

Automatique (AU3)

Compensation des Systèmes Bouclés

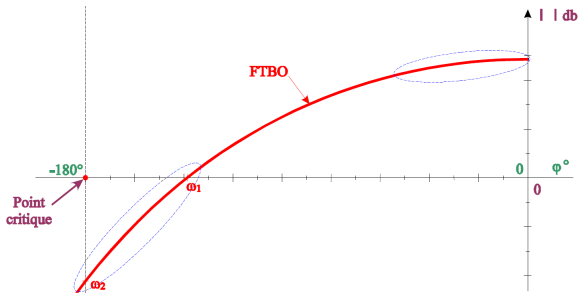
8 février 2010

Objectifs :

- connaître l'effet des actions proportionnelles, dérivées et intégrales;
- savoir régler un correcteur P ou PI;
- connaître la structure et le fonctionnement des autres correcteurs usuels (PD, PID, avance et/ou retard de phase).

Intérêt et contraintes de la correction

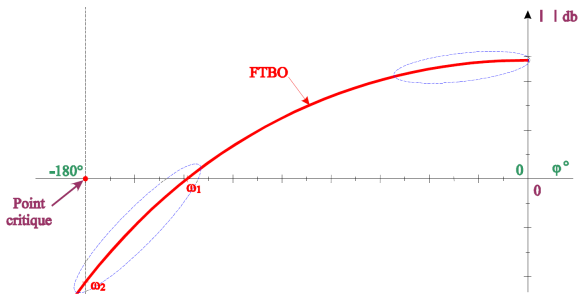
- Caractéristiques d'un système asservi :
 - stabilité, précision [, rapidité]
 - résultat d'un compromis
- Relation avec la FTBO :



- Rôle du correcteur : compenser « localement » la FTBO

Intérêt et contraintes de la correction

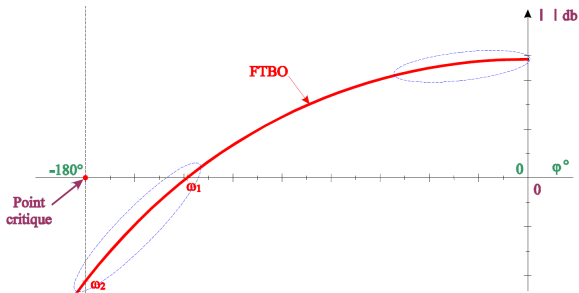
- Caractéristiques d'un système asservi :
 - stabilité, précision [, rapidité]
 - résultat d'un compromis
- Relation avec la FTBO :



- Rôle du correcteur : compenser « localement » la FTBO

Intérêt et contraintes de la correction

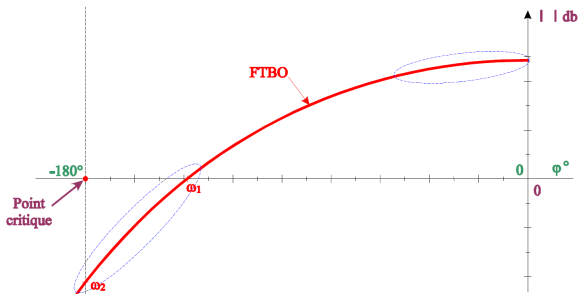
- Caractéristiques d'un système asservi :
 - **stabilité**, **précision** [, rapidité]
 - résultat d'un **compromis**
- Relation avec la FTBO :



- Rôle du correcteur : compenser « localement » la FTBO

Intérêt et contraintes de la correction

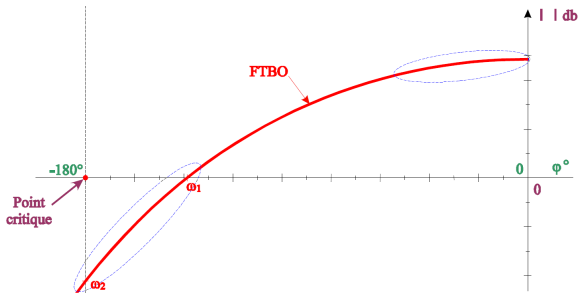
- Caractéristiques d'un système asservi :
 - stabilité, précision [, rapidité]
 - résultat d'un compromis
- Relation avec la FTBO :



