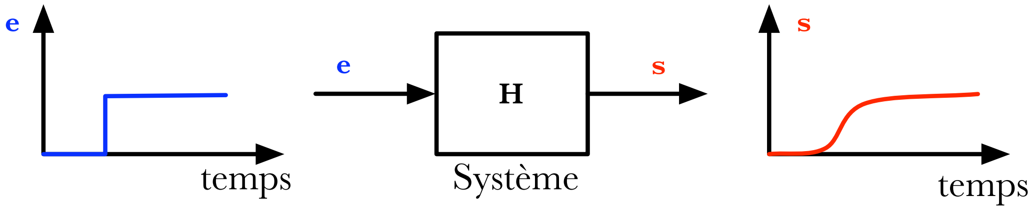
2) Boucles simples

1. Critères de qualité d'une régulation

1.1. Stabilité

1.1.1. Procédés stables

Un procédé est dit naturellement stable si à une variation finie de la grandeur réglante E correspond une variation finie de la grandeur réglée S.

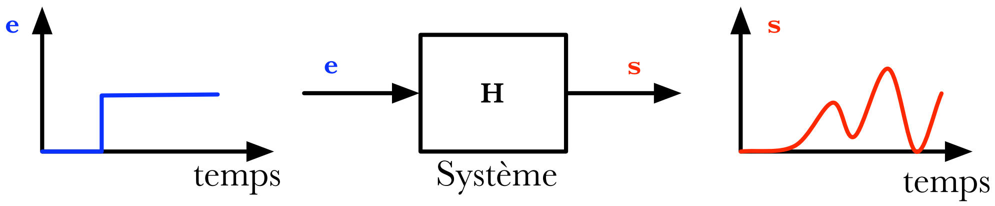


Exemple :

- Grandeur réglée : température d'une pièce ;
- Grandeur réglante : puissance du radiateur.

1.1.2. Procédé instable

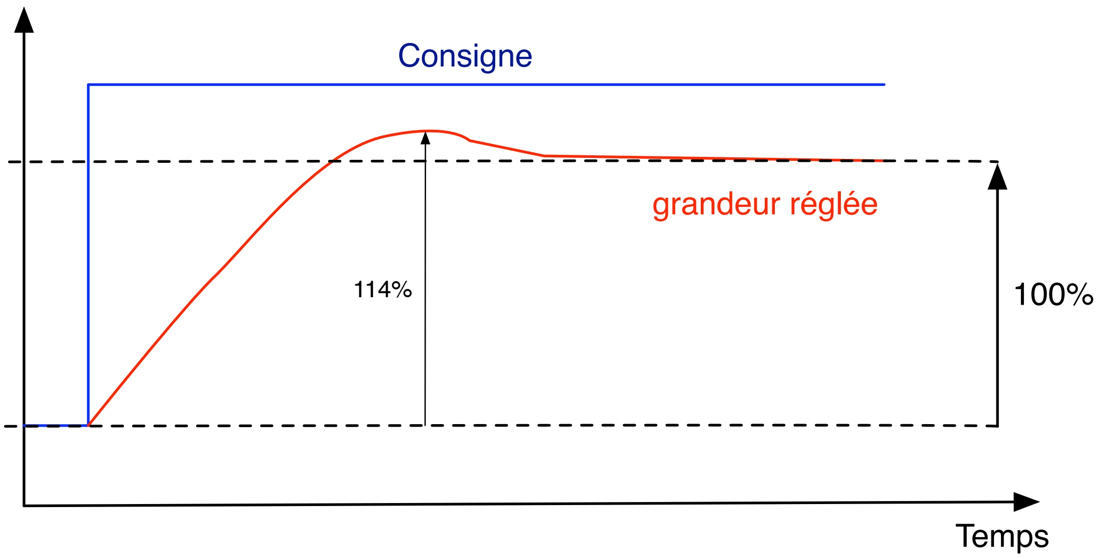
Un système est dit instable si à une variation finie de la grandeur réglante E correspond une variation continue de la grandeur réglée S.



1.1.3. De la stabilité à l'instabilité

Dans une régulation, l'entrée e est la consigne w et la sortie s, la mesure x. Le premier dépassement permet de qualifier la stabilité de la régulation. Plus celui-ci sera important, plus la régulation sera proche de l'instabilité. Dans certaines régulations, aucun dépassement n'est toléré. Dans d'autres régulations, un dépassement inférieur à 15 % est considéré comme acceptable.

