

LES SYSTEMES ASSERVIS

Objectifs : Modélisation des asservissements en boucle ouverte ou fermée par schéma bloc.
Connaissance et réglage des correcteurs Proportionnel, intégral et dérivé.

Pré requis : connaissance des chaines d'action et d'acquisition en boucle ouverte et de leurs caractéristiques de transfert. Connaissance technologique de systèmes régulés ou asservis.

1. Introduction.

Il y a asservissement d'une grandeur Y à une grandeur de consigne X lorsque l'on force par un dispositif particulier la grandeur Y à suivre l'évolution de la grandeur X indépendamment de l'environnement.

Si la consigne est constante, on parle de **régulation**.

Exemples :

la température d'un bain, réguler à 60°C un bain d'huile.

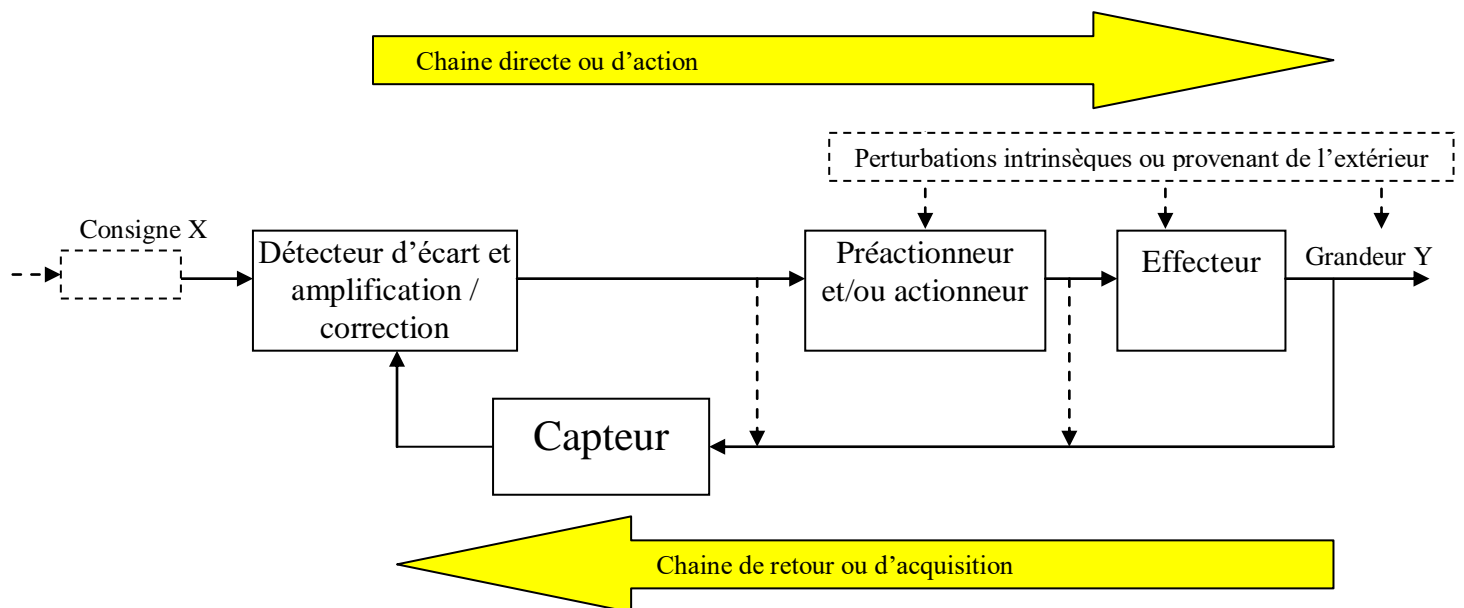
la régulation de vitesse d'une machine de production.

la régulation de pression d'air comprimé

Si la consigne est variable, on parle d'**asservissement** ou de **système asservi**.

Exemples :

L'asservissement de vitesse d'un moteur



2. Cahier des charges - performances.

Un système asservi performant doit satisfaire à trois critères, résultant d'une attente précise de l'utilisateur :

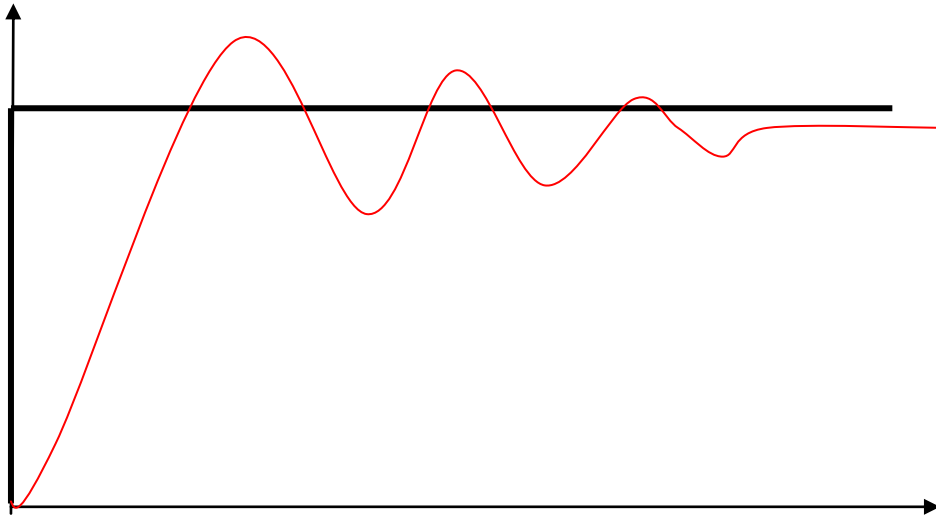
La vitesse de réaction du système à une sollicitation : Rapidité

