



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT
SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE CONSTANTINE I

Faculté des Sciences de la Technologie

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

جامعة قسنطينة 1

كلية علوم التكنولوجيا

قسم: هندسة التكييف

N° d'ordre :

Série :

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du
Diplôme de Magistère en Thermique de bâtiment et réfrigération.

« Thème »

**Simulation du réglage optimal des installations
de chauffage et de climatisation avec les
régulateurs progressifs**

Présenté Par

BENLAKHLEF Messaoud

Jury de thèse :

Président de jury : Pr BELHAMRI Azeddine «Pr-Université de Constantine 1 »

Examineurs : Pr MAHRI Zine labiddine «Pr-Université de Constantine 1 »

Dr BOUOUDEN Sofiane « MCA-Université de khenchela »

Directeur de la thèse : Dr BACHTARZI Abdelmalik «MCA-Université de Constantine1»

Avant-propos

Je voudrais avant tout remercier ceux qui m'ont aidé, guidé et supporté. Leur présence m'a permis d'achever cette thèse dans de très bonnes conditions :

M. BACHTARZI Abdelmalik, mon directeur de thèse, pour m'avoir donné la possibilité de réaliser cette thèse, par son savoir faire technique et sa grande disponibilité. Il a su porter une attention quotidienne à l'avancement de mes recherches.

Pr BELHAMRI Azeddine, Pr MAHRI Zine labiddine, Dr BOUOUDENE Sofiane d'avoir accepter la participation de l'évaluation de ce travail.

Je remercie également Pr GOMRI Rabah, Pr KAABI Abdenacer Pr ROUABAH Mohamed Salah qui n'ont épargné aucun pour nous donner le savoir et nous mettre sur rail

Enfin, je souhaiterais remercier ma grande famille et mes nombreux amis pour leur présence et leurs encouragements et surtout mon ami BENLATRECHE Adel. Ils ont eux aussi une grande importance dans le bon déroulement de ma thèse.

Résumé

L'objectif de ce travail est de développer une régulation optimale sur les modèles décrivant les installations de chauffage et de climatisation. Ces systèmes peuvent présenter quelques contre performances : une précision permanente insuffisante, une marge de stabilité trop faible (instabilité), un temps de réponse trop élevé, un dépassement trop important, au regard des spécifications d'un cahier des charges. Il est donc souvent nécessaire d'intégrer dans la boucle un organe appelé régulateur dont l'objectif est d'améliorer les performances de la boucle fermée. Le régulateur le plus répandu est le régulateur ' Proportionnel, Intégral, Dérivateur' ou PID. Son rôle principal est de satisfaire les spécifications contenues dans un cahier des charges. Celles-ci peuvent être formulées de différentes manières, mais dans tous les cas, elles traduisent les performances relatives à la stabilité, à la précision et à la rapidité. Ce régulateur doit permettre de répondre au cahier des charges et de réaliser le meilleur compromis entre les spécifications lorsque celle-ci ne peuvent pas être satisfaites simultanément et ce dans le but d'avoir le réglage optimal.

Compte tenu de sa simplicité et de sa performance, il est de ce fait utilisé sur la grande majorité des installations du Génie Climatique. Notre sujet permettra de comprendre le fonctionnement d'un PID, de déterminer la structure de réglage la mieux adaptée à un processus et de déterminer les paramètres les mieux adaptés par des méthodes basées sur la pratique ou issues de développements théoriques.

Mots Clés : *Régulation Progressive, PID, Stabilité, Précision, Rapidité, Fonction de Transfert, Chauffage, Climatisation*

Abstract

The objective of this work is to develop an optimal control on models describing the heating and air conditioning. These systems may have some performance against : a permanent insufficient accuracy, a too low margin of stability (instability), a response time too high, an excessive overtaking, under technical specifications. It is often necessary to include in the loop body called a regulator which objective is to improve the performance of the closed loop. The most common regulator is the 'Proportional regulator, Integral diverter' or PID. Its main role is to meet the included technical specifications. These can be formulated in various ways, but in all cases they reflect the relative performance stability, precision and speed .. This controller should satisfy the specifications and achieve the best compromise between the specifications when it can not be satisfied simultaneously and in order to have the optimal setting. Given its simplicity and performance, it is thus used in the vast majority of HVAC installations. Our topic will include the operation of PID to determine the control structure best suited to a process and to determine the parameters best suited by methods based on the practice or from theoretical developments.