Dans la réponse indicielle ci-dessous, le premier dépassement est de 14 %.



Attention : La mesure du dépassement se fait par rapport à la valeur finale de la mesure et non par rapport à la consigne.

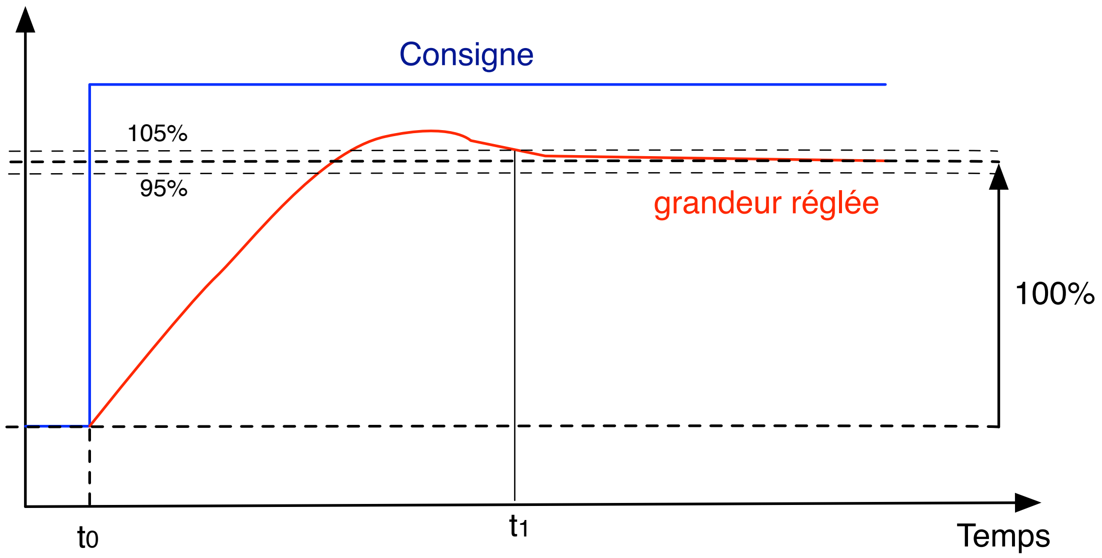
1.2. Précision

Si la régulation est stable, la précision se mesure à l'aide de l'erreur statique ε_s qui est la différence entre la consigne w et la mesure x en régime permanent. Plus ε_s est petit, plus le système est précis.

$$\varepsilon_s = \lim_{t \to \infty}(w(t) - x(t))$$

1.3. Rapidité

C'est l'aptitude du système à suivre les variations de la consigne. Dans le cas d'un échelon de la consigne, la croissance de la grandeur réglée définit les différents temps de réponse. Dans l'exemple ci-dessous, on mesure le temps de réponse à ±5% qui est égal à t1 – t0.

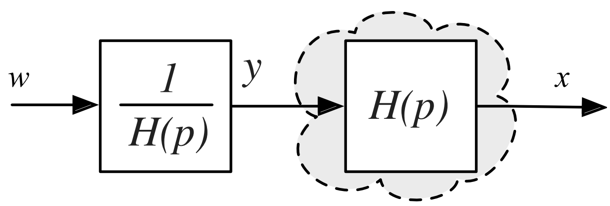


1.4. Compromis

La régulation parfaite est à la fois précise, rapide et stable. Le problème de la précision étant facile à résoudre, il faudra en fait trouver un compromis entre la stabilité et la rapidité. Le dépassement sera souvent le critère de réglage utilisé.

2. Régulation en chaine ouverte (régulation de tendance)

Il ne s'agit pas à proprement parler de régulation, car cette technique n'utilise pas la mesure pour déterminer la commande du régulateur. On suppose que l'on connait parfaitement la fonction de transfert du système H(p). Il suffit alors de prendre $C(p) = H^{-1}(p)$. Le système peut alors être représenté de la manière suivante :

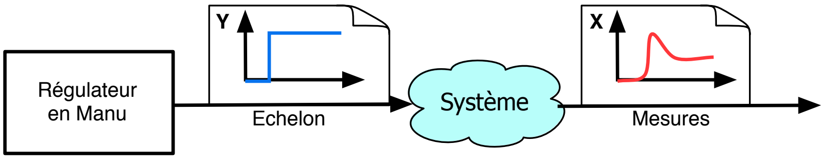


Mais la fonction de transfert réelle H(p) varie en fonction du point de fonctionnement et les systèmes réels sont soumis à des perturbations. De plus pour certaine fonction de transfert (retard), $H^{-1}(p)$ n'existe pas. On utilisera ce type de commande uniquement si la mesure de la grandeur réglée est 'difficile' et le système 'facilement modélisable'.

