur d'analyse et de résolution de problèmes sur un système complexe industriel telle qu'explicitée dans le programme officiel et qui comporte :

- trois domaines d'étude
 - domaine du *commanditaire* avec des *performances souhaitées* ;
 - domaine du *laboratoire* avec des *performances mesurées* ;
 - domaine de la *simulation* avec des *performances estimées*.
- et trois écarts entre ces différents domaines.

À chaque fois que cela lui sera demandé, le candidat devra indiquer le domaine sur lequel l'étude est menée et l'écart qui est quantifié.

Présentation du poste de travail

Pour l'ensemble des études, le matériel suivant est mis à disposition du candidat :

- un système d'aide à la navigation, composé d'un pilote automatique hydraulique de bateau posé sur un banc (vérin hydraulique + safran + calculateur SIMRAD + capteur d'angle safran + compas) et de plusieurs capteurs supplémentaires (débit, vitesse de rotation, etc.)
- un simulateur de bateau constitué (voir dossier ressource pour les compléments) :
 - d'un plateau tournant motorisé sur lequel est posé le compas magnétique ;
 - d'une interface didactique basée sur une carte d'acquisition et de pilotage NI 6009 (boîtier blanc) et de hacheurs de puissance pour alimenter le moteur du plateau tournant et celui de la pompe hydraulique
 - d'un calculateur implanté dans l'application Labview exécutée par l'ordinateur
- un poste de travail informatique permettant, grâce à un logiciel dédié, de piloter les déplacements du safran et d'exploiter les résultats des mesures faites par les différents capteurs ;
- un classeur comportant un document technique et un document ressource (disponibles au format PDF sur le poste de travail complètent la documentation fournie.

Première partie

Objectifs

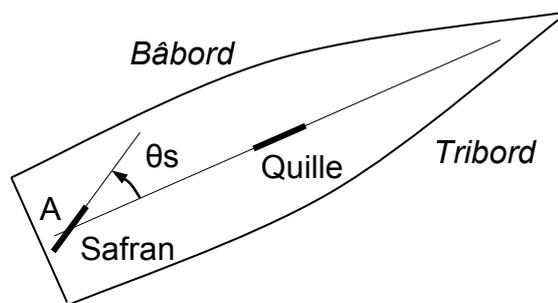
Dans cette première partie, les activités proposées ont pour objectif de s'approprier le support matériel du TP, la problématique du TP et de vérifier les performances attendues.

1. Mise en évidence de la problématique

1.1. Compréhension de l'environnement

Activité 1 Analyse de la fonction du système

- À l'aide de la boussole fournie, vérifier la valeur du cap affichée sur le pupitre de commande SIMRAD (voir dossier technique). Expliquer la différence entre la valeur mesurée par la boussole et la valeur affichée par le compas.
- Lorsque le safran du bateau est pivoté autour de l'axe vertical d'un angle θ_s positif (voir figure), analyser et justifier l'évolution du bateau (pivotement vers bâbord ou vers tribord).



1.2. Simulateur de bateau en « pilotage manuel »

Lire la présentation sur le simulateur de bateau dans le dossier ressource.

1- Vérifier la configuration de la mesure à suivre

- vérifier que l'interrupteur de l'interface didactique est basculé sur la position « 0 » ;
- placer le compas sur le plateau motorisé et pivotant modélisant le bateau ;
- vérifier que le système SIMRAD est sous tension, sinon appuyer sur le bouton 'Standby' 

2- Lancer et régler l'application de commande du simulateur de bateau

- lancer l'application '**Simulateur bateau**' en double-cliquant sur l'icône sur le bureau ;
- choisir le type de bateau : dans l'onglet « bateau », choisir le « modèle cinématique » et régler :
 - la longueur quille / safran en fonction des caractéristiques du bateau étudié défini dans le dossier technique ($L = 5 \text{ m}$) ;
 - la vitesse du bateau à 3,9 nœuds (soit 2 m.s^{-1}).

3- Préparer la mesure

- mettre le safran dans la position angulaire centrale (angle nul) à $\pm 1^\circ$ (voir dans le dossier technique, la notice d'utilisation du pupitre de commande SIMRAD) ;
- dans l'onglet 'Pilotage SIMRAD' cliquer sur le bouton pilotage (il sera alors vert clair) ;
- passer en mode de pilotage automatique en appuyant sur le bouton associé du pupitre de commande SIMRAD : le plateau supportant le compas commence à tourner ; 

- imposer un changement de Cap pour suivre la route indiquée sur le poste de travail (voir aussi dans le dossier technique, la notice d'utilisation du pupitre de commande SIMRAD) ;
- laisser le simulateur de bateau se stabiliser sur le cap indiqué (cela peut prendre un certain temps selon l'orientation initiale en comparaison avec la route proposée : dans ce cas, faire attention à ce que le câble du compas ne s'enroule pas sous le plateau motorisé).

4- Analyser le comportement en suivi de consigne

- passer en mode manuel Stand-by en appuyant sur le bouton correspondant du pupitre de commande SIMRAD ;
- déplacer alors manuellement la barre en bois fixée au bras de mèche.



Remarques :

- a- déplacer **doucement** la barre en bois fixée sur la mèche de safran, inutile de forcer ;
- b- imposer des petits angles au safran pour éviter de trop déstabiliser le simulateur de bateau ;
- c- faire évoluer le simulateur de bateau autour du cap indiqué sur la feuille de route.



Si le comportement devient instable, il faut interrompre le mouvement du simulateur de bateau en appuyant sur le bouton pilotage sur le logiciel.
Nota : vu le contexte d'utilisation du pilote automatique, le système sera considéré comme stable si les évolutions angulaires autour de la position finale restent inférieures à 10° (un « pompage » est autorisé).
Quand une étude est terminée, ne pas oublier de :
 - ***laisser le système SIMRAD sur le mode « Stand-by »***
 - ***cliquer sur le bouton pilotage sur le logiciel (il sera alors vert foncé).***

Activité 2 Analyse du comportement pour le bateau de référence

- **Au vu des évolutions observées, commenter les performances du simulateur de bateau dans le cas du pilotage manuel (précision, stabilité, etc.).**
- **Expliquer comment évoluerait le comportement dans les deux cas suivants (il n'est pas demandé de réaliser les essais, une simple analyse qualitative est suffisante) :**
 - **bateau plus long mais vitesse identique**
 - **bateau identique mais vitesse plus rapide**

Cette première étude a permis de mettre en évidence la possibilité de pilotage du bateau de manière manuelle, ce qui correspond à un système non automatisé.

La suite va s'attacher à l'étude du simulateur de bateau dans le cas d'un pilotage automatique.

1.3. Validation partielle des performances en « pilotage automatique »

On se propose d'utiliser le banc d'essais pour valider la performance en stabilité du système de navigation, en mer.

Pour cela, réaliser les opérations suivantes :

- dans l'onglet « bateau » de l'application « **Simulateur bateau** », choisir le modèle cinématique ;
- régler la longueur quille / safran en fonction des caractéristiques du bateau étudié définies dans le dossier technique (L = 5 m) et la vitesse du bateau à 3,9 nœuds (soit 2 m.s⁻¹) ;
- mettre le safran en position angulaire centrale (à ± 1°) ;
- dans l'onglet « Pilotage SIMRAD », cliquer sur le bouton « pilotage » (il sera alors vert clair) puis sur le bouton « Auto » du pupitre de commande SIMRAD ;
- imposer un changement de Cap de 10° et analyser l'évolution de l'angle de lacet donné par le simulateur de bateau, à la fois en regardant le plateau du simulateur de bateau (sur lequel est placé le compas) et les courbes affichées à l'écran ;

- recommencer l'activité pour deux autres vitesses du bateau :
 - 9,7 nœuds (soit 5 m.s^{-1})
 - 15,5 nœuds (soit 8 m.s^{-1}).

Nota : le « Cap compas Consigne » est en rouge dans la fenêtre d'affichage de l'évolution de cap ; il est possible de le mettre manuellement à jour en relevant la valeur de cap de consigne sur le pupitre de commande SIMRAD et en donnant cette valeur dans le champ « Cap Compas Consigne » de l'application « **Simulateur bateau** ».

Activité 3 **Analyse du comportement**

- Analyser la stabilité du système de navigation selon les trois modes de navigation proposés (noter la présence ou non d'oscillations ainsi que la période et l'amplitude approximatives de ces oscillations).

Basculer le système SIMRAD sur le mode Stand-by et cliquer sur le bouton pilotage (il sera alors vert foncé) quand cette étude sera terminée.

2. Ébauche du schéma fonctionnel de l'asservissement

Une présentation des chaînes d'énergie et d'information associées au modèle de simulation du bateau est proposée dans le dossier ressource.

Un document réponse pouvant être complété est disponible sur le poste de travail.

Activité 4 **Analyse des composants de puissance**

- Identifier et repérer, sur le poste de travail, les composants matériels mis en évidence sur cette structuration en chaînes fonctionnelles. L'analyse des flux d'énergie pourra faire partie de l'analyse.

Activité 5 **Schéma fonctionnel**

- À partir de cette structuration en chaînes fonctionnelles, établir le schéma fonctionnel de l'asservissement en cap du bateau en mer dont l'entrée est la consigne de cap et la sortie le cap réel du bateau.

Activité 6 **Différence entre le système réel et le banc**

- En observant le système didactisé mis à votre disposition (banc « pilote hydraulique » posé sur la table + le simulateur de bateau via le « boîtier didactique »), compléter la chaîne d'information du simulateur de bateau sur le document réponse et rajouter les différents liens vers les autres chaînes fonctionnelles.
- Discuter de ce qui différencie cette structure du système réel (ici, un bateau sur l'eau).

Fin de la 1^{ère} partie – Merci de préparer l'intervention orale

La synthèse associée à cette partie ne devra pas dépasser 5 minutes.

Dès que celle-ci est prête, le signaler à l'examineur, puis passer à la suite sans attendre.

Deuxième partie

Objectifs

Au vu des observations précédentes, il apparaît que le système SIMRAD étudié, développé initialement pour une utilisation sur des bateaux de plaisance, ne semble pas adapté à une utilisation dans un contexte sportif.

