Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

<u>*CHAPITRE VII*</u>

IDENTIFIFACTION DES PROCEDES INDUSTRIELS

<u>*CHAPITRE VIII*</u>

REGULATION

<u>*CHAPITRE IX*</u>

REGULATION MULTI-BOUCLES

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

CHAPITRE *I* *INTRODUCTION A LA REGULATION*

CHAPITRE *II* *TYPES DE PROCEDES INDUSTRIELS*

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

CHAPITRE III PARAMETRES DES PROCEDES

CHAPITRE IV REGULATEURS

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

CHAPITRE V *STABILITE ADAPTEE AUX BOUCLES DE REGULATION*

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

CHAPITRE VI REGLAGE EXPERIMENTAL DES ACTIONS P.I.D

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

CHAPITRE *VII* *IDENTIFICATION DES PROCEDES*

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

CHAPITRE VIII REGULATION

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

CHAPITRE IX *REGULATION MULTIBOUCLES*

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

INDEX BIBLIOGRAPHIQUE
OUVRAGES SUR
LES ASSERVISSEMENTS ET LA REGULATION

- Dynamique de la commande linéaire
  J.C. GILLES, P. DECAULNE, M. PELEGRIN - Edit : Dunod

- Théorie et calcul des asservissements linéaires
  J.C. GILLES, P. DECAULNE, M. PELEGRIN - Edit : Dunod

- Asservissements linéaires
  F. MILSANT - Edit : Eyrolles

- Les régimes variables dans les systèmes linéaires et non-linéaires
  P. NASLIN - Edit. : Dunod

- Automatique Tome 1
  R. PRUDHOMME - Edit. : Masson & Cie

- Asservissements linéaires continus
  F. CARFORT et C. FOULARD - Edit. : Dunod

- Technique de la régulation industrielle
  D. DINDELEUX - Edit. : Eyrolles

- Thèse ingénieur en automatique C.N.A.M.
  J.P. MERISSE

- Cours d'automatique Tome 1 . Signaux et systèmes
  Tome 2 . Asservissement - Régulation - Commande analogique
  Tome 3 . Commande par calculateur - Indentification
  M. RIVOIRE, J.L. FERRIER - Edit. : Eyrolles

- Régulation et asservissement
  GUYENOT, HANS - Edit. : Eyrolles

- Commande et optimisation des processus
  P. BORNE - Edit. : Technip

- Commande et régulation par calculateur numérique
  C. FOULARD, S. GENTIL, J.P. SANDRAZ - Edit. : Eyrolles

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

- Pratique de la régulation numérique des processus industriels
  K. NAJIM, G. MURATET - Edit. : Masson

- Commande des processus industriels par calculateur
  Y. FACS - Edit. : Masson

- Boucles de régulation - Etude et mise au point par BHALY
  B. PIGERON
  H. MULLOT
  A. CHAIX
  L. FELIX
  Y. AUBERT - Edit. : Kirk

- Automatique
  Ph. LARMINAT - Edit. : Hermès Paris

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

INTRODUCTION A LA REGULATION

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél· 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

1 - BUT DE LA REGULATION -

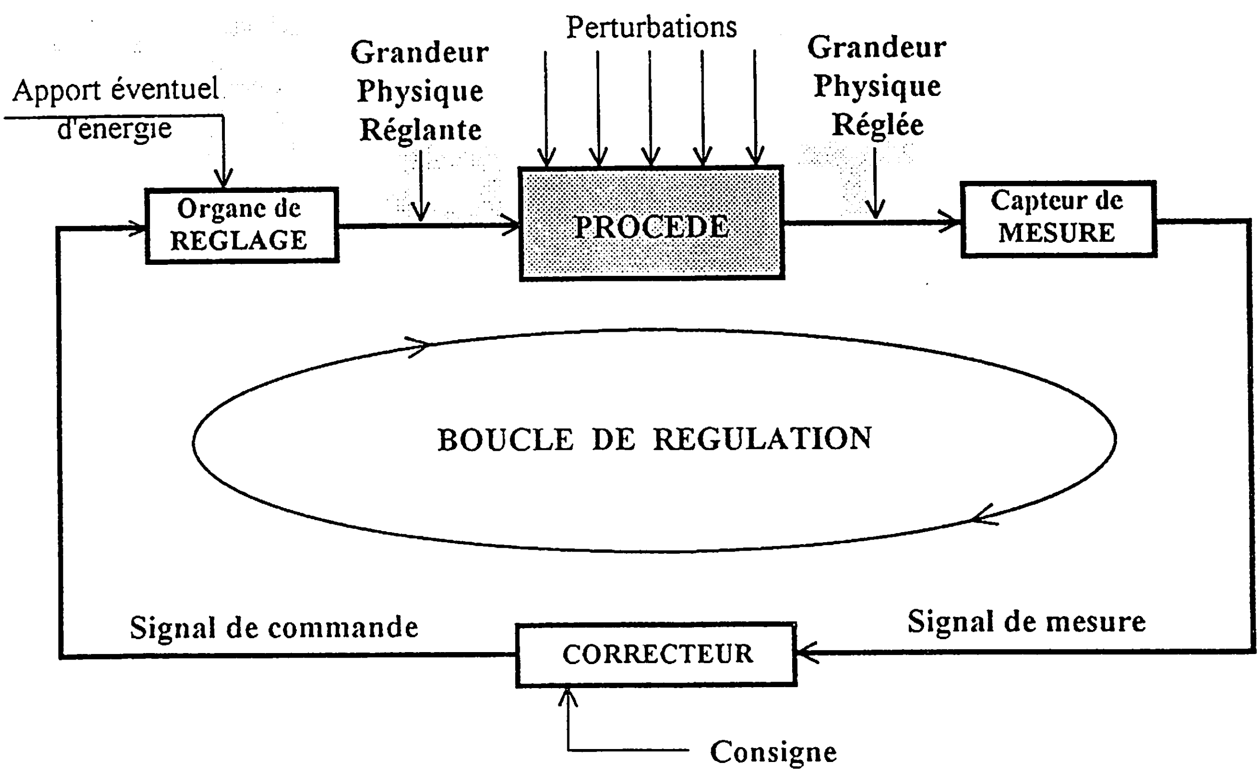
La régulation automatique ou "**AUTOMATIQUE**" regroupe l'ensemble des techniques utilisées visant à maintenir constante à une valeur désirée appelée **CONSIGNE**, une grandeur physique appelée **GRANDEUR REGLEE**, soumise à des **PERTURBATIONS**, en agissant sur une autre grandeur physique appelée **GRANDEUR REGLANTE**.

Pour réguler un système physique, il faut :

- **MESURER la grandeur à régler.**
  Capteurs de pression, niveau, débit, température ...
- **REFLECHIR sur l'attitude à suivre. Elaborer une loi de commande.**
  Correcteurs ou régulateurs, P, PI et PID ...
- **AGIR sur la grandeur réglante par l'intermédiaire d'un organe de réglage.**
  Vannes pneumatiques, électriques, unités à thyristors...

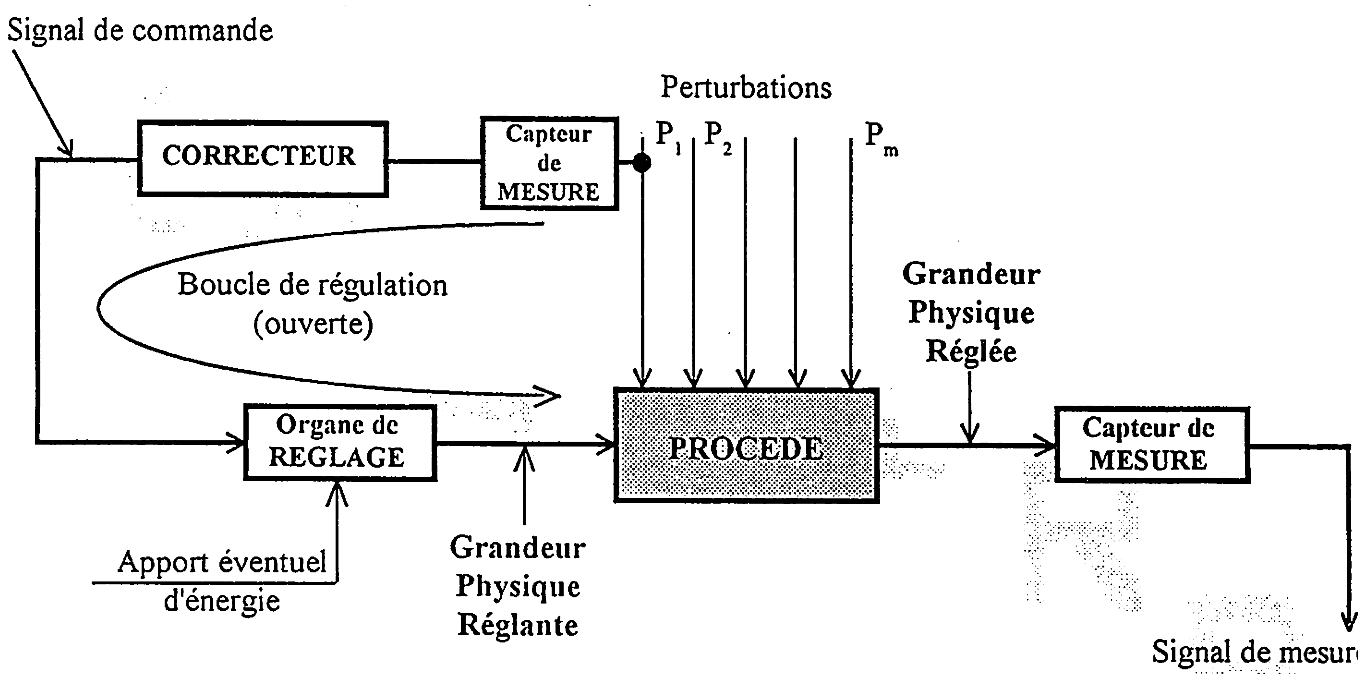
2 - TYPES DE BOUCLES DE REGULATION -

2.1 REGULATION EN BOUCLE FERMEE :



Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

2.2 REGULATION EN BOUCLE OUVERTE :



Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

3 - SYMBOLISATION ET TERMINOLOGIE UTILISEE EN INSTRUMENTATION -

3.1 AVANT-PROPOS :

Pour faciliter la réalisation et la lecture des plans et schémas sur lesquels figurent les instruments de mesure et de contrôle, il a été créé un système de symbolisation graphique des appareils de génie chimique, que nous trouverons sous forme de normes.

Principales normes utilisées :

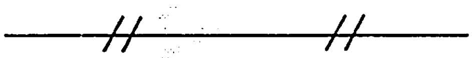
- la norme I.S.A : Instrument Society of America
- la norme D.I.N : D.I.N. (M.S.R.) Allemagne
- la norme AFNOR :
- NFE 04-203.1 : Principes de base
- NFE 04-203-2 : Capteurs, signaux, dispositifs réglants
- NFE 04-203-3 : Transducteurs et dispositifs de traitement de signaux
- NFE 04-203-4 : Symboles détaillés complémentaires pour les schémas d'interconnexion d'instruments.

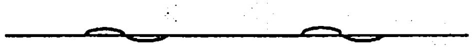
3.2 SYMBOLISATION :

Liaison procédé instrument


Liaison hydraulique inter-instrument

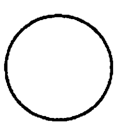

Liaison électrique inter-instrument

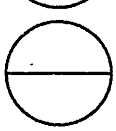

Liaison pneumatique inter-instrument

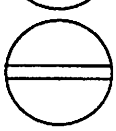

Liaison sans fil (Sonique, Hertzienne)

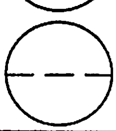

Liaison capillaire (mesure de température)


Liaison numérique (bus) ou liaison par logiciel


Instrument monté localement

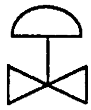

Instrument monté sur tableau en salle


Instrument monté sur tableau local

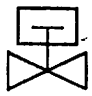

Instrument non-monté en façade

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

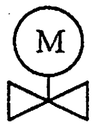
Vanne à commande manuelle



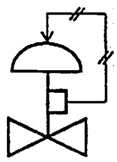
Vanne auto-servo-moteur à membrane



Vanne auto-servo-moteur à piston



Vanne auto-servo-moteur électrique

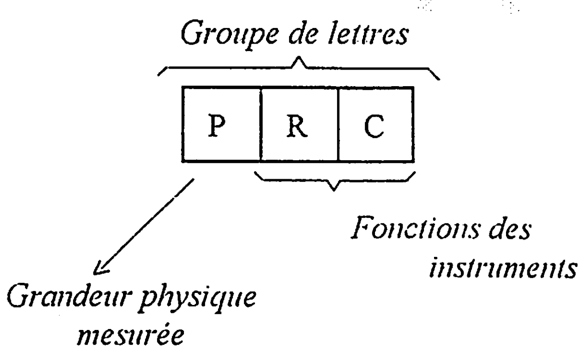


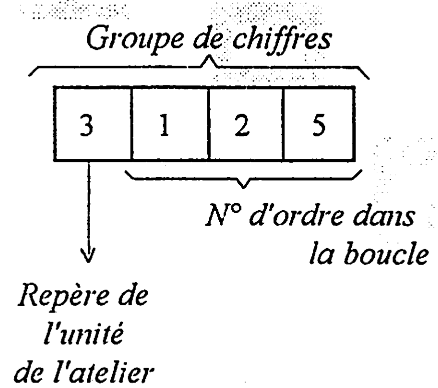
Vanne auto-servo-moteur à membrane et équipée de positionneur

Aux symboles graphiques sont associés des groupes de lettres et de chiffres qui vont permettre aux techniciens de définir :

1° La grandeur physique mesurée
2° La ou les fonctions des instruments
3° L'unité ou l'atelier ... dans lesquels les instruments sont installés
4° Le numéro d'ordre des appareils dans la chaîne de mesure.

En règle générale, on trouve :





Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

Code servant à identifier les fonctions des instruments :

	GRANDEUR PHYSIQUE MESURE PREMIERE LETTRE	FONCTION DES INSTRUMENTS AUTRES LETTRES
A	ANALYSE	ALARME
B	COMBUSTION	AU CHOIX DE L'UTILISATEUR
C	CONDUCTIVITE ELECTRIQUE	REGULATION
D	MASSE VOLUMIQUE	DIFFERENCE
E	TENSION, FORCE ELECTROMOTRICE	ELEMENT PRIMAIRE
F	DEBIT	RAPPORT (FRACTION), FERME
G	LAISSE AU CHOIX DE L'USAGER	GLACE (SANS MESURE)
H	COMMANDE MANUELLE	H - HAUT, HH - TRES HAUT
I	INTENSITE D'UN COURANT ELECTRIQUE	INDICATION
J	PUISSANCE	SCRUTATION
K	TEMPS OU PROGRAMMATION	POSTE DE CONTROLE
L	NIVEAU	L - BAS, LL - TRES BAS, LAMPE TEMOIN
M	HUMIDITE	MOYEN INTERMEDIAIRE
N	VISCOSITE	LAISSE AU CHOIX DE L'USAGER
O	LAISSE AU CHOIX DE L'USAGER	OUVERT DIAPHRAGME (RESTRICTION)
P	PRESSION OU DEPRESSION (VIDE)	POINT D'ESSAI
Q	QUALITE, COMPTAGE	INTEGRE OU TOTALISE INTEGRATION OU TOTALISATION
R	RAYONNEMENT	ENREGISTREMENT OU IMPRIMEUR
S	VITESSE OU FREQUENCE	COMMUTATION, SECURITE
T	TEMPERATURE	TRANSMISSION
U	A VARIABLES MULTIPLES	MULTIFONCTION
V	GRANDEURS MECANIQUES (VIBRATIONS)	VANNE
W	MASSE OU FORCE	PROTECTION DOIGT DE GANT
X	LAISSE AU CHOIX DE L'USAGER	COORDONNEE
Y	EVENEMENT	RELAIS
Z	POSITION, LONGUEUR	ELEMENT DE REGULATION FINAL

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

Exemple de combinaisons de lettres

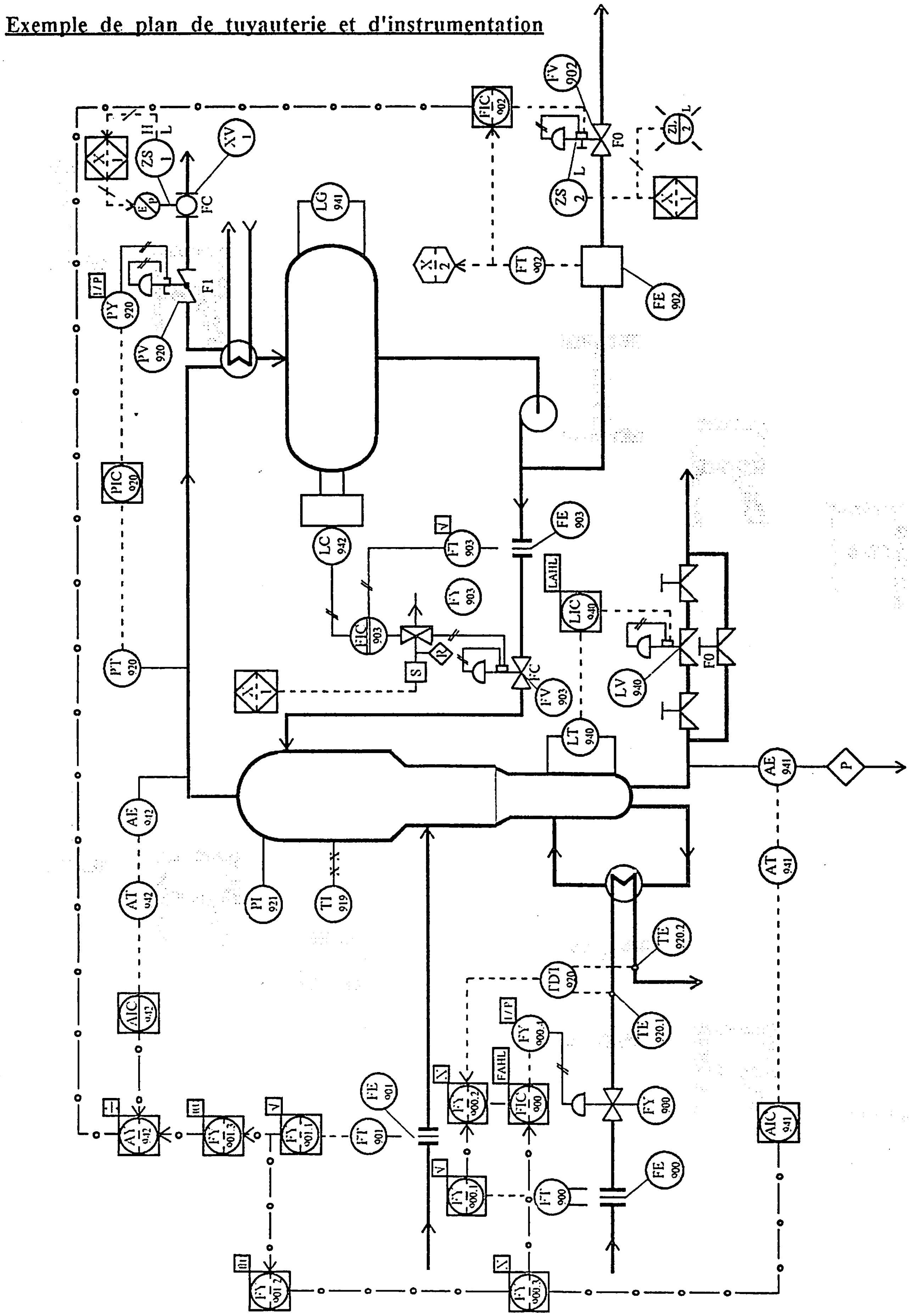
▨ COMBINAISONS IMPOSSIBLES

Deuxième et troisième lettres - Types de service : I = Indicateur ; R = Enregistreur ; C = Régulateur ; IC = Régulateur indicateur ; RC = Régulateur et enregistreur ; CV = Robinet de régulation ; G = Glace uniquement pour observation sans mesure ; A = Alarme ; Q = Totalisateur ; E = Mesure non-raccordée ; W = Gaine

Première lettre	Type de mesure ou d'action	I	R	C	IC	RC	CV	G	A	Q	E	W
A	Analyseur	AI	AR		AIC	ARC			AA			
B	Flamme de brûleur	BI							BA			
C	Conductivité	CI	CR		CIC	CRC			CA			
D	Masse volumique	DI	DR	DC	DIC	DRC			DA			
E	Tension	EI	ER						EA		EE	
F	Débit	FI	FR		FIC	FRC		FG	FA	FQ		
G	Mesure dimentionnelle						HCV	GG				
H	Commande manuelle			HC	HIC				[illegible]			
I	Intensité	II	IR				KCV		IA	IQ		
K	Temps	KI					LCV			KQ		
L	Niveau	LI	LR	LC	LIC	LRC		LG	LA			
M	Humidité	MI	MR	MC	MIC	MRC	PCV		MA			
P	Pression	PI	PR	PC	PIC	PRC			PA			
Q	Quantité	QI	QR						QA	QQ		
R	Radioactivité	RI	RR				SCV			RQ		
S	Vitesse	SI	SR	SC	SIC	SRC	TCV		SA		SE	
T	Température	TI	TR	TC	TIC	TRC			TA			TW
V	Viscosité	VI	VR		VIC	VRC		VG	VA			
W	Poids	WI	WR		WIC	WRC			WA	WQ		

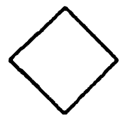
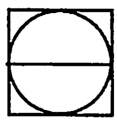
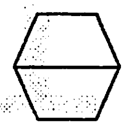
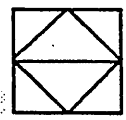
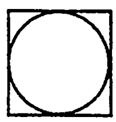
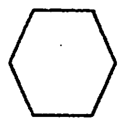
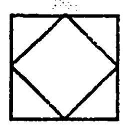
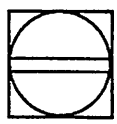
Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

Exemple de plan de tuyauterie et d'instrumentation



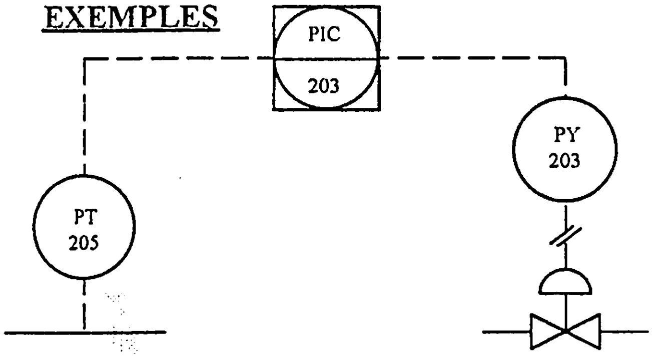
Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.03.03.15

3.3 SYMBOLISATION POUR REGULATION SUR SYSTEMES NUMERIQUES :

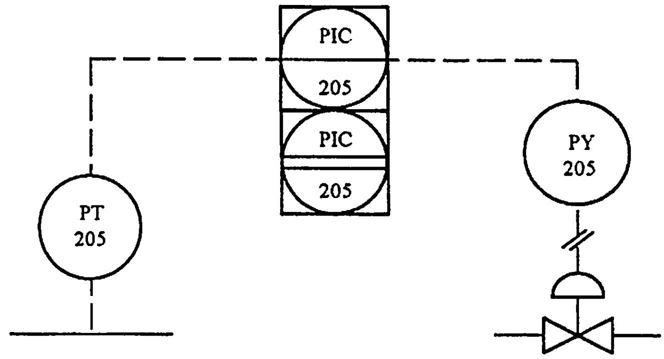
SIGNIFICATION DES SYMBOLES	SYSTEMES DISTRIBUES (1)	CALCULATEURS (2)	SYSTEMES LOGIQUES (3)
(3) Symbole général pour système interconnecté (logique ou contrôle séquentiel)			
"NORMALEMENT ACCESSIBLE OPERATEUR" (1)(2) Indication, régulation enregistrement ou alarmes indiqués sur écran vidéo (3) Contrôle logique avec logique séquentielle ou binaire			
"NORMALEMENT NON-ACCESSIBLE OPERATEUR" (1) Aveugle, peut être changé par configuration (2) Interfaces entrées, sorties régulateur aveugle ou module logiciel (3) Programmable ou système partagé			
(1) Station auxiliaire accessible à l'opérateur, normalement éloignée de la console opérateur - station de secours - station manuelle			

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

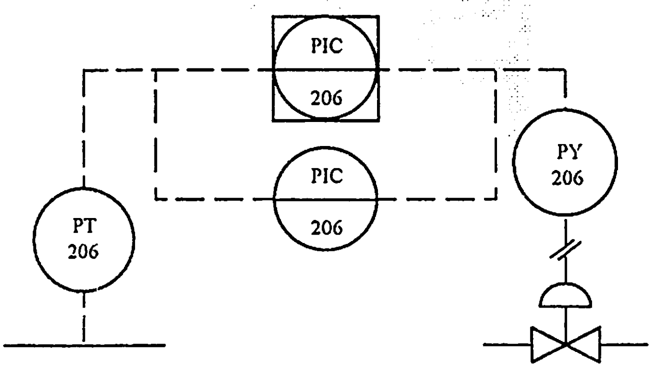
EXEMPLES



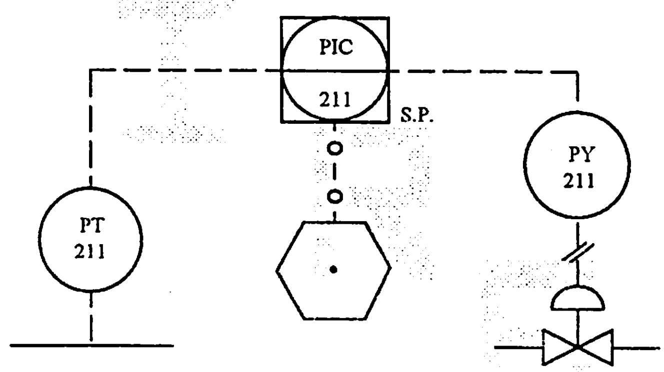
- Système numérique distribué
- Visualisation sur écran vidéo
- Pas de secours



- Système numérique distribué
- Visualisation sur écran vidéo
- Station éloignée de la console opérateur



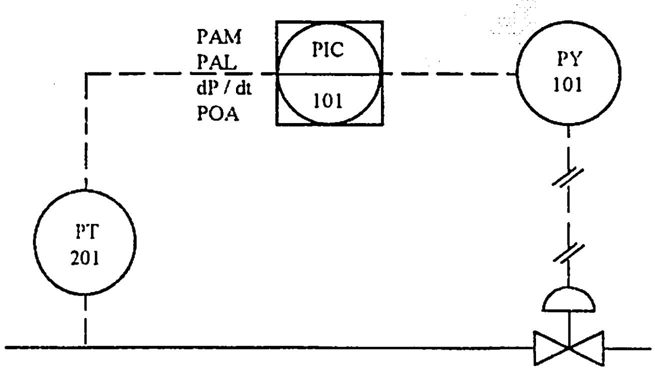
- Système numérique distribué
- Visualisation sur écran vidéo
- Régulateur analogique de secours



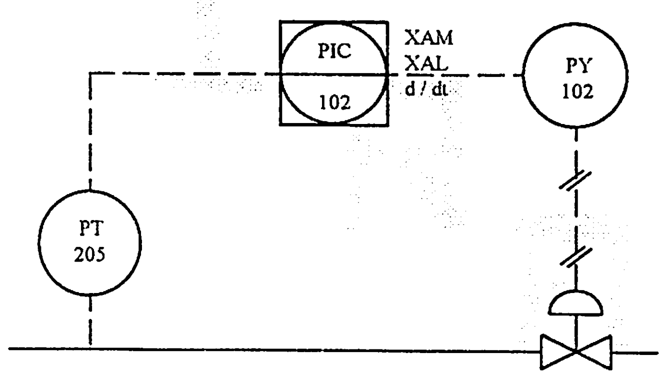
- Supervision de point de consigne (SP) d'un régulateur appartenant à un système numérique distribué
- Calculateur supervisant via : liaison numérique

REPRESENTATION DES ALARMES

Exemple : SUR MERSURE



Exemple : sur SIGNAL DE SORTIE



Ces symboles signifient que ces points d'alarme seront visualisés et accessibles sur écran vidéo et console opérateur (éventuellement).

Exemples :	PAH	:	haut -------------------------------	XAH	:	"
	PAL	:	bas ----------------------------------	XAL	:	"
	dP/dt	:	vitesse de variation --------------	d/dt	:	"
	PDA	:	écart par rapport à la consigne.			

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

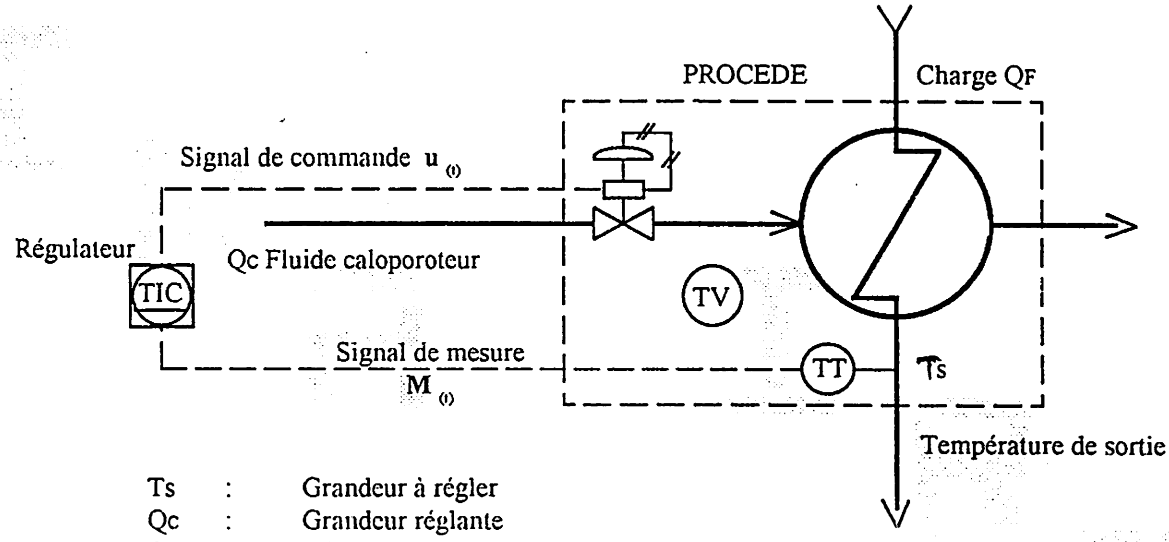
TYPES DE PROCEDES INDUSTRIELS

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

3 - PROCEDES STABLE ET INSTABLE -

3.1 PROCEDE NATURELLEMENT STABLE : mais plus compliqué à régler.

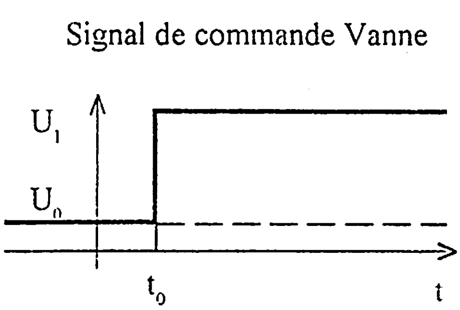
- Exemple : Echangeur thermique

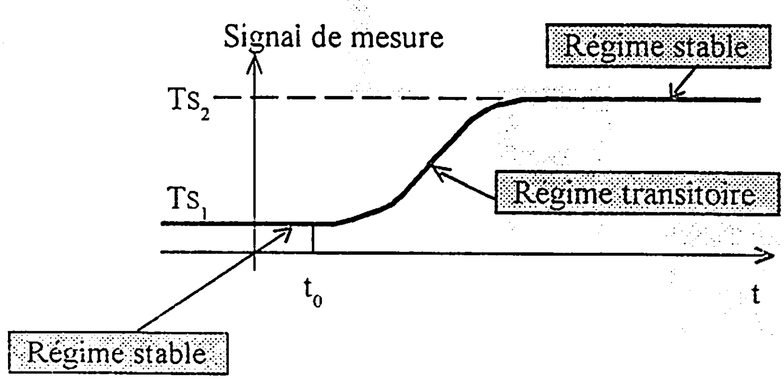


Ts	:	Grandeur à régler
Qc	:	Grandeur réglante
QF	:	Débit de charge
Te	:	Température d'entrée
Tc	:	Température de chauffe

1ère méthode pour reconnaître le procédé

REGULATEUR EN MANUEL





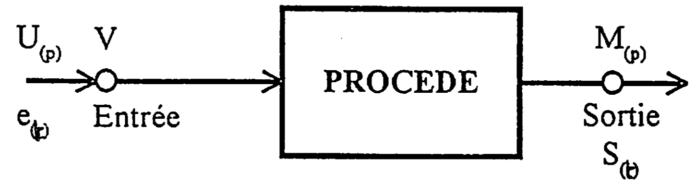
A une variation d'entrée limitée, (signal de commande de l'organe de réglage) correspond une variation de sortie limitée (signal de la grandeur à régler).

La variation de la sortie est proportionnelle à la variation d'entrée.

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

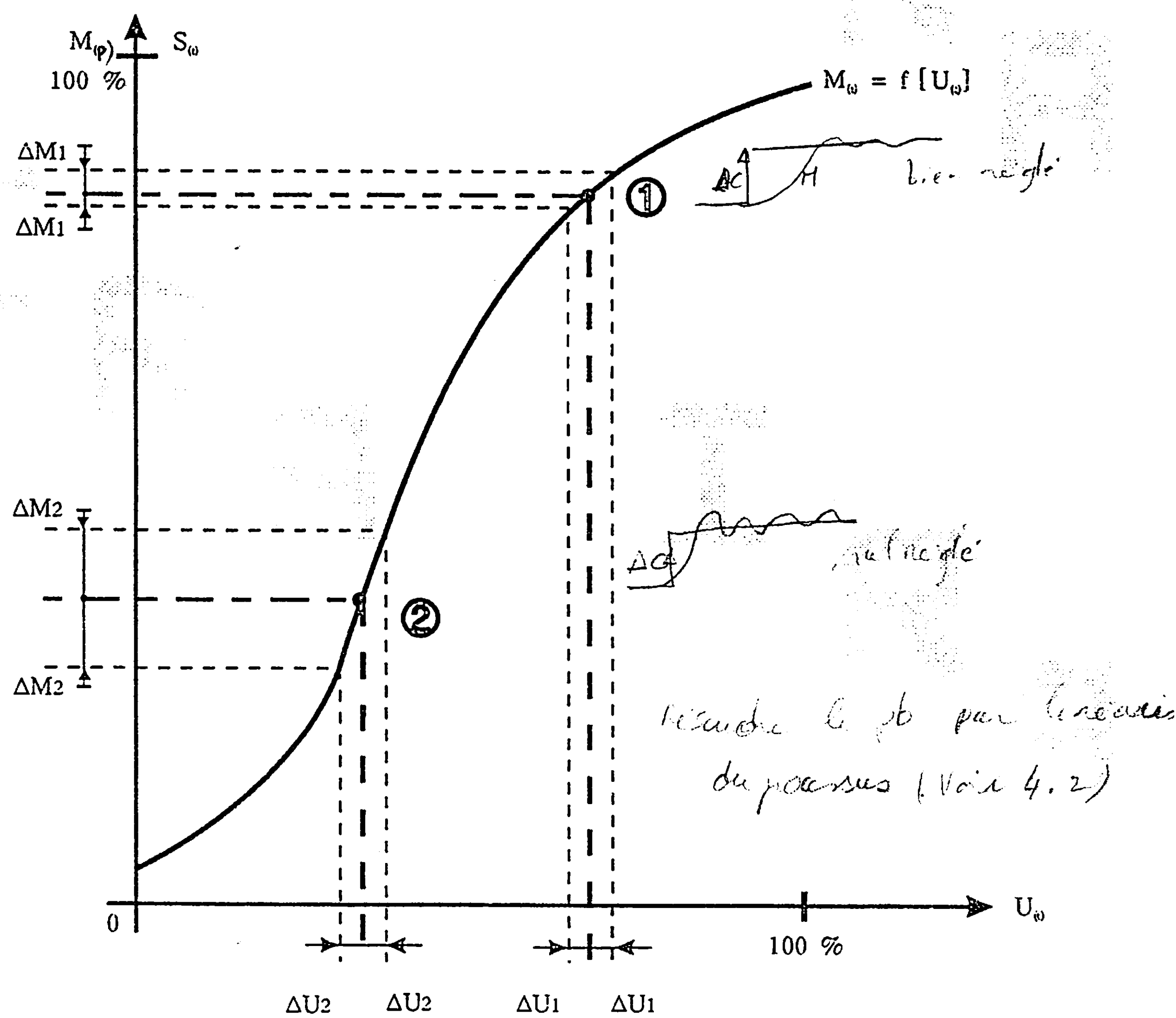
4 - CARACTERISTIQUE STATIQUE D'UN PROCEDE -

4.1 TRACE DE LA CARACTERISTIQUE STATIQUE : Sur système stable



Si à un régime établi, à toute entrée constante $e_{(t)}$ correspond une valeur de la sortie $s_{(n)}$ également constante, le système est dit STATIQUE (stable).

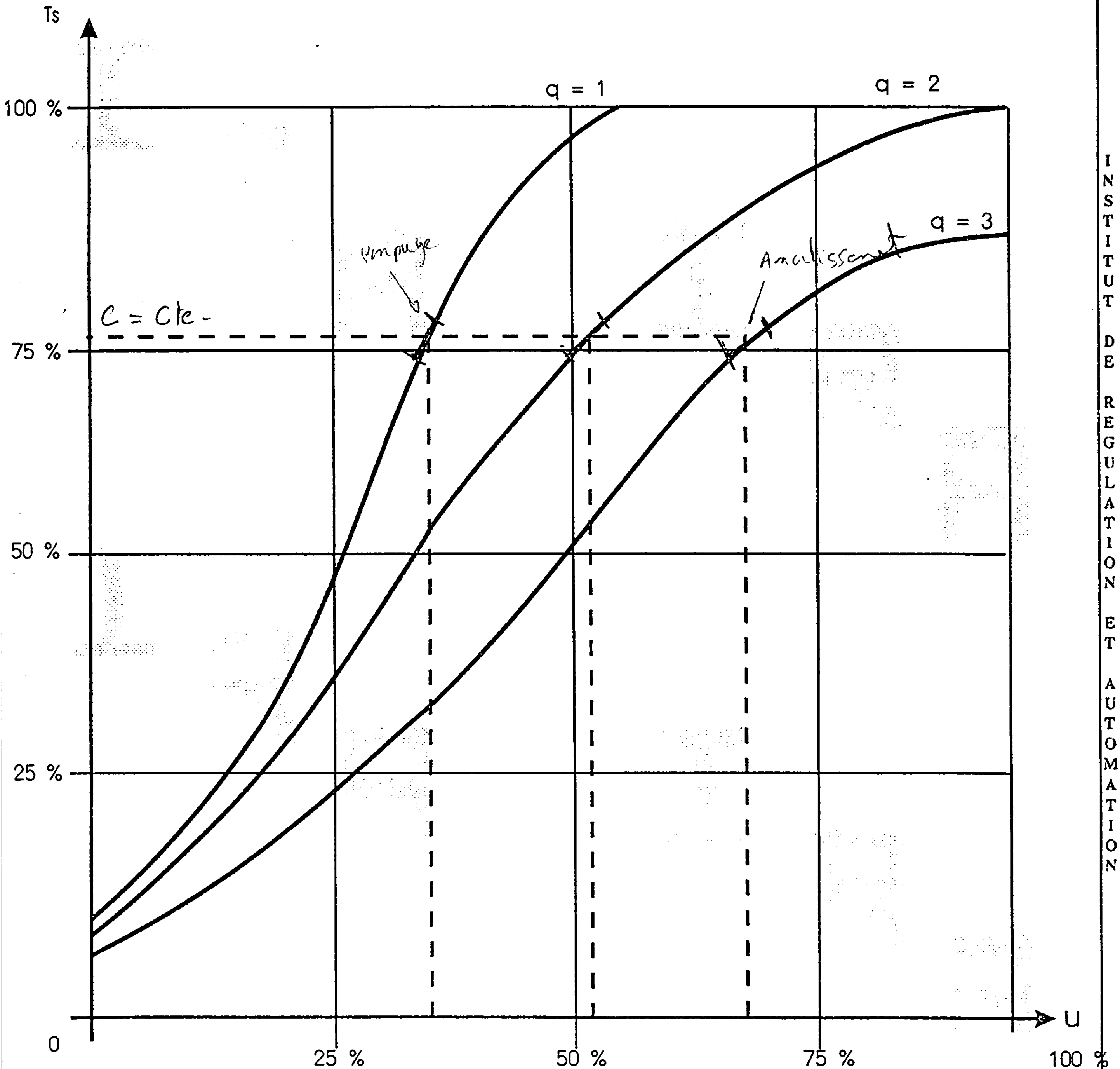
On peut alors tracer la courbe $s_{(t)} = f[e_{(t)}]$ ou $M_{(t)} = f[U_{(t)}]$ que l'on appelle essai (ou réponse) statique du système.



Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

Si le système est soumis à d'importantes variations de charge, il est intéressant de connaître le comportement statique pour différentes charges.

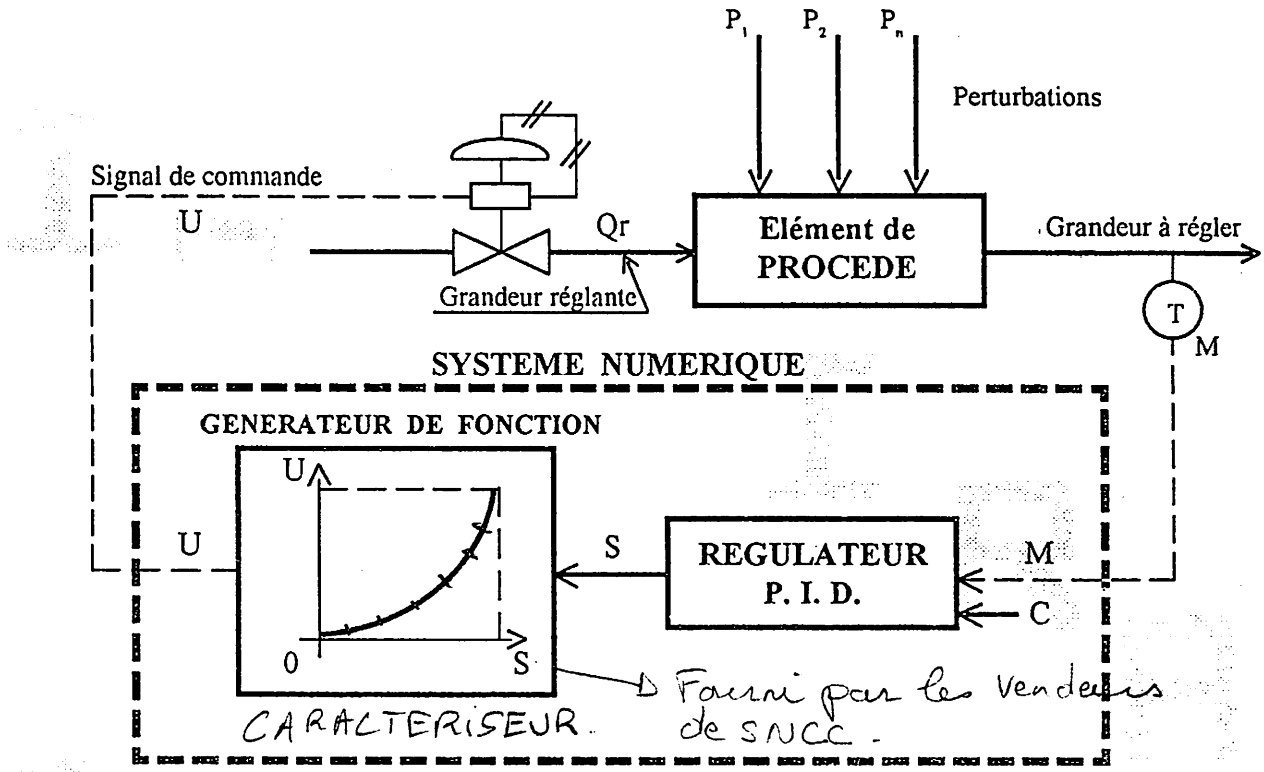
<u>exemple</u> : Echangeur thermique



on résoud ce pb en faisant régulation mixte boucle fermée + boucle ouverte qui prend en compte variation de la charge

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

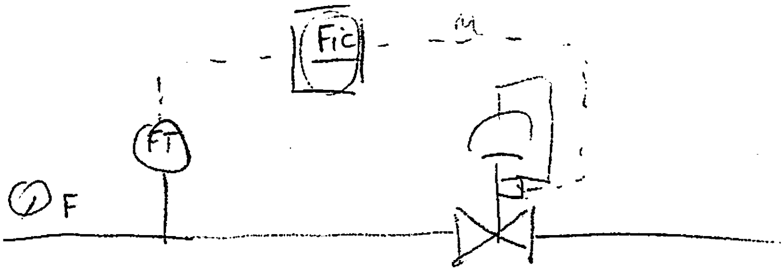
4.2 <u>LINEARISATION DE LA CARACTERISTIQUE STATIQUE DU PROCEDE PAR TRAITEMENT DU SIGNAL DE COMMANDE DE LA VANNE</u> :



G statique procédé = cte ∀ le point de fonctionnement mais on doit travailler à charge constante.

La linéarisation par cette méthode ne concerne que le gain statique, les paramètres dynamiques du procédé ne sont pas pris en compte.

Si le point de fonctionnement change dans de grandes proportions, il est nécessaire de modifier les actions de réglage. On peut résoudre ce problème en utilisant un système numérique de contrôle commande dans lequel on fait une auto-adaptation des actions, par "zones" de travail.

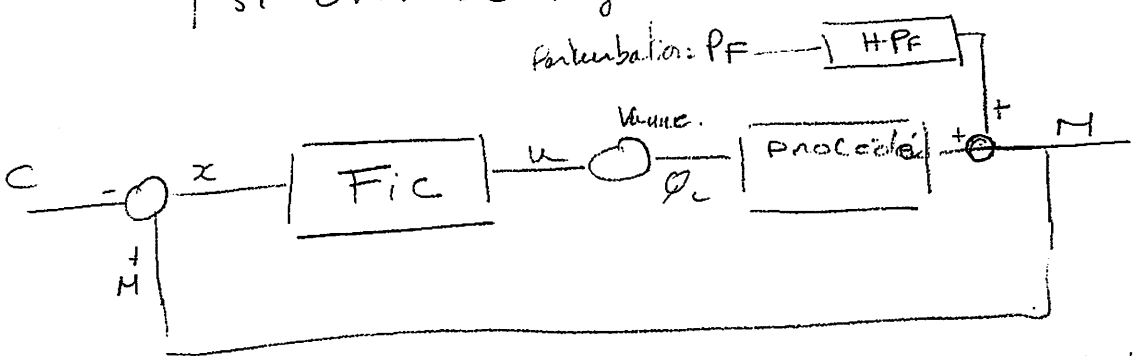


FMA.

