

# Asservissements

## Conception d'un correcteur

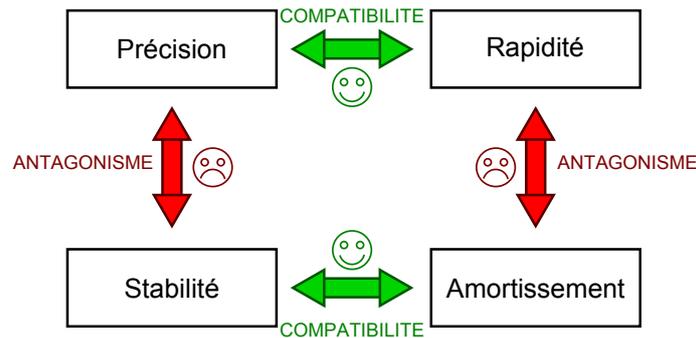
PSI - MP : Lycée Rabelais

On s'intéresse ici au choix du correcteur pour l'**asservissement en position** d'une voiture avec assistance au stationnement (modèle e-Golf). On souhaite vérifier ici que le système pourra répondre au cahier des charges donné ci-dessous.

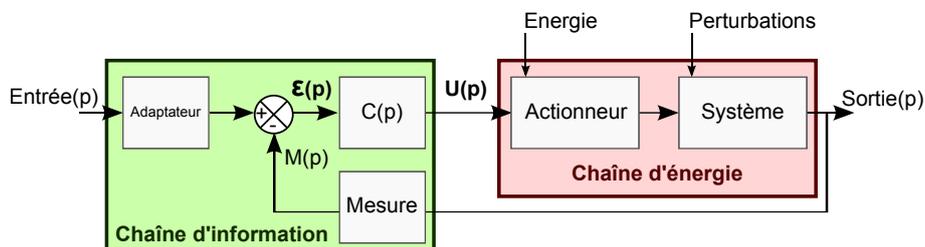
<b>Stabilité</b>	Marge de phase $> 45^\circ$
	Marge de gain $> 10$ dB
<b>Précision</b>	Écart statique nul (pour une entrée en échelon)
	Insensible à une perturbation échelon
<b>Dépassements</b>	Aucun
<b>Rapidité</b>	Temps de réponse à 5% $< 30$ s
	$\omega_{0\text{ dB}} > 5$ rad/s



Plus généralement, on souhaite qu'un système soit stable, bien amorti, rapide, précis, et si possible, insensible aux perturbations. Ces exigences ne sont malheureusement pas toujours compatibles. Par exemple, améliorer la précision ne peut se faire qu'au détriment des marges de stabilité ! Le schéma ci-dessous récapitule les grandeurs compatibles et antagonistes.



Une solution pour trouver un compromis sur l'ensemble des performances est d'ajouter un correcteur. Il existe différents modes de correction, mais nous nous limiterons à la correction en série. Dans ce cas, le correcteur est placé entre le soustracteur et le processus à commander.



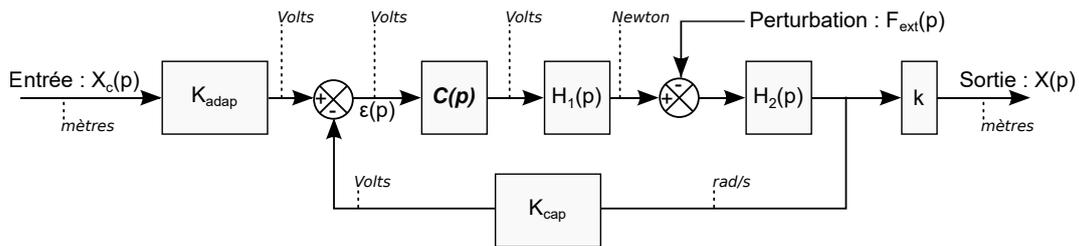
Le but du correcteur va donc être de modifier l'écart  $\varepsilon(p)$  pour obtenir le signal  $U(p)$  le plus efficace pour piloter le système. On dispose de trois outils mathématiques permettant de moduler ce signal : la proportionnalité, la dérivée et l'intégration.

## 1 Modélisation de l'asservissement en position

On suppose que l'étude permettant la modélisation a déjà été effectuée. L'entrée est alors la consigne de position  $X_c(p)$  et la sortie est la position réelle de la voiture  $X(p)$ . Les entrées et sorties sont alors exprimées en mètres.

On notera également  $F_{\text{ext}}(p)$  un effort perturbateur s'exerçant sur la voiture (exprimé en Newtons).

Les unités des autres grandeurs sont indiquées sur le schéma-bloc ci-dessous.



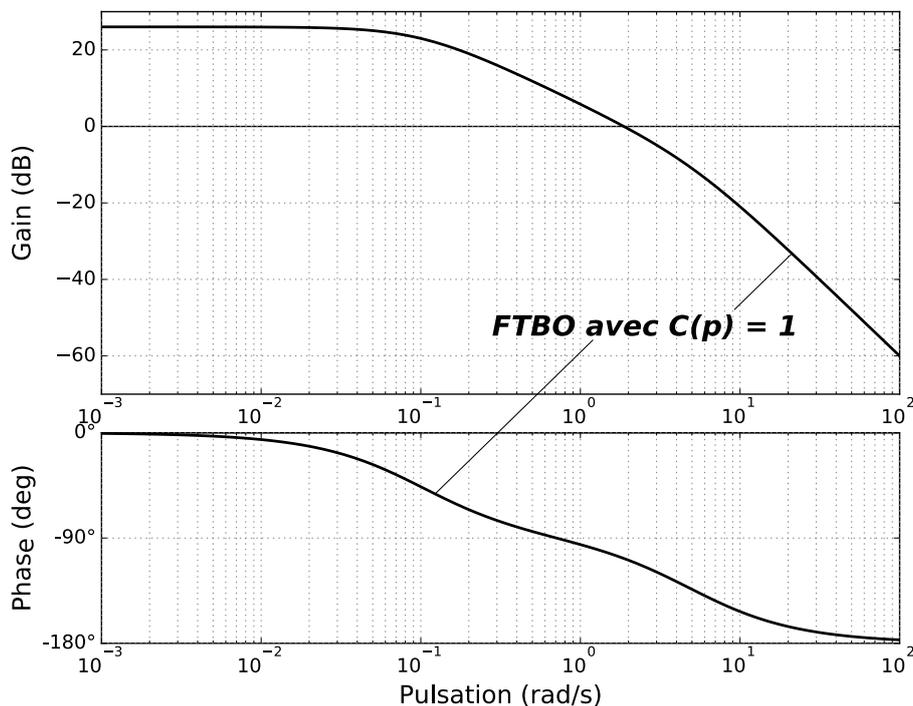
On considère pour traiter les futurs exemples que :