Ainsi, une étude prospective en vue d'évaluer une solution permettant d'adapter le système de pilotage actuel aux courses sportives est nécessaire. Dans ce contexte, cette 2ème partie consiste donc à modéliser le comportement du système actuel.

Quels que soient les modèles proposés, la partie suivante consistera à exploiter une modélisation existante en vue de modifier et optimiser les réglages du système afin de répondre au nouveau cahier des charges

3. Identification des fonctions de transfert de certains éléments du schéma fonctionnel

3.1. Présentation de la démarche

La 1^{ère} partie a permis d'ébaucher le schéma fonctionnel de l'asservissement angulaire du safran.

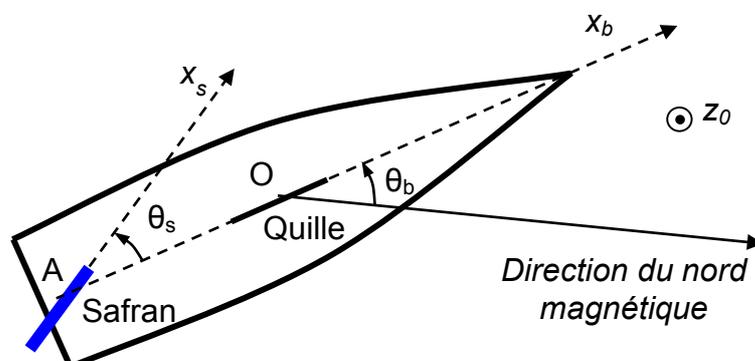
Cette 2e partie consiste à proposer des modèles de connaissance (ou de comportement) d'une partie du système. Il est également attendu du candidat qu'il explique comment identifier les paramètres du modèle qu'il a proposé. L'objectif final consiste à enrichir le modèle de comportement du système actuel dédié aux bateaux de plaisance.

La 3e partie s'appuie sur une modélisation fournie du système et permet d'ajuster les réglages du correcteur de l'asservissement en vue d'utiliser ce pilote automatique dans un contexte sportif.

3.2. Identification de la fonction de transfert du bateau

L'angle du safran permet d'agir sur le cap du bateau.

On souhaite dans la suite établir un modèle simple liant l'angle safran θ_s (supposé petit : en pratique, il évolue dans la plage $\pm 20^\circ$) et le cap du bateau θ_b , en s'appuyant sur des propriétés cinématiques exclusivement (on ne tient donc pas compte des effets dynamiques et on suppose que l'évolution se fait strictement dans le plan, donc sans roulis ni tangage du navire).



On suppose que la quille et le safran imposent, en leurs points moyens O et A, une vitesse du bateau par rapport à l'eau colinéaire à leurs directions et notées :

- V_O pour la vitesse en O du bateau par rapport à l'eau (supposée immobile) : cette vitesse est dirigée selon la direction x_b décalée d'un angle θ_b par rapport au nord magnétique ;
- et V_A pour la vitesse en A du bateau par rapport à l'eau (supposée immobile) : cette vitesse est dirigée selon la direction x_s décalée d'un angle θ_s par rapport à la direction x_b .

Le pivotement du bateau est supposé se faire uniquement dans le plan : dans cette hypothèse, le roulis et le tangage sont négligés, seul le mouvement de lacet est pris en compte.

La distance entre les deux points A et O est notée L (pour les ordres de grandeur, les caractéristiques du bateau de plaisance de référence sont données dans le dossier technique).

Activité 7

- **Justifier que, dans le cas où le comportement dynamique n'est pas pris en compte et que l'angle de pivotement du safran reste petit (en utilisation en mer, le pivotement θ_s du safran est généralement compris dans la plage $\pm 20^\circ$), la fonction de transfert cinématique du bateau $\Theta_b(p) / \Theta_s(p)$ est assimilable à un intégrateur, ce dernier ne dépendant que de la vitesse V_O et de la dimension L associée au bateau.**
Nota : il n'est pas nécessaire de réaliser les calculs, seule la démarche permettant d'obtenir la relation doit clairement être explicitée.

Remarque : ce modèle cinématique du bateau est celui qui a été utilisé dans les premières activités du sujet, dans l'onglet 'Modèle cinématique' de l'application 'Simulateur bateau'.

Activité 8

- **Proposer deux évolutions simples de la fonction de transfert $\Theta_b(p) / \Theta_s(p)$ permettant de prendre en compte le comportement dynamique du bateau sachant que l'évolution se fait de manière non immédiate après une variation de l'angle de safran pour le bateau de référence.**
- **Discuter des influences de ces deux évolutions sur les performances générales de l'asservissement étudié (aucun calcul n'est attendu).**

3.3. Modélisation de la chaîne de mesure du cap

Le compas peut être manipulé aisément à la main. Afin d'éviter que le calculateur SIMRAD « bipe » en continu lors de ces manipulations, il est demandé de le mettre sur « Standby ».

Le compas est un système supposé linéaire et continu d'entrée l'angle du bateau $\theta_b(t)$ et de sortie l'information angulaire $\theta_{b\text{-mes}}(t)$ affichée sur le pupitre du calculateur SIMRAD.

Activité 9

- **Proposer un modèle qui lie $\theta_{b\text{-mes}}(t)$ et $\theta_b(t)$. Identifier un ordre de grandeur des paramètres du modèle proposé. Justifier le choix effectué et la démarche retenue.**

3.4. Identification de la fonction de transfert de la chaîne cinématique

La chaîne cinématique correspond à l'association du vérin hydraulique (corps + tige) et du safran pouvant être orienté sur un secteur angulaire limité ($\pm 35^\circ$ et même $\pm 20^\circ$ lors de l'utilisation en mer), les deux éléments étant en liaison entre eux et avec le bâti.

L'objectif est de proposer un modèle cohérent du comportement de la chaîne cinématique d'entrée le déplacement de la tige du vérin et de sortie l'angle de rotation du safran.

Un mètre ruban est disponible sur le poste de travail. L'angle d'orientation du safran est mesuré par le capteur associé et est affiché sur le pupitre du calculateur SIMRAD.

On souhaite établir un lien entre l'angle $\theta_b(t)$ et la longueur de la tige du vérin par rapport à la position centrée.

Activité 10

- **Proposer un modèle qui lie ces 2 paramètres et identifier clairement chacun des termes. Justifier le choix de modèle et la démarche d'identification retenue.**

Fin de la 2^e partie – Merci de préparer l'intervention orale

La synthèse associée à cette partie ne devra pas dépasser 5 minutes.

Dès que celle-ci est prête, le signaler à l'examineur, puis passer à la suite sans attendre.

Troisième partie

Objectifs

Le système SIMRAD développé pour une utilisation sur des bateaux de plaisance ne semble pas adapté à des utilisations dans un contexte sportif.

On se propose de faire une étude prospective en vue de faire évoluer le système de pilotage par étapes successives à partir du modèle fourni par l'examineur.

Le schéma bloc utilisé dans l'étude est proposé dans les fichiers Scilab-Xcos **Pilote1.zcos** et **Pilote2.zcos**, à compléter en différentes étapes.

Le fichier **Pilote1.zcos** correspond à la prise en compte d'une seule boucle de retour (la prise en compte de l'orientation du bateau, mesurée par le compas) ; la simulation de ce modèle permet d'obtenir une réponse temporelle de l'asservissement corrigé en boucle fermée et une réponse fréquentielle de la boucle ouverte.

Le fichier **Pilote2.zcos** correspond à la prise en compte de deux boucles de retour (la mesure de l'angle de barre en plus de l'orientation du bateau par le compas) ; la simulation de ce modèle permet d'obtenir une réponse temporelle de l'asservissement.

Une notice d'utilisation du logiciel Scilab est proposée en annexe.

Il est demandé d'ouvrir dès à présent ces deux fichiers qui seront complétés en parallèle.

Pour modifier les valeurs déclarées, faire un clic droit sur la fenêtre de Scilab contenant le schéma et choisir « modifier le contexte ». Dans ces deux fichiers, les configurations de simulation sont prêtes à l'emploi.

4. Modélisation de la chaîne fonctionnelle

4.1. Modélisation de l'actionneur

Effectuer les opérations suivantes :

- Basculer l'interrupteur de l'interface didactique sur la position « 0 ».
- Mettre le safran à la position angulaire 35° babord (à $\pm 1^\circ$) : si nécessaire, voir, dans le dossier technique, la notice d'utilisation du pupitre de commande SIMRAD.
- Si ce n'est déjà fait, fermer l'application « **Simulateur bateau** » ;
- Lancer l'application « **TP SI PH** » via l'icône sur le bureau ;
- Choisir « Fichier mesure » → 'Nouveau'.
- Tout cocher dans l'onglet « Voies sélectionnées » puis OK.
- Mettre la masse à 0 (puisque aucune masse n'est accrochée à la mèche).
- Choisir une durée d'acquisition de 16 s et la déclencher en cliquant sur le bouton.
- Au bout de 1 s environ, appuyer sur le bouton du pupitre de commande SIMRAD de déplacement vers tribord et le maintenir appuyé jusqu'à ce que le safran atteigne sa position extrême à tribord (le déplacement se fait en une dizaine de secondes).
- Sauver la mesure sur le bureau sous votre nom.

En cliquant sur l'onglet « Affichage », il est possible de disposer des informations de mesure : tension U, intensité I, etc.

La position angulaire du safran θ_S est commandée par la tension d'alimentation du moteur. On se propose d'identifier la fonction de transfert $\theta_S(p) / U_m(p)$ à l'aide de la mesure effectuée.

La phase transitoire de cette mesure est perturbée par la fermeture du « by-pass » (hors champ de cette étude). Lors de l'utilisation normale, le « by-pass » reste fermé. En conséquence, **on ne tiendra pas compte de la 1^{ère} seconde du début de la mesure.**

Activité 11 Analyse des mesures réalisées

- Justifier qu'un modèle « gain pur » suffit pour modéliser les évolutions des sous-systèmes suivants : moteur électrique, pompe hydraulique et vérin hydraulique.
- Identifier les gains correspondants à partir des mesures réalisées.
- Compléter le bloc vert des deux fichiers Scilab-Xcos en utilisant ces valeurs.

