Drone à Géométrie Variable  
Corrigé UPSTI

**PARTIE I : Influence des mouvements des bras du drone sur son comportement**

**Objectif :** Conséquences des mouvements des bras sur le comportement dynamique du drone

# Influence de la rotation des bras sur l’envergure – vérification des exigences Id 1 et Id 1.1

1. À partir de la figure 23 de l’annexe 2, déterminer l’expression de la largeur en fonction de et des données de la géométrie du drone

Par lecture de la figure et par symétrie :

1. En déduire la valeur de la réduction d’envergure et l’exprimer en %. Conclure sur la performance liée à l’exigence de réduction d’envergure Id 1.1

A.N. :

La réduction d’envergure doit être de au minimum, l’Id 1.1 est respectée.

1. Relever pour l’essai n°4, la valeur de avant repliement (notée ) et la comparer à de la question précédente. De même pour la valeur après repliement (notée ) à comparer à .  
   Si des écarts sont constatés entre les valeurs expérimentales et les valeurs théoriques, expliquer l’(les) origine(s) de ces écarts.

Conclure sur la vérification de l’exigence liée au passage d’ouverture Id 1.

Instant du repliement, bras déployés

Les bras ne sont donc pas tout à fait déployés :

Le drone n’aborde pas de façon orthogonale l’obstacle. La largeur projetée mesurée n’est donc pas la valeur de la largeur réelle du drone. Si l’angle de lacet est non nul la largeur projetée devrait être plus grande. Si l’angle de roulis est non nul, la largeur projetée devrait être plus petite. Comme ici elle est légèrement plus petite, on en déduit que l’angle de roulis n’est pas tout à fait nul comme cela est supposé dans l’énoncé.

Bras repliés

Même si l’angle de tangage est non nul (, le drone est presque dans l’axe de l’obstacle ().

L’exigence Id 1.1 est bien respectée au vu de la figure, et même au-delà car la zone de collision mesure (au lieu de !).

# Influence de la rotation des bras sur la vitesse en bout de pale – vérification de l’exigences Id 4

1. Déterminer l’expression littérale de , la vitesse en bout de pale de l’hélice par rapport à , en fonction des données et notamment de et de .

*Commentaire : Le repère n’est jamais défini*

1. Dans quelle condition du bras et de la pale cette vitesse en bout de pale est-elle maximale ?

Déterminer dans ce cas l’expression maximale de la norme, notée . Réaliser l’application numérique en déterminant au préalable la valeur numérique de chacun des termes de .

Commenter l’influence de la vitesse de rotation des bras du drone sur la valeur et sur la vérification de l’exigence Id 4.

La norme de la vitesse est maximale quand les trois composantes de celle-ci sont dans le même sens soit dans la direction . Si le drone avance, et . De plus en phase de dépliement .

Quand le bras est en fin de phase de dépliement, , et

A.N.

La vitesse de rotation des bras est négligeable sur la vitesse en bout de pale .

, l’exigence Id 4 est donc vérifiée.

# Influence de la rotation des bras sur comportement dynamique du drone selon l’axe du lacet – vérification de l’exigence Id 1.1.1

1. Déterminer l’expression littérale du moment dynamique du bras 1 calculé en selon : . En déduire l’expression littérale du moment dynamique du bras 2 calculé en selon : .

Or le mouvement est rectiligne uniforme donc .

est le centre d’inertie du bras 1

De même :

1. Déterminer l’expression littérale du moment dynamique de l’hélice calculé en selon : .

Car

1. En déduire l’expression littérale du moment dynamique de l’hélice calculé en selon : .
2. À partir des résultats des trois questions précédentes, montrer que l’expression du moment dynamique de l’ensemble , calculé en selon se met sous la forme :

où est une constante dont l’expression est à préciser.

Vol rectiligne uniforme

Par identification :

1. Expliquer en quoi ce choix de conception permet de vérifier l’exigence Id 1.1.1

Le moment dynamique de l’ensemble en selon est donc nul ce qui permet de valider l’exigence Id 1.1.1

# Influence de la rotation des bras sur l’inertie du drone – analyse de l’exigence Id 1.2

1. Compte tenu de la géométrie retenue, simplifier la forme de la matrice d’inertie totale . Justifier vos simplifications

Il y a donc une symétrie de par rapport à .

# Influence du sens de rotation des hélices sur le comportement dynamique du drone – analyse de l’exigence Id 1.2

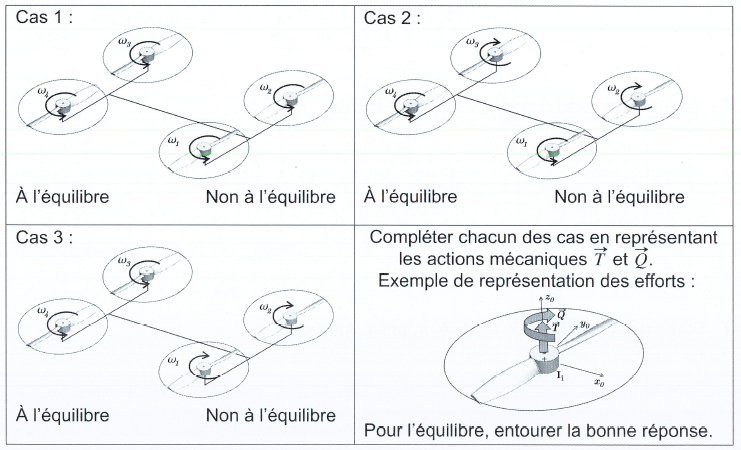
1. En déduire en %, les variations maximales d’inertie en roulis, définie par et en tangage, définie par . Conclure sur la différence de comportement en vol du drone en roulis et en tangage une fois les bras pliés.