- Rôle du correcteur : compenser « localement » la FTBO

Intérêt et contraintes de la correction

- Caractéristiques d'un système asservi :
 - stabilité, précision [, rapidité]
 - résultat d'un compromis
- Relation avec la FTBO :



- Rôle du correcteur : compenser « localement » la FTBO

Types de correcteurs

Action des correcteurs :

Action	Stabilité	Précision	Rapidité
Proportionnel	−	+	+
Intégral		++	−
Dérivée	+		+

Types de correcteurs usuels :

- amélioration de la stabilité → PD (et avance de phase) ;
- amélioration de la précision → PI (et retard de phase) ;
- action mixte → PID (et avance-retard de phase) ;

Types de correcteurs

Action des correcteurs :

Action	Stabilité	Précision	Rapidité
Proportionnel	−	+	+
Intégral		++	−
Dérivée	+		+

Types de correcteurs usuels :

- amélioration de la stabilité → PD (et avance de phase) ;
- amélioration de la précision → PI (et retard de phase) ;
- action mixte → PID (et avance-retard de phase) ;

Types de correcteurs

Action des correcteurs :

Action	Stabilité	Précision	Rapidité
Proportionnel	−	+	+
Intégral		++	−
Dérivée	+		+

Types de correcteurs usuels :

- amélioration de la stabilité → PD (et avance de phase) ;
- amélioration de la précision → PI (et retard de phase) ;
- action mixte → PID (et avance-retard de phase) ;

Types de correcteurs

Action des correcteurs :

Action	Stabilité	Précision	Rapidité
Proportionnel	−	+	+
Intégral		++	−
Dérivée	+		+

Types de correcteurs usuels :

- amélioration de la stabilité → PD (et avance de phase) ;
- amélioration de la précision → PI (et retard de phase) ;
- action mixte → PID (et avance-retard de phase) ;

Types de correcteurs

Action des correcteurs :

Action	Stabilité	Précision	Rapidité
Proportionnel	−	+	+
Intégral		++	−
Dérivée	+		+

Types de correcteurs usuels :

- amélioration de la stabilité → PD (et avance de phase) ;
- amélioration de la précision → PI (et retard de phase) ;
- action mixte → PID (et avance-retard de phase) ;

Types de correcteurs

Action des correcteurs :

Action	Stabilité	Précision	Rapidité
Proportionnel	−	+	+
Intégral		++	−
Dérivée	+		+

Types de correcteurs usuels :

- amélioration de la **stabilité** → **PD** (et avance de phase) ;
- amélioration de la précision → **PI** (et retard de phase) ;
- action **mixte** → **PID** (et avance-retard de phase) ;

Types de correcteurs

Action des correcteurs :

Action	Stabilité	Précision	Rapidité
Proportionnel	−	+	+
Intégral		++	−
Dérivée	+		+

Types de correcteurs usuels :

- amélioration de la stabilité → PD (et avance de phase) ;
- amélioration de la **précision** → PI (et retard de phase) ;
- action **mixte** → PID (et avance-retard de phase) ;

Types de correcteurs

Action des correcteurs :

Action	Stabilité	Précision	Rapidité
Proportionnel	−	+	+
Intégral		++	−
Dérivée	+		+

Types de correcteurs usuels :

- amélioration de la stabilité → PD (et avance de phase) ;
- amélioration de la précision → PI (et retard de phase) ;
- action **mixte** → **PID** (et avance-retard de phase) ;

Placement et réglage des correcteurs

Placement des correcteurs :

- série (sur la chaîne directe);
- parallèle (sur la chaîne de retour).