Activité 12 Validation d'une valeur estimée antérieurement

- Vérifier, à partir de ces mesures, la cohérence des valeurs estimées à l'activité 10 pour le gain et la zone de linéarité (il est possible de combiner les mesures en mettant une grandeur en abscisse et une autre en ordonnée).
- Proposer quelques sources des écarts observés entre les valeurs obtenues dans ces deux activités.

4.2. Modélisation du variateur

La fonction « distribuer l'énergie » est réalisée par un hacheur à commande analogique.

Les ports analogiques du boîtier de commande (boîtier blanc NI 6009 connecté en USB à l'ordinateur) délivrent une tension comprise entre 0 V et 5 V qui permet au hacheur de délivrer la tension d'alimentation du moteur. La source énergétique (batterie) délivre une tension comprise entre 0 V et 12 V.

On néglige le temps de réponse du variateur au regard des autres constantes de temps.

Activité 13 Modèle du hacheur

- À partir de la description précédente, donner la valeur du gain du hacheur.
- Compléter les fichiers Scilab-Xcos **Pilote1.zcos** et **Pilote2.zcos** avec cette valeur.

4.3. Saturations

Nota : ces saturations ne sont pas présentes dans le fichier **Pilote1.zcos** car celui-ci va être utilisé pour des tracés fréquentiels qui ne sont pas possibles lorsqu'il y a des non linéarités.

Le modèle Scilab-Xcos **Pilote2.zcos** comporte deux saturations :

- l'une au niveau du hacheur en amont du moteur à courant continu (valeur saturée $\pm \text{sat1}$) ;
- l'autre au niveau du bras de mèche (valeur $\pm \text{sat2}$).

Activité 14 Saturations

- Après avoir analysé le document technique, préciser, dans le contexte du fichier Scilab-Xcos, les valeurs des deux saturations **sat1** et **sat2**.

5. Commande à une boucle de retour informationnel (fichier Scilab-Xcos « Pilote1.zcos »)

5.1. Présentation de l'asservissement via le calculateur SIMRAD

Les algorithmes de commande implantés dans le calculateur SIMRAD ne sont pas accessibles et sont probablement d'une structure relativement compliquée.

On se propose dans ce sujet de trouver un correcteur à structure série P puis PD permettant de respecter le cahier des charges et synthétisé par approches successives.

5.1. Asservissement Proportionnel et Dérivé

On fait l'hypothèse, dans un premier temps, que la structure de l'asservissement en cap du bateau possède une seule boucle de retour informationnel. Cette structure correspond à la non prise en compte de la présence d'un capteur pour la mesure du pivotement du bras de mèche.

On choisit pour cette boucle un correcteur de type proportionnel dérivé de fonction de transfert

$$\text{Cor1}(p) = K_p \left(1 + \frac{T_D p}{1 + T_f p} \right) \cong K_p \left(\frac{1 + T_D p}{1 + T_f p} \right)$$

Avec $T_f \ll T_D$ (la partie dérivée est filtrée à haute fréquence : la constante de temps associée est prise égale à 1 ms dans les simulations).

5.2. Réglage des paramètres du correcteur

On note T_C la constante de temps du compas.

Activité 15

- En analysant la structure de fonction de transfert en boucle ouverte non corrigée, justifier le choix du type de correcteur retenu.
- Choisir et justifier la configuration pertinente parmi les suivantes : $T_D > T_C$ et $T_D < T_C$ (pour répondre, il est possible de se baser sur la représentation des diagrammes de Bode asymptotiques (pour le module) et allure des diagrammes réels (pour la phase) de la FTBO).

Pour l'activité suivante, il est possible, au choix, d'employer une approche théorique ou une simulation utilisant le logiciel Scilab.

Activité 16

- Déterminer une valeur approximative de la constante de temps T_D assurant une marge de phase de 45° puis en déduire la valeur de K_p (des informations sur la réponse fréquentielle du correcteur à avance de phase sont fournies dans le dossier ressources).
- Faire une simulation temporelle sous Scilab avec ces valeurs et évaluer les performances du correcteur adopté par rapport aux objectifs définis dans le cahier des charges.

5.3. Validation du modèle

Effectuer les opérations suivantes :

- Basculer l'interrupteur de l'interface didactique sur la position « 1 ».
- Fermer l'application « TP SI PH » puis lancer l'application « Simulateur bateau ».

- Dans l'onglet « bateau », choisir le « modèle cinématique » et régler la longueur quille safran en fonction des caractéristiques du bateau étudié ($L = 5 \text{ m}$) et la vitesse du bateau à 5 m.s^{-1} .
- Mettre le safran en position angulaire nulle (à $\pm 1^\circ$).
- Dans l'onglet « Pilotage Labview », sélectionner l'onglet « PID sans angle safran ».

Nota : dans la structure programmée dans le logiciel, le correcteur exprimé sous une forme parallèle a comme fonction de transfert

$$C_{\text{PID-SAS}}(p) = K_p \left(1 + \frac{T_D p}{1 + T_f p} + \frac{\omega_I}{p} \right)$$

où T_f est une constante de temps correspondant à un filtrage à très haute fréquence (dans le cas du logiciel, cette constante de temps vaut 1 ms).

Activité 17

- Régler les valeurs des paramètres du correcteur en fonction des valeurs trouvées précédemment.
- Relever le cap actuel sur le pupitre de commande SIMRAD (valeur CA) puis effectuer un échelon de cap de 10° : pour cela, renseigner le champ « Cap Compas Consigne » avec la valeur CA + 10° .
- Appuyer sur le bouton pilotage puis analyser le comportement observé.
- Discuter la pertinence de cette commande (on pourra observer notamment la valeur de la tension Uc sur l'application « Pilote automatique » ainsi que sur le modèle Scilab).

6. Commande à deux boucles de retour informationnel (fichier Scilab-Xcos « Pilote1.zcos »)

Les résultats précédents montrent l'insuffisance d'une commande à une seule boucle de retour.

La chaîne d'information réelle dispose en effet, en plus de l'information fournie par le compas, d'une information sur la position angulaire du safran. Pour des raisons d'encombrement, ce capteur d'angle du safran n'est pas monté sur l'axe de rotation de la mèche.

Activité 18

- Discuter de la pertinence et des limites de la solution technique adoptée (il sera par exemple possible de se baser sur l'effet d'un écart entre deux longueurs à définir).
- Proposer un modèle de liaisons pour la boucle « bâti », « bras de mèche », « tige file-tée », « capteur » et déterminer son degré d'hyperstaticité. Si nécessaire, proposer des modifications pour le rendre isostatique.
- Indiquer en quoi une solution isostatique est nécessaire dans le cas présent.

L'architecture de l'asservissement étudié est présentée dans le fichier Scilab **Pilote2.zcos** qui a été complété jusque là. Les correcteurs PD utilisés sont les suivants :

$$\text{Cor1}(p) = K_p \left(1 + \frac{T_D p}{1 + T_f p} \right) \quad \text{et} \quad \text{Cor1}(p) = K_t \left(1 + \frac{T_T p}{1 + T_f p} \right)$$

Les valeurs de K_p, T_D, K_t et T_t sont données dans l'onglet « PID avec safran » de l'application « Simulateur bateau ». On donne également $T_f = 1 \text{ ms}$ (filtrage).

Activité 19

- Lancer la simulation et valider la qualité de la réponse temporelle du système.

- **Tester sur le banc l'architecture de commande adoptée en sélectionnant l'onglet « PID avec angle safran » et en le réglant conformément aux valeurs des correcteurs (disponibles dans le contexte du modèle, accessible en cliquant avec le bouton droit dans l'espace de travail du modèle).**
- **Analyser le comportement observé et conclure quant à la pertinence de la commande adoptée par rapport aux attendus du cahier des charges.**

Quatrième partie

7. Activités de synthèse finale (30 dernières minutes)

Objectif

Ce bilan, qui peut être abordé quel que soit votre niveau d'avancement, va permettre de préparer la synthèse attendue à la fin de cette épreuve.

7.1. Analyse de la robustesse de la commande vis-à-vis de la vitesse du bateau

La chaîne d'information dispose, en plus de l'information fournie par le compas, d'une information sur la position angulaire du safran. Cette information est utilisée dans l'architecture de la commande sous la forme d'une boucle interne. Le réglage optimal des constantes des correcteurs a été préalablement effectué (valeurs proposées par défaut).

Avant d'aborder les activités suivantes, basculer l'interrupteur de l'interface didactique sur « 1 ».

Activité 20

- **Tester les performances de cette commande pour les 3 vitesses du bateau retenues pour valider le critère de stabilité dans la 1^{ère} partie, en sélectionnant l'onglet « Pilotage Labview », puis l'onglet « PID avec angle safran ».**
- **Analyser le comportement du système.**

Activité 21

- **Dans le modèle transfert de la chaîne d'énergie, identifier le paramètre variant et expliquant les limites du modèle utilisé dans le simulateur de bateau.**
- **Proposer une ou plusieurs méthodes pour en tenir compte dans le modèle (il n'est pas demandé de modifier le modèle, seule une analyse suffit).**

7.2. Proposition de solutions

Comme identifié dans la 2^e partie, le compas présente un retard de mesure non négligeable, ce qui conduit à un comportement proche d'un retard pur dans la chaîne d'asservissement.

Activité 22

- **Après avoir rappelé la performance particulièrement affectée par un retard dans la chaîne d'asservissement, proposer une (ou des) solution(s) au problème de robustesse selon le type de contexte sachant que ce système peut être utilisé en compétition ou en plaisance (amélioration à coût matériel constant).**

Fin de l'étude – Merci de préparer l'intervention orale

La synthèse associée à cette partie ne devra pas dépasser 3 minutes.