L'exactitude de la correspondance entre la consigne et la grandeur de sortie : Précision ;(complété éventuellement par une volonté de non dépassement)

L'équilibre en régime permanent du système : Stabilité ou Amortissement.

Le cahier des charges devra quantifier chacun de ces critères en phase transitoire et permanente

Identification des critères et termes spécifiques :



Consigne : C'est la grandeur que l'on souhaite atteindre

Sortie : C'est la grandeur qu'asservi le système

Régime transitoire : C'est la phase pendant laquelle le système agit pour se rapprocher de la consigne

Régime permanent (ou établi): C'est la phase où la sortie est très proche de la consigne et ne varie quasiment plus

Rapidité ou Temps de réponse : c'est le temps nécessaire au système asservi pour atteindre la consigne souhaitée. On lui associe en général une tolérance (on parle de temps de réponse à 5 %).

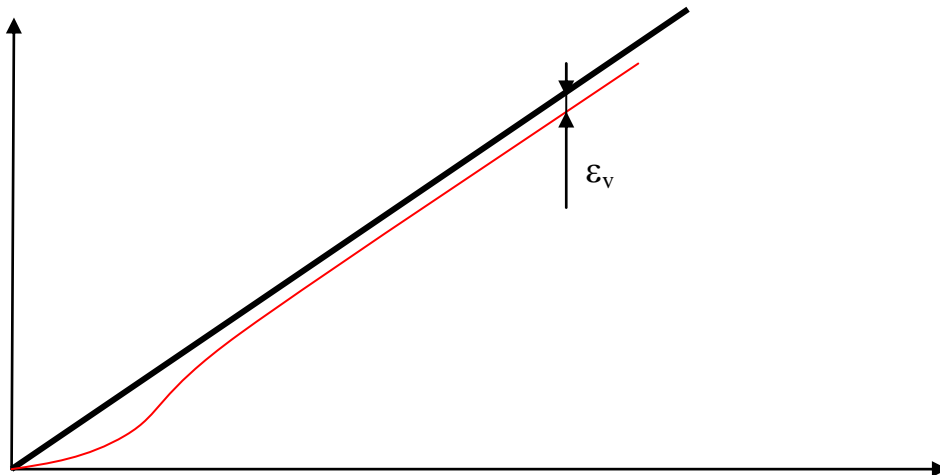
Amortissement : C'est la capacité de la réponse à se rapprocher de la consigne

Stabilité : un système est dit stable s'il revient à sa position d'équilibre lorsqu'une perturbation l'écarte de celle-ci et si lors d'une commande il n'oscille pas ou oscille en s'amortissant rapidement.

Précision : C'est l'écart entre la sortie et la consigne. Plus le signal de retour est proche de la consigne, plus la précision est grande.

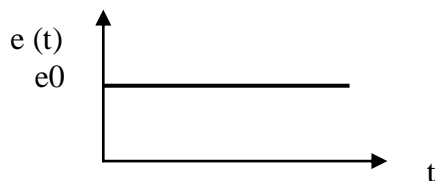
Erreur statique : C'est la différence entre consigne et grandeur de sortie en régime permanent. Elle quantifie la précision

Erreur de traînage : C'est la différence entre consigne et grandeur de sortie lorsque la consigne varie linéairement (entrée rampe)

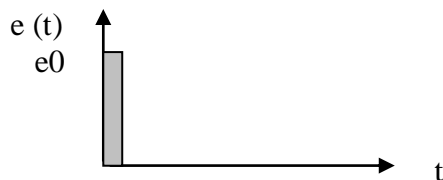


Différentes entrées de consigne : (Qui peuvent etre des perturbations)

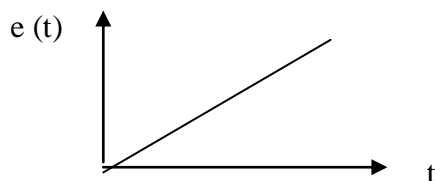
- L'entrée en échelon.



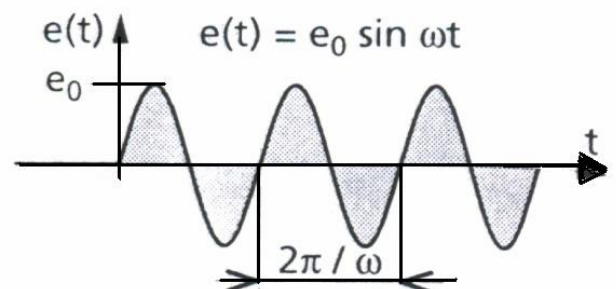
- L'entrée impulsion.



