

Pilote automatique

Réflexions sur la stabilité

Avant propos

Ce document est une réflexion sur le fonctionnement et le comportement du voilier sous pilote automatique. Il s'agit d'une analyse de la physique du voilier (simplifiée) et du servomécanisme attendant. Je n'ai pu éviter d'utiliser les équations différentielles et le calcul symbolique, ce qui fait qu'un pan de ce document n'est accessible qu'aux automaticiens.

La première partie qui concerne la mise en équation est agrémentée d'explications multiples pour être appréciée par tous.

La seconde partie qui concerne la stabilité s'adresse aux automaticiens

La troisième partie qui concerne la simulation compare les performances théoriques de l'étude vue sur un concept linéaire.

J'ai cherché, dans la mesure du possible à expliquer au mieux les phénomènes pour que chacun puisse en tirer un bénéfice. Ceux qui seront intéressés par l'aspect automatisme pourront consulter le cours de JM Dutertre sur www.esme.fr qui m'a semblé bien fait.

Pourquoi cet article ?

D'une part les automatismes ont été mon métier et d'autre part au cours des nombreuses discussions sur les forums traitant du sujet j'ai relevé beaucoup de remarques parfois contradictoires, lesquelles laissent un flou sur cette technologie aux multiples facettes.

Enfin dans les calculs vous verrez, je ne m'embarrasse pas trop des virgules, la densité de l'eau est donnée pour 1000 sel ou pas sel, souvent π est égal à 3 et le radian assimilé à 60°

Mon modèle de bateau : le mien : l'Arpège. Le pilote : basé sur les caractéristiques du TP10 Simrad

J'ai explicité davantage la mise en équation qui est toujours le parent pauvre des explications. L'observation et l'analyse du phénomène physique sont les points les plus importants. Pour le reste, c'est de la cuisine de spécialiste.

Table des matières

PILOTE AUTOMATIQUE.....	1
REFLEXIONS SUR LA STABILITE.....	1
AVANT PROPOS.....	1
TABLE DES MATIERES	2
GENERALITES.....	3
LE BATEAU ET SON COMPORTEMENT.....	3
CHAPITRE 1 : MISE EN EQUATION.....	4
COUPLE D'INERTIE.....	4
COUPLE DE FROTTEMENT	4
<i>Notion de portance.....</i>	4
COUPLE DE RAPPEL.....	7
L'EQUATION GENERALE :.....	8
ANALYSE DE L'EQUATION.....	8
APPLICATION NUMERIQUE.....	11
1 <i>l'inertie.....</i>	11
2 <i>les couples du safran et de l'aileron.....</i>	11
STABILITE DU PILOTE	13
AVANT PROPOS.....	13
LES FONCTIONS	13
<i>Le bateau.....</i>	13
<i>Le pilote.....</i>	14
<i>Les limites du système.....</i>	14
FONCTION DE TRANSFERT	16
STABILITE	16
<i>Courbe 1 le bateau et le pilote.....</i>	16
<i>Courbe 2 calage du gain.....</i>	17
<i>Courbe 3 réponse indicielle cas 1.....</i>	17
STABILITE AVEC GYROMETRE.....	18
<i>Courbe 5 le bateau le pilote et le gyromètre.....</i>	18
<i>Courbe 6 calage du gain du gyromètre.....</i>	19
<i>Courbe 7 calage général cas 2.....</i>	19
<i>Courbe 8 réponse indicielle cas2.....</i>	20
PREMIERE CONCLUSION.....	20
SIMULATION.....	22
1 ESSAI REPOSE A UN GROS CHOC.....	24
2 ESSAI REPOSE A UN PETIT CHOC	25
3 CAS DE LA HOULE 15S	26
4 CAS DE LA HOULE 8S.....	27
5 ESSAI PAR MAUVAIS TEMPS	28
6 CHANGEMENT DE VERIN PAR MAUVAIS TEMPS.....	30
7 LE GROS CHOC AVEC LES DEUX BATEAUX.....	31
8 LE GROS CHOC AVEC UN VERIN TRES RAPIDE	32
9 COURBES DE STABILITE COMPAREES	33
CONCLUSION.....	34
REGLAGES.....	35
COMPORTEMENT ET ANALYSE	35

Généralités

Lorsque on désire concevoir un automatisme, quel qu'il soit, il faut au préalable comprendre le système sur lequel on va agir. Dans un second temps, on peut choisir le matériel le mieux adapté et faire en sorte que le dimensionnement de l'automatisme soit convenable. Si on ne le fait pas, le choix pourra ne pas convenir ou être limite en performances et l'investissement s'avérer non rentable.

Le bateau et son comportement

Il existe des modèles qui décrivent le comportement du navire en particulier celui de NOMOTO. La plupart des articles qui traitent du problème se sont attachés à décrire le comportement global du navire dans tous ses mouvements : roulis, tangage, lacet, avance, dérive et pilonnement.

Si la méthode est complète, l'avalanche d'équations et de calculs, souvent sous forme matriciel, fait perdre la vision des phénomènes essentiels qui agissent sur notre bateau.

Nous allons donc simplifier le travail en faisant les hypothèses suivantes :

- Notre bateau est équilibré sous voile, ni mou ni ardent.
- Il subit des efforts externes qui engendrent des couples de rotation que nous ramenons à des angles de barre.
- Nous supposons que les forces de dérive passent par le centre de rotation en lacet du bateau.
- Nous ne tiendrons pas compte ni du roulis ni de la gîte ni du tangage.
- La force de propulsion de notre voile passe, en vue de dessus, par le centre de carène et est confondu avec le centre de rotation en lacet.
- La force de propulsion est dans l'axe du bateau, ce dernier ne dérive pas.

Ces simplifications qui peuvent apparaître réductrices ne le sont pas tant que cela.

Exemple 1 : effet d'une gîte.

Imaginons notre voilier équilibré au vent de travers par mer plate. Survient un coup de vent qui induit une gîte et une aulofée. Cette aulofée a deux origines : les formes de la coque et la position du centre de voilure décalé sous le vent.

Le bon barreur réagit. Il met la barre au vent pour contrecarrer l'action.

Ainsi, un coup de gîte peut se modéliser comme un couple perturbateur dont l'amplitude s'assimile à un coup de barre.

On peut donc simuler ces phénomènes comme de simple couples perturbateurs. Un peu comme si sur un bateau idéal, à deux safrans, l'un était utilisé pour semer la zizanie, l'autre couplé au pilote.

Exemple 2 : l'orientation de la force propulsive.

Si notre bateau est parfaitement équilibré, la dérive qu'il subit sous l'effet de la voilure ne génère pas de couple de rotation. Ce simple équilibre nous autorise à négliger la dérive sous le vent. Nous ne cherchons pas à connaître la route réelle suivie et ne nous intéressons qu'au cap et à ses variations.

Chapitre 1 : mise en équation.

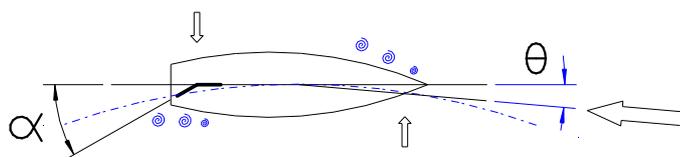


Figure 1

Sur la figure ci-dessus, sous l'effet d'un angle du safran α , le bateau tourne d'un angle θ en suivant le cercle bleu en trait mixte. Sous l'effet de la rotation se développe des effets sur la coque, effets simulés par les flèches verticales qui symbolisent des résistances et les traînées ou remous que l'on observe en eau calme.

Dans cette hypothèse de rotation, l'équipier à l'avant voit un flux d'eau arriver de biais, la grosse flèche orientée.

Pour alléger la figure, les efforts dus à l'inertie ne sont pas représentés. Il en est de même pour les forces exercées sur le safran qui seront détaillées à part.

Les hypothèses que nous avons prise nous permettent de réduire le comportement en lacet du bateau aux seules forces qui engendrent des effets de rotation sur notre modèle à savoir :

- le couple d'inertie du à l'accélération angulaire
- le couple de frottement du à la vitesse angulaire
- le couple de rappel du à l'orientation (s'il existe)
- le couple du à l'orientation du safran

Couple d'inertie

Rapidement, nous expliciterons davantage avec l'évaluation des grandeurs.

$$C(i) = J d^2\theta / dt^2$$

Classique, le couple d'inertie est proportionnel à l'accélération angulaire.

Couple de frottement

Notion de portance.

Avant d'écrire l'équation il nous faut comprendre ce qu'est une portance.

Supposons que, par calme plat nous fassions tourner notre bateau sur lui-même barre bloquée centrée.

Que se passe t-il sur notre gouvernail ? :

Ce dernier voit arriver un flux d'eau, flux engendré par la rotation et perpendiculaire à sa surface.

L'effort induit sur le gouvernail bloqué est proportionnel à sa surface et au carré de la vitesse suivant la relation, bien connue :

$$F = \frac{1}{2} C_y r S V^2$$

Où C_y est un coefficient dépendant de la forme ex : 1 pour une plaque plane perpendiculaire au sens du déplacement.

ρ est la densité du fluide ici de l'eau à 1000 Kg/m^3 environ.

S est la surface de l'appendice.

V^2 est la vitesse au carré que l'on peut relier à la vitesse angulaire du bateau $d\theta/dt$ par la relation :

$$V=L*d\theta/dt$$

L représente la distance entre le centre de rotation et le safran.

Plus le gouvernail sera loin du centre de rotation du bateau plus ces frottements seront importants.

Cette expression n'est valable que lorsque le bateau n'avance pas et tourne simplement sur lui-même.

Isolons notre safran et supposons le dans un courant venant de « l'avant ». On le positionne parfaitement dans l'axe du courant.

Le safran voit un flux d'eau passer de part et d'autre : Il n'existe pas d'effort latéral.

Supposons maintenant qu'on déplace le safran latéralement à vitesse constante.

Le safran voit une composante entre la vitesse d'avance du flux et la vitesse latérale.

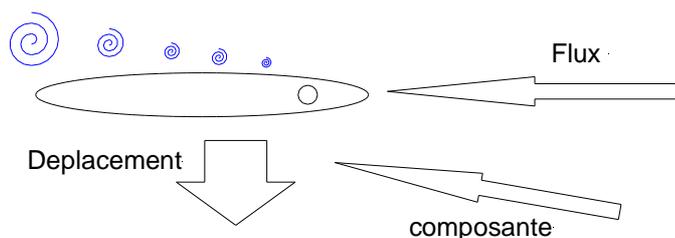


Figure 2

L'orientation de la composante entre le flux et le déplacement que nous allons appeler (a) s'écrit.

Tangente $(a) = \text{Flux}/\text{Déplacement}$.

Supposons que cet angle soit faible. Par simplification, on peut assimiler la tangente à l'angle :

$$(a) = \text{Flux}/\text{Déplacement}$$

Revenons à un bateau qui avance droit mais qui est animé de tous petits mouvements en lacets d'angle θ .

Le flux, ce sera notre vitesse d'avance du bateau et le déplacement ce sera $Ld\theta/dt$ (Vitesse angulaire multipliée par la longueur entre le safran et l'axe de rotation du bateau). D'où la relation :

$$a = L (d\theta/dt) / V$$

Quelques chiffres pour fixer les esprits

Vitesse du bateau 6 Nœuds => 3 m/s.

Vitesse de rotation cas de la vitesse d'un virement de bord 100° en 10 secondes ou 0,16 rd/s.

Evidemment, virer de bord safran droit, c'est pas commun, mais toutes voiles dehors un coup de gîte et une risée soudaine... C'est le quotidien des forces sur le bateau.

Distance du safran au centre du bateau 4m environ

$$a = 4 (0,16) / 3 = 0,21 \text{ rd}$$

Soit environ 13° d'orientation de la composante du flux.

Il s'agit d'un phénomène de portance.

Cette notion de portance associée à des formes ou « profils » a fait l'objet de nombreuses études et d'établissement de courbes.

Ci-joint, un document extrait de résultat d'essai d'un club de modéliste pour une aile d'avion qui montre que la forme générale, en plus du profil, donne des résultats variables.

Il existe une zone progressive et relativement linéaire pour un petit angle 0 à 15° . On retiendra comme valeur $P=1$ pour 15° d'incidence.

L'équation de la force exercée sur le safran est donc $F = \frac{1}{2} P r S V^2$ pour un angle de 15° ou $\frac{1}{4}$ de radian

Si on pouvait atteindre 1 radian sans décrocher, P serait égal à 4.

Donc $P=4$ pour 1 radian tout en sachant que cette équation sera fautive au delà de 15° à cause du décrochement. Et au delà de 15° , on redescend sur des valeurs proches de 1, valeur d'une plaque plane.

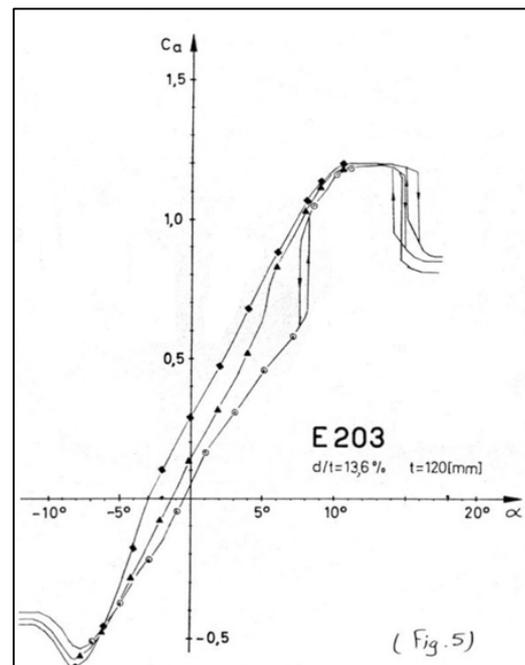


Figure 3

Or la vitesse qui agit sur la surface n'est plus celle due à notre variation angulaire $L \cdot d\theta/dt = 0,34 \text{ m/s}$ cas du bateau en simple rotation sur lui-même, mais 3 m/s nos 6 nœuds :

La force exercée est donc beaucoup plus importante :

10 fois plus en vitesse et 4 fois plus du fait de la portance.

Arrêtons nous un instant sur ces considérations.

Cela vous explique pourquoi une rame ou une pagaie à besoin d'une grande surface alors que l'aviron de godille plus étroit va chercher sa poussée par la vitesse de déplacement latéral et une faible incidence.

C'est aussi une des raisons de l'efficacité d'une hélice par rapport à une roue à aube qui, à poussée égale est d'une dimension sans commune mesure (même en ne comptant pas les pales inutiles qui brassent de l'air par conception.)

Un des points à noter est le comportement du bateau.

A l'arrêt il tourne d'un rien sur lui-même : Peu de force pour freiner sa rotation alors qu'en route l'effet d'écoulement exerce des forces plus importantes sur le safran et le bateau est plus stable.

Si vous manœuvrez trop lentement au moteur dans un port alors qu'il y a un peu de vent, il arrive un moment où l'angle d'incidence de votre quille, angle entre votre vitesse d'avance et votre dérive sous le vent dépasse les 15° et brutalement le bateau décroche latéralement, et pan dans le cat way ; alors que cela avançait tout gentiment tout droit !...

Enfin quand nous parlerons des problèmes de carène il nous faudra faire le distinguo entre un bateau aux formes rondes ayant peu de pied dans l'eau et un tanker dont toute la coque va subir ces effets de portance.

Revenons à notre équation.

Notre portance est une force décomposée. En effet on différencie la portance et la traînée qui est un frein. Par simplification nous supposerons la traînée négligeable par rapport à la force de poussée du bateau.

La portance est une force qui n'est pas perpendiculaire à l'objet et dans notre cas, elle est parallèle au tableau arrière. Ceci évite l'introduction d'un cosinus fonction toujours difficile à linéariser.