En roulis :

En tangage

Le repliement augmente le moment d’inertie en tangage et le diminue en roulis.

1. Sur la figure du DR, représenter les actions mécaniques et pour chacune des hélices (en trait plein pour les résultantes et en pointillés pour les moments). En déduire si le drone est en équilibre ou non.

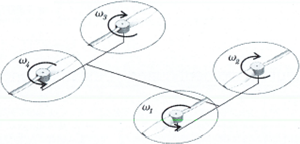


1. Quel est le comportement du drone dans le cas où et avec ?

Vous pouvez vous aider d’un schéma pour représenter les actions et justifier votre réponse.

et et

, les couples se compensent





La poussée à l’avant est plus faible, le drone s’incline vers l’avant. De plus, cette poussée sur les quatre hélices s’incline vers l’avant, le drone avance.

1. Déterminer l’expression du torseur de l’action de l’air sur l’hélice (défini par l’équation (1)) calculé au point , centre d’inertie du drone. Les composantes du torseur seront données dans la base en fonction des grandeurs géométriques, de , de , et de .
2. Que dire de l’action des hélices dans la position bras repliés pour le moment résultant en selon l’axe de roulis ? Conclure sur le respect de l’exigence Id 1.2 dans cette configuration.

Si , alors le moment autour de , =0. Dans cette position, le roulis n’est donc pas piloté ce qui ne valide pas l’exigence Id 1.2.

*Remarque : dans le texte de l’exigence Id 1.2 « attitude »« altitude », risque de contresens.*

**PARTIE II : Choix d’un mécanisme de modification de l’envergure**

1. Calculer le degré d’hyperstaticité de la modélisation spatiale du mécanisme de repliement. Détailler votre analyse en précisant selon la méthode retenue : le nombre d’équations (cinématique ou statique), le nombre d’inconnues (cinématique ou statique) et le nombre de mobilités (utile et interne) en expliquant à quel(s) mouvement(s) et à quelle(s) pièce(s) ces mobilités sont associées.

1 ddl

Pivot d’axe

Pivot d’axe

Pivot d’axe

Pivot d’axe

Pivot d’axe

Pivot d’axe

Pivot d’axe

1 ddl

1 ddl

1 ddl

1 ddl

1 ddl

1 ddl

La rotation du servomoteur lié au palonnier 5 entraîne la rotation des bras 1 et 2 et il n’y a pas de mobilités internes :

Il y a 7 liaisons pivots donc 7 inconnues cinématiques :

Il y a deux boucles indépendantes (évident) :

1. Préciser succinctement quelle(s) contrainte(s) géométrique(s) est(sont) à respecter pour assurer l’assemblage de ce mécanisme ?

Il est nécessaire de mettre en place des contraintes d’orientation sur les liaisons pivots : parallélisme entre elles par exemple.

1. En modifiant la nature de certaine(s) liaison(s), proposer un modèle de mécanisme de repliement isostatique basé sur un double système 4 barres.

Justifier votre proposition en reprenant le calcul du degré d’hyperstaticité.

En remplaçant les liaisons pivots par des liaisons sphériques en et , le mécanisme devient isostatique :

Deux mobilités internes apparaissent, rotation propre des bielles 3 et 4 :

Il y a 3 liaisons pivots et 4 liaisons sphériques donc 15 inconnues cinématiques :

1. À partir du paramétrage et des hypothèses retenues, écrire la fermeture vectorielle liée à la chaîne de solides {corps 0, bras 1, câble 1 et poulie 5}.

La mettre sous la forme

1. En déduire une relation du type : .

Exprimer les constantes et en fonction des données géométriques.

1. Déterminer approximativement la valeur numérique de obtenue pour et .

Déterminer approximativement la valeur numérique de obtenue pour et .

En déduire la valeur approchée en degrés de la course angulaire nécessaire pour assurer le repliement du bras 1, lorsque passe de à .