- L'entrée rampe.



- L'entrée sinusoïdale.



e est un signal sinusoïdal :

Sa fréquence est f, sa pulsation ω et sa période $T = 2\pi / \omega$

Variation de consigne de type « échelon » : Cela correspond à une variation brusque de la consigne (ou de l'écart consigne – signal capteur) pour aboutir à une valeur constante indépendante du temps

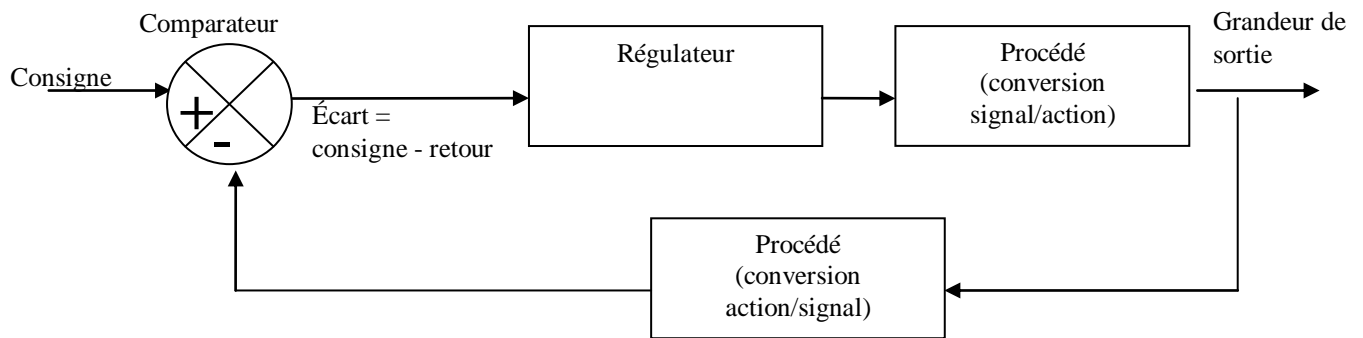
Variation de consigne de type « impulsion » : Ce signal subit une variation brutale de courte durée. Le cahier des charges spécifie alors une réaction ou non de la sortie.

Variation de consigne de type « rampe » : Ce signal varie linéairement au cours du temps, on parle de pente.

Variation de consigne de type « entrée sinusoïdale » : Ce signal varie selon une loi sinusoïdale, il permet de vérifier la réponse en fréquence d'un asservissement (déphasage et amplitude).

3. Boucle ouverte, boucle fermée

Schéma bloc d'un système asservi :



Différenciation entre boucle ouverte et boucle fermée :

- a) Une machine de production doit produire 3600 produits / heure. L'opérateur se rend compte que la machine n'en produit que 3000, il augmente manuellement la vitesse de la machine afin d'obtenir la cadence souhaitée.

- b) Une machine de production doit produire 3600 produits / heure. L'automate se rend compte que la machine n'en produit que 3000, il augmente automatiquement la vitesse de la machine afin d'atteindre la cadence souhaitée.

Synthèse : Une boucle de régulation sera élaborée lorsque les critères de rapidité, précision et stabilité ne sont pas respectés en chaine d'action seule (boucle ouverte).

Perturbation : Action de l'environnement sur le système

Fonctionnement en boucle ouverte : la rétroaction est dépendante du milieu extérieur (en général l'homme).

Fonctionnement en boucle fermée : la rétroaction est indépendante du milieu extérieur (intrinsèque au système).

4. Exercices d'application :

Tracer les schémas blocs des systèmes suivants et dites s'ils sont à boucle ouverte ou fermée:

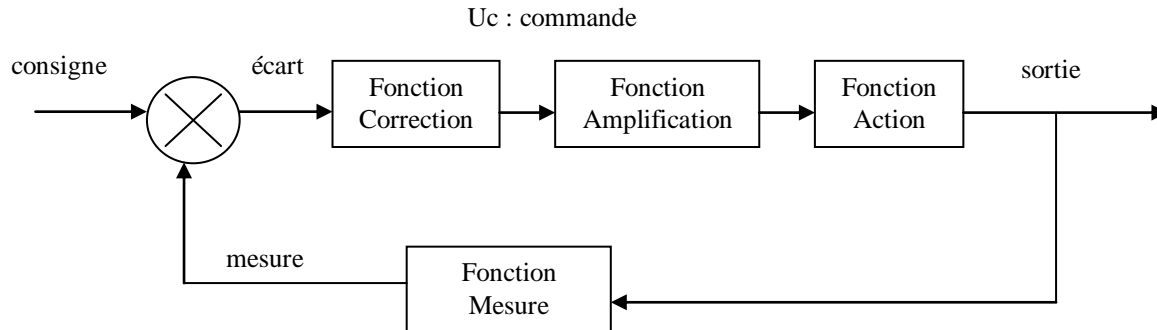
- a) Système automatique de régulation de température d'un bain avec sonde PT100.
- b) Système de régulation de vitesse de production d'une machine avec variateur de fréquence et codeur incrémental et unité de dialogue pour la saisie de la consigne de cadence.
- c) Système de régulation de vitesse de production d'une machine avec variateur de fréquence, et potentiomètre sur le pupitre de dialogue permettant la saisie de la consigne de cadence.
- d) Système de régulation de pression d'air en fonction des variations de consommation de celui-ci, avec un capteur analogique de pression.