Donc la force exercée par un safran de surface S_s lorsque nous orientons le safran d'un angle α petit est :

$$F(\alpha) = \frac{1}{2} \cdot 4r S_s V^2 \alpha$$

Et la force de frottement visqueux pour une surface d'aileron S_a soumis à la portance par rotation du bateau sur lui même s'écrit

$$F(\theta') = \frac{1}{2} \cdot 4r S_a V^2 (L\theta' / V)$$

Notons :

S'il n'y avait pas de frottement le bateau verrait sa vitesse de rotation augmenter indéfiniment. Il existe donc une limite de vitesse angulaire ou la composante de la vitesse d'avance du bateau et la vitesse induite par la rotation annule l'effet de l'angle du safran.

Donc il faut considérer S_a comme la surface de l'appendice arrière - safran + aileron - ou partie de quille par rapport à la rotation du bateau sur lui-même.

Ces forces sont à multiplier par la distance d'action L pour les exprimer en couple ce qui donne les deux expressions

$$C(\alpha) = L \cdot \frac{1}{2} \cdot 4r S_s V^2 \alpha$$

$$C(\theta') = L \cdot \frac{1}{2} \cdot 4r S_a V^2 (L\theta' / V)$$

Couple de rappel

On a pris pour hypothèse que la vitesse d'avance était dans l'axe du bateau donc on n'a aucune force de rappel qui s'exerce sur le bateau. Les voiles sont supposées bien réglées et sans influence sur la direction du bateau. Et lorsque le bateau tourne, l'effet induit sur le safran est déjà écrit dans l'expression des efforts proportionnels à la variation d'angle. Et le bateau est libre.

Cette simplification de non-influence du vent sur le comportement rotatif du bateau est évidemment inexacte. Témoin nos modèles réduits de notre enfance qui voguaient correctement sur le bassin des tuileries.

Par ailleurs il nous faudrait différencier le comportement du ketch de celui du sloop de régates et introduire une force de rappel différente suivant les modèles et dépendante du vent. Restons simple.

Attention, au mouillage, ce n'est pas le cas. Le bateau est tenu et s'oriente par rapport au courant. Cette orientation du bateau crée une force de rappel sur le safran. La mise en équation ressemblerait un peu à celle du pendule pesant

L'équation générale :

Une des difficultés de cette étude est que la valeur des couples dépend du carré de la vitesse d'avance du bateau. Lorsque nous allons avoir des expressions de la forme Inertie/Couple qui traduit des fréquences propres (ou des pulsations) le comportement fréquentiel sera dépendant de la vitesse.

Pour bien faire, il faudra faire une étude petite vitesse et une étude grande vitesse. Sur les gros navires le calculateur tient compte de la vitesse du bateau. Nous adopterons une vitesse forte avec des couples forts sachant que, à vitesse plus faible le bateau sera « plus calme ».

L'équation est classique :

Couple moteur – Couple de frottement = Couple d'inertie

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + L \frac{1}{2} \cdot 4 \cdot r S_a V^2 (L/V) \frac{d\theta}{dt} = L \frac{1}{2} \cdot 4 r S_s V^2 a$$

Introduisons des symboles pour alléger l'écriture.

$$C_s = L \frac{1}{2} \cdot 4 \cdot r S_s V^2 \text{ et}$$

$$C_f = L \frac{1}{2} \cdot 4 \cdot r S_a V^2 (L/V) \text{ ou avec simplification}$$

$$C_f = L^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 4 r S_a V$$

L'équation générale s'écrit :

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + C_f \frac{d\theta}{dt} = C_s a$$

Analyse de l'équation.

En régime établis

Supposons la vitesse de rotation constante sans accélération : Le couple d'inertie ne joue plus $J \frac{d^2\theta}{dt^2} = 0$

La dérivée du cap, vitesse de rotation du bateau est proportionnelle à l'angle de barre : le bateau tourne indéfiniment si le gouvernail n'est pas à zéro.

$$\frac{d\theta}{dt} = C_s / C_f a$$

Essayons d'évaluer ce rapport C_s / C_f

$$C_s / C_f = L \frac{1}{2} \cdot 4 r S_s V^2 / (L^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 4 r S_a V)$$

Simplifions

$$C_s / C_f = (V S_s) / (S_a L)$$

- plus la vitesse V est grande, plus le bateau tourne vite et c'est proportionnel
- plus le bateau est long et moins cela tourne vite :
- plus la surface du safran est grande plus cela tourne vite
- plus l'aileron fixe est imposant moins cela tourne vite

Un First classe 8 vire pratiquement sur place parce que $S_s/S_a=1$ et que le safran est rejeté tout à l'arrière : Pas d'aileron

Le thonier à voile de Concarneau possède une quille longue. Elle est plus profonde à l'arrière et forme un aileron du double du gouvernail. Le virement de bord posait problème car la vitesse de rotation était limitée par cet appendice. Faute de bien régler les voiles lors du virement de bord, le manque à virer pouvait arriver.

Ceci nous amène à faire un aparté sur les formes de coque que nous avons négligées.

En effet comme sur notre croquis de départ (figure1), dans la rotation, les formes de l'avant dérapent vers le centre du cercle alors que celles de l'arrière vont vers l'extérieur en créant une trace ou des remous.



Si vous avez déjà bien regardé une remorque de camion à trois essieux (non directionnels) sur un rond point, c'est pareil. Le pneu de l'essieu du milieu suit la trajectoire circulaire celui qui le précède ripe vers l'intérieur du virage, celui qui suit ripe vers l'extérieur.

Sur nos bateaux de plaisance légers, les formes sont arrondies et en glissement latéral nous avons plutôt un effort de portance vertical. La résistance à ce glissement est une traînée bien plus faible. Le couple induit est fonction de la vitesse de rotation du bateau et de la distance au centre de rotation. Donc proportionnel à L^2 . Il s'amointrit en se rapprochant du centre Nous pouvons donc négliger ces influences car elles sont de faible valeur.

Pour un pétrolier possédant des murs verticaux la problématique n'est pas la même et le frottement induit par ces murs est énorme. C_s/C_f est alors très faible et la rotation du bateau par angle de barre aussi. Ce qui explique leur difficulté pour tourner. Surtout lorsqu'ils sont en petits fonds et que le manque de profondeur empêche l'eau de passer par-dessous. (Effet de sol.)

Sur un 8 avec barreur, le safran est très petit et la coque très longue cela ne favorise pas les évolutions.

Sur une péniche, dont la coque longue offre une résistance importante en rotation, le safran est taillé large pour offrir un couple important pour compenser en partie l'inconvénient

La photo : péniche à voile avec un très grand safran pour créer un couple important à faible vitesse. A l'origine pas de moteur donc pas de déflexion latérale à l'aide du flux d'hélice.



En régime variable

Supposons une forte accélération angulaire : $d^2\theta / dt^2$ élevé.

L'équation $J d^2\theta / dt^2 + C_f d\theta / dt = C_s a$

se réduit à $J d^2\theta / dt^2 = C_s a$

Soit encore : $d^2\theta / dt^2 = a * C_s / J$

A savoir : l'accélération angulaire est proportionnelle au couple du safran et inversement proportionnel à l'inertie.

Rappelons que C_s est proportionnel à V^2 . Donc à vitesse moitié du bateau ce terme est 4 fois plus faible.

Un bateau lourd mettra du temps à se décider à tourner tout simplement parce que son accélération angulaire sera faible. Ainsi, sur un bateau lourd on trouve souvent une taille de safran importante pour augmenter le couple. Et en fin de virement il faudra « rencontrer » pour annuler l'énergie de rotation emmagasinée par l'inertie.

Un bateau léger comme un dériveur partira très vite en rotation.

Sur un canoë, l'inertie est importante car les deux pagayeurs sont « assis » tout à l'avant et tout à l'arrière. Quand il s'agit de tourner en catastrophe, le pagayeur de pointe met sa pelle en travers en l'appuyant sur la proue. Cela crée ainsi un gouvernail inattendu de grande surface. Beaucoup plus efficace que le coup de pelle latéral : Portance importante.

Cette action est plus risquée pour la stabilité en roulis du canoë mais très efficace en rotation.

Application numérique.

1 l'inertie

Hélas, les architectes navals ne nous simplifient pas la vie avec des formes que l'on ne trouve pas dans les manuels de mathématique. On va donc faire ce qu'ils ne veulent pas faire, transformer notre fier coursier en caisse à savon.

On sait que l'inertie de rotation autour d'un axe centré d'un parallélépipède homogène s'exprime par l'équation.

$$J=M (L^2+l^2) / 12$$

L et l représentent la longueur et la largeur totale.

On assimile notre bateau à un parallélépipède homogène un peu plus court en tenant compte du fait que les formes extrêmes sont plus lourde car plus renforcées mais moins volumineuse et que l'inertie joue au carré de la distance. Cela donne à peu près cela :

Pour la coque M=2T un rectangle de 7m de long x 3m de large avec des masses réparties.

Il est vrai que les bordés sont sur le bord et que le chargement dans les équipets ou les coffres latéraux ne sont pas des exemples de bonne répartition. Accordons nous ces erreurs.

$$J \text{ coque}=2000x (7^2+3^2) / 12 = 9666 \text{ m}^2\text{Kg}$$

Le bulbe de l'arpège pèse 1,7 tonnes et mesure 2,5m de long son épaisseur est négligeable. (Version MK2

$$J \text{ quille} = 1700x (2,5)^2 / 12 = 885 \text{ m}^2\text{Kg}$$

Enfin j'ajoute quelques bricoles pour mieux comprendre les influences : le mouillage M=30Kg tout à l'avant, un équipier à l'arrière 75kg et encore 30Kg de bricoles dans le coffre arrière à 4 m de distance ici en inertie ponctuelle MD^2 cela représente

$$J \text{ divers} =135.(4)^2=2160 \text{ m}^2\text{Kg}.$$

Bilan :

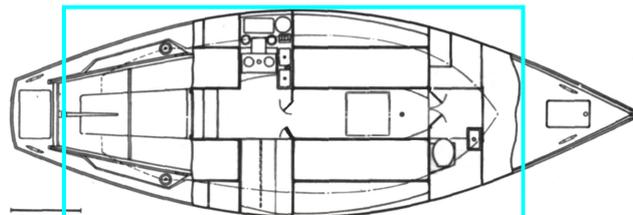
On remarque ici que le bulbe centré représente environ 7% de l'inertie globale. Et que le mouillage, le bidon de gasoil et l'équipier assis tout à l'arrière coûte 16% de l'inertie globale

On arrondis l'ensemble à **13000 m²Kg**

2 les couples du safran et de l'aileron,

Les données sont :

- Densité 1000Kg/m³
- Vitesse 6 noeuds = 3m/s
- Surface du safran 0,35m x 1m
- Safran+aileron 0,5m x 1m
- Distance du safran au centre de rotation 4 m



$$C_s = L \cdot \frac{1}{2} \cdot 4r S_s V^2$$

$$\text{soit : } 4 \cdot \frac{1}{2} \cdot 4 \cdot 1000 \cdot 0,35 \cdot 3^2 \Rightarrow C_s = 25200 \text{ m}_L \text{ N/rd}$$

$$C_f = L^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 4r S_a V$$

$$\text{soit : } 4^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 4 \cdot 1000 \cdot 0,5 \cdot 3 \Rightarrow C_f = 48000 \text{ m}_L \text{ N/rd/s}$$

(Désolé pour les Newtons et le produit vectoriel, mais c'est bon de le rappeler de temps en temps.)

Les coefficients correspondent à des valeurs qui seraient atteintes pour un angle de barre de 1rd (57°) et une vitesse de rotation de 1rd/seconde (57°/seconde).

Dans les équations, on exprime

- le couple de l'angle de barre avec la surface du safran
- le couple de frottement visqueux la surface totale arrière : safran + aileron (s'il existe.)

En ayant linéarisé nos équations on obtient des valeurs homogènes entre elles qui vont nous permettre de modéliser le système et de comprendre les réactions aux petits angles. L'angle de décrochement de la portance d'un gouvernail assez allongé comme celui de l'arpège se situe vers 15°.

Attention. Il ne faut pas assimiler la portance avec l'angle de barre. Si le bateau tourne, la déflexion engendrée par la vitesse de rotation du bateau réduit l'angle de portance sur le safran. A contrario, sous une risée lorsque le barreur met la barre au vent pour empêcher le bateau de lofer. Le bateau ne tournant pas, le décrochement sera effectif au-delà de nos 15° de barre. Quelquefois on sent que la barre « cède » : décrochage. Cela se rattrape en réduisant l'angle ou en pompant.

Notre TP10 est monté à 460mm de l'axe de la barre avec sa course de 250mm hors tout et nous permet un angle maximum de Arc tangente (125/460) = 15° Heureux hasard.

La vitesse de rotation s'exprime par le rapport C_s/C_f

$$25000/48000 \Rightarrow 0,52 \text{rd/s.}$$

Pour une vitesse d'avance de 6 nœuds et barre à 15° on aura 7,8°/s -> virement 100° en 13 secondes.

Reprenons notre équation

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + C_f \frac{d\theta}{dt} = C_s a$$

Et écrivons la sous la forme

$$J/C_f \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{d\theta}{dt} = C_s/C_f a$$

Fonction que nous allons exploiter avec les valeurs que nous avons évaluées.

Stabilité du pilote

Avant propos

Ce chapitre est surtout adressé aux automaticiens. On y étudie la stabilité du système bouclé avec ses variantes, gain simple, contre réaction de vitesse (gyromètre).

On effectue une transformation mathématique : La transformée de Laplace qui est une application qui permet de transposer les dérivées et les intégrales dans un espace où elle apparaissent sous forme de produit ou de division. Cela permet de simplifier encore les équations pour les analyser dans des espaces spécifiques.

Pour les non-initiés il faut situer la courbe représentative du comportement du bateau avec son pilote dans un plan où apparaît simultanément phase et amplitude. Les courbes sont graduées en fréquence (ou pulsations). On règle au mieux le gain du système bouclé pour obtenir la stabilité et augmenter les performances.

Dans ce travail qui consiste à calculer l'écart entre le cap du bateau et le cap commandé et à utiliser cet écart pour orienter le gouvernail nous aurons deux problèmes. Celui de la phase et celui de l'amplitude. Trop de déphasage le système est instable, trop d'amplitude il l'est aussi.

Nous utiliserons la variable symbolique « s ». Variable « s » au lieu de « p » car les logiciels que nous utiliserons sont conçus en langue saxonne.

$d\theta / dt$ sera symbolisé par θs $d^2\theta / dt^2$ sera symbolisé par θs^2

L'étude a été faite en solution graphique dans le plan de Black. Tout simplement car cela permet d'apprécier visuellement ce qui se passe.

Les pilotes modernes sont sous microprocesseurs. Il est vraisemblable que leurs fonctions internes aient été développées avec d'autres artifices mathématiques comme la transformée en z ; méthode adaptée à la résolution des asservissements échantillonnés. Les adeptes de la fréquence de Shannon se feront un régal d'explorer plus avant cette spécialité encore plus imbuvable que ce qui suit.

Nous allons supposer un asservissement analogique pour essayer de comprendre le fonctionnement.

Les diagrammes et la simulation ont été faits avec le logiciel Scilab qui dans sa version 5.2.2. Ce logiciel possède quelques péchés de jeunesse comme la graduation en fréquence dans le plan de Black ou le réglage en pulsation pour la simulation en sinusoïdal. Il y a aussi quelques fonctions déficientes, mais vu la simplicité d'usage et les performances offertes ne critiquons pas ce logiciel libre et gratuit.

Il suffit d'être prudent et de bien regarder ce que l'on fait.

Les fonctions

Le bateau

Après application de la transformée pour des conditions initiales nulles, la fonction représentant le bateau s'écrit :

$$\frac{\theta}{\alpha} = \frac{\frac{C_s}{C_f}}{s\left(\frac{J}{C_f}s+1\right)}$$

Fonction générale

$$\frac{\theta}{\alpha} = \frac{0,5}{s\left(\frac{s}{4}+1\right)}$$

à 6 nœuds

$$\frac{\theta}{\alpha} = \frac{0,25}{s\left(\frac{s}{2}+1\right)}$$

à 3 nœuds

Les courbes 3 nœuds et 6 nœuds sont superposées. Il y a simplement une translation de fréquence on le voit en remplaçant s par p/2 à 3 nœuds.