3. Modélisation

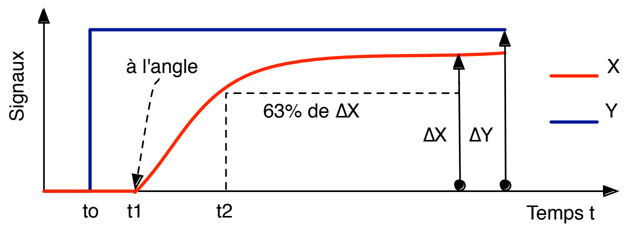
3.1. Mise en œuvre

Autour du point du fonctionnement, on relève la réponse du système, à un petit échelon du signal de sortie y du régulateur. Attention à ne pas saturer la mesure x.



3.2. Procédé stable

3.2.1. Méthode simple

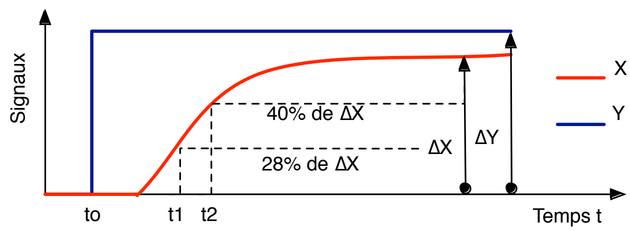
Allures des signaux	Modèle de Broïda
	$H(p)=\frac{K.e^{-Tp}}{1+\tau p}$

À partir des constructions ci-dessus, on calcule :

- Le gain statique : K = ΔX/ΔY ;
- Le retard : T = t1 - t0 ;
- La constante de temps : τ = t2 - t1.

On privilège cette méthode si l'angle est aisé à identifier.

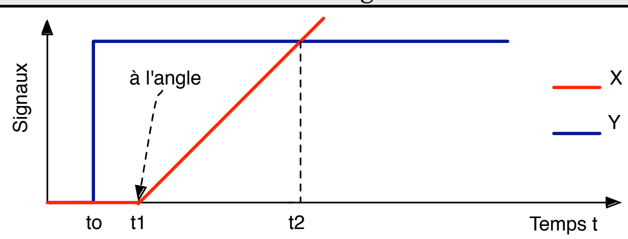
3.2.2. Méthode Broïda

Allures des signaux	Modèle de Broïda
	$H(p)=\frac{K.e^{-Tp}}{1+\tau p}$

À partir des constructions ci-dessus, on calcule :

- Le gain statique : K = ΔX/ΔY ;
- Le retard : T = 2,8(t1-t0) - 1,8(t2-t0). Attention !! T doit être positif ;
- La constante de temps : τ = 5,5(t2-t1).

3.3. Procédé instable

Allures des signaux	Modèle intégrateur avec retard
	$H(p)=\frac{e^{-Tp}}{\tau p}$

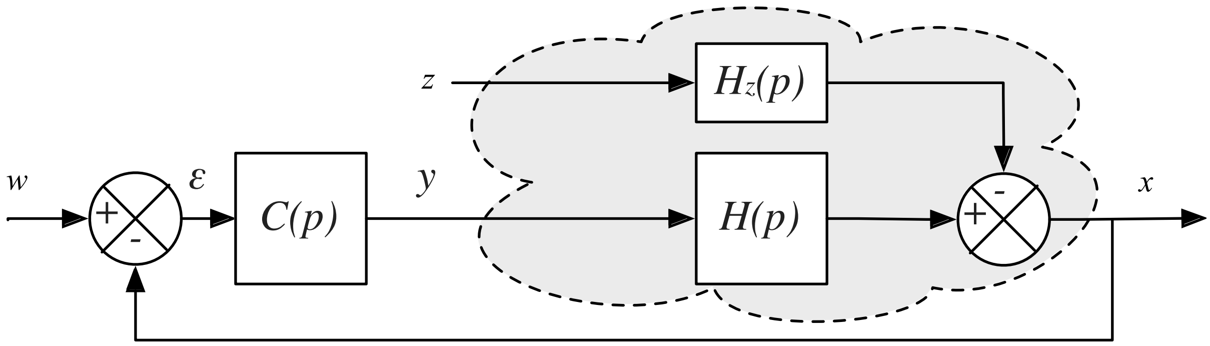
À partir des constructions ci-dessus, on calcule :