1. Déterminer à l’aide de la courbe de la figure 12 une valeur approchée de solution du système ➀. La valeur numérique de correspondante est alors .

donne

1. Les critères de performance de l’exigence Id 1.1.2 liés au mécanisme de repliement/dépliement sont-ils respectés ?

* Rigidité avec les bras pliés ou dépliés : il n’y a pas d’oscillations sur les courbes de réponses mais les hélices et le drone sont à l’arrêt, il est donc difficile de conclure ;
* Passer d’une configuration à l’autre en moins de : en phase de repliement le passage se fait en environ, c’est donc conforme. En phase de dépliement le passage se fait en environ, ce qui est non conforme mais c’est moins important et peut être accepté ;
* Assurer une précision angulaire de : erreur de position est nulle, conforme ;
* Être de poids limité par rapport au poids total : 6% du poids total, conforme

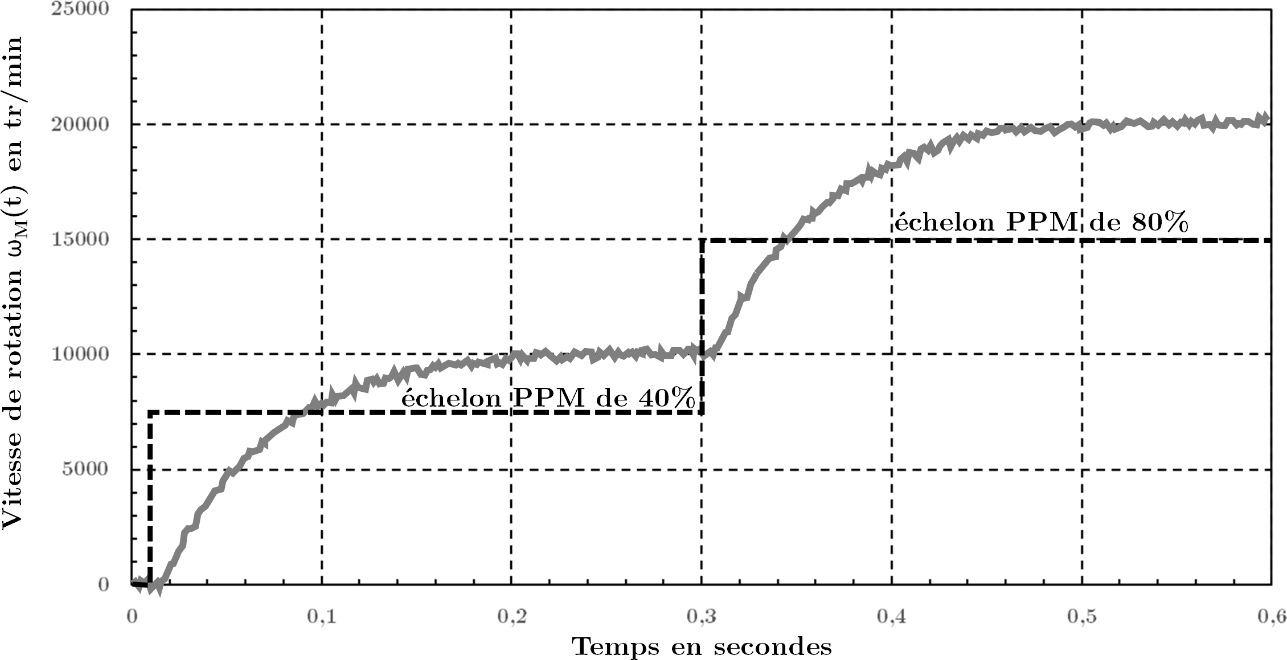
1. Expliquer l’origine physique des oscillations observées sur la position angulaire du bras 1 et dans une moindre mesure sur la position angulaire du bras 2 lors du dépliement des bras.

Les oscillations sont dues à la présence des élastiques pour exercer la force de rappel.

**PARTIE III : Analyse simplifiée de l’asservissement du drone**

# Modélisation du comportement des moteurs brushless

1. Justifier le modèle de comportement retenu pour et déterminer ses caractéristiques (valeurs numériques et unités à préciser). Faire apparaître sur la figure du **DR** les tracés permettant de déterminer les caractéristiques de .



Tangente à l’origine non nulle et pas de dépassement, la réponse à un échelon peut donc être celle d’une fonction du premier ordre :