Le pilote

Le pilote est un dispositif d'asservissement à moteur à courant continu. Nous allons considérer ses trois pôles. Comme s'il était piloté par un asservissement linéaire classique.

Constante de temps électrique

L/R (self sur résistance). La valeur est faible quelques millisecondes

exemple : 5ms donc $\omega=200$ ou fréquence de 30 hertz hors de notre domaine. Donc négligeable

Constante de temps mécanique

Assez souvent on rencontre des valeurs de l'ordre de 10ms à 20ms. Ce qui importe c'est l'inertie ramenée sur l'axe moteur par rapport au couple du moteur. Ici nous avons une vis sans fin de petit diamètre. Donc inertie très modérée. Le rapport de réduction fait par poulies est élevé. Environ un facteur 3 donc l'influence de notre masse en rotation, l'inertie n'est vue que au $1/10^{\text{ème}}$ par le moteur. Tout au plus on pourra tenir compte de la masse de la courroie en prise directe sur le petit pignon.

Supposons une constante de temps de 19,8943 ms, pile 8hz. On est dans un domaine 10 fois plus élevé que notre domaine de fréquence. On va négliger tout en sachant que cela nous coûte quelques degrés de phase. (-5°?)

Le gain de boucle du pilote automatique

Compte tenu de ce qui précède, ce gain peut être élevé. 10 à 20. Cette valeur confère un pôle qui se situe vers un domaine fréquentiel compris entre 1,6 à 3,2 hertz. Pour simplifier la présentation et les calculs nous allons une fois encore le négliger au regard de ce qui suit. (Nous en tiendrons compte en simulation car à force de négliger des petits déphasages on risque de faire des bêtises.)

Les limites du système

Un des problèmes est celui de la limite mécanique du pilote.

Limite d'amplitude ou de force, mais surtout **limite de vitesse de sortie du vérin**

Supposons que nous soumettions notre pilote à un ordre de barre de 5° en vert ou de 15° en bleu

Dans un cas la course (en noir) sera obtenue en 1s, dans l'autre il nous faudra attendre 3s.

Si nous assimilons ces réponses à une exponentielle 63% du signal sera obtenu en 0,63 seconde pour l'une et 1,89 pour l'autre.

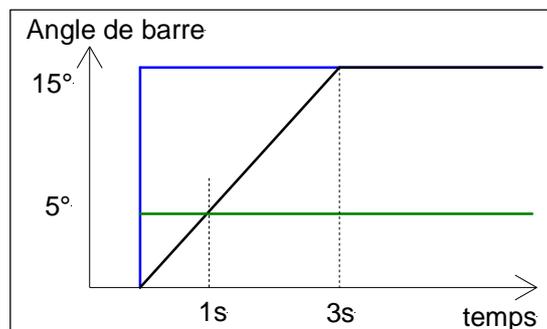


Figure 4

D'où le dilemme suivant :

- En grands signaux la constante de temps serait proche de 2s.
- En petits signaux la constante de temps serait proche de la demi seconde

Comme nous devons assurer la stabilité globale du système nous assimilerons notre pilote à un système linéaire de constante de temps de 2 secondes. En petits signaux la réponse sera meilleure et le déphasage apporté sera moindre. Donc premier ordre avec $T = 0,5$ soit un facteur $(1+2s)$ au dénominateur

Quelques chiffres.

La vitesse maximale du vérin est de 6,5 seconde pour un débattement de +/- 15°, Pilote monté conformément a sa documentation. Sa vitesse maximale est donc de ¼ rd pour 3,25 ou **0,077rd/s**

Supposons un état de mer avec une houle de période **6 seconde soit $\omega=1$** .

Pour cette pulsation supposée sinusoïdale, la vitesse et l'accélération ont la même valeur d'amplitude que l'angle. (Rappel : dérivée de $A \cdot \sin(\omega t) \Rightarrow A \omega \cdot \cos(\omega t)$)

On atteindra la limitation de vitesse du pilote pour une amplitude de 0,077 rd soit 4,4° d'angle de barre.

Donc, si par une mer courte, le barreur est obligé de compenser avec +/- 5° de barre à la période de la houle, la mise en place du pilote ne pourra pas donner d'améliorations de performances.

Soit le système reste en phase à l'aide de réseaux correcteurs savamment placés et le pilote réduira les oscillations du bateau en étant en limite de performances.

Soit le système est mal calé et le déphasage est tel qu'il peut y avoir même amplification du signal et donc un comportement plus mauvais que celui que l'on aurait barre simplement amarrée.

Nous allons étudier cette fonction en boucle ouverte pour ajuster notre gain ajouter les bons réseaux correcteurs et régler au mieux la stabilité. Puis nous allons fermer la boucle et regarder les réponses indicielles (réponse à un choc énergétique.)

La fonction globale en boucle fermée s'écrit

$$\frac{\theta}{\alpha} = \frac{F(s)}{1 + \beta F(s)}$$

En basse fréquence « s » très petit $F(s)$ fonction de terme principal $1/s$ est grand. Donc la réponse à une perturbation exprimée en angle de barre sera

$$\frac{\theta}{\alpha} \approx \frac{1}{\beta}$$

Pour une tenue de cap précise Il nous faut donc bien maximiser ce terme de retour « β » constitué par la réponse lente du vérin et le gain G de la boucle

Attention : L'étude est faussée par la linéarisation du vérin. En effet, plus le signal de commande sera grand, plus le système déphasera. A à l'extrême on peut avoir une réponse totalement déphasée comme sur la figure 6. en rouge.

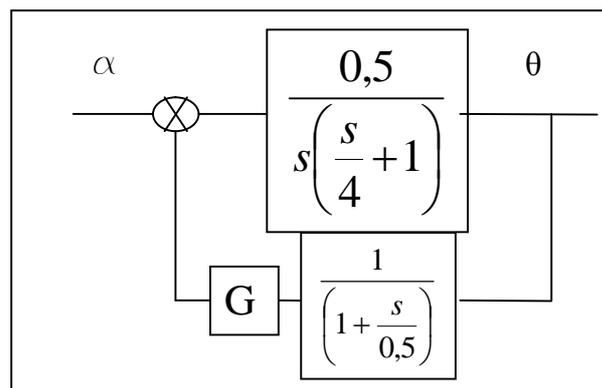


Figure 5

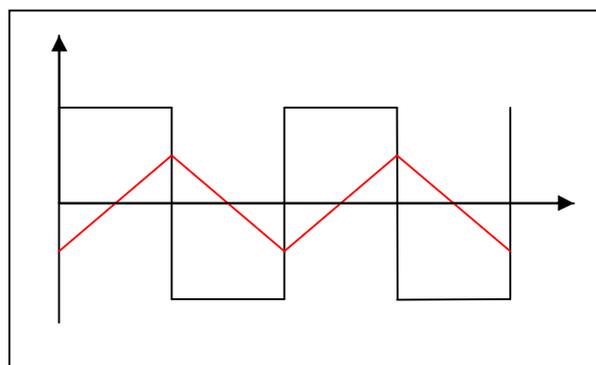


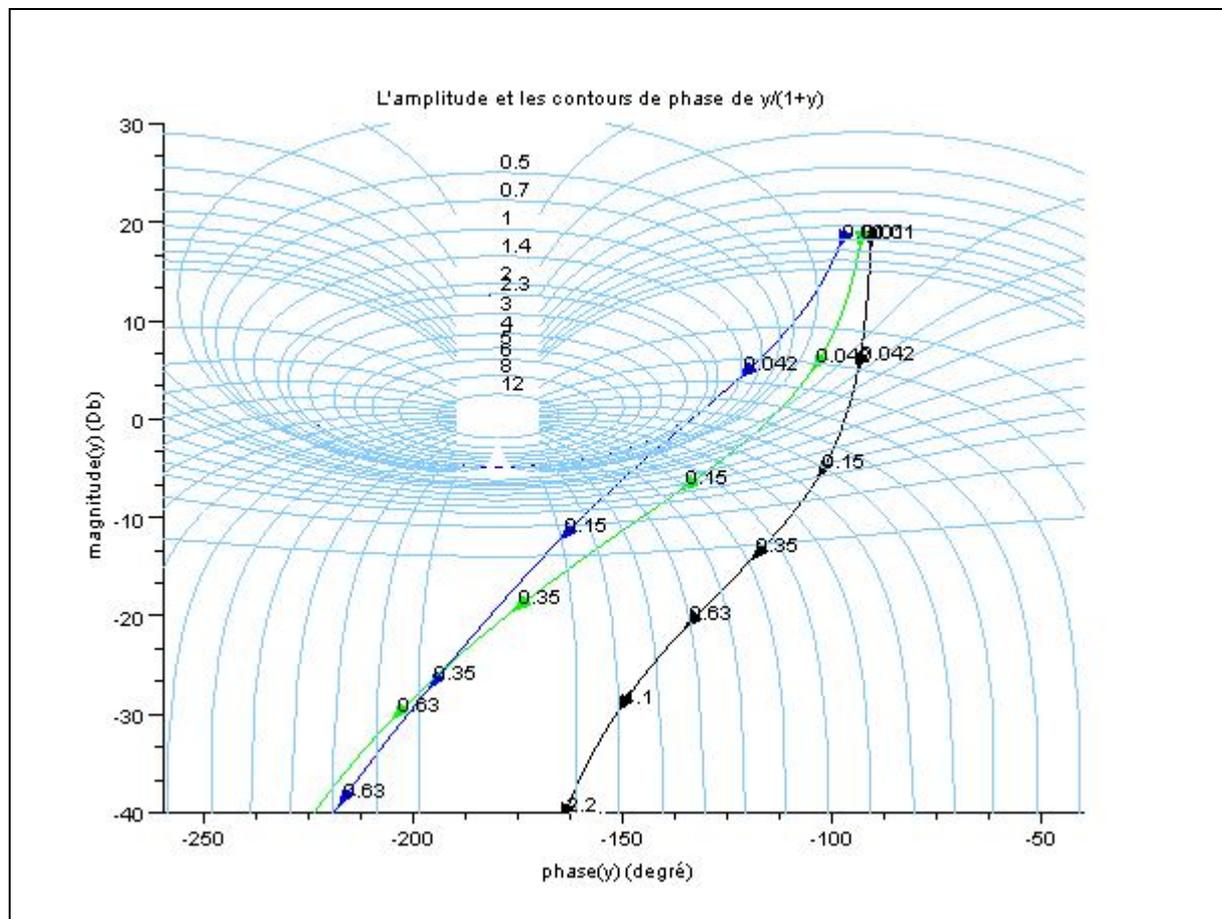
Figure 6

Quelques limites à partir desquelles il faudra faire attention :

5° de barre à période 6 secondes, 10 degré à période 12, seconde 15° à période 18 secondes.

Fonction de transfert

Stabilité



Courbe 1 le bateau et le pilote

En noir le bateau seul (fonction θ/a). En bleu le bateau et le pilote et sa fonction retard en grands débattements. En vert : pilote + bateau + réseau correcteur dérivateur $(1+2s)/(1+0,66s)$ pour anticiper un peu le signal pour le pilote.

Cela se présente fort mal.

Pour le bateau seul, courbe noire, vers une période de 12s 0,083 hz, pulsation 0,52 rd/s. le gain est de 1 (0 dB) : logique : $0,5/s = 0,5/0,52$ sensiblement 1 soit 0dB

A cette fréquence le pilote en grand mouvement retarde sérieusement les signaux : courbe Bleue

Ce retard correspond à une perte de phase de 45° environ. Heureusement le réseau correcteur rattrape la phase d'environ 20° Courbe verte sans trop faire remonter les hautes fréquences ex : le point 0,63hz qui remonte de 10dB

On peut ajuster le gain d'environ 6 dB à frôler le contour 2,3db. Contour qui donne un peu de résonance en boucle fermée environ 30% Cela ne sera pas très bon en grand mouvement mais cela sera correct en petit mouvement.

6 db correspond à un gain de 2.

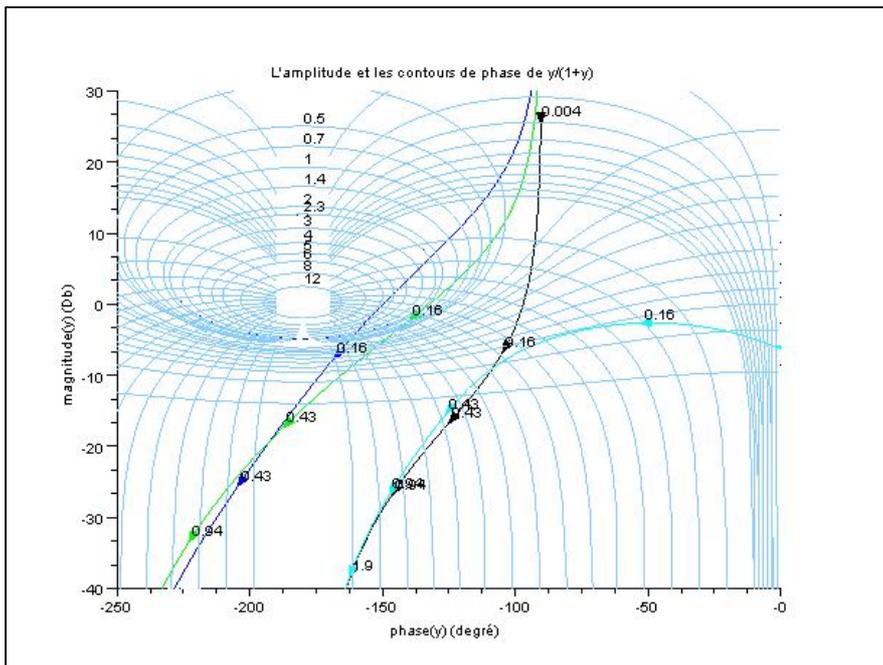
On notera quand même que notre système de pilotage est bien pénalisant en terme de phase. En automatisme, ce genre de choix est à éviter.

Courbe 2 calage du gain

La marge de phase est limitée pour les fréquences de 0,12Hz à 0,22Hz (environ 50°), et la marge de gain est correcte sans plus pour 0,4 Hz (environ 15dB). On s'est placé en grand mouvement donc on aura plutôt tendance à se situer entre la courbe bleue et la courbe noire.

On aura en boucle fermée une petite résonance de 30% : Sur la courbe bleue en boucle fermée on note une atténuation d'un facteur 6dB pour le régime statique avec -3dB à la résonance vers 0,16 Hz. En petits mouvements cela sera meilleur mais on n'est pas à l'abri d'un décrochage complet avec saturation du pilote.

Pour bien faire il faudrait adjoindre un gain adaptatif qui limite le travail du pilote en baissant le signal si ce dernier est trop fort.



Courbe 3 réponse indicielle cas 1

Sans pilote, barre amarrée une impulsion sur notre bateau l'écart de sa route : la courbe noire : écart de 0,5 pour une excitation de 1.

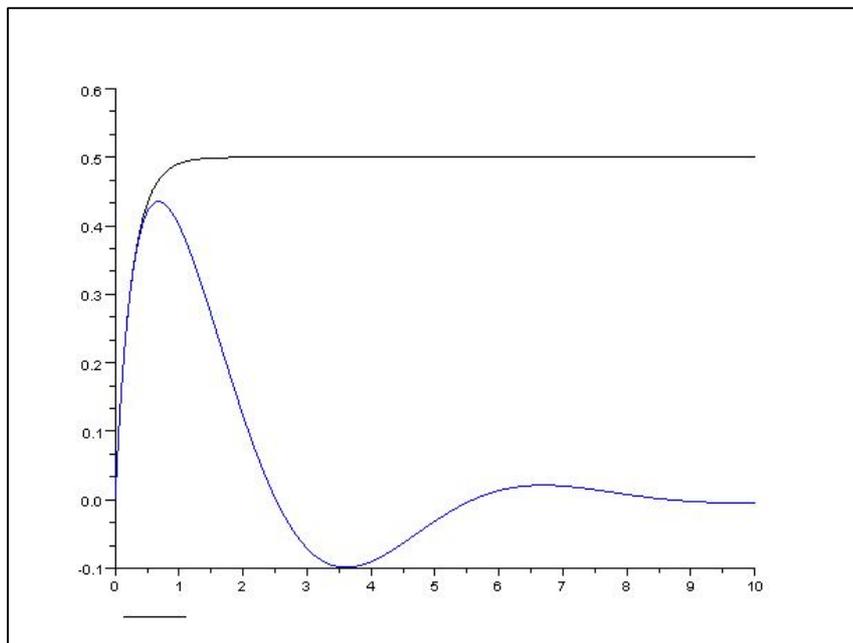
Avec pilote, courbe bleue, en dessous d'une seconde notre système n'apporte pratiquement pas d'amélioration en terme d'élongation, tout au plus l'écart de route est plus faible de 15% environ.