Méthodes de réglage :

- méthodes fréquentielles (à partir de la réponse fréquentielle de la FTBO);
- méthodes temporelles (Ziegler & Nichols);
- méthode du modèle (cf. TP3 « Asservissement de position d'un MCC : relation forme de la réponse indicielle – position des pôles)

Placement et réglage des correcteurs

Placement des correcteurs :

- **série** (sur la chaîne directe);
- parallèle (sur la chaîne de retour).

Méthodes de réglage :

- **méthodes fréquentielles** (à partir de la réponse fréquentielle de la FTBO);
- méthodes temporelles (Ziegler & Nichols);
- méthode du modèle (cf. TP3 « Asservissement de position d'un MCC : relation forme de la réponse indicielle – position des pôles)

Placement et réglage des correcteurs

Placement des correcteurs :

- **série** (sur la chaîne directe);
- **parallèle** (sur la chaîne de retour).

Méthodes de réglage :

- **méthodes fréquentielles** (à partir de la réponse fréquentielle de la FTBO);
- méthodes temporelles (Ziegler & Nichols);
- méthode du modèle (cf. TP3 « Asservissement de position d'un MCC : relation forme de la réponse indicielle – position des pôles)

Placement et réglage des correcteurs

Placement des correcteurs :

- **série** (sur la chaîne directe);
- **parallèle** (sur la chaîne de retour).

Méthodes de réglage :

- **méthodes fréquentielles** (à partir de la réponse fréquentielle de la FTBO);
- méthodes temporelles (Ziegler & Nichols);
- méthode du modèle (cf. TP3 « Asservissement de position d'un MCC : relation forme de la réponse indicielle – position des pôles)

Placement et réglage des correcteurs

Placement des correcteurs :

- **série** (sur la chaîne directe);
- **parallèle** (sur la chaîne de retour).

Méthodes de réglage :

- **méthodes fréquentielles** (à partir de la réponse fréquentielle de la FTBO);
- méthodes temporelles (Ziegler & Nichols);
- méthode du modèle (cf. TP3 « Asservissement de position d'un MCC : relation forme de la réponse indicielle – position des pôles)

Placement et réglage des correcteurs

Placement des correcteurs :

- **série** (sur la chaîne directe);
- **parallèle** (sur la chaîne de retour).

Méthodes de réglage :

- **méthodes fréquentielles** (à partir de la réponse fréquentielle de la FTBO);
- **méthodes temporelles** (Ziegler & Nichols);
- **méthode du modèle** (cf. TP3 « Asservissement de position d'un MCC : relation forme de la réponse indicielle – position des pôles)

Placement et réglage des correcteurs

Placement des correcteurs :

- **série** (sur la chaîne directe);
- **parallèle** (sur la chaîne de retour).

Méthodes de réglage :

- **méthodes fréquentielles** (à partir de la réponse fréquentielle de la FTBO);
- méthodes temporelles (Ziegler & Nichols);
- méthode du modèle (cf. TP3 « Asservissement de position d'un MCC : relation forme de la réponse indicielle – position des pôles)

Organisation du cours

- Critère de performance : marge de phase à 45° ou gain en surtension à 2.3 dB (dicté par la stabilité)
- Principe de l'étude : visualisation dans le plan de Black de l'influence des correcteurs sur la fonction de transfert :
 - proportionnel (P) ;
 - PI et retard de phase ;
 - PD et avance de phase ;
 - PID et avance-retard de phase.

Organisation du cours

- Critère de performance : marge de phase à 45° ou gain en surtension à 2.3 dB (dicté par la stabilité)
- Principe de l'étude : visualisation dans le plan de Black de l'influence des correcteurs sur la fonction de transfert :
 - proportionnel (P) ;
 - PI et retard de phase ;
 - PD et avance de phase ;
 - PID et avance-retard de phase.