5) Rôle et principe des correcteurs (proportionnel, intégral, dérivé) :

Afin de respecter au mieux les 3 critères du cahier des charges, aussi bien en régime transitoire que permanent, il faut alors corriger le signal en sortie du comparateur.

Le comportement global d'un système asservi dépend de la nature des blocs présents dans la boucle. On place donc un bloc paramétrable dans la boucle, que l'on appelle communément **correcteur** (on le place généralement juste derrière le comparateur).

Le schéma fonctionnel d'un système asservi muni d'un correcteur est le suivant :

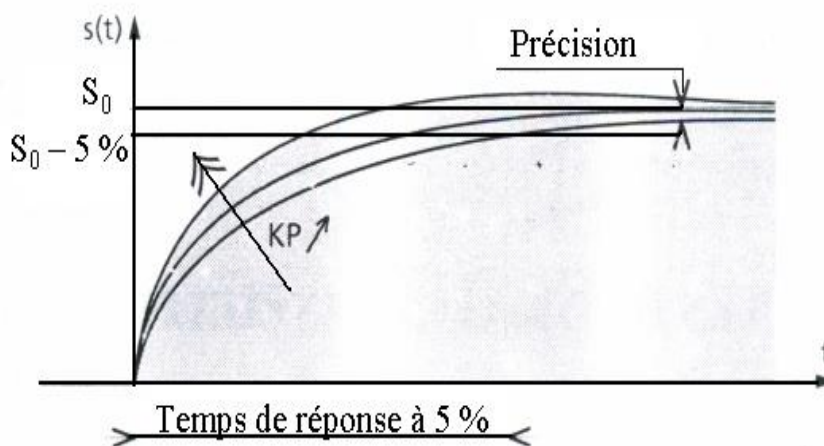


5.1. P pour proportionnel :

Le correcteur P introduit un coefficient proportionnel (K_P) en plus du gain (amplification) de la chaîne directe.

La commande du préactionneur ou de l'actionneur sera donc $U_c = K_P \text{Ecart}(t)$

Voici la réponse temporelle obtenue pour une entrée en échelon :



En résumé, on peut dire que si le gain proportionnel augmente, alors :

- La rapidité augmente ;
- La précision augmente ;
- La stabilité diminue.

Un correcteur à action proportionnelle (réglage par gain) peut suffire en général. La valeur de K_P agit sur la **rapidité** du système et sur sa **précision**, mais le système a un comportement plus « vif » et peut conduire à une **instabilité**. *C'est le dilemme « Stabilité-Précision ».*

Le réglage du gain d'un asservissement va consister en un compromis : augmentation du gain au maximum sans atteindre la limite de stabilité. En pratique, on prendra une marge de sécurité appelée marge de gain.

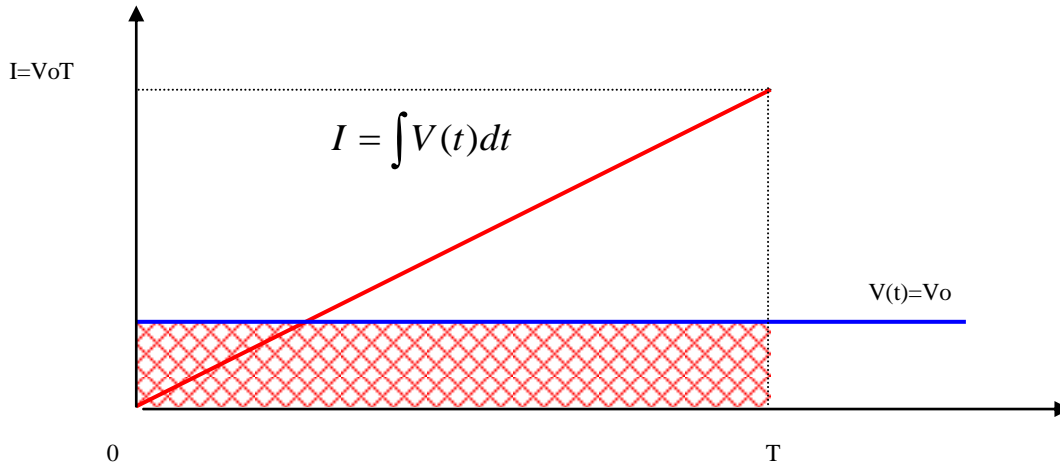
Rq : la partie proportionnelle du correcteur (K_P) ne tient pas compte du comportement de l'écart. Sur un intervalle de temps donné, cet écart peut être constant, décroissant ou croissant.

On utilise donc deux autres facteurs I (pour Intégral) et D (pour dérivé).