Systeme d'aide à la navigation

Dossier Ressources



1. Glossaire

Fréquence et hauteur de la houle

La houle correspond à la propagation libre des vagues. Elle est caractérisée par sa hauteur (qui se mesure du creux entre deux vagues à la crête de la vague), sa période (ou sa fréquence) et sa longueur d'onde.

Sur une mer calme (la houle est alors souvent appelée « clapot » et la hauteur est très faible), la période est comprise entre 1 et 4 s et sa longueur d'onde est inférieure au mètre. Sur une mer agitée, la période est comprise entre 3 s et 10 s.

Description de l'état de la mer. Échelle de Douglas

Les marins utilisent couramment l'échelle de Douglas, qui donne 9 classes de valeur pour cette hauteur des vagues, de mer 0 à mer 9 :

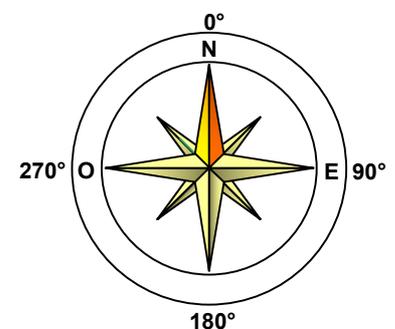
Degrés	Termes descriptifs	Hauteur des vagues
0	calme	0
1	ridée	0 à 0,1 m
2	belle	0,1 à 0,5 m
3	peu agitée	0,5 à 1,25 m
4	agitée	1,25 à 2,5 m
5	forte	2,5 à 4 m
6	très forte	4 à 6 m
7	grosse	6 à 9 m
8	très grosse	9 à 14 m
9	énorme	≥ 14 m

Le cap

Le cap d'un bateau est l'angle mesuré entre l'axe longitudinal de la coque et la direction du Nord magnétique terrestre.

Par convention le Nord magnétique terrestre correspond à 0°, l'Est à 90°, le Sud à 180° et l'Ouest à 270° avec toutes les valeurs intermédiaires possibles entre 0° et 360°.

Sur les cartes, la direction du Nord parallèle aux méridiens correspond au Nord géographique. Il existe entre le Nord magnétique et le Nord géographique un angle de correction, variable d'une année sur l'autre.



Conversion nœud km/h

Le nœud est une unité de vitesse utilisée en navigation maritime et aérienne.

1 nœud correspond à 1 mille marin par heure, soit 1,852 km/h.

2. Modélisation SysML du système

Diagramme des cas d'utilisation (Use Case Diagram, uc)

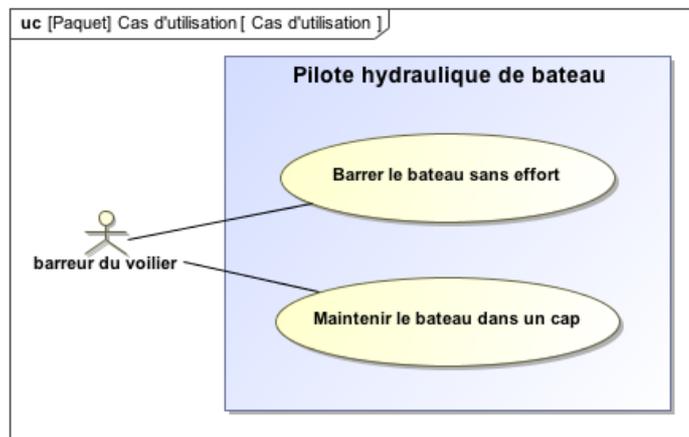
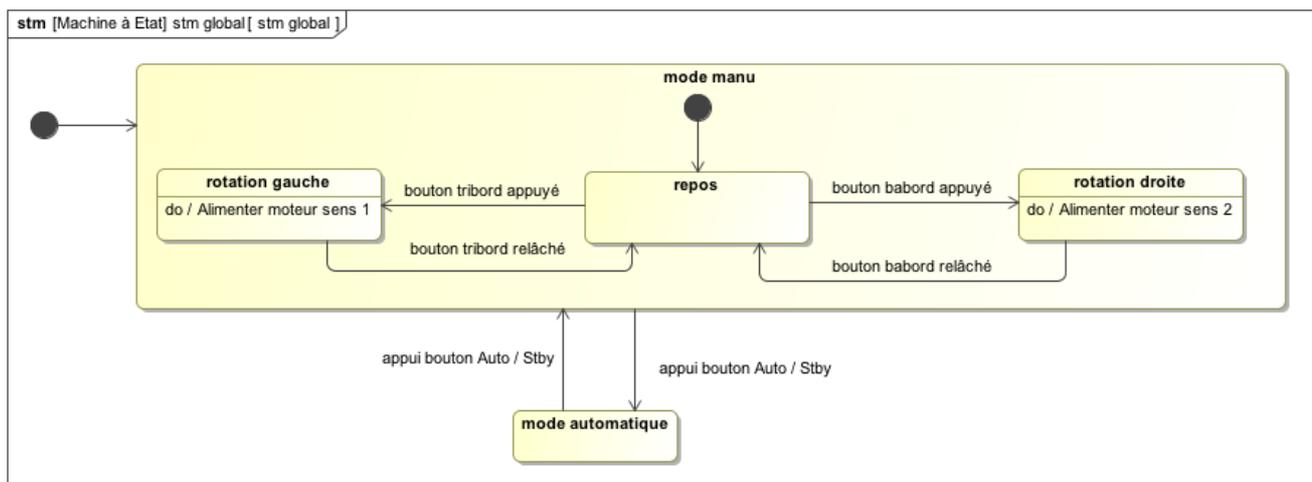


Diagramme des exigences (Requirement Diagram, req)

Voir page suivante.

Diagramme d'état du système (State Machine, stm)



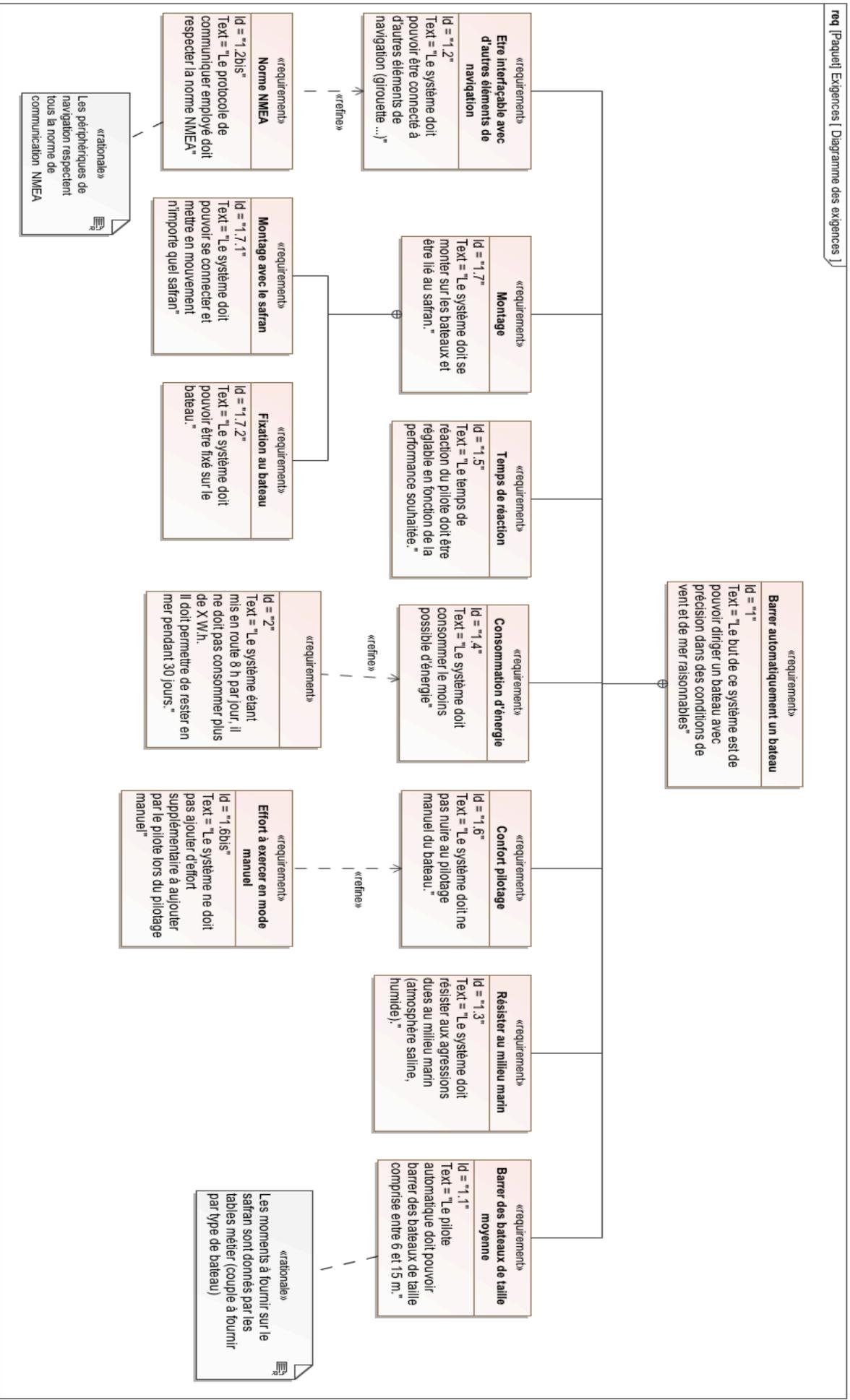
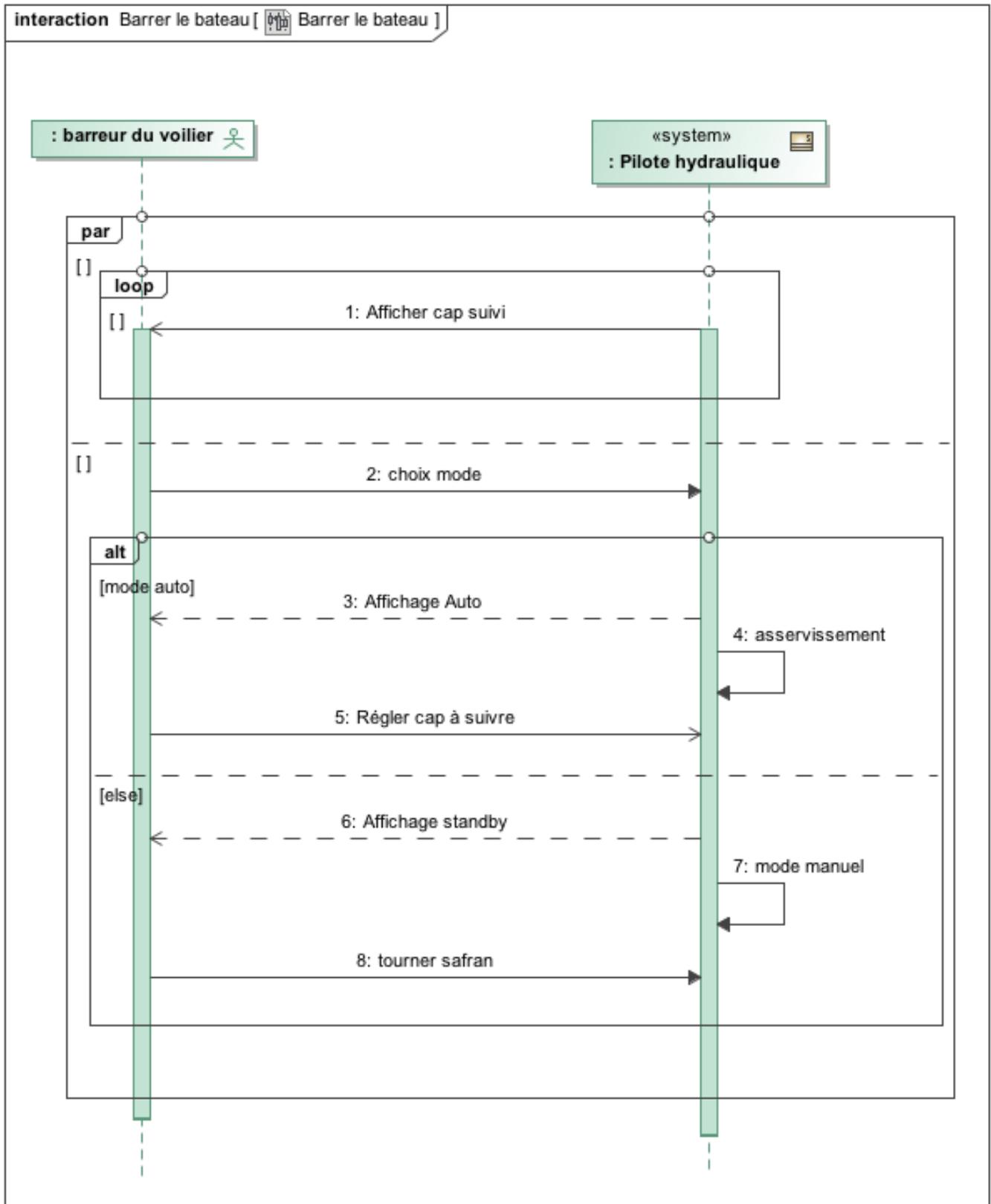