$$H_1(p) = \frac{K_1}{1 + T_1 \cdot p} ; K_1 = 2 \text{ N/V} ; T_1 = 0,2 \text{ s} \quad \text{et} \quad H_2(p) = \frac{K_2}{1 + T_2 \cdot p} ; K_2 = 5 \text{ (rad/s)/N} ; T_2 = 10 \text{ s}$$

Et pour que l'asservissement soit opérationnel, il faut que :

$$K_{\text{adap}} = \frac{K_{\text{cap}}}{k} ; K_{\text{cap}} = 2 \text{ V/(rad/s)} ; k = 0,5 \text{ m}$$

Une étude préalable a également permis de tracer le **diagramme de Bode de la FTBO** dans le cas particulier où  $C(p) = 1$ .



## 2 Méthodologie

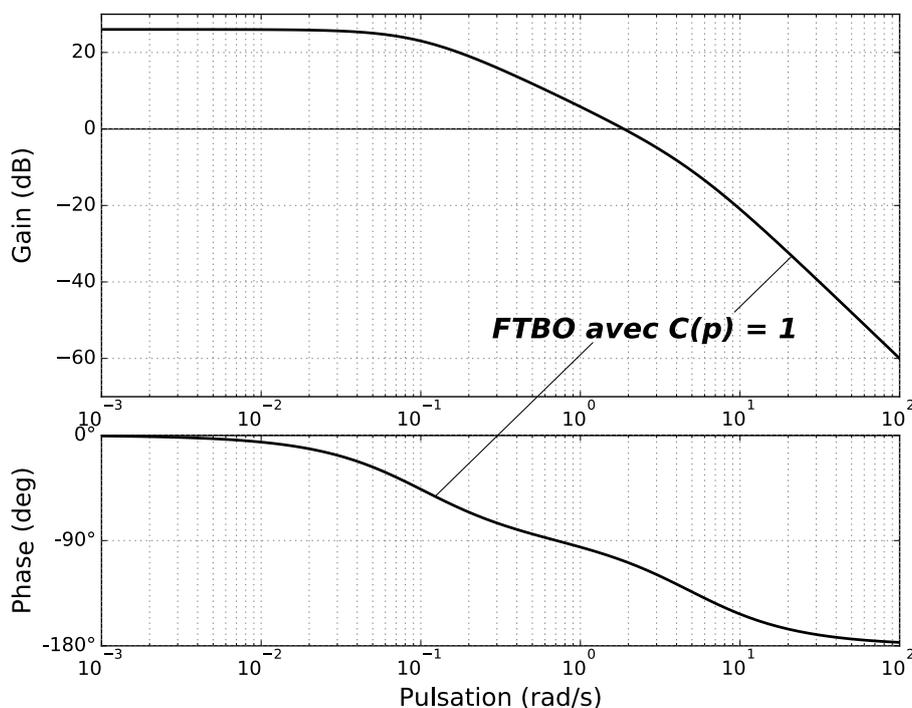
L'étude d'un asservissement sur un système automatique amène toujours son concepteur à réaliser un compromis entre :

- la stabilité, qu'amène la présence de gains faibles, et de déphasages faibles dans la FTBO.
- la précision, qu'amène la présence de gains forts et d'intégrateurs (ces derniers, toujours accompagnés d'un déphasage important) dans la FTBO.

D'une manière générale, la démarche de conception se décompose en deux étapes principales :

1. Choix du type de correcteur afin de vérifier le cahier des charges en termes de précision (nombre d'intégration nécessaire),
2. Ajustement des paramètres du correcteur afin de vérifier les exigences de stabilité et de rapidité (ce qui se traduit par le respect des marges de stabilité et par la validation de la bande passante à 0 dB de la FTBO).

Autant que possible, le correcteur devra cibler une plage de fréquence donnée. Sur le diagramme de Bode ci-dessous, on visualise bien les modifications à effectuer pour vérifier le cahier des charges.