Keywords : *Progressive control, PID, Stability, Accuracy, Speed, Transfer Function, Air conditioning.*

ملخص

الهدف من هذا العمل هو السيطرة المثلى على نماذج تصف التدفئة وتكييف الهواء. قد يكون بعض هذه الأنظمة ضد الأداء: قليل الدقة، هامش الاستقرار منخفض للغاية (عدم الاستقرار)، وقت الاستجابة عالي جداً، والكثير من التجاوز، بالنظر إلى مواصفات دفتر الشروط فمن الضروري في كثير من الأحيان

أن تدرج في هذه الأنظمة حلقة تسمى المنظم الذي يهدف إلى تحسين أداء الدائرة المغلقة. المنظم الأكثر شيوعاً هو منظم 'نسبي، مشتق، متكامل، و دوره الرئيسي هو تلبية المواصفات الواردة في دفتر الشروط. هذا يمكن أن يصاغ بطرق مختلفة، ولكن في جميع الحالات لأنه يعكس على استقرار، الأداء والدقة والسرعة، وحدة التحكم هذه يجب تلبية دفتر الشروط، وتحقيق أفضل حل وسط بين المواصفات،

نظراً لبساطته و حسن أدائه فإنه يستخدم في غالبية أنظمة التدفئة وتكييف الهواء. وسوف يشمل موضوعنا دراسة طريقة عمل ن.م.م، لتحديد هيكل التعديل الأنسب وتحديد المعايير الأنسب بالطرق استناداً إلى الممارسة أو من التطورات النظرية

الكلمات الرئيسية:

التعديل التدريجي, PID, الاستقرار دقة، سرعة، وظيفة نقل، التدفئة وتكييف الهواء.

Table des matières

Page de titre	
Avant-propos	
Résumé	
Abstract	
ملخص	
Table des matières	
Table des figures	
Liste des tableaux	
Liste des symboles	
Introduction générale	1
Chapitre I : Principes de régulation et bases théorique	
I.1	Introduction4
I.2	But et principe4
I.3	Définitions5
I.4	Les Boucles7
I.4.1	Les boucles ouvertes7
I.4.2	Les boucles fermées8
I.4.3	Association boucle ouverte et boucle fermée8
I.4.4	Mise au point de la boucle ouverte9
I.4.5	Mise au point de la boucle fermée9
I.4.6	Eléments perturbateurs d'une boucle de régulation10
I.5	Les éléments constituant une boucle de régulation11
I.5.1	Les organes de détections ou de mesure11
I.5.1.1	Sondes passives11
I.5.1.2	Sondes actives11
I.5.1.3	Sondes métalliques (passives)11
I.5.1.4	Thermocouples12
I.5.1.5	Thermistances à coefficient de température positif13
I.5.2	Types de régulation et les régulateurs14
I.5.2.1	Types de régulation14
I.5.2.1.1	Régulation analogique14
I.5.2.1.2	Régulation numérique15

I.5.2.1.3	Régulation pneumatique	17
I.5.2.2	Les régulateurs	19
I.5.2.2.1	Régulateur à action continue (progressifs)	19
I.5.2.2.1.1	Régulateur proportionnel	19
I.5.2.2.1.2	Régulateur proportionnel et intégral (PI)	20
I.5.2.2.1.3	Régulateur proportionnel et dérivé (PD)	20
I.5.2.2.1.4	Régulateur proportionnel intégral et dérivé (PID)	21
I.5.2.2.2	Régulateurs à action discontinue	21
I.5.2.2.2.1	Régulation tout ou rien (discontinue)	21
I.5.2.2.2.2	Régulation flottante	22
I.5.3	Les organes de réglage pour les installations.....	22
	de chauffage et de climatisation	
I.5.3.1	Les vannes	22
I.5.3.1.1	Vannes motorisées	25
I.5.3.1.2	La vanne à 2 voies	25
I.5.3.1.3	La vanne à 3 voies	25
I.5.3.1.4	La vanne à 4 voies	27
I.5.3.2	Commande de chauffage et climatisation	28
I.5.4	Chaine de régulation complète	29
I.6	Lois de régulation	29
I.6.1	Comportement thermique d'un bâtiment	29
I.6.2	Lois à une seule pente en chauffage	30
I.6.3	Lois à plusieurs pentes en chauffage	31
I.6.4	Lois en climatisation	31
I.7	Conclusion	34
Chapitre II : Identification et Modélisation des systèmes		
II.1	Introduction	35
II.2	Modélisation des systèmes linéaires	35
II.2.1	Définition de la notion de système	35
II.2.2	Fonction de transfert d'un système linéaire	36
II.3	Modèles de quelques systèmes linéaires	39
II.3.1	Systèmes du premier ordre	39
II.3.1.1	Exemple d'un circuit Electrique	39
II.3.1.2	Exemple d'un système Hydraulique	40