Organisation du cours

- Critère de performance : marge de phase à 45° ou gain en surtension à 2.3 dB (dicté par la stabilité)
- Principe de l'étude : visualisation dans le plan de Black de l'influence des correcteurs sur la fonction de transfert :
 - proportionnel (P) ;
 - PI et retard de phase ;
 - PD et avance de phase ;
 - PID et avance-retard de phase.

Organisation du cours

- Critère de performance : marge de phase à 45° ou gain en surtension à 2.3 dB (dicté par la stabilité)
- Principe de l'étude : visualisation dans le plan de Black de l'influence des correcteurs sur la fonction de transfert :
 - proportionnel (P) ;
 - PI et retard de phase ;
 - PD et avance de phase ;
 - PID et avance-retard de phase.

Organisation du cours

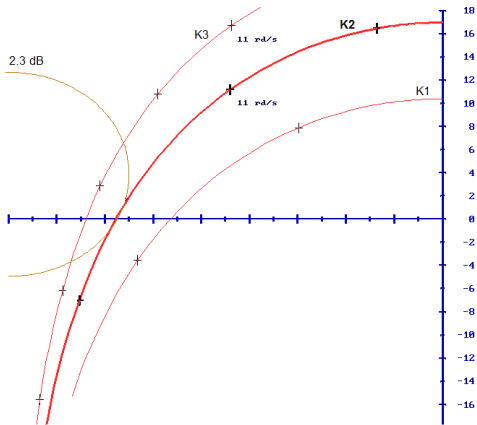
- Critère de performance : marge de phase à 45° ou gain en surtension à 2.3 dB (dicté par la stabilité)
- Principe de l'étude : visualisation dans le plan de Black de l'influence des correcteurs sur la fonction de transfert :
 - proportionnel (P) ;
 - PI et retard de phase ;
 - PD et avance de phase ;
 - PID et avance-retard de phase.

Organisation du cours

- Critère de performance : marge de phase à 45° ou gain en surtension à 2.3 dB (dicté par la stabilité)
- Principe de l'étude : visualisation dans le plan de Black de l'influence des correcteurs sur la fonction de transfert :
 - proportionnel (P) ;
 - PI et retard de phase ;
 - PD et avance de phase ;
 - PID et avance-retard de phase.

Correcteurs proportionnels : généralités

- Fonction de transfert : $K(p) = K$
- Effet : translation verticale de la FTBO
- Exemple : tracé pour trois valeurs de K ($K1 < K2 < K3$) :



Résultats et méthode de réglage du correcteur

Résultats :

- $K1$: trop faible \rightarrow précision \searrow (mais stabilité \nearrow);
- $K2$: réglage optimal vis-à-vis du critère;
- $K3$: trop fort \rightarrow stabilité \searrow (mais précision \nearrow).

Méthode de réglage d'un correcteur P (à M_φ donnée)

- 1 Tracer la FTBO sans correcteur
- 2 Déterminer la pulsation pour laquelle on a :
 $\varphi(FTBO) = -180^\circ + M_\varphi$
- 3 Le gain en cette pulsation est l'opposé de K (en dB)

Résultats et méthode de réglage du correcteur

Résultats :

- $K1$: trop faible \rightarrow précision \searrow (mais stabilité \nearrow);
- $K2$: réglage optimal vis-à-vis du critère;
- $K3$: trop fort \rightarrow stabilité \searrow (mais précision \nearrow).

Méthode de réglage d'un correcteur P (à M_φ donnée)

- 1 Tracer la FTBO sans correcteur
- 2 Déterminer la pulsation pour laquelle on a :
 $\varphi(FTBO) = -180^\circ + M_\varphi$
- 3 Le gain en cette pulsation est l'opposé de K (en dB)

Résultats et méthode de réglage du correcteur

Résultats :

- $K1$: trop faible \rightarrow précision \searrow (mais stabilité \nearrow);
- $K2$: réglage optimal vis-à-vis du critère;
- $K3$: trop fort \rightarrow stabilité \searrow (mais précision \nearrow).