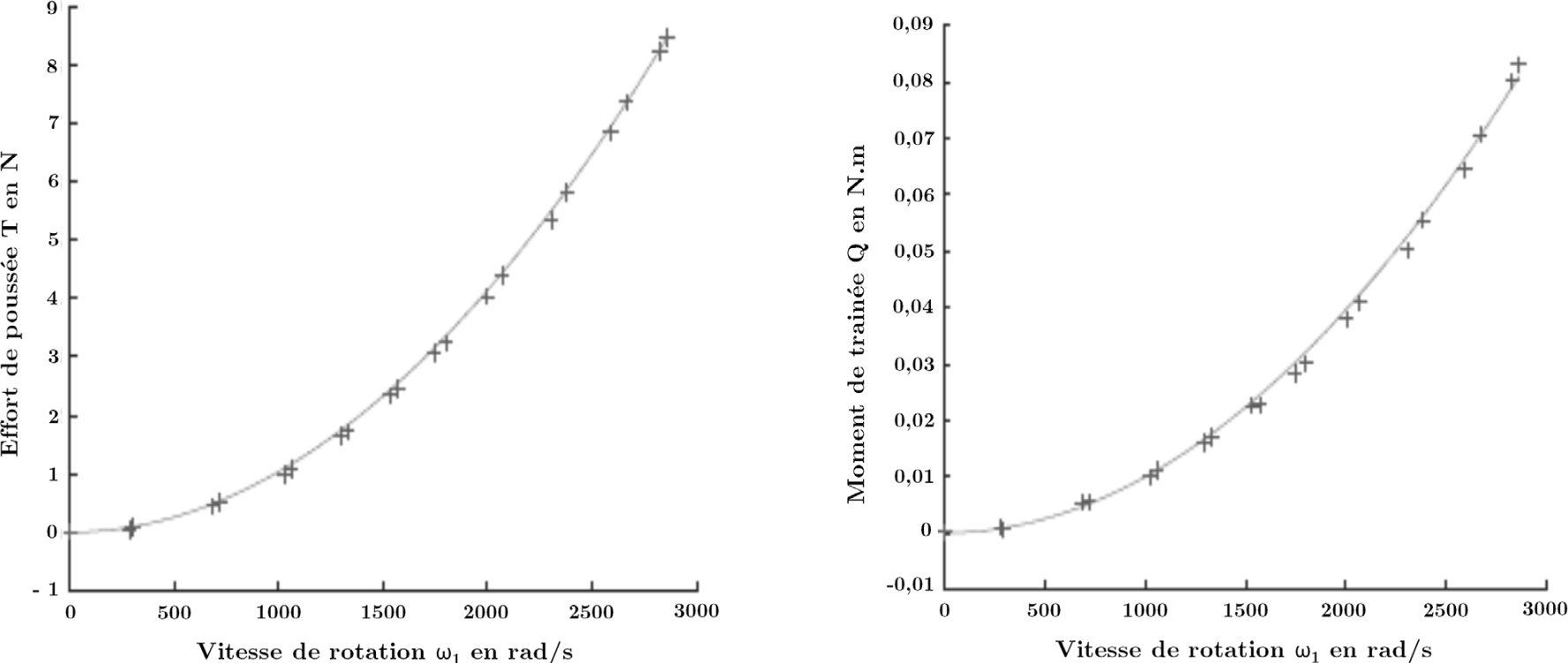
# Modélisation du comportement des hélices

1. Justifier la nécessité de décaler l’axe de rotation du moteur de l’axe du capteur d’effort d’une distance et en déduire quel capteur d’effort ou permet de mesurer quelle composante de l’action (effort de poussée ou moment de trainée ).

Il est nécessaire de décaler un des deux capteurs de l’axe de l’hélice afin d’avoir un bras de levier et de mesurer le moment de trainée.

Le capteur décalé est le capteur : il permet donc de mesurer le moment de traînée et le capteur mesure l’effort de poussée .

1. Proposer un modèle de comportement linéarisé de la variation de l’effort de poussée et en fonction de la variation de vitesse de rotation autour du point de fonctionnement étudié   
   () et valable dans le domaine de variation de considéré. Laisser apparents sur les courbes du **DR** les tracés permettant de justifier votre démarche.



# Analyse du contrôleur d’attitude en roulis

1. Justifier le choix retenu pour l’expression de et déterminer graphiquement les valeurs numériques et unités des paramètres caractéristiques , et . Faire apparaître sur la figure du **DR**, les constructions permettant de justifier les valeurs proposées.

Quand , la phase tend vers et la courbe de gain a une asymptote à 0 dB.