- Le retard : T = t1 - t0 ;
- La constante de temps d'intégration : τ = t2 - t1.

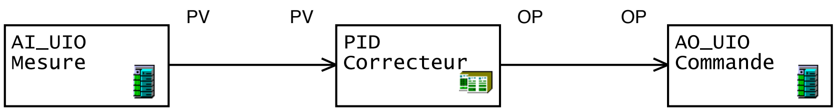
4. Régulation en chaîne fermée

4.1. Présentation

C'est la régulation que vous avez étudiée jusqu'à présent. La mesure est comparée à la consigne afin de calculer le signal de commande.
Le système, avec une perturbation z, peut être représenté de la manière suivante :



4.2. Programmation sur T2550



Le schéma est simple. La boucle est composé d'une mesure (AI_UIO), d'un correcteur PID (PID) et d'une sortie (AO_UIO).

4.3. Choix du sens d'action d'un régulateur

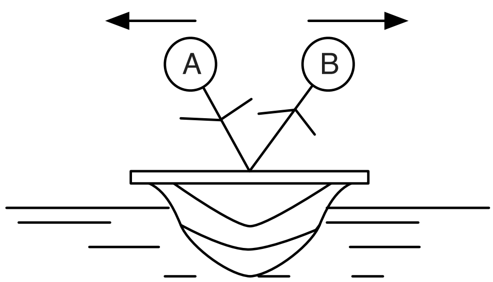
4.3.1. Définition

Un procédé est direct, quand sa sortie varie dans le même sens que son entrée. Dans le cas contraire, le procédé est dit inverse. Dans un régulateur, la mesure est considérée comme une entrée.

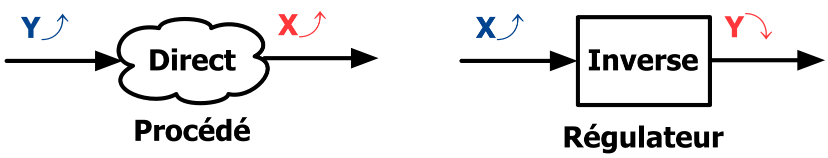
4.3.2. Règle de stabilité

Dans la barque représentée ci-contre, si A se penche trop vers la gauche, B est obligé de se pencher sur la droite pour maintenir la barque en équilibre et ne pas finir dans l'eau. Dans une boucle de régulation c'est la même chose, le régulateur doit agir pour limiter les variations du procédé.

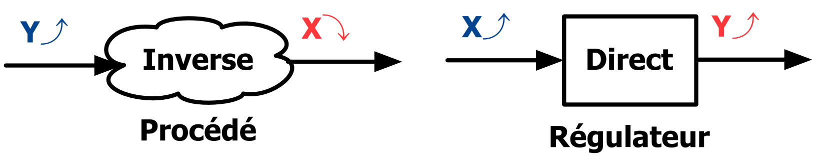
Règle : Pour avoir un système stable dans une boucle de régulation, le régulateur doit agir de manière à s'opposer à une variation de la mesure X non désirée. Si X augmente, le couple régulateur + procédé doit tendre à le faire diminuer.



Si le procédé est direct : Il faut mettre le sens d'action du régulateur sur inverse.



Si le procédé est inverse : Il faut mettre le sens d'action du régulateur sur directe.



4.3.3. Mise en œuvre pratique

- Mettre le régulateur en manuel ;
- Augmenter la sortie commande du régulateur ;
- Si la mesure augmente, mettre le régulateur en sens inverse ;
- Si la mesure diminue, mettre le régulateur en sens direct.

4.3.4. T2550

Dans le bloc PID, on trouve sur la colonne de droite le champ Options. Par défaut InvPID est à FALSE (inverse). Pour paramétrer le régulateur avec une action directe, il suffit de mettre InvPID à TRUE.