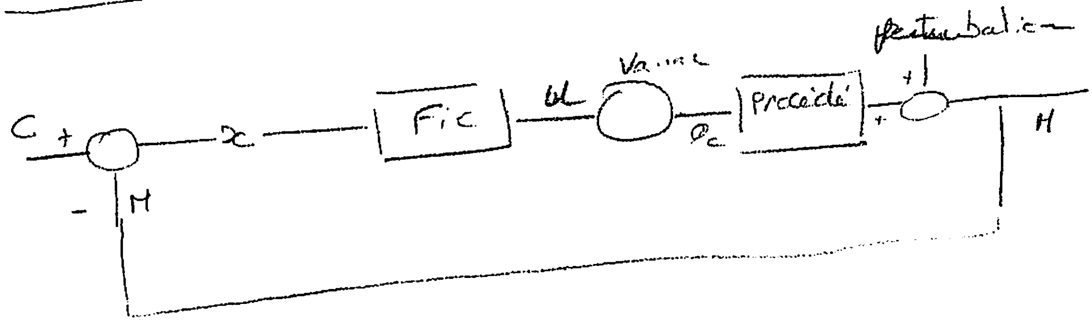
Si $\emptyset_F$ ↑ il faut fermer la vanne

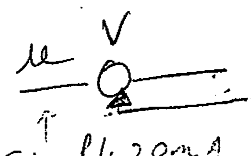
Si FMA ⇒ Régulateur à action inverse
Si OMA ⇒ Régulateur à action directe

direct :



sens Inverse

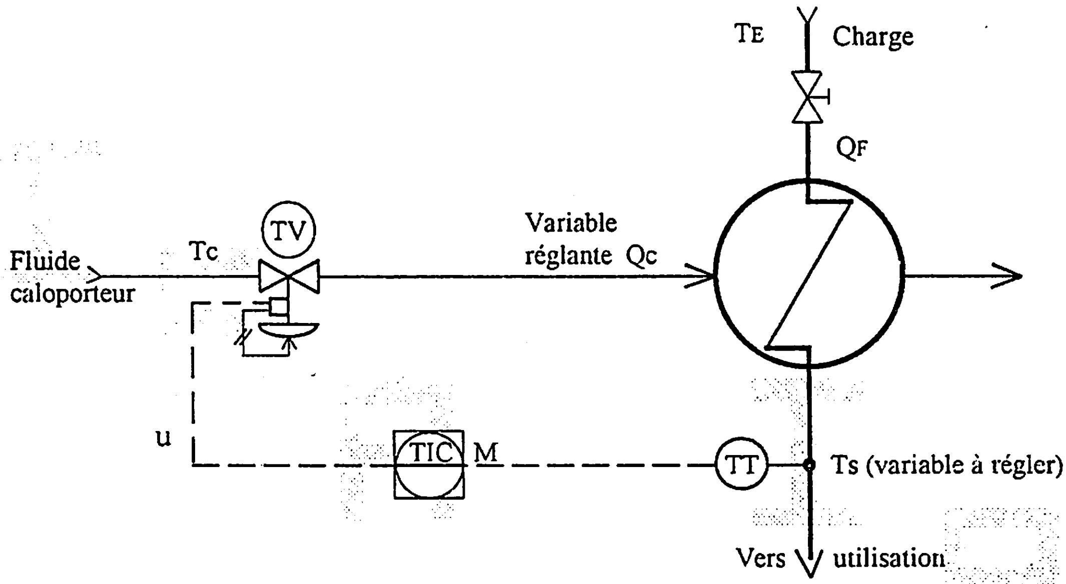




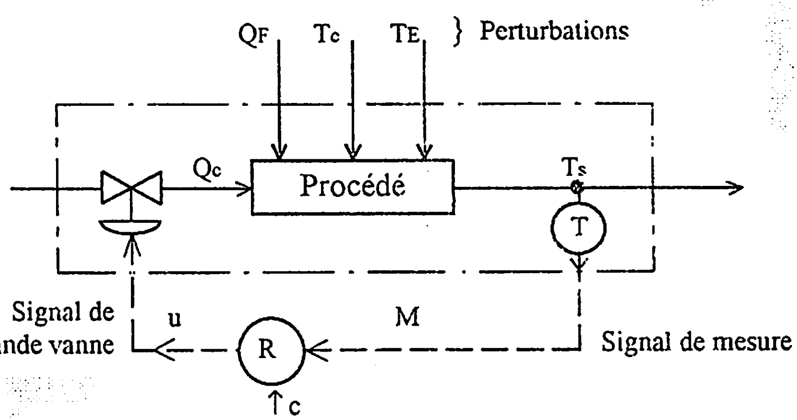
: action sur le procédé : ensemble positionneur + clapet + ouverture de vanne.

5 - REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES PROCEDES -

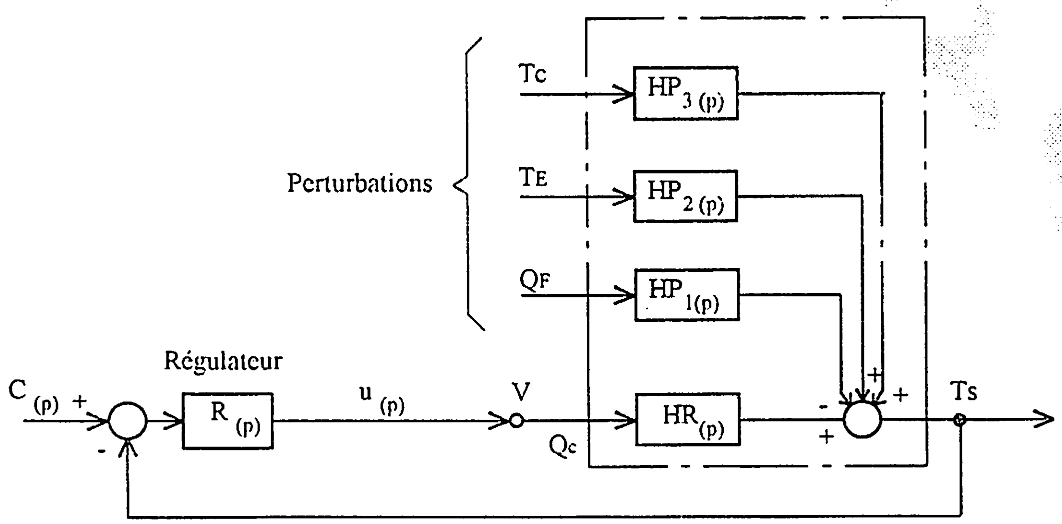
5.1 PLAN DES TUYAUTERIES ET DE L'INSTRUMENTATION (T.I.) :



5.2 SCHEMA BLOC :



5.3 SCHEMA FONCTIONNEL : (Simplifié)



Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

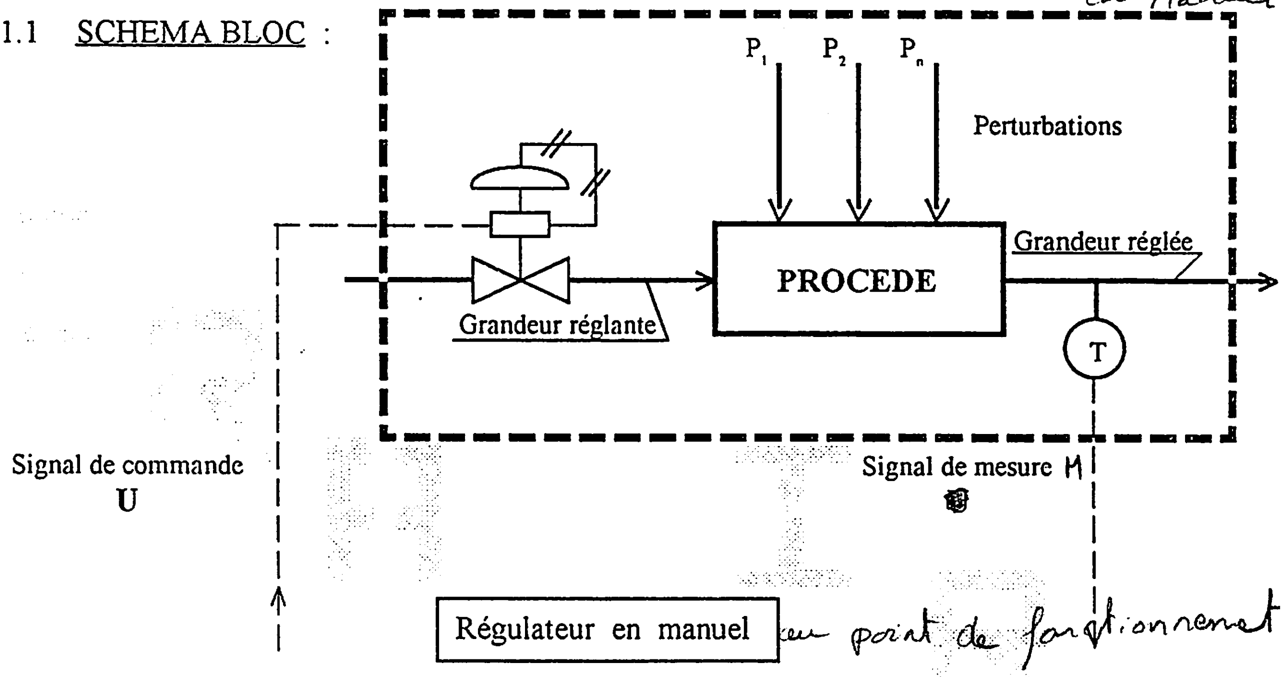
PARAMETRES DES PROCEDES

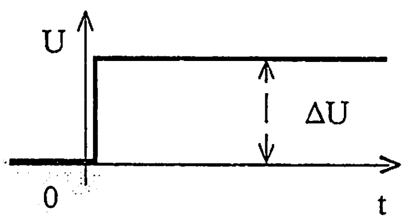
Page

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

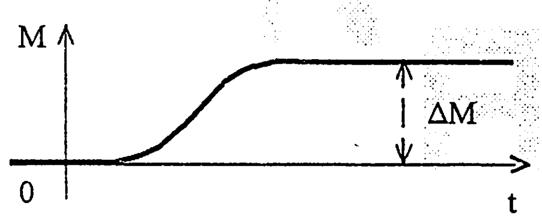
1 - PARAMETRES DES SYSTEMES STABLES EN BOUCLE OUVERTE - Régulateur en Manuel

1.1 SCHEMA BLOC :



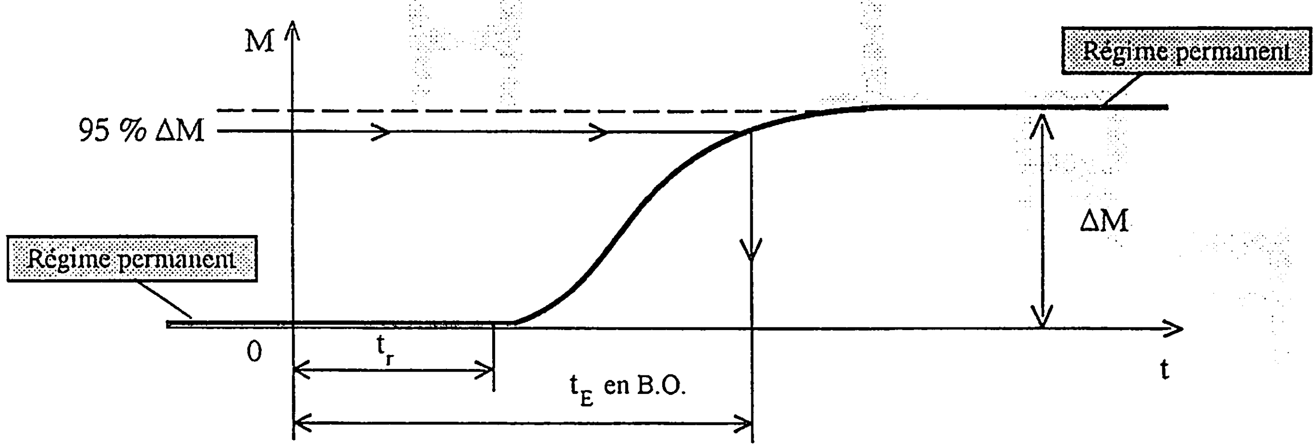


ni trop petit,
ni trop grand



1.2 SYSTEME DU Nième ORDRE, ALLURE GENERALE DU SIGNAL DE MESURE

a) Première méthode :



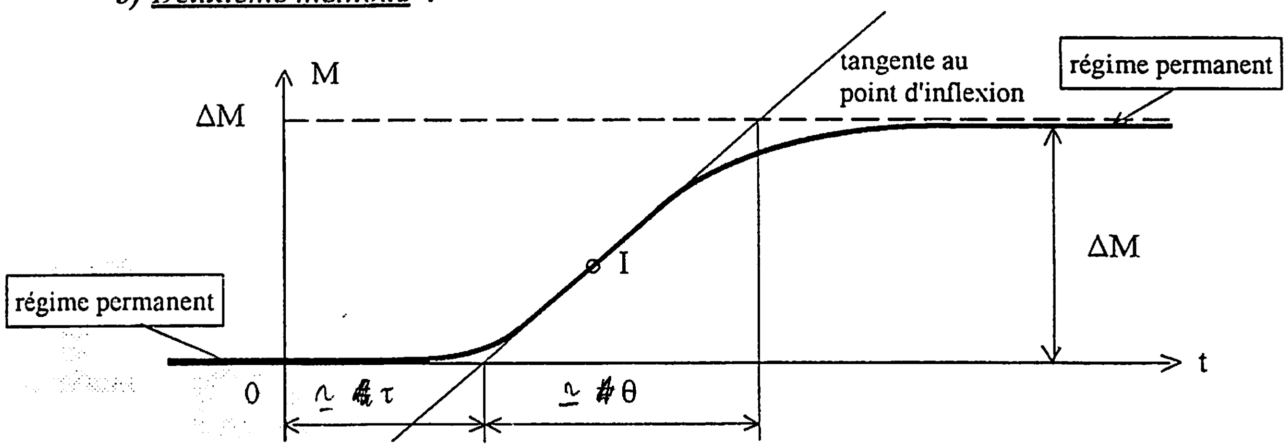
t_r	:	Retard ou temps mort "apparent" du procédé
t_E	:	Temps d'établissement du procédé en boucle ouverte
Gs	:	Gain statique du procédé

$$Gs = \frac{\Delta M\,\%}{\Delta U\,\%}$$

$G_R < G_s$
$T_d = T_r$

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

b) *Deuxième méthode* :



Si $\frac{\theta}{\tau} < 2$ ⇒ hors zone du PID. Il faut un autre moyen de régulation

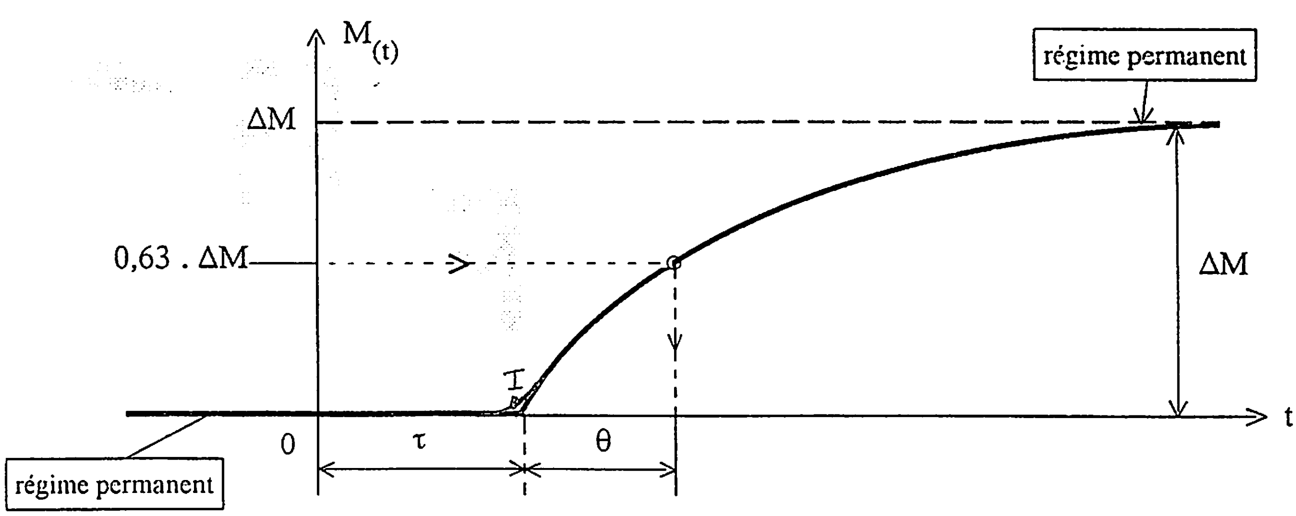
τ : Retard ou temps mort du procédé

θ : Constante de temps du procédé en boucle ouverte

Gs : Gain statique du procédé

$$\boxed{Gs = \frac{\Delta M}{\Delta U}}$$

1.3 PROCEDE A DOMINANTE DU PREMIER ORDRE AVEC RETARD :



τ : Retard ou temps mort du procédé

θ : Constante de temps du procédé en boucle ouverte

Gs : Gain statique du procédé

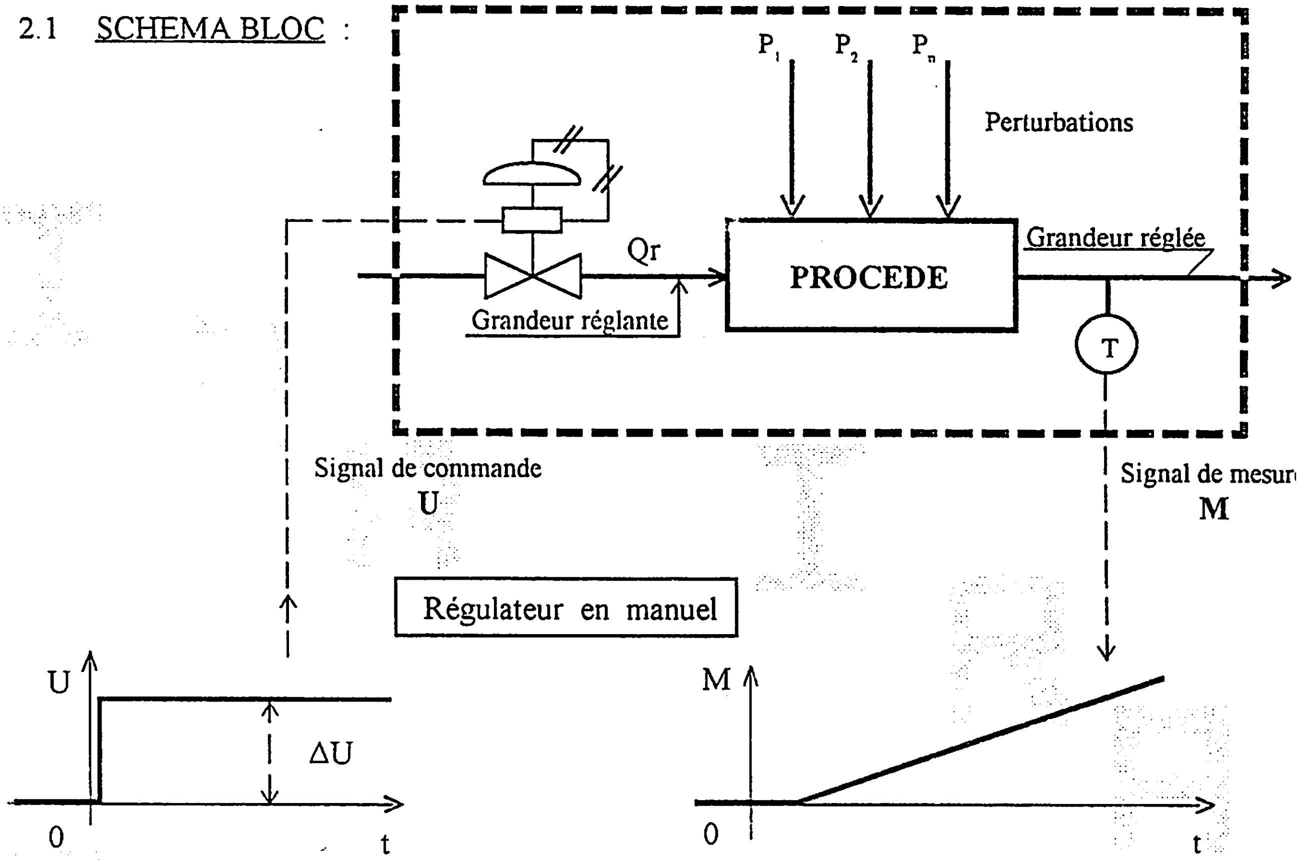
$$\boxed{Gs = \frac{\Delta M}{\Delta U}}$$

INSTITUT DE REGULATION ET AUTOMATION

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

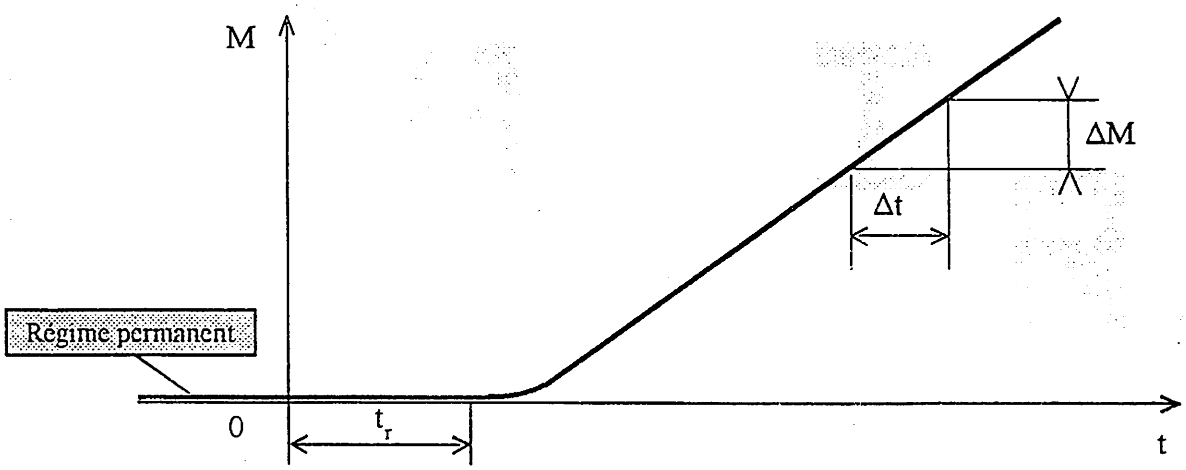
2 - PARAMETRES DES SYSTEMES INSTABLES EN BOUCLE OUVERTE -

2.1 SCHEMA BLOC :



2.2 ALLURE GENERALE DU SIGNAL DE MESURE :

a) Première méthode :



t_r : Retard ou temps mort "apparent" du procédé

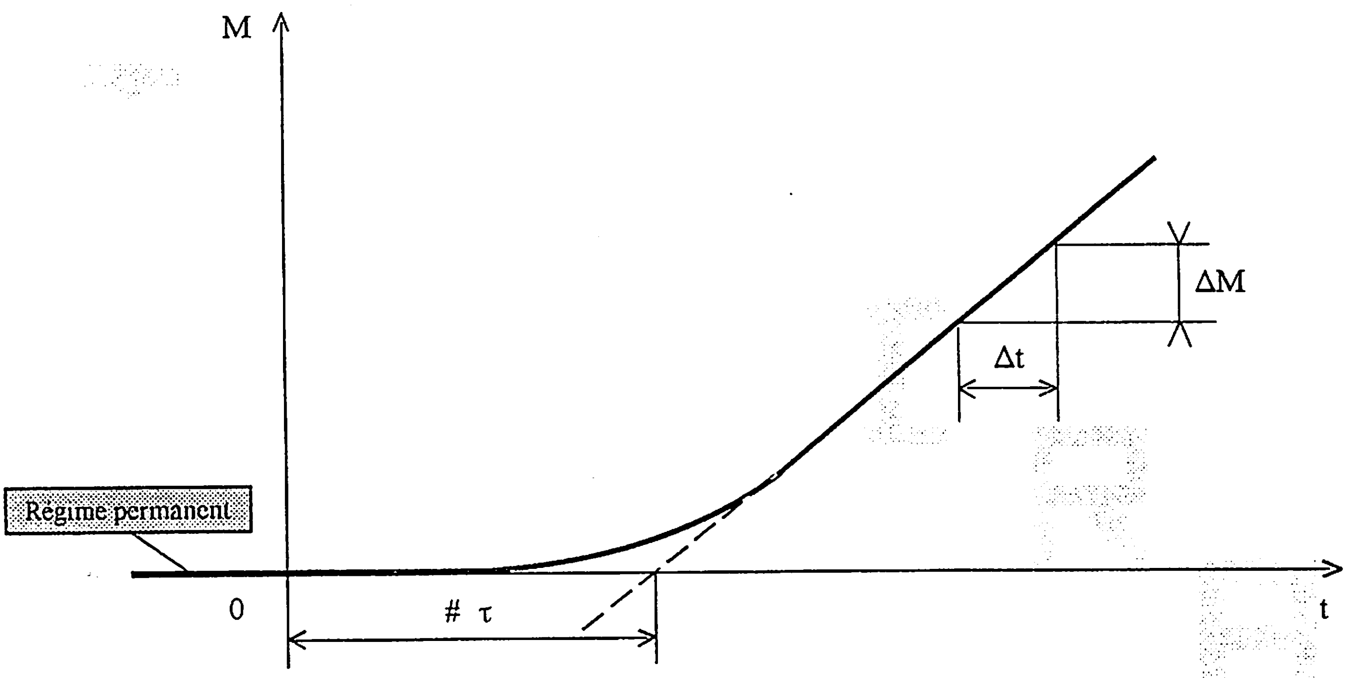
k : Coefficient d'intégration du procédé

$$\boxed{k = \frac{\Delta M}{\Delta U . \Delta t}}$$

Nota : La pente $\frac{\Delta M}{\Delta t}$ dépend du procédé et de la valeur de l'amplitude de l'échelon ΔU

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

b) Deuxième méthode :



τ : Retard ou temps mort du procédé

k : Coefficient d'intégration du procédé $\boxed{k = \frac{\Delta M}{\Delta U . \Delta t}}$

si $\frac{1}{k\tau} < 2$ hors zone du PID
(tps de réponse mauvais) .

CONCLUSIONS -

La connaissance des paramètres du procédé industriel nous permet de choisir les différents modes de régulation (P, PI ou PID) et nous aide dans le réglage (ou le calcul) des actions du correcteur PID.

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

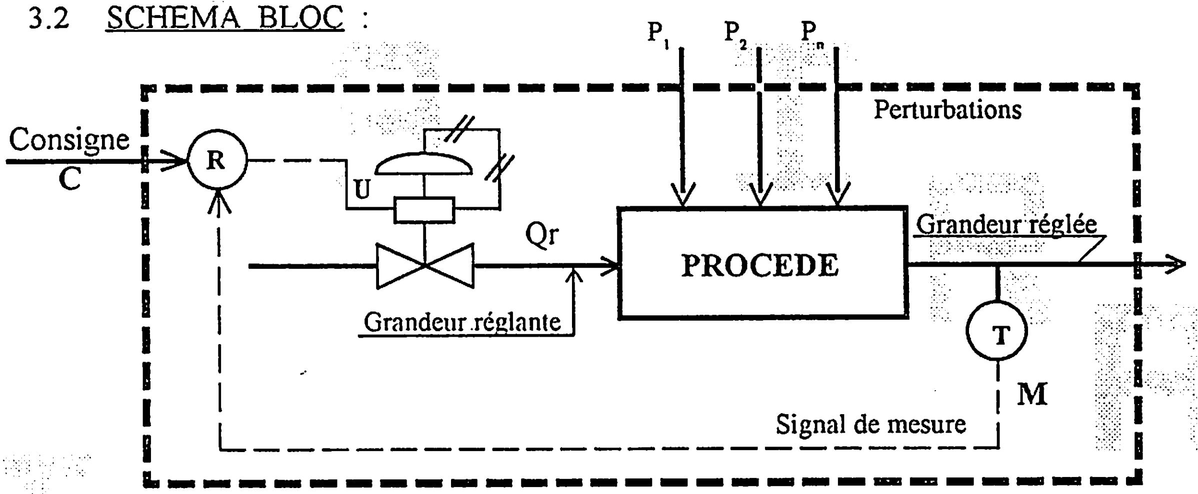
3 - PARAMETRES DES SYSTEMES EN BOUCLE FERMEE -

3.1 GENERALITES :

Les performances d'une régulation peuvent se vérifier en observant l'allure du signal de mesure. Après réglage des actions du correcteur R, pour vérifier si le comportement du système asservi est acceptable, on effectue des :

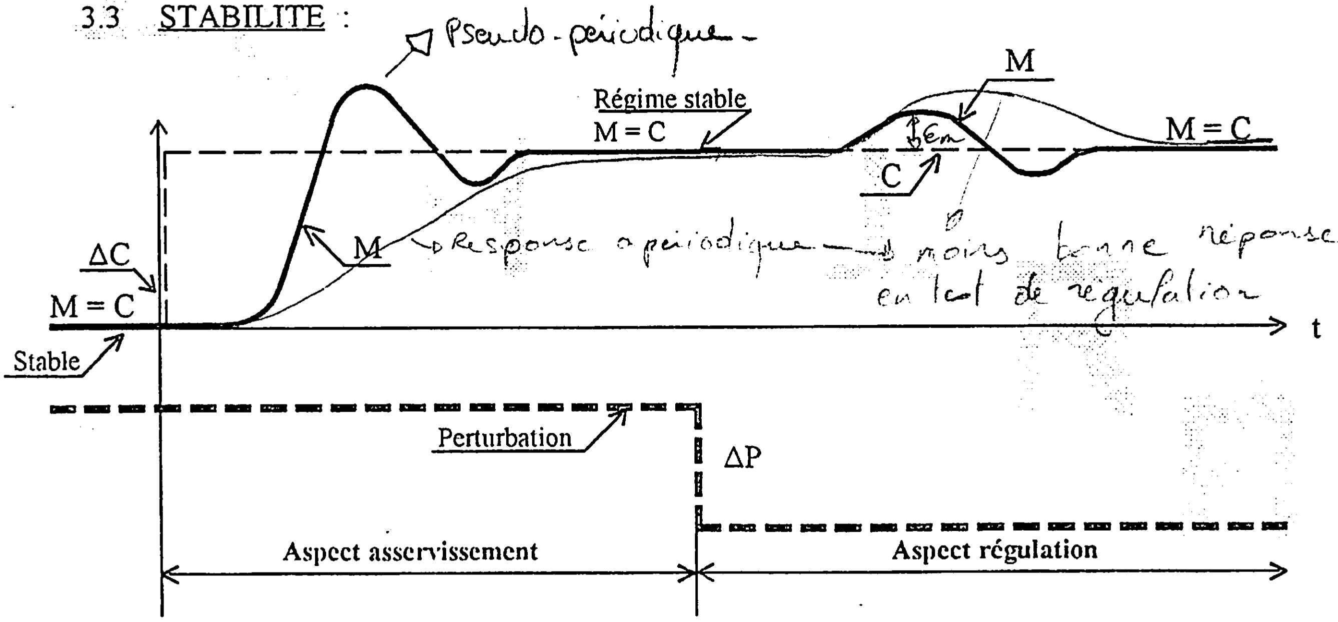
- Tests en asservissement : $\Delta C \Rightarrow$ Echelon de consigne
- Tests en régulation : $\Delta P \Rightarrow$ Echelon sur une perturbation.

3.2 SCHEMA BLOC :



SYSTEME ASSERVI

3.3 STABILITE :



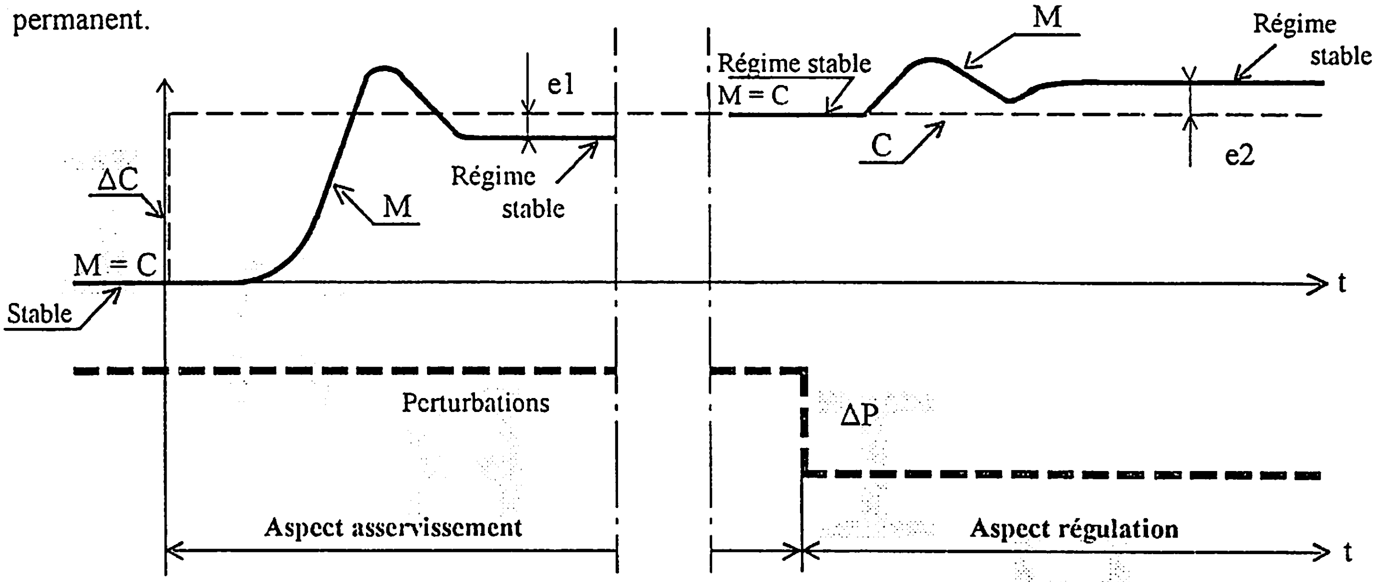
Un système asservi est dit "stable" lorsque, soumis à une variation d'entrée ΔC ou ΔP, il retrouve un état stable en sortie (mesure).

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

3.4 PRECISION :

s'en proportionnelle seule par ex.

Elle est définie par l'erreur statique qui subsiste entre la consigne et la mesure en régime permanent.

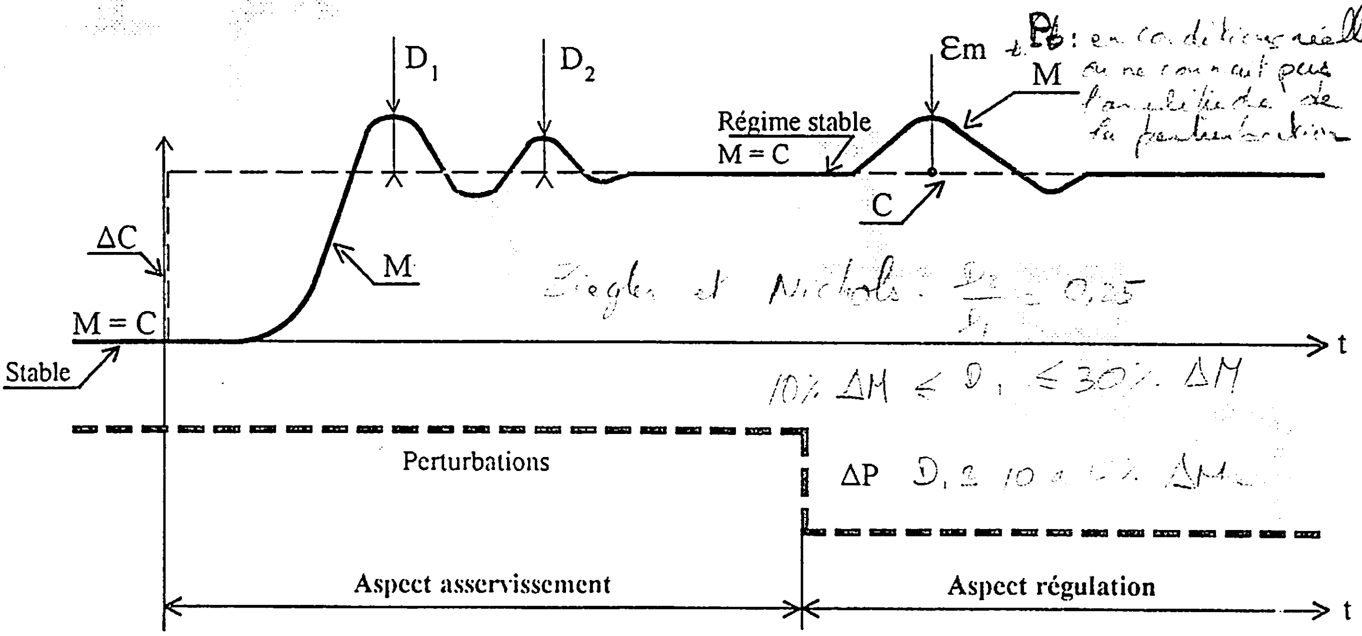


$$\boxed{\text{Erreur de précision (\%)} = \frac{e}{\Delta E}\ 100}$$ avec $\Delta E = \Delta C$ ou ΔP

3.5 AMORTISSEMENT :

Il caractérise l'allure du retour à l'équilibre de la sortie (mesure), il est définit

- en asservissement : par l'amortissement par période ou par le dépassement (D1)
- en régulation : par l'amplitude de l'écart maximum εm



$$\boxed{\text{Amortissement par période} = \frac{D_2}{D_1}}$$

$$\boxed{\text{Dépassement (\%)} = \frac{D_1}{\Delta C} \times 100}$$

$$\boxed{\text{Amplitude de l'écart maximum : } \varepsilon m}$$

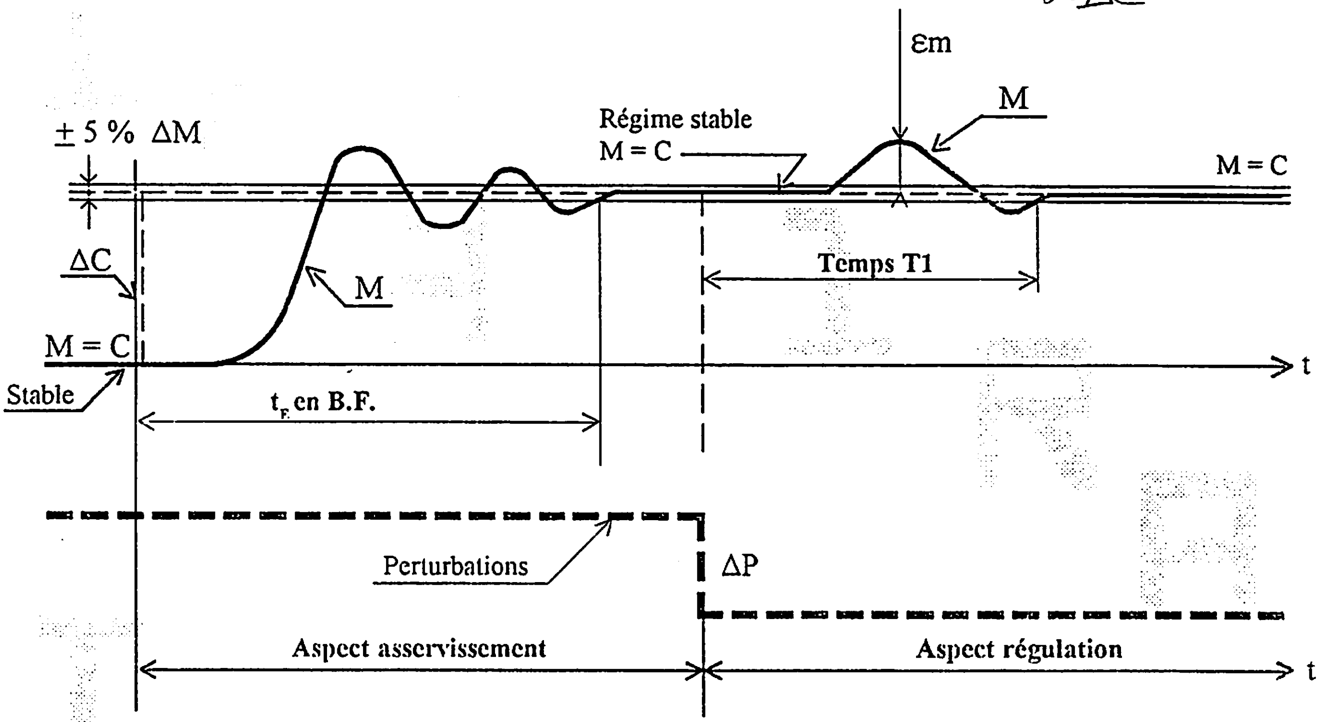
INSTITUT DE REGULATION ET AUTOMATION

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

3.6 RAPIDITE :

Le temps d'établissement en boucle fermée définit la rapidité du système asservi (système bouclé).

C'est le temps que met la mesure à rentrer dans la fourchette des ± 5 % de ΔM pour ne plus en sortir. ou ΔC



Après réglage des actions, vérifier que :

$$\boxed{t_E \text{ en B.F.} \leq t_E \text{ en B.O.}}$$

Critère non atteignable quand on est hors zone du PID

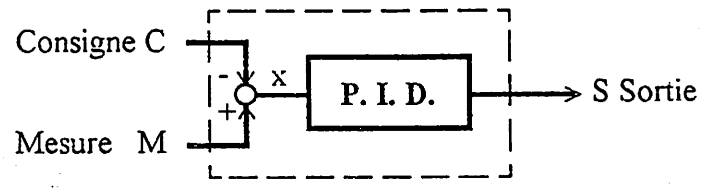
Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

REGULATEURS

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

1 - GENERALITES -

Le régulateur est le cerveau de la boucle de régulation. Avant d'effectuer une mise au point qui consiste à déterminer la valeur numérique des actions à afficher, en utilisant une méthode de calcul, il faut connaître sa fonction de transfert.

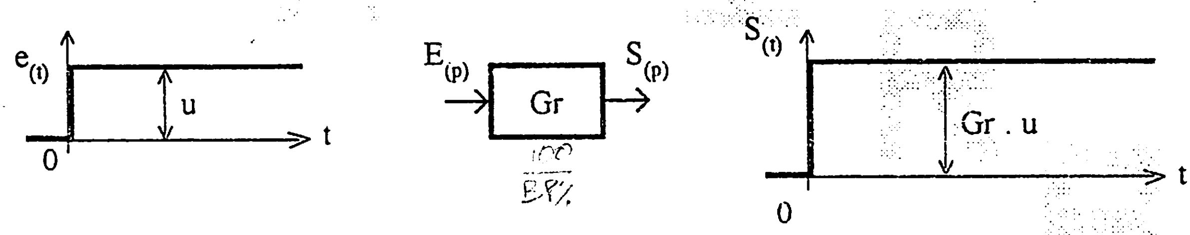


x : Ecart (M - C)

1.1 FONCTION PROPORTIONNELLE (P) : Dans certains régulateurs on parle de Bande Proportionnelle $BP\% = \frac{100}{Gr}$

accélération de la boucle

Réponse à un échelon :



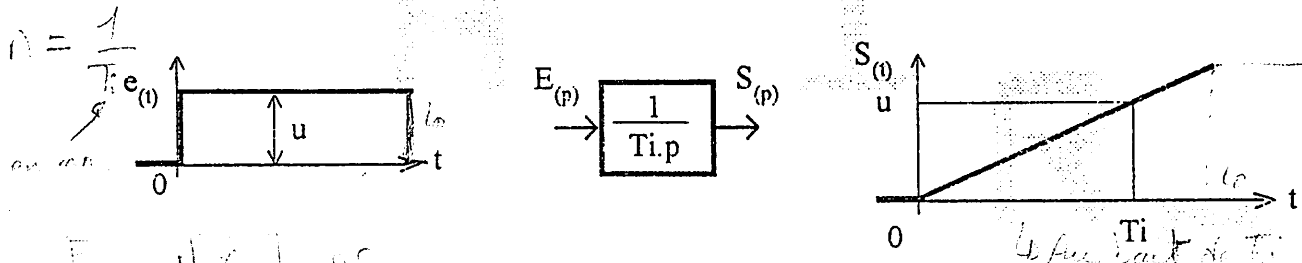
Fonction de transfert : $\boxed{H_{(p)} = Gr}$

Il faut mettre le max. de proportionnelle admissible.

1.2 FONCTION INTEGRALE (I) :

ou nombre de répétitions par mn

Réponse à un échelon :



Fonction de transfert : $\boxed{H_{(p)} = \frac{1}{Ti.p}}$

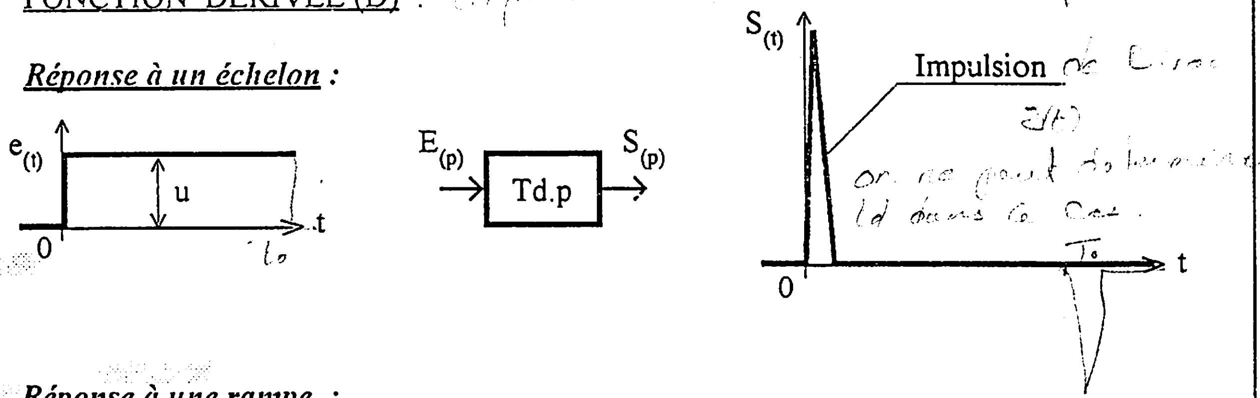
Ti : Temps d'action intégrale en minutes ou secondes.
Ti est le coefficient de dosage de l'action intégrale.

p : Opérateur Laplacien.