Méthode de réglage d'un correcteur P (à M_φ donnée)

- 1 Tracer la FTBO sans correcteur
- 2 Déterminer la pulsation pour laquelle on a :
 $\varphi(FTBO) = -180^\circ + M_\varphi$
- 3 Le gain en cette pulsation est l'opposé de K (en dB)

Résultats et méthode de réglage du correcteur

Résultats :

- $K1$: trop faible \rightarrow précision \searrow (mais stabilité \nearrow);
- $K2$: réglage optimal vis-à-vis du critère;
- $K3$: trop fort \rightarrow stabilité \searrow (mais précision \nearrow).

Méthode de réglage d'un correcteur P (à M_φ donnée)

- 1 Tracer la FTBO sans correcteur
- 2 Déterminer la pulsation pour laquelle on a :
$$\varphi(FTBO) = -180^\circ + M_\varphi$$
- 3 Le gain en cette pulsation est l'opposé de K (en dB)

Résultats et méthode de réglage du correcteur

Résultats :

- $K1$: trop faible \rightarrow précision \searrow (mais stabilité \nearrow);
- $K2$: réglage optimal vis-à-vis du critère;
- $K3$: trop fort \rightarrow stabilité \searrow (mais précision \nearrow).

Méthode de réglage d'un correcteur P (à M_φ donnée)

- 1 Tracer la FTBO sans correcteur
- 2 Déterminer la pulsation pour laquelle on a :
$$\varphi(FTBO) = -180^\circ + M_\varphi$$
- 3 Le gain en cette pulsation est l'opposé de K (en dB)

Résultats et méthode de réglage du correcteur

Résultats :

- $K1$: trop faible \rightarrow précision \searrow (mais stabilité \nearrow);
- $K2$: réglage optimal vis-à-vis du critère;
- $K3$: trop fort \rightarrow stabilité \searrow (mais précision \nearrow).

Méthode de réglage d'un correcteur P (à M_φ donnée)

- 1 Tracer la FTBO sans correcteur
- 2 Déterminer la pulsation pour laquelle on a :
$$\varphi(FTBO) = -180^\circ + M_\varphi$$
- 3 Le gain en cette pulsation est l'opposé de K (en dB)

Résultats et méthode de réglage du correcteur

Résultats :

- $K1$: trop faible \rightarrow précision \searrow (mais stabilité \nearrow);
- $K2$: réglage optimal vis-à-vis du critère;
- $K3$: trop fort \rightarrow stabilité \searrow (mais précision \nearrow).

Méthode de réglage d'un correcteur P (à M_φ donnée)

- 1 Tracer la FTBO sans correcteur
- 2 Déterminer la pulsation pour laquelle on a :
$$\varphi(FTBO) = -180^\circ + M_\varphi$$
- 3 Le gain en cette pulsation est l'opposé de K (en dB)

Correcteurs PI et à retard de phase : généralités

- But : améliorer la **précision statique** du système bouclé
- Moyen : introduire une action **intégrale** dans la boucle
- Localisation de l'action : uniquement **aux basses fréquences**

Correcteurs PI et à retard de phase : généralités

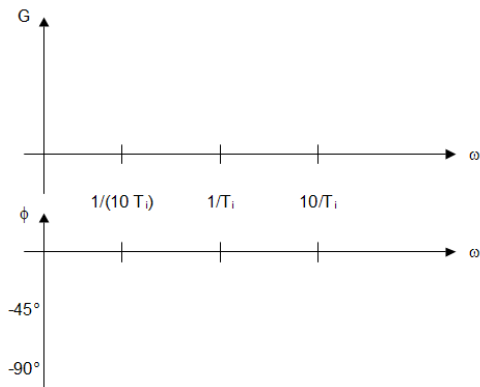
- But : améliorer la **précision statique** du système bouclé
- Moyen : introduire une action **intégrale** dans la boucle
- Localisation de l'action : uniquement **aux basses fréquences**