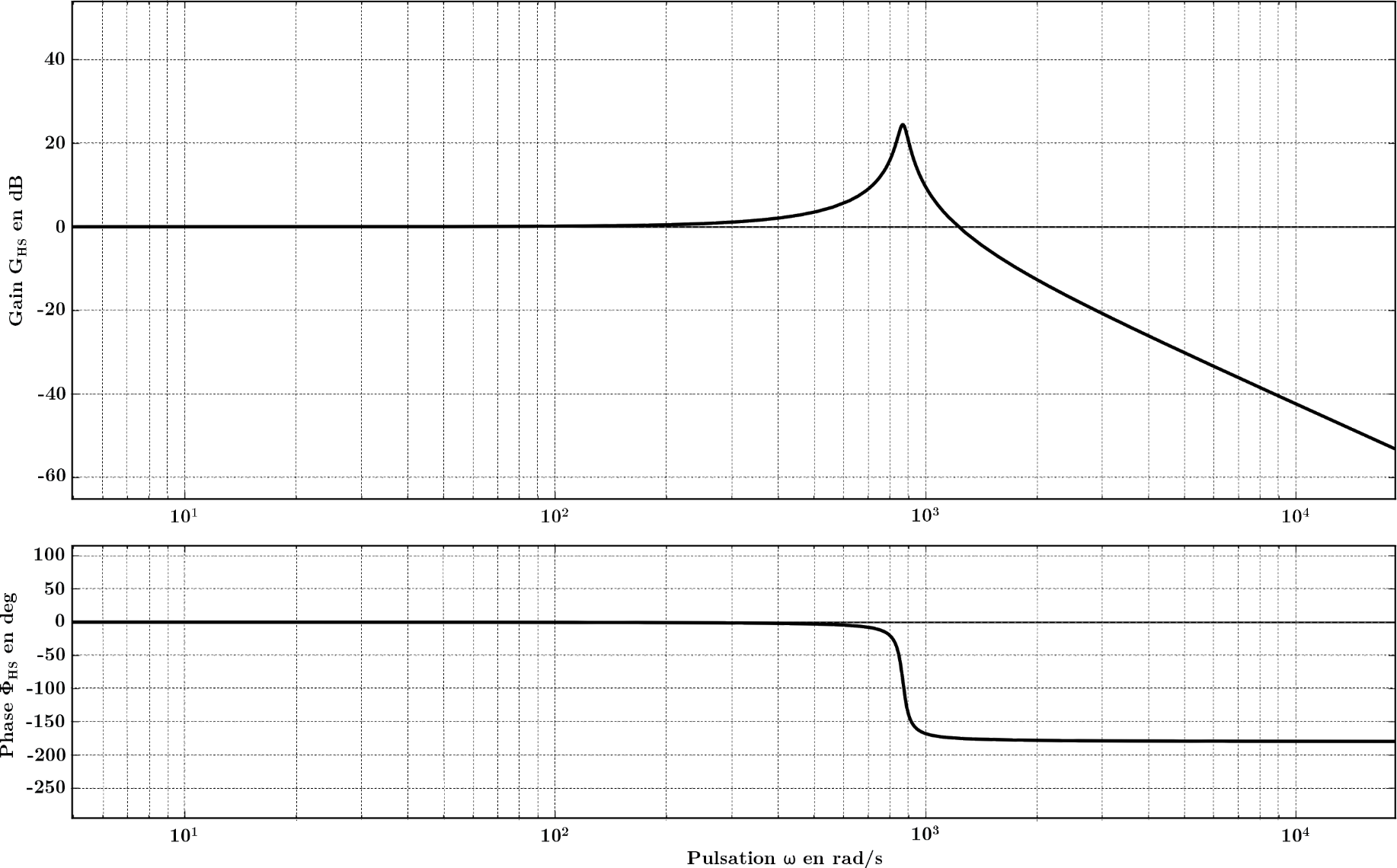
Quand , la phase tend vers , la courbe de gain a une asymptote de pente de /décade.

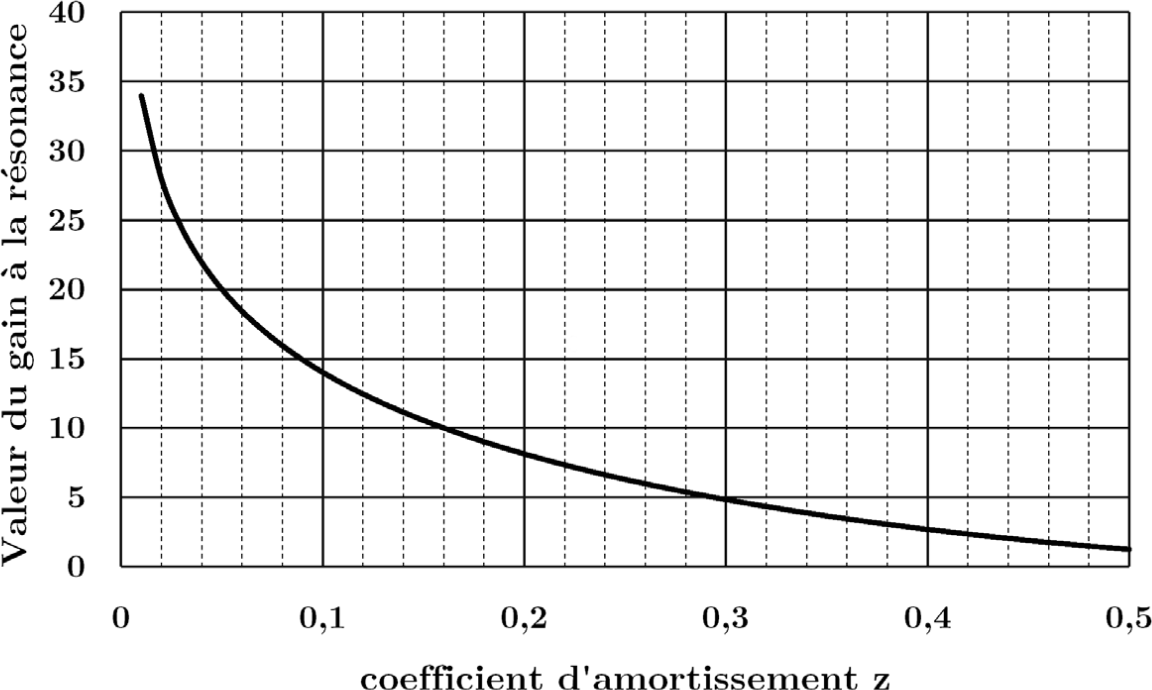
Le modèle choisi pour la fonction est donc correct.