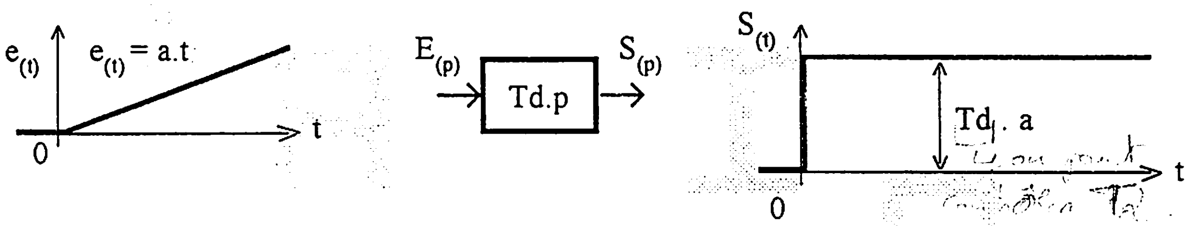
Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

1.3 FONCTION DERIVEE (D) :

Réponse à un échelon :



Réponse à une rampe :

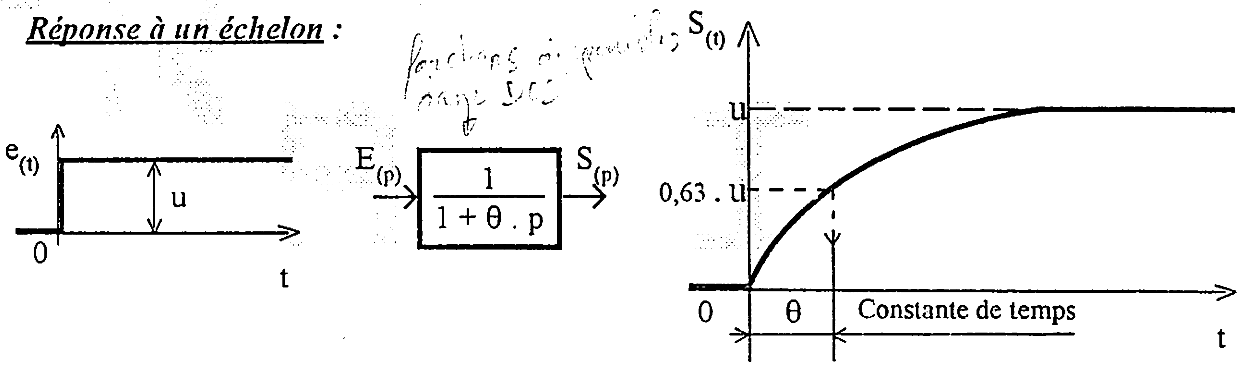


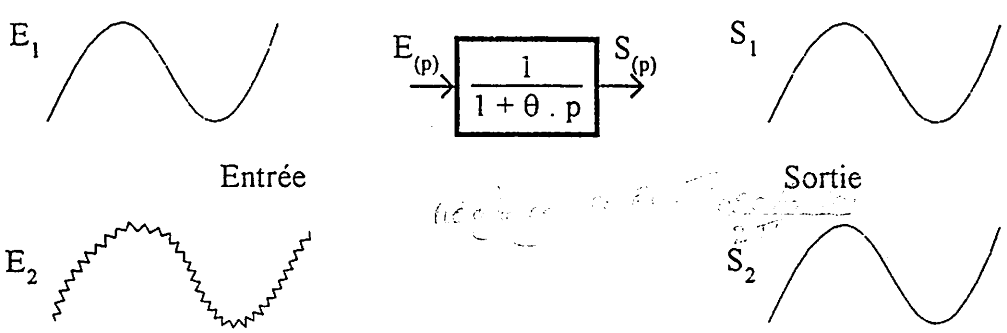
Fonction de transfert : $\boxed{H_{(p)} = Td.p}$

Td : Temps d'action dérivée en minutes ou secondes.
Td est le coefficient de dosage de l'action dérivée.

1.4 FILTRE PASSE-BAS OU FONCTION DU PREMIER ORDRE :

Réponse à un échelon :

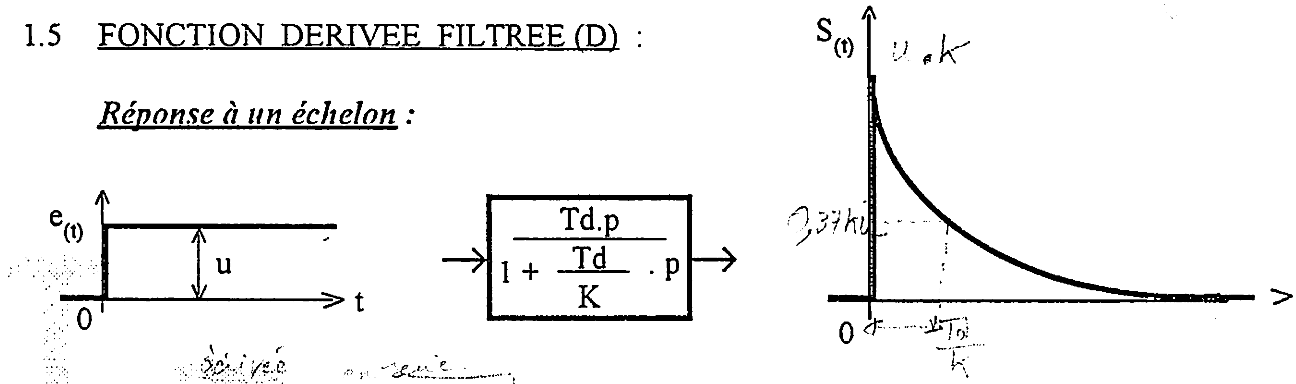




Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

1.5 FONCTION DERIVEE FILTREE (D) :

Réponse à un échelon :



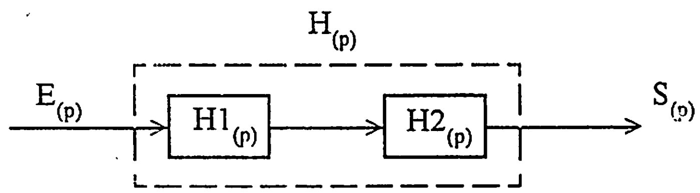
Fonction de transfert de la dérivée filtrée : $H_{(p)} = \boxed{\dfrac{Td.p}{1 + \dfrac{Td}{K}.p}}$

K : Gain transitoire de l'action dérivée

Td : Temps d'action dérivée en minutes ou secondes

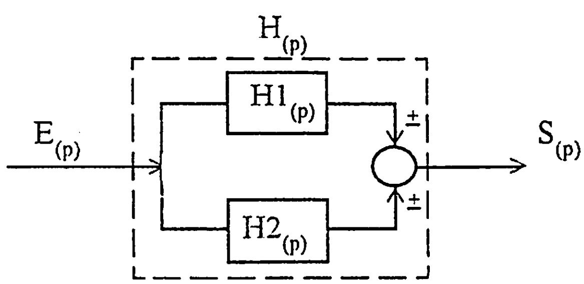
1.6 ASSOCIATION DES FONCTIONS DE TRANSFERT :

a) - Montage série :



$$\boxed{H_{(p)} = H1_{(p)} . H2_{(p)}}$$

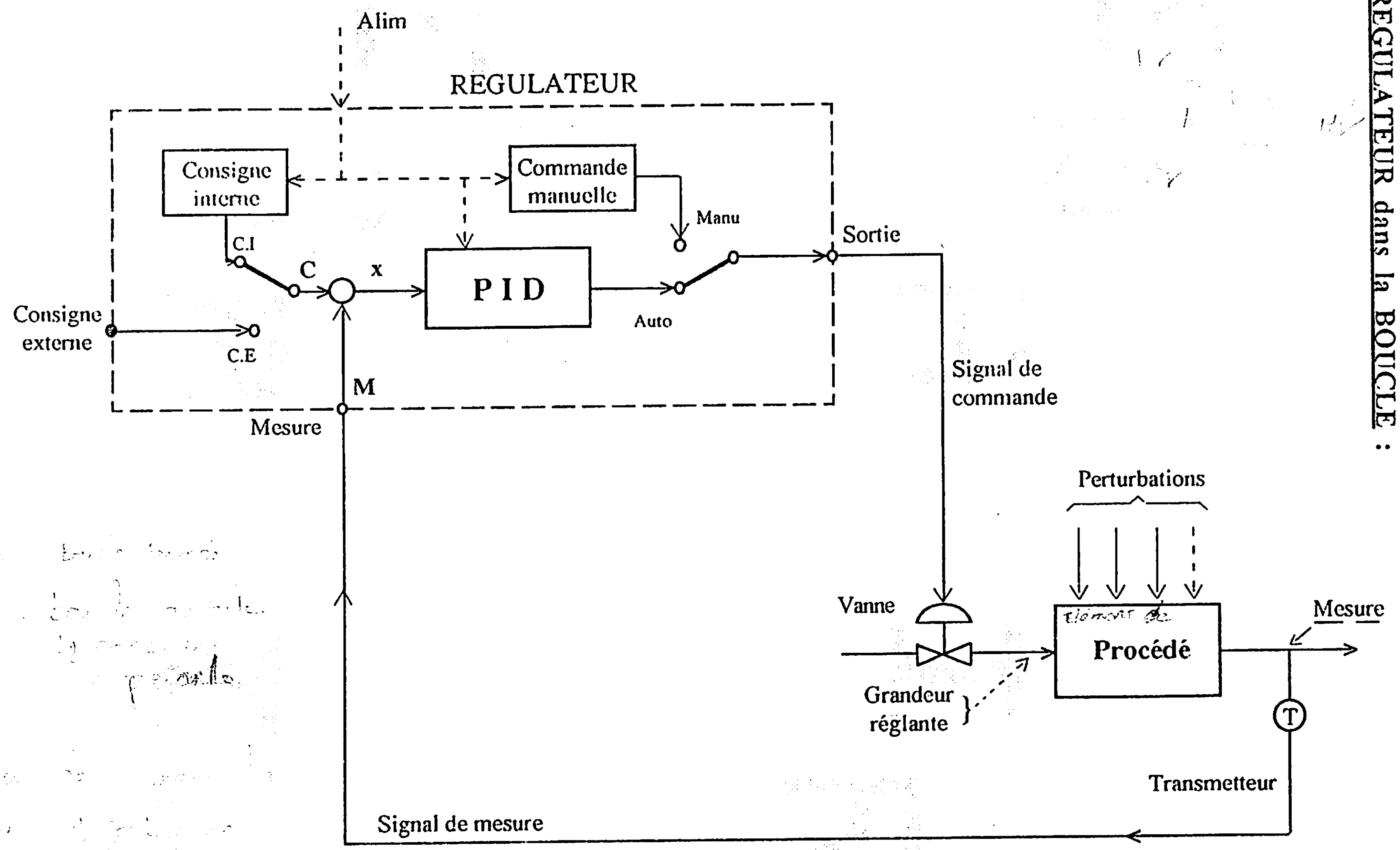
b) - Montage parallèle :



$$\boxed{H_{(p)} = \pm H1_{(p)} \pm H2_{(p)}}$$

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

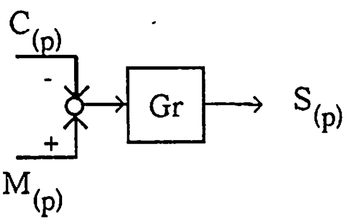
2 - REGULATEUR dans la BOUCLE :



Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.03.03.15

3 - REGULATEUR PROPORTIONNEL P

3.1 SCHEMA FONCTIONNEL :



3.2 FONCTION DE TRANSFERT :

$$\boxed{R_{(p)} = Gr = \frac{S_{(p)}}{X_{(p)}}}$$

$$S_{(p)} = Gr.X_{(p)}$$

3.3 EQUATION TEMPORELLE :

quand M = C [illegible]

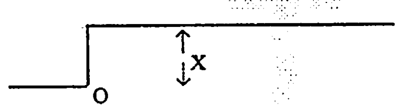
$$\boxed{s_{(t)} = \pm\, Gr.x_{(t)} + s_{o.}}$$ avec $x_{(t)} = M_{(t)} - C_{(t)}$

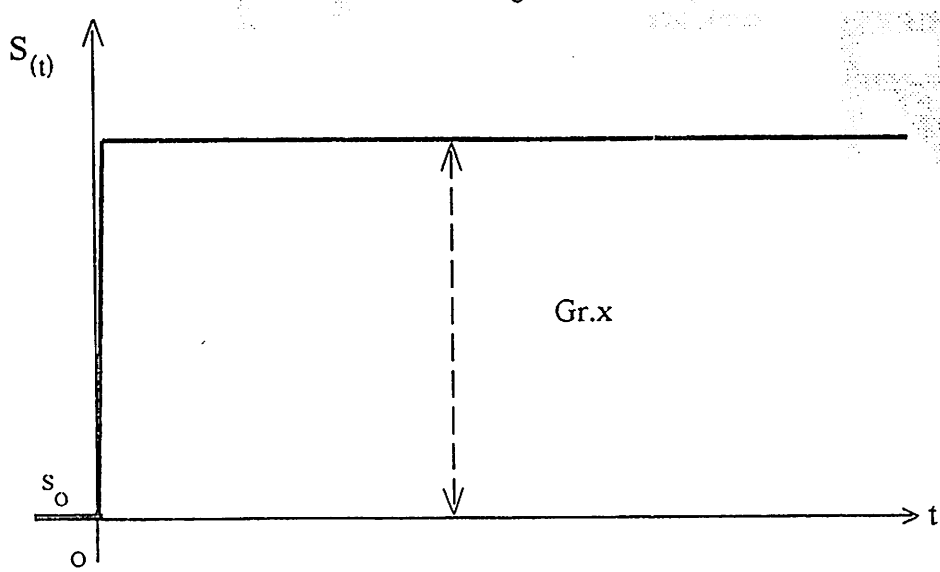
Autres appellations : IM : Intégrale manuelle
CB : Centrage de bande
MR : Manual Reset

* ± Sens d'action du régulateur :

- sens direct : les signaux M et S varient dans le même sens.
- sens inverse : les signaux M et S varient en sens contraire.

3.4 REPONSE A UN ECHELON :

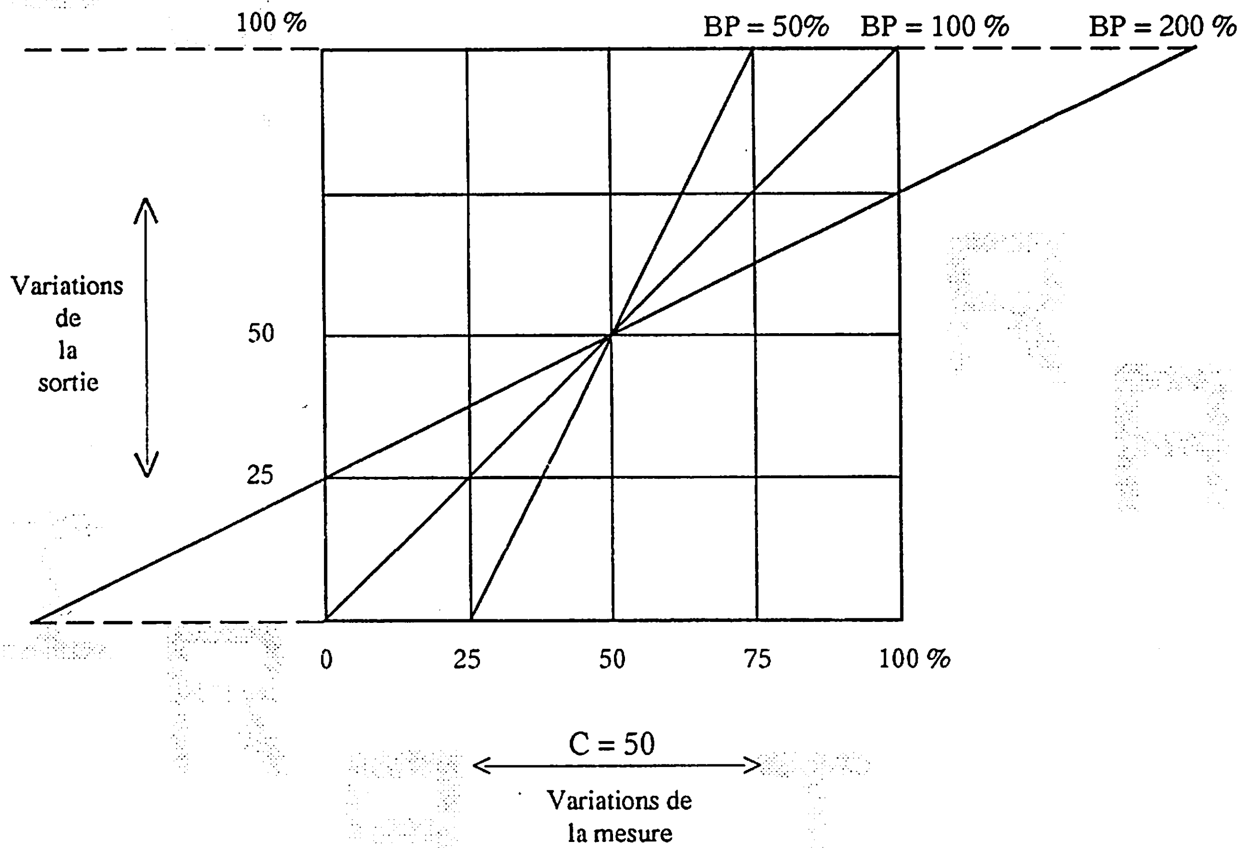


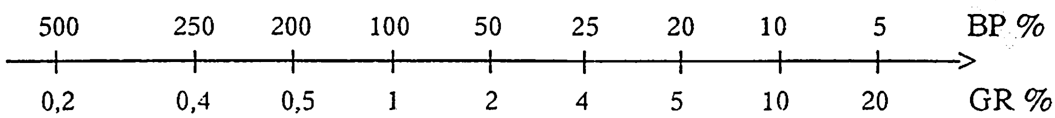


Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

3.5 BANDE PROPORTIONNELLE :

$$\boxed{BP\% = \frac{100}{Gr}}$$

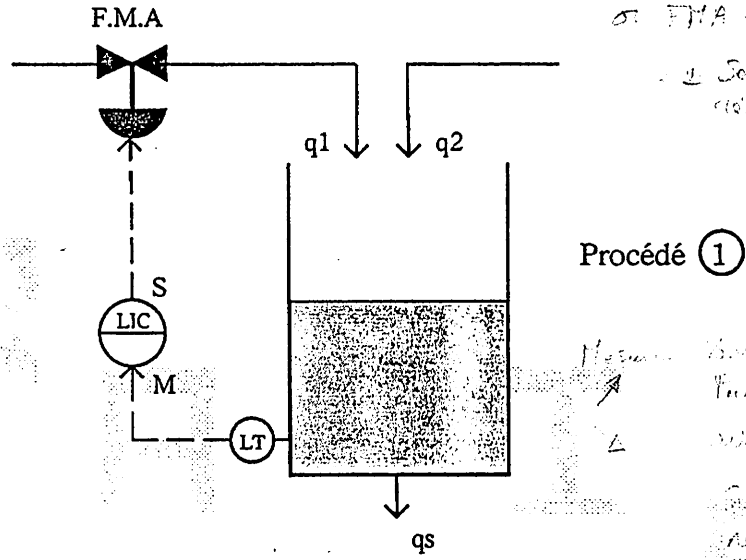


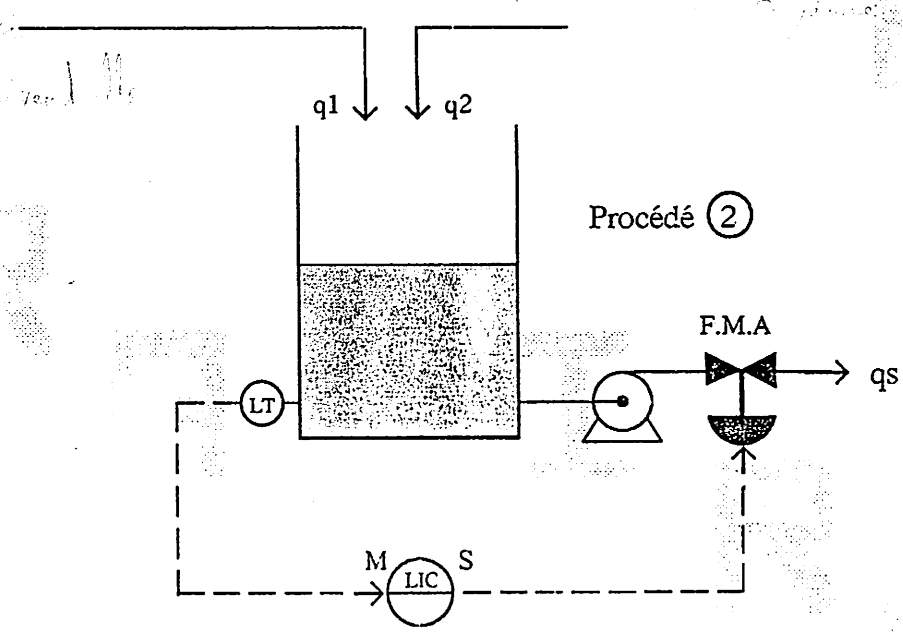


Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

3.6 <u>CHOIX DU SENS D'ACTION DU REGULATEUR</u> :

Si M ↗ ⇒ fermeture de la vanne
⇒ FMA ⇒ Signal ↘
⇒ Sens inverse du régulateur





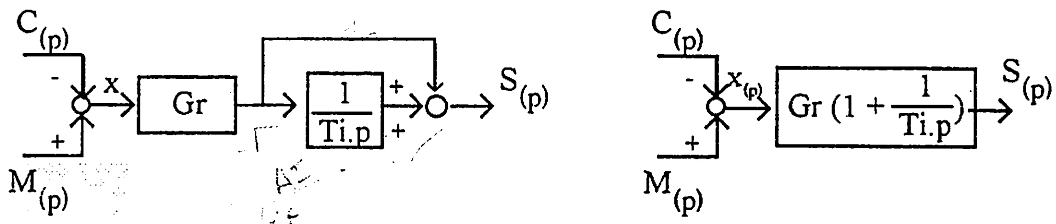
Si M ↗ ⇒ ouverture de la vanne
⇒ FMA Signal ↗
⇒ Sens direct du régulateur

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

4 - REGULATEURS à ACTIONS PROPORTIONNELLE et INTEGRALE (P + I)

4.1 REGULATEUR PROPORTIONNEL ET INTEGRAL P.I (série) :

a) *Schéma fonctionnel :*



b) *Fonction de transfert :*

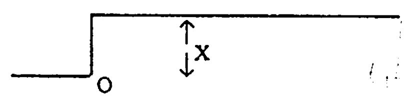
$$\boxed{R_{(p)} = Gr\,(1 + \frac{1}{Ti.p}) = \frac{S_{(p)}}{X_{(p)}}}$$

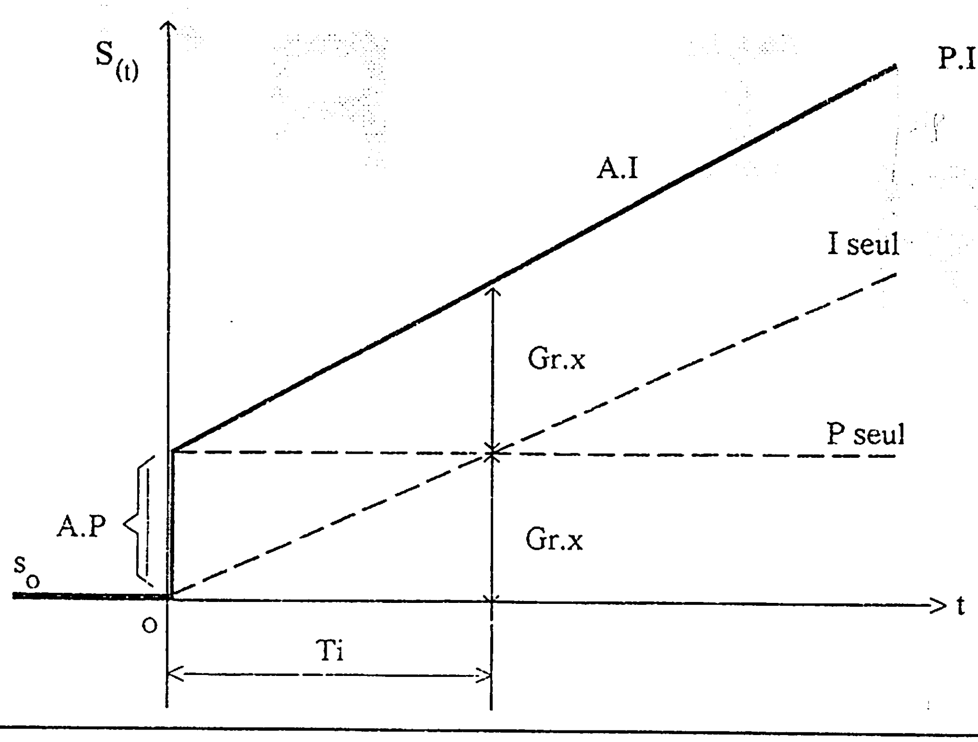
$$S_{(p)} = X_{(p)}\ Gr + \frac{Gr}{Ti}\ \frac{X_{(p)}}{p}$$

c) *Equation temporelle :*

$$\boxed{s_{(t)} = \pm\ Gr.x_{(t)} + \frac{Gr}{Ti}\int_{o}^{t} x_{(t)}\,dt + s_{o}}$$

d) *Réponse à un échelon :*



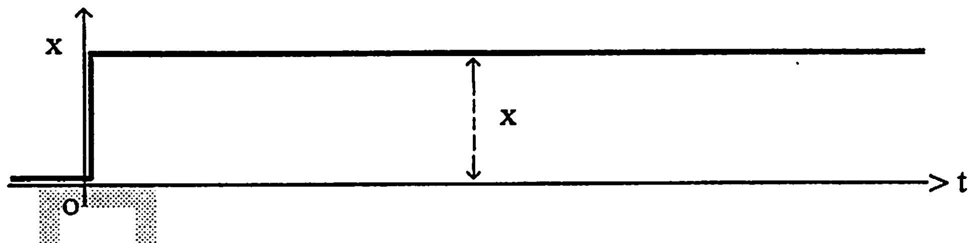


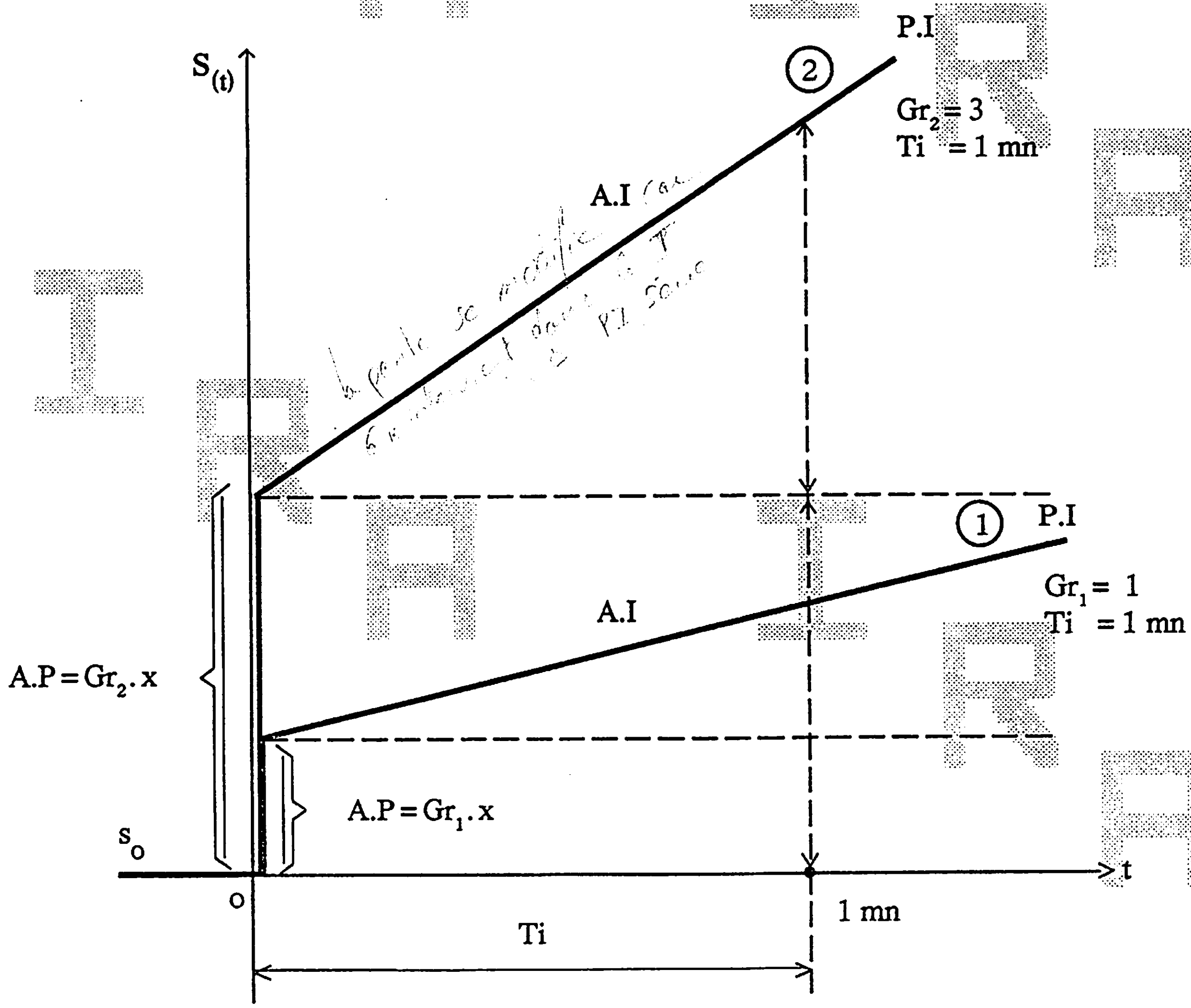
Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

e) ***Recherche de la structure :***

Régulateur P.I série

- Réponse à un échelon





Le gain Gr (ou la BP%) modifie la pente de l'action intégrale.

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

f) Dosage de l'action intégrale :

Remarque : Pour doser l'action intégrale, on utilise également le nombre de répétitions par minute noté ***n***

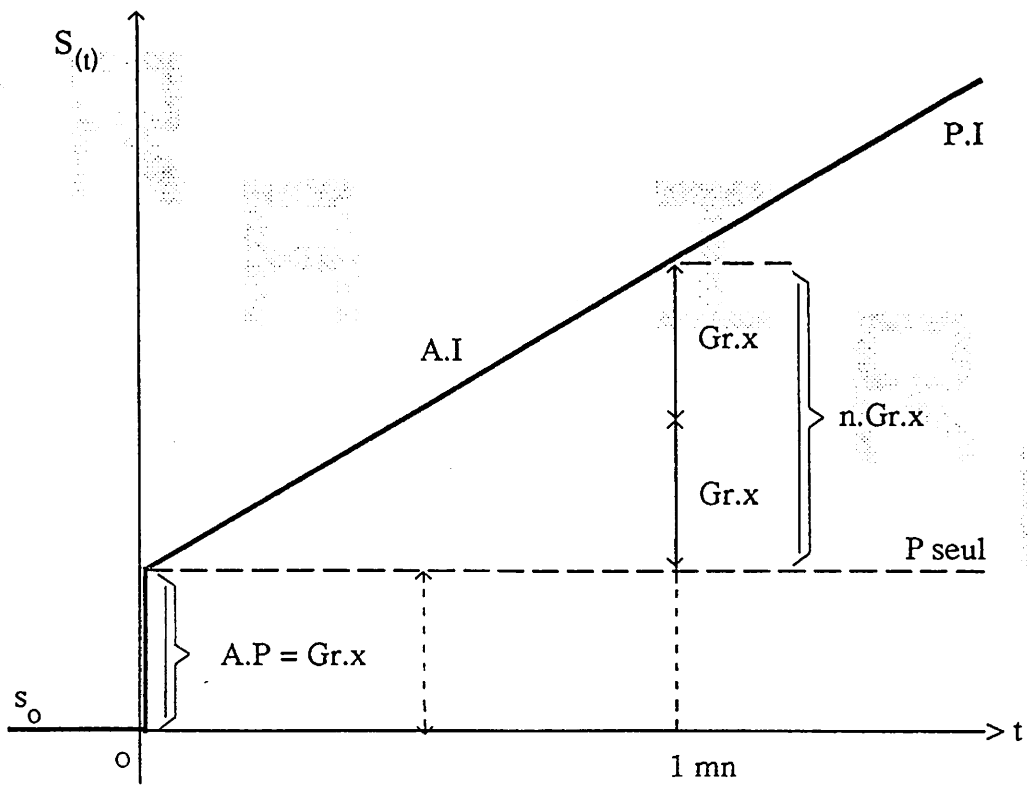
$$\boxed{n = \frac{1}{Ti}}$$

Rep/mn — mn

- Equation temporelle pour un régulateur P.I série

$$\boxed{s_{(t)} = \pm\, Gr.x_{(t)} \pm n.Gr \int_0^t x_{(t)}\, dt + s_o}$$

- Réponse à un échelon :

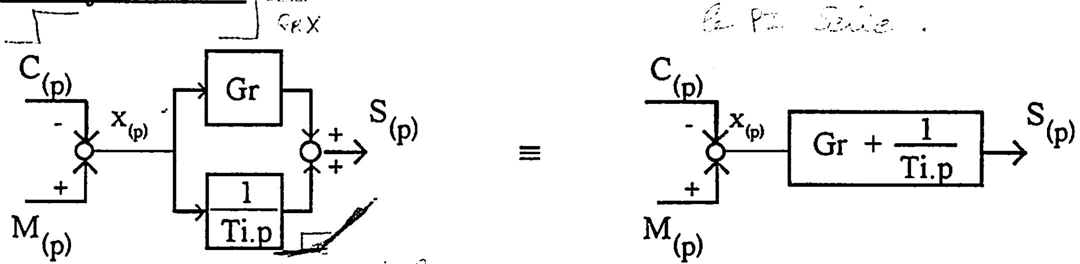


Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

4.2 REGULATEUR PROPORTIONNEL ET INTEGRAL P.I. (PARALLELE) :

Pas plus performant que le PI série.

a) *Schéma fonctionnel :*



b) *Fonction de transfert :*

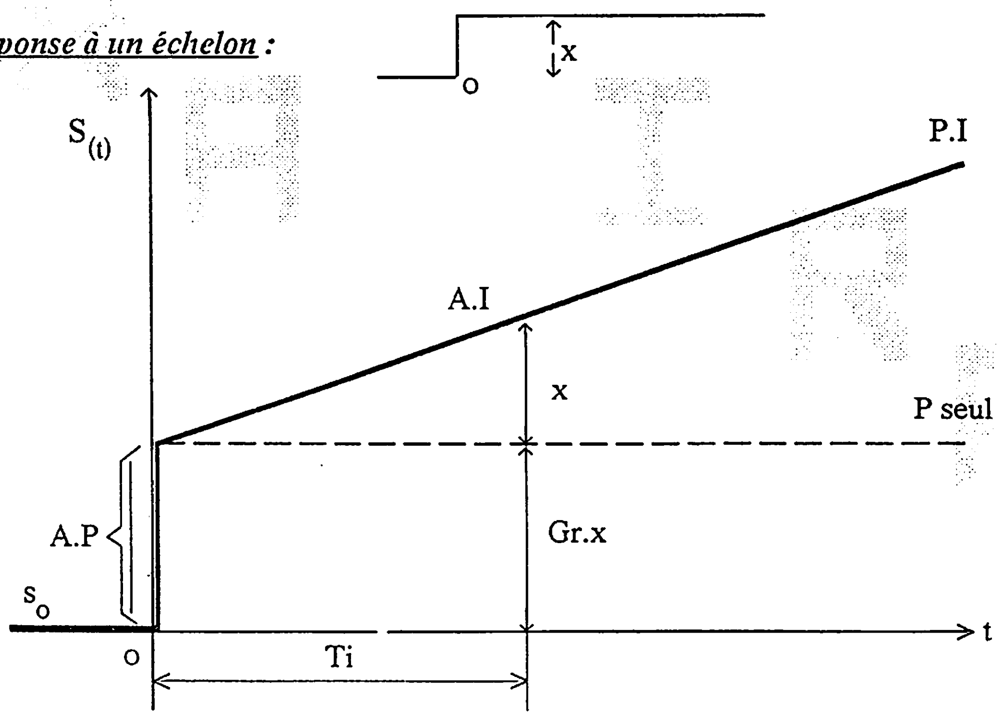
$$\boxed{R_{(p)} = Gr + \frac{1}{Ti.p} = \frac{S_{(p)}}{X_{(p)}}}$$

$$S_{(p)} = X_{(p)}\ Gr + \frac{1}{Ti}\,\frac{X_{(p)}}{p}$$

c) *Equation temporelle :*

$$\boxed{s_{(t)} = \pm\, Gr.x_{(t)} \pm \frac{1}{Ti}\int_0^t x_{(t)}\,dt + s_{o.}}$$

d) *Réponse à un échelon :*

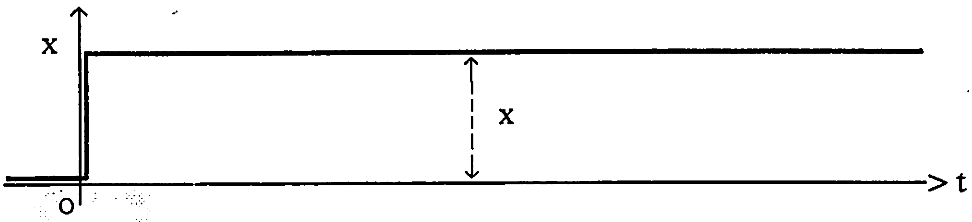


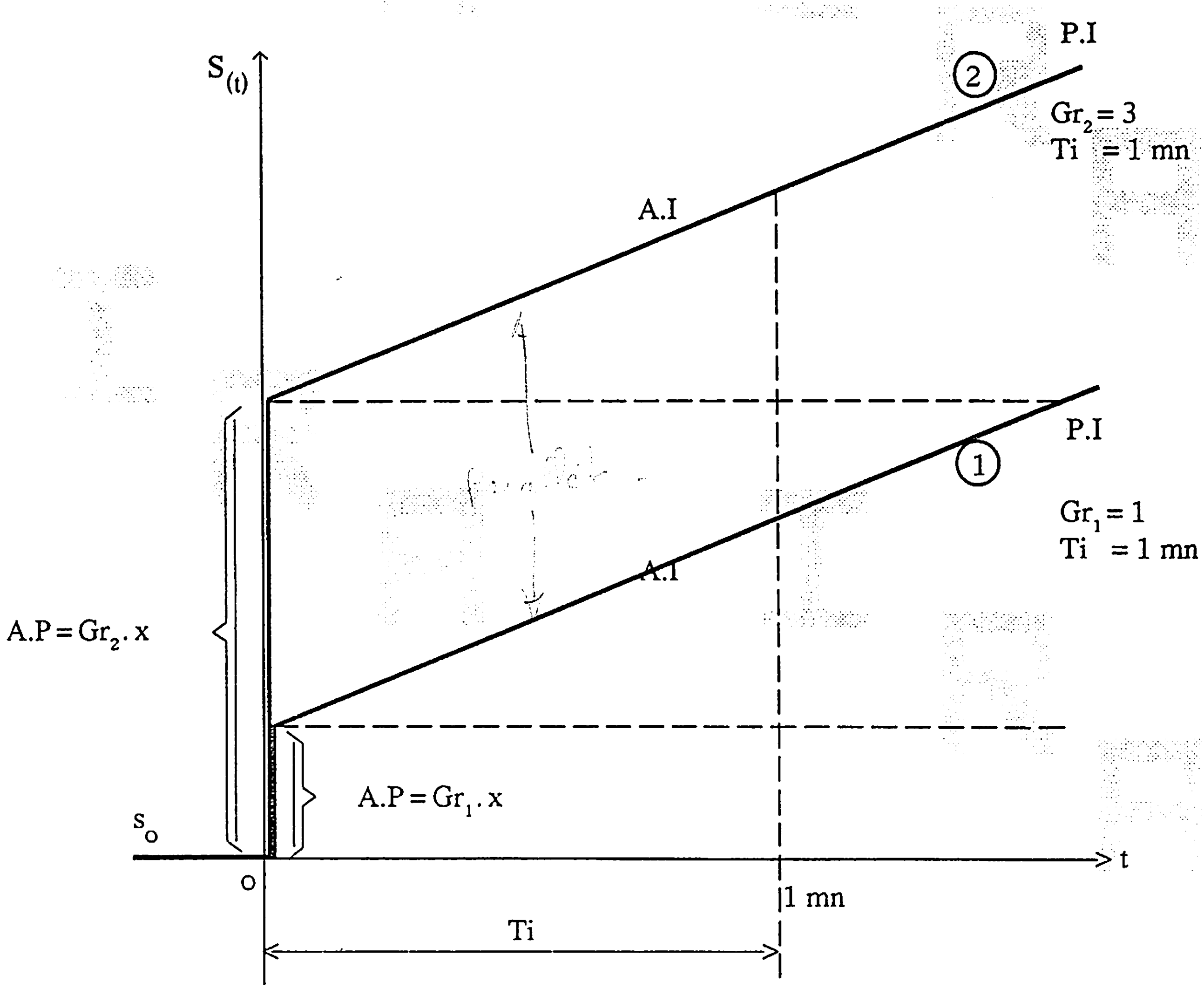
Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

e) *Recherche de la structure :*

Régulateur P.I (parallèle)

- Réponse à un échelon





Le gain Gr (ou la BP%) ne modifie pas la pente de l'action intégrale.

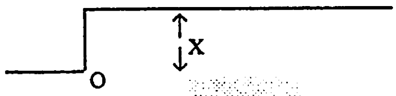
Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

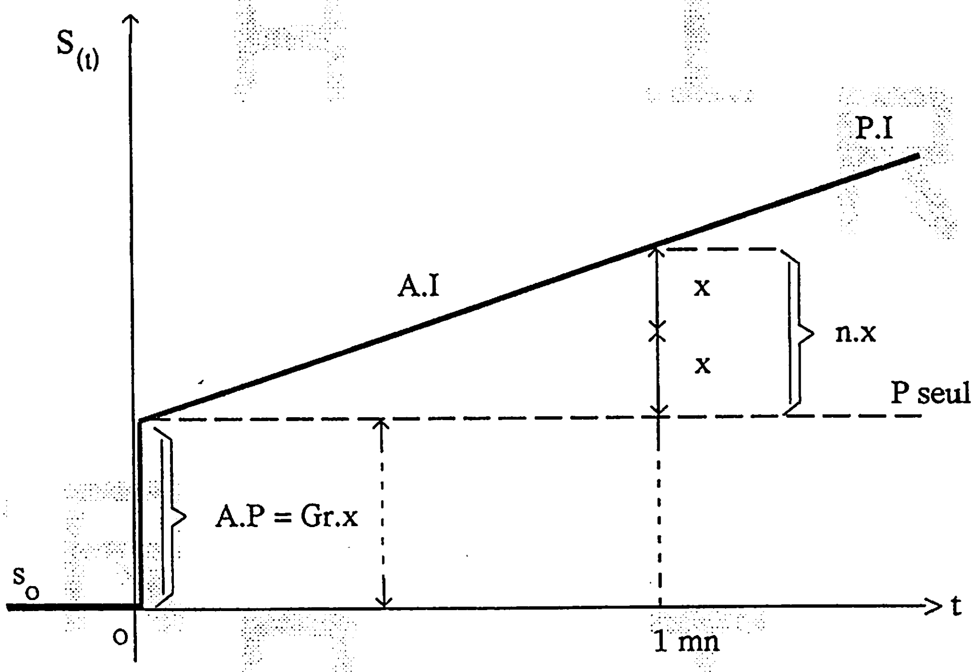
f) Dosage de l'action intégrale :

- Equation temporelle pour un régulateur P.I parallèle :

$$\boxed{s_{(t)} = \pm\ Gr.x_{(t)} \pm n \int_0^t x_{(t)}\,dt + s_{o.}}$$

- Réponse à un échelon :





Nota : Pour supprimer l'action intégrale :

- Afficher Ti = max ou sur certains régulateurs numériques
  Ti = 0 ⇒ (Test logique)

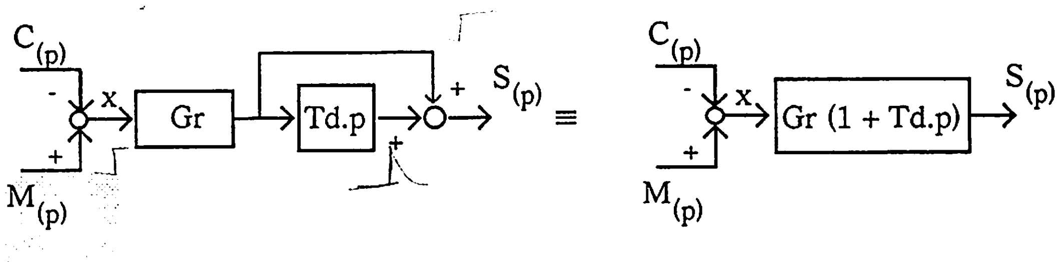
ou n = 0 Rep/mn

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

5 - REGULATEURS à ACTIONS PROPORTIONNELLE et DERIVEE (P + D)

5.1 REGULATEUR PROPORTIONNEL ET DERIVEE P.D (série) :

a) Schéma fonctionnel :



b) Fonction de transfert :

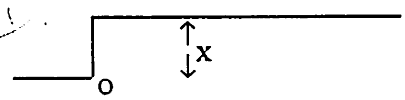
$$\boxed{R_{(p)} = Gr\ (1 + Td.p) = \frac{S_{(p)}}{X_{(p)}}}$$

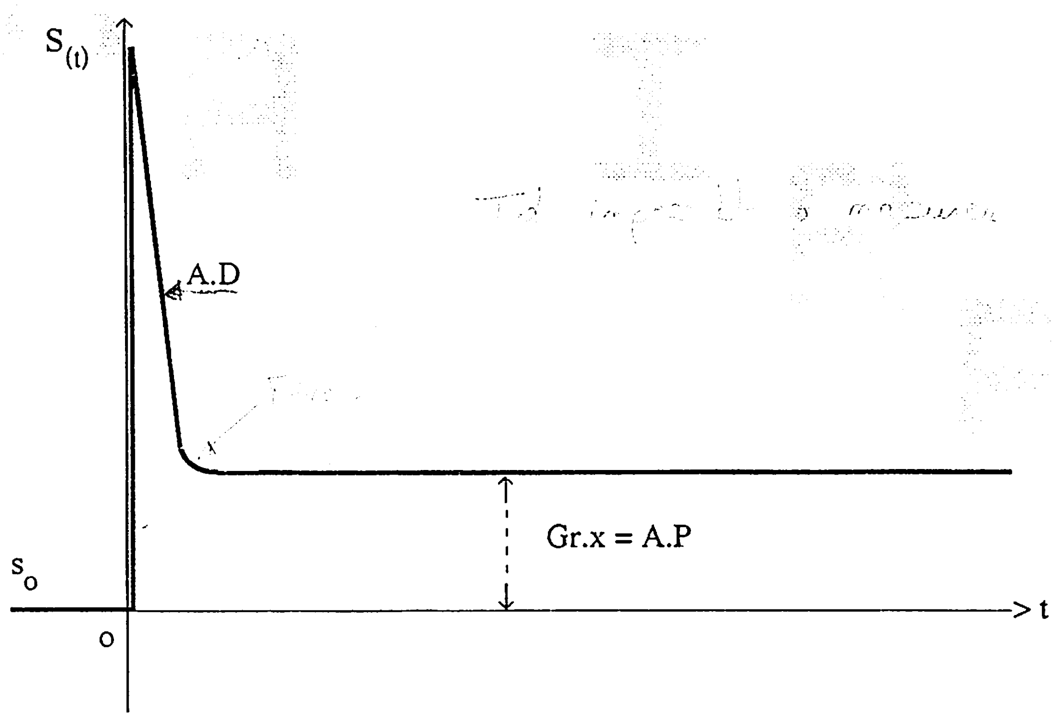
$$S_{(p)} = Gr.X_{(p)} + Gr.Td.X_{(p)} \cdot p$$

c) Equation temporelle :

$$\boxed{s_{(t)} = \pm\ Gr.x_{(t)} \pm Gr.Td \frac{dx_{(t)}}{dt} + s_{o.}}$$

d) Réponse à un échelon :

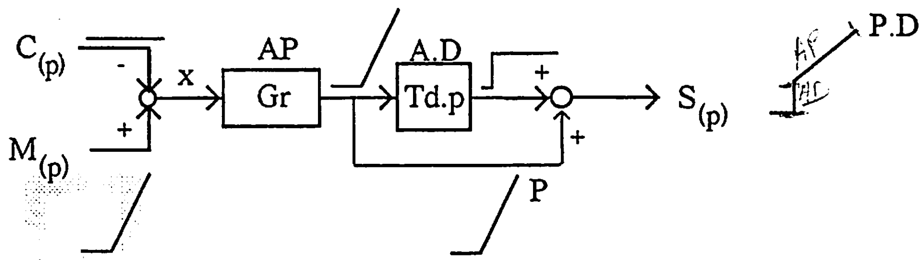




Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

e) ***Réponse à une rampe :*** car un échelon ne permet pas de vérifier Td.