5.2. I pour intégral.

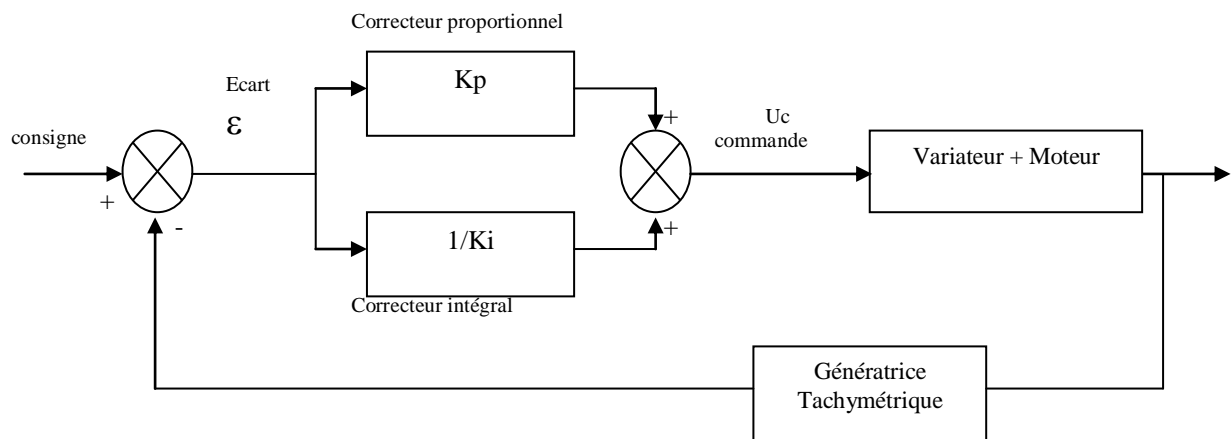
L'action intégrale est une action progressive et persévérante. Le correcteur intégral permet de prendre en compte des erreurs statiques très faibles par un processus d'accumulation. En effet, si on considère une valeur constante

dans le temps : $V(t)=V_0$. L'intégrale de cette valeur est :
$$I = \int_0^T V(t)dt = V_0 T$$



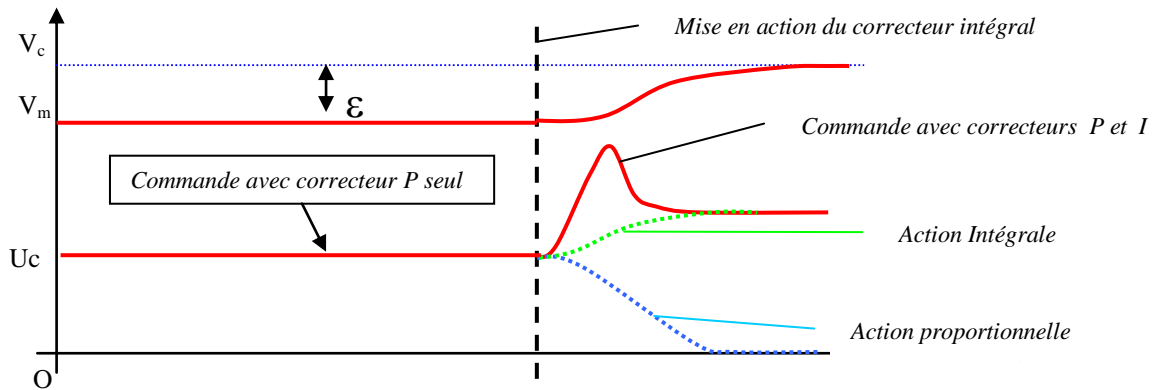
L'intégrale est la surface couverte par la grandeur intégrée : même si V_0 est très petit, au bout d'un certain temps, son intégrale devient suffisamment grande.

Prenons l'exemple d'un asservissement de vitesse :



Le signal de commande sera :
$$Uc(t) = K_p \varepsilon(t) + \frac{1}{K_i} \int \varepsilon(t) dt$$
 avec K_p coefficient d'action proportionnelle et K_i coefficient d'action intégrale (on l'appelle parfois T_i).

En régime permanent (vitesse visée V_c) il existe un écart $\varepsilon(t)$ non nul permettant le pilotage du moteur à la vitesse V_m . Dès sa mise en action, le correcteur intégral va commencer à accumuler l'écart.



Le signal de commande U_c va progressivement augmenter, la vitesse du moteur aussi, l'écart va donc diminuer.

Le correcteur proportionnel fournit un signal de plus en plus faible, tandis que le correcteur intégral accumule l'écart et fournit un signal de plus en plus fort. Au bout d'un certain temps, la vitesse du moteur V_m est égale à la consigne V_c :

L'écart est nul ;

Le signal proportionnel est nul ;

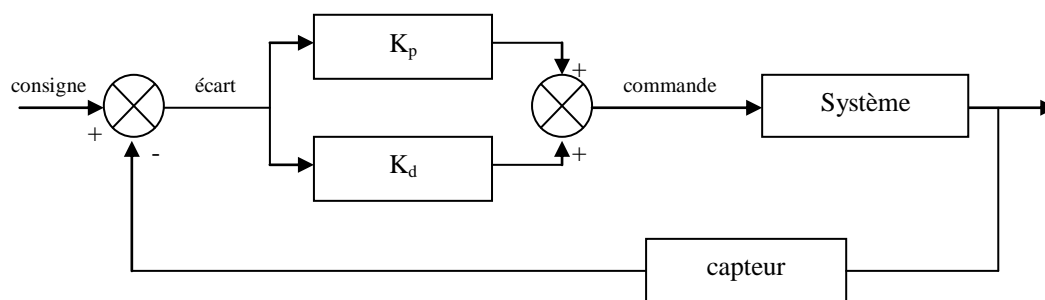
Le signal intégral est constant (il accumule une valeur nulle, donc n'augmente plus).