## 3 Les différents correcteurs

### 3.1 Principe de la correction

### 3.2 Correcteur à action proportionnelle

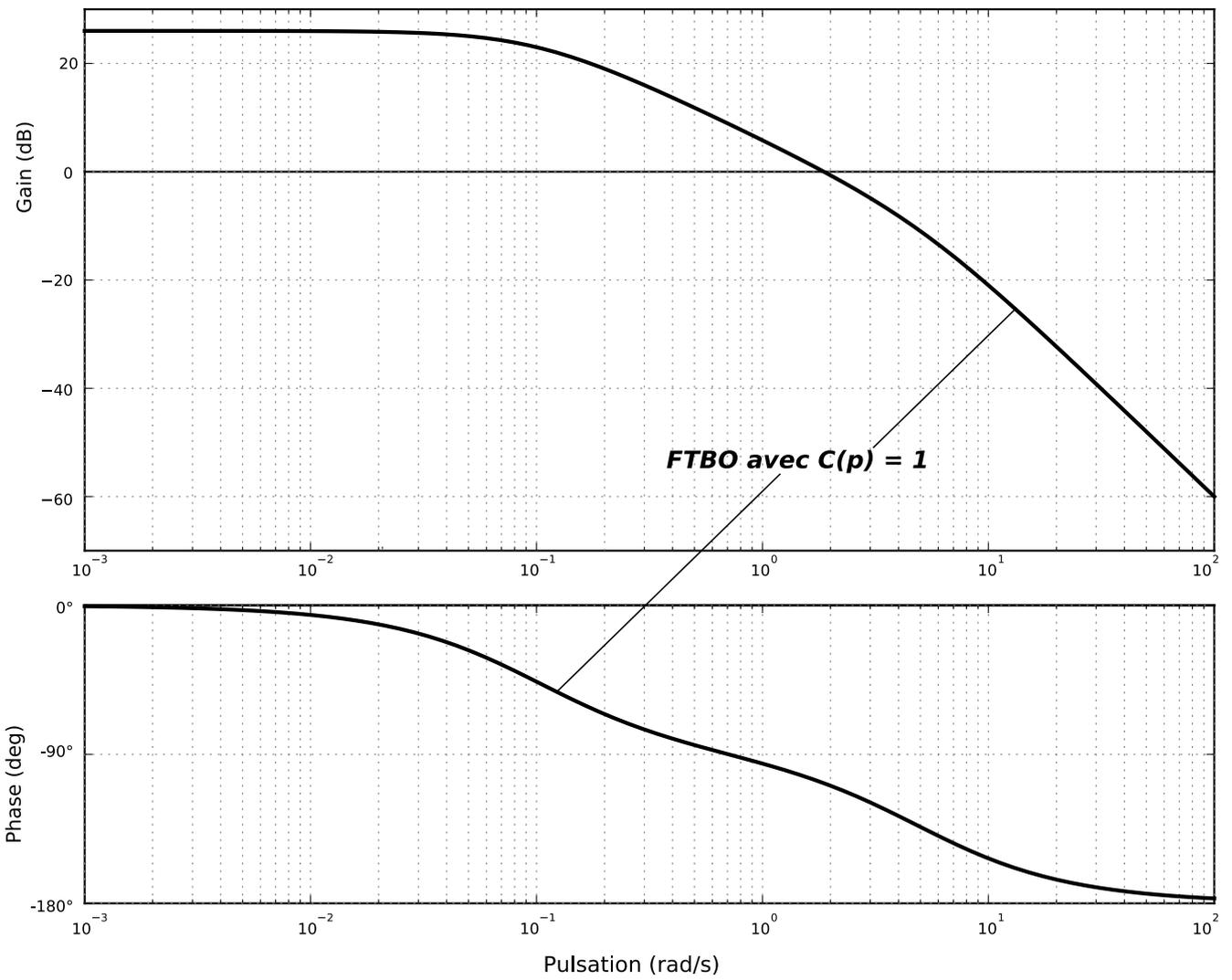
Fonction de transfert du correcteur :  $C(p) = K_p$

Ce type de correcteur permet d'obtenir une meilleure précision et une meilleure rapidité. Ce gain de performance s'obtiendra en augmentant la valeur du gain  $K_p$ . Ces améliorations de performances se feront néanmoins au détriment de la stabilité et de l'amortissement. Le respect du cahier des charges (en terme de stabilité et d'amortissement) imposera, au contraire, de limiter la valeur de  $K_p$ .



**Réglage vis-à-vis de la précision :**

**Réglage vis-à-vis de la rapidité :**



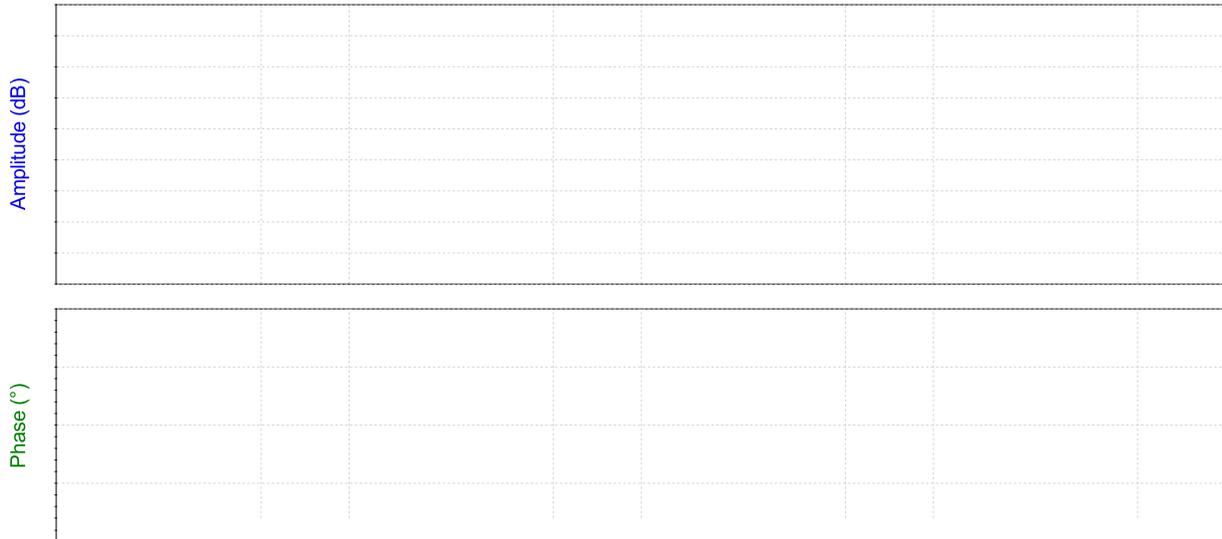
Réglage vis-à-vis de la stabilité :