Régulateur proportionnel et dérivée P.D série

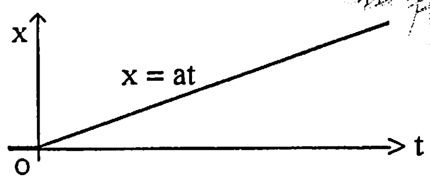


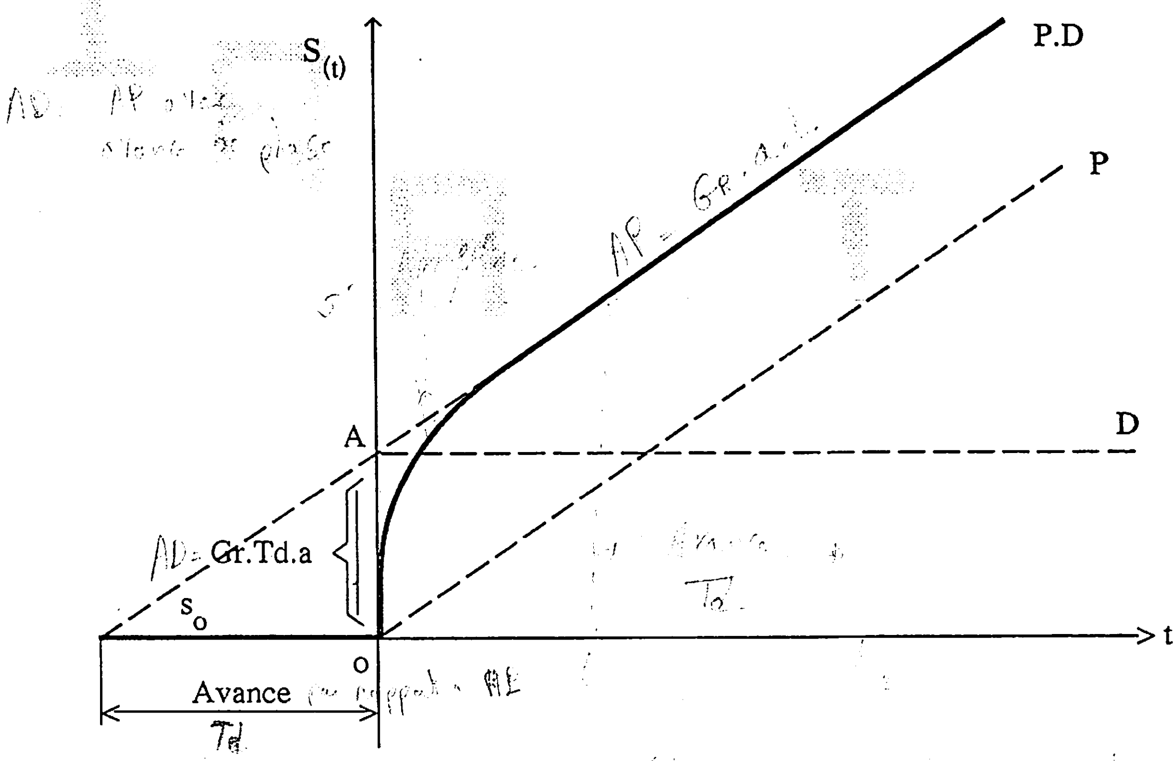
- Equation temporelle :

$$\boxed{s_{(t)} = \pm\, Gr.x_{(t)} \pm Gr.Td\,\frac{dx_{(t)}}{dt} + s_{o.}}$$

sans le filtre (pour alléger l'écriture)

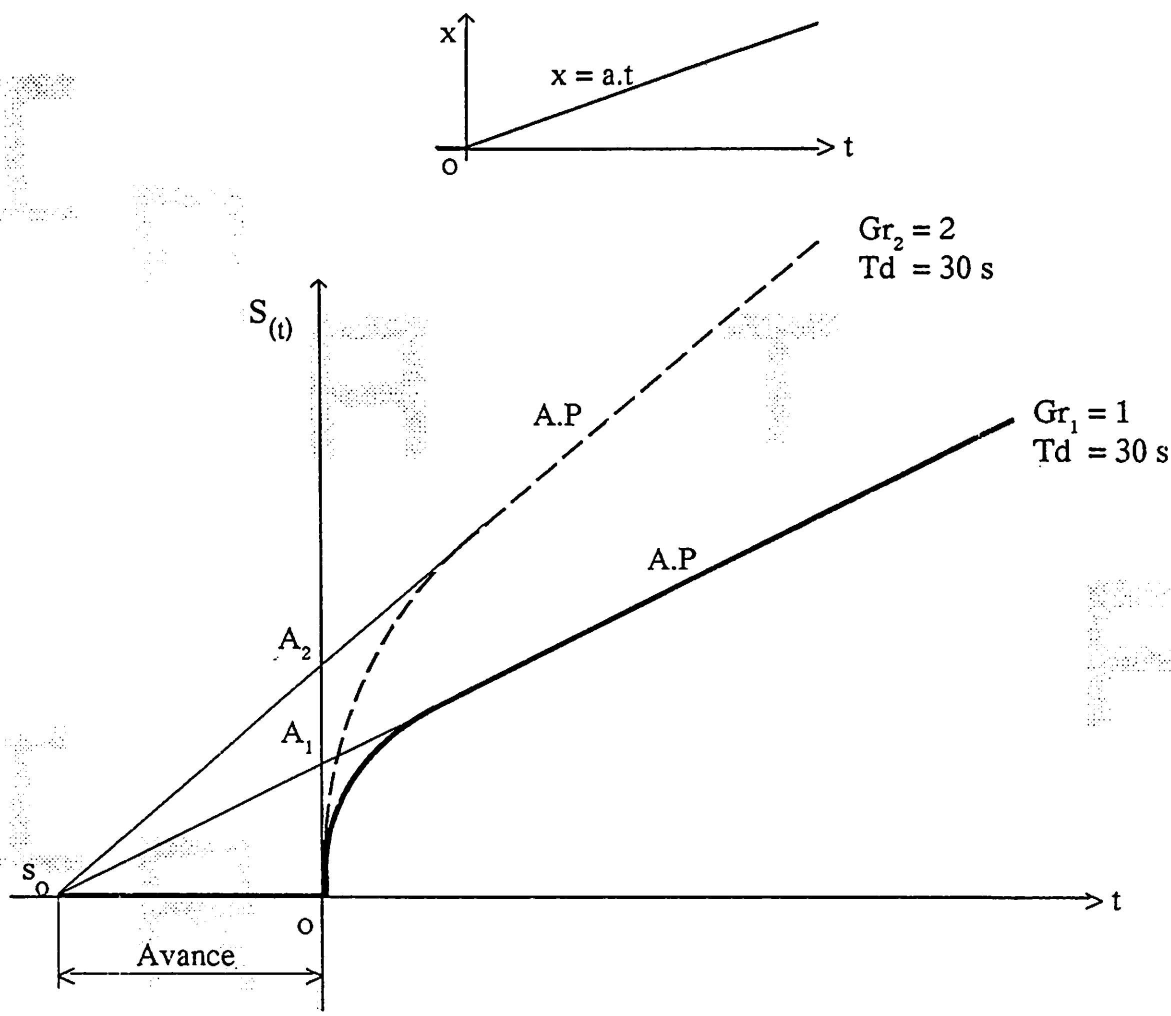
- Réponse à une rampe :





Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

f) Recherche de la structure du régulateur P.D série :



Le segment OA change avec le gain Gr (ou la BP%) et l'avance reste constante quelle que soit la valeur de Gr (ou la BP%).

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

5.2 REGULATEUR PROPORTIONNEL ET DERIVEE P.D (parallèle)

a) *Schéma fonctionnel :*

b) *Fonction de transfert :*

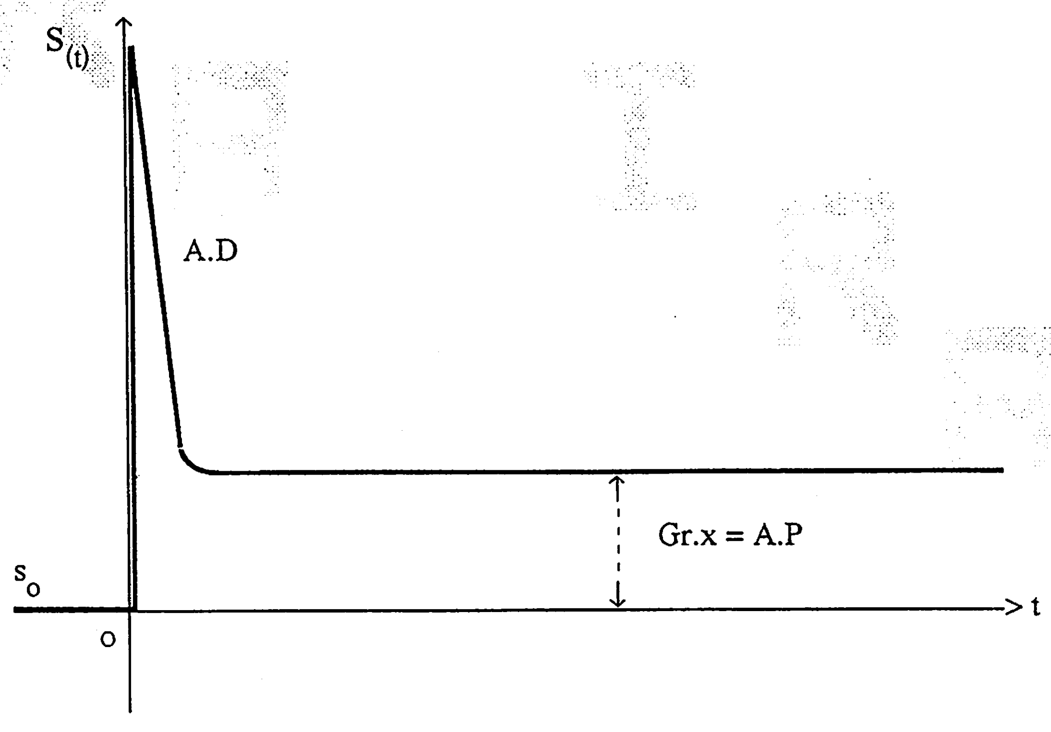
$$R_{(p)} = Gr + Td.p = \frac{S_{(p)}}{X_{(p)}}$$

$$S_{(p)} = \underbrace{Gr.X_{(p)}}_{AP} + \underbrace{Td.X_{(p)}\,p}_{AD}$$

c) *Equation temporelle :*

$$s_{(t)} = \pm\, Gr.x_{(t)} \pm Td\,\frac{dx_{(t)}}{dt} + s_{o.}$$

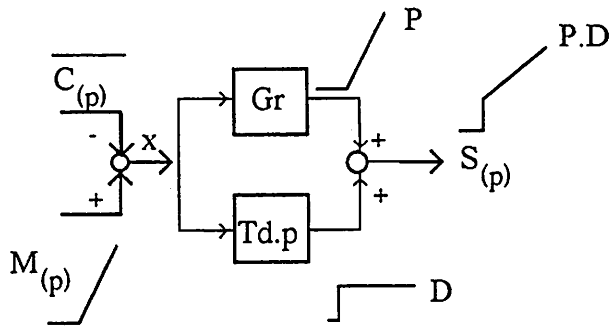
d) *Réponse à un échelon :*



Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

e) Réponse à une rampe :

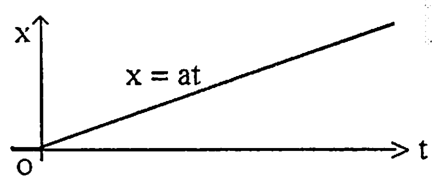
Régulateur proportionnel et dérivée P.D parallèle

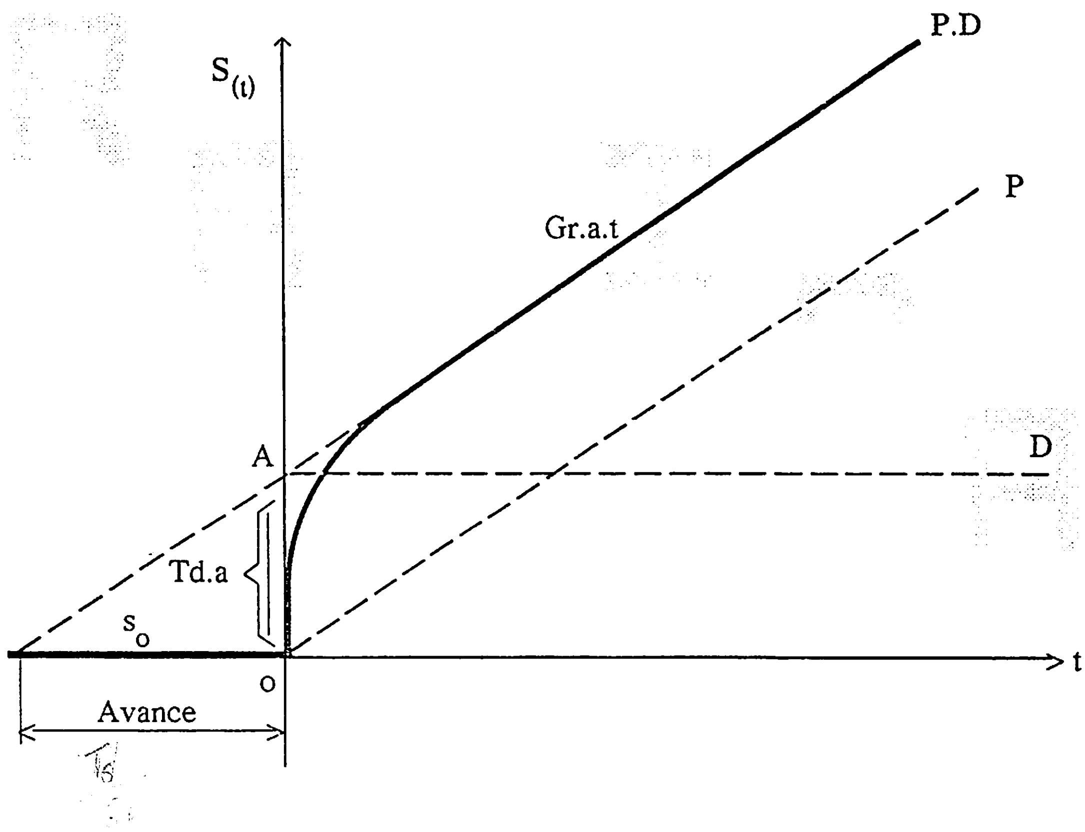


- Equation temporelle :

$$\boxed{s_{(t)} = \pm Gr.x_{(t)} \pm Td\,\frac{dx_{(t)}}{dt} + s_{o.}}$$

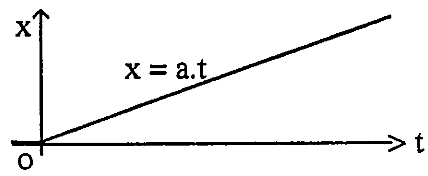
- Réponse à une rampe :

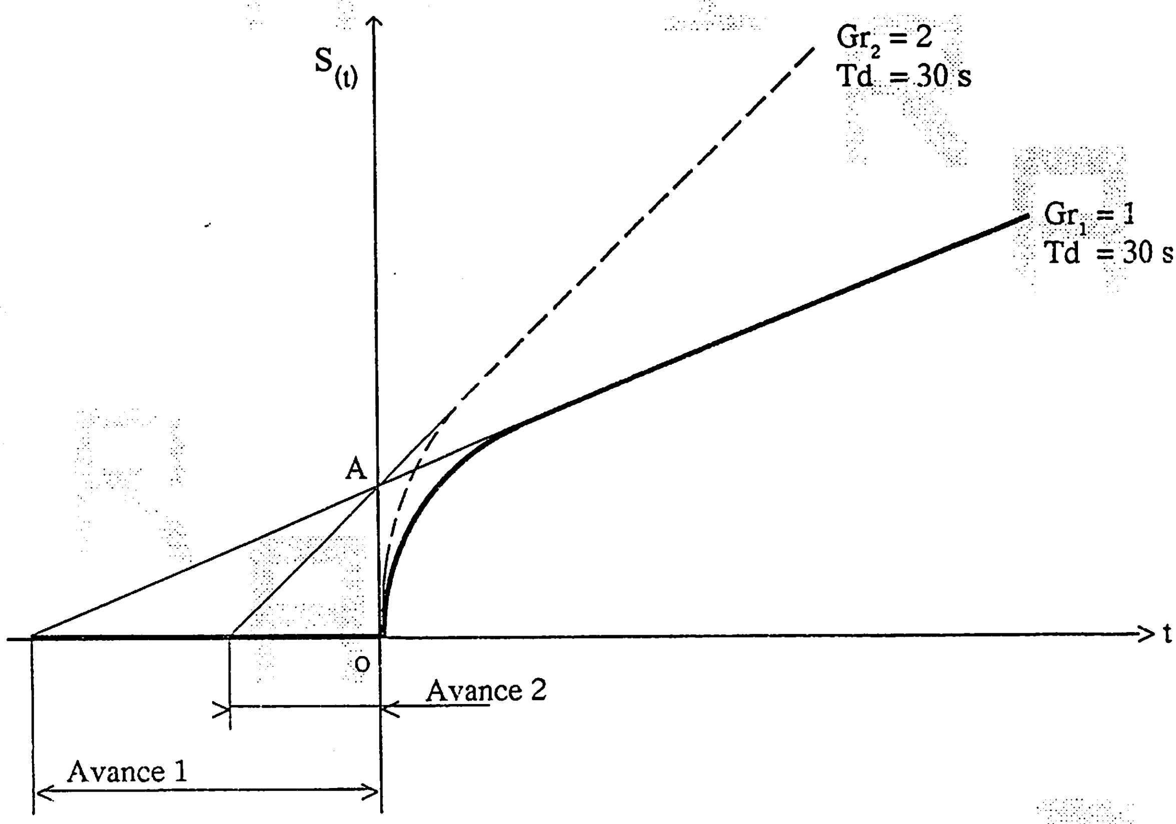




Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

f) Recherche de la structure d'un régulateur P.D parallèle :



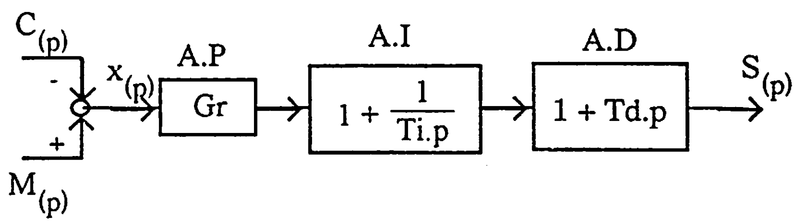


L'avance se modifie avec le gain Gr (ou la BP%) et le segment OA reste constant quelle que soit la valeur de Gr (ou la BP%).

6 - REGULATEURS à ACTIONS PROPORTIONNELLE, INTEGRALE et DERIVEE

6.1 REGULATEUR P.I.D SERIE :

a) *Schéma fonctionnel :*



b) *Fonction de transfert :*

$$\boxed{R_{(p)} = Gr\left(1 + \frac{1}{Ti.p}\right)(1 + Td.p)}$$

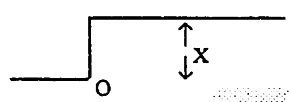
$$S_{(p)} = X_{(p)}\left(\alpha.Gr + \frac{Gr}{Ti.p} + Gr.Td.p\right) \qquad \text{avec} \quad \frac{Ti + Td}{Ti} = \alpha$$

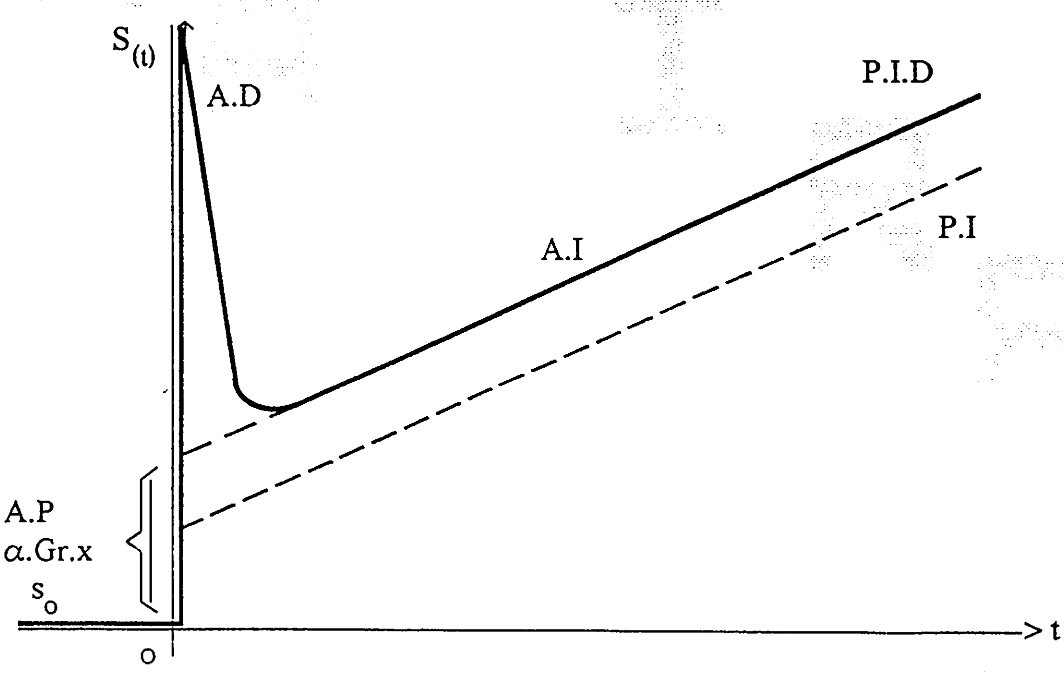
c) *Equation temporelle :*

$$\boxed{s_{(t)} = \pm\ \alpha.Gr.x_{(t)} \pm \frac{Gr}{Ti}\int_0^t x_{(t)}\,dt \pm Gr.Td\,\frac{dx_{(t)}}{dt} + s_{o.}}$$

Coefficient d'interaction : $\alpha = \dfrac{Ti + Td}{Ti}$. Ce coefficient n'existe que sur des régulateurs PID série.

d) *Réponse à un échelon :*



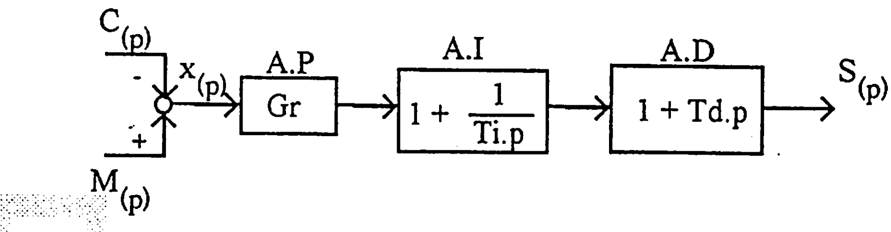


Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

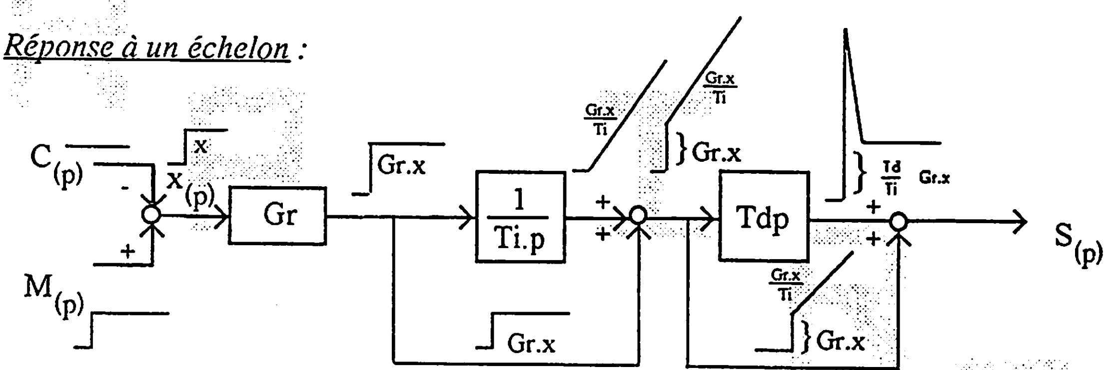
e) Régulateur P.I.D série (allure des signaux) :

en perte de phase ... on la retrouve dans TDC 30[illegible] IA Série

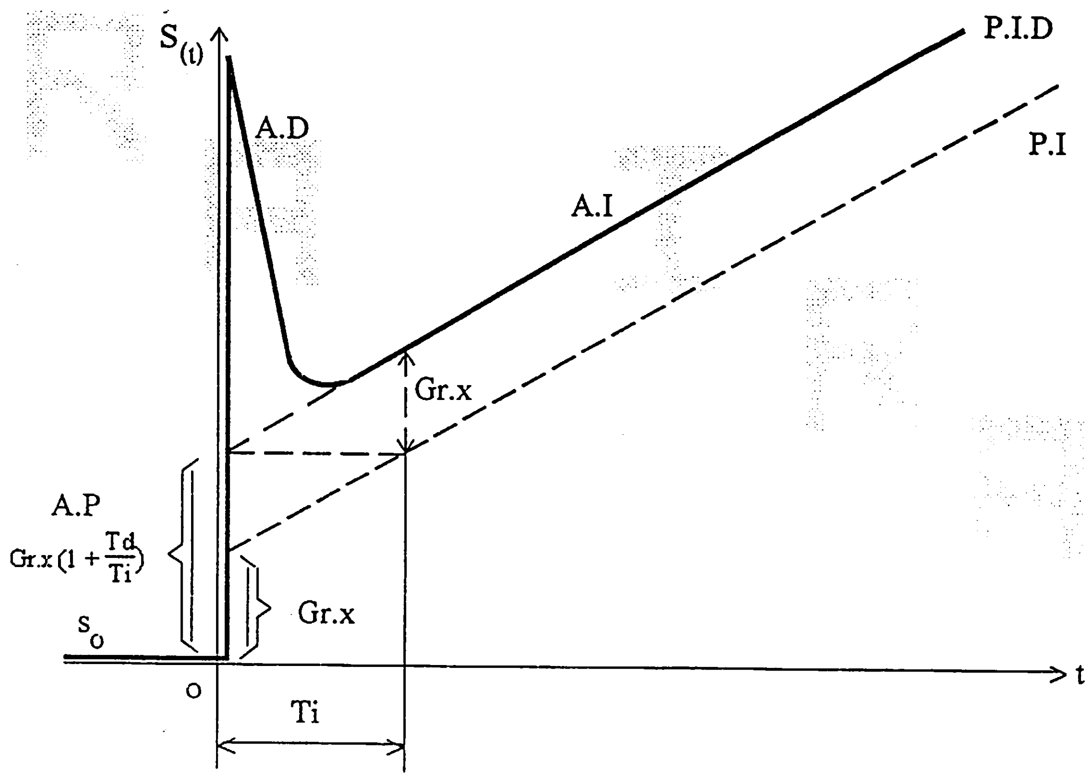
Schémas fonctionnels :



Réponse à un échelon :



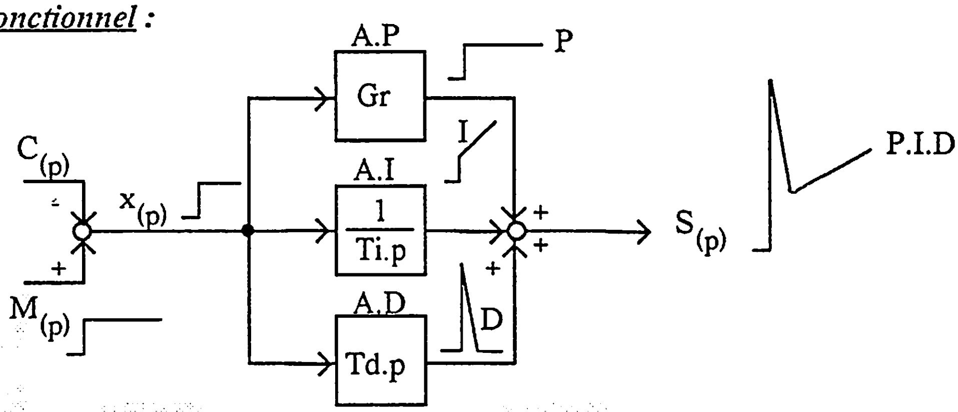
Allure de la sortie :



Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

6.2 REGULATEUR P.I.D PARALLELE :

a) *Schéma fonctionnel :*



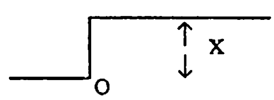
b) *Fonction de transfert :*

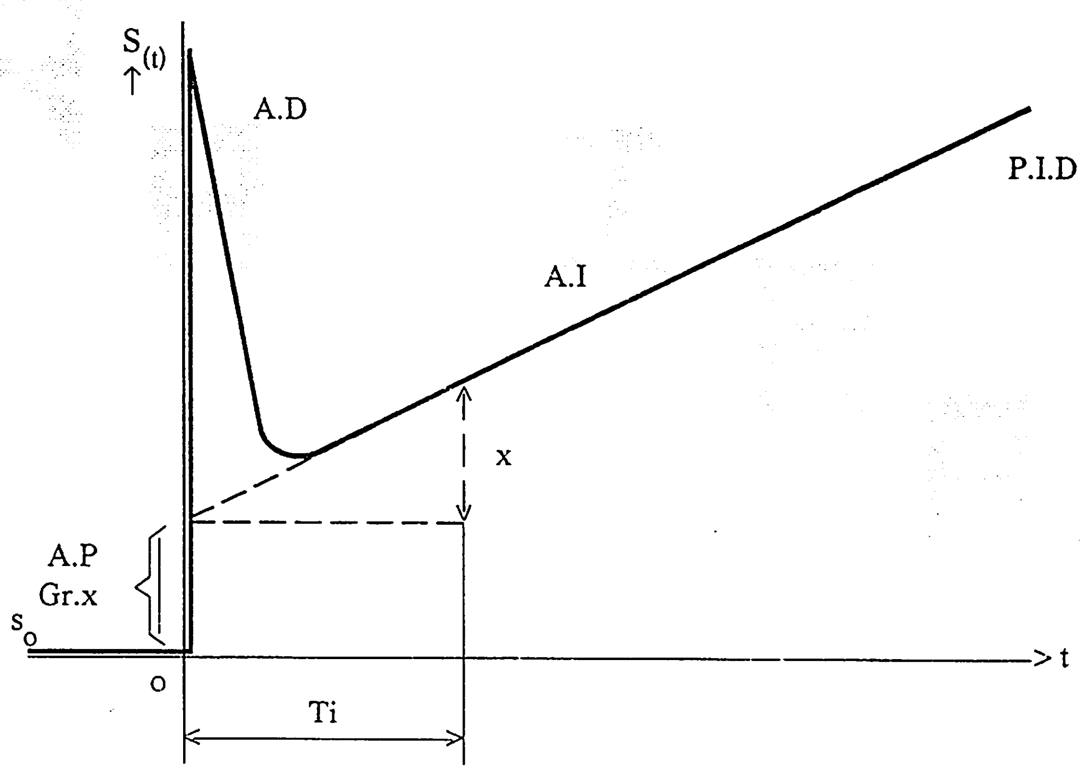
$$R_{(p)} = Gr + \frac{1}{Ti.p} + Td.p$$

c) *Equation temporelle :*

$$s_{(t)} = \pm\ Gr.x_{(t)} \pm \frac{1}{Ti} \int_0^t x_{(t)}\,dt \pm Td\,\frac{dx_{(t)}}{dt} + s_{o.}$$

d) *Réponse à un échelon :*

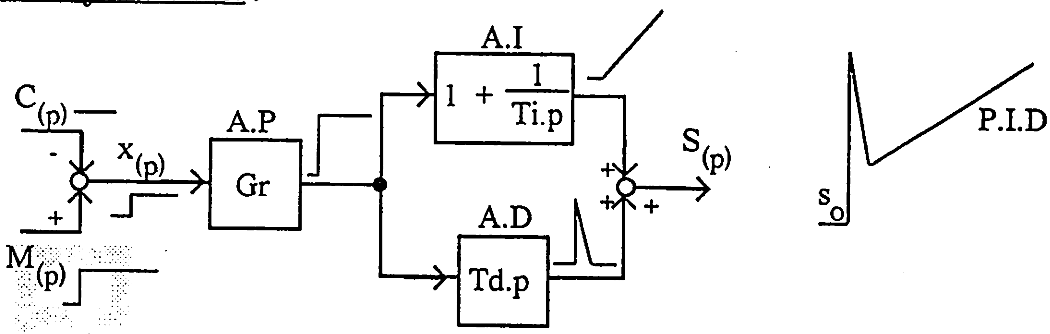




Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

6.3 REGULATEUR P.I.D mixte (1)

a) *Schéma fonctionnel :*



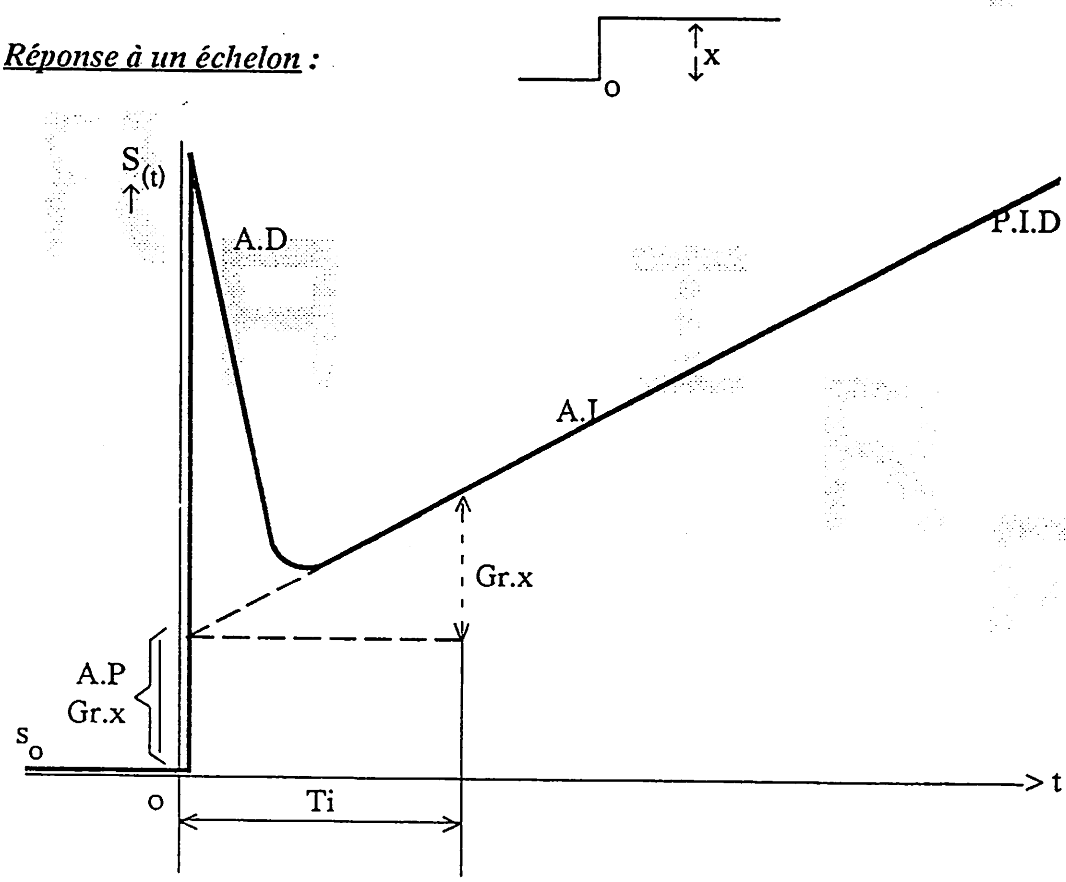
b) *Fonction de transfert :*

$$R_{(p)} = Gr\left(1 + \frac{1}{Ti.p} + Td.p\right)$$

c) *Equation temporelle :*

$$s_{(t)} = \pm\, Gr.x_{(t)} \pm \frac{Gr}{Ti}\int_o^t x_{(t)}\,dt \pm Gr.Td\,\frac{dx_{(t)}}{dt} + s_{o.}$$

d) *Réponse à un échelon :*

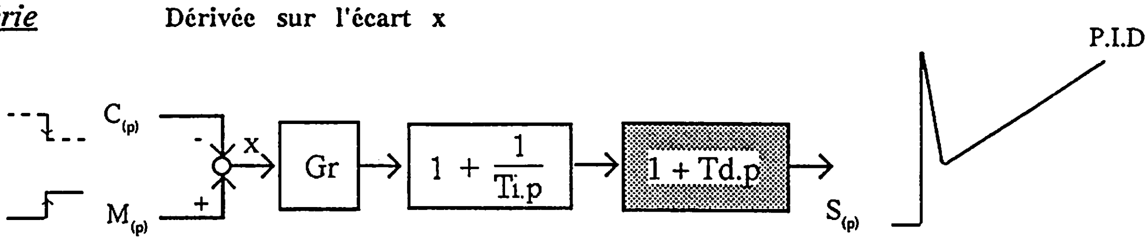


Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

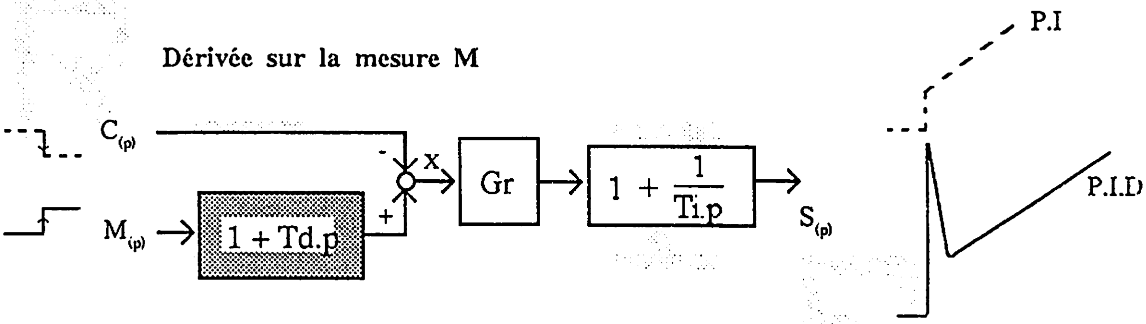
6.5 POSITION DE L'ACTION DERIVEE SUR LES REGULATEURS P.I.D. :

Sur YOKOGAWA on ne peut pas choisir

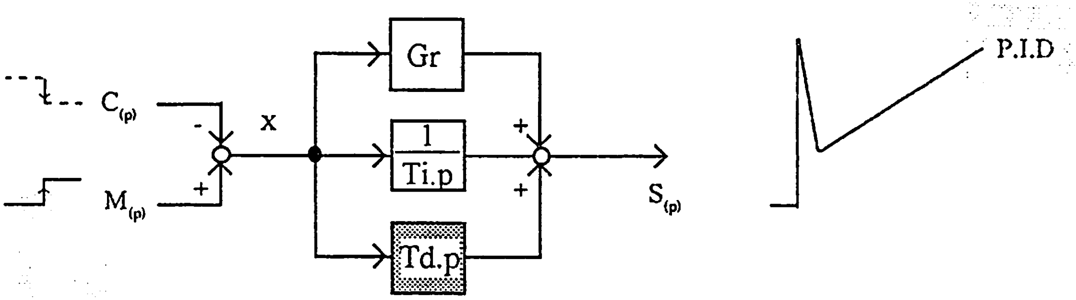
a) Série **Dérivée sur l'écart x**



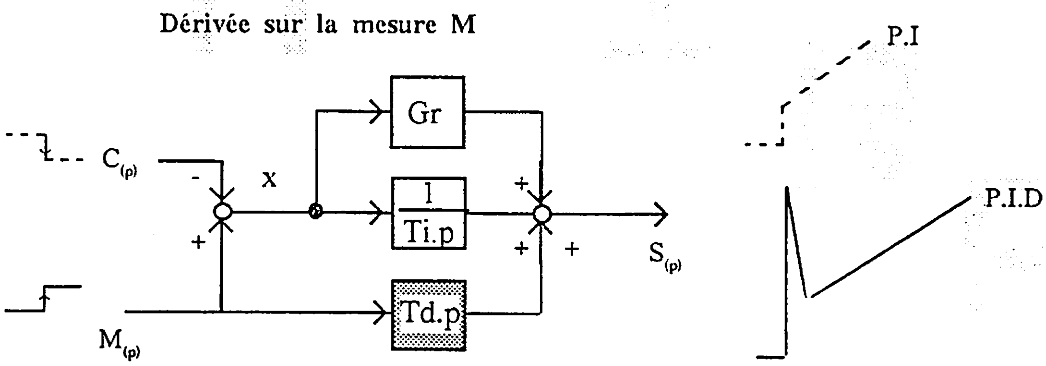
Dérivée sur la mesure M



b) Parallèle **Dérivée sur l'écart x**

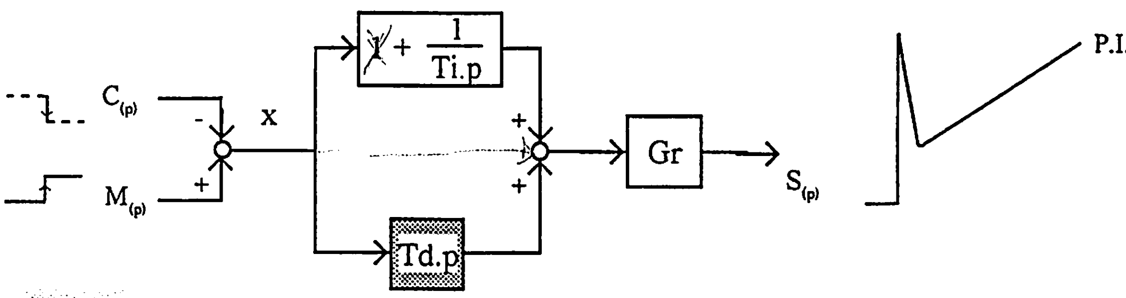


Dérivée sur la mesure M

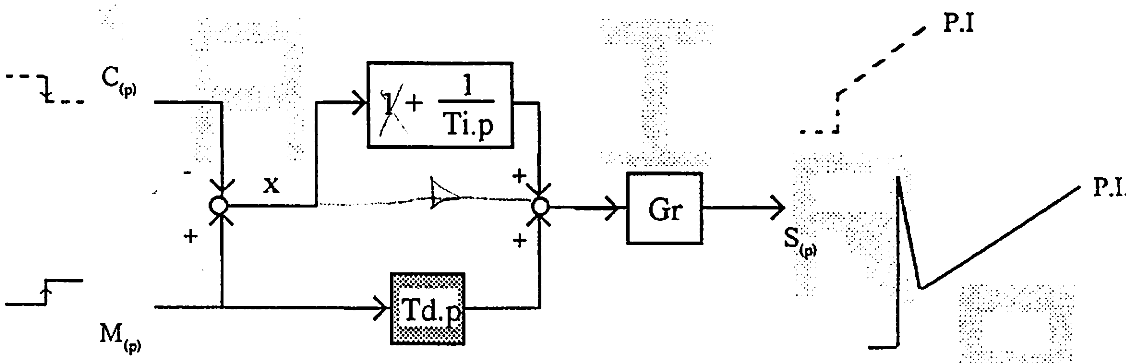


Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

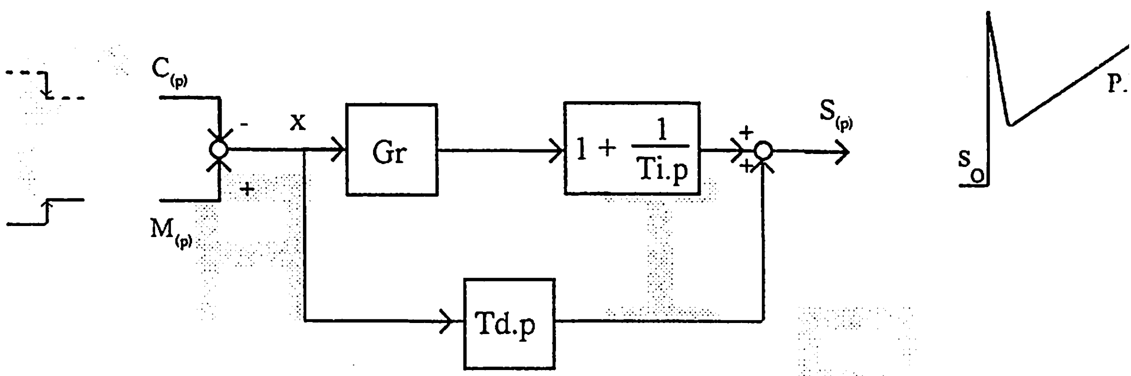
c) *Mixte (1)* Dérivée sur l'écart x



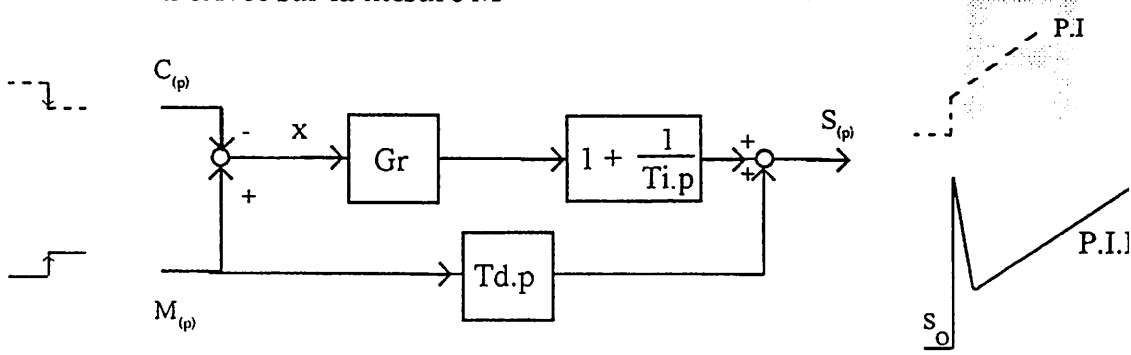
Dérivée sur la mesure M



d) *Mixte (2)* Dérivée sur l'écart x



Dérivée sur la mesure M



INSTITUT DE REGULATION ET AUTOMATION

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

FOSTER WHEELER CONCEPTION ETUDES ENTRETIEN

Ref. N°

Date Page

Subject

Prepared by

Customer

Location 21/08/96.

Checked by

- TAYLOR MOD 30

  PID série avec AD sur x ou sur M au choix.

- TCS : mixte L avec AD sur M fixe

  $Ti = 0$

- MODUHAT 8000

  mixte L AD sur x ou M.