Entre 1 et 3 secondes on rattrape... Un peu trop on dépasse de plus de 20%

De 3,5 à 10 secondes on rejoint notre cap initial.

Notons la résonance : $\frac{1}{2}$ période 3s environ donc fréquence 0,16Hz

En petits mouvements ou vitesse un peu moindre du bateau cela serait meilleur.



Stabilité avec gyromètre.

Quand un système se présente sous cette forme, une intégrale et deux pôles simples, lesquels confèrent une courbe générale monotone descendante, une contre réaction de vitesse est tout à fait appropriée.

Par ailleurs, utiliser un signal que l'on sait être en avance pour compenser un signal qui lui donnera du retard ne peut qu'être bénéfique.

Principe de l'étude

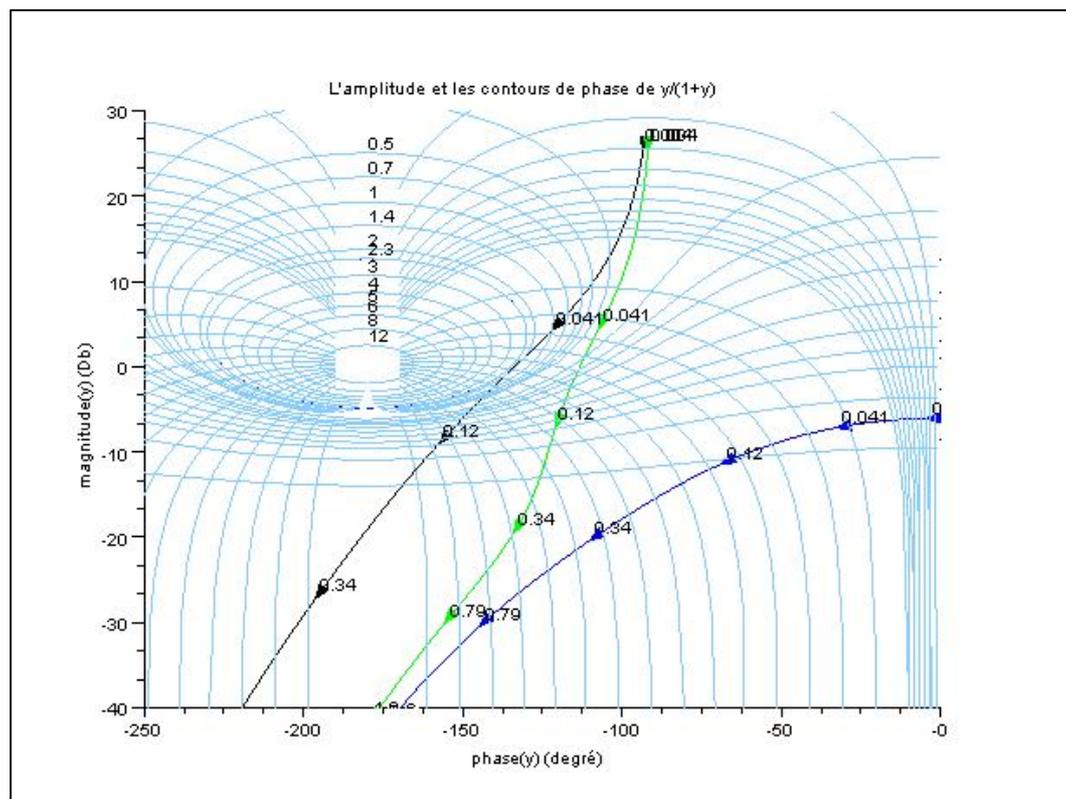
On applique le principe de superposition de deux boucles : retour vitesse+retour compas

- On part de la courbe du bateau d'origine, on la reboucle avec un terme dérivé et son filtre $s/(1+0,03s)$
- On recale cette courbe dans le plan de black avec un gain optimal stable
- On ajoute sur le même plan l'autre courbe en calant son gain
- Il ne reste plus qu'à faire l'addition des points pour situer notre courbe et la tracer.
- On referme cette deuxième boucle et on peut vérifier la réponse indicielle.

Courbe 5 le bateau le pilote et le gyromètre

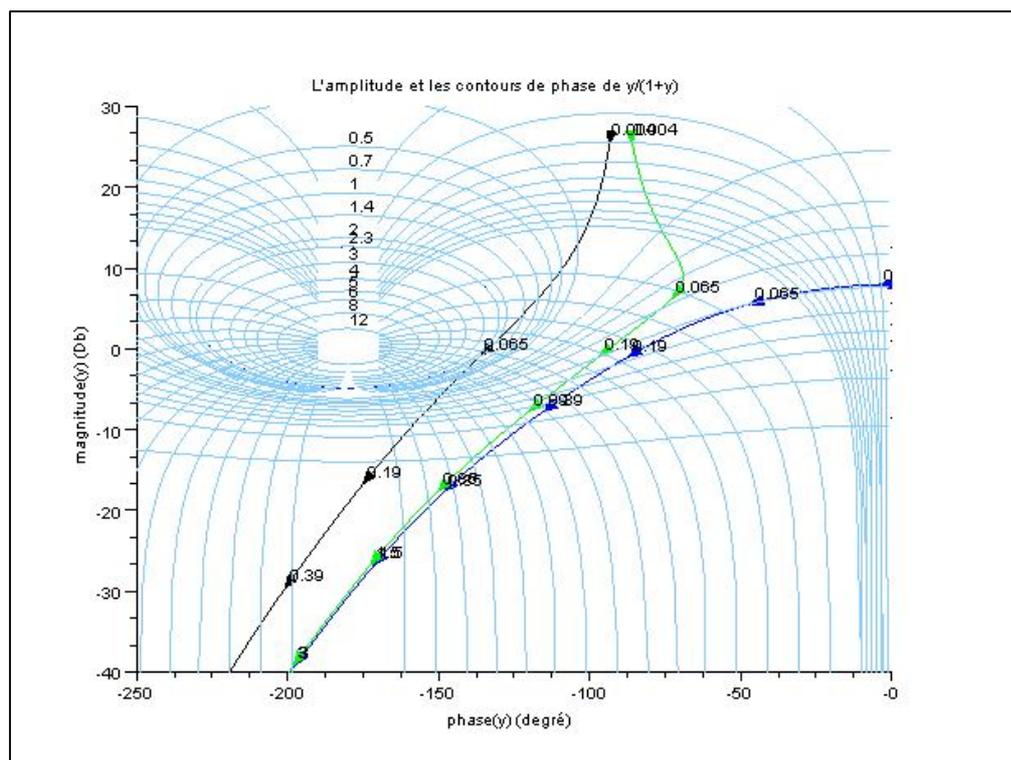
En noir le bateau, et le pilote. En bleu le gyro et le pilote. En vert la courbe résultante.

On voit que la courbe bleue attire vers elle la courbe noire. Comme elle se situe très bas dans le plan, on peut renforcer son action avec un gain de 15dB soit un facteur 5.



Courbe 6 calage du gain du gyromètre

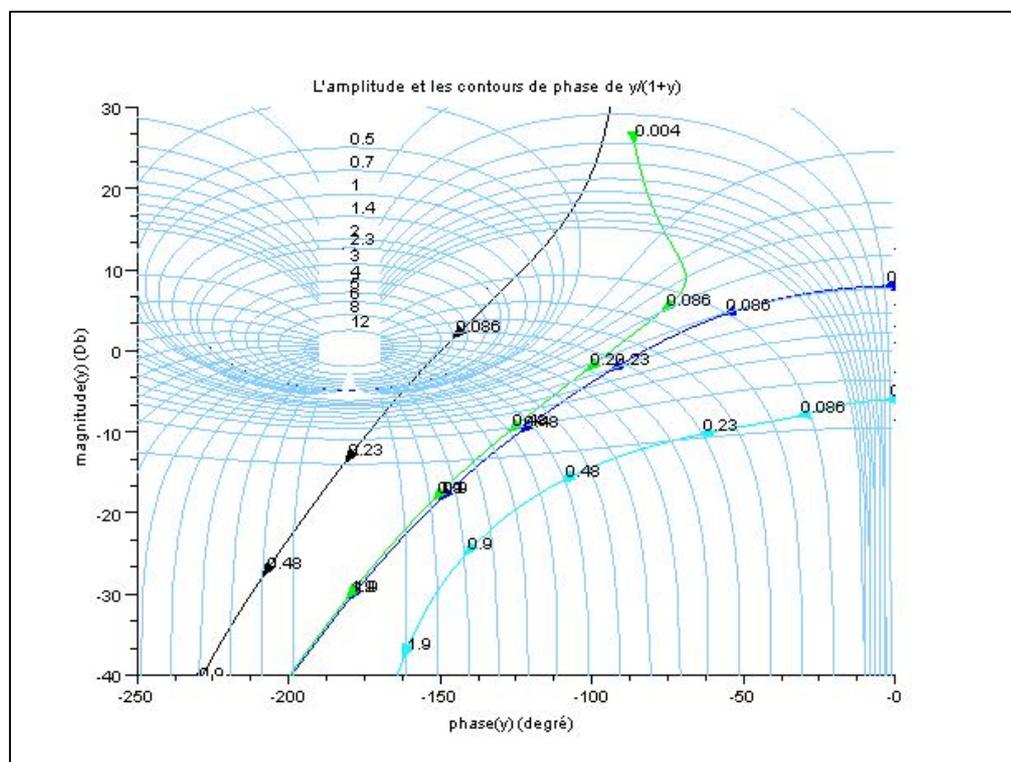
Le gain de 5 mis en place montre un effet très important sur la courbe résultante avec une marge de phase de 100° environ. On peut alors augmenter un peu le gain de la voie compas pour améliorer encore le comportement.



Courbe 7 calage général cas 2

La courbe bleue ciel est la représentation en boucle fermée de la courbe verte gain2 sur la voie compas gain 5 sur la voie gyro. Elle est monotone décroissante. Elle part un peu en dessous le contour $-10\text{dB } 12\text{ db}$ c'est un facteur 4.

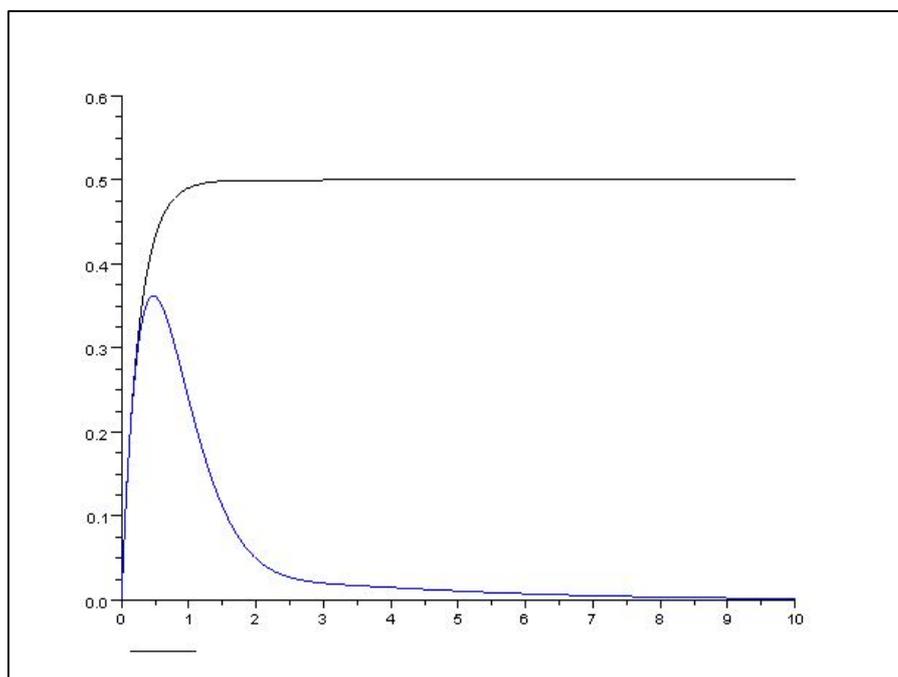
Si le pilote barre bord sur bord sans être saturé 15° le bateau ne s'écartera pas plus de 4° de sa route.



Courbe 8 réponse indicielle cas2

Avec un gain de 5 sur la boucle gyro et un gain de 2 sur la boucle directe

En noir le bateau seul et en bleu notre réponse. L'élongation n'est que de 75% du signal et le retour au cap se fait en 3 secondes environ sans dépassement.



Première conclusion.

On pourrait poursuivre l'étude avec l'analyse de réseaux correcteurs à action intégrale. Mais on sait que ces éléments fonctionnent et sont secondaires par rapport à ce qui nous préoccupe : l'obtention d'un bon équilibre performances stabilité. Nous nous en tiendrons là.

Et comme Scilab possède les fonctions Xcos() ou suivant la version scicos() qui permettent de faire des simulations avec des non linéarités, nous n'allons pas nous priver de cet outil maintenant que nous savons à peu près où situer nos gains.