La courbe de gain a une asymptote à 0 dB quand , le gain

Pour ,

Il y a une résonnance donc et à la résonnance le gain de la réponse est de . Donc d’après l’abaque,

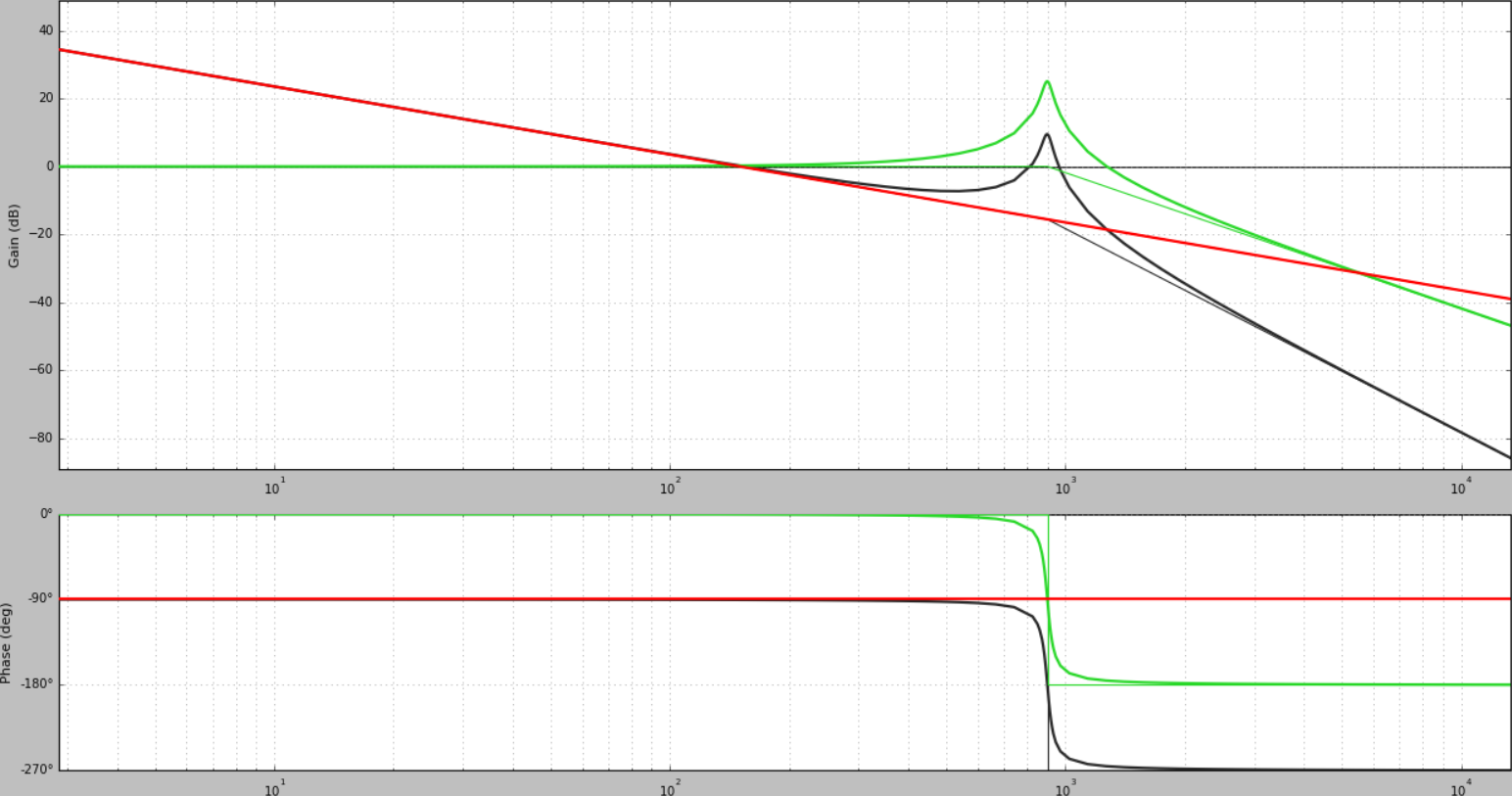




1. Tracer, sur la figure du **DR**, les courbes de gain et de phase de la réponse fréquentielle de la fonction de transfert en boucle ouverte non corrigée, c’est à dire pour . Justifier vos tracés.

Il faut « ajouter » à la courbe précédente : la phase est donc décalée de et une pente de /décade à la courbe de gain

Intégrateur :



/décade

/décade

/décade

(tracé avec PySylic).

1. Représenter, sur le **DR**, les marges de gain et marge de phase de la FTBO si elles sont définies. Conclure sur les performances de l’asservissement en roulis sans correction (exigence Id 2).