L'intégrateur fournit le signal de commande permanent nécessaire à l'entretien de la vitesse de rotation du moteur à la vitesse visée : **le système est devenu précis**. De plus, si une perturbation survient, le correcteur intégral intervient afin de corriger l'écart.

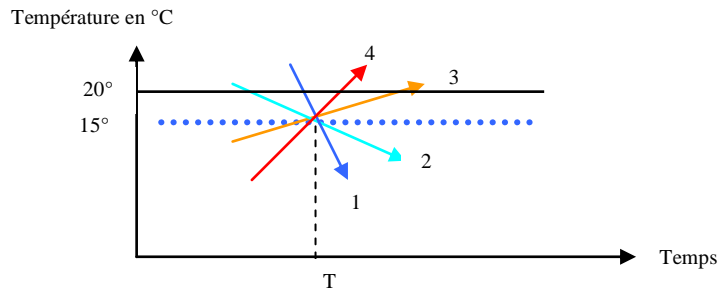
5.3. D pour dérivé.

Le principe de correction dérivée consiste en une **correction par anticipation** en fonction de l'évolution de l'écart. Plus l'écart varie rapidement, plus la commande est importante pour compenser rapidement cette variation. Mathématiquement, la variation du signal d'écart $\varepsilon(t)$ est donnée par sa dérivée $d\varepsilon(t)/dt$ et le sens de la variation par le signe de la dérivée (d'où le nom du correcteur). Le correcteur dérivé, c'est « **agir au plus tôt pour agir peu** ». Pour un signal d'écart identique, la correction dérivée fournira donc un signal de commande différent suivant que ce signal d'écart est en train d'augmenter ou de diminuer, vite ou lentement.

Prenons l'exemple d'une régulation de température dans un habitacle par un système de climatisation régulée.



Dans le cas de la régulation de température d'un habitacle de véhicule, imaginons quatre cas de figure (représentés ci-dessous) : on observe le système à l'instant T, la consigne restant inchangée $C = 20^\circ\text{C}$



1. Température de 15°C baissant rapidement.
2. Température de 15°C baissant lentement.
3. Température de 15°C augmentant lentement.
4. Température de 15°C augmentant rapidement.

Observons maintenant la réaction du système à l'instant T : dans tous les cas, le signal de commande est $Uc(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) + K_d \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$ avec $Uc(t)$ signal de commande, K_p coefficient d'action proportionnelle et K_d coefficient d'action dérivée (parfois appelé T_d). K_p et K_d sont positifs et réglables.

En l'absence de correction dérivée, le système réagirait de manière identique dans les quatre cas. En effet, l'écart à l'instant T est le même ($\varepsilon(t)=5^\circ\text{C}$) et le signal de commande serait le même ($Uc(T)=K_p \cdot \varepsilon(T)=5K_p$).

Intuitivement, on sent bien qu'il faut pourtant chauffer plus fort dans le cas 1 que dans le cas 4. C'est la contribution du correcteur dérivé qui va permettre cette différence de réaction. Le tableau ci-dessous résume le comportement du système à l'instant T dans les quatre cas :

cas	Consigne	Mesure	Variation de la mesure	Ecart	Variation de l'écart	Signal proportionnel	Signal dérivé	Signal de commande
1	$C=20^\circ\text{C}$	$R=15^\circ\text{C}$	$-1^\circ/\text{s}$	$\varepsilon=5^\circ\text{C}$	$+1^\circ/\text{s}$	$5K_p$	$+K_d$	$5K_p+K_d$
2	$C=20^\circ\text{C}$	$R=15^\circ\text{C}$	$-0.1^\circ/\text{s}$	$\varepsilon=5^\circ\text{C}$	$+0.1^\circ/\text{s}$	$5K_p$	$+0.1K_d$	$5K_p+0.1K_d$
3	$C=20^\circ\text{C}$	$R=15^\circ\text{C}$	$+0.1^\circ/\text{s}$	$\varepsilon=5^\circ\text{C}$	$-0.1^\circ/\text{s}$	$5K_p$	$-0.1K_d$	$5K_p-0.1K_d$
4	$C=20^\circ\text{C}$	$R=15^\circ\text{C}$	$+1^\circ/\text{s}$	$\varepsilon=5^\circ\text{C}$	$-1^\circ/\text{s}$	$5K_p$	$-K_d$	$5K_p-K_d$

Dans les cas 1 et 2, où la température baisse, le signal proportionnel est renforcé légèrement. Dans le cas 2 et plus fortement dans le cas 1 : la consigne sera plus vite atteinte et donc la rapidité augmente.