### 3.3 Correcteur à action intégrale

**Fonction de transfert du correcteur :**  $C(p) = \frac{K_i}{p}$

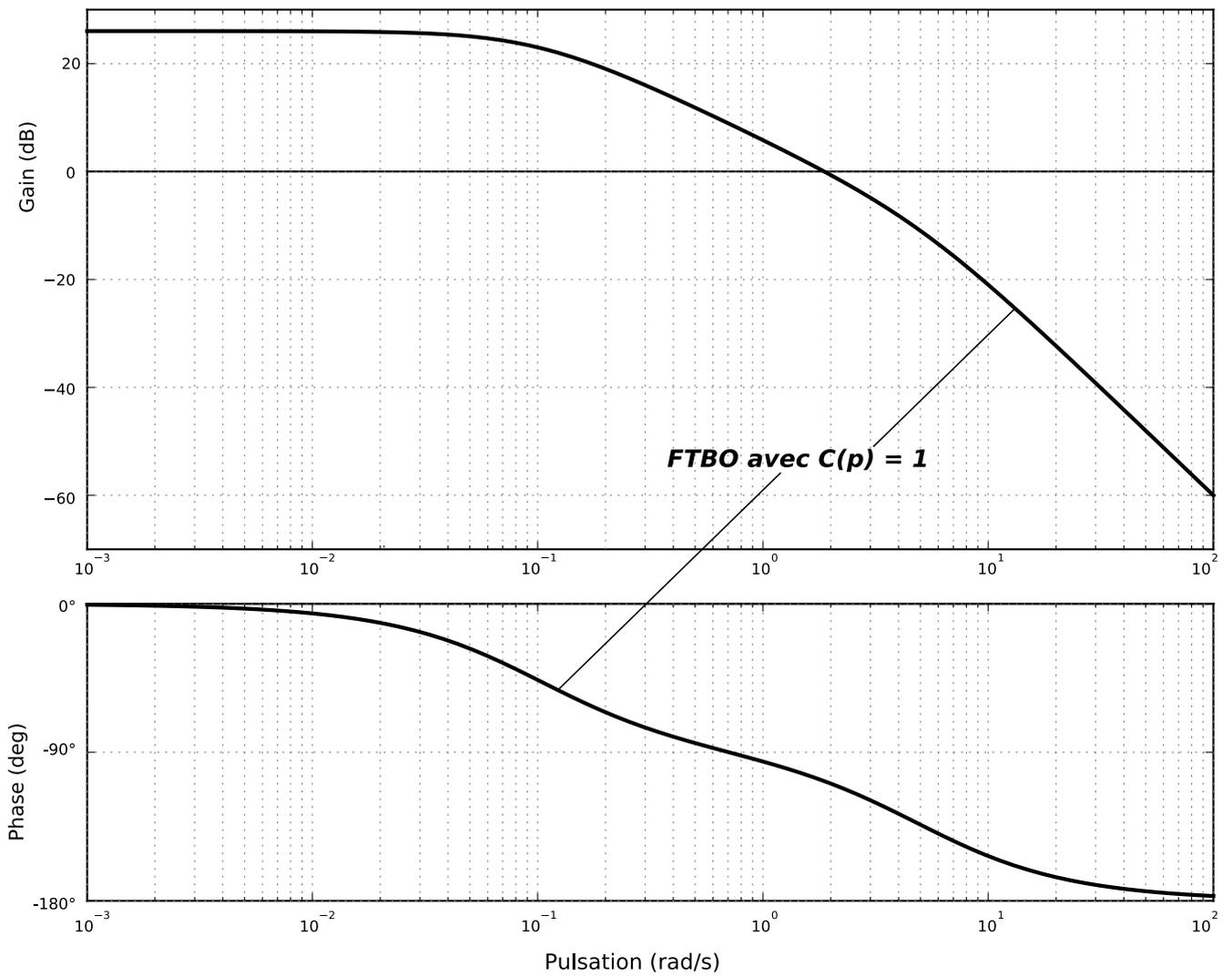
L'utilisation d'un correcteur intégral permet d'augmenter la classe de la FTBO. De fait, la précision du système est donc améliorée.

Ce correcteur introduit également un déphasage de  $-90^\circ$  (voir le diagramme de Bode tracé ci-dessous). Ce déphasage supplémentaire peut rendre le système instable !



**Réglage vis-à-vis de la précision :**

**Réglage vis-à-vis de la stabilité :**



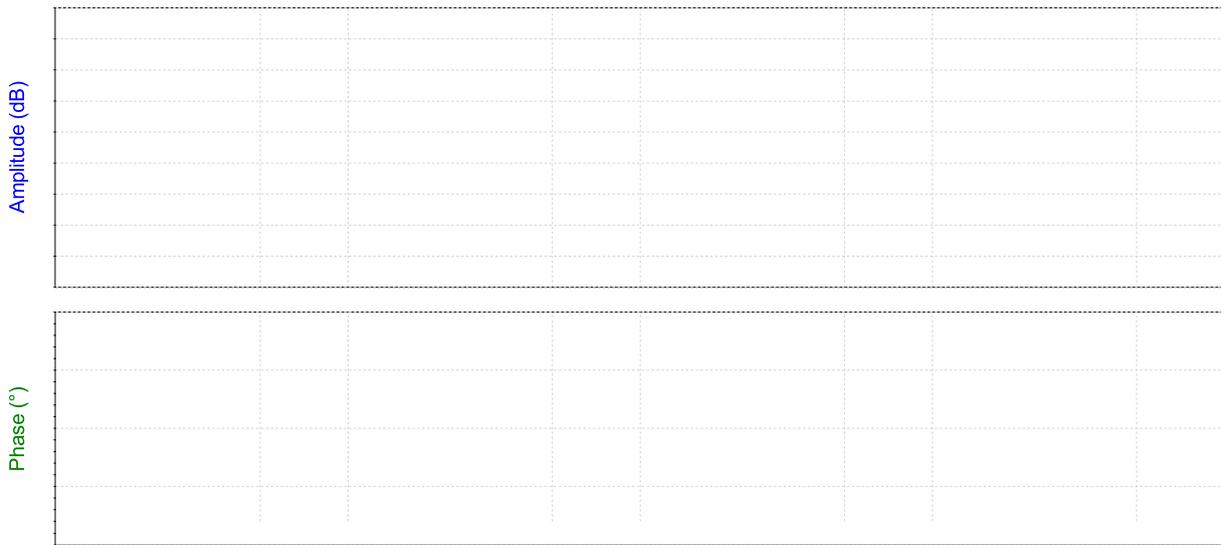
Réglage vis-à-vis de la rapidité :

### 3.4 Correcteur à action proportionnelle-intégrale

**Fonction de transfert du correcteur :**  $C(p) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i p} \right) = K_p \frac{1 + T_i p}{T_i p}$

Afin de ne pas introduire ce déphasage supplémentaire sur toute la gamme de pulsation, on privilégie l'utilisation d'un correcteur dit proportionnel intégral.