La pulsation la plus grande pour laquelle le gain en décibel est égal à est environ . Pour cette pulsation

La marge de phase est négative

La pulsation pour laquelle la phase est égale à est environ . Pour cette pulsation

La marge de gain est négative

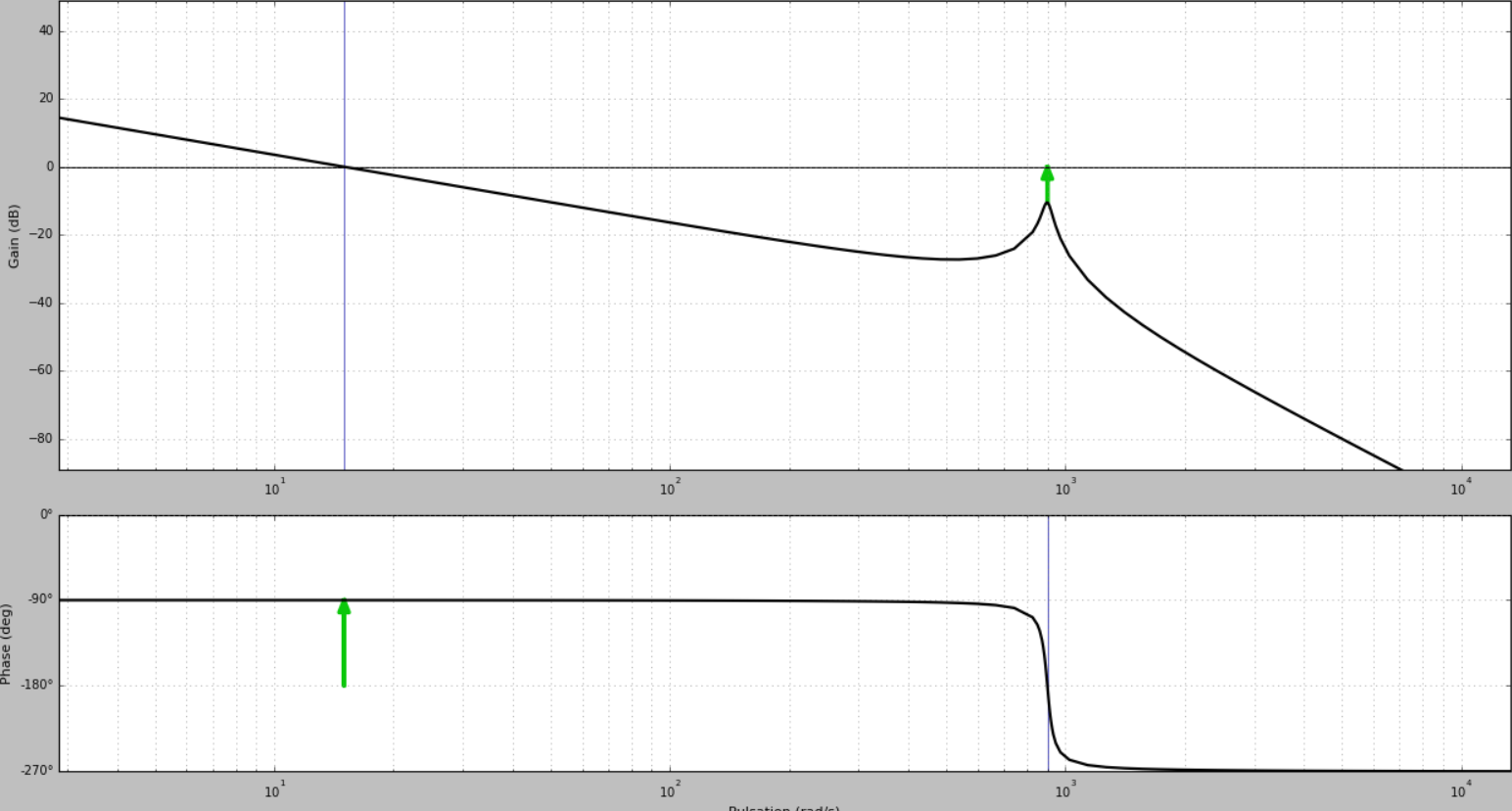
Les deux marges sont négatives, le système est instable sans correction et ne satisfait pas l’exigence Id 1.2

1. Déterminer graphiquement la valeur à donner à pour vérifier le critère de stabilité.

Pour avoir une marge de gain de , il est nécessaire « d’abaisser » la courbe d’au moins ( pour annuler la marge de gain et pour avoir la marge de gain). Soit un gain tel que :

Cette valeur est alors un maximum.

Le fait de « baisser » la courbe de gain permet aussi d’augmenter la marge de phase :



1. Déterminer l’expression de en fonction de et de . On rappelle que et est définie par l’équation (2).
2. Déterminer l’expression de la contribution de la perturbation de type échelon d’amplitude sur la valeur de en régime établi dans le cas où la consigne est nulle .
3. Quelle valeur donner à pour respecter le critère de précision vis-à-vis de la perturbation ? Conclure sur les limites de la correction proportionnelle.

Or pour la stabilité, il faut . Les deux valeurs ne sont pas compatibles.

1. Justifier que cette correction permet de satisfaire les critères de précision sur la consigne et sur la perturbation.

Le fait de mettre un intégrateur en amont de la perturbation permet d’annuler l’erreur due à un échelon de perturbation.