Dans les cas 3 et 4, où la température augmente, le signal proportionnel est diminué légèrement. Dans le cas 3 et plus fortement dans le cas 4 : l'élan vers la consigne est freiné, le dépassement sera plus faible, voire nul. On peut donc dire que la stabilité augmente. Plus le paramètre K_d est grand, plus cette influence sera importante.

On pourra remarquer qu'à un instant T_1 , l'écart deviendra assez faible en se rapprochant de la consigne (dérivée du signal d'écart négative) et le signal de commande $Uc(T_1) = K_p \cdot \varepsilon(T_1) + K_d \cdot \frac{d\varepsilon(T_1)}{dt}$ peut alors devenir nul voire négatif. Ce moment dépendra des valeurs respectives de K_p et K_d .

En pratique, cela signifie que l'on arrête d'envoyer de l'air chaud avant que la température visée ne soit atteinte, et aussi que l'on commence à refroidir avant qu'il ne fasse trop chaud par dépassement de la consigne.

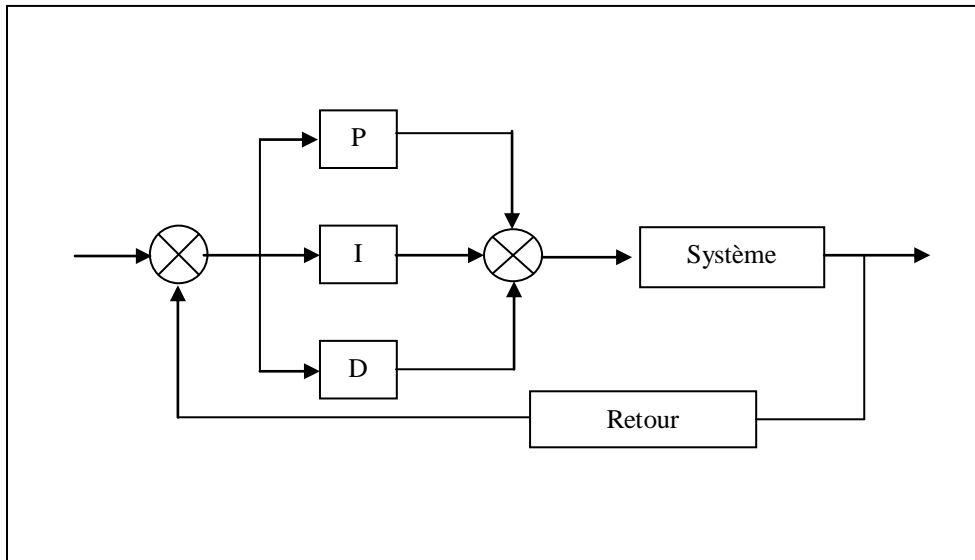
C'est le conflit rapidité / stabilité

Particularités du correcteur dérivé :

Si l'erreur est constante en régime permanent, le signal dérivé est nul, donc ce correcteur n'améliore pas la précision ;
On utilise toujours un correcteur proportionnel avec le correcteur dérivé ;
Si l'erreur varie brutalement (échelon au démarrage par exemple) la dérivée devient infinie en théorie, très grande en pratique : il est donc nécessaire de limiter ce signal (par saturation des amplificateurs V_{sat}) ;
L'action dérivée augmente la sensibilité aux parasites (bruits de fond) : on trouvera parfois un filtre en série avec le correcteur ;

5.4. Le correcteur PID.

Il cumule les avantages de PI et de PD.



La figure ci-dessus représente un PID parallèle avec :

$$Uc(t) = K_p \varepsilon(t) + K_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} + \frac{1}{K_i} \int \varepsilon(t) dt$$

Le réglage d'un PID consiste donc à régler les paramètres K_p , K_d et K_i . Il existe trois méthodes :

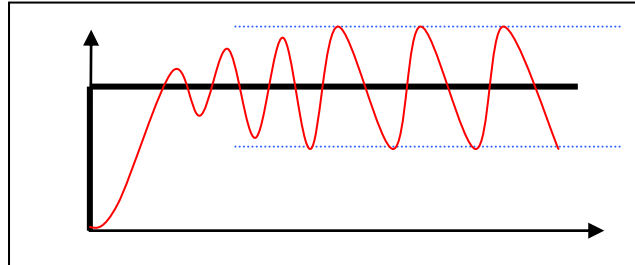
Par approches successives : c'est une méthode longue et fastidieuse ;
Par modélisation : c'est une démarche d'ingénieur concepteur ;
Par une méthode empirique : la méthode de Ziegler et Nichols.

Remarque : on pourrait penser que l'effet du correcteur dérivé (à avance de phase) s'oppose à celui du correcteur intégrale (à retard de phase). En fait, il n'en n'est rien car le premier concerne les hautes fréquences alors que le second concerne les basses fréquences.

6. Réglage des correcteurs : Méthode de Ziegler et Nichols.

C'est une méthode de réglage des paramètres d'un PID amenant un dépassement de 25% et une oscillation minimum :

Avec la *seule action proportionnelle*, amener le système en *boucle fermée* en régime d'oscillations entretenues (*pompage*).