L'inconvénient du déphasage de  $-90^\circ$  sur toute la gamme de pulsation est levé puisque à haute fréquence, ce correcteur ne provoque plus de déphasage (voir le diagramme de Bode ci-dessous). Pour autant la classe de la FTBO est bien augmentée !



Pour ce type de correcteur, le choix des paramètres est plus complexe. Il existe principalement deux méthodes.

**Compensation du pôle dominant :** Lorsque la fonction de transfert en boucle fermée du système à asservir possède un pôle dominant  $p_1$ , cela signifie donc qu'il y aura donc une constante de temps  $T_1$  telle que  $T_1 = -\frac{1}{p_1}$ . **Compenser le pôle dominant revient donc à choisir  $T_i = T_1$  !** Cette méthode peut se généraliser pour  $n$  pôles avec un correcteur qui possède donc  $n$  constantes de temps.

 Cela signifie que si la FTBO non-corrigée s'écrit sous forme factorisée :

$$FTBO_{NC}(p) = \frac{K \left[ 1 - \frac{p}{p_1^n} \right] \cdot \left[ 1 - \frac{p}{p_2^n} \right] \cdot \left[ 1 - \frac{p}{p_3^n} \right] \dots}{p^\alpha \left[ 1 - \frac{p}{p_1^d} \right] \cdot \left[ 1 - \frac{p}{p_2^d} \right] \cdot \left[ 1 - \frac{p}{p_3^d} \right] \dots}$$

 Compenser le pôle  $p_1^d = -\frac{1}{T_1}$  (par exemple) revient à choisir  $T_i = T_1$ . Dans ce cas, on pourra écrire la FTBO

corrigée de la manière suivante :

$$\begin{aligned}
 FTBO_C(p) = C(p).FTBO_{NC}(p) &= K_p \frac{1 + T_i p}{T_i p} \cdot \frac{K \left[1 - \frac{p}{p_1^n}\right] \cdot \left[1 - \frac{p}{p_2^n}\right] \cdot \left[1 - \frac{p}{p_3^n}\right] \dots}{p^\alpha \left[1 - \frac{p}{p_1^d}\right] \cdot \left[1 - \frac{p}{p_2^d}\right] \cdot \left[1 - \frac{p}{p_3^d}\right] \dots} \\
 &= K_p \frac{\cancel{1 + T_1 p}}{T_1 p} \cdot \frac{K \left[1 - \frac{p}{p_1^n}\right] \cdot \left[1 - \frac{p}{p_2^n}\right] \cdot \left[1 - \frac{p}{p_3^n}\right] \dots}{p^\alpha \cancel{[1 + T_1 \cdot p]} \cdot \left[1 - \frac{p}{p_2^d}\right] \cdot \left[1 - \frac{p}{p_3^d}\right] \dots} \\
 &= K_p \frac{1}{T_1 p} \cdot \frac{K \left[1 - \frac{p}{p_1^n}\right] \cdot \left[1 - \frac{p}{p_2^n}\right] \cdot \left[1 - \frac{p}{p_3^n}\right] \dots}{p^\alpha \left[1 - \frac{p}{p_2^d}\right] \cdot \left[1 - \frac{p}{p_3^d}\right] \dots}
 \end{aligned}$$

Application à partir de l'exemple donné :

**Utilisation des marges :** Cette méthode nécessite deux étapes.

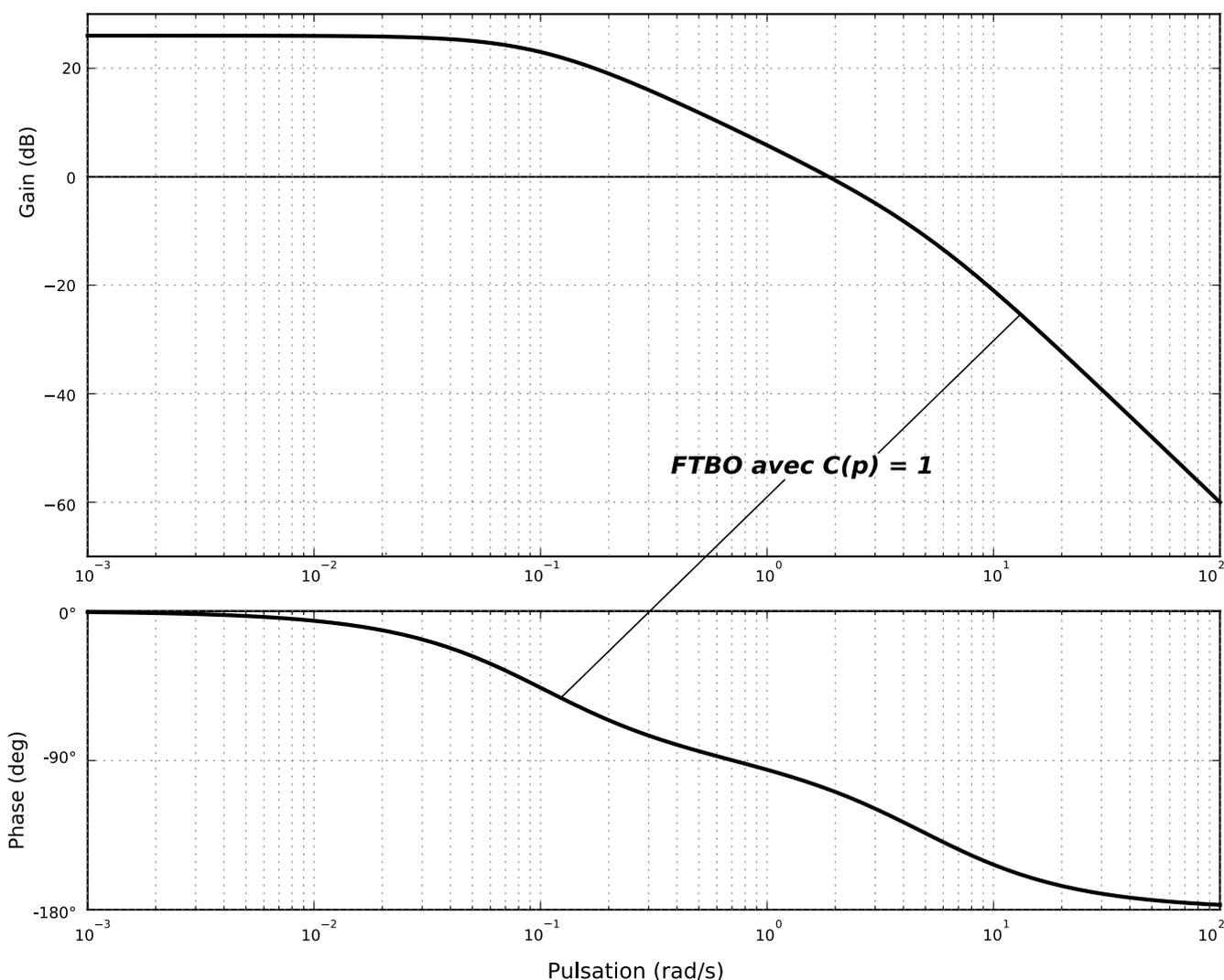
1. **Détermination de  $K_p$  :** On choisit le coefficient  $K_p$  de façon à obtenir la marge de phase désirée avec la correction proportionnelle seule. La mesure de la translation ( $T_{dB}$ ) donne la valeur de  $K_p$  en dB soit :