Vous trouverez ci-joint des éléments du programme sous SILAB 5.2 si vous voulez jouer avec. Vous pouvez directement « copier-coller » dans l'éditeur de scilab, la couleur arrange tout.

```

s=poly(0,"s")
t=(0:0.01:10)';
xset("window",1)
clf(1,"clear")
G0=1
G=1 //gain de la boucle asservissement sans gyro
Gd=1 // gain direct lorsque le gyro est présent
Gt=5 // gain tachy
h0=syslin('c',0.5/((1+0.25*s))); // faux bateau : sans l'intégrale
h1=syslin('c',h0/s); //bateau
h2=syslin('c',G*h1/(1+2*s)); //bateau + pilote retard linéarisé
h3=syslin('c',h1/(1+h2)); // Système en boucle fermée
//-----
h4=syslin('c',Gt*h0/(1+2*s)/(1+0.03*s)); //Bateau + contre réact tachy + filtre sur gyro(+gain)
h5=syslin('c',Gd*h1/(1+2*s)); //bateau + pilote gain avec gyro
h6=syslin('c',h4+h5); // Bateau +CR + pilote
h7=syslin('c',h1/(1+h0*(1/(1+2*s)))*(Gd/s+Gt/(1+0.03*s))); // regroupement des deux
précédentes
h8=syslin('c',Gd*h1/(1+2*s)) // bateau avec gain si gyro
h9=syslin('c',G*h1/(1+0.7*s)); //bateau + pilote retard linéarisé + réseau correcteur dérivateur
facteur 3
h10=syslin('c',h1/(1+h9));

// NFP black([h;h1],style=[color('red'),color('green')],0.0001,0.5);
black([h5;h4;h2+h4],0.004,10); // ["H1";"h2";"h3";"h4";"h5";"h6";]
//black([h2;h9;h10],0.004,10);
chart(list(1,1,12,3));
set(gca(),'data_bounds',[-250 -40; -30 +30]); // extension du ca

//bode(h,0.01,100)

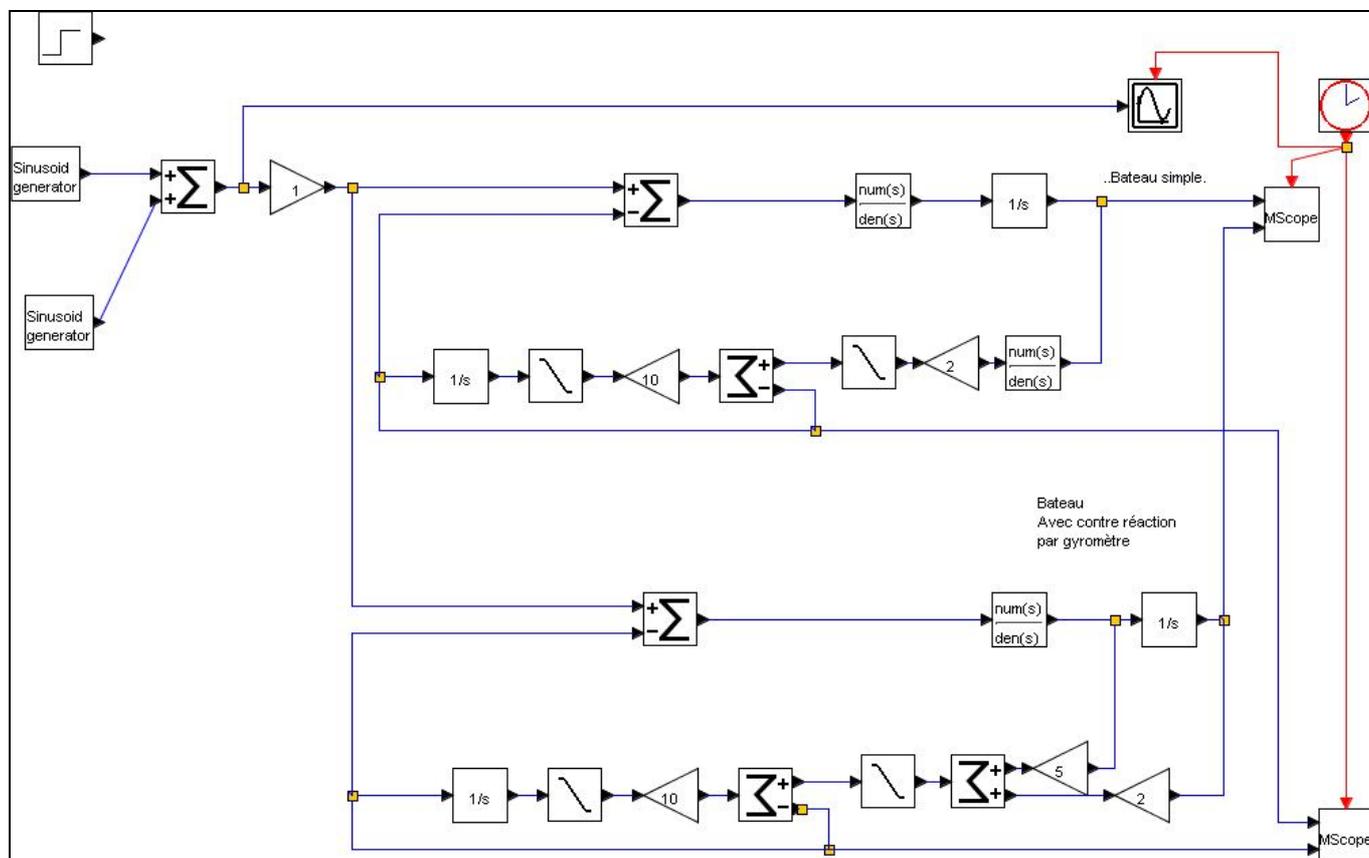
xset('window',2);
xbasc(2);
//y1=csim('step',t,H4);
y=csim('impuls',t,h1);
y1=csim('impuls',t,h7);
//y4=csim('impuls',t,H6);
//y5=csim('impuls',t,H10);

plot2d(t,[y;y1],leg=' ');
//-----

```

Simulation

Le schéma bloc est le suivant



Attention les flèches de la boucle « retour » sont inversées.

Nous allons analyser le comportement avec les gains de 2 en boucle directe avec le réseau correcteur et les gains de 2 et de 5 pour le bateau équipé d'un gyromètre.

-Il y a deux bateaux qui font route parallèle.

- L'un avec un retour simple, gain de 2 : Bateau simple
- l'autre équipé du gyro gains de 2 et 5 : Bateau avec contre réaction par gyromètre.

Il y a trois générateurs

- un pour une perturbation équivalent à un coup de barre d'amplitude maximale du pilote pendant 1 seconde et retour à zéro : Une grosse vague qui cogne
- un second sinusoïdal.
- un autre cumulable pour simuler une mer croisée ex période 12 sec + 8 sec.

Pour simuler le vérin du pilote : deux limitations une en amplitude l'autre en vitesse et une fonction intégration rebouclée sur l'entrée. Le gain a été réglé moyen 10, comme un asservissement de position.

En observateur,

- la houle ou couple perturbateur ou angle de barre (comme si nous avons 2 safrans, l'un pour semer la zizanie, l'autre couplé au pilote.)
- les deux caps bateau
- les deux positions de barre

Quelques détails.

J'ai beau dire au logiciel que les signaux en retour vont vers la gauche, il me remet les flèches vers la droite.

Par simplification je n'ai pas mis le filtre au gyromètre.

La contre réaction de vitesse est prise au milieu de la fonction bateau. La ou la dérivée est « naturelle »
On analyse barre et cap, les courbes en vert sont représentatives du bateau avec gyromètre.

Systematiquement, le premier jeu de courbes est la barre le second jeu, le cap.

Pour la simulation, Xcos() n'aime pas la suppression des blocs. On peut facilement bâtir mais en enlevant des fonctions quelquefois cela plante. Il est donc préférable de modifier le circuit par câblages en laissant des fonctions inutilisées non-cablées.

De préférences les fonctions non-utilisées seront reliées en entrée pour éviter que le logiciel se pose des questions du genre « je fais quoi ? » prenne une décision et ralentisse le temps de simulation.

1 essai réponse à un gros choc

La grosse vague équivalente à 0,3 rd de barre pendant 1s, la barre ne pouvant faire que 0,25 rd d'amplitude

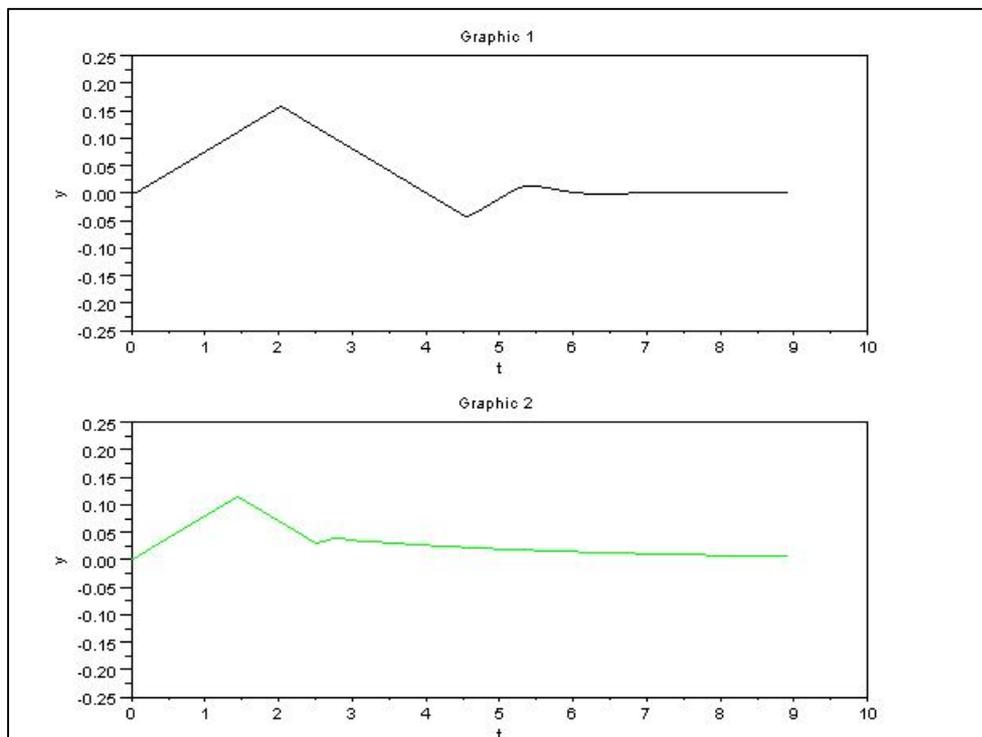
Base du vérin du TP10 monté comme sur la documentation.

La Barre :

Avec un pilote simple en noir, la sortie du vérin se prolonge sur 2 secondes.

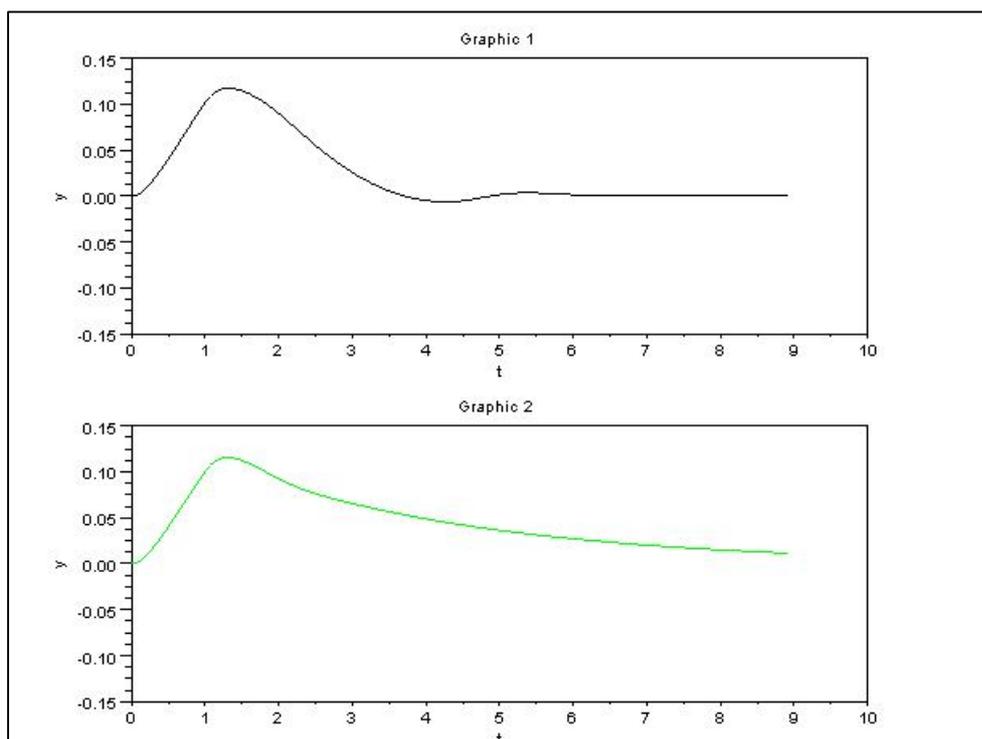
Avec le gyro, en vert, la barre est mieux contrôlée et le travail moins important. 1,5 seconde de sortie avant de se dire qu'il faut revenir au centre.

L'un comme l'autre les pilotes sont limités en vitesse et amplitude et c'est ce qui gêne.



Le Cap :

Pour le cap on voit bien l'aspect frein apporté par le gyro et l'absence d'oscillations au retour sur le cap. Mais au niveau de l'élongation c'est à peine mieux.



2 essai réponse à un petit choc

Recommençons avec une vague moitié moins haute équivalente à 0,15rd d'angle de barre 9° environ

Les résultats sont un peu meilleurs

Barre :

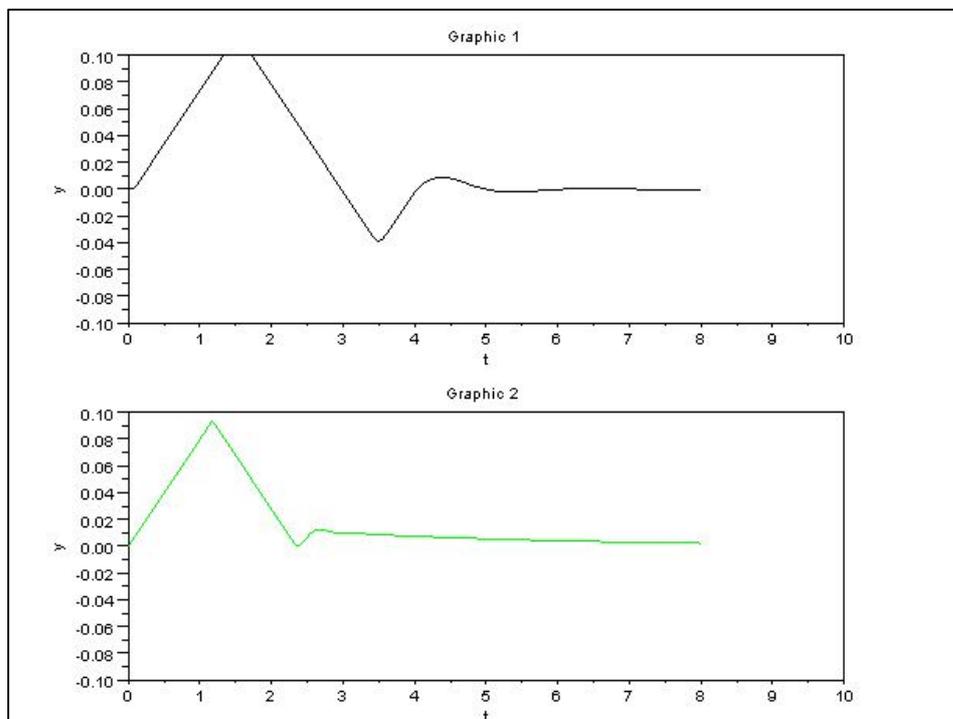
La barre du bateau sans gyro va trop loin (courbe noire)

Elle met trop de temps à revenir et le bateau oscille sur l'autre bord.

Légère instabilité.

Avec le gyro, le système est plus prompt à détecter l'action bénéfique du coup de barre ce qui permet de la ramener dans l'axe plus tôt.

On notera que la barre reste longtemps au dessus du zéro et ne revient dans l'axe que très doucement

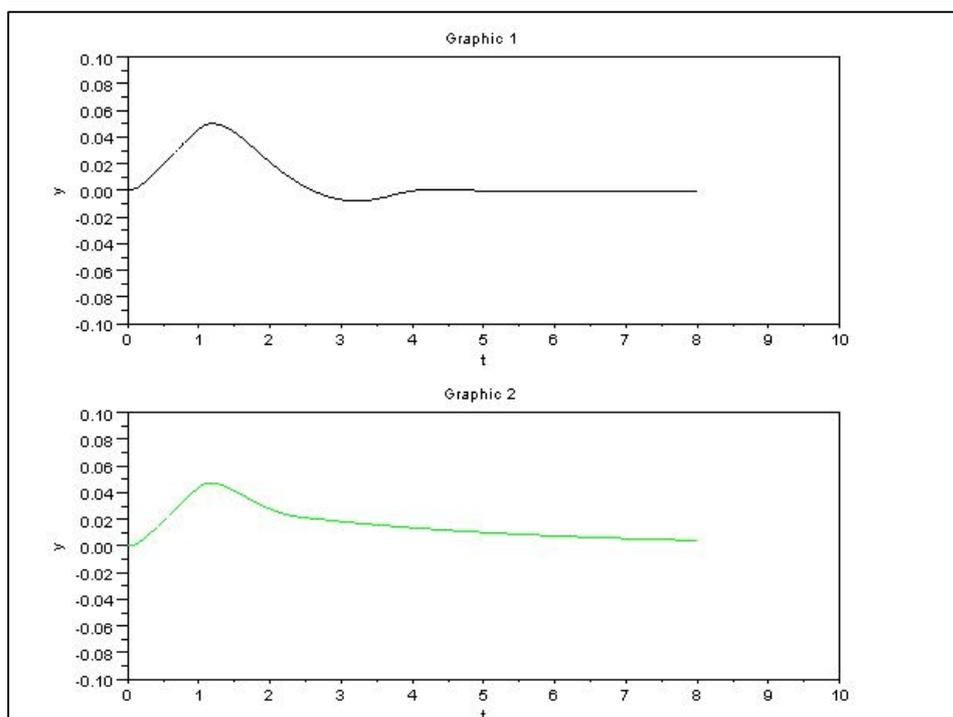


Cap :

Avec le gyro le retour au cap est plus doux. Mais on a à peine gagné sur l'élongation.