Diagramme de séquences (Sequence Diagram, seq)



Cahier des charges fonctionnel partiel

Exigence	Critère	Niveau
Suivre un cap	Précision de cap suivi en régime permanent par mer belle à peu agitée	$\left \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \text{cap}(t) \cdot dt \right \leq 1^\circ$ pour $T \geq 10\text{mn}$
	Stabilité du cap suivi	Erreur maximale de cap $\pm 5^\circ$
	Temps de réponse suite à un changement de cap de 40° par mer belle à peu agitée	Moins de 15 secondes
	Précision	Résolution de 1°
Alimenter le système	Tension d'alimentation	0 - 12 V
	Autonomie de fonctionnement	10 h
	Capacité de la batterie	70 A.h
	Part du système d'aide à la navigation dans la consommation d'énergie électrique du bateau	20 %

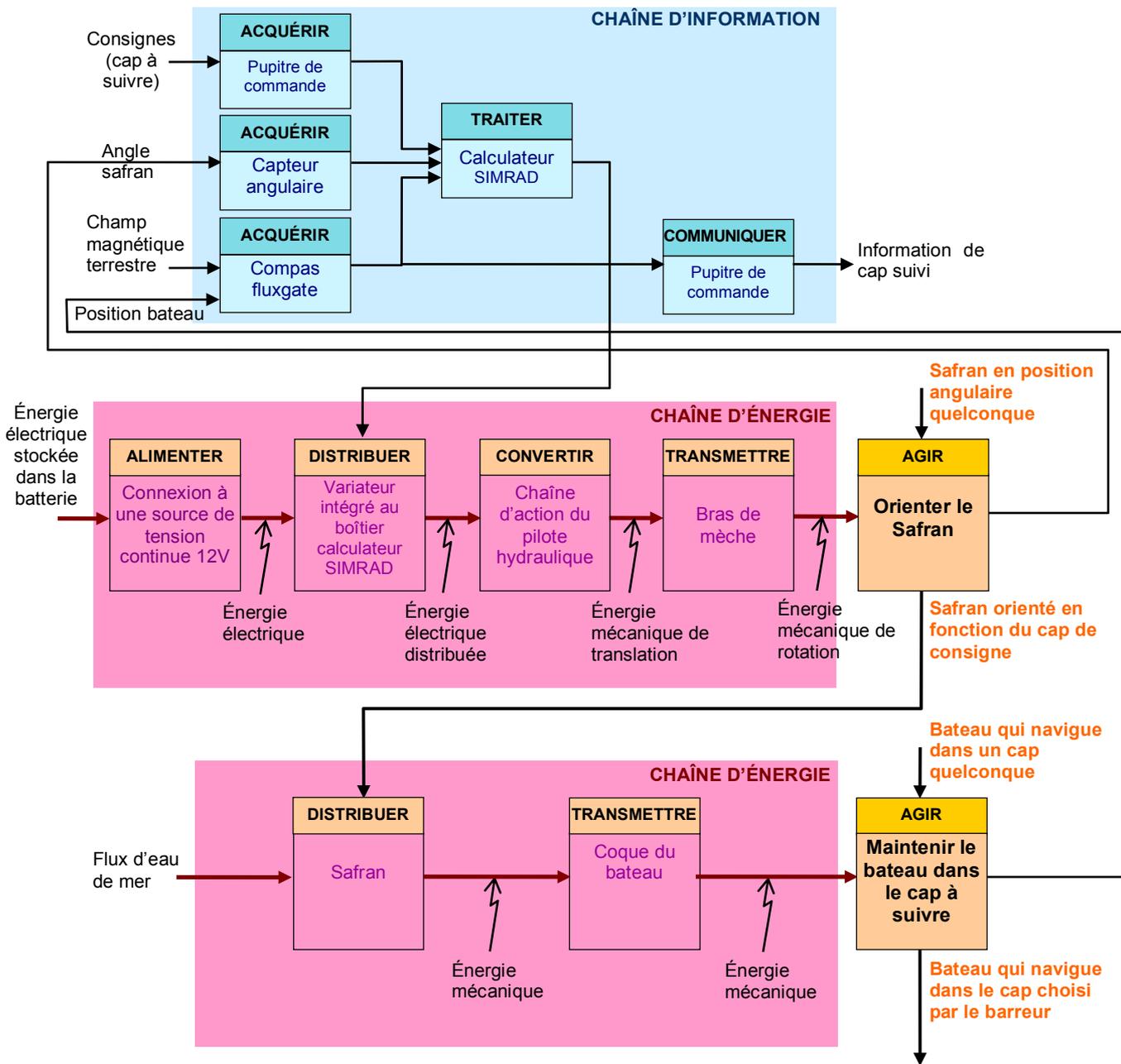
3. Chaînes fonctionnelles du système

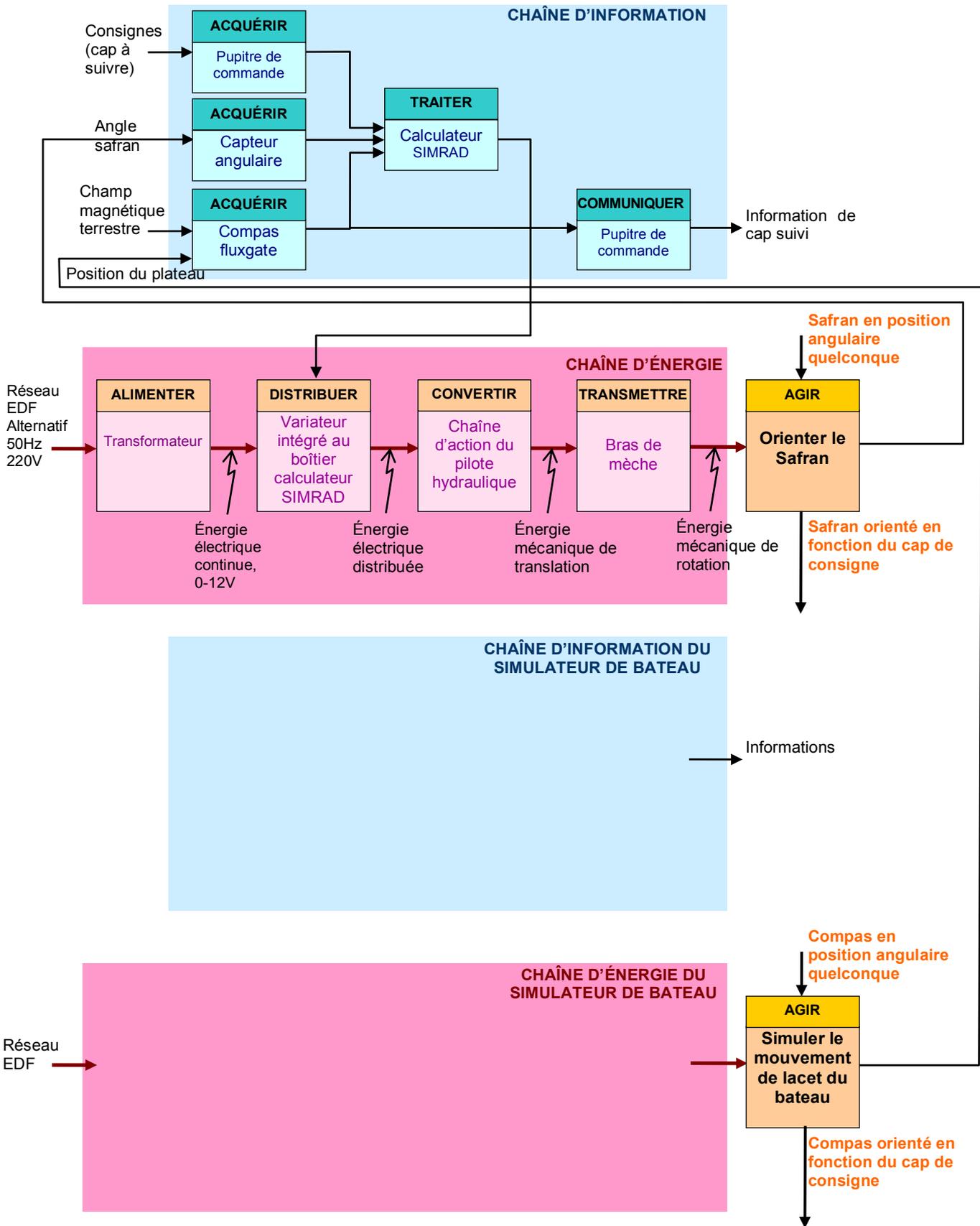
3.1. Version 1 : bateau en mer avec système de navigation SIMRAD