  P. seul non possible.

- MYL mixte L AD fixe sur M

  P seul non possible

  $Ti \approx$ constante de temps du système

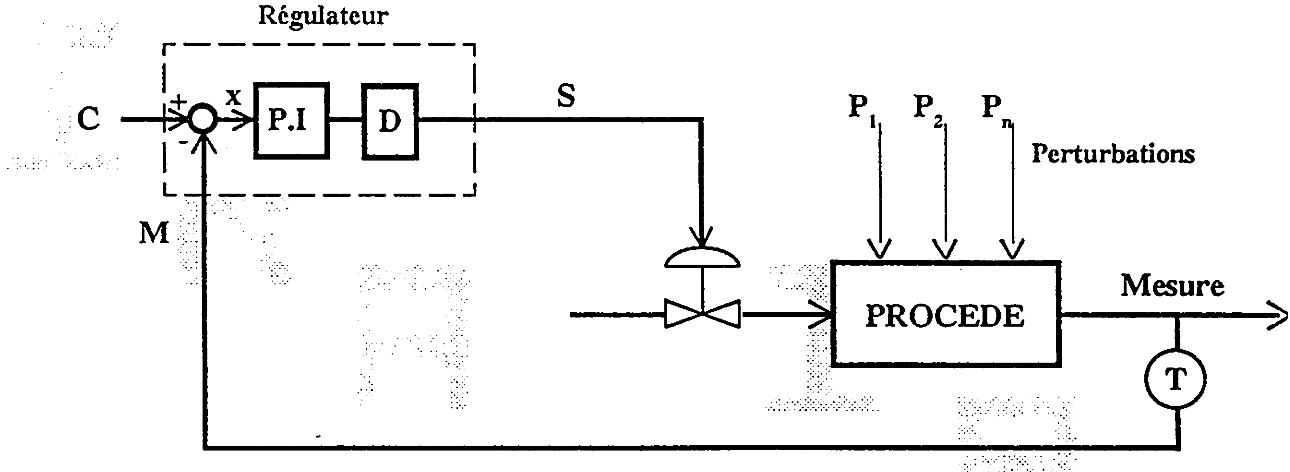
si $Ti \nearrow$ alors $Tc \nearrow$

$Tc < \frac{\theta}{10}$

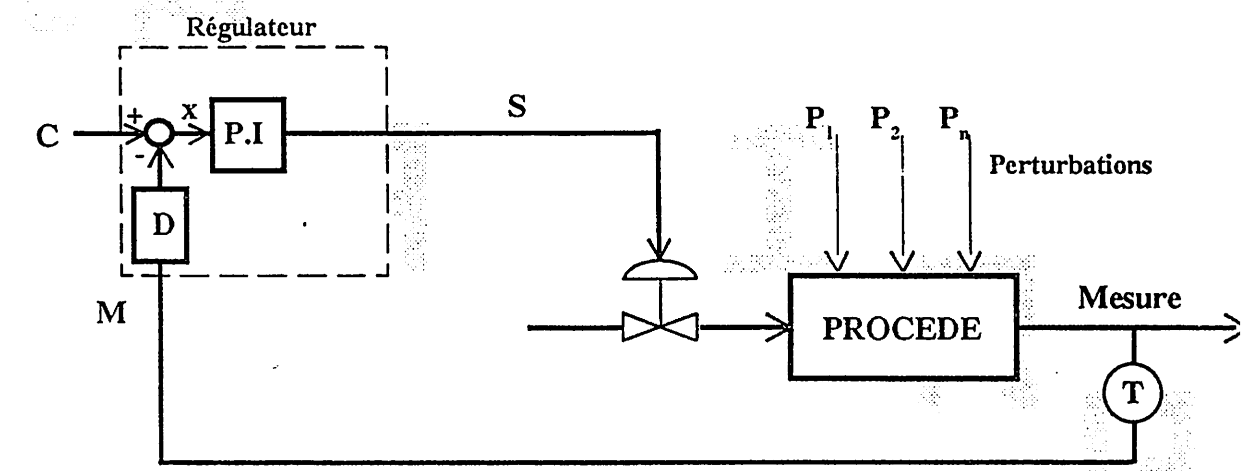
période d'échantillonnage du régulateur

6.6 REGULATEUR DANS LA BOUCLE AVEC DERIVEE SUR X OU SUR M :

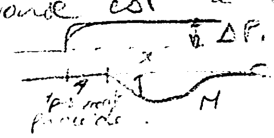
a) *Régulateur avec dérivée sur x* :



b) *Régulateur avec dérivée sur M* :



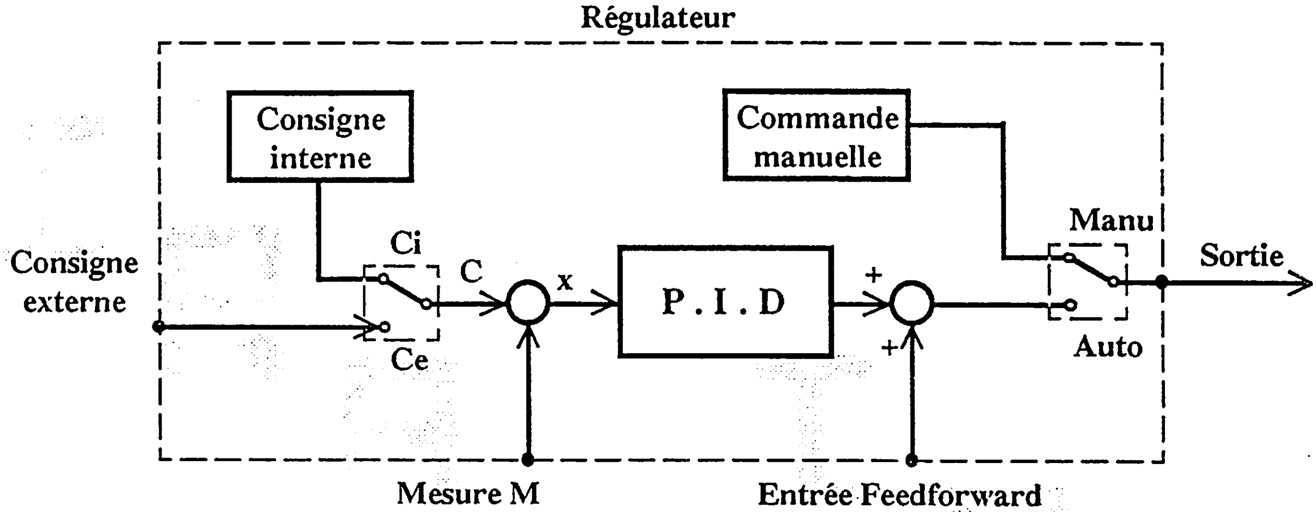
- sur un test en régulation, la réponse est la même pour a) et b)
  consigne : Ete
  perturbation



- Test en asservissement
  => C vanne [illegible]
  dans b) l'action [illegible] par rapport à a)
  pourquoi AD sur M ? [illegible] vanne [illegible]
  varier la consigne, l'action dérivée [illegible]
  [illegible] sur la vanne

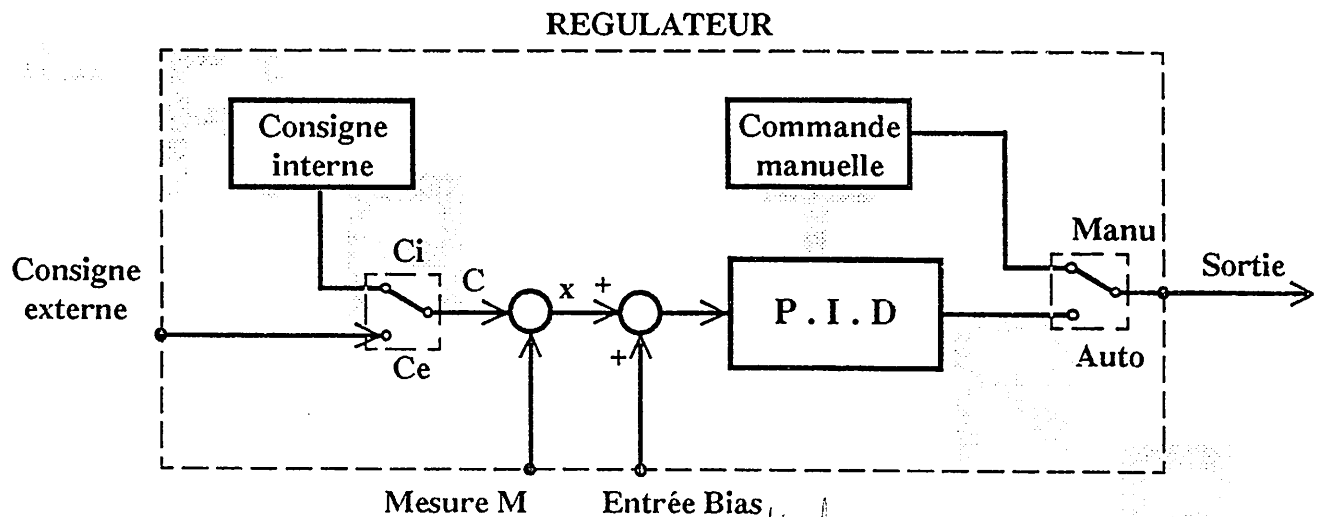
Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

6.7 REGULATEUR AVEC ENTREE FEEDFORWARD :



= entrée FF sur TCS, Taylor, MH
• on règle le So
• sert à faire une régulation mixte

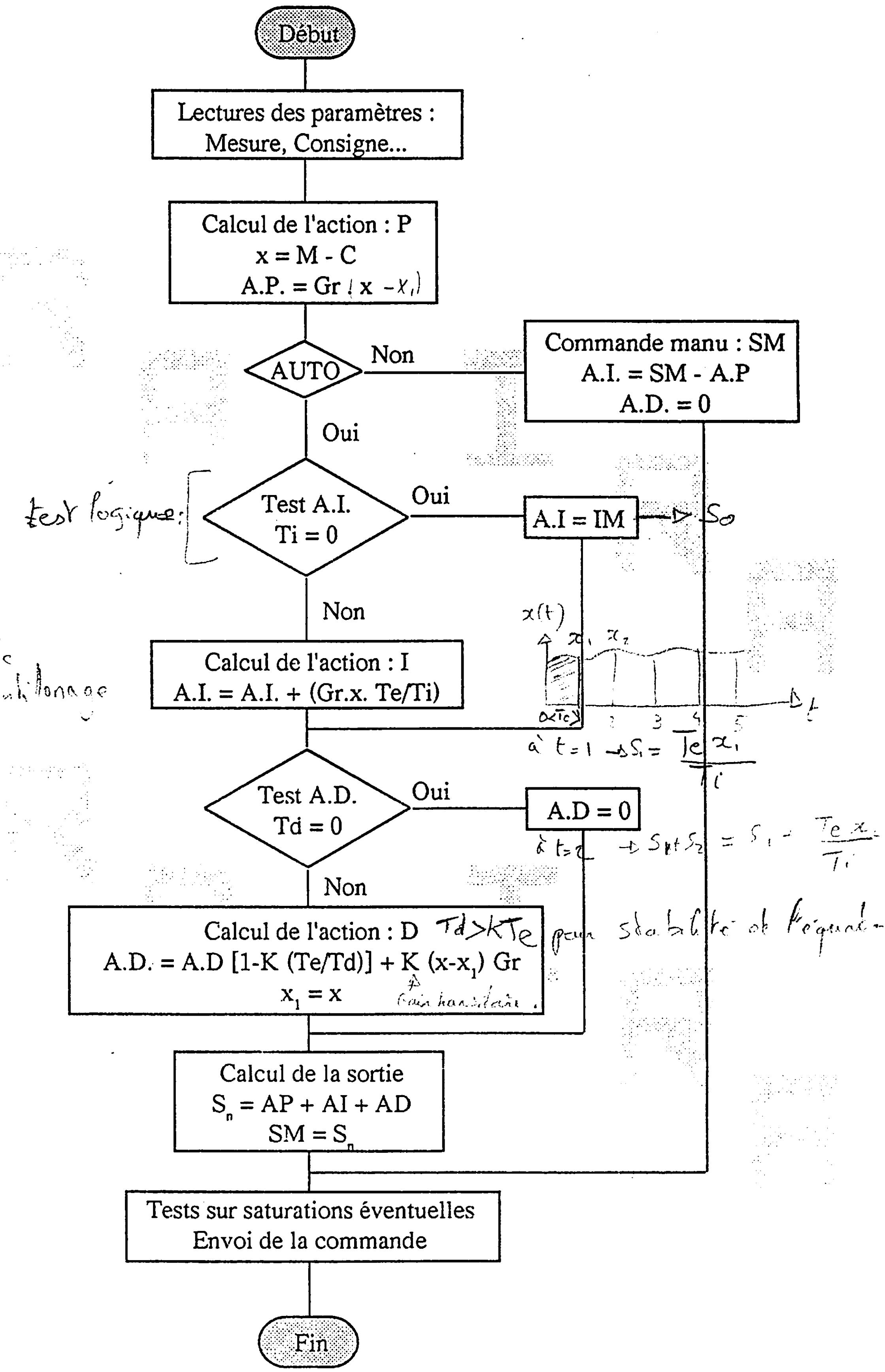
6.8 REGULATEUR AVEC ENTREE BIAS :



→ décalage
Sert à fabriquer la correction de Smith

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

7 - ORGANIGRAMME d'un REGULATEUR NUMERIQUE P.I.D. MIXTE (1)



Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

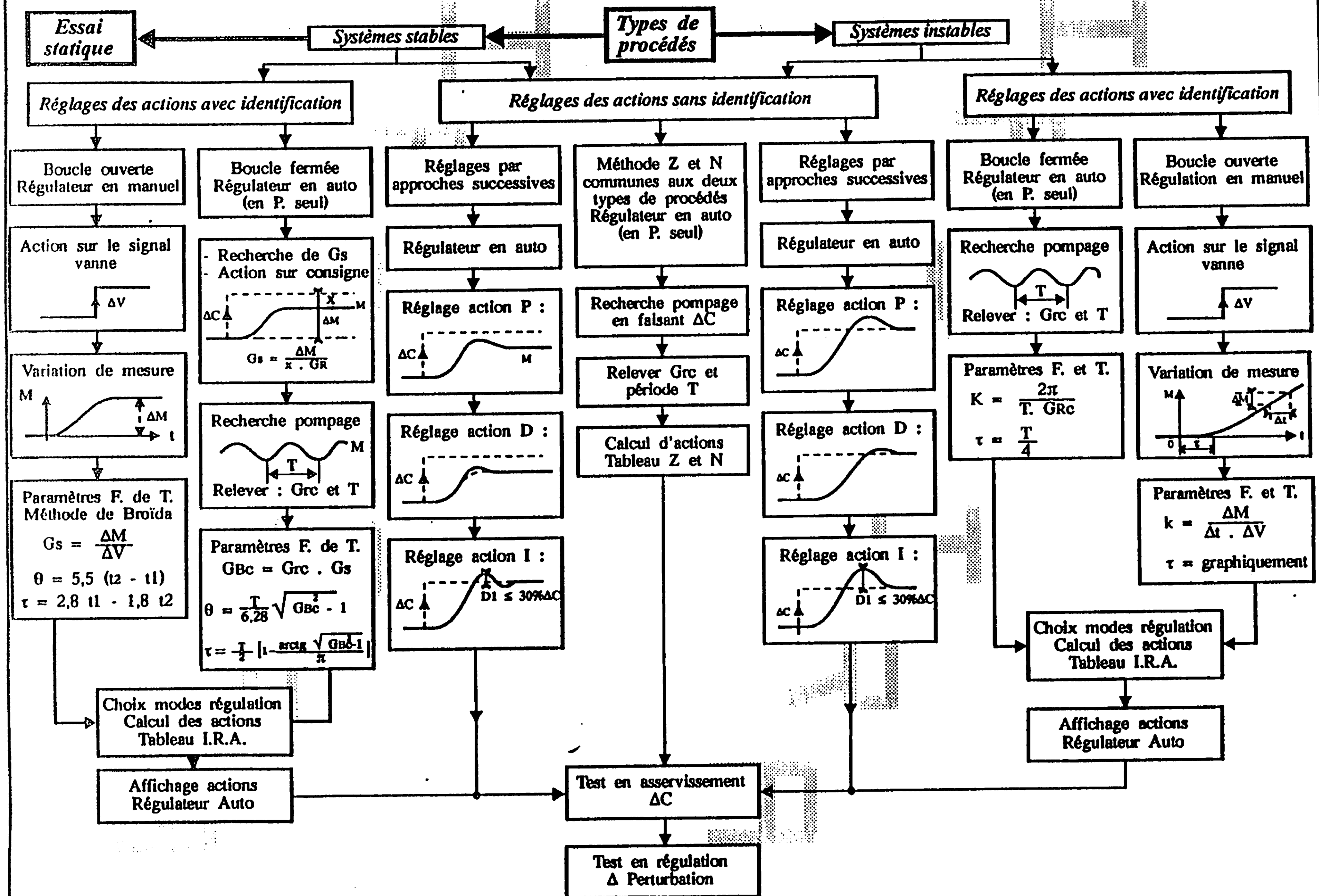
8 - FORMULES DE TRANSFORMATION DE STRUCTURE DES REGULATEURS -

ACTIONS recherchées / connues (Pour convertir un PID en un autre type de PID)	Série	Parallèle	Mixte (1)	Mixte (2)
	$FT_{(p)} = Gr(1+\frac{1}{Ti.p})(1+Td.p)$	$FT_{(p)} = K + \frac{1}{I.p} + D.p$	$FT_{(p)} = K'(1+\frac{1}{Ti'.p} + Td'.p)$	$FT_{(p)} = KP.(1+\frac{1}{TN.p}) + Tv.p$
Série $FT_{(p)} = Gr(1+\frac{1}{Ti.p})(1+Td.p)$	**I.R.A.**	$K = \alpha.Gr = \frac{Ti+Td}{Ti}\,Gr$ $I = \frac{Ti}{Gr}$ $D = Td.Gr$	$K' = \alpha.Gr = \frac{Ti+Td}{Ti}\,Gr$ $Ti' = Ti + Td$ $Td' = \frac{Ti\,.\,Td}{Ti+Td}$	$KP = \alpha.Gr = \frac{Ti+Td}{Ti}\,.\,Gr$ $TN = Ti + Td$ $Tv = Td\,.\,Gr$
Parallèle $FT_{(p)} = K + \frac{1}{I.p} + D.p$	$Gr = \frac{1}{2.I}[K.I + \sqrt{K^2.I^2 - 4.D.I}]$ $Ti = \frac{1}{2}[K.I + \sqrt{K^2.I^2 - 4.D.I}]$ $Td = \frac{1}{2}[K.I + \sqrt{K^2.I^2 - 4.D.I}]$	**I.R.A.**	$K' = K$ $Ti' = K.I$ $Td' = \frac{D}{K}$	$KP = K$ $TN = K.I$ $Tv = D$
Mixte (1) $FT_{(p)} = K'(1+\frac{1}{Ti'.p} + Td'.p)$	$Gr = \frac{K'}{2}[1 + \sqrt{\frac{Ti'^2 - 4.Ti'.Td'}{Ti'}}]$ $Ti = \frac{1}{2}[Ti' + \sqrt{Ti'^2 - 4.Ti'.Td'}]$ $Td = \frac{1}{2}[Ti' + \sqrt{Ti'^2 - 4.Ti'.Td'}]$	$K = K'$ $I = \frac{Ti'}{K'}$ $D = K'.Td'$	**I.R.A.**	$KP = K'$ $TN = Ti'$ $Tv = K'\,.\,Td'$
Mixte (2) $FT_{(p)} = KP.(1+\frac{1}{TN.p}) + Tv.p$	$Gr = \frac{KP}{2}[1 + \sqrt{1 - \frac{4.Tv}{TN.KP}}]$ $Ti = \frac{1}{2}[TN - \sqrt{TN^2 - \frac{4.Tv.TN}{KP}}]$ $Td = \frac{1}{2}[TN - \sqrt{TN^2 - \frac{4.Tv.TN}{KP}}]$	$K = KP$ $I = \frac{TN}{KP}$ $D = Tv$	$K' = KP$ $Ti' = TN$ $Td' = \frac{Tv}{KP}$	**I.R.A.**

Institut de Régulation et d'Automation
Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.03.03.15

N/Réf: RI-REI11

4 TABLEAU RESUME POUR LA MISE AU POINT D'UNE BOUCLE DE REGULATION P.I.D. -

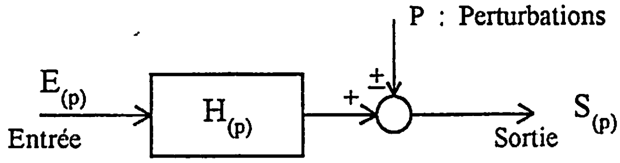


STABILITE ADAPTEE AUX BOUCLES DE REGULATION

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

1 - BOUCLE OUVERTE (B.O.) -

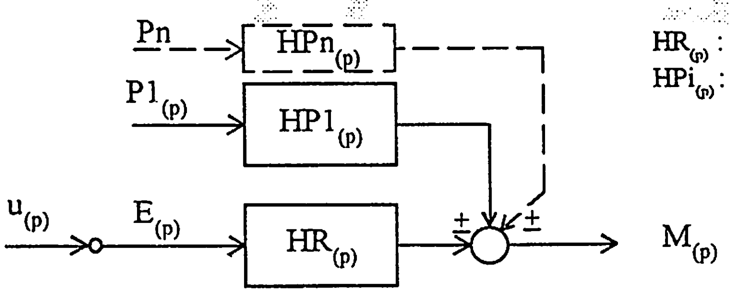
1.1 GENERALITES :



On veut $S_{(p)} = E_{(p)} . H_{(p)}$ mais un tel système est soumis à des grandeurs perturbatrices (P) et on a en réalité :

$$S_{(p)} = E_{(p)} . H_{(p)} \pm P_{(p)}$$

1.2 EXEMPLE D'UN PROCEDE INDUSTRIEL :

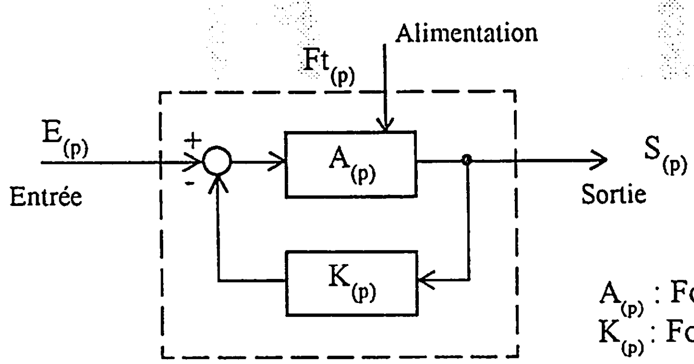


$HR_{(p)}$: Fonction de transfert réglante
$HPi_{(p)}$: Fonctions de transfert perturbatrices

$$M_{(p)} = \pm U_{(p)} . HR_{(p)} \pm P1_{(p)} . HP1_{(p)} \pm \ldots\ldots\ldots \pm Pn_{(p)} \; . \; HPn_{(p)}$$

2 - SYSTEME ASSERVI : BOUCLE FERMEE (B.F) -

2.1 LOI GENERALE DES SYSTEMES ASSERVIS :

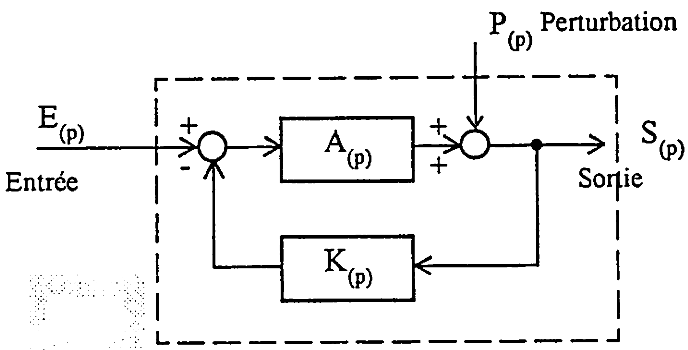


$A_{(p)}$: Fonction de transfert "Aller"
$K_{(p)}$: Fonctions de transfert "Retour"

$$\boxed{Ft_{(p)} = \frac{S_{(p)}}{E_{(p)}} = \frac{A_{(p)}}{1 + A_{(p)} . K_{(p)}}}$$

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

2.2 SYSTEME ASSERVI AVEC PERTURBATION :



On veut que $S_{(p)} = G \cdot E_{(p)}$ avec G : gain

$$S_{(p)} = [E_{(p)} - K_{(p)} \cdot S_{(p)}] A_{(p)} + P_{(p)}$$

$$S_{(p)} = \underbrace{\frac{E_{(p)} \cdot A_{(p)}}{1 + A_{(p)} \cdot K_{(p)}}}_{ⓐ} + \underbrace{\frac{P_{(p)}}{1 + A_{(p)} \cdot K_{(p)}}}_{ⓑ}$$

P est minimisée

Si $A_{(p)}$ est un gain important ⇒ le terme ⓑ devient négligeable et l'expression de la sortie peut s'écrire :

$$S_{(p)} \# \frac{E_{(p)}}{K_{(p)}} \qquad \text{si} \qquad K_{(p)} = \frac{1}{G} \qquad \text{on a donc}$$

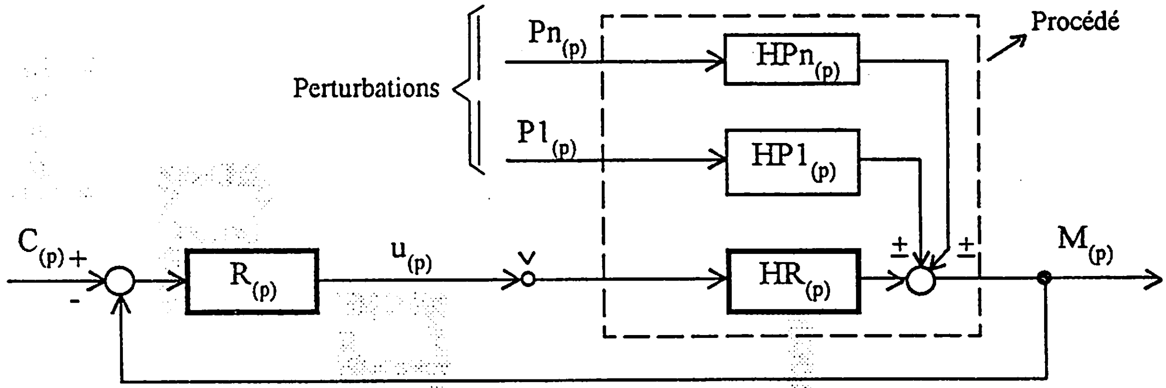
$$\boxed{S_{(p)} \# G \cdot E_{(p)}}$$

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

3 - CAS D'UNE BOUCLE DE REGULATION -

On considèrera une boucle de régulation fermée soumise à l'influence de grandeurs perturbatrices.

3.1 SCHEMA FONCTIONNEL :



3.2 EQUATION DE LA MESURE : $M_{(p)}$

$R_{(p)}$: Fonction de transfert du correcteur
$HR_{(p)}$: Fonction de transfert réglante du procédé
$HPi_{(p)}$: Fonctions de transfert perturbatrices du procédé

$$\boxed{M_{(p)} = C_{(p)} \underbrace{\frac{R_{(p)} \cdot HR_{(p)}}{1 + R_{(p)} \cdot HR_{(p)}}}_{\text{Terme d'asservissement}} \underbrace{\pm \; P1_{(p)} \frac{HP1_{(p)}}{1 + R_{(p)} \cdot HR_{(p)}} \pm \dots \pm \; Pn_{(p)} \frac{HPn_{(p)}}{1 + R_{(p)} \cdot HR_{(p)}}}_{\text{Terme de régulation}}}$$

Remarque :

- L'équation comprend deux termes :
** un terme d'asservissement dont la variable d'entrée est la consigne $C_{(p)}$*
** un terme de régulation dont les variables d'entrée sont les perturbations $Pi_{(p)}$*
- L'équation ci-dessus est importante car elle nous permet d'étudier les problèmes de STABILITE qui se posent aux systèmes bouclés.
- Les deux termes ont le même dénominateur $D_{(p)} = 1 + R_{(p)} \cdot HR_{(p)}$ appelé EQUATION CARACTERISTIQUE

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

4 - CONDITION DE STABILITE -

Quand on a une fonction $F_{(p)} = \frac{N_{(p)}}{D_{(p)}}$, si on veut trouver l'expression temporelle, il faut calculer la transformée inverse de $F_{(p)}$

$$h_{(t)} = \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{N_{(p)}}{D_{(p)}}\right] = K1 \cdot e^{R1.t} + K2 \cdot e^{R2.t} + \ldots\ldots + Kn \cdot e^{Rn.t} + \ldots\ldots$$

$$+ \underbrace{2.e^{a1.t}\ [\alpha_1 \cdot \cos\omega t - \beta_1 \sin\ \omega t]}_{P1} + \ \ldots\ + \underbrace{2e^{an.t}\ [\alpha_n \cdot \cos\omega t - \beta_n \sin\ \omega t]}_{Pn}$$

avec $R_1, R_2, \ldots R_n$: pôles réels
$P_1, P_2, \ldots P_n$: pôles complexes

} Pôles = racines de $D_{(p)}$

D'où le théorème fondamental de la stabilité :

Une fonction de transfert $F_{(p)}$ est STABLE si tous les pôles de cette fonction ont leur partie réelle négative.

* Soit $F_{(p)}$ est connue et on devra observer que le ou les pôles ont leur partie réelle négative (Cas d'une chaîne ouverte).

* Soit $F_{(p)}$ devra être modifiée par un élément correcteur (régulateur) de telle sorte que le ou les pôles de la fonction de transfert globale deviennent à partie réelle négative (Cas d'une boucle de régulation).

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

5 - METHODE DE DETERMINATION DE LA STABILITE -

5.1 METHODE DIRECTE : Recherche des racines de $D_{(p)}$

- Conditions : * Connaître l'équation caractéristique $D_{(p)} = 1 + R_{(p)} \cdot HR_{(p)}$ et résoudre cette équation $D_{(p)} = 0$
  * Déterminer les conditions à remplir pour que toutes les racines soient à partie réelle négative.

5.2 CRITERE GEOMETRIQUE : Critère du revers

- Conditions : * Connaître l'équation caractéristique $D_{(p)} = 1 + R_{(p)} \cdot HR_{(p)}$,si on pose $A_{(p)} = R_{(p)} \cdot HR_{(p)}$,
  on a à résoudre $A_{(p)} = -1$

fonction aller

fonction Retour

- Etude du lieu de Nyquist de $A_{(p)}$ quand :

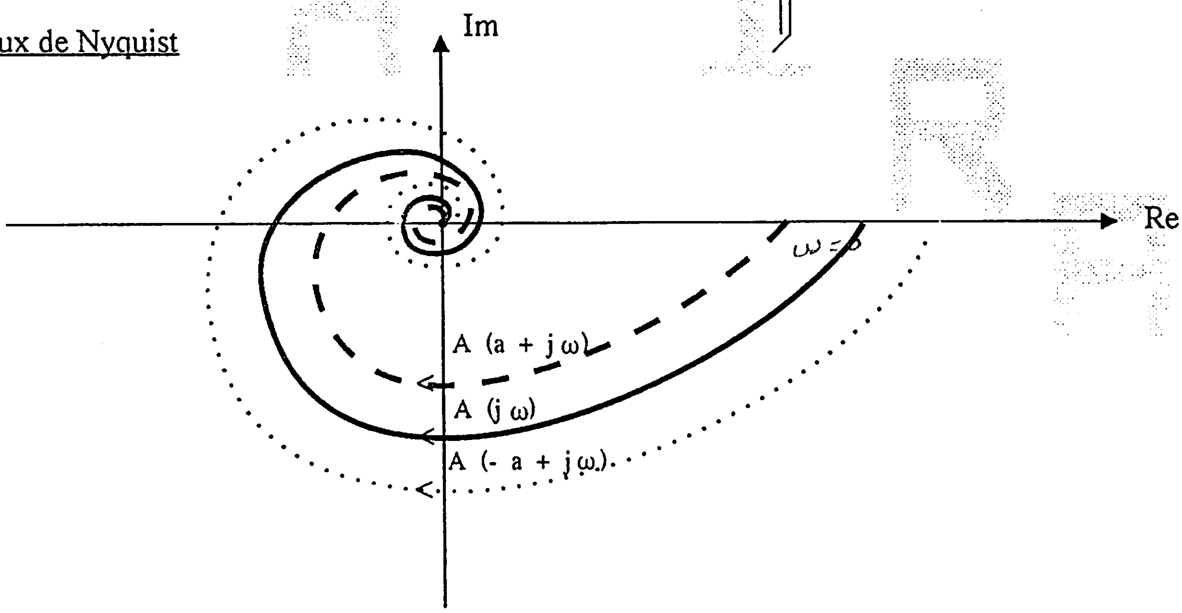
① $p = j\omega$ — Module : $|A(j\omega)|$; Argument : $\angle A(j\omega)$

② $p = -a + j\omega$ — Module : $|A(-a + j\omega)|$; Argument : $\angle A(-a + j\omega)$

③ $p = a + j\omega$ — Module : $|A(a + j\omega)|$; Argument : $\angle A(a + j\omega)$

Si on fait varier ω $[0, +\infty[$, on obtient les différents lieux ci-dessous

Lieux de Nyquist



Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

En observant comment se modifie ces lieux en fonction de p, on en déduit le critère du revers.

Règle du revers :

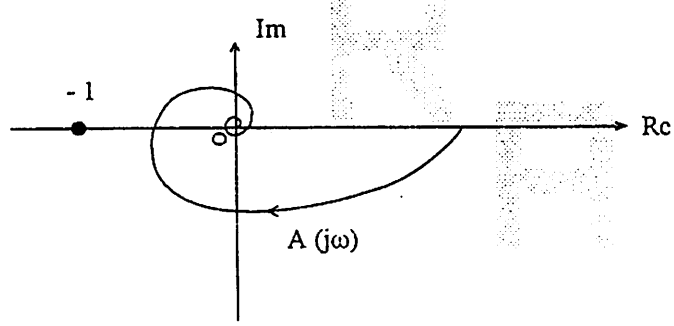
Un système asservi linéaire est STABLE si, en décrivant le lieu de transfert (lieu de Nyquist) dans le sens des fréquences croissantes, le point critique - 1 se situe à gauche de ce lieu de transfert.

<u>Remarque</u> :

Il n'est pas nécessaire de rechercher les racines de l'équation caractéristique. Il suffit de remplacer p par jω dans $A_{(p)}$, de calculer le module (| A (jω) |) et l'argument ($\angle A(j\omega)$) puis faire varier ω [o, + ∞ [puis tracer le lieu de Nyquist de $A_{(p)}$.

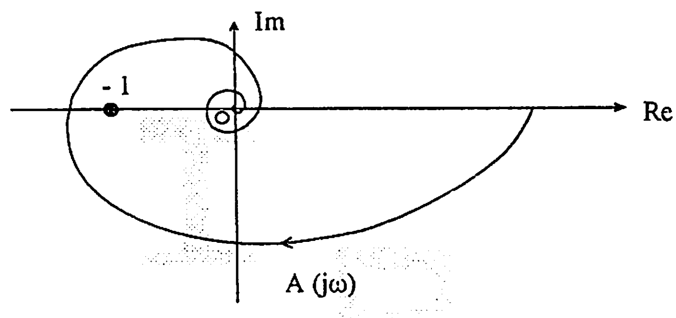
<u>1er cas</u> : Le lieu de Nyquist passe à droite du point - 1

SYSTEME STABLE



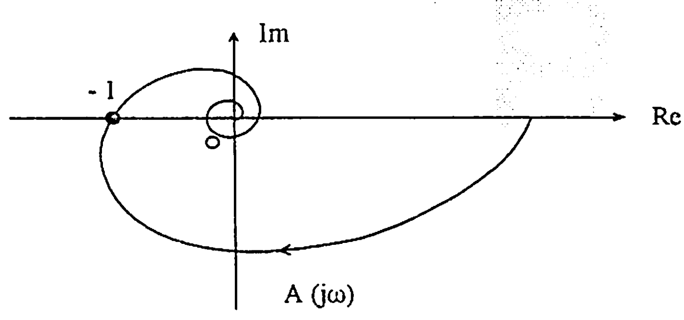
<u>2ème cas</u> : Le lieu de Nyquist passe à gauche du point - 1

SYSTEME INSTABLE



<u>3ème cas</u> : Le lieu de Nyquist passe par le point - 1

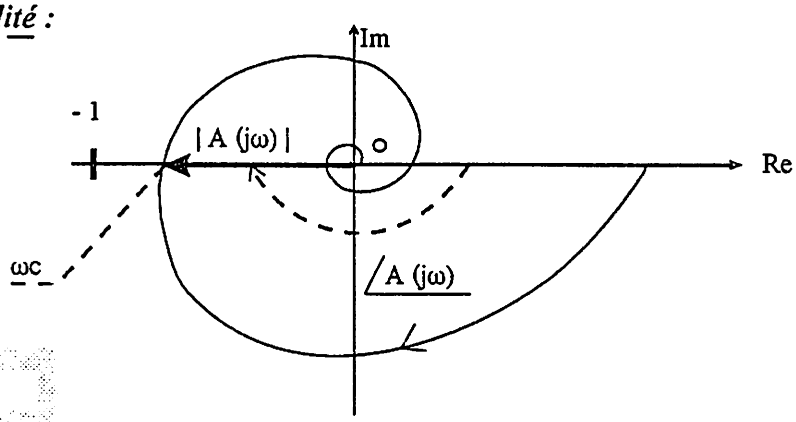
SYSTEME INSTABLE
POMPAGE REGULIER



INSTITUT DE REGULATION ET AUTOMATION

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

- ***Conditions de stabilité :***



Module : $|A(j\omega c)| < 1$

Argument : $\angle A(j\omega c) = -\pi$

SYSTEME STABLE

Nota . ωc : Pulsation critique qui crée un déphasage de - π

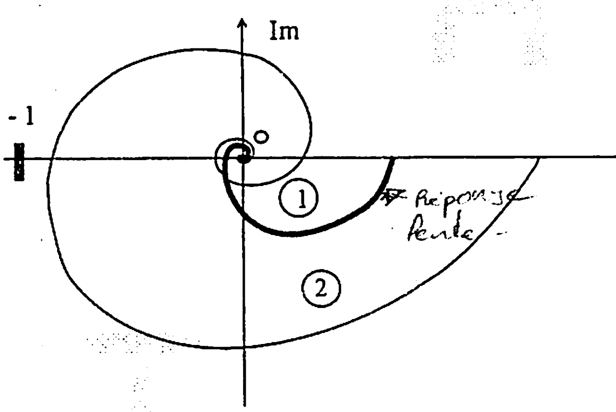
6 - MARGE DE STABILITE -

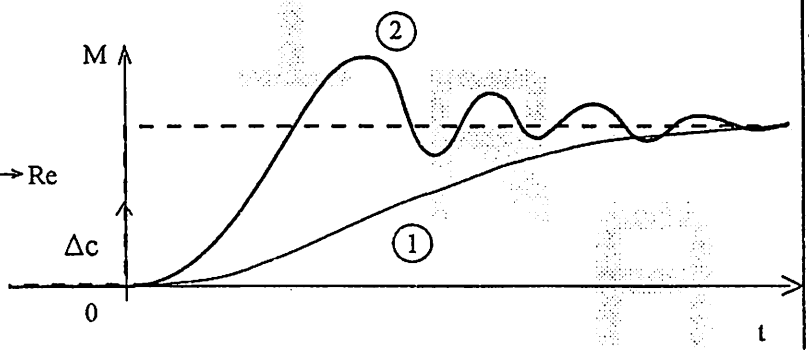
La fonction de transfert $HR_{(p)}$ du procédé risque d'évoluer suite à un changement de point de fonctionnement (modification du point de consigne) ou à une modification d'une grandeur perturbatrice.

$$A_{(p)} = R_{(p)} . HR_{(p)}$$

On peut donc avec $R_{(p)}$ restant constant, passer d'une "bonne stabilité" à une "stabilité médiocre" voire même à l'instabilité. De ce fait, il convient de se prémunir par des marges de stabilité :

- Marge de gain.
- Marge de phase.

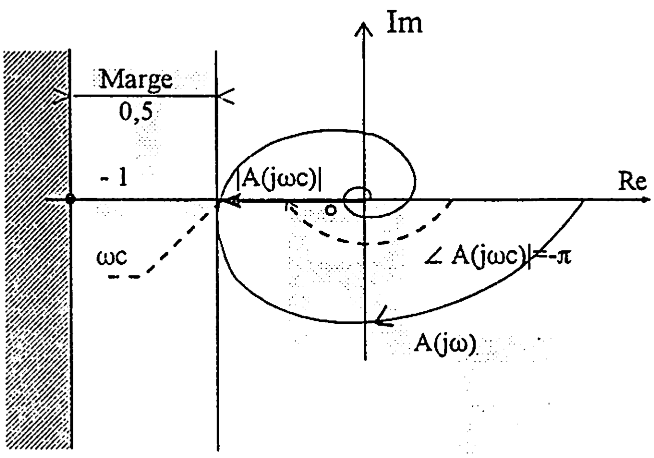




6.1 MARGE DE GAIN :

La marge de gain mG est définie comme étant le gain supplémentaire pour obtenir l'instabilité.

Exemple : mG = 2 signifie que l'on peut multiplier le gain par 2 avant d'obtenir l'instabilité.

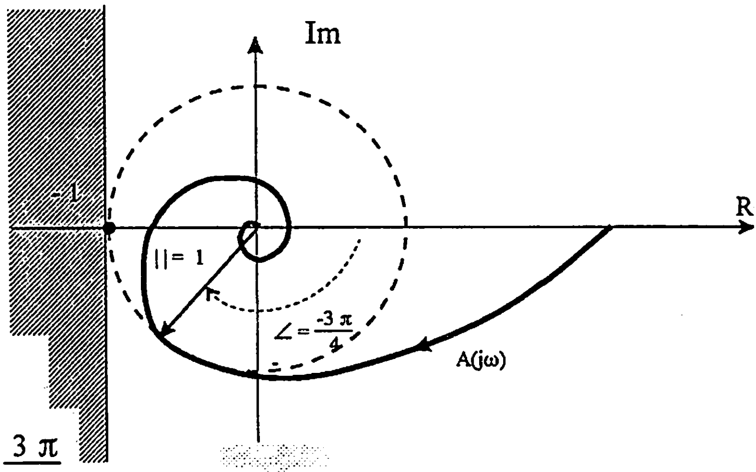


On s'impose à ce que le module de $A(j\omega_c) = 0,5$ pour un argument de $-\pi$.

$$\left.\begin{aligned} |A(j\omega c)| &= 0,5 \\ \angle A(j\omega c) &= -\pi \end{aligned}\right\}$$

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

6.2 MARGE DE PHASE :



La marge de phase mφ est définie comme étant la phase supplémentaire qui amène aux oscillations entretenues.

On simpose à ce que :

le module de $A(j\omega_c) = 1$ pour un argument $= -\frac{3\pi}{4}$

$$\left\{ \begin{array}{l} |A(j\omega_c)| = 1 \\ \angle A(j\omega_c) = -\frac{3\pi}{4} \end{array} \right.$$

FOSTER WHEELER CONCEPTION ETUDES ENTRETIEN

Ref. N°

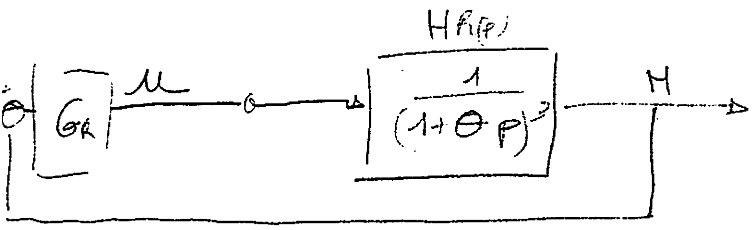
Date Page

Subject

Prepared by

Customer Location

Checked by



$G_R = ?$ $\qquad A(p) = R(p)\, H_R(p) = \dfrac{G_R}{(1+\theta p)^3}$

On remplace p par $j\omega$.

$A(j\omega) = \dfrac{G_R}{(1+j\omega\theta)^3}$ $\qquad$ Module $|A(j\omega)| = \dfrac{G_R}{\left(\sqrt{1+\omega^2\theta^2}\right)^3}$

$\leq 0{,}5$

$\underline{/A(j\omega)} = -3 \operatorname{Arctg} \omega\theta = -\pi$

$\hookrightarrow \omega\theta = \sqrt{3}$

$G_R \leq 0{,}5 \left(\sqrt{1+(\sqrt{3})^2}\right)^3$ $\qquad G_R \leq 4$

Si $G_R = 8 \Rightarrow$ pompage.

Si $G_R > 8 \Rightarrow$ pompage divergent

REGLAGE EXPERIMENTAL DES ACTIONS P, I, et D

Page

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

1 - METHODES DE REGLAGE DES ACTIONS -

Il existe différentes méthodes de réglage des actions d'un régulateur P.I.D. Suivant le type de procédé et les contraintes de fabrication, on choisira l'une des méthodes exposées dans le cadre de ce stage.

Méthode par approches successives : Pour procédés à faible inertie

Cette méthode consiste à régler les paramètres du régulateur par approches successives. On règle l'action proportionnelle puis l'action dérivée et l'intégrale. Cette technique présente l'intérêt d'être simple et utilisable sur n'importe quel type de système. Néanmoins du fait de son caractère itératif, son application devient longue sur des procédés à grande inertie.

Méthode de Ziegler et Nichols :

Cette méthode permet de calculer les actions du régulateur, sans la détermination des paramètres du procédé. Pour son application, on doit connaître uniquement la structure du régulateur que l'on utilise. Cette technique est utilisable sur n'importe quel type de procédé, à condition d'être dans le domaine des performances inhérent au P.I.D.

Méthode nécessitant l'identication du procédé : Permet de choisir le mode de régulation

Si l'on connait les paramètres du procédé, suite à une modélisation de sa fonction de transfert réglante et si l'on est en possession de la structure du régulateur, il est alors possible de calculer rapidement les paramètres de réglage qu'on pourra affiner suite à des essais, afin d'obtenir la réponse souhaitée.

Le calcul des actions ne sert qu'à dégrossir les réglages du régulateur. Si le point de fonctionnement évolue dans de grandes proportions, le réglage de ces actions devra être éventuellement modifié.

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

2 - REGLAGE PAR APPROCHES SUCCESSIVES SUR PROCEDES STABLES -

2.1 REGLAGE DE L'ACTION PROPORTIONNELLE :

Souvent utilisée mais de façon anarchique

a) Mode opératoire :

- Stabiliser la mesure au point de fonctionnement.

- Mettre le régulateur en P seul (Ti = max ou n = 0 et Td = 0).

- Afficher un gain Gr faible (Gr < 1). Si on a pu déterminer le gain statique Gs du procédé lors d'un essai en manuel, afficher pour un premier essai Gr << 1/Gs ou BP% >> 100 . Gs.

- Egaler la consigne à la mesure (C = M), passer le régulateur en automatique.

- Effectuer un échelon de consigne de 5 à 10 %. ⚠ La réponse est différente si $\Delta C = +10\%$ ou si $\Delta C = -10$

- Observer l'enregistrement de l'évolution du signal de mesure. => optimiser sur les 2 essais.

  - Si elle est suramortie (apériodique), augmenter le gain Gr ou diminuer la BP%
  - Si elle présente plus de deux oscillations, diminuer le gain Gr ou augmenter la BP%

La manipulation consiste à rechercher par approches successives, la valeur du gain Gr (ou de la BP%) qui donne la réponse la plus rapide avec un amortissement par période ~~minimal~~ = 0

$D_2 = 0$

Remarque :

Si le procédé a le même comportement pour un échelon positif et négatif, on peut utiliser le retour aux conditions initiales pour tester une nouvelle valeur de l'action proportionnelle.