Les accélérations sont moindres et le confort de l'équipage sera meilleur.

Quelque soit le cas, Cet évènement surprend le système qui réagit mal, du fait de sa limitation de vitesse.



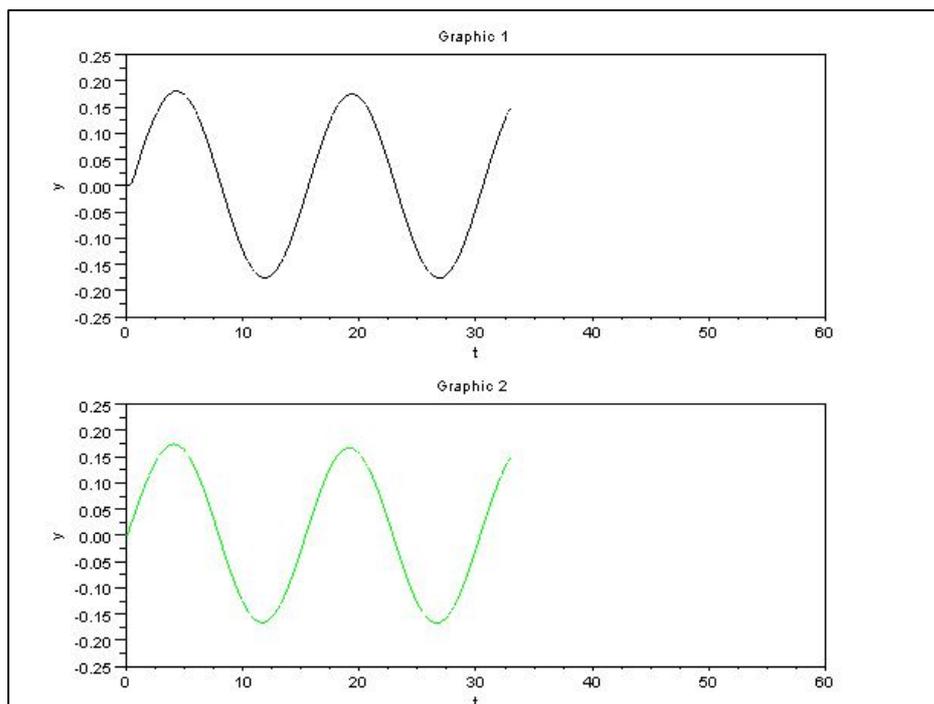
3 Cas de la houle 15s

Mettons nous maintenant dans une houle creuse en période 15s.d'amplitude maxi 0,2 rd

Barre :

Apparemment nos deux safrans semblent travailler de la même façon

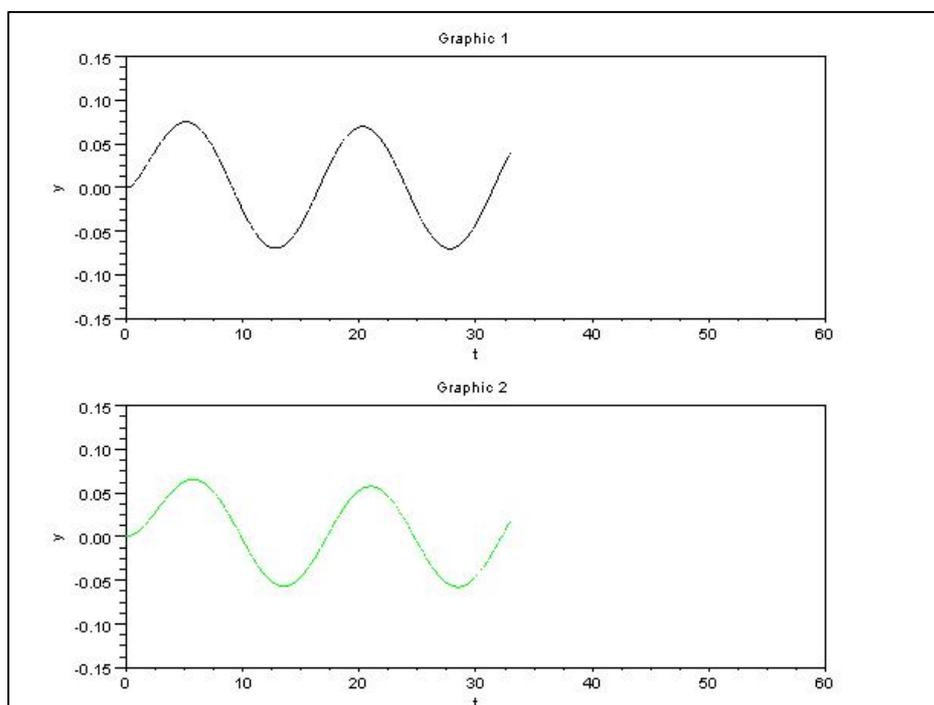
En regardant bien on constate le décalage de phase entre les courbes.



Cap :

C'est un peu mieux moins bon sans gyro, (courbe noire)

4,5° d'élongation de cap contre 3,2° avec gyro.(courbe verte)



4 Cas de la houle 8s

Mettons nous maintenant dans une houle creuse en période 8s.d'amplitude maxi 0,2 rd

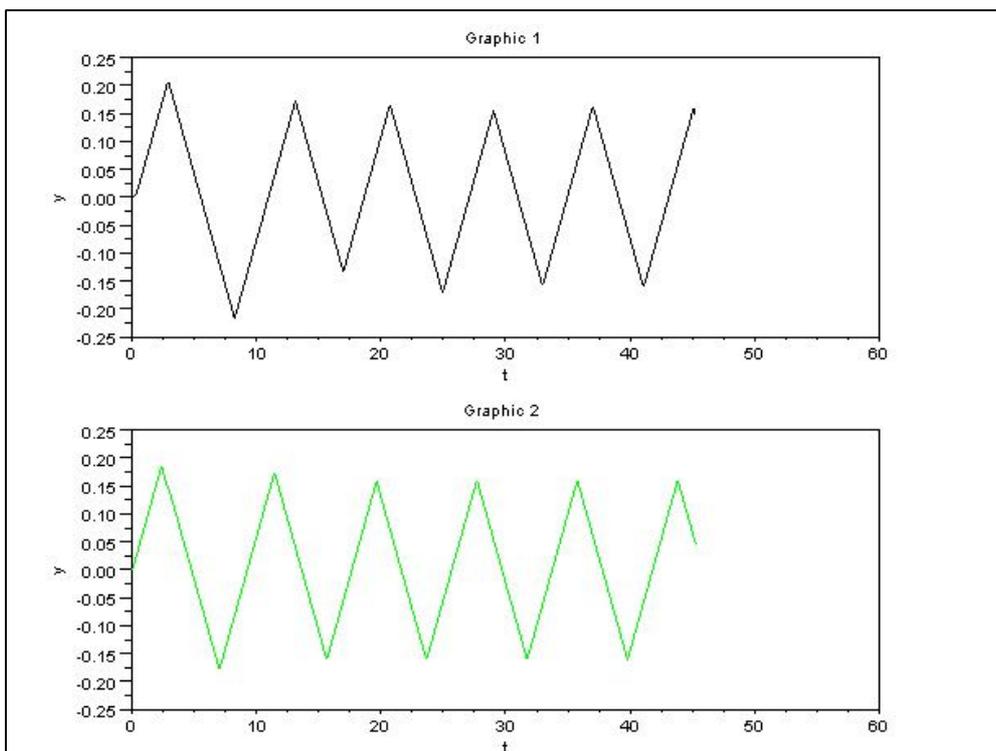
Barre :

On est saturé.

Apparemment nos deux safrans semblent travailler de la même façon, à la phase près.

Sur la courbe noire à $t=40$ secondes le vérin est à peu près centré alors qu'avec le gyro, sur la courbe verte, il est en élongation extrême et fait déjà demi tour.

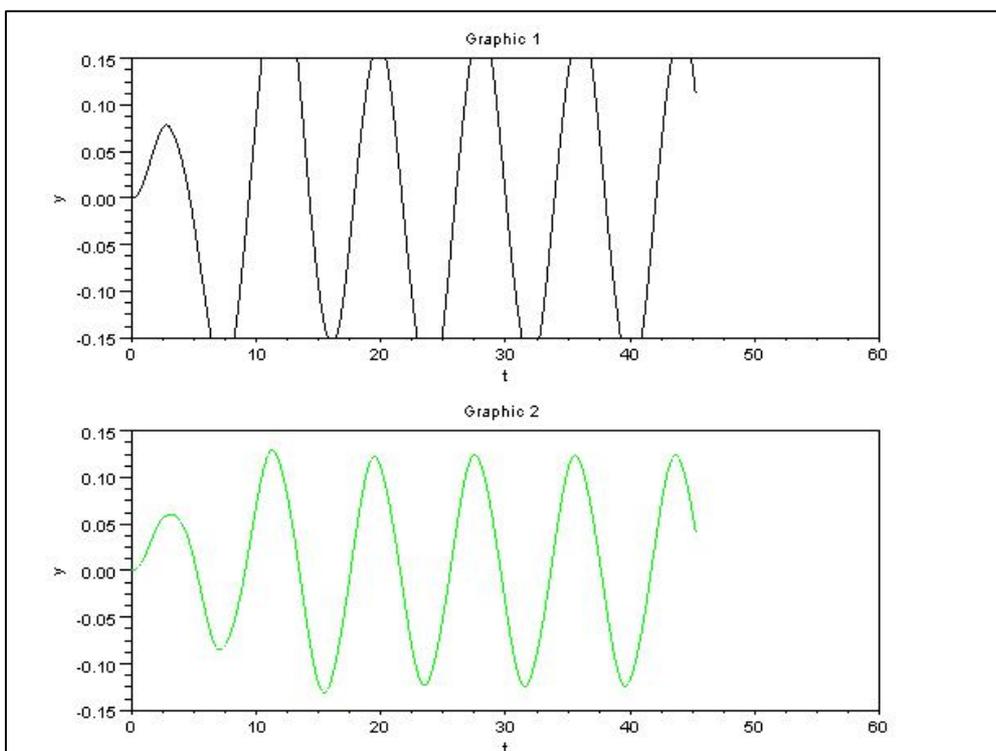
A noter la courbe en noir qui est mal centré sur les trois premières périodes



Cap :

Sur un phénomène de grande amplitude rapide et répétitif le résultat est sans appel.

Avantage au gyro.



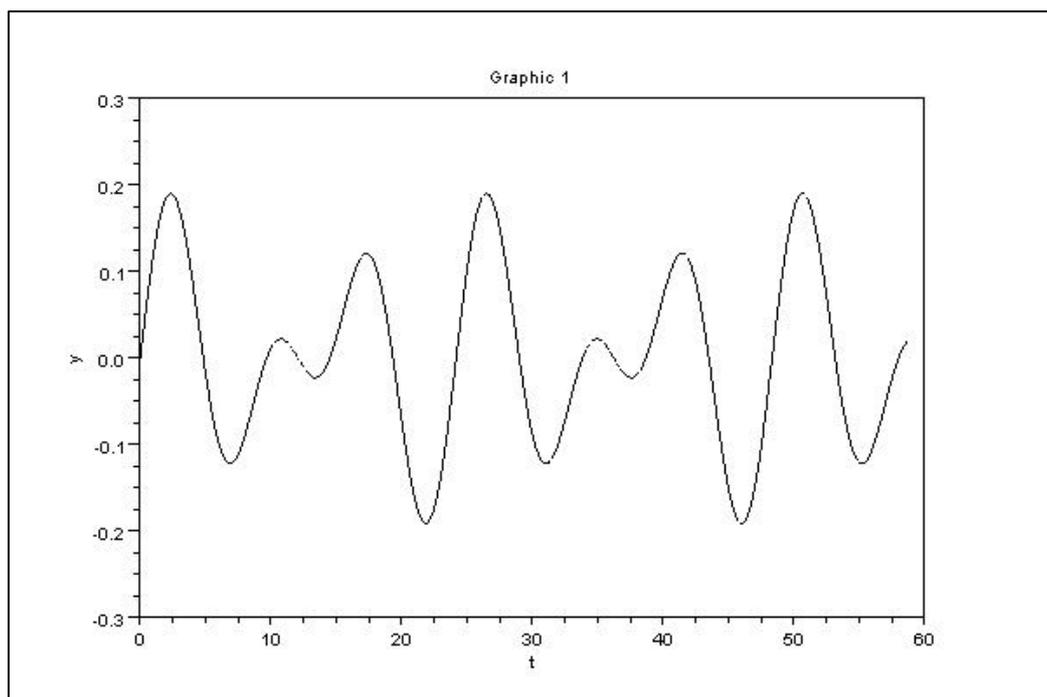
5 Essai par mauvais temps

Restons dans notre mer courte 8 secondes et réduisons l'amplitude de moitié ; Ajoutons une houle croisée : période 12s d'amplitude de 0,1rd.

Ce genre de houle :

Entre deux terres, avec peu de fond, par vent appuyé contre le courant : Tout pour plaire.

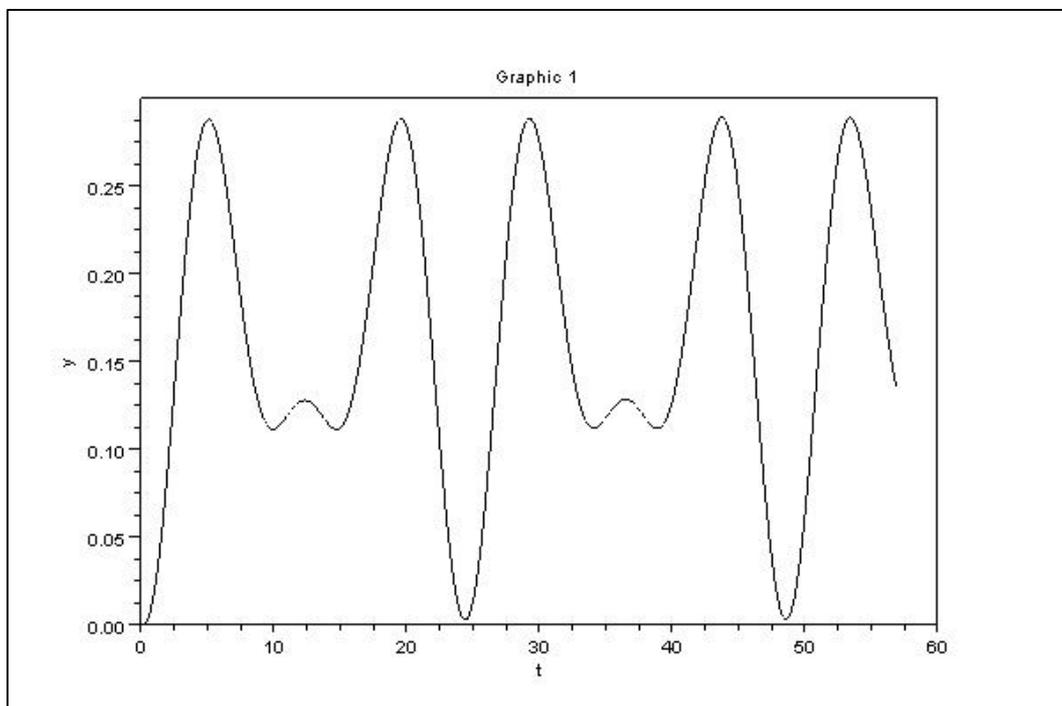
On s'attache !