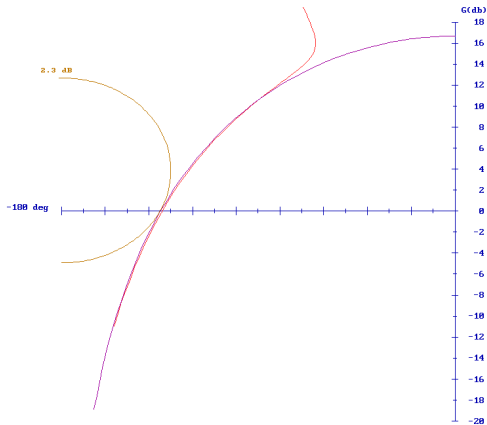
Correcteurs PI et à retard de phase : généralités

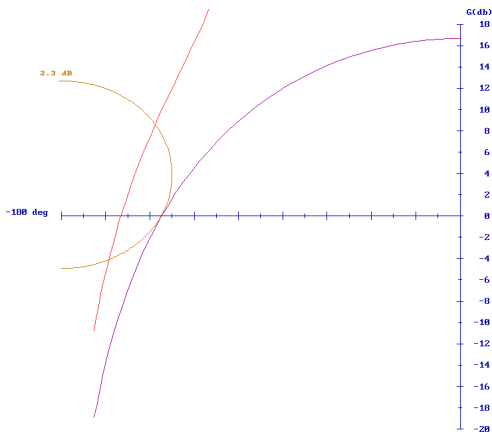
- But : améliorer la **précision statique** du système bouclé
- Moyen : introduire une action **intégrale** dans la boucle
- Localisation de l'action : uniquement **aux basses fréquences**

Correcteurs PI : définition et tracé dans Bode

$$\text{Fonction de transfert : } K \left[1 + \frac{1}{T_i p} \right] = K \left[\frac{1 + T_i p}{T_i p} \right]$$



Exemple de correcteur bien réglé $\left(T_i \approx \frac{10}{\omega_R}\right)$ 

Exemple de correcteur mal réglé $\left(T_i = \frac{1}{\omega_R}\right)$ 

Réglage du correcteur PI

Méthode de réglage d'un correcteur PI (à surtension donnée)

- 1 Régler le gain K pour avoir la surtension souhaitée et en déduire ω_R
- 2 Choisir T_i tel que $\omega_R \geq \frac{10}{T_i}$
- 3 Ajuster le gain statique (le diminuer légèrement)

En pratique : on prend $\omega_R = \frac{4 \text{ à } 10}{T_i}$

Réglage du correcteur PI

Méthode de réglage d'un correcteur PI (à surtension donnée)

- 1 Régler le gain K pour avoir la surtension souhaitée et en déduire ω_R
- 2 Choisir T_i tel que $\omega_R \geq \frac{10}{T_i}$
- 3 Ajuster le gain statique (le diminuer légèrement)

En pratique : on prend $\omega_R = \frac{4 \text{ à } 10}{T_i}$

Réglage du correcteur PI

Méthode de réglage d'un correcteur PI (à surtension donnée)

- 1 Régler le gain K pour avoir la surtension souhaitée et en déduire ω_R
- 2 Choisir T_i tel que $\omega_R \geq \frac{10}{T_i}$
- 3 Ajuster le gain statique (le diminuer légèrement)

En pratique : on prend $\omega_R = \frac{4 \text{ à } 10}{T_i}$

Réglage du correcteur PI

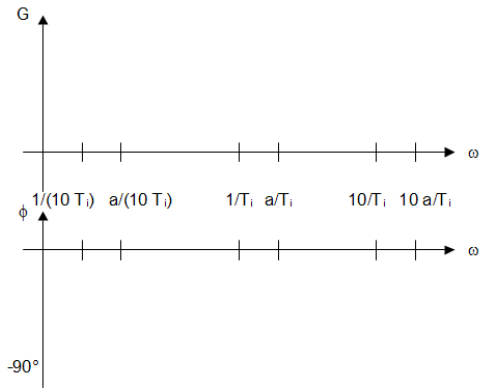
Méthode de réglage d'un correcteur PI (à surtension donnée)