Voir page 7

3.2. Version 2 : banc d'essai avec système de navigation SIMRAD

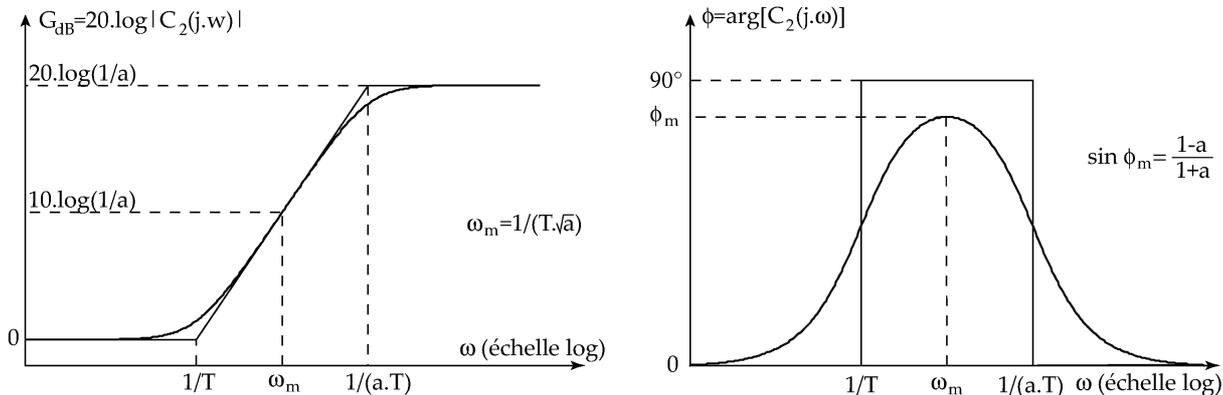
Voir page 8





4. Système à avance de phase

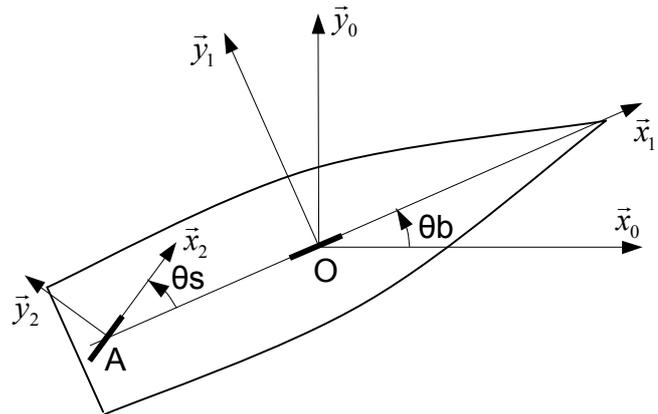
Diagrammes de Bode du système de fonction de transfert : $C_2(p) = \frac{1+T.p}{1+a.T.p}$ avec $a < 1$



5. Modèle dynamique à 1 degré de liberté du bateau

(Pour information)

La quille représentant un point d'appui majeur dans l'eau, un modèle dynamique simple consiste à supposer que le mouvement du bateau est la combinaison d'une vitesse constante V du point O (centre d'effort de la quille) colinéaire à la quille et d'une rotation θ du bateau par rapport à l'eau (supposée immobile dans le référentiel galiléen).



L'équation de moment en O du PFD appliquée au bateau et projetée sur l'axe \vec{z} permet d'obtenir une équation différentielle liant l'angle safran θ_s et le cap du bateau θ_b . Un bref bilan des actions mécaniques extérieures conduit à l'équation :

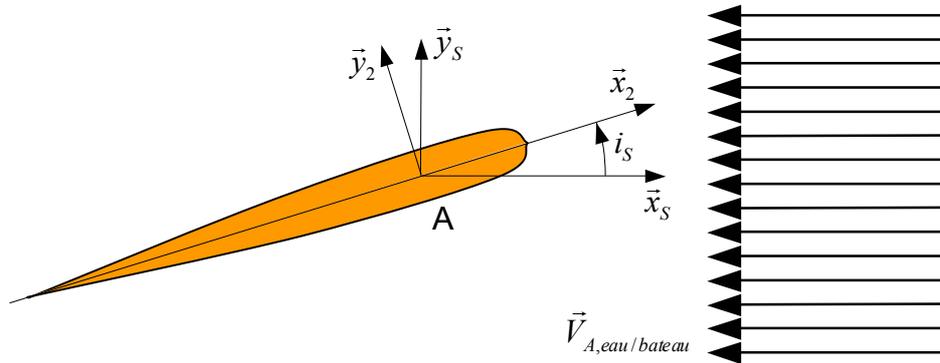
$$\vec{z} \cdot \vec{M}(O, \text{eau} \rightarrow \text{safran}) + \vec{z} \cdot \vec{M}(O, \text{eau} \rightarrow \text{quille}) + \vec{z} \cdot \vec{M}(O, \text{vent} \rightarrow \text{voiles}) + \vec{z} \cdot \vec{M}(O, \text{eau} \rightarrow \text{coque}) = \vec{z} \cdot \vec{\delta}(O, \text{bateau} / \text{Rg})$$

- L'action mécanique de l'eau sur la quille est modélisable par un torseur force dont le support passe par le point O . Son moment en O est donc nul.
- Lorsque le bateau bien réglé, l'action du vent dans les voiles ne modifie pas le cap du bateau. Le moment de l'action du vent sur la voile suivant (O, \vec{z}) est donc nul.
- Pour une mer calme, l'action de l'eau sur la coque ne perturbe pas le cap du bateau. On considère à nouveau que le moment de l'action de l'eau sur la coque suivant (O, \vec{z}) est nul.

L'équation devient donc : $\vec{z} \cdot \vec{M}(O, \text{eau} \rightarrow \text{safran}) = \vec{z} \cdot \vec{\delta}(O, \text{bateau} / \text{Rg})$

5.1. Modélisation de l'action de l'eau sur le safran

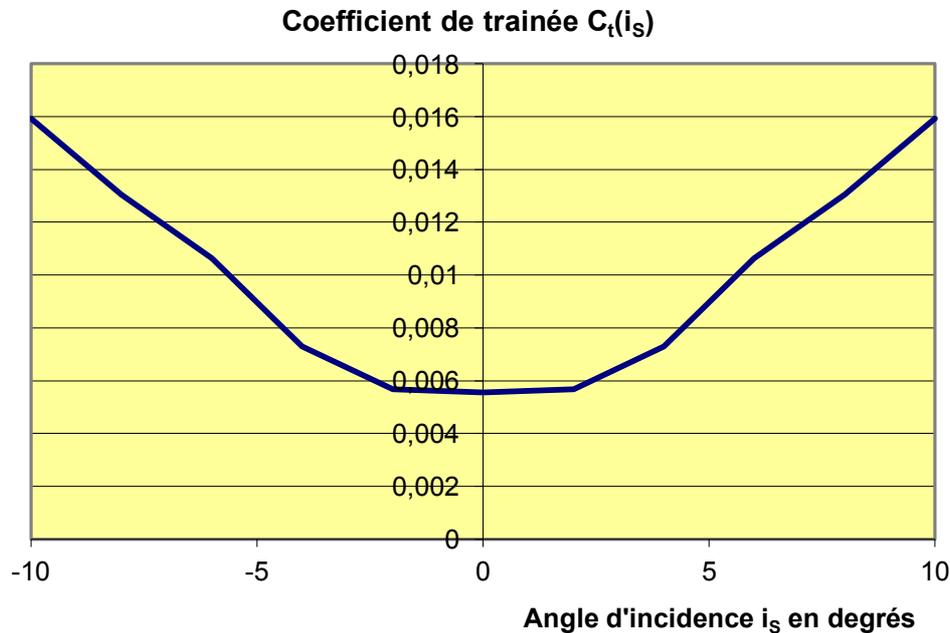
Le safran est considéré comme une aile plongée dans un écoulement fluide uniforme. L'action de l'eau sur le safran est modélisée par un torseur force dont le support passe par le centre de poussée A du safran.