Qui donnerait sans pilote, donnerait cela sur le bateau (Attention aux échelles)

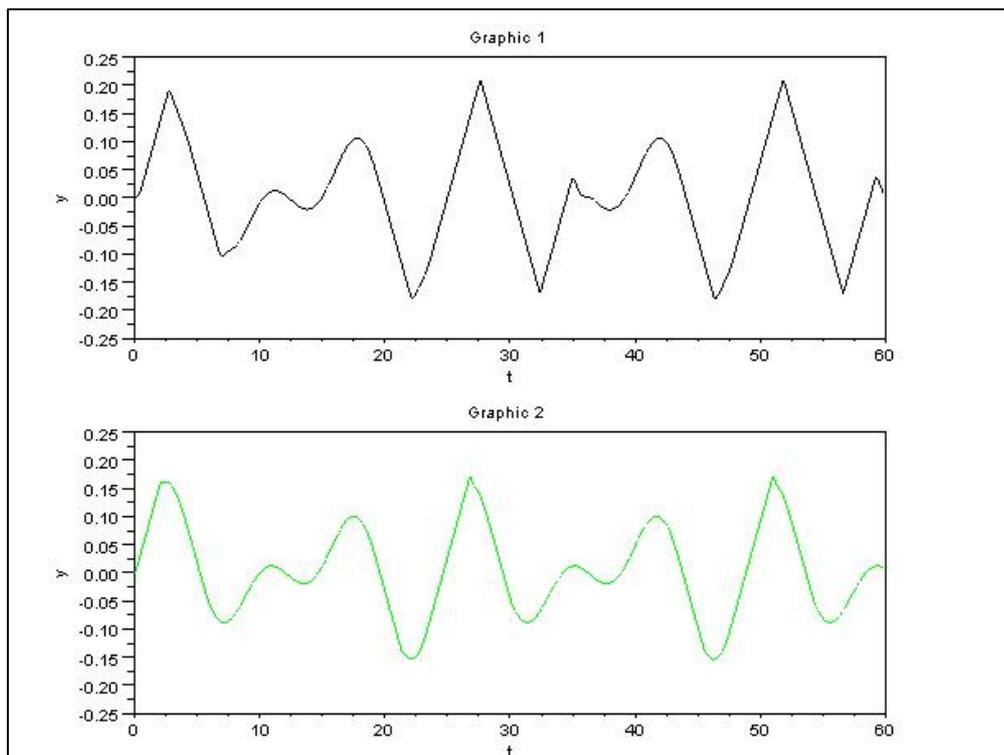
Cap du bateau barre amarrée

+/- 9° autour du cap !
(0,3 rd crête à crête)



Barre

Les deux pilotes saturent par moment. Le pilote sans gyro sature davantage.

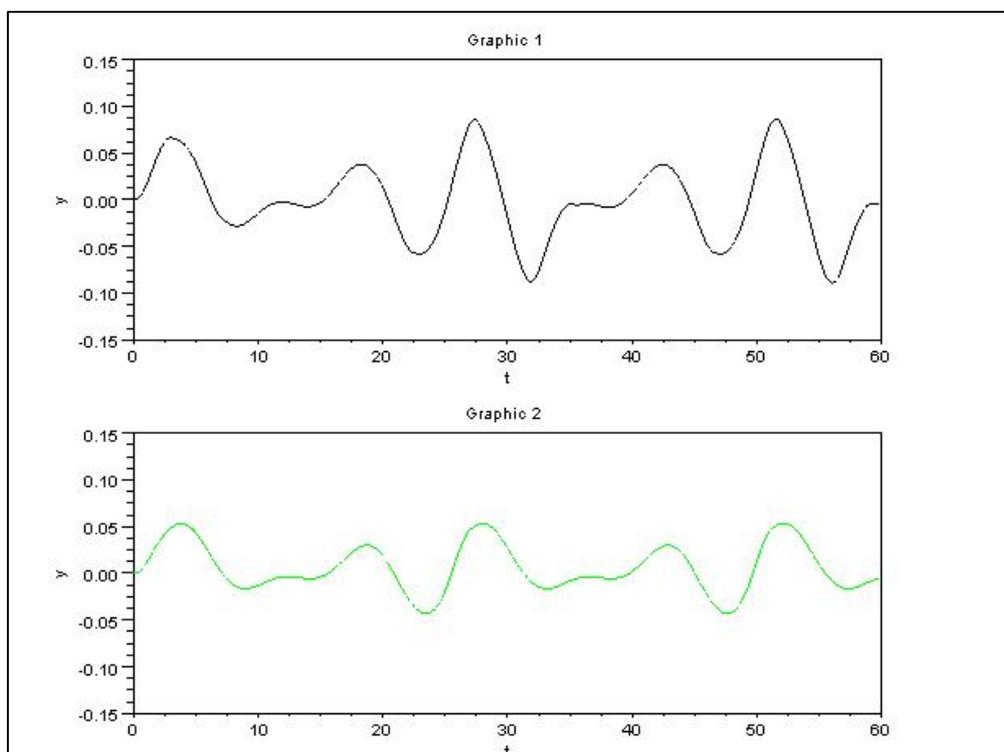


La barre travaille moins dans le second cas en vert que dans le premier en noir

Cap

Alors que le premier pilote accuse des moments de saturation et de mauvais comportement...

...le système avec gyro reste en phase et n'a pas ces élongations doubles que l'on constate sur la courbe noire.



6 Changement de vérin par mauvais temps

Toujours par mauvais temps, avec un gain 2 et le même réseau correcteur mais avec un pilote dont le vérin sort en 4s au lieu de 6,5s: 0,125rd/s au lieu de 0,08rd/s

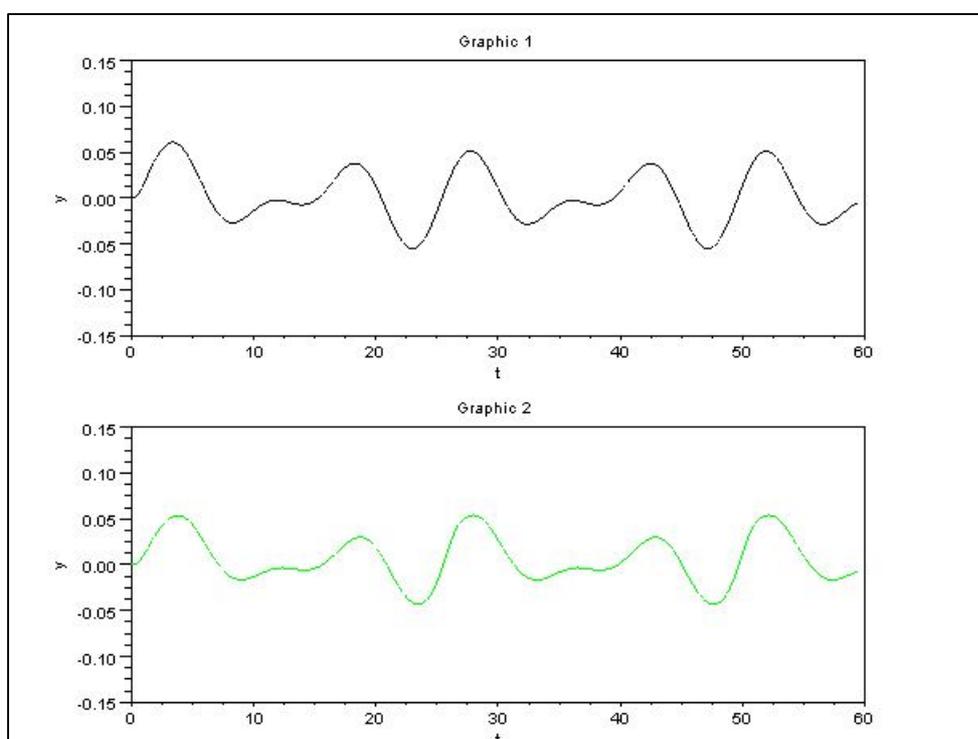
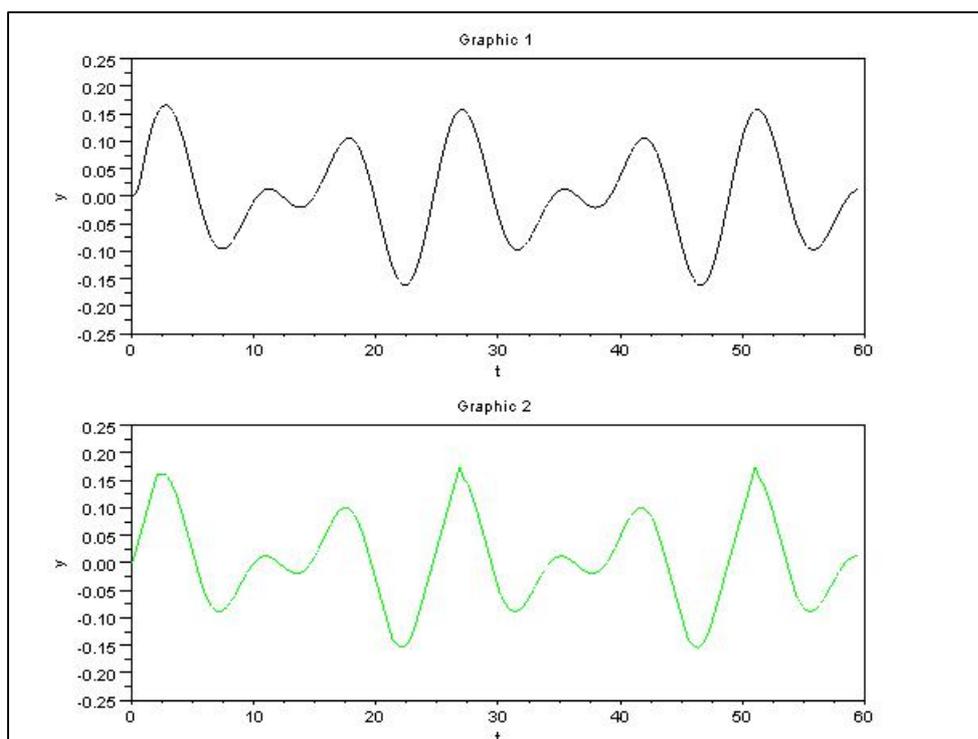
Pilote monté uniquement pour le bateau sans gyro. : Le vérin rapide ou le gyro mais pas les deux :

A noter que la barre ne sature plus en vitesse avec le vérin rapide.

La barre du bateau sous gyro, barre lente, sature toujours par moments. Mais elle conserve toujours cette petite avance de phase qui ne peut que se traduire par un petit mieux sur le bateau.

Le cap,

Une toute petite différence : Plus doux avec gyro sur les périodes à faibles élongations. Le moment où les deux vagues se compensent.



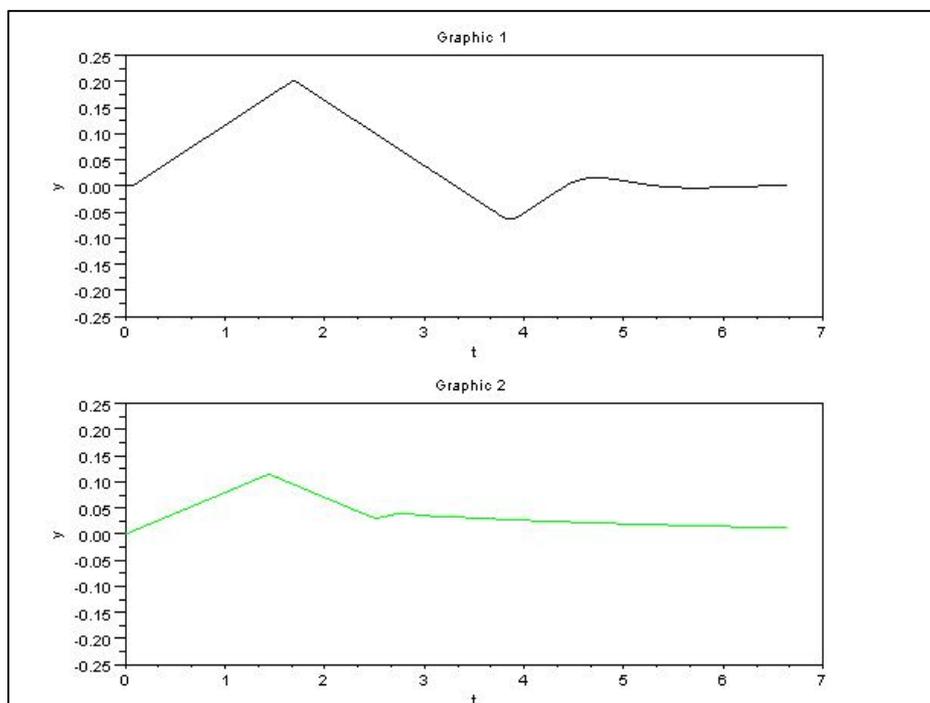
7 Le gros choc avec les deux bateaux

Barre

De nouveau notre grosse vague 0,3rd pendant 1 seconde.

La barre plus rapide va plus loin. Elle est toujours limitée en vitesse mais moins. La stabilité est du même ordre de grandeur que dans le cas 1.

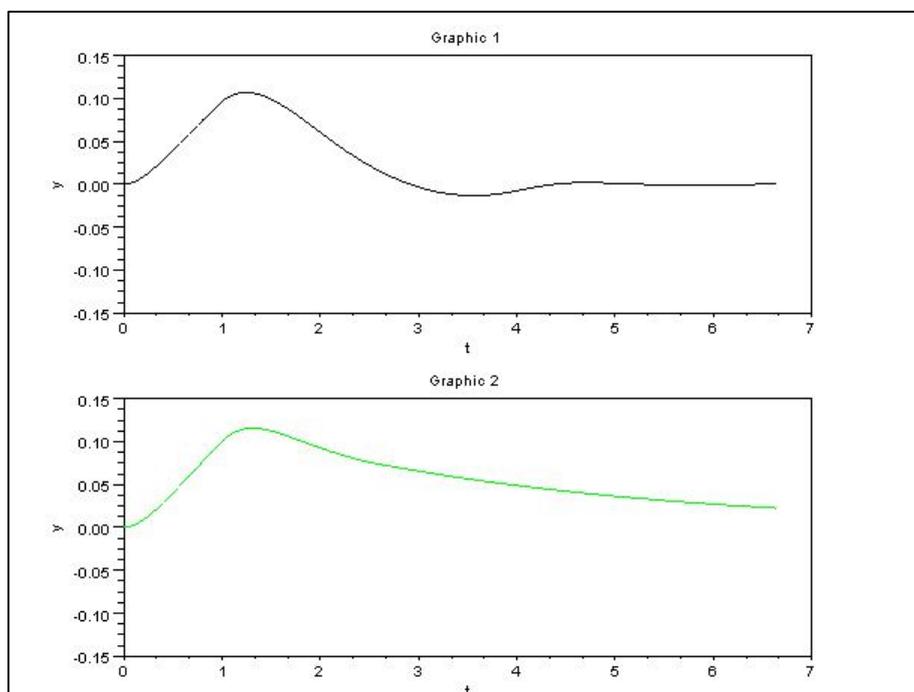
Toujours une oscillation et un dépassement inverse.



Cap

L'élongation du cap est pratiquement semblable pour les deux configurations

Toutefois sans gyro on observe Le retour possède toujours le petit dépassement qui témoigne du gain un peu trop fort.



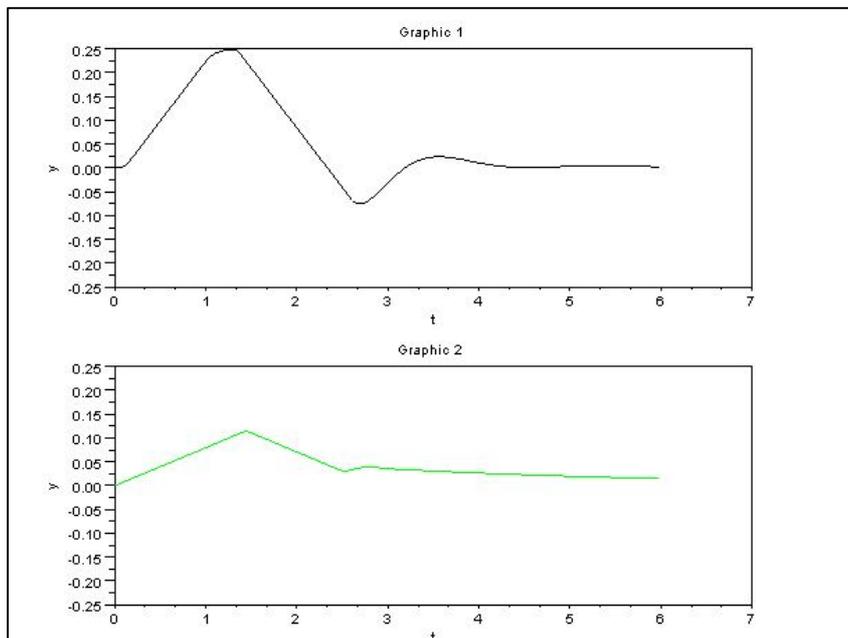
8 Le gros choc avec un vérin très rapide

Finalisons l'étude avec un super vérin de temps de sortie 2 s soit une seconde pour 0,25 radian, comme un barreur le ferait 15° en 1 seconde.