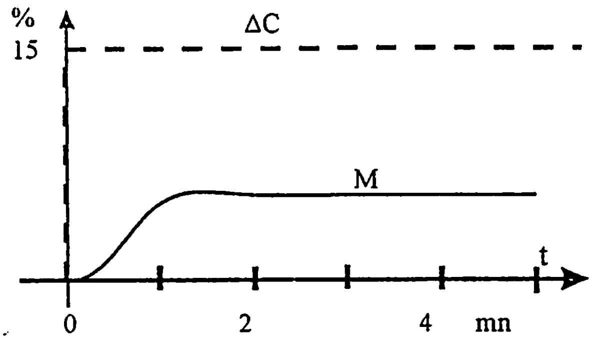
Sinon, on essaiera de trouver une valeur de l'action proportionnelle correspondant à un compromis acceptable entre les deux comportements.

Sinon se mettre dans le cas le plus défavorable (réponse la plus lente)

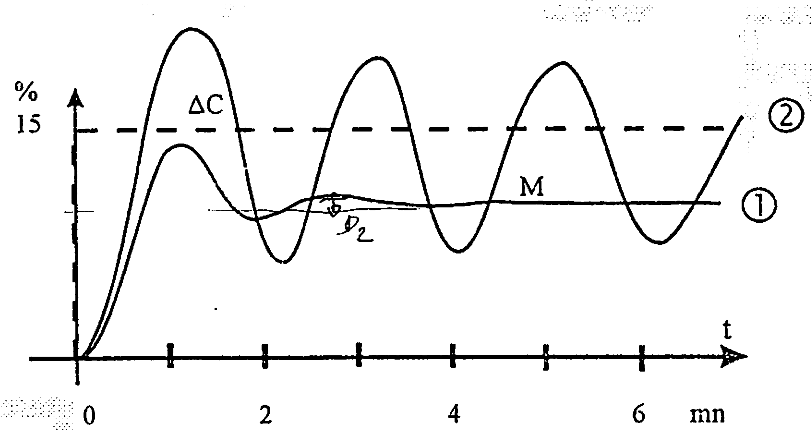
Il y a des régulateurs autoadaptatifs
— mais Pb s'il y a des perturbations pdt l'adaptation

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

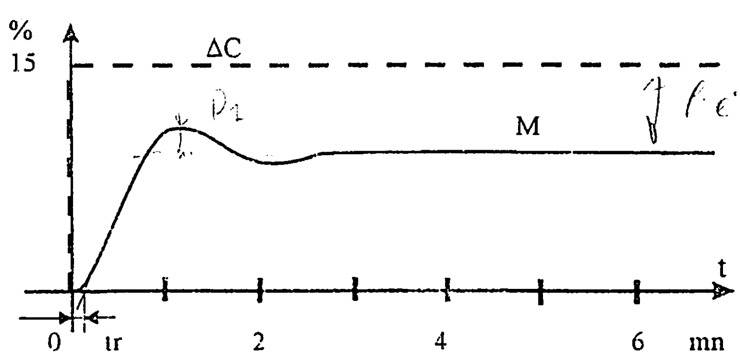
- Action proportionnelle trop faible : Augmenter Gr ou diminuer BP%.



- Action proportionnelle trop forte. Diminuer Gr ou augmenter BP%.



- Action proportionnelle correcte



↑ l'écart diminue avec le gain mais stabilité ↘

b) Rôle de l'action proportionnelle :

Le rôle de l'action proportionnelle est d'accélérer la réponse du procédé

Avec une simple action proportionnelle sur un procédé stable :

- La mesure ne rejoint pas la consigne
- L'écart diminue avec le gain (si Gr↗ ⇒ x↓) mais la stabilité se dégrade
- La réponse s'accélère en augmentant le gain
- Il faut trouver un compromis entre rapidité et stabilité.

2.2 REGLAGE DE L'ACTION DERIVEE :

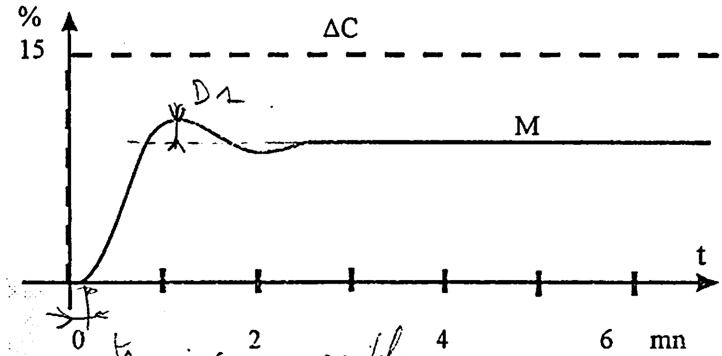
a) Mode opératoire :

- L'action dérivée ne se justifie que si la mesure a un certain retard (tr ou τ) Comme lors de l'essai en proportion
- Conserver la valeur de l'action proportionnelle déterminée lors de l'essai précédent.
- Afficher une action dérivée faible (Td égale à quelques secondes) Td Accélère la réponse et ↗ l'amortissement.
  - Pour un premier essai, afficher Td = tr/3 ou Td = τ/3
- Egaler la consigne à la mesure (C = M), passer le régulateur en automatique
- Effectuer un échelon de consigne de 5 à 10 %
- Si la réponse ne s'amortie pas, augmenter Td
- Si la réponse est oscillante ou si elle est plus lente, diminuer Td

Une action dérivée correctement dosée conduit à une stabilisation au bout d'un temps plus court qu'avec l'action proportionnelle seule.

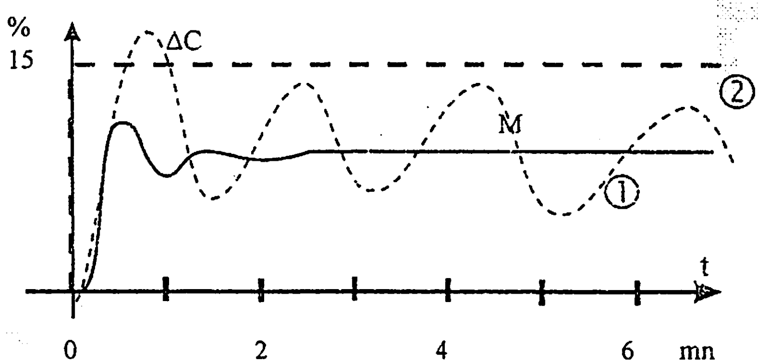
Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

- Action dérivée trop faible, augmenter Td. Si ↑Td

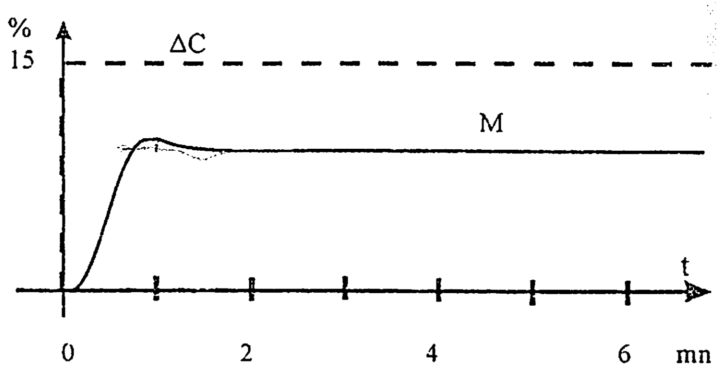


tr incompressible !

- Action dérivée trop forte, diminuer Td.



- Action dérivée correcte D1 minimisé



Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

b) ***Rôle de l'action dérivée*** *:*

Le rôle de l'action dérivée est de compenser les effets du temps mort du procédé

- L'action dérivée a un effet anticipatif.

- L'action dérivée stabilise la réponse du procédé

- La répon~~e~~ s'accélère en augmentant l'action dérivée

- Il faut trouver un compromis entre rapidité et stabilité.

2.3 REGLAGE DE L'ACTION INTEGRALE :

a) Mode opératoire :

- Conserver les valeurs des actions proportionnelle et dérivée déterminées aux essais précédents

- Afficher une action intégrale faible (Ti est proportionnel au temps de réponse du procédé)

- Pour un premier essai, afficher : Ti $= \frac{tE - tr}{2}$ ou Ti = θ

- Egaler la consigne à la mesure (C = M), passer le régulateur en automatique

- Effectuer un échelon de consigne de 5 à 10 %

- Si la réponse est suramortie ou trop lente, diminuer Ti (action intégrale trop faible)

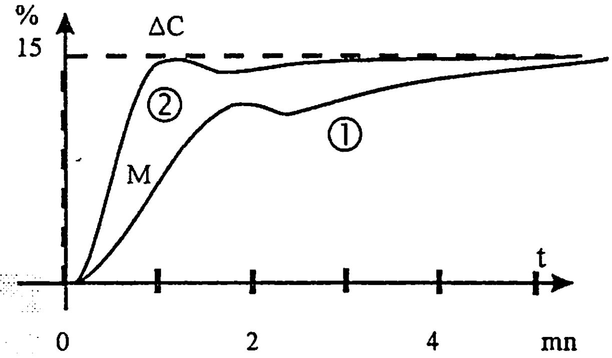
- Si la réponse présente un dépassement trop important, on augmente Ti (action intégrale trop forte)

Choisir une valeur de Ti donnant une réponse la plus rapide avec un dépassement D1 compris entre 10 % de ΔM au minimum et 30 % de ΔM au maximum.

D1 de 10 à 15 % de ΔM

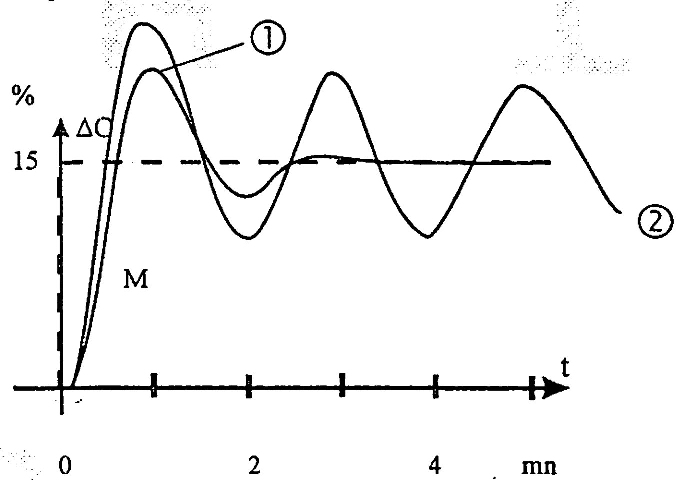
Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

- Action intégrale trop faible, diminuer Ti.



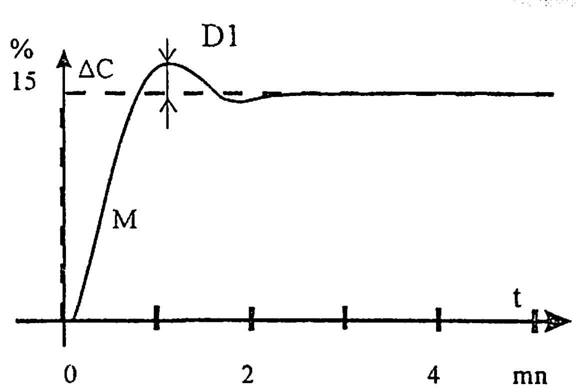
Ti ① > Ti ②

- Action intégrale trop forte, augmenter Ti.



Ti ① > Ti ②

- Action intégrale correcte



Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

b) <u>Rôle de l'action intégrale</u> :

Le rôle de l'action intégrale est d'annuler l'écart mesure consigne.

- L'action intégrale donne la précision statique (M = C)
- La mesure rejoint la consigne sur un test en asservissement (ΔC) ou sur un test en régulation (ΔP)
- La réponse s'accélère en augmentant l'action intégrale (diminuer Ti)
- Il faut trouver un compromis entre rapidité et stabilité.

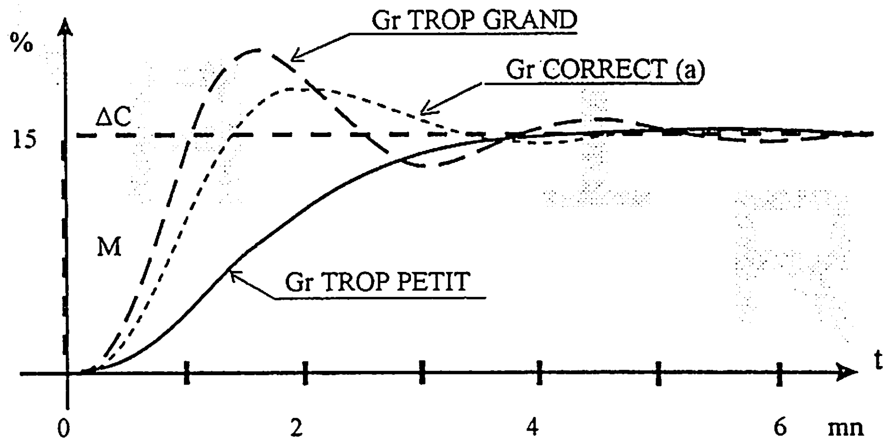
Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

3 - REGLAGE PAR APPROCHES SUCCESSIVES SUR PROCEDES INSTABLES -

La procédure et les critères de performances sont identiques à ceux des procédés stables. On se limite pour chaque action à fixer des valeurs initiales en suivant la même procédure exposée pour les systèmes stables.

3.1 REGLAGE DE L'ACTION PROPORTIONNELLE :

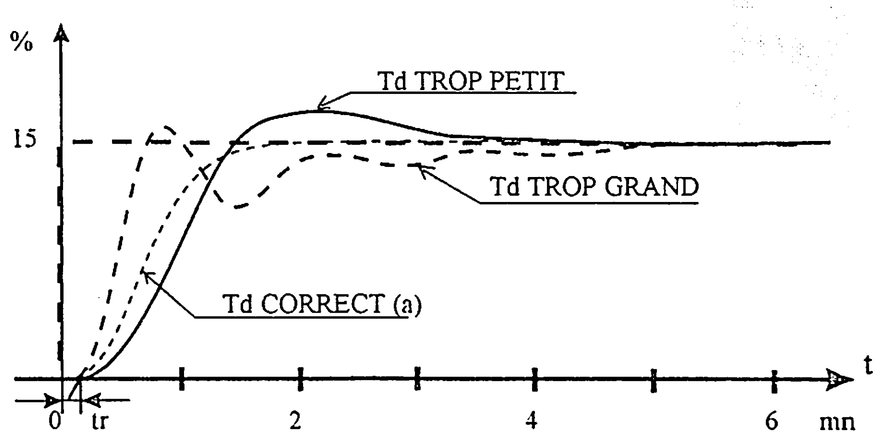
- Pour un premier essai, afficher : $Gr << \frac{1}{k\tau}$ ou $Gr << \frac{1}{ktr}$ ou bien BP% >> 100 k.τ ou BP% >> 100 k.tr



- La mesure rejoint la consigne sur un test en asservissement (ΔC).
- La mesure ne rejoint pas la consigne sur un test en régulation (Δ Perturbations)

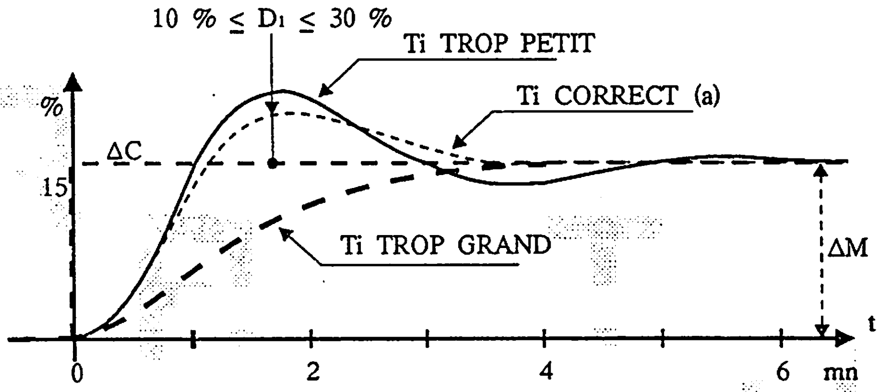
3.2 REGLAGE DE L'ACTION DERIVEE :

- Pour un premier essai, afficher : Td = tr/3 ou Td = τ/3



3.3 REGLAGE DE L'ACTION INTEGRALE :

- Pour un premier essai, afficher : Ti > 5.tr ou Ti > 5τ



Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

Réponses excessives et nerveuses

fonctionne bien pour : $\frac{\theta}{\tau} > 3$ / Stable pas modifié

$\frac{1}{\theta \tau} > 3$ / Instable pas modifié

4 - METHODE DE ZIEGLER ET NICHOLS - (1942) bien pour

Bon pour valeurs initiales mais pas plus.

4.1 MODE OPERATOIRE : Au point de fonctionnement.

C'est une méthode expérimentale qui permet de régler les actions d'un régulateur à partir de la mise en "pompage régulier" de la mesure.

- Mettre le régulateur en action proportionnelle (Ti = maxi ou n = 0 et Td = 0)

- Passer le régulateur en automatique

  · pour rester dans la linéarité du sys (en Gs et en τ et (Te)
  · pour rester discret

- Augmenter l'action proportionnelle en faisant de petits échelons de consigne jusqu'à l'obtention du pompage régulier de la mesure

  $\Delta C \le 0,1\, BP$ affichée ou $\Delta C < \frac{10}{Gr \text{ affiché}}$

- Relever la période des oscillations T et le gain critique du régulateur Grc.

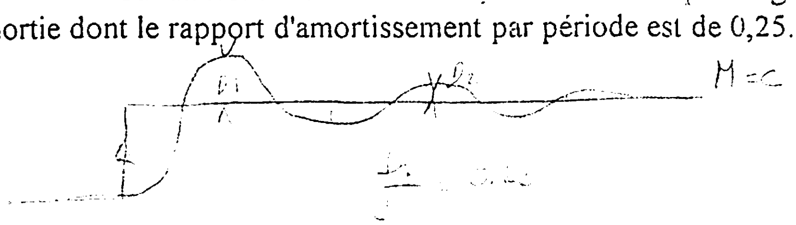
- Calculer les actions du régulateur à l'aide du tableau suivant.

4.2 CALCUL DES ACTIONS :

REGUL. / ACTIONS	P	P.I. Série	P.I. Parallèle	P.I.D. Série	P.I.D. Parallèle	P.I.D. Mixte (1)	P.I.D. Mixte (2)
Gr	$\frac{Grc}{2}$	$\frac{Grc}{2,2}$	$\frac{Grc}{2,2}$	$\frac{Grc}{3,3}$	$\frac{Grc}{1,7}$	$\frac{Grc}{1,7}$	$\frac{Grc}{1,7}$
Ti	Maxi	$\frac{T}{1,2}$	$\frac{2.T}{Grc}$	$\frac{T}{4}$	$\frac{0.85.T}{Grc}$	$\frac{T}{2}$	$\frac{T}{2}$
Td	0	0	0	$\frac{T}{4}$	$\frac{Grc.T}{13,3}$	$\frac{T}{8}$	$\frac{Grc.T}{13,3}$

4.3 CRITERE CHOISI :

Sur un test en asservissement, le critère choisi par Ziegler et Nichols est une réponse oscillante amortie dont le rapport d'amortissement par période est de 0,25.



IDENTIFICATION DES PROCEDES INDUSTRIELS

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

1 - INTRODUCTION -

La fonction de transfert réelle d'un procédé industriel est pratiquement impossible à déterminer.

On utilise des méthodes d'identification qui permettent de trouver un modèle de comportement traduisant le plus fidèlement le procédé autour d'un point de fonctionnement.

Les paramètres du modèle servent :

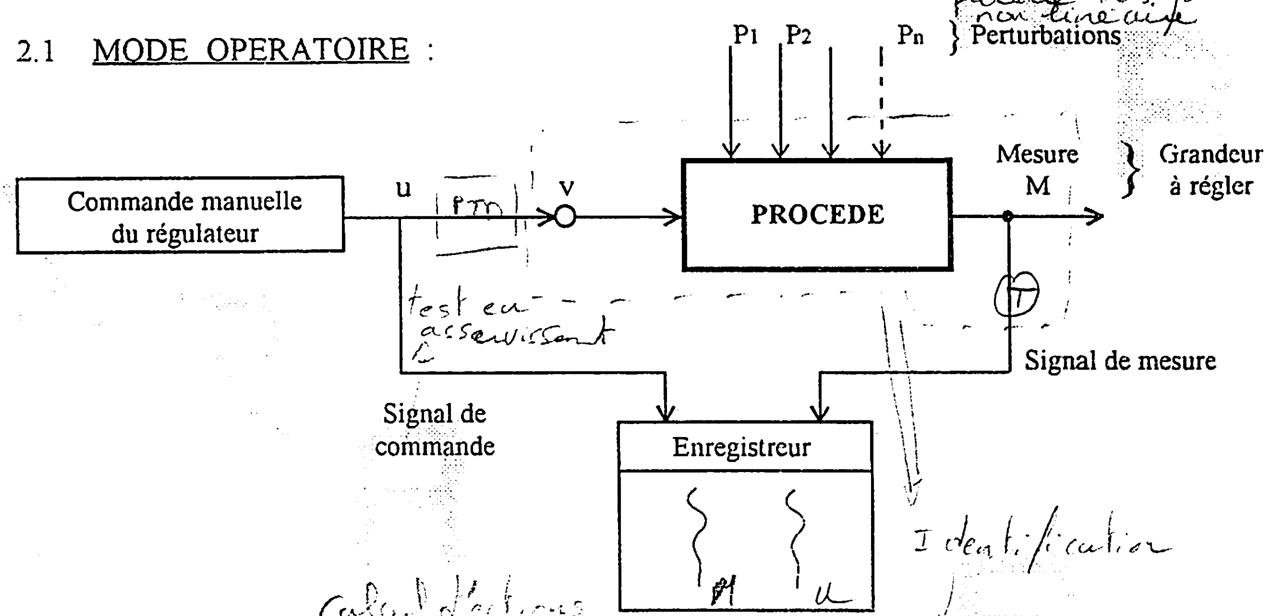
- au réglage des actions P.I.D. dans une boucle de régulation,
- au choix des modes de régulation,
- à la régulation par correcteur à modèle interne.

---

2 - METHODE D'IDENTIFICATION EN BOUCLE OUVERTE -

Pas possible si procédé très fortement non linéaire

2.1 MODE OPERATOIRE :



Calcul d'actions

Identification

Paramètres

choix des modes de régulation

En B.O => régulateur en BO

En B.F => " " en Auto

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

- Stabiliser la mesure $M_{(t)}$ au point de fonctionnement choisi ou aux conditions moyennes. Le système pouvant présenter des non-linéarités (voir courbes d'essais statiques), il est important d'analyser au point de fonctionnement futur.

- Régulateur en manuel ⇒ boucle ouverte.

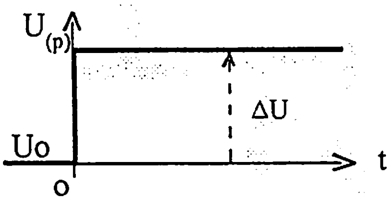
- Faire un échelon ΔU à l'aide de la commande manuelle sur le signal de vanne. Cet échelon doit être suffisamment grand afin d'obtenir une réponse sur l'enregistrement de la mesure exploitable et suffisamment faible afin de ne pas ~~pas~~ dépasser les limites de linéarité du procédé.

- Exploitation graphique de l'enregistrement du signal de mesure $M_{(t)}$.

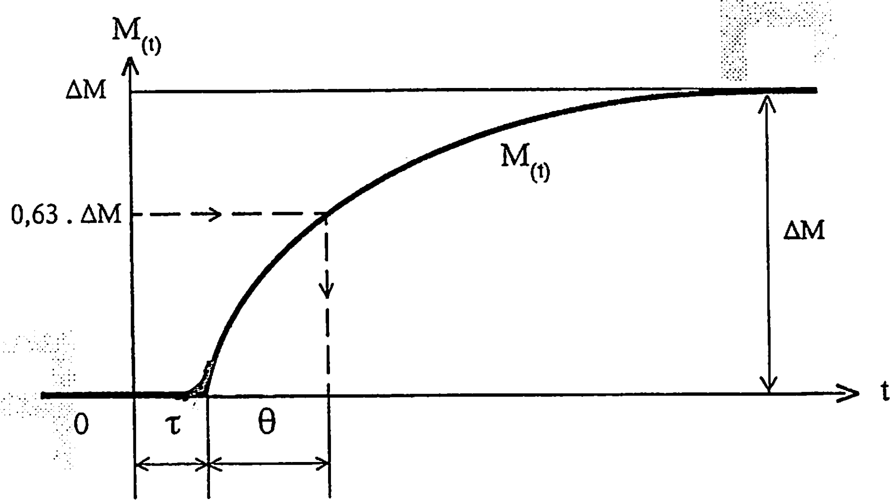
2.2 PROCEDES NATURELLEMENT STABLES : **Types de réponses :**

a) Procédé à dominante du premier ordre avec retard :

La fonction de transfert : $HR_{(p)} \# \dfrac{Gs \cdot e^{-\tau \cdot p}}{1 + \theta \cdot p}$



Echelon sur la commande de la vanne



Réponse de la mesure

Gain statique : $\boxed{Gs = \dfrac{\Delta M \,\%}{\Delta U \,\%}}$

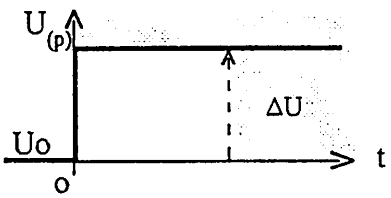
La constante de temps θ
Le retard τ
} Relevés graphiquement

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

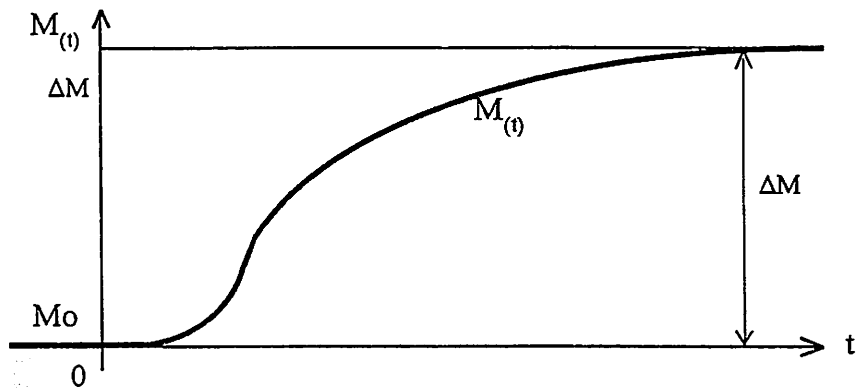
b) Procédé du nième ordre avec retard :

On obtient des courbes en forme de S pour l'enregistrement du signal mesure.

La fonction de transfert : $Ft_{(p)} = \dfrac{Gs\ e^{-\tau r.p}}{(1+\theta 1.p)\,(1+\theta 2.p)\,.....\,(\theta n.p+1)}$ } PROCEDE



Echelon sur la commande de la vanne



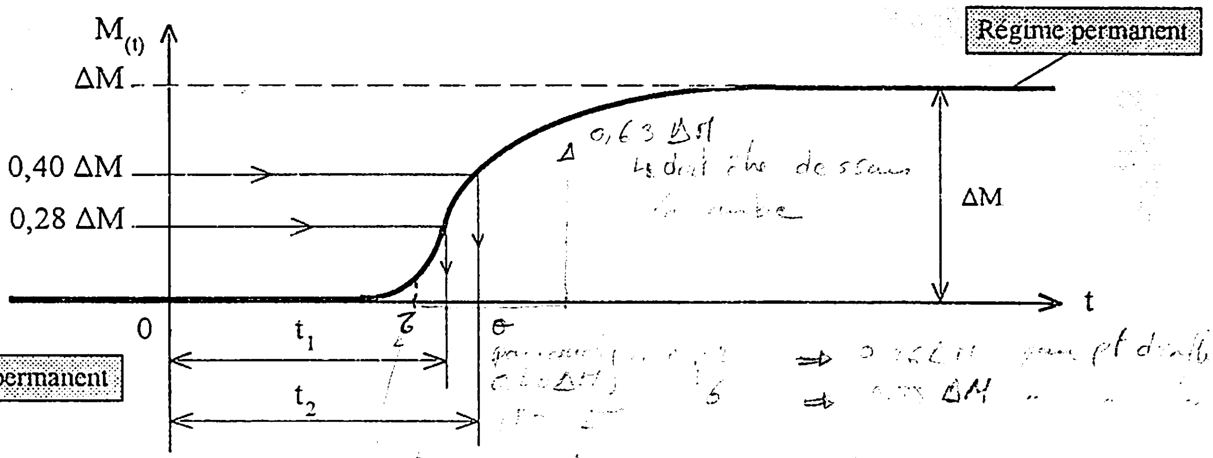
Autres méthodes | - STRECH - DAVOUST - équation -

Méthode de BROIDA Rapide mais manque de précision -

$$HR_{(p)} = \underbrace{\frac{Gs\ e^{-\tau r.p}}{(1+\theta 1.p)\,(1+\theta 2.p)\,.....\,(\theta n.p+1)}}_{\text{Procédé}} \quad \# \quad \underbrace{\frac{Gs\ e^{-\tau.p}}{(1+\theta.p)}}_{\text{Modèle}}$$

Recherche des paramètres du modèle.

Allure générale du signal de mesure



Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

Calcul des paramètres du modèle :

- Constante de temps : $\boxed{\theta = 5{,}5\,(t_2 - t_1)}$

- Temps mort : $\boxed{\tau = 2{,}8\,t_1 - 1{,}8\,t_2}$

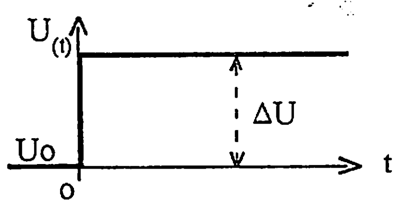
- Gain statique : $\boxed{Gs = \dfrac{\Delta M}{\Delta U}}$

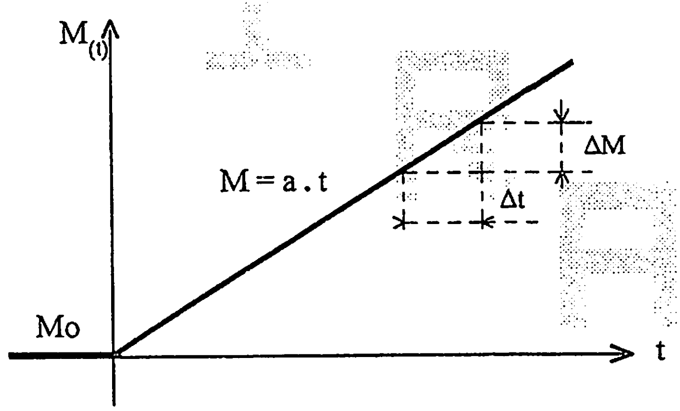
2.3 PROCEDES NATURELLEMENT INSTABLES : TYPES DE REPONSES :

A manipuler avec précaution -

a) *Procédé intégrateur pur :* Très rare -

La fonction de transfert : $HR_{(p)} = \dfrac{k}{p}$





$M = a\,.\,t$ mais $a = k\,.\,\Delta U$ d'où $k = \dfrac{a}{\Delta U}$

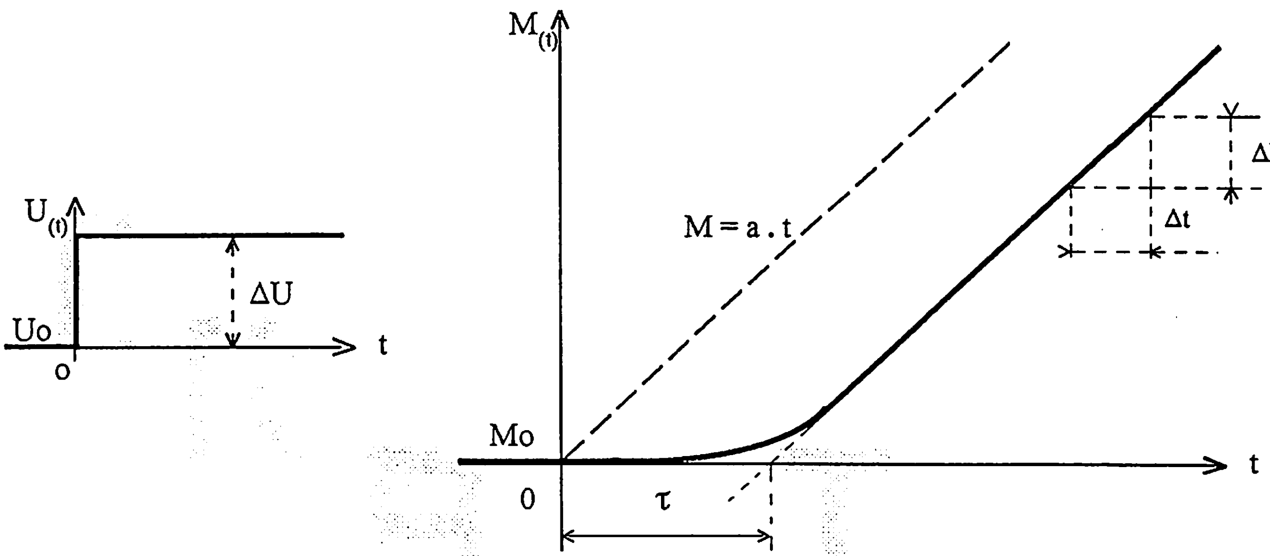
Coefficient d'intégration du procédé : $\boxed{k = \dfrac{\Delta M\%}{\Delta U\%\,.\,\Delta t}}$

b) *Procédé intégrateur du $n^{ième}$ ordre avec retard* :

La fonction de transfert : $HR_{(p)} = \dfrac{k\,e^{-\tau r.p}}{p.(1 + \theta 1.p)\ \ldots\ldots\ (1 + \theta n.p)}$

On peut approximer : $HR_{(p)} = \underbrace{\dfrac{k\,e^{-\tau r.p}}{p(1 + \theta_1 1.p)\ \ldots\ldots\ (1 + \theta_n n.p)}}_{\text{Procédé}} \# \underbrace{\dfrac{k\,e^{-\tau .p}}{p}}_{\text{Modèle}}$

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15



- Le temps mort du modèle est déterminé graphiquement

- Coefficient d'intégration du procédé : $k = \dfrac{\Delta M\%}{\Delta u\%\,\Delta t}$

⚠ A manipuler avec précaution car le système est instable -

Remarques :

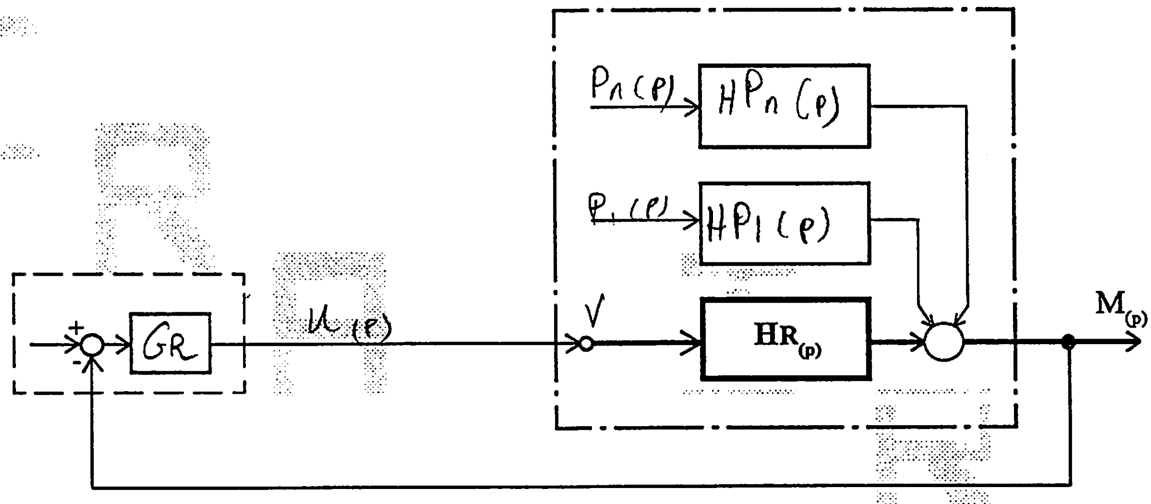
- Cette méthode d'identification en boucle ouverte doit être utilisée avec précautions, compte-tenu du caractère instable du procédé.

- Pour restabiliser le procédé, passer le régulateur en automatique et en proportionnelle seule, avec un gain assurant la statibilité.

3 - METHODE D'IDENTIFICATION EN BOUCLE FERMEE - plus précise mais besoin de 2 essais
1 - Gs
1 - τ et θ

3.1 PROCEDES NATURELLEMENT STABLES :

a) *Schéma fonctionnel* :



b) *Modèle recherché* :

On approximera le procédé à une fonction de transfert du premier ordre avec retard. C'est une identification paramétrique car on choisit à priori un modèle et on cherche par cette méthode, les paramètres de la fonction de transfert du modèle.

$$HR_{(p)} = \underbrace{\frac{Gs.e^{-\tau r.p}}{(1+\theta 1.p)\,(1+\theta 2.p)\,.\,.\,.\,.\,.\,(1+\theta n.p)}}_{\text{Procédé}} \;\#\; \underbrace{\frac{Gs.e^{-\tau.p}}{(1+\theta\,.p)}}_{\text{Modèle}}$$

c) *Mode opératoire* :

La méthode d'identification en boucle fermée nécessite deux essais :

- Premier essai : Recherche du gain statique Gs

- Deuxième essai : Recherche des paramètres dynamiques θ et τ.

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

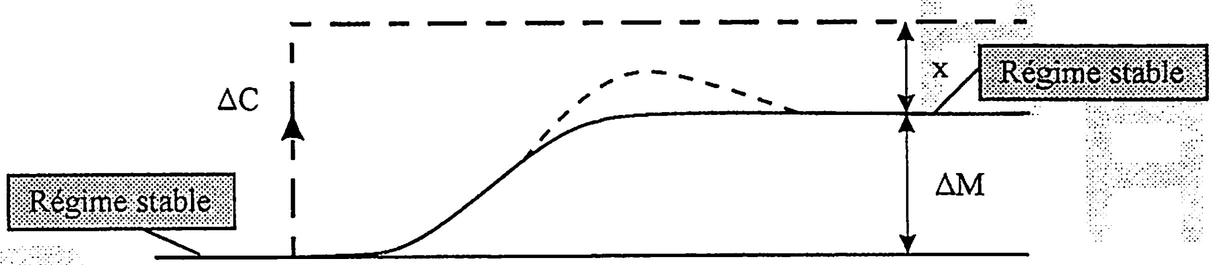
- ***Premier essai*** *: Recherche du gain statique Gs*

- Se placer au point de fonctionnement et stabiliser la mesure. Egaler la consigne à la mesure (C = M)
- Le régulateur en automatique et en action proportionnelle seule

  GR = 0,5 en valeur initiale.
- Faire un échelon sur la consigne ΔC
- Relever la variation de mesure ΔM et l'écart x (x = C - M).

  ⇒ pas besoin de l'enregistreur sur YOKOGAWA DV = x directement
- Calculer le gain statique Gs.

$$\boxed{Gs = \frac{\Delta M}{x \cdot GR}}$$



$$\Delta M_{(p)} = \frac{\Delta C}{p} \quad \frac{R_{(p)} \cdot HR_{(p)}}{1 + R_{(p)} \cdot HR_{(p)}} \qquad \text{avec} \qquad R_{(p)} = GR \qquad \text{et}$$

$$HR_{(p)} = \frac{Gs \cdot e^{-\tau \cdot p}}{1 + \theta\, p}$$: Fonction de transfert réglante

Pour calculer le régime établi suite à l'échelon de consigne, on calcule :

$$\lim.\ p \cdot \Delta M_{(p)} \qquad \text{lorsque} \qquad p \rightarrow 0$$

$$\Delta M = \Delta C \quad \frac{GR \cdot HR_{(o)}}{1 + GR \cdot HR_{(o)}} = \Delta C \quad \frac{GR \cdot GS}{1 + GR \cdot GS}$$

≈ 1 si GR grand
[illegible]
$\Delta M \neq \Delta C$

Nota : *Ce qui prouve que sur un système stable avec une régulation proportionnelle, la mesure ne rejoint pas la consigne.*

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

Si on calcule l'écart x :

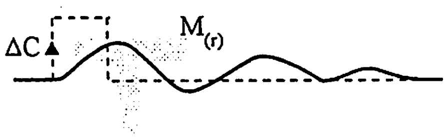
$$x = \Delta C - \Delta M$$

$$x = \frac{\Delta C}{1 + G_R \cdot G_S} \quad \text{d'où l'on tire :}$$

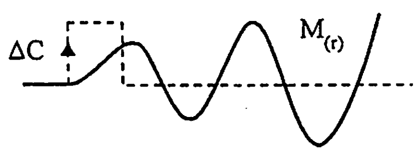
$$\boxed{G_S = \frac{\Delta M}{x \cdot G_R}}$$

- ***Deuxième essai*** *: Recherche des paramètres dynamiques θ et τ*

- Au point de fonctionnement
- Régulateur en automatique et en action proportionnelle seule.
- Augmenter progressivement le gain du régulateur en faisant de petits échelons sur la consigne jusqu'à l'obtention du "pompage" régulier de la mesure.

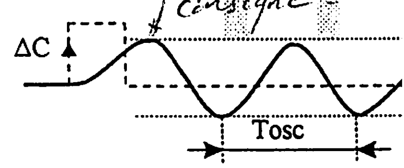


GR trop petit ou
BP% trop grand



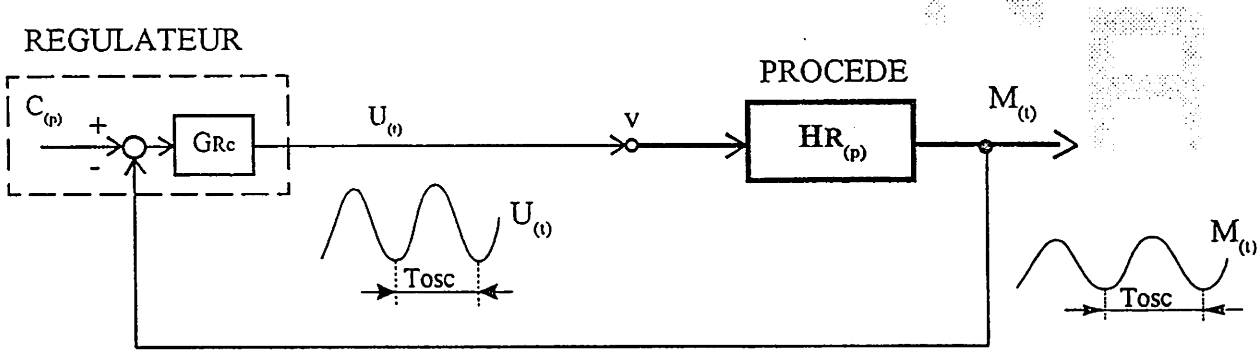
GR trop grand ou
BP% trop petite

erreur = l'oscillation ne se fait pas sur la consigne



GR correct
BP% correcte

- Relever la valeur du gain critique du régulateur (GRc) qui occasionne le pompage et la période des oscillations (Tosc) de la mesure $M_{(r)}$ [ou du signal de commande de la vanne $U_{(t)}$].



Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

- Calculer les paramètres dynamiques du modèle θ et τ

- Gain de boucle critique GBc

$$\boxed{G_{Bc} = G_{Rc} \cdot G_S}$$

- Constante de temps du modèle θ

$$\boxed{\theta = \frac{T_{osc}}{2\pi}\sqrt{G_{Bc}^2 - 1}}$$

- Temps mort ou retard du modèle τ

$$\boxed{\tau = \frac{T_{osc}}{2}\left[1 - \frac{\operatorname{arc\,tg}\sqrt{G_{Bc}^2 - 1}}{\pi}\right]}$$

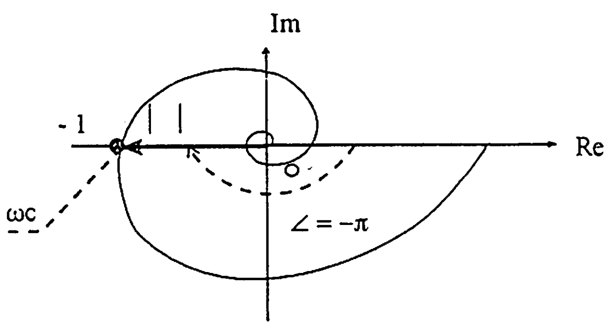
Si arc tg est exprimé en radians

$$\boxed{\tau = \frac{T_{osc}}{2}\left[1 - \frac{\operatorname{arc\,tg}\sqrt{G_{Bc}^2 - 1}}{180}\right]}$$

Si arc tg est exprimé en degrés

Remarques :

Dans le cas du pompage



Module : $|A(j\omega c)| = 1$

Argument : $\angle A(j\omega c) = -\pi$

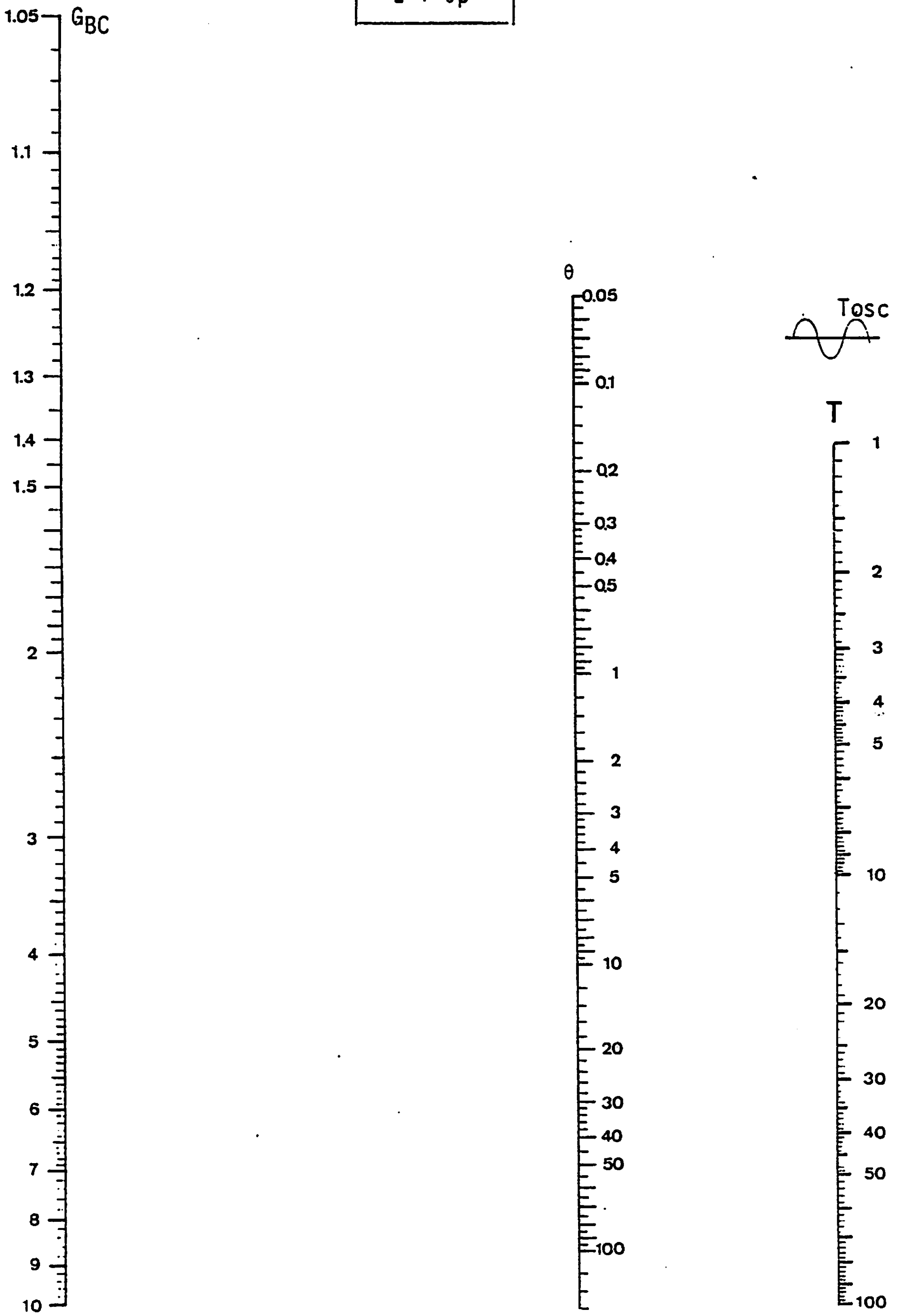
avec $\omega c = \dfrac{2\pi}{T_{osc}}$

Nota . ωc : Pulsation critique

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

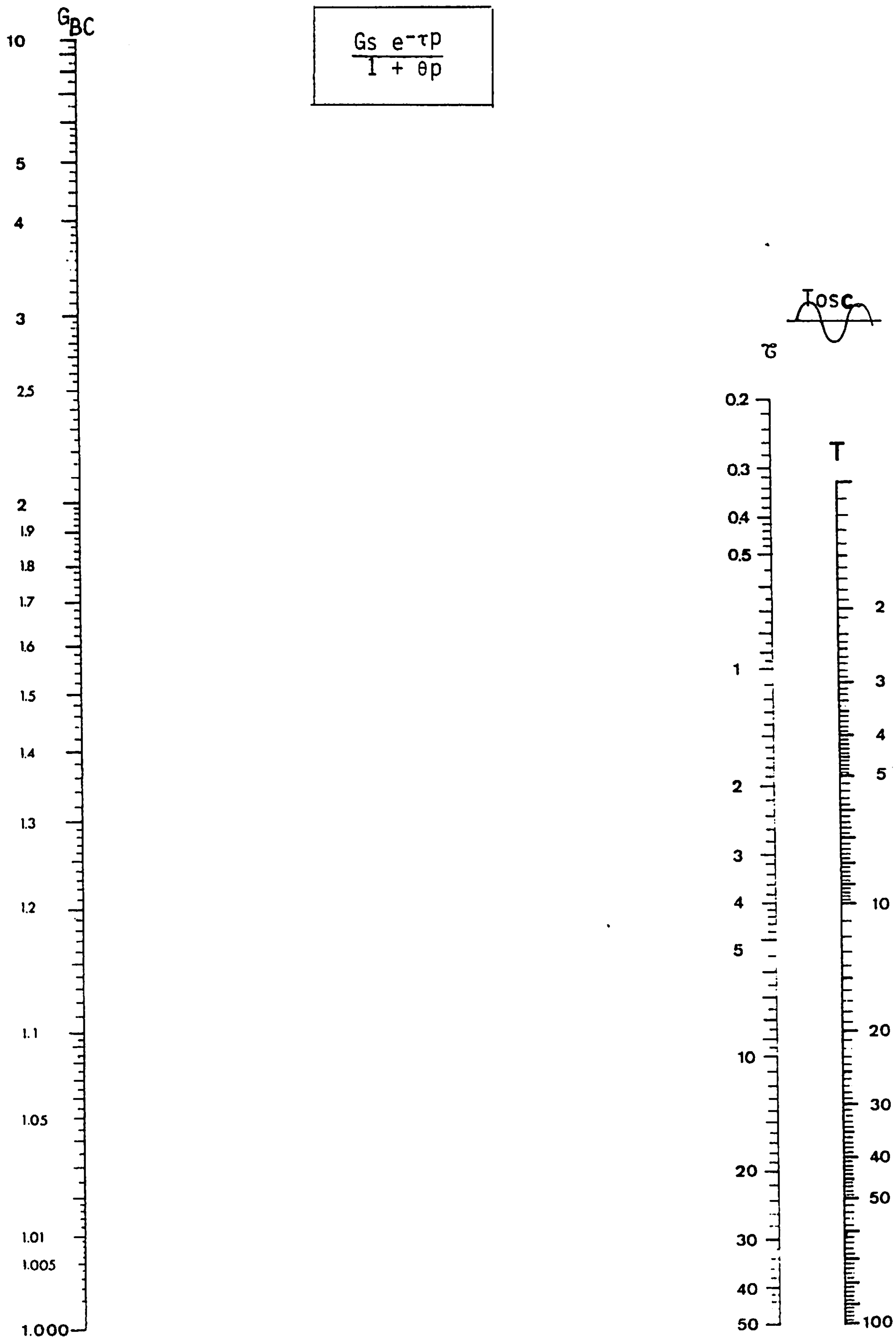
MODELE DE BROIDA : RECHERCHE DE θ

$$\boxed{\frac{G_s\, e^{-\tau p}}{1 + \theta p}}$$



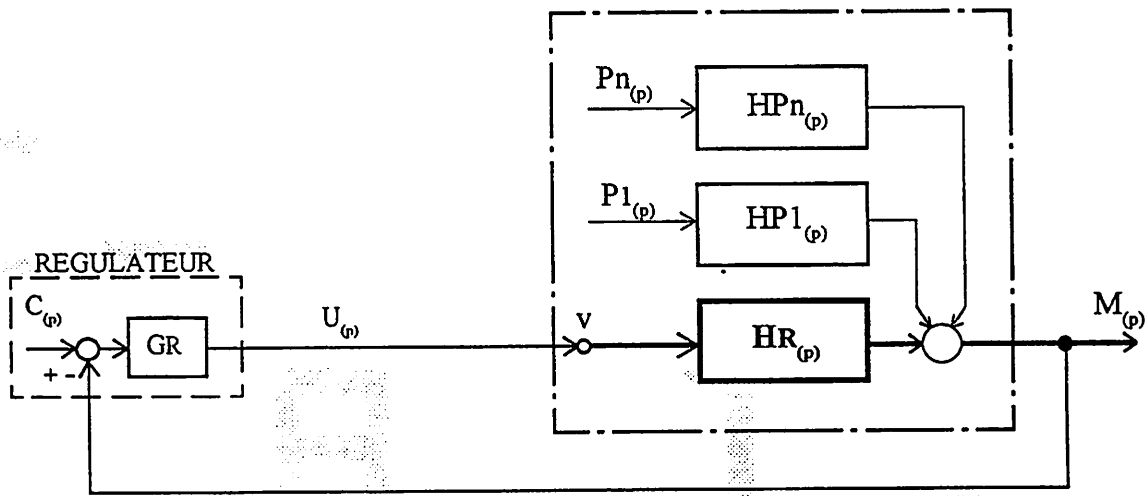
MODELE DE BROIDA : RECHERCHE DE τ

$$\frac{Gs\ e^{-\tau p}}{1 + \theta p}$$



3.2 PROCEDES NATURELLEMENT INSTABLES : moins dangereuse que méthode en B O –

a) *Schéma fonctionnel* :



b) *Modèle recherché* :

On approximera le procédé à une fonction de transfert intégrateur pur avec retard.

$$HR_{(p)} = \underbrace{\frac{k \, . \, e^{-\tau r.p}}{p \, . \, (1 + \theta 1.p)\,(1 + \theta 2.p) \ldots . (1 + \theta n.p)}}_{\text{Procédé}} \;\#\; \underbrace{\frac{k \, . \, e^{-\tau.p}}{p}}_{\text{Modèle}}$$

c) *Mode opératoire* :

- Se placer au point de fonctionnement
- Le régulateur en automatique et en action proportionnelle seule
- Augmenter progressivement le gain du régulateur en faisant de petits échelons sur la consigne jusqu'à l'obtention du pompage régulier de la mesure.
- Relever la valeur du gain critique du régulateur (GRc) qui occasionne le pompage et la période des oscillations (Tosc) de la mesure $M_{(t)}$. [ou du signal de commande de la vanne $u_{(t)}$].

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

- Calculer les paramètres k et τ du modèle

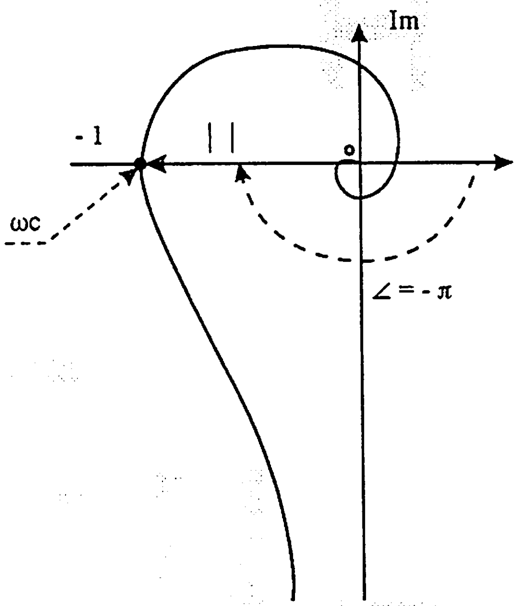
- Coefficient d'intégration k : $k = \dfrac{2\pi}{Tosc \cdot GRc}$

- Temps mort ou retard du modèle τ : $\tau = \dfrac{Tosc}{4}$

Remarques :

① *Dans le cas du pompage*

Lieu de Nyquist



Module : $|A(j\omega c)| = 1$

Argument : $\angle A(j\omega c) = -\pi$

avec $\omega c = \dfrac{2\pi}{Tosc}$

Nota . ωc : Pulsation critique

② *Comportement d'un procédé instable sur un échelon de consigne ΔC en proportionnelle seule avec un gain GR assurant la stabilité*

$$\Delta M_{(p)} = \frac{\Delta C}{p} \quad \frac{G_R \cdot HR_{(p)}}{1 + G_R \cdot HR_{(p)}} \quad \text{avec} \quad HR_{(p)} = \frac{k \cdot e^{-\tau . p}}{p}$$

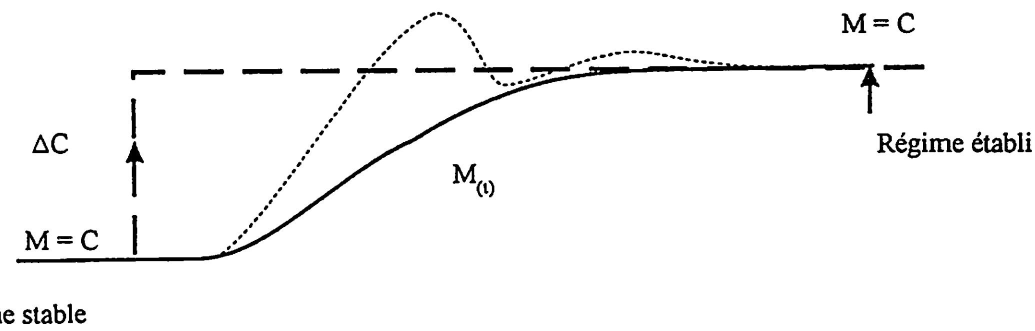
Fonction de transfert du modèle.

Pour calculer le régime établi suite à l'échelon de consigne ΔC, on calcule la lim p . $\Delta M_{(p)}$ lorsque $p \to 0$.

$$\Delta M_{(0)} = \Delta C \quad \frac{G_R \cdot HR_{(0)}}{1 + G_R \cdot HR_{(0)}}$$

$$\Delta M = \Delta C$$

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15



Sur un système naturellement instable en action proportionnelle, la mesure rejoint la consigne sur un test en asservissement.

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

REGULATION

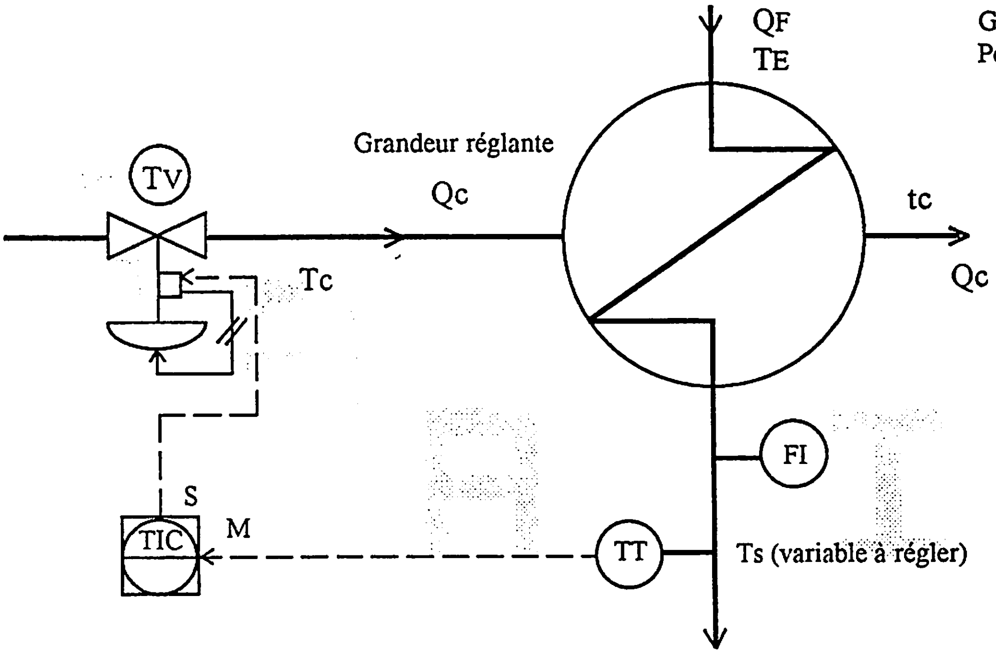
Page

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

1 - REGULATION EN BOUCLE FERMEE -

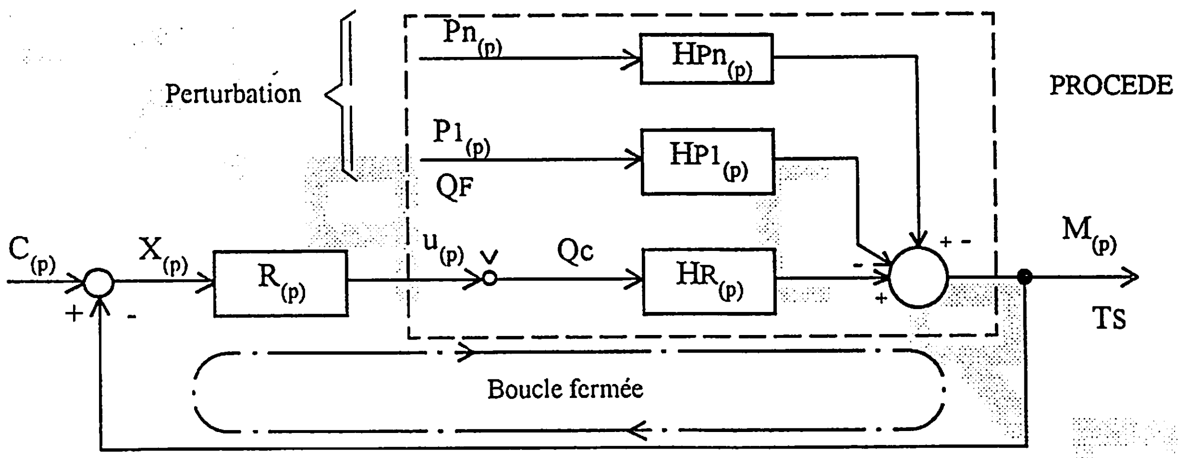
1.1 EXEMPLE : ECHANGEUR THERMIQUE :

Grandeur réglante : Qc
Grandeur réglée : Ts
Perturbations : TE, Tc, QF



Dans une régulation en boucle fermée (BF), on "corrige" la valeur de la variable que l'on mesure.

1.2 SCHEMA FONCTIONNEL SIMPLIFIE :



1.3 EQUATION GENERALE :

$$\boxed{M_{(p)} = \underbrace{C_{(p)} \frac{R_{(p)} \cdot HR_{(p)}}{1 + R_{(p)} \cdot HR_{(p)}}}_{\text{Terme d'asservissement}} \underbrace{\pm P1_{(p)} \frac{HP1_{(p)}}{1 + R_{(p)} \cdot HR_{(p)}} \pm \ldots \pm Pn_{(p)} \frac{HPn_{(p)}}{1 + R_{(p)} \cdot HR_{(p)}}}_{\text{Terme de régulation}}}$$

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

1.4 AVANTAGES ET INCONVENIENTS :

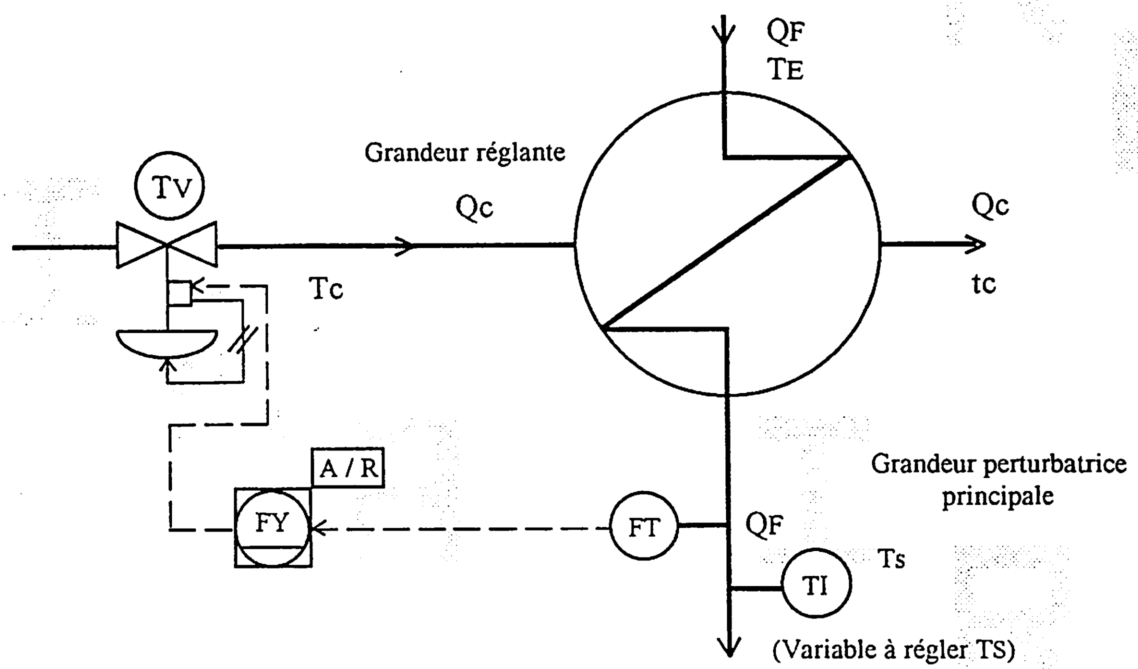
Toutes les perturbations entrant sur le système seront annulées (au bout d'un temps transitoire) par la boucle de régulation afin de ramener la mesure égale à la consigne.

Les performances de la régulation en boucle fermée (généralement du type PID) dépendent des paramètres de la fonction de transfert réglante $HR_{(p)}$ du procédé.

La régulation en boucle fermée s'oppose à toutes les perturbations après en avoir constaté les effets sur la grandeur réglée (c'est une régulation à postériori).

2 - REGULATION EN BOUCLE OUVERTE (A PRIORI) -

2.1 EXEMPLE : ECHANGEUR THERMIQUE :

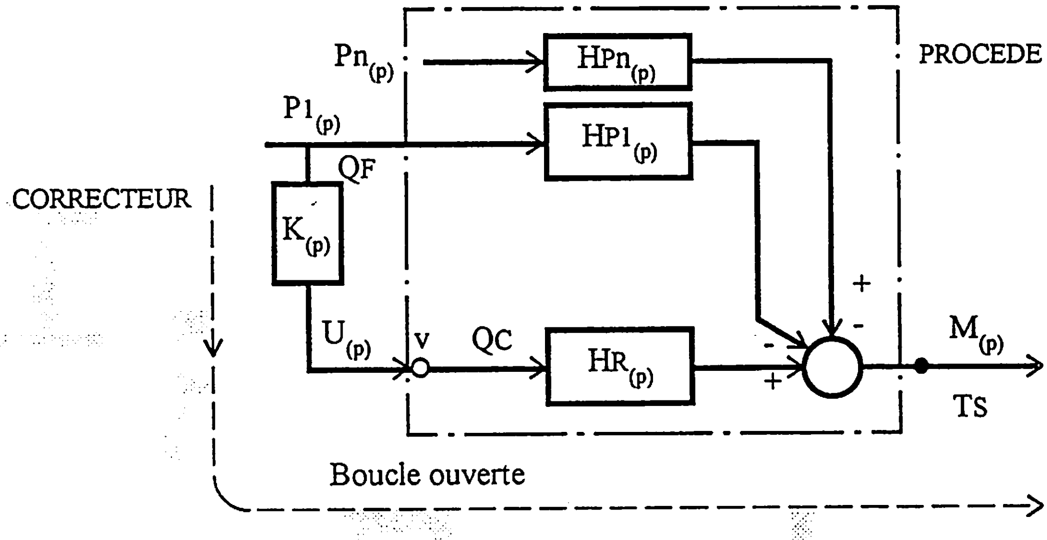


Dans une régulation en boucle ouverte (BO), on ne "corrige" pas la valeur de la variable que l'on mesure.

N/Réf: RI-REI19

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

2.2 SCHEMA FONCTIONNEL SIMPLIFIE :



2.3 EQUATION GENERALE :

$$M_{(p)} = P1_{(p)} \left[K_{(p)} . HR_{(p)} - HP1_{(p)} \right] \pm P2_{(p)} . HP2_{(p)} \pm \ldots \pm Pn_{(p)} HP_{n(p)}$$

Si l'on veut éliminer l'influence de la grandeur perturbatrice $P1_{(p)}$ sur la mesure $M_{(p)}$, il faut s'imposer

$K_{(p)} . HR_{(p)} - HP1_{(p)} = 0$ d'où la fonction de transfert

$$\boxed{K_{(p)} = \frac{HP1_{(p)}}{HR_{(p)}}}$$

La fonction de transfert du correcteur $K_{(p)}$ est égale au rapport de la fonction de transfert perturbatrice ($HP1_{(p)}$) par la fonction de transfert réglante $HR_{(p)}$. En identifiant ces deux fonctions de transfert, on obtient la valeur des "paramètres" de réglage du correcteur $K_{(p)}$.

2.4 AVANTAGES ET INCONVENIENTS :

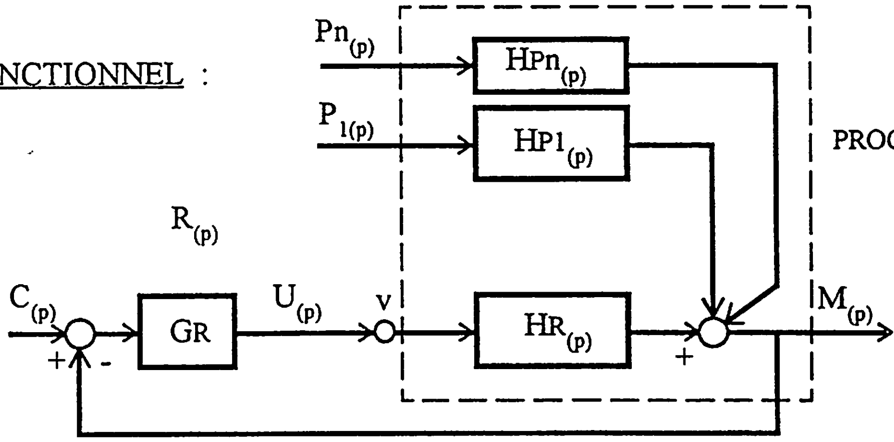
La régulation en boucle ouverte s'oppose instantanément à une grandeur perturbatrice en agissant immédiatement sur la grandeur réglante, avant d'avoir constaté les effets de cette perturbation sur la grandeur réglée. Elle a un rôle de prédiction.

Elle ne contrôle qu'une perturbation et reste insensible aux autres perturbations qui peuvent entrer sur le procédé.

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

3 - REGULATION A ACTION PROPORTIONNELLE D'UN PROCEDE NATURELLEMENT STABLE -

3.1 SCHEMA FONCTIONNEL :



3.2 PROCEDE MODELISE PAR UN PREMIER ORDRE AVEC RETARD :

$$R_{(p)} = GR \quad \text{et} \quad HR_{(p)} = \frac{GS \,.\, e^{-\tau.p}}{1 + \theta p}$$

3.3 ETUDE DE LA STABILITE :

Equation caractéristique $$1 + R_{(p)} . HR_{(p)} = 1 + \frac{GR \,.\, GS \,.\, e^{-\tau.p}}{1 + \theta \,.\, p}$$

avec $$A_{(p)} = \frac{GR \,.\, GS \,.\, e^{-\tau.p}}{1 + \theta \,.\, p}$$

Critères du revers : on remplace p par $j\omega$ dans $A_{(p)}$

$$A_{(j\omega)} = \frac{GR \,.\, GS \,.\, e^{-j\omega.\tau}}{1 + j\omega.\theta}$$

Module : $$|A_{(j\omega)}| = \frac{GR \,.\, GS}{[1 + \omega^2 \,.\, \theta^2]^{1/2}}$$

Argument : $$\angle A_{(j\omega)} = -\omega \,.\, \tau - \text{arc tg } \omega \,.\, \theta$$

Dans le cas de la pulsation critique ωc, si on prend une marge (m) de gain de 2 (mG = 1), on a alors :

$$|A(j\omega c)| = \frac{GR \,.\, GS}{[1 + \omega c^2 \,.\, \theta^2]^{1/2}} \leq 0{,}5$$

$$\angle A_{(j\omega c)} = -\omega c \,.\, \tau - \text{arc tg } \omega c \,.\, \theta = -\pi$$

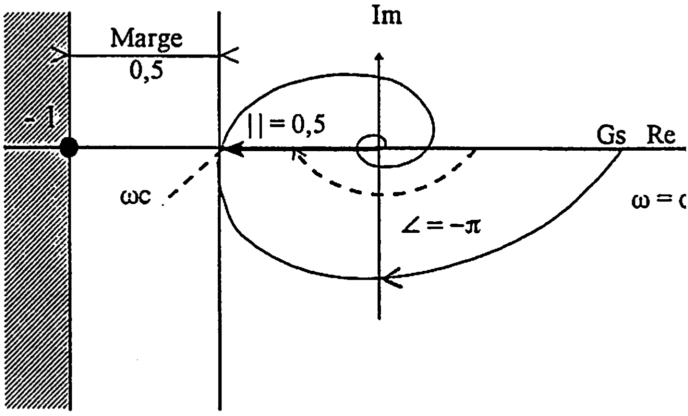
Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

Recherche du gain G_R à afficher sur le régulateur :

$$\pi - \omega c \,.\, \tau \;=\; \operatorname{arc\,tg} \omega c \,.\, \theta$$

$$\operatorname{tg}\,(\pi - \omega c \,.\, \tau) \;=\; \omega c \,.\, \theta$$

$$-\operatorname{tg}\, \omega c \,.\, \tau \;=\; \omega c \,.\, \theta$$



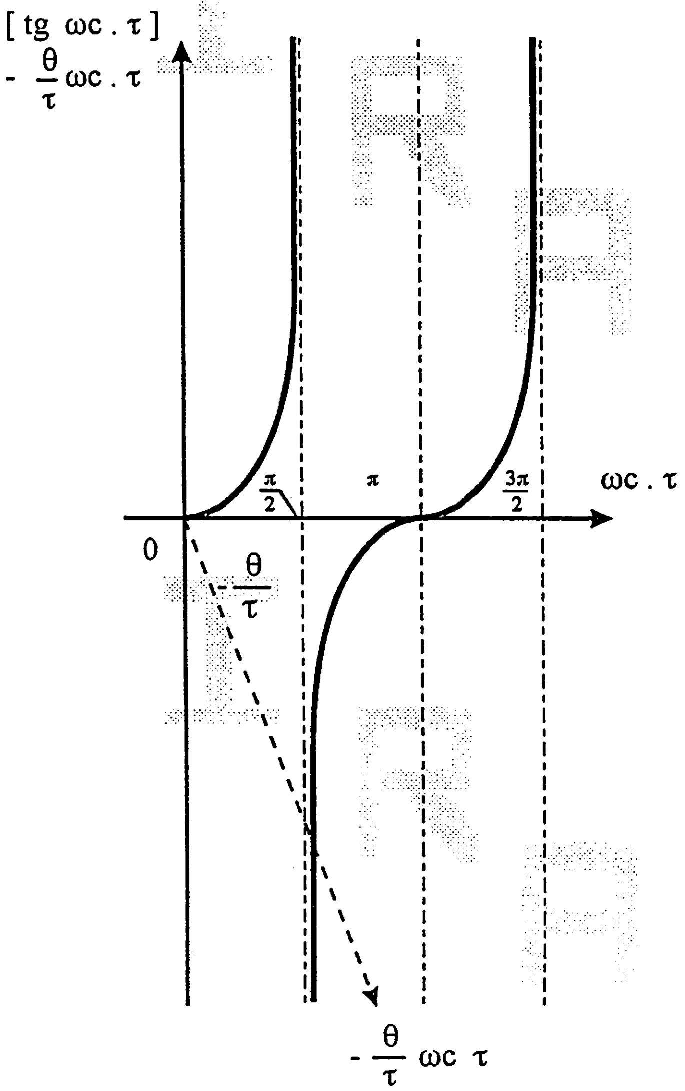
qui peut s'écrire :

$$\underbrace{\operatorname{tg}\, \omega c \,.\, \tau}_{\text{Fonction tangente}} \;=\; \underbrace{-\frac{\theta}{\tau}\, \omega c .\, \tau}_{\text{droite}}$$

Traçons la fonction tangente et la droite. On constate que

$$\text{si } \frac{\theta}{\tau} \text{ petit} \Rightarrow \omega c \,.\, \tau \;\#\; \pi$$

$$\text{si } \frac{\theta}{\tau} \text{ grand} \Rightarrow \omega c \,.\, \tau \;\#\; \frac{\pi}{2}$$



Pour une bonne régulation en proportionnelle seule, il faut que

$$\frac{\theta}{\tau} \overset{\geq 10}{\text{ soit grand}} \Rightarrow \omega c \,.\, \tau \;=\; \frac{\pi}{2}$$

d'où $G_R \,.\, G_S \leq 0{,}5 \sqrt{1 + \omega^2 c \,.\, \theta^2}$

$$G_R \,.\, G_S \leq 0{,}5 \sqrt{1 + (\omega c \,.\, \tau)^2 \left(\frac{\theta}{\tau}\right)^2}$$

mais $\omega c \,.\, \tau \;\#\; \dfrac{\pi}{2}$

$$G_R \,.\, G_S \leq 0{,}5 \sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \left(\frac{\theta}{\tau}\right)^2}$$

$$G_R \,.\, G_S \leq 0{,}5 \;.\; \frac{\pi}{2} \,.\, \frac{\theta}{\tau}$$

d'où gain du régulateur G_R

$$G_R \;\leq\; \frac{\pi}{4}\, \frac{\theta}{\tau}\, \frac{1}{G_s}$$

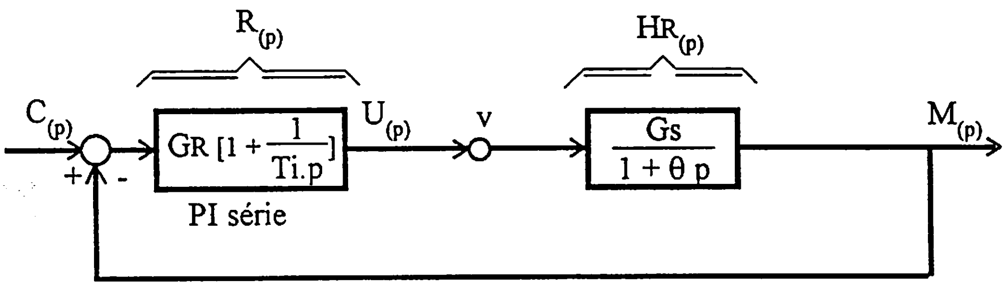
$$\boxed{G_R \;\leq\; \frac{0{,}8 \,.\, \theta}{\tau \,.\, G_s}}$$

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

4 - REGULATION A ACTIONS PROPORTIONNELLE ET INTEGRALE D'UN SYSTEME NATURELLEMENT STABLE -

4.1 PROCEDE DU PREMIER ORDRE :

a) Schéma fonctionnel simplifié :



b) Aspect asservissement :

$$M_{(p)} = C_{(p)} \frac{R_{(p)}\, HR_{(p)}}{1 + R_{(p)}\, HR_{(p)}}$$

Si on pose GB = GR . GS

$$M_{(p)} = C_{(p)} \frac{\dfrac{G_B\,(Ti.p + 1)}{Ti.p\,(1 + \theta\,.\,p)}}{1 + \dfrac{G_B\,(Ti.p + 1)}{Ti.p\,(1 + \theta\,.\,p)}} = \frac{G_B\,(1 + Ti.p)}{Ti\,.\,\theta\,.\,p^2 + Ti\,(1 + G_B)\,.\,p + G_B}$$

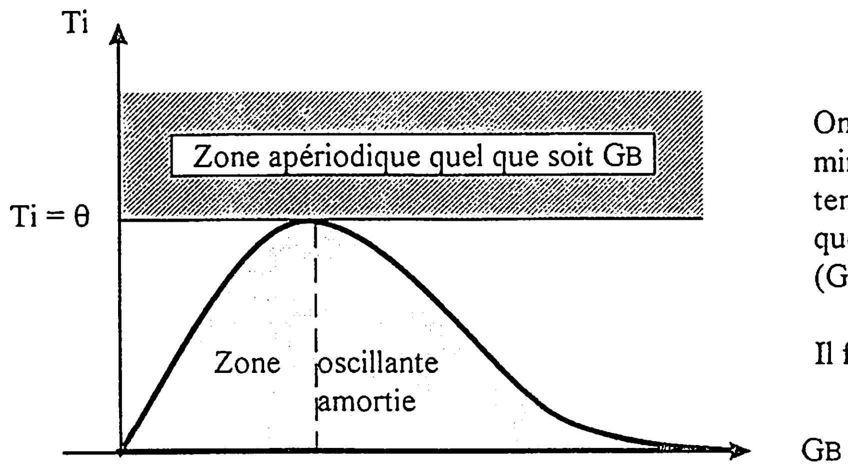
On a un polynôme du 2ème degré au dénominateur

déterminant du 2ème degré -

Si $\Delta \geq 0 \Rightarrow$ système apériodique $\Rightarrow$ $Ti \geq 4\theta \dfrac{G_B}{(1 + G_B)^2}$

Si $\Delta \leq 0 \Rightarrow$ système oscillant amorti $\Rightarrow$ $Ti \leq 4\theta \dfrac{G_B}{(1 + G_B)^2}$

Traçons la courbe $Ti = f(G_B)$



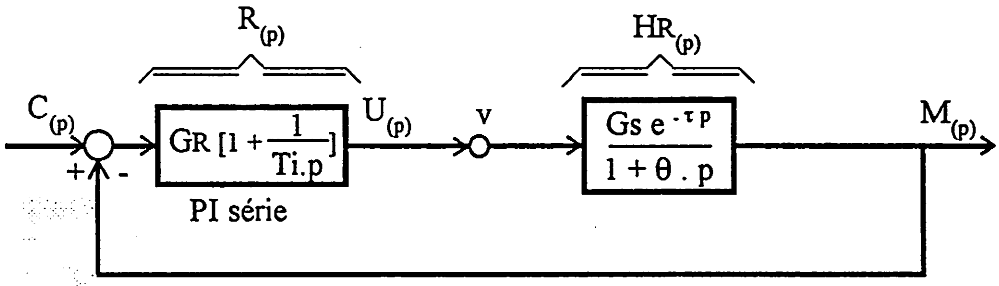
On veut déterminer une valeur minimale à donner en Ti afin d'obtenir une réponse apériodique quelle que soit la valeur de GB. (GB = GR . Gs)

Il faut que $\boxed{Ti \geq \theta}$

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

4.2 PROCEDE MODELISE PAR UN PREMIER ORDRE AVEC RETARD :

a) *Schéma fonctionnel simplifié* :



b) *Recherche des actions P et I* :

$$R_{(p)} = G_R \left[\frac{Ti.p + 1}{Ti.p} \right] \quad \Rightarrow \quad \text{Régulateur PI série}$$

$$HR_{(p)} = \frac{G_S . e^{-\tau p}}{1 + \theta p} \quad \Rightarrow \quad \text{Modèle choisi}$$

Equation caractéristique :

$$1 + R_{(p)} . HR_{(p)} = 1 + A_{(p)} = 0$$

$$A_{(p)} = \frac{G_B\,(1 + Ti.p)\, e^{-\tau p}}{Ti.p\,(1 + \theta . p)}$$

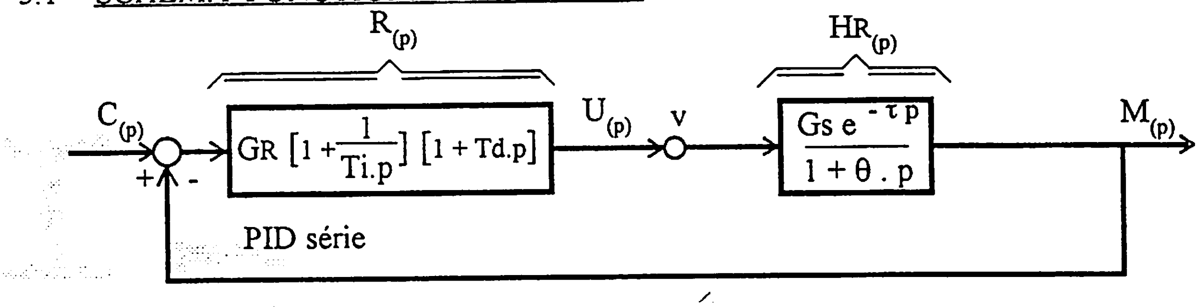
Comme nous l'avons vu précédemment, pour avoir un régime apériodique, on affichera $Ti = \theta$ (on se place dans le cas limite), d'où :

$$A_{(p)} = \frac{G_B\, e^{-\tau p}}{\theta p}$$

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

5 - REGULATION A ACTIONS PROPORTIONNELLE, INTEGRALE ET DERIVEE D'UN SYSTEME NATURELLEMENT STABLE -

5.1 SCHEMA FONCTIONNEL SIMPLIFIE :



5.2 RECHERCHE DES ACTIONS P., I. et D :

On démontrerait, en procédant comme pour le chapitre précédent et en prenant une marge de gain de 2, une marge de phase de $+\frac{\pi}{4}$ que les actions à afficher sur le régulateur sont :

Action proportionnelle $\quad \boxed{GR \leq \frac{0{,}85 . \theta}{\tau . Gs}}$

Action intégrale $\quad \boxed{Ti \geq \theta}$

Action dérivée $\quad \boxed{Td \leq 0{,}4 . \tau}$

CALCUL DES ACTIONS
Tableau résumé des PROCEDES STABLES

Modèle : $\boxed{HR_{(p)} = \frac{Gs.\,e^{-\tau p}}{1 + \theta . p}}$

on a de meilleurs résultats si on remplace 1,2 par 2 (moins d'erreur)

REGUL. ACTIONS	P	P.I Série	P.I Parallèle	P.I.D Série	P.I.D Parallèle	P.I.D Mixte (1)	P.I.D Mixte (2)
Gr	$\frac{0{,}8 . \theta}{Gs . \tau}$	$\frac{0{,}8 . \theta}{Gs . \tau}$	$\frac{0{,}8 . \theta}{Gs . \tau}$	$\frac{0{,}85 . \theta}{Gs . \tau}$	$\frac{(\theta/\tau) + 0{,}4}{1{,}2 . Gs}$	$\frac{(\theta/\tau) + 0{,}4}{1{,}2\ Gs}$	$\frac{(\theta/\tau) + 0{,}4}{1{,}2 . Gs}$
Ti	Maxi	θ	$\frac{Gs . \tau}{0{,}8}$	θ	$\frac{Gs . \tau}{0{,}75}$	$\theta + 0{,}4 . \tau$	$\theta + 0{,}4 . \tau$
Td	0	0	0	$0{,}4 . \tau$	$\frac{0{,}35 . \theta}{Gs}$	$\frac{\theta . \tau}{\tau + 2{,}5 . \theta}$	$\frac{0{,}35 . \theta}{Gs}$

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

6 - REGULATION A ACTION PROPORTIONNELLE D'UN PROCEDE NATURELLEMENT INSTABLE -

6.1 REMARQUE :

Un système intégrateur avec retard est assimilable à un système du premier ordre avec retard dont le gain statique n serait infini et la constante de temps $\theta = \frac{n}{k}$.

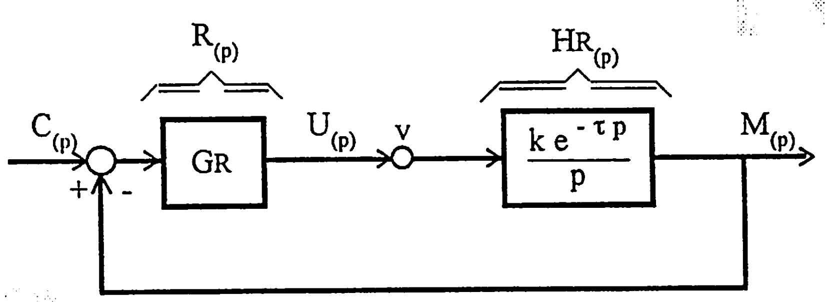
Cette égalité nous permet de simplifier la recherche des actions, P., I. et D. sur un système instable.

$$\boxed{\frac{k\,e^{-\tau p}}{p} = \lim_{n \to \infty} \frac{n\,.\,e^{-\tau p}}{1 + \frac{n}{k}p}}$$

idem système stable avec Gs ∞

6.2 PROCEDE MODELISE PAR UN INTEGRATEUR AVEC RETARD :

a) Schéma fonctionnel simplifié :



b) Etude de la stabilité :

Recherche du gain GR à afficher sur le régulateur :

On avait trouvé pour un système stable en régulation proportionnelle :

$$GR \leq \frac{0{,}8\,.\,\theta}{\tau\,.\,GS}$$

$$\text{comme } \frac{k}{p}\,e^{-\tau p} = \lim_{n \to \infty} \frac{n\,.\,e^{-\tau p}}{1 + \frac{n}{k}p}$$

Dans le cas d'un système naturellement stable, on a :

$$\theta = \frac{n}{k} \qquad \text{et} \qquad Gs = n \qquad \text{d'où}$$

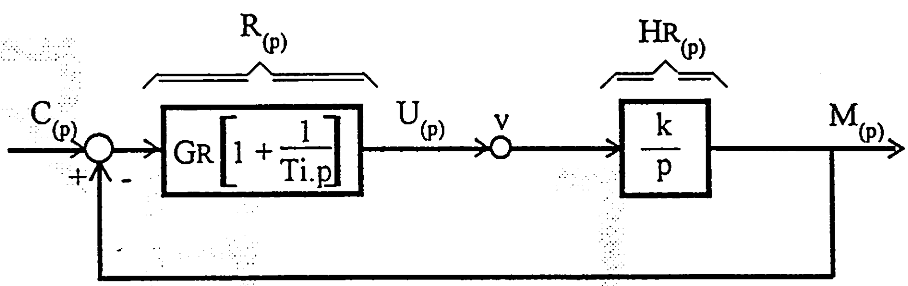
$$\boxed{GR \leq \frac{0{,}8}{k\tau}}$$

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

7 - REGULATION A ACTIONS PROPORTIONNELLE ET INTEGRALE D'UN SYSTEME NATURELLEMENT INSTABLE -

7.1 PROCEDE INTEGRATEUR PUR :

a) Schéma fonctionnel simplifié :



b) Aspect asservissement :

$$M_{(p)} = C_{(p)} \frac{\frac{GR\,.\,k}{p}\left[\frac{Ti.p+1}{Ti.p}\right]}{1+\frac{GR\,.\,k}{p}\left[\frac{Ti.p+1}{Ti.p}\right]} = \frac{GR\,.\,k\,[\,Ti.p+1\,]}{Ti.p^2 + GR\;k\,Ti.p + GR\,.\,k}$$

On a un polynôme du 2ème degré au dénomiteur

Si $\Delta < 0 \Rightarrow$ système oscillant amorti

Si $\Delta > 0 \Rightarrow$ système apériodique

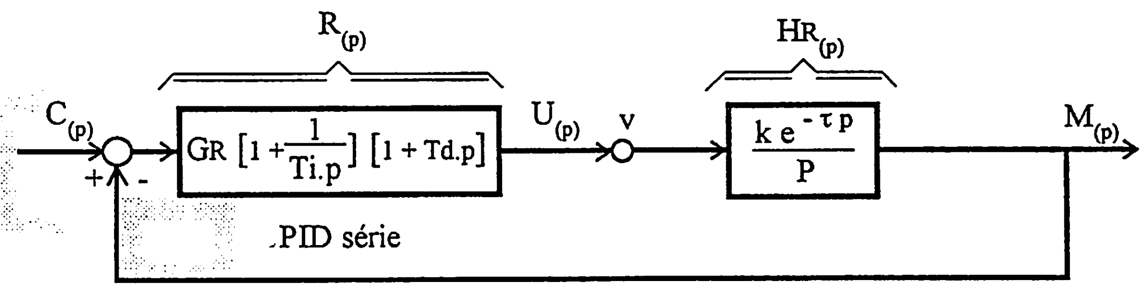
d'où $GR\,.\,k\,.\,Ti - 4 > 0$ pour avoir une réponse apériodique, ce qui impose :

$$\boxed{Ti \geq \frac{4}{GR\,k}}$$

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

8 - REGULATION A ACTIONS PROPORTIONNELLE, INTEGRALE ET DERIVEE D'UN SYSTEME NATURELLEMENT INSTABLE -

8.1 SCHEMA FONCTIONNEL SIMPLIFIE :



8.2 RECHERCHE DES ACTIONS P., I. et D :

On démontrerait, en procédant comme pour le chapitre 4,2 que les actions à afficher sur le régulateur sont :

Valeur de gain GR $\quad \boxed{G_R \leq \dfrac{0{,}83}{k\,.\,\tau}}$

Valeur de Ti $\quad \boxed{Ti \geq 4{,}8\,.\,\tau}$

Valeur de Td $\quad \boxed{Td \leq 0{,}4\,.\,\tau}$

CALCUL DES ACTIONS

Tableau résumé des PROCEDES INSTABLES

Modèle : $\boxed{HR_{(p)} = \dfrac{k\,.\,e^{-\tau p}}{p}}$

REGUL. ACTIONS	P	P.I Série	P.I Parallèle	P.I.D Série	P.I.D Parallèle	P.I.D Mixte (1)	P.I.D Mixte (2)
Gr	$\frac{0{,}8}{k\,.\,\tau}$	$\frac{0{,}8}{k\,.\,\tau}$	$\frac{0{,}8}{k\,.\,\tau}$	$\frac{0{,}85}{k\,.\,\tau}$	$\frac{0{,}9}{k\,.\,\tau}$	$\frac{0{,}9}{k\,.\,\tau}$	$\frac{0{,}9}{k\,.\,\tau}$
Ti	Maxi	$5\,.\,\tau$	$\frac{k\,.\,\tau^2}{0{,}15}$	$4{,}8\,.\,\tau$	$\frac{k\,.\,\tau^2}{0{,}15}$	$5{,}2\,.\,\tau$	$5{,}2\,.\,\tau$
Td	0	0	0	$0{,}4\,.\,\tau$	$\frac{0{,}35}{k}$	$0{,}4\,.\,\tau$	$\frac{0{,}35}{k}$

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

9 - CHOIX DU MODE DE REGULATION -

9.1 LIMITES D'UNE REGULATION :

- Les qualités éxigées pour une boucle de régulation sont la précision et la stabilité.