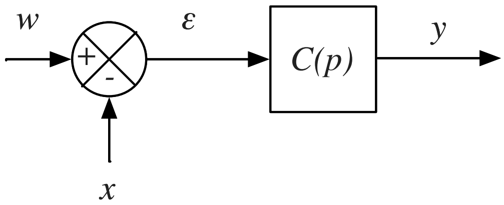
Options	
InvPID	FALSE
SL_Track	FALSE
IntBalSL	TRUE
IntBalXP	TRUE
IntBal	FALSE
MSelFunc	TRUE

4.4. Composition des régulateurs PID

4.4.1. Composition

Tout régulateur PID est constitué de deux éléments principaux :

- Le comparateur ;
- Le correcteur C(p).



4.4.2. Correction proportionnelle P

C'est un simple amplificateur : $C(p) = A$

4.4.3. Correction intégrale I

Le correcteur s'écrit : $C(p) = \dfrac{1}{T_i p}$

Ti est la constante de temps d'action intégrale et s'exprime en unité de temps.

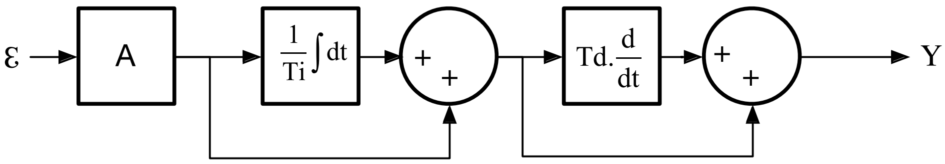
4.4.4. Correction dérivée D

C'est un simple amplificateur : $C(p) = T_d p$

Td est la constante de temps d'action dérivée et s'exprime en unité de temps.

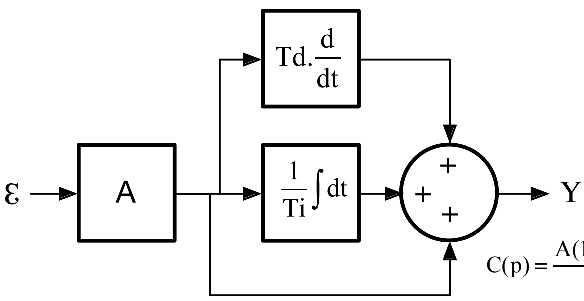
4.5. Structures PID

Le triplet, gain proportionnel A, temps intégral Ti et temps dérivé Td, définit trois structures qui sont représentées sur les figures suivantes.



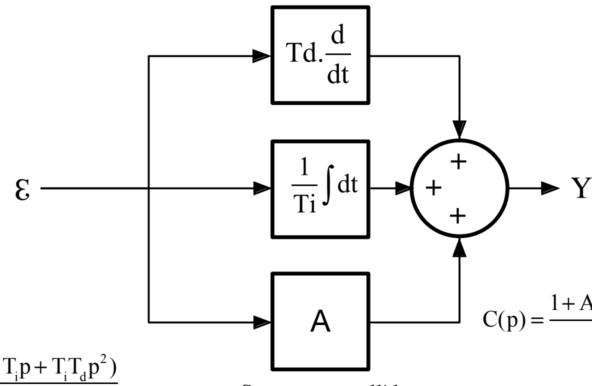
$$C(p) = \frac{A(1+T_i p)(1+T_d p)}{T_i p}$$