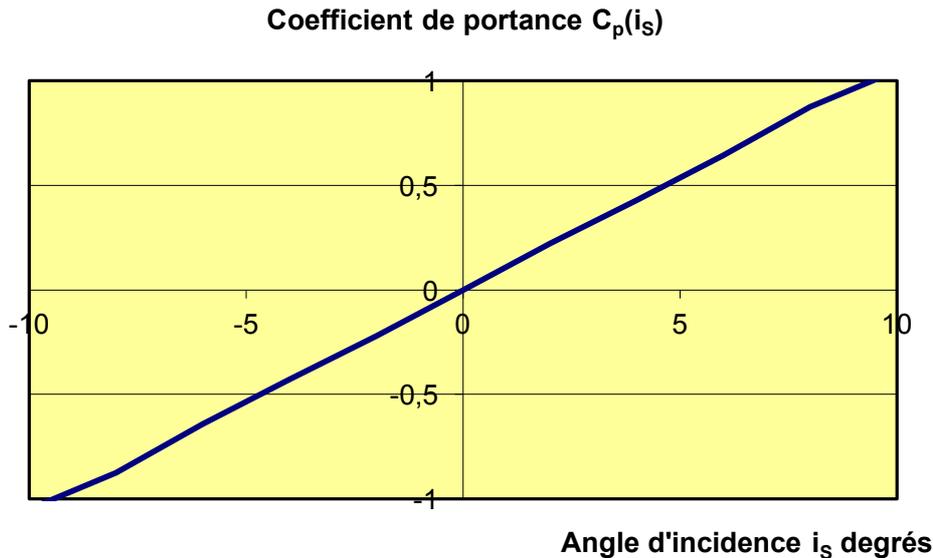


Cette action mécanique est classiquement décrite par les coefficients de portance Cp et de trainée Ct, dépendant de l'angle d'incidence du fluide. Elle dépend de la masse volumique ρ du fluide, de la vitesse du fluide et de sa surface S_S de l'aile :

$$\{F_{\text{eau} \rightarrow \text{safran}}\} : \left\{ \begin{array}{c} (C_p(i_s)\vec{y}_s - C_t(i_s)\vec{x}_s) \times \frac{1}{2} \rho \cdot S_S \cdot \|\vec{V}_{A, \text{bateau}/\text{eau}}\|^2 \\ \vec{0} \end{array} \right\}_A$$

Les coefficients C_p(i_s) et C_t(i_s) sont mesurés expérimentalement pour différentes incidences. Les résultats sont donnés sur les courbes suivantes :





L'angle d'incidence est l'angle entre le vecteur vitesse $\vec{V}(A, \text{bateau} / \text{eau})$ et le safran.

Le torseur cinématique du bateau par rapport à l'eau s'écrit, à partir des hypothèses faites sur

le mouvement : $\left\{ \vec{V}_{\text{bateau/eau}} \right\} : \left\{ \begin{array}{l} \dot{\theta}_b \vec{z} \\ V \vec{x}_1 \end{array} \right\}_O$

En déplaçant le torseur en A, on obtient : $\vec{V}(A, \text{bateau} / \text{eau}) = V \vec{x}_1 - L \dot{\theta}_b \vec{y}_1$

L'angle d'incidence vaut donc :

$$i_s = \left(\vec{V}(A, \text{bateau} / \text{eau}), \vec{x}_2 \right) = \left(\vec{V}(A, \text{bateau} / \text{eau}), \vec{x}_1 \right) + \left(\vec{x}_1, \vec{x}_2 \right) = \arctan \left(\frac{L \dot{\theta}_b}{V} \right) + \theta_s$$

Le moment de l'action de l'eau sur le safran en projection sur l'axe (O, \vec{z}) se calcule par la relation :

$$\vec{M}(O, \text{eau} \rightarrow \text{safran}) \cdot \vec{z} = \left(-LC_p(i_s) \cos(\theta_s - i_s) + LC_t(i_s) \sin(\theta_s - i_s) \right) \times \frac{1}{2} \rho S_s \left(V^2 + L^2 \theta_s^2 \right)$$

5.2. Moment dynamique

Le moment cinétique se calcule par la relation :

$$\vec{\sigma}(O, \text{bateau} / \text{Rg}) = I(O, \text{bateau}) \cdot \vec{\Omega}(\text{bateau} / \text{Rg}) + m \vec{OG} \wedge \vec{V}(O, \text{bateau} / \text{Rg}) = I \dot{\theta}_b \vec{z}$$

Le moment dynamique se calcule par la relation :

$$\vec{\delta}(O, \text{bateau} / \text{Rg}) = \left[\frac{d\vec{\sigma}(O, \text{bateau} / \text{Rg})}{dt} \right]_O + m \vec{V}(O / \text{Rg}) \wedge \vec{V}(G, \text{bateau} / \text{Rg}) = I \ddot{\theta}_b \vec{z}$$

Systeme d'aide à la navigation

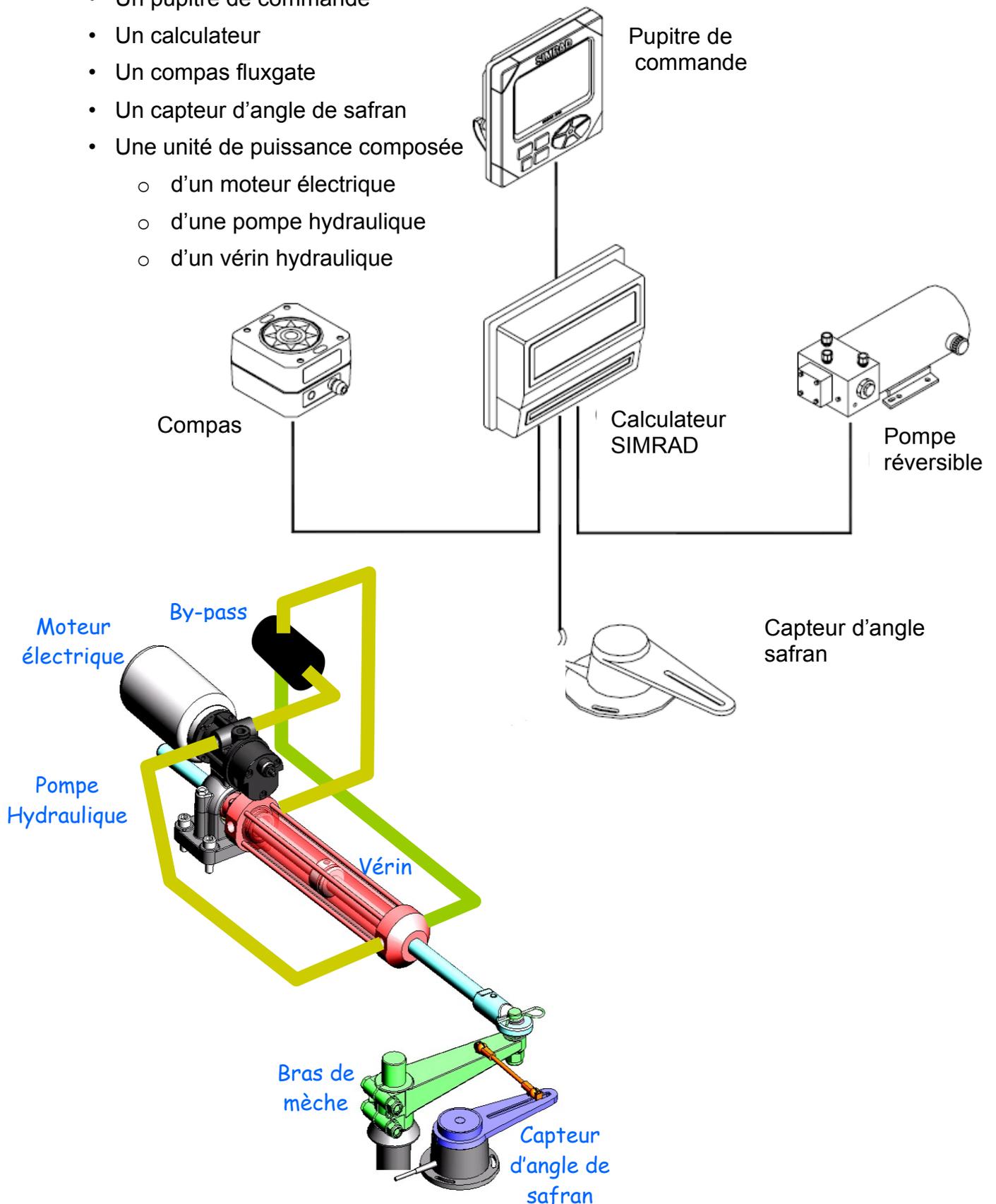
Dossier Technique



1. Composants du système d'aide à la navigation SIMRAD

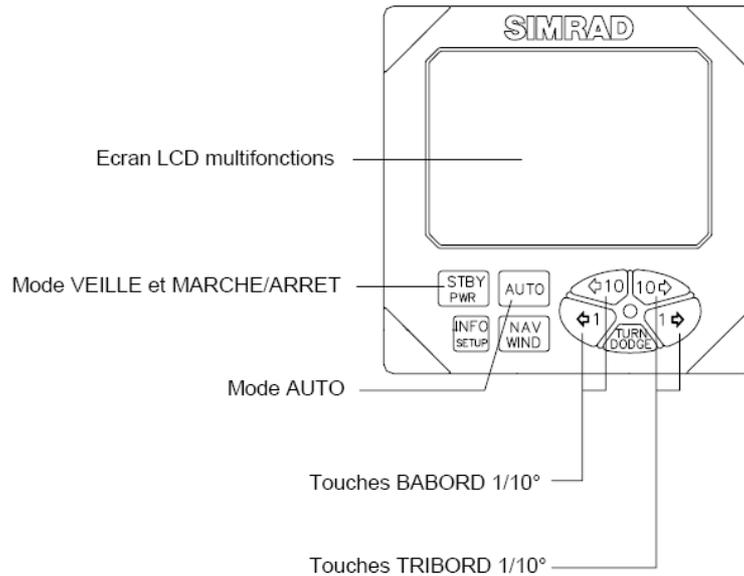
Le système à la navigation étudié comprend les éléments suivants :

- Un pupitre de commande
- Un calculateur
- Un compas fluxgate
- Un capteur d'angle de safran
- Une unité de puissance composée
 - d'un moteur électrique
 - d'une pompe hydraulique
 - d'un vérin hydraulique



2. Notice d'utilisation du pupitre de commande SIMRAD

2.1. Vue d'ensemble

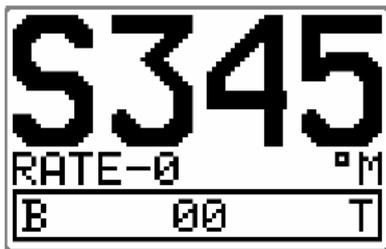


2.2. Mode d'utilisation

Mode veille

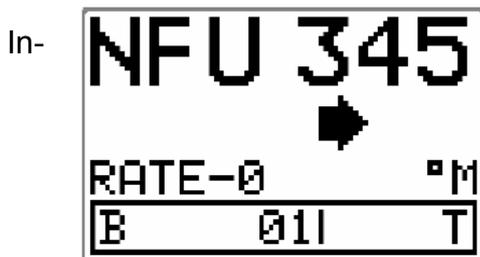
Après l'appui sur **STBY PWR** le système SIMRAD est en mode veille.