- 1 Régler le gain K pour avoir la surtension souhaitée et en déduire ω_R
- 2 Choisir T_i tel que $\omega_R \geq \frac{10}{T_i}$
- 3 Ajuster le gain statique (le diminuer légèrement)

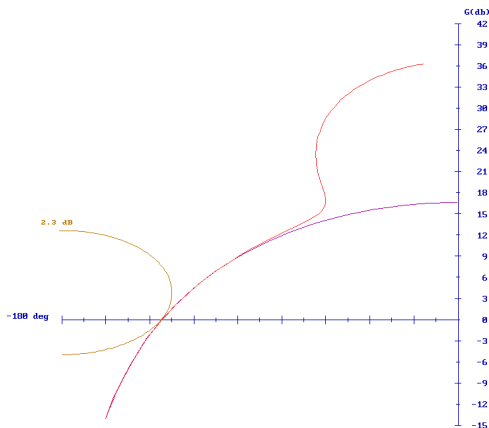
En pratique : on prend $\omega_R = \frac{4 \text{ à } 10}{T_i}$

Correcteurs à retard de phase : définition et tracé dans Bode

Approximation d'un PI (sans intégrateur pur) : $K \frac{1 + \frac{T}{a} p}{1 + T p}$ avec $a > 1$
(en pratique : $6 \leq a \leq 15$)



Exemple et résultats



Comparaison avec le régulateur PI : moins précis mais plus robuste

Correcteurs PD et à avance de phase : généralités

- But : améliorer la **stabilité** du système bouclé
- Moyen : introduire une action **dérivée** dans la boucle
- Localisation de l'action : uniquement autour de la **résonance** (moyennes et hautes fréquences)

Correcteurs PD et à avance de phase : généralités

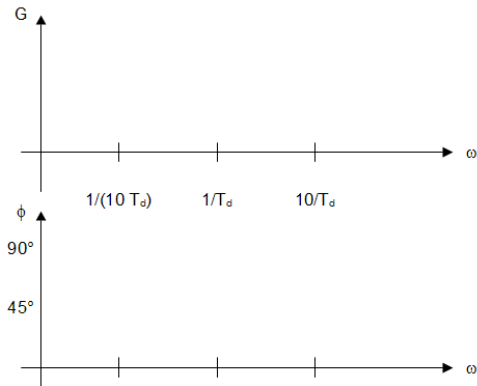
- But : améliorer la **stabilité** du système bouclé
- Moyen : introduire une action **dérivée** dans la boucle
- Localisation de l'action : uniquement autour de la **résonance** (moyennes et hautes fréquences)

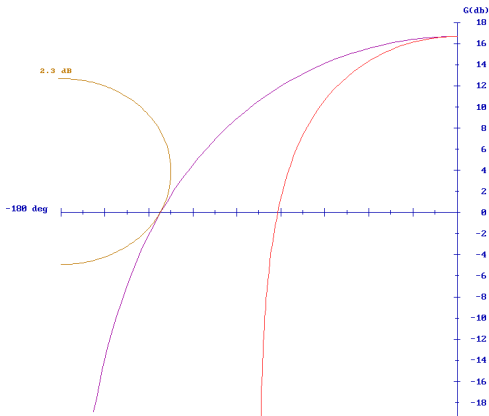
Correcteurs PD et à avance de phase : généralités

- But : améliorer la **stabilité** du système bouclé
- Moyen : introduire une action **dérivée** dans la boucle
- Localisation de l'action : uniquement autour de la **résonance** (moyennes et hautes fréquences)