$$K_p = 10^{\frac{T_{dB}}{20}}$$

2. **Détermination de  $T_i$  :** On met ensuite en place l'effet intégral mais cela ne doit pas (ou peu) modifier le réglage effectué à la pulsation  $\omega_{0dB}^{cor}$ . Il faut donc prendre une constante de temps  $T_i$  tel que  $\frac{1}{T_i} \ll \omega_{0dB}^{cor}$ . On choisit en

général  $T_i \approx \frac{10}{\omega_{0dB}^{cor}}$ .

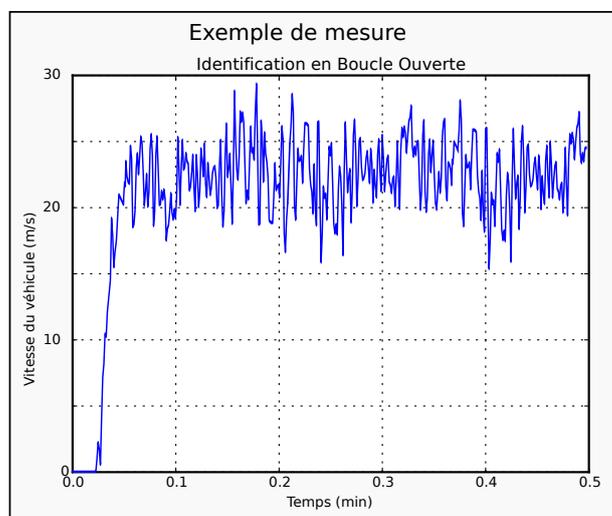
**NOTA :** Le choix de  $T_i$  modifie légèrement la marge de phase ( $-6^\circ$ ) mais on peut éventuellement anticiper cet inconvénient en choisissant  $K_p$  de façon à obtenir la marge de phase souhaitée  $+6^\circ$ .



### 3.5 Correcteur à avance de phase

**Fonction de transfert du correcteur dérivé :**  $C(p) = K_d \cdot p$

Un correcteur à action dérivée n'est jamais utilisé en réalité mais peut servir pour une approche purement théorique. Si l'on trace son diagramme de Bode (figure ci-dessous), on remarque d'abord que la phase est positive. C'est cette propriété qui sera utilisée afin de stabiliser la commande des systèmes. Cependant pour des hautes fréquences, le gain de ce type de correcteur tend vers l'infini. Cela pose un réel problème de mise en œuvre. Dans la réalité, les signaux sont plus ou moins bruités. Ce bruit est souvent composé de très hautes fréquences. L'utilisation de ce type de correcteur mènerait donc à l'amplification du bruit ! Cela n'est, bien entendu, pas acceptable.



On utilise donc un correcteur dit à avance de phase qui permet d'éviter ce problème.

**Fonction de transfert du correcteur à avance de phase :**  $C(p) = K_p \frac{1 + a\tau p}{1 + \tau p}$  avec  $a > 1$

Le paramètre  $a$  est appelé "largeur de bande". La réponse harmonique d'un tel correcteur est représentée ci-dessous.



On a également :

$$\omega_M = \frac{1}{\tau \cdot \sqrt{a}} \quad \text{et} \quad \sin(\varphi_M) = \frac{a-1}{a+1}$$

Le choix de  $a$  et  $\tau$  s'effectue de telle façon que son efficacité soit maximale dans la zone de la pulsation où le gain de la FTBO sans correction est nul (c'est à partir de cette pulsation que l'on calcule la marge de phase !). Une solution efficace est donc de choisir  $\omega_M = \omega_{0dB}$  où  $\omega_{0dB}$  est la pulsation telle que le gain est nul pour cette pulsation. Dans ce cas, on a :

$$\omega_M = \omega_{0dB} \quad \text{et} \quad \tau = \frac{1}{\omega_{0dB} \cdot \sqrt{a}}$$