Structure série



$$C(p) = \frac{A(1+T_i p + T_i T_d p^2)}{T_i p}$$

Structure Mixte



$$C(p) = \frac{1 + A T_i p + T_i T_d p^2}{T_i p}$$

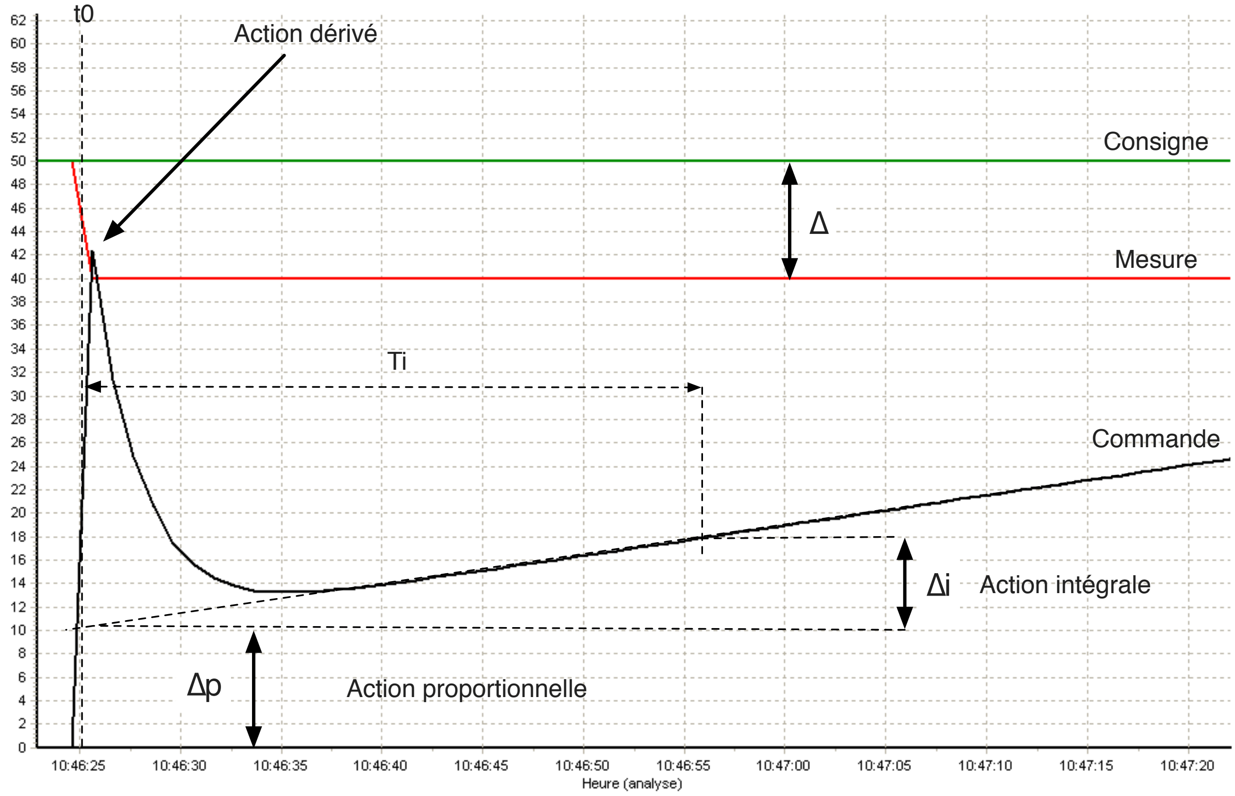
Structure parallèle

Remarque : Les régulateurs électroniques (tous ceux de la salle de travaux pratiques) ont une structure mixte.

4.6. Réponse indicielle

On observe la commande d'un régulateur en réponse à un échelon Δ d'erreur. La réponse Y est alors composée de trois parties distincts :

- Un pic résultant de l'action dérivée ;
- Un échelon résultant de l'action proportionnelle ;
- Une rampe résultant de l'action intégrale.



4.7. Déterminer la structure interne d'un correcteur

La figure ci-avant montre les constructions nécessaires à la détermination de deux Δ, Δp et Δi, permettant de déterminer la structure du régulateur. Le tableau suivant permet de connaître la valeur de ces deux Δ en fonction de la structure du régulateur.

Structure	Δp	Δi
Mixte	A×Δ	A×Δ
Série	A(1+Td/Ti)×Δ	A×Δ
Parallèle	A×Δ	Δ

4.8. Mise en œuvre pratique

Régulateur en automatique, sens d'action réglé en inverse, commande à 0%. On règle Xp à 200%, Ti et Td à 10s. On fait un échelon de mesure Δ de 25% et on relève Δp et Δi à l'aide de constructions graphique.

On détermine la structure à l'aide du tableau suivant :

Structure	Δp en %	Δi en %
Mixte	12,5	12,5
Série	25	12,5
Parallèle	12,5	25

4.9. Réglages avec modèle

Modèle stable	Modèle instable
$H(p)=\dfrac{Ke^{-T.p}}{1+\tau.p}$	$H(p)=\dfrac{e^{-T.p}}{\tau.p}$

Le facteur de réglabilité kr = T/τ, permet de connaître quel type de régulation PID utiliser :

TOR	0,05	P	0,1	PI	0,2	PID	0,5	Autre

La régulation PID, avec un seul correcteur, est d'autant moins efficace que :

- Le rapport T/ τ est supérieur à 0,5 ;
- La perturbation z est trop importante.