Informations affichées :



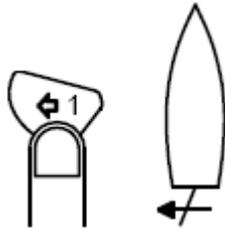
- Mode veille
- Cap courant : 345°
- Angle de barre : 0°

Fonctionnement en mode non- suiveur

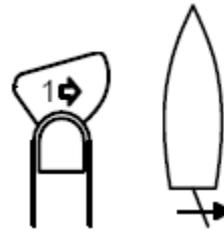


Informations affichées :

- Mode non-suiveur
- Cap courant : 345°
- Angle de barre : 1° à Tribord.



Active la commande de l'angle de barre à Bâbord



Active la commande de l'angle de barre à Tribord

Pilotage automatique

In-

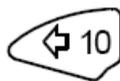


formations affichées :

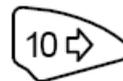
- Mode pilotage automatique
- Cap de consigne : 305°
- Cap compas : 301° M. (Nord magnétique)
- Angle de barre : 1° Tribord



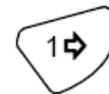
Réglage de cap vers bâbord par pas de 1°



Réglage de cap vers bâbord par pas de 10°



Réglage de cap vers tribord par pas de 10°



Réglage de cap vers tribord par pas de 1°

4. Description des éléments originaux

4.1. Alimentation électrique

Alimentation sur 12 V continu (alimentation stabilisée sur le poste de travail, batterie haute capacité sur un bateau).

4.2. Pompe hydraulique

La pompe hydraulique est à 6 pistons. Sa cylindrée est réglable par vis pointeau sur la plage 0,2 litres / minutes à 2 litres / minute sous 25 bars.

4.3. Moteur électrique

Technologie à courant continu. Vitesse de 2000 tours/minute sous 12 V.

4.4. Vérin hydraulique

Le vérin est de type « double effet et double tige ».

La pression maximale admissible est de 25 bars, la course est de 240 mm, la tige est de diamètre 23 mm et le piston est de diamètre 50 mm.

4.5. Bras de mèche

Le bras de mèche est de longueur 200 mm entre l'axe de rotation et le point de fixation de la tige du vérin. Dans cette configuration, l'amplitude du pivotement est de $\pm 35^\circ$.

4.6. Compas + chaîne de mesure

Mesure sur la plage $0^\circ \sim 359^\circ$. Résolution de 1° .

4.7. Capteur d'angle de barre + chaîne de mesure

Mesure sur la plage $\pm 37^\circ$. Résolution de $0,5^\circ$.

5. Description des capteurs rajoutés

Les capteurs suivants ont été rajoutés :

- Génératrice tachymétrique pour la mesure de la vitesse de rotation du moteur
- Débitmètre à palettes pour la mesure du débit d'huile envoyé dans les chambres du vérin
- Capteur de pression à technologie piézoélectrique pour la mesure de la pression dans la chambre arrière du vérin.
- Résistance de shunt calibrée pour la mesure de l'intensité consommée par le moteur électrique.
- Potentiomètre rectiligne en parallèle du vérin pour la mesure de l'allongement de la tige par rapport au corps du vérin

Par ailleurs, la tension d'alimentation du moteur est mesurée directement par la carte d'acquisition (voir point suivant).

6. Acquisition et traitement des données

Les grandeurs physiques issues des différents capteurs sont acquises par une carte National Instrument 6009 et traitées par une interface logicielle programmée en Labview.

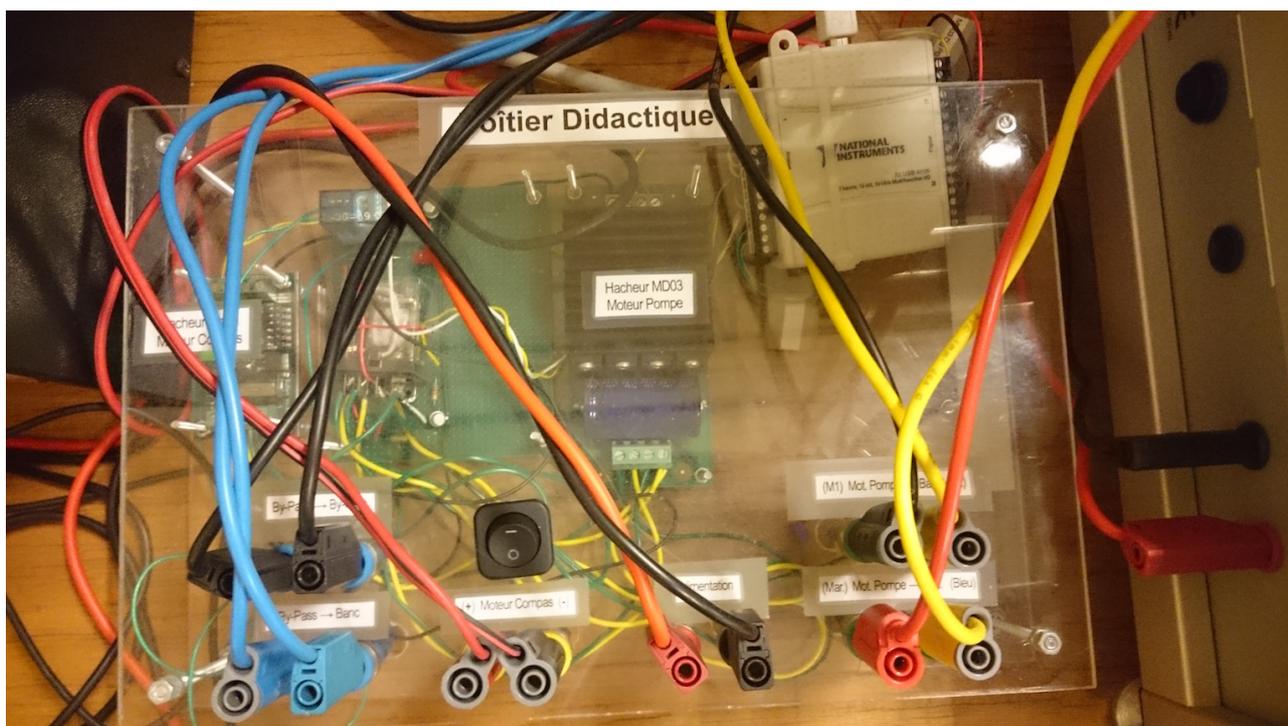
L'évolution en « simulateur de pilote » est décrite dans le paragraphe suivant.

7. Le simulateur de bateau

Afin de simuler le comportement d'un bateau, un système « simulateur de bateau » a été rajouté à ce poste de travail. Ce simulateur comporte trois parties principales :

- Un plateau motorisé et pouvant pivoter de manière continue autour de l'axe vertical : de plateau représente le bateau qui vire de bord. En mode de simulation de l'évolution du bateau, le compas sera posé sur la partie supérieure du plateau.
- Un « boîtier didactique » qui comprend :
 - La carte d'acquisition et de pilotage Ni 6009 (la carte acquière des données, les transfère à l'ordinateur qui les traite puis transfère les ordres à la carte qui pilote les hacheurs en fonction des consignes transmises par l'interface logicielle).

- Un hacheur de puissance MD03 (24 V, 20 A) alimentant le moteur électrique du pilote automatique de bateau (située en amont de la pompe hydraulique).
- Un hacheur de puissance de marque SYREN alimentant le motoréducteur situé sous le plateau orientable.
- Des relais de puissance permettant de changer le mode d'utilisation de ce boîtier didactique permettant de simuler un bateau :
 - pilotage manuel : interrupteur sur la position 0
 - asservissement : interrupteur sur la position 1
- Plusieurs fils de connexion à fiches bananes reliés au banc pour la transmission des informations ou des puissances.



- Une interface logicielle programmée sous l'environnement logiciel Labview et correspondant au calculateur de l'asservissement en lacet du bateau. Dans cette interface logicielle (dont l'utilisation est décrite au fur et à mesure du TP afin de faciliter son utilisation), il est possible de régler :
 - Les caractéristiques du bateau (dimension et vitesse) selon un modèle cinématique (pas de prise en compte de la dynamique de réaction).
 - La gestion de l'information par une ou deux boucles d'asservissement (compas seulement ou compas + capteur d'angle de barre).
 - Le réglage des correcteurs PID associés aux deux boucles d'asservissement (dans le cadre de ce TP, les correcteurs utilisés seront des Proportionnel Dérivés).
 - Le traitement des trames et des grandeurs issues des différents capteurs.

La connexion entre l'ordinateur et le boîtier didactique se fait par une connexion USB sur la carte NI 6009 (câble USB blanc branché sur les ports arrières du PC).

8. Bateau de plaisance de référence

Sun Odyssey 33i Performance



Longueur quille - safran	L	5 m
Surface safran	S_S	0,4 m ²
Masse totale	M	4700 kg
Moment d'inertie selon l'axe (O,z)	I_B	73600 kg.m ²