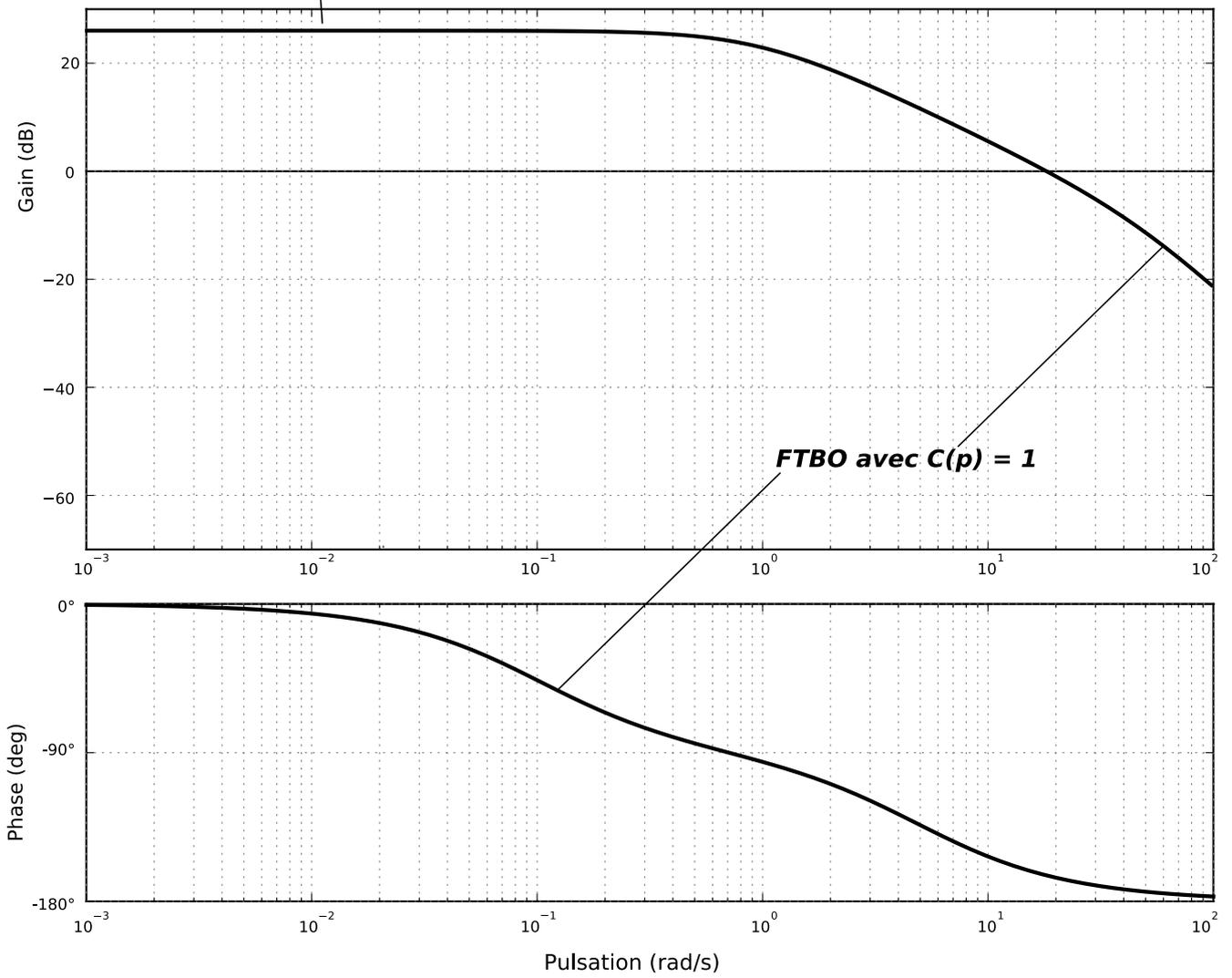
Pour choisir ce correcteur, il faut donc suivre les étapes suivantes :

1. Mesurer la marge de phase de la FTBO non-corrigée
2. En déduire  $\varphi_M$  puis la largeur de bande correspondante ( avec  $\sin(\varphi_M) = \frac{a-1}{a+1}$  ) pour respecter la marge de phase
3. Calculer la valeur de  $\tau$  en prenant  $\omega_M = \omega_{0dB}$

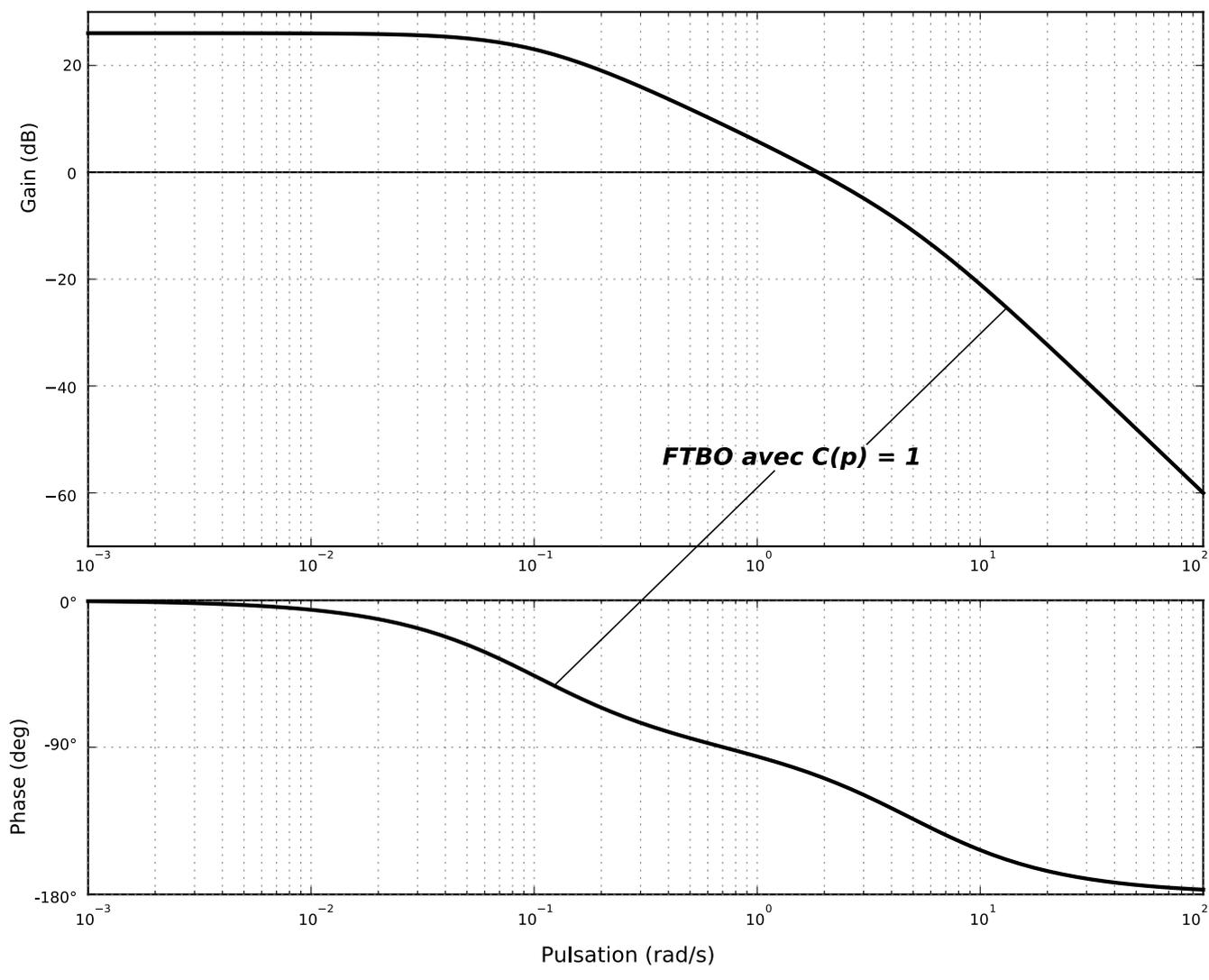
**Attention :** Ces étapes ont modifié la courbe de gain. Un réajustement est donc nécessaire !