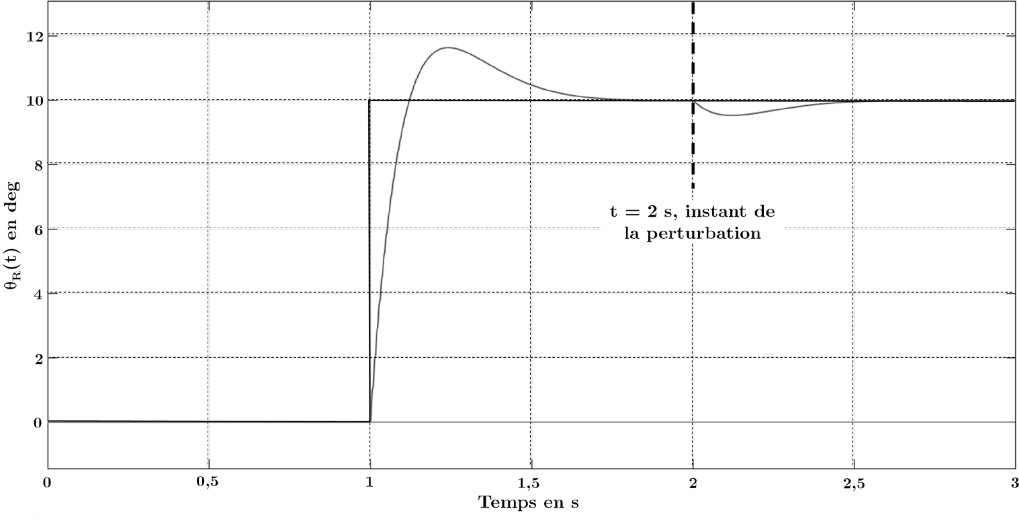
De plus, la classe de la FTBO sera 2. Donc l’erreur de position et l’erreur de vitesse seront nulles.

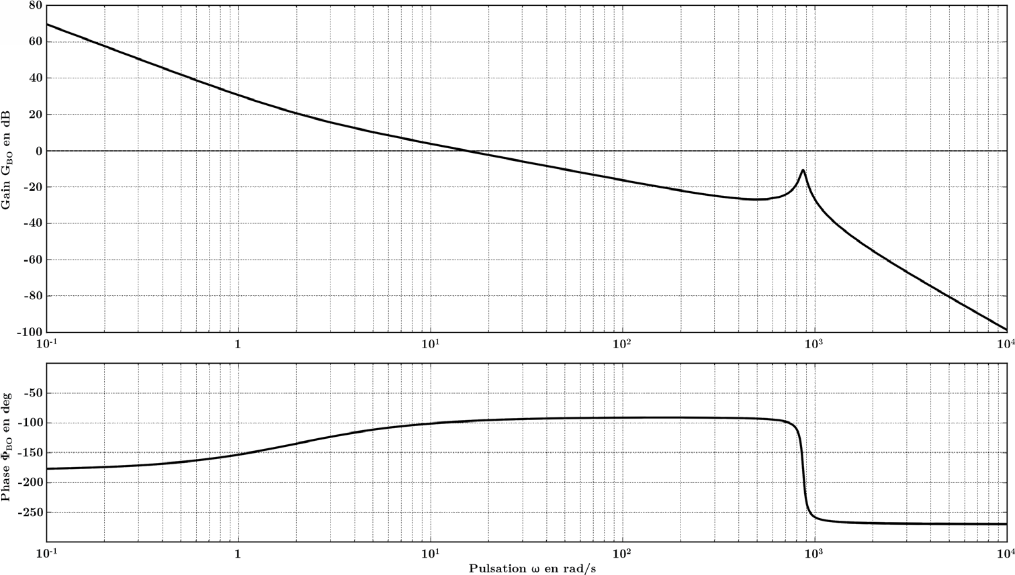
1. Vérifier les performances temporelles et déterminer les marges de gain et de phase de la FTBO avec correction. Faire apparaître les constructions sur les figures du **DR**. Conclure sur le réglage et le choix d’un correcteur PI.

En observant le diagramme temporel, la sortie tend vers l’entrée, l’erreur pour une entrée en échelon est donc nulle. De plus, après l’apparition d’une perturbation, la sortie revient vers la valeur initiale.

Les exigences de précision (écart par rapport à la consigne et robustesse vis-à-vis d’une perturbation) sont donc respectées.

De plus, le temps à , , le critère de rapidité est aussi respecté.





La mesure des marges donne :

Les deux marges respectent le critère de stabilité.

Le correcteur PI permet de respecter les critères de l’exigence Id 2.

1. Conclure sur l’influence de la phase de repliement des bras et du passage de l’ouverture sur le comportement en roulis du drone avec la correction retenue.

La phase de repliement induit une erreur sur qui a tendance à diminuer lorsque le repliement est terminé. Le drone semble « vouloir » récupérer sa position initiale.

De plus, l’évolution de la vitesse de roulis confirme l’erreur sur l’angle .

Le correcteur n’est pas assez rapide réellement. Le modèle retenu de la perturbation est peut-être trop simpliste.