À partir des tableaux suivants, on détermine les réglages du correcteur PID :

Modèle stable

	P	PI série	PI //	PID série	PID //	PID mixte
$A=\dfrac{100}{Xp}$	$\dfrac{0{,}8}{K\times k_r}$	$\dfrac{0{,}8}{K\times k_r}$	$\dfrac{0{,}8}{K\times k_r}$	$\dfrac{0{,}83}{K\times k_r}$	$\dfrac{0{,}83}{K}\times(\dfrac{1}{k_r}+0{,}4)$	$\dfrac{0{,}83}{K}\times(\dfrac{1}{k_r}+0{,}4)$
T_i	∞	τ	$1{,}25K\times T$	τ	$\dfrac{K\times T}{0{,}75}$	$\tau+0{,}4T$
T_d	0	0	0	$0{,}4T$	$\dfrac{0{,}35\tau}{K}$	$\dfrac{T}{k_r+2{,}5}$

Modèle instable

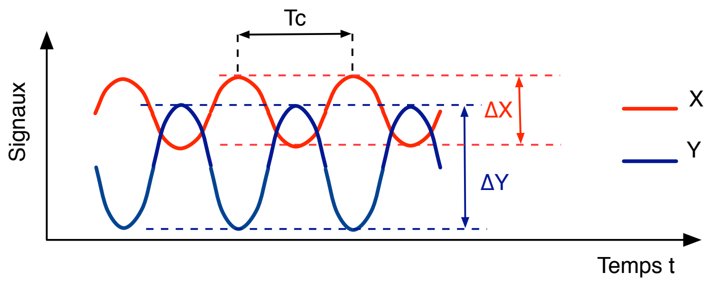
	P	PI série	PI //	PID série	PID //	PID mixte
$A=\dfrac{100}{Xp}$	$\dfrac{0{,}8}{k_r}$	$\dfrac{0{,}8}{k_r}$	$\dfrac{0{,}8}{k_r}$	$\dfrac{0{,}85}{k_r}$	$\dfrac{0{,}9}{k_r}$	$\dfrac{0{,}9}{k_r}$
T_i	∞	$5T$	$\dfrac{k_r\times T}{0{,}15}$	$4{,}8T$	$\dfrac{k_r\times T}{0{,}15}$	$5{,}2T$
T_d	0	0	0	$0{,}4T$	$\dfrac{0{,}35}{k_r}$	$0{,}4T$

Note : On rappelle que le correcteur PI série est un correcteur PID mixte avec Td = 0.

4.10. Réglage en chaîne fermée

4.10.1. Ziegler & Nichols

La méthode de Ziegler-Nichols est une méthode heuristique de réglage d'un régulateur PID. Elle utilise une identification du système en boucle fermée. Elle ne nous donne pas à proprement parlé un modèle, mais nous permet de relever deux caractéristiques du procédé qui nous permettront de déterminer un réglage satisfaisant.



Le système est en régulation proportionnelle (actions intégrale et dérivée annulées). On diminue la bande proportionnelle Xp jusqu'à obtenir un système en début d'instabilité, le signal de mesure X et la sortie du régulateur Y sont périodiques, sans saturation.

On relève alors la valeur du gain critique Ac réglé, ainsi que la période des oscillations Tc.
Les valeurs de Tc et de Ac permettent de calculer les actions PID du régulateur à l'aide du tableau fourni ci-après.

	P	PI série	PID mixte
$A = \frac{100}{Xp}$	$\frac{Ac}{2}$	$\frac{Ac}{2,2}$	$\frac{Ac}{1,7}$
T_i	∞	$\frac{Tc}{1,2}$	$\frac{Tc}{2}$
T_d	0	0	$\frac{Tc}{8}$

Remarques :