- Dans la régulation boucle simple du type P.I.D., le signal de commande ne dépend que des signaux de mesure et de consigne.

- Entre l'apparition d'une perturbation et sa détection sur le signal mesure, il peut s'écouler un temps tel que la régulation ne puisse empêcher la mesure de s'écarter fortement de sa valeur normale de fonctionnement. La dégradation de la stabilité globale sera d'autant plus importante que le retard sera important.

- La régulation P.I.D. n'est pas sensible aux perturbations mais à leurs effets sur la mesure. Les performances d'une régulation dépendent du rapport θ/τ pour les procédés stables et du rapport $1/k.\tau$ pour les procédés instables.

- Pour améliorer la régulation P.I.D., plusieurs solutions peuvent être envisagées. La plus simple consiste (si possible) à réaliser des régulations multi-boucles cascade, mixte ...

- Pour améliorer la régulation, utiliser des algorithmes numériques tels que correcteur de SMITH ou régulation à modèle interne de référence.

9.2 CHOIX DU MODE REGULATION : (Expérimental)

Le choix des modes de régulation d'un procédé dépend du rapport θ / τ pour les systèmes stables et du rapport $1/k\tau$ pour les systèmes instables. Les limites entre les différents modes sur des procédés ont été déterminées expérimentalement par des essais réalisés sur des procédés et ne sont pas forcément applicables dans tous les domaines.

En effet, d'autres facteurs d'appréciation peuvent conduire à choisir un mode de régulation plus adapté au procédé à piloter.

(Par exemple : - pas de dépassement de la mesure sur un changement de consigne.
- Temps de montée minimal
- Réponse plate décalée

réponse plus lente que le process –

instables $\left\{\frac{1}{k.\tau}\right.$ 1	2	5	10	20	$\left.\frac{\theta}{\tau}\right\}$ stables
Multi-boucles	P.I.D.	P.I. ou P.I.D.	P. ou P.I.	T.O.R.	

Correcteur de SMITH
Correcteur à modèle interne de référence } Algorithmes numériques

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

1 - AMELIORATION DE LA STABILITE GLOBALE D'UN PROCEDE -

Pour améliorer le comportement global d'une boucle de régulation, il faut essayer d'analyser les grandeurs perturbatrices.

① Grandeurs perturbatrices affectant la grandeur réglante :

Si on peut mesurer la variable réglante affectée par ces grandeurs perturbatrices, on pourra se servir de cette mesure pour réaliser une régulation en cascade.

② Grandeurs perturbatrices affectant la grandeur réglée :

Si on ne peut pas agir directement sur cette grandeur perturbatrice, on utilisera alors sa mesure pour réaliser une régulation mixte (prédictive ou à priori).

③ Grandeurs (ou variables internes) non-mesurables :

On peut alors essayer de reconstituer ces variables (ou états) internes par différents moyens (Ex: modèle de référence, observateurs ...) afin de "reconstituer" le comportement dynamique du procédé. A partir de là, on peut faire une régulation plus performante (par exemple : régulation par retour d'état ...)

CONCLUSIONS :

Pour améliorer la régulation PID en boucle simple, on réalisera (si possible) des régulations cascade et, ou mixte dans le but de minimiser les effets d'une grandeur perturbatrice sur la variable à régler.

Si dans ces cas spécifiques (ou objectifs différents), les techniques citées ci-dessus ne donnent pas des résultats statisfaisants, on aura recours à des techniques de régulation plus performantes (retour d'état, algorithmes numériques, ...)

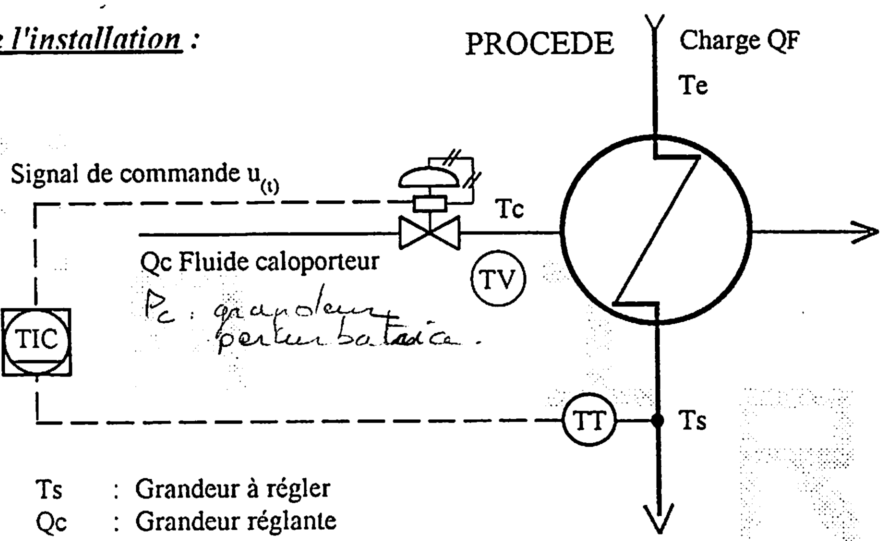
Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

2 - REGULATION EN CASCADE -

Pour mettre en évidence les avantages et les limites d'une régulation en cascade, nous ferons l'étude pratique du comportement de la régulation d'un échangeur thermique.

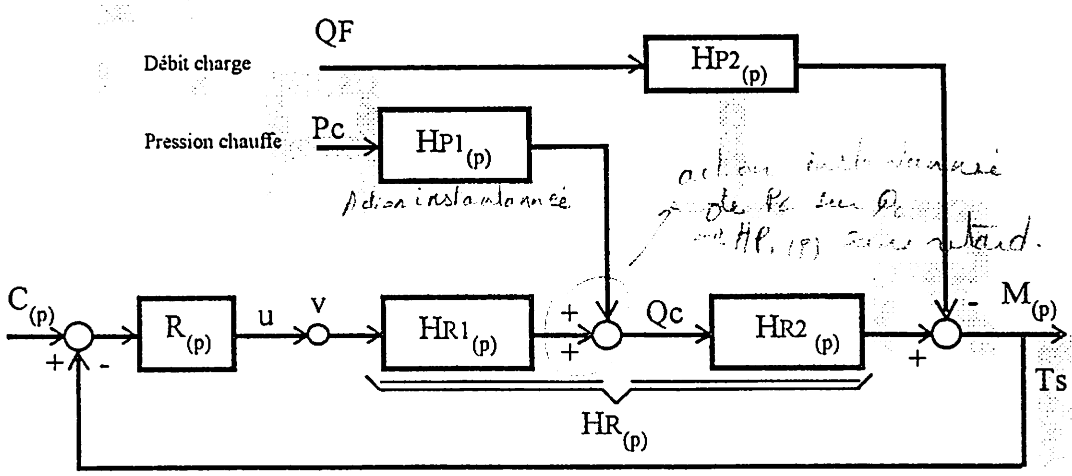
2.1 CAS D'UNE BOUCLE SIMPLE :

a) T.I. de l'installation :



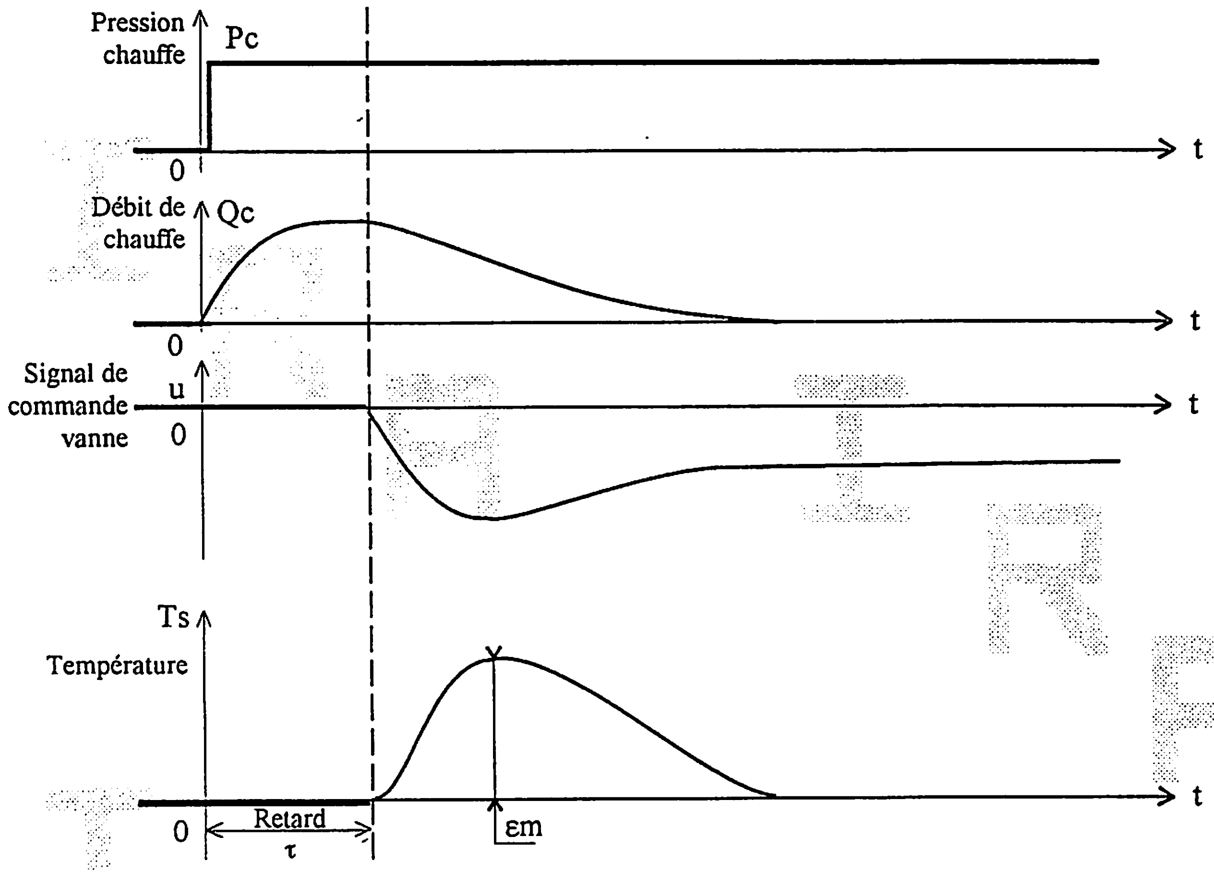
Ts	:	Grandeur à régler
Qc	:	Grandeur réglante
QF	:	Débit de charge
Te	:	Température d'entrée
Tc	:	Température de chauffe

b) Schéma fonctionnel :



Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

c) <u>Allure des signaux lors d'une perturbation de pression de chauffe (Pc)</u> :



Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

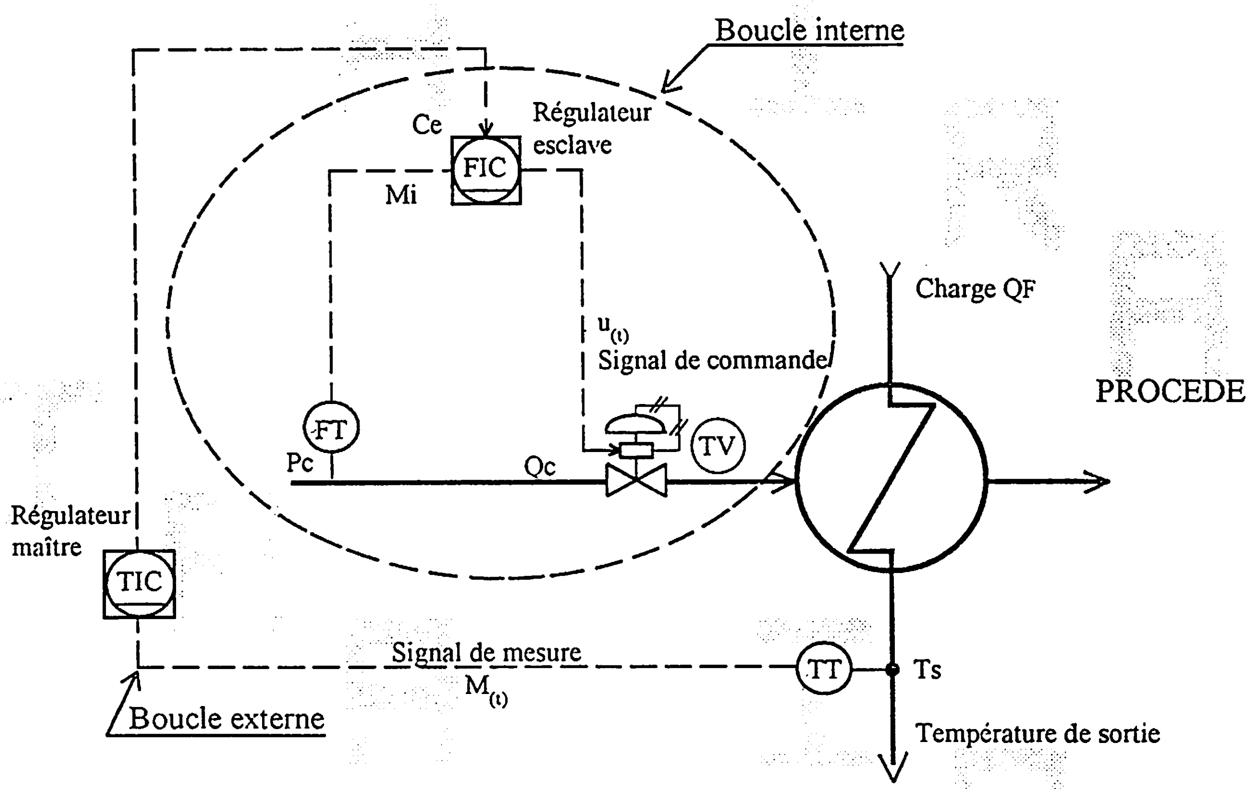
2.2 CAS D'UNE REGULATION EN CASCADE :

a) ***Objectif*** **: Minimiser les effets d'une ou de plusieurs grandeurs perturbatrices qui agissent soit :**

- sur la variable réglante

- sur une grandeur intermédiaire se trouvant en amont de la variable à régler, cette grandeur intermédiaire étant en avance temporelle sur la variable à régler.

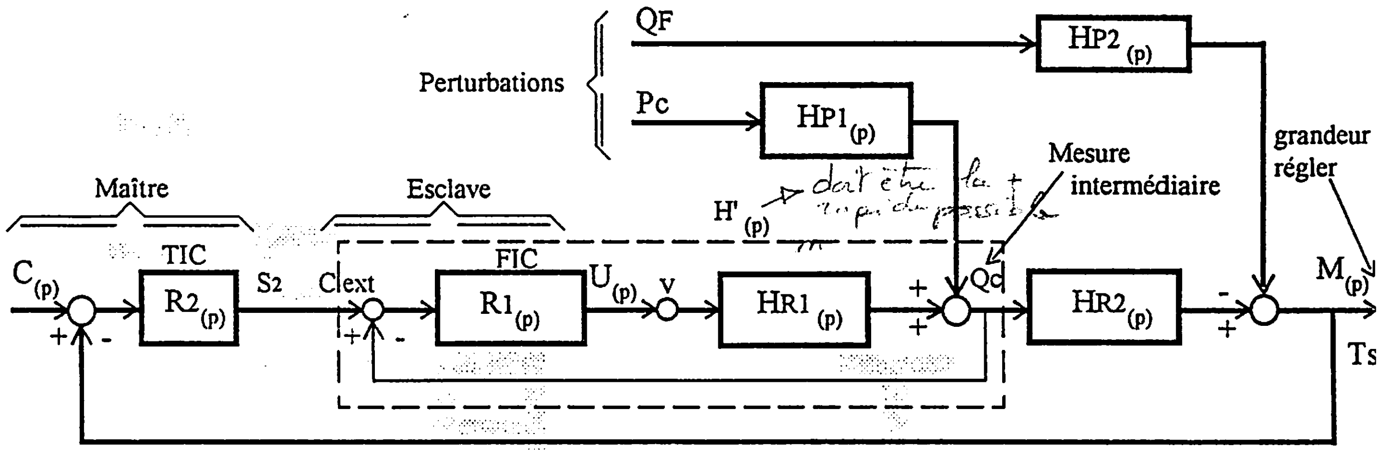
b) T.I. de l'installation :



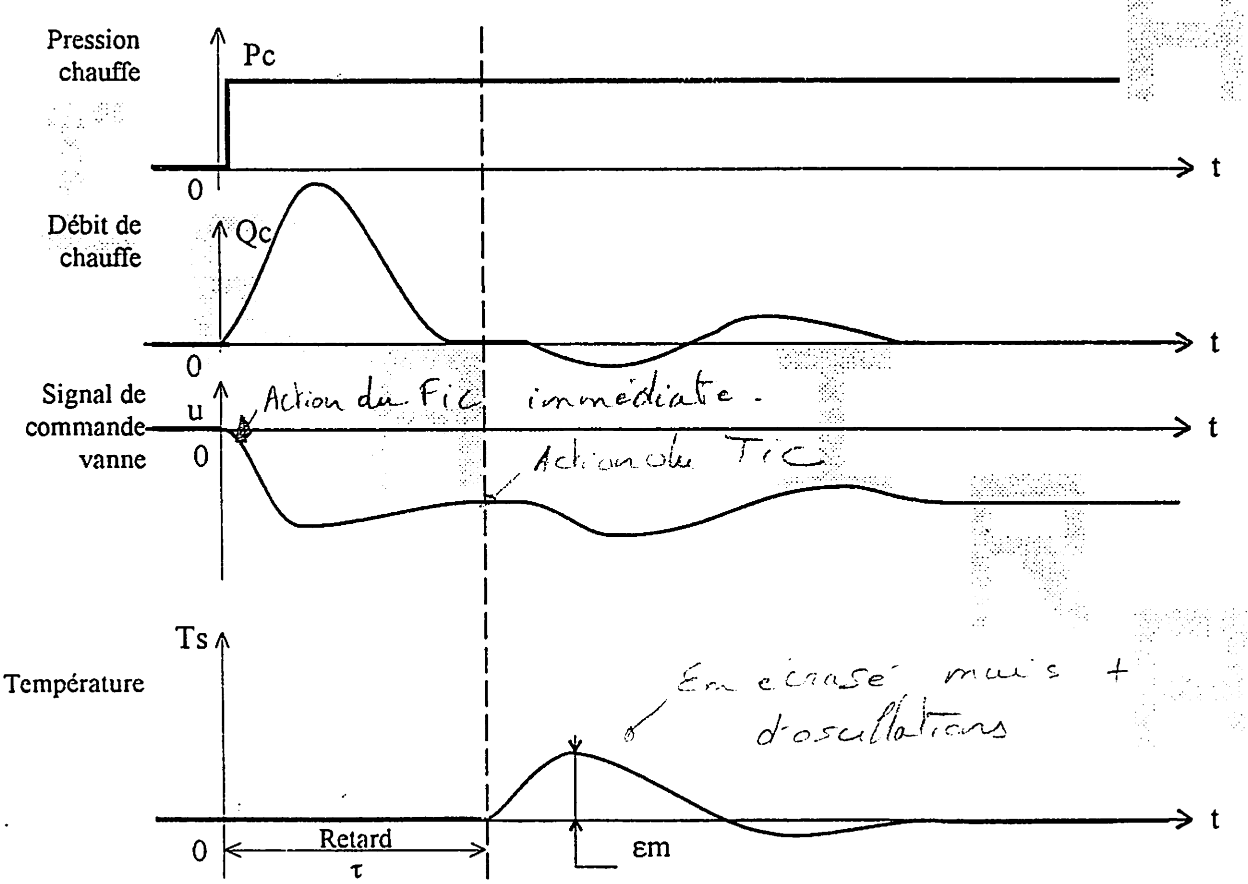
Ts : Grandeur à régler
Qc : Grandeur réglante
QF : Débit de charge
Te : Température d'entrée
Tc : Température de chauffe

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

c) Schéma fonctionnel :



d) Allure des signaux lors d'une perturbation de pression de chauffe (Pc) :



Il faut que la boucle interne ait un temps de retard < à celui de la boucle externe

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

e) Terminologie :

- Boucle externe	⇒	Régulateur	TIC (R_2)
		Régulateur	maître
		Régulateur	pilote
		Régulateur	primaire
		Régulateur	externe
		Régulateur	menant
- Boucle interne	⇒	Régulateur	FIC (R_1)
		Régulateur	esclave
		Régulateur	asservi
		Régulateur	secondaire
		Régulateur	interne
		Régulateur	mené

Le régulateur maître (TIC) reçoit la mesure de la grandeur à régler (Ts) et sa sortie va piloter la consigne externe (Ce) du régulateur esclave (FIC).
ou des régulateurs esclave

Le régulateur esclave (FIC) reçoit la mesure de la grandeur réglante (Qc) et sa sortie commande la vanne (TV).

Modes de fonctionnement :

- Régulateur maître : Manuel => on casse la cascade
  Automatique avec consigne interne
- Régulateur esclave : Manuel
  Automatique avec consigne interne
  Automatique avec consigne externe

f) Réglage d'une régulation en cascade :

Les étapes à suivre sont :

- Détermination du sens d'action des régulateurs :

- Commencer par déterminer le sens d'action du régulateur esclave en tenant compte du sens d'action de l'organe de réglage et de l'évolution de la mesure intermédiaire.

- Puis déterminer le sens d'action du régulateur maître.

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

- *Réglage de la boucle interne (régulateur esclave) :*

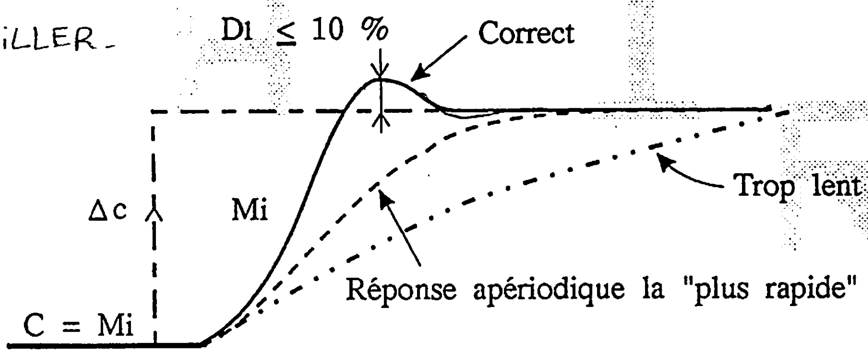
- Passer le régulateur esclave en consigne interne afin de le rendre indépendant du régulateur maître

  - si la boucle interne est une boucle rapide (DEBIT), la régler par approches successives.
  - si la boucle interne a une certaine inertie, on peut utiliser les différentes méthodes étudiées précédemment.

IMPERATIF

- Après réglage des actions sur le régulateur esclave, effectuer un test en asservissement afin de vérifier que la réponse de la mesure intermédiaire est apériodique ou a un facteur d'amortissement nul.

LES BOUCLES INTERNES NE DOIVENT SURTOUT PAS OSCILLER.



Nota : S'il y avait plusieurs boucles internes, après réglage, elles doivent être toutes apériodiques.

- Passer le régulateur esclave en consigne externe (cascade) et en automatique.

- *Réglage de la boucle externe (régulateur maître) :*

Pour régler la boucle externe, on choisit une des méthodes de réglage suivantes :

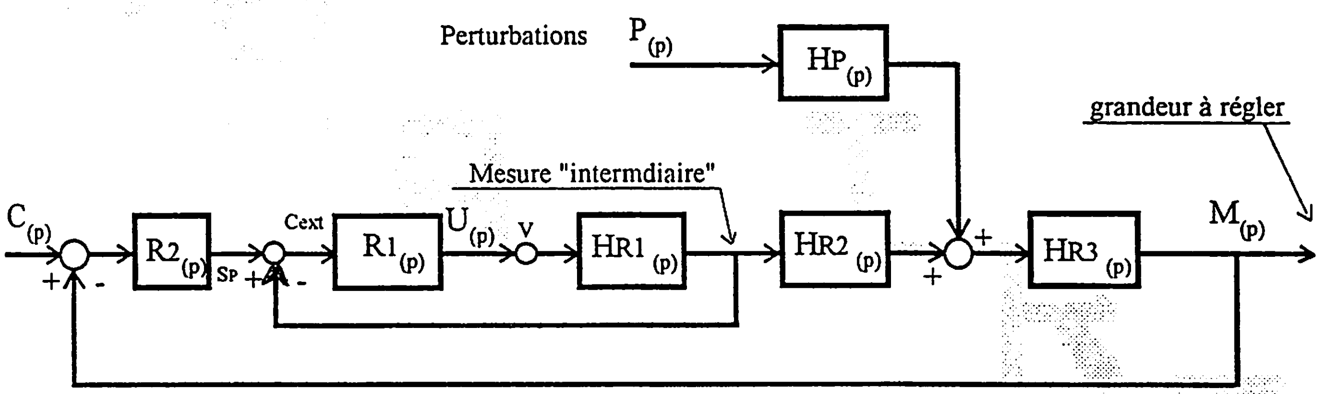
- Réglage par approches successives
- Réglage par la méthode de Ziegler et Nichols
- Réglage par le calcul des actions après identification de la fonction de transfert réglante du procédé.

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

g) *Performances :*

La cascade n'apporte pas ou peu d'amélioration sur un test en asservissement. Son objectif n'est pas de diminuer le régime transitoire global.

L'efficacité de la cascade est inopérante si une perturbation se produit après la mesure intermédiaire.

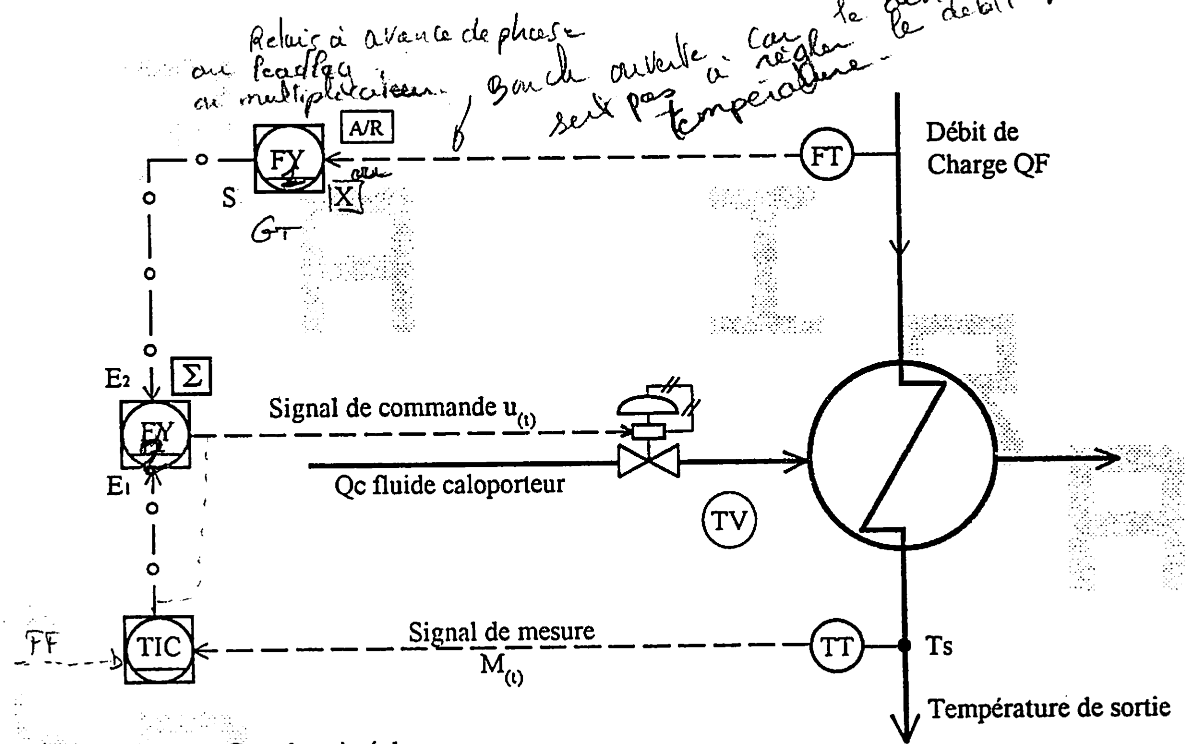


Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

3.2 CAS D'UNE REGULATION MIXTE :

a) ***Objectif*** **: Minimiser les effets d'une grandeur perturbatrice agissant directement sur la variable à régler.**

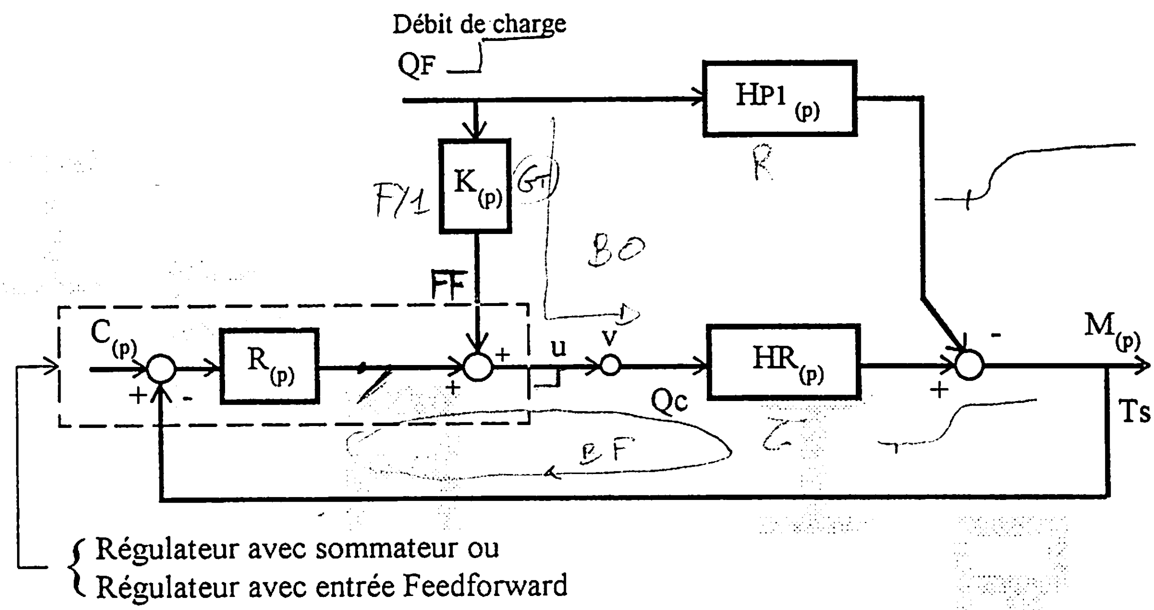
b) T.I. de l'installation :



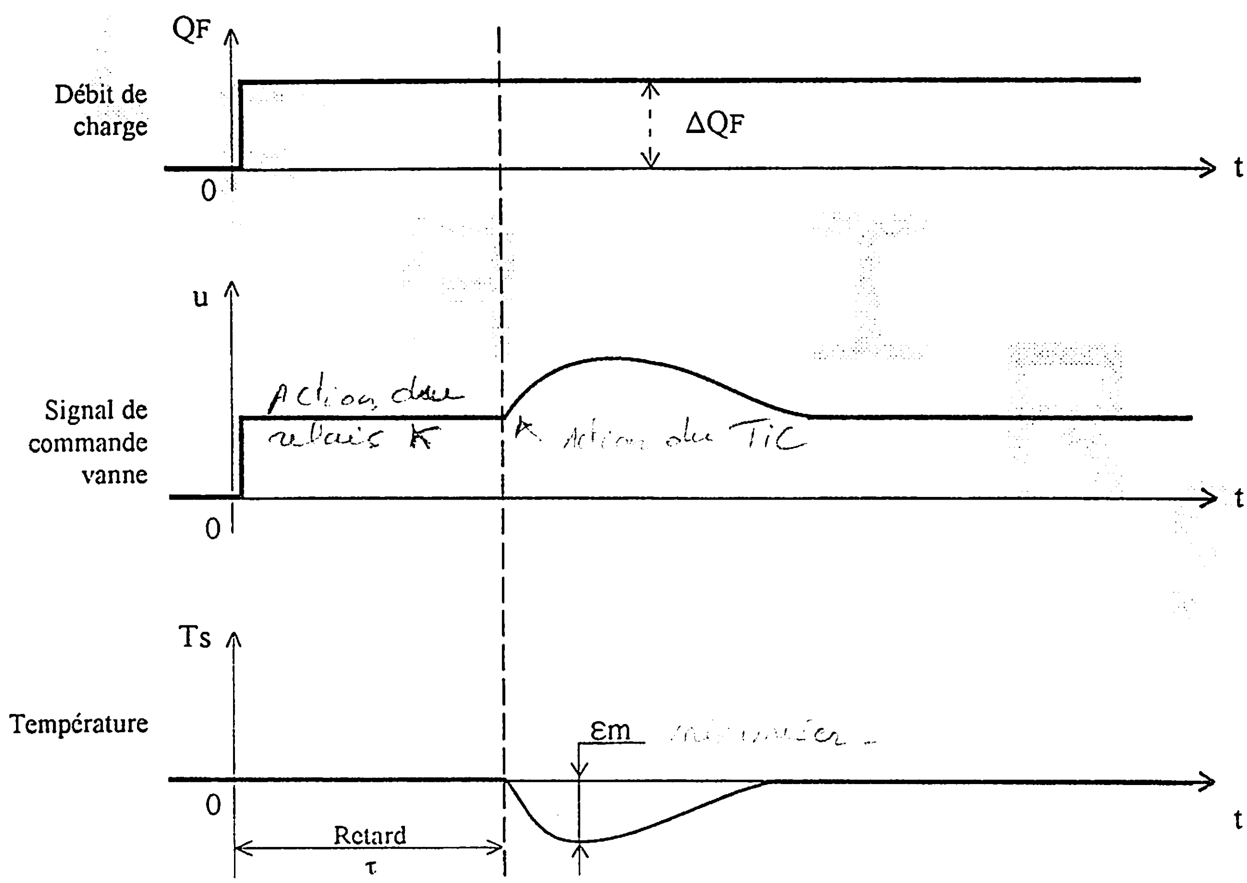
Ts : Grandeur à régler
Qc : Grandeur réglante
QF : Débit de charge
Te : Température d'entrée
Tc : Température de chauffe

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

c) *Schéma fonctionnel :*



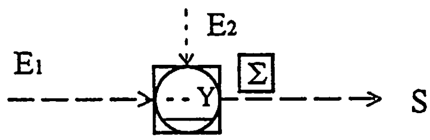
d) *Allure des signaux lors d'une perturbation du débit de charge QF :*



Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

e) Etude du sommateur et du relais avance retard de phase :

- ***Sommateur*** : Opérateur statique réalisant une somme algébrique de signaux standards.



Expression de la sortie :

$$S = \pm E_1 \pm E_2 \pm Bo \quad \text{ou}$$

$$S = \pm K_1 . E_1 \pm K_2 . E_2 \pm Bo$$

K_1, K_2 : Coefficient de pondération affectant les entrées : (Ratio)

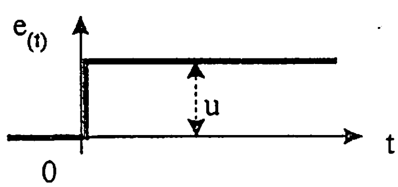
Bo : Coefficient de décalage : (Bias).

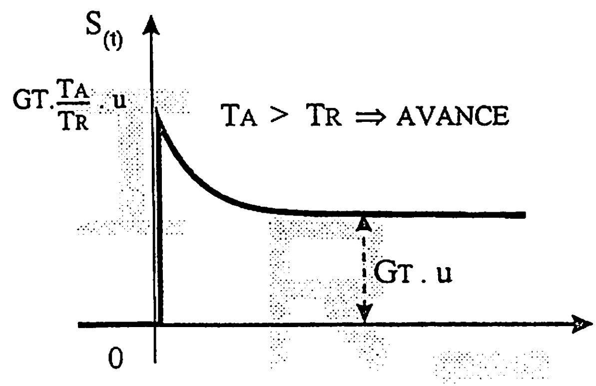
- ***Relais avance retard de phase :*** Souvent on ne met que du Gain -

- Fonction de transfert $H_{(p)} = \dfrac{G_T\ (1 + T_A.p)}{1 + T_R.p}$

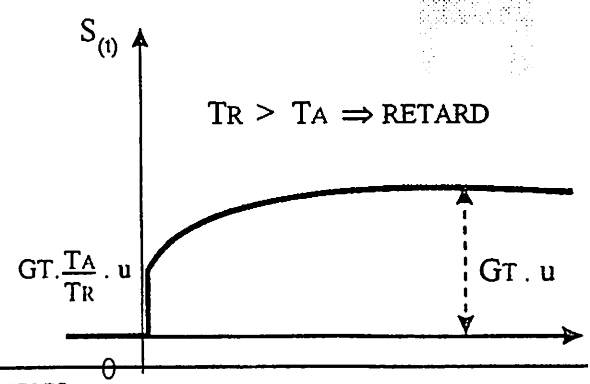
avec G_T : gain de temps
T_A : temps d'avance
T_R : temps de retard

Réponse à un échelon :





$$E_{(p)} \rightarrow \boxed{\dfrac{G_T\ (1 + T_A.p)}{1 + T_R.p}} \rightarrow S_{(p)}$$



f) Réglage d'une régulation mixte :

- Réglage de la boucle fermée : (du régulateur $R_{(p)}$)

- Rendre inopérante la boucle ouverte en affichant le gain de tendance égal à zéro soit :

  - sur le relais A/R : $\Rightarrow$ $G_T = 0$
  - sur l'entrée E2 du sommateur : $\Rightarrow$ $K_2 = 0$

- Choisir une des méthodes suivantes :

  - Réglage par approches successives
  - Réglage par la méthode de Ziegler et Nichols
  - Réglage par le calcul des actions après identification du procédé.

- Réglage de la boucle ouverte :

La difficulté de mise au point réside dans le fait qu'on n'a pas toujours accès à la grandeur perturbatrice pour la faire évoluer.

(1) ***Par identification*** : Identifier $H_{R(p)}$ et $H_{P(p)}$.

$$K_{(p)} = \frac{H_{P(p)}}{H_{R(p)}} = \frac{\text{Fonction de transfert perturbatrice}}{\text{Fonction de transfert réglante}}$$ Irréalisable si $\tau > R$

$$\text{si} \quad \overbrace{H_{R(p)} = \frac{G_S \cdot e^{-\tau . p}}{1+\theta . p}}^{\text{Fonction de transfert réglante}} \quad \text{et} \quad \overbrace{H_{P(p)} = \frac{G_P \cdot e^{-R.p}}{1+T . p}}^{\text{Fonction de transfert perturbatrice}}$$

$$\text{avec } K_{(p)} = \frac{G_T\,(1 + T_A . p)}{1 + T_R . p}$$: Relais AVANCE RETARD de PHASE

$$\boxed{G_T = \frac{G_P}{G_S}} \quad ; \quad \boxed{T_A = \theta} \quad ; \quad \boxed{T_R = T}$$

G_S : gain statique de F de T réglante
G_P : gain statique de F de T perturbatrice
θ : constante de temps de la F de T réglante
T : constante de temps de la F de T perturbatrice

Remarque :

Pratiquement, il est difficile de déterminer la fonction de transfert perturbatrice $H_{P(p)}$. Aussi, pour régler $K_{(p)}$, on utilise des méthodes basées sur l'observation de l'évolution des signaux.

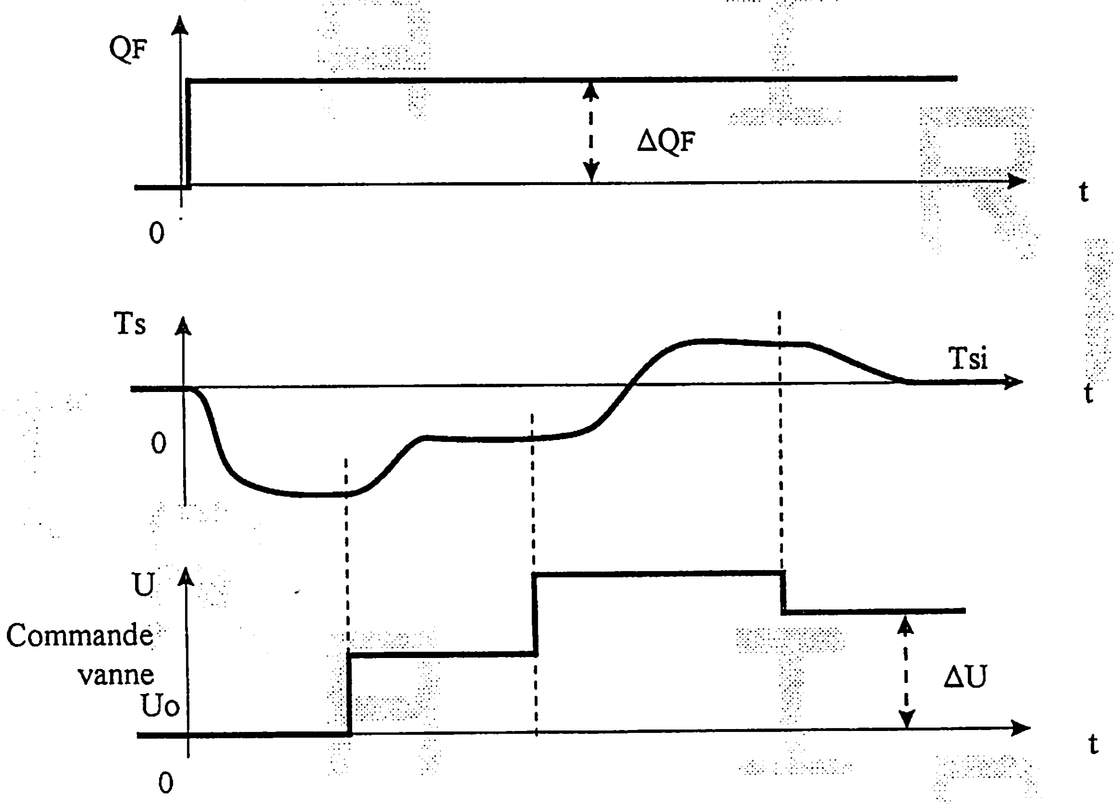
Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

(2) *Réglage "pratique" du gain de tendance GT :*

Nous donnons deux méthodes :

Première méthode : Commander la vanne en manuel :

- Stabiliser la mesure au point de fonctionnement
- Effectuer une variation sur le débit de charge $\Delta QF \Rightarrow$ (Δ . Perturbation)
- A l'aide de la commande de la vanne (u), agir progressivement pour ramener la température Ts à sa valeur initiale. Noter la valeur de Δu.



- Calculer GT : $\boxed{GT = \dfrac{\Delta U\%}{\Delta QF\%}}$

P = 999 D = 0
I = 9999

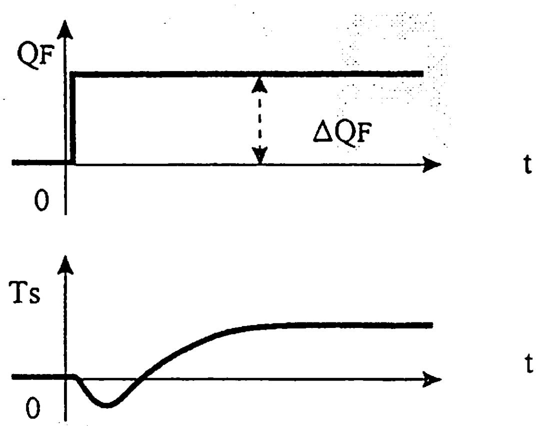
- Revenir aux conditions initiales pour QF et U | puis corriger GT
- Inhiber la boucle de régulation
- Afficher la valeur GT sur le relais avance retard de phase

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

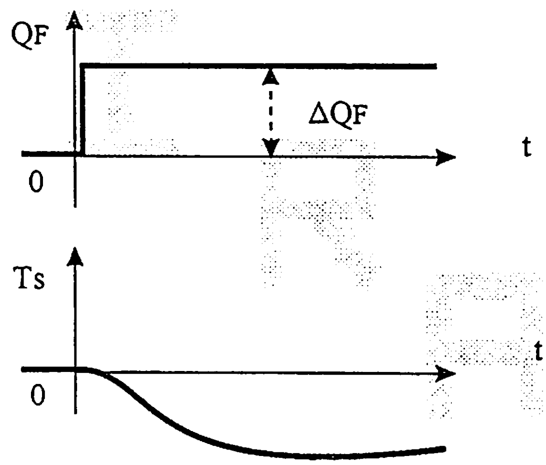
- ***Deuxième méthode : Seule, la régulation en boucle ouverte est active (en auto)***

Rendre inopérant la régulation en boucle fermée. Tributaire de la technologie du DCS

- Stabiliser la mesure au point de fonctionnement
- Afficher sur le relais avance retard de phase une valeur GT, mettre TA = TR = 0
- La régulation en boucle ouverte en auto
- Effectuer une variation sur le débit de charge ΔQF
- Observer l'évolution de l'enregistrement du signal de la grandeur à régler (température Ts)

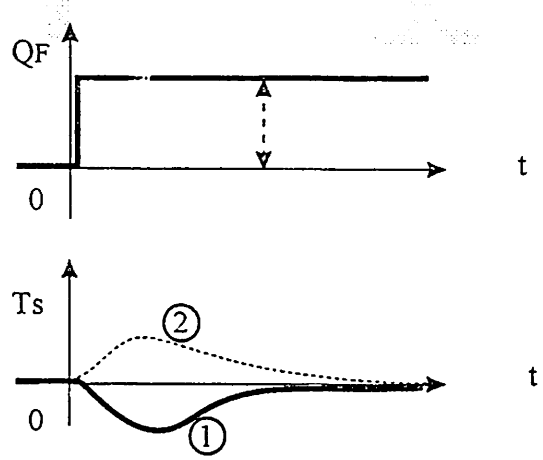


GT trop grand



GT trop petit

- Revenir aux conditions initiales
- Modifier la valeur de GT par approches successives jusqu'à obtenir le résultat de la figure ci-après (soit ① ou ②)



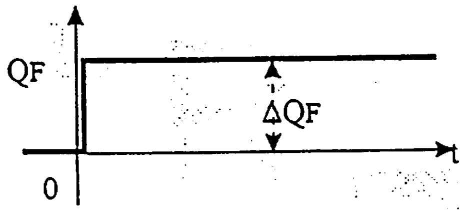
GT correct

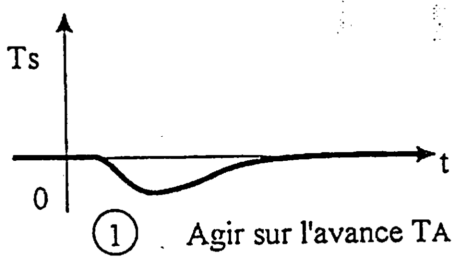
Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15

Si TA et TR n'apportent rien => ne pas les mettre.

- ***Réglage de l'avance TA et du retard TR :*** avec boucle fermée inopérante
(P= 999% I = 9999 D = 0)

Après avoir réglé correctement le gain GT, suivant le type de r éponse obtenue sur la mesure, on essaiera de minimiser la surface de l'écart en agissant sur TA ou TR.





Agir sur l'avance TA

Fonction de transfert réglante plus lente que la perturbatrice

Agir sur l'avance TR

Fonction de transfert réglante plus rapide que la perturbatrice

Pour chaudière : 3 éléments = mixte + cascade.

Chemin des Moines - 13644 ARLES
Tél: 90.99.47.00 / Fax: 90.93.03.15