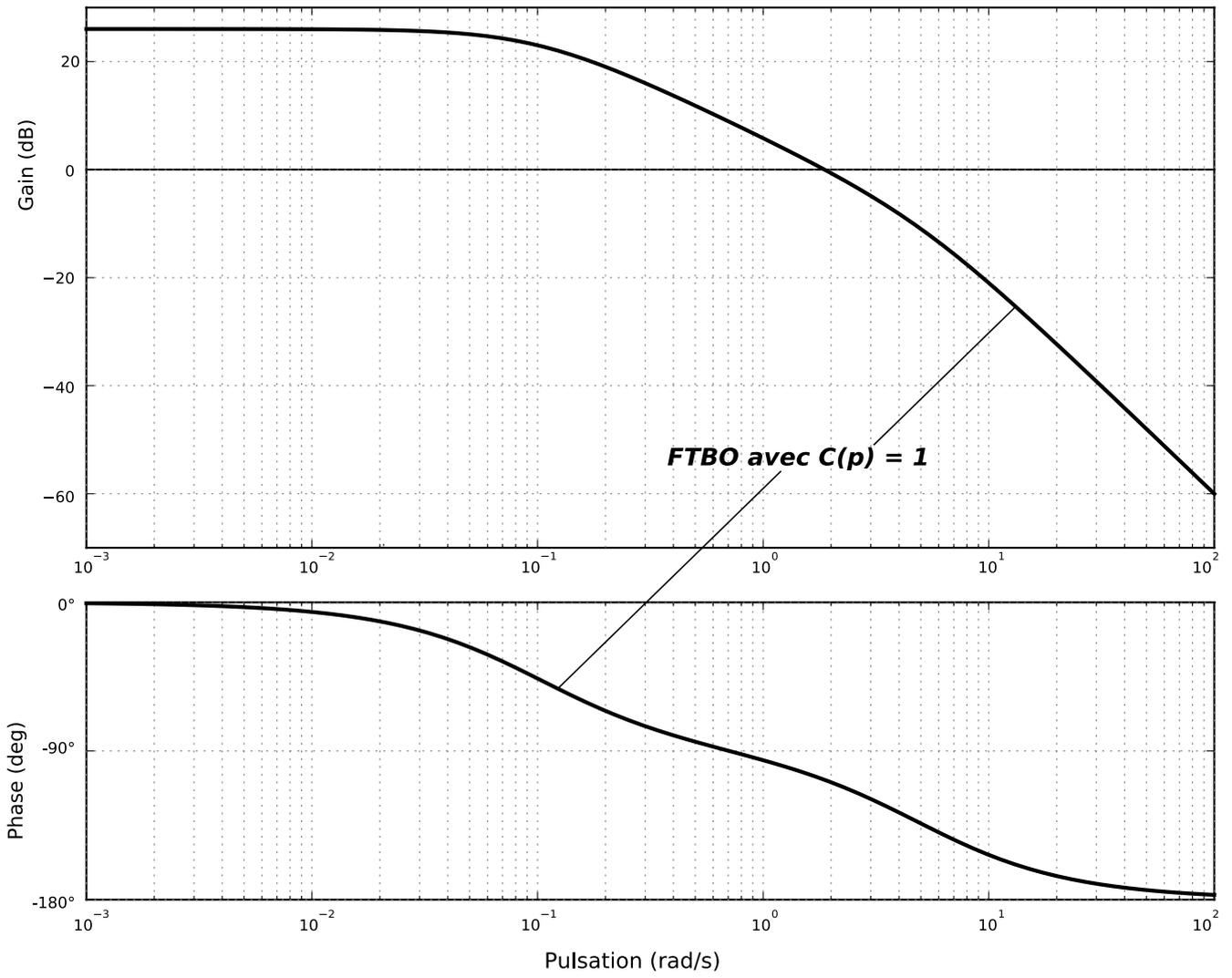
4. Réajuster la marge de phase avec le gain  $K_p$

La courbe a été "artificiellement" modifiée pour cette exemple sinon le correcteur n'a aucun intérêt !



Fin du cours sur les asservissements !





La courbe a été "artificiellement" modifiée pour cet exemple sinon le correcteur n'a aucun intérêt !