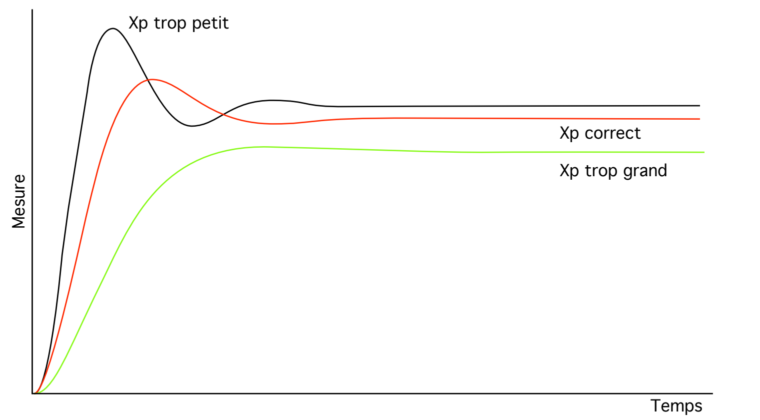
- La méthode de Ziegler-Nichols donne un gain agressif et favorise les dépassements ;
- Pour les applications qui ont besoin de dépassements minimaux voire nuls, la méthode de Ziegler-Nichols est inappropriée ;
- Le principal intérêt de cette méthode est sa grande simplicité: il n'est pas nécessaire de déterminer la fonction de transfert H(p) du système pour en réaliser la correction.

4.10.2. Méthode du Régleur

Le réglage du régulateur se fait par petit pas. Le système fonctionnant en boucle fermée, autour du point de consigne, on observe la réponse de la mesure à un échelon de consigne.

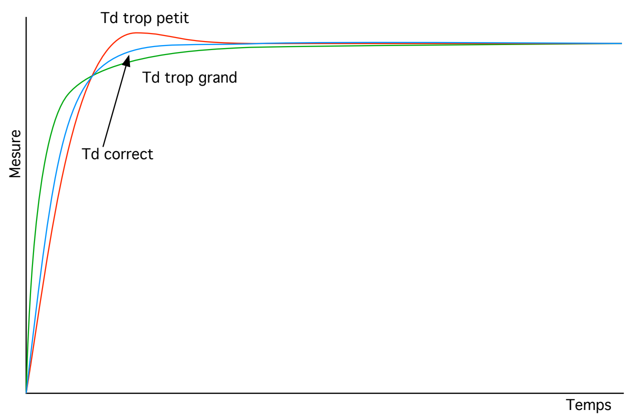
1. En régulation proportionnelle, on cherche la bande proportionnelle correcte en observant la réponse du système à un échelon de consigne :

Xp varie
Td = 0
Ti = ∞

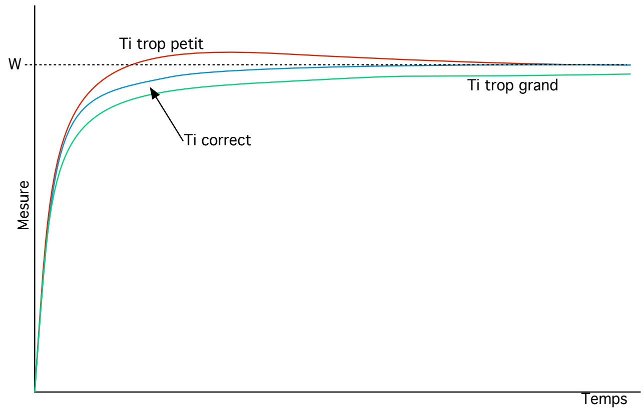


2. En régulation proportionnelle dérivée, on cherche le temps dérivé correct en observant la réponse du système à un échelon de consigne :

Xp fixé
Td varie
Ti = ∞



3. En régulation proportionnelle intégrale dérivée, on cherche le temps intégral correct en observant la réponse du système à un échelon de consigne :

Xp fixé Td fixé **Ti** varie	

Remarques :

- Si Td amène des instabilités pour de petites valeurs, on préférera prendre Td = 0 ;
- L'ordre P≫D≫I permet un réglage plus fin de l'action D que l'ordre P≫I≫D.

5. Conclusion

On trouve dans ce chapitre une multitude de méthodes pour régler une boucle simple de régulation. Si malgré tout vous désirez améliorer les performances de votre régulation, d'autres boucles, plus complexes, vous permettront de vous rapprocher de vos objectifs. On s'apercevra dans le prochain chapitre que l'augmentation du nombre de mesures ou du nombre d'organes de réglage augmentera la difficulté de réglage en même temps que le contrôle du procédé.