Toujours sur un seul bateau. Sans modifier les gains

La barre :

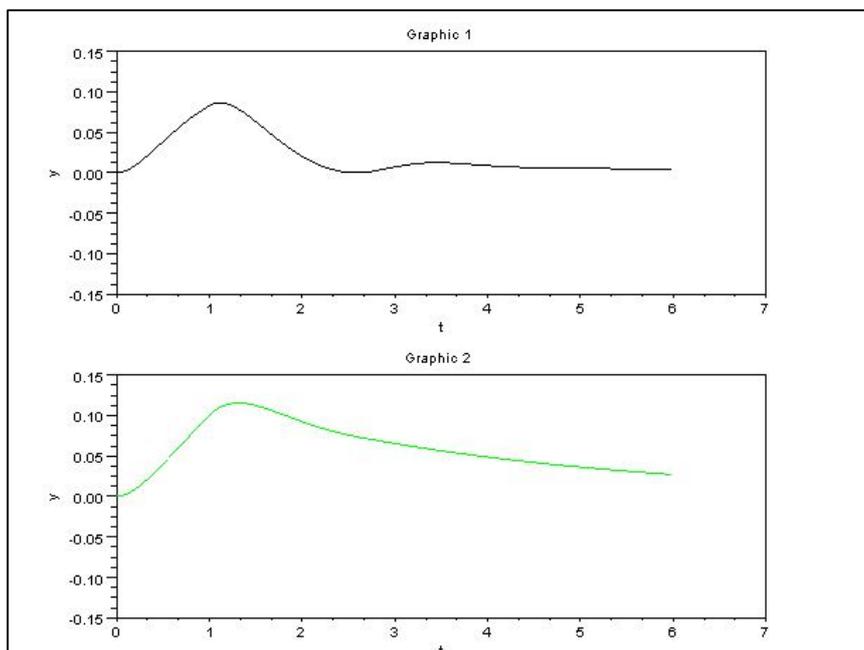
Le comportement de la barre commence à ressembler à celui de la perturbation : montée raide, plat, puis retour au centre, pas parfait, mais efficace. On atteint l'élongation maximum.



Le cap :

Le bateau s'écarte moins en cap, car la barre agit davantage en compensation. En terme d'élongation, c'est meilleur qu'avec un vérin lent + gyro.

Tandis que pour le pilote lent équipé gyro la barre joue sur le temps : moins de barre mais pendant plus longtemps : un retour au cap lent.



9 Courbes de stabilité comparées

Nos trois pilotes en boucle ouverte avec réseau correcteur vérin linéarisé et le bateau.

Gain non réglé, celui du bateau naturel : 0,5 pour 6 nœuds.

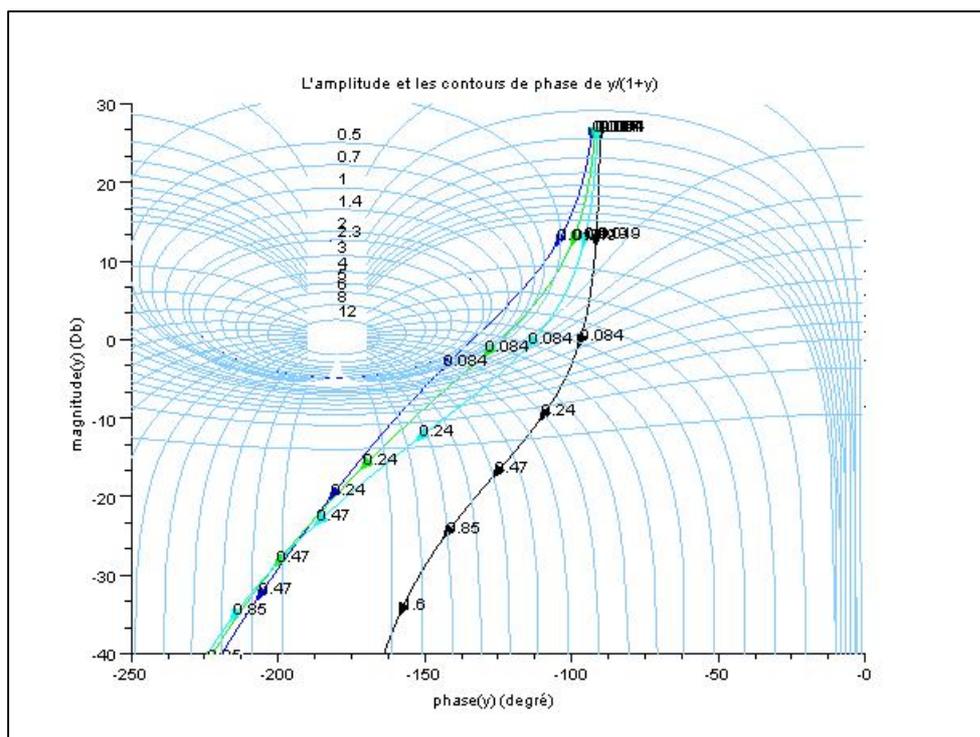
En noir, le bateau sans pilote

En bleu foncé le pilote lent (6,5s) avec réseau correcteur

En vert le pilote rapide 4s avec réseau correcteur

En bleu ciel le super pilote 2 secondes.

Entre le pilote 6 seconde et le pilote 4 on constate qu'il existe 12° de marge de phase en plus et que le pilote 2 secondes à encore environ 12° de marge en plus.



En adaptant au mieux le réseau correcteur en fonction de la vitesse du pilote on aurait :

En noir, le bateau sans pilote

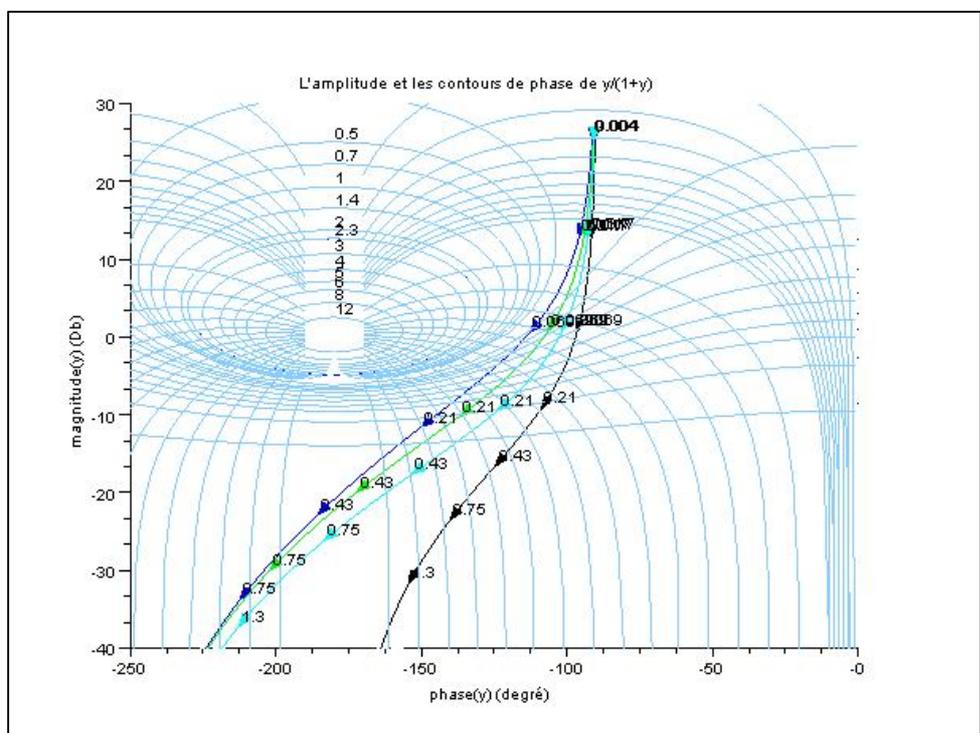
En bleu foncé le pilote lent (6,5s) avec réseau correcteur

En vert le pilote rapide 4s avec réseau correcteur.

En Bleu ciel le pilote super rapide avec réseau correcteur.

Un pilote rapide nous éloigne de l'instabilité et permet d'augmenter le gain. Ou d'être plus agréable en stabilité.

La limitation de vitesse est donc très préjudiciable au bon fonctionnement de notre boucle.



Conclusion

Par rapport à ce que j'ai fait dans cet article, on peut certainement peaufiner tout cela, avoir de meilleurs comportements et affiner les conclusions. Cette étude est simplement une approche sur la connaissance du fonctionnement d'un pilote.

Très certainement les matériels du commerce font appel à une formulation du comportement autre: La transformée en Z. Cela permet de calculer un fonctionnement, une stabilité et des lois de pilotage. On découpe le temps en tranches et le pilote réagit en tenant compte de ce qu'il a fait aux instants précédents à t-1, t-2, t-3 etc. Il travaille par à coups avec de petites impulsions de déplacement.

Les lois de stabilité, même si elles s'expriment sur un concept mathématique autre, restent globalement valables.

La présence d'un microcontrôleur permet d'accéder à des fonctions qui peuvent tenir compte des problèmes de non linéarité et de retard. On améliore encore notre réponse et on évite une instabilité grave. Je pense à des réseaux déphaseurs non linéaires qui permettent de gérer le comportement en grands mouvements et en saturation, et à des gains auto adaptatifs. Ces fonctions sont difficilement réalisables en analogique.

Et je suppose, sur les systèmes les plus évolués des lois de comportement tenant compte de l'allure du bateau par rapport au vent, voire de l'état de mer observée par le système .

Mais la, c'est du secret du concepteur et caché au sein du programme du microcontrôleur. Donc, non accessible si l'on ne possède pas le « programme source ».

Le constructeur n'en parle pas dans ses documentations qui reste d'ailleurs très évasive. Tout du moins pour les appareils d'entrée de gamme.

Le choix d'un pilote dépend de son programme et du budget à y consacrer. J'ai à bord un petit TP10 qui convient par beau temps ou pour l'usage mains libres d'été. Je sais que sa vitesse est limitée pour des conditions de mauvais temps mer courte creuse et croisée. Au-delà, un pilote plus rapide se comporterait mieux et permettrait de sortir par des temps plus appuyés.

C'est d'ailleurs un paradoxe : le système de régulation utilisé (pilote) est plus lent que le dispositif sur lequel il agit (bateau en rotation).

Sur un système simple, la mise en place de réseaux correcteurs permet d'améliorer le comportement mais pas autant que le fait un gyro

En hauturier ou en cas de mer mauvaise, le gyromètre apporte la fonction « d'amortissement » ; amortissement qui manque lorsqu'on sature le système dans des conditions trop dures. Avec le gyro, l'amélioration du déphasage confère au pilote un comportement plus doux sur le bateau. Vraisemblablement moins de consommation d'énergie et une moindre usure

Un vérin plus rapide est une solution simple et efficace surtout par gros temps. On peut se demander, si un système rapide ne revient pas moins cher qu'un gyro. Mais, plus gros moteur et électronique un peu plus musclée.

Notons que un pilote plus rapide n'est pas forcément plus gourmand. Le travail = (force * déplacement * temps) est le même. A moins d'avoir un safran lourd, la consommation énergétique est la même. Voire moins car en gagnant en phase et stabilité, le bateau n'a plus ces grandes élongations qui engendrent ces grands coups de barre mal opérants.

Dans l'absolu, il faudrait avoir connaissance de la perturbation pour la contrecarrer avant que cette dernière ne se manifeste par un écart de cap. Ce qu'il est commun d'appeler « le contrôle forward » par opposition au « contrôle feedback ».

La façon la plus élégante serait de mesurer l'accélération angulaire pour créer le plus rapidement le couple antagoniste et asservir cette accélération à « 0 ». Accélération nulle cela se traduit par une vitesse de rotation constante. Cette constante peut être nulle dans un système bien étudié.

Notre corps est sensible aux accélérations et c'est bien le paramètre essentiel sur lequel il faudrait jouer.

Si la valeur d'accélération est assez forte $\frac{1}{2} \text{ rd/s}^2$ par radian de barre à 6 noeuds, la mise en place de capteurs spécialisés se heurte au coût: Il faut éliminer les signaux parasites induit par les perturbations que sont le roulis le tangage et le pilonnement. La technologie évolue, peut être auront nous d'ici quelques années des accéléromètres angulaires sensibles et de coût abordables.

Mais attention, le fait de s'opposer à l'influence d'une perturbation sur le bateau ne supprime pas tous les effets de la perturbation. Et si le bateau reste au degré près sur son cap grâce à un asservissement pointu, l'énergie induite par la vague s'écoulera d'une autre façon : Freinage, augmentation du roulis, augmentation du tangage, coup de dérive ou un mélange de tout cela.

Quelle est l'utilisation du pilote ? C'est toute la difficulté du choix technologique de l'appareil. Certes, maintenir un cap précis dans une mer infâme peut s'avérer utile, mais faut il maintenir le cap en cas de violente risée ou laisser le bateau venir un peu au vent pour essuyer cette perturbation passagère ? En contre partie, il est préférable de ne pas partir en crabe au portant pour éviter l'empannage.

Autant de cas, autant de comportements différents, autant de réglages différents qu'il faudrait avoir.

Réglages

Je suis un peu démuni devant mon pilote qui est une boîte noire qui ne laisse pas transparaître ses secrets. La documentation et les possibilités d'adaptations sont un bras d'honneur pour un automaticien : Et je suis comme vous, je ne sais pas trop comment régler mon pilote.

Plus de gain cela oscille ? Alors mettez moins de gain !

On peut essayer, de régler le gain, au moteur, par beau temps, à la vitesse maxi. En perturbant le dispositif avec un aimant.

Les commandes 10° de barre ou virement de bord sont à éviter car il n'est pas dit qu'elles ne comportent pas une loi particulière. Je ne le sais, et il nous faut simuler une réponse indicielle sous une perturbation franche, pour voir la réponse du système à une sollicitation ni prévue ni prévisible. S'il y a un dépassement ou un rebondissement trop fort en fin de virement : ce n'est pas bon.

Mais pour le gain je ne saurais vous dire ce qu'est sa valeur exprimée en clignotements de leds ; Et au moteur la déflexion du jet de l'hélice dans le safran modifie le comportement du bateau.

Il existe deux fonctions qui confèrent un comportement oscillant, l'intégration et le seuil. La fonction seuil est, sur le plan de l'asservissement, déstabilisante. Mais elle permet d'éviter que le pilote travaille d'une façon continue pour de petites variations. Il faudra bien veiller à ne pas confondre l'instabilité de servomécanisme qui se règle par le gain avec les oscillations très basse fréquence apportée par les fonctions de seuil ou d'intégration. Dans un cas les périodes sont de 2 à 4 secondes environ, dans l'autre cas c'est plutôt 20-30 secondes et au-delà. Et ces dernières sont imparables car congénitales.

Notons que si l'intégration basse fréquence est théoriquement stable, la résolution de position engendrée par un comportement tout ou rien du pilote génère cette oscillation de très basse fréquence ; La barre ne sera que par hasard parfaitement au zéro.

Enfin, pour les grandes élongations, risée subite ou vague de l'arrière au portant, il n'y a pas de secret. Il faut de la rapidité et de l'anticipation. Et plus on cherchera à compenser plus le matériel sera gourmand en énergie.

Comportement et analyse

Ce document n'est qu'une analyse théorique de l'automatisme. N'ayant pas plusieurs pilotes ni plusieurs bateaux, je ne puis que prédire le comportement sur le plan théorique. Pour le reste, l'expérience de chacun est la bienvenue.

GilusBleu. février 2011