Correcteurs PD : définition et tracé dans Bode

Fonction de transfert : $K(1 + T_d p)$

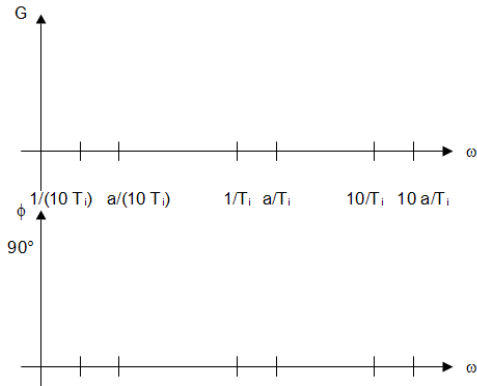


Exemple de correcteur bien réglé $\left(\frac{1}{\omega_R} < T_d < \frac{10}{\omega_R} \right)$ 

Correcteurs à avance de phase : définition et tracé dans Bode

Correcteur à action dérivée : irréalisable physiquement

Approximation : correcteur à avance de phase : $K \frac{1+T_p p}{1+\frac{T}{a} p}$ avec $a > 1$



Réglage et limites du correcteur à avance de phase

- Réglage des paramètres a et T : hors-programme
- Limites d'utilisation :
 - amplification du bruit des capteurs ;
 - variations brusques des entrées (consigne ou perturbation) \Rightarrow forte augmentation de la commande.

Réglage et limites du correcteur à avance de phase

- Réglage des paramètres a et T : hors-programme
- Limites d'utilisation :
 - amplification du bruit des capteurs ;
 - variations brusques des entrées (consigne ou perturbation) \Rightarrow forte augmentation de la commande.

Réglage et limites du correcteur à avance de phase

- Réglage des paramètres a et T : hors-programme
- Limites d'utilisation :
 - amplification du bruit des capteurs ;
 - variations brusques des entrées (consigne ou perturbation) \Rightarrow forte augmentation de la commande.

Réglage et limites du correcteur à avance de phase

- Réglage des paramètres a et T : hors-programme
- Limites d'utilisation :
 - amplification du bruit des capteurs ;
 - variations brusques des entrées (consigne ou perturbation) \Rightarrow forte augmentation de la commande.

Correcteurs PID et à avance-retard de phase : généralités

- But : améliorer la stabilité **et** la précision du système bouclé
- Moyen : introduire des actions dérivée **et** intégrale dans la boucle
- Localisation de l'action : aux basses fréquences (précision) **et** aux moyennes et hautes fréquences (stabilité)

Correcteurs PID et à avance-retard de phase : généralités

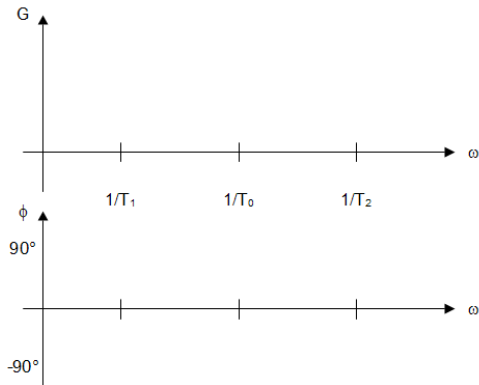
- But : améliorer la stabilité **et** la précision du système bouclé
- Moyen : introduire des actions dérivée **et** intégrale dans la boucle
- Localisation de l'action : aux basses fréquences (précision) **et** aux moyennes et hautes fréquences (stabilité)

Correcteurs PID et à avance-retard de phase : généralités

- But : améliorer la stabilité **et** la précision du système bouclé
- Moyen : introduire des actions dérivée **et** intégrale dans la boucle
- Localisation de l'action : aux basses fréquences (précision) **et** aux moyennes et hautes fréquences (stabilité)

Correcteurs PID : définition et tracé dans Bode

Fonction de transfert : $K \left[1 + \frac{1}{T_i p} + T_d p \right]$



Exemple de PID bien réglé