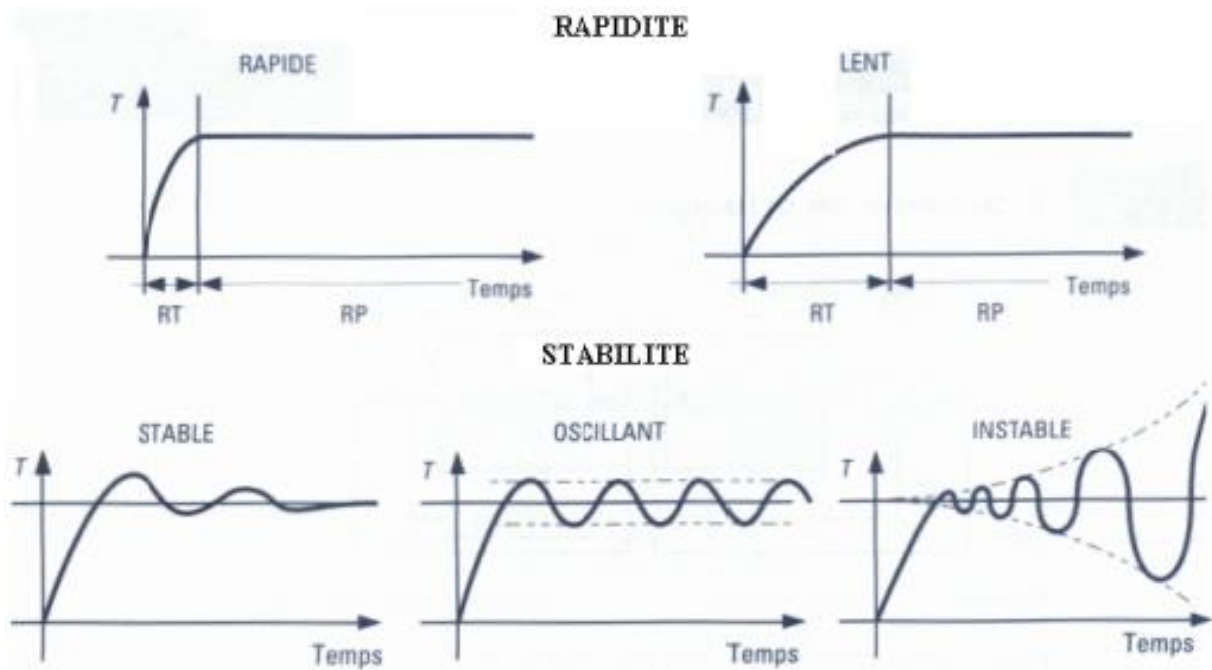
Noter le gain critique G_c ;

Mesurer la période T des oscillations en s ;

Utiliser le tableau suivant :

	P	PI série	PI parallèle	PID série	PID parallèle
K_p	$G_c/2$	$G_c/2.2$	$G_c/2.2$	$G_c/3.3$	$G_c/1.7$
K_i ou T_i	maxi	$T/1.2$	$2T/G_c$	$T/4$	$0.85T/G_c$
K_d ou T_d	0	0	0	$T/4$	$TG_c/13.3$

7. Quelques exemples de caractéristiques en rapidité et stabilité



8. Résumé des actions PID

Action	Rôle et domaine d'utilisation
P	L'action Proportionnelle agit de manière instantanée, donc rapide. Afin de diminuer l'écart de réglage et rendre le système plus rapide, on augmente le gain mais, on est limité par la stabilité du système. Le régulateur P est utilisé lorsqu'on désire régler un paramètre dont la précision n'est pas importante, exemple : régler le niveau dans un bac de stockage.
I	L'action intégrale complète l'action proportionnelle. Elle permet d'éliminer l'erreur statique résiduelle en régime permanent. Afin de rendre le système plus dynamique (diminuer le temps de réponse), on diminue l'action intégrale (car $1/K_i$) . L'action intégrale est utilisée lorsqu'on désire avoir en régime permanent, une précision parfaite, en outre, elle permet de filtrer la variable à régler d'où l'utilité pour le réglage des variables bruitées telles que la pression. C'est le correcteur en cas de perturbation.
D	L'action Dérivée, en compensant les inerties dues au temps mort, accélère la réponse du système et améliore la stabilité de la boucle, en permettant notamment un amortissement rapide des oscillations dues à l'apparition d'une perturbation ou à une variation subite de la consigne. Dans la pratique, l'action dérivée est appliquée aux variations de la grandeur à régler seule et non de l'écart mesure. L'action D est utilisée pour le réglage des variables lentes telles que la température, elle n'est pas recommandée pour le réglage d'une variable bruitée ou trop dynamique (la pression). En dérivant un bruit, son amplitude risque de devenir plus importante que celle du signal utile.

Résumé du résumé

Action	Avantage	Désavantage
P	Dynamique	Ne permet pas d'annuler une erreur statique
I	Annulation d'erreur statique Amélioration de la robustesse	Action lente Ralentit le système (effet déstabilisant)
D	Action très dynamique Améliore la rapidité (effet stabilisant)	Sensibilité aux bruits Forte sollicitation de l'organe de commande (effet booster)