II.3.1.3	Exemple d'un système Mécanique en translation	41
II.3.2	Systèmes du second ordre	42
II.3.2.1	Exemple d'un système Mécanique de translation	42
II.3.2.2	Exemple d'un Système électromécanique	43
II.3.2.3	Exemple d'un système Electrique de second ordre	45
II.3.3	Systèmes pouvant être du premier ou du deuxième ordre.....	46
II.3.3.1	Exemple d'un système mécanique de rotation	46
II.4	Identification en Boucle Ouverte	47
II.4.1	Les différents modèles d'identification des systèmes	47
II.4.1.1	Modèle du 1 ^{er} ordre	47
II.4.1.1.1	Exemple d'un système du 1er ordre retardé,.....	48
	système thermique (soufflerie)	
II.4.1.2	Modèle du 2eme ordre	49
II.4.2	Méthode de Strejc	52
II.4.3	Méthode de Broïda	53
II.5	Éléments de transfert	55
II.5.1	Élément P	55
II.5.2	Élément PT1	55
II.5.3	Élément I	56
II.5.4	Élément DT1	57
II.5.5	Élément D.....	57
II.5.6	Élément à temps mort	57
II.6	Les milieux réglés	58
II.6.1	Délimitation des milieux réglés	58
II.6.2	Fonction de transfert des milieux réglés	58
II.6.3	Milieux réglés statiques	59
II.6.3.1	Milieux réglés statiques de 1 ^{er} ordre	59
II.6.3.2	Courbes caractéristiques de milieux régler statiques	59
II.7	Identification expérimentale d'un milieu réglé statique	60
II.7.1	Réponse indicielle de la grandeur de réglage.....	61
II.8	Identification d'un système de chauffage avec SIMTRAIN	62
II.9	Conclusion	68
Chapitre III : Méthodes de réglage des régulateurs et leurs actions.		
III.1	Introduction	69

III.2	Les actions des régulateurs progressifs	69
III.2.1	Action proportionnelle	69
III-2.1.1	Régulation proportionnelle	70
III.2.1.2	Régulation proportionnelle en chauffage	70
III.2.1.3	Régulation proportionnelle en refroidissement	71
III.2.1.4	Bande proportionnelle	71
III.2.2	Actions intégrales	72
III.2.2.1	Essai de concrétisation de l'action intégrale	73
III.2.2.2	Temps d'intégrale	74
III.2.2.3	Vitesse de déplacement de l'organe de réglage	75
III.2.3	Actions dérivées	76
III.2.4	Actions PID	76
III.3	Rôle des actions dans les boucles	78
III.3.1	Rôle de l'action proportionnelle (P)	78
III.3.2	Rôle de l'action Intégrale	79
III.3.3	Rôle de l'action dérivée	79
III.4	Méthodes de réglage des actions	80
III.4.1	Méthode par approches successives	80
III.4.1.1	Réglage par approches successives	80
III.4.1.2	Réglage de l'action proportionnelle	81
III.4.1.3	Réglage de l'action dérivée	82
III.4.1.4	Réglage de l'action intégrale	82
III.4.2	Méthode nécessitant l'identification du procédé	83
III.4.2.1	Réglage à partir de l'identification du procédé	83
III.4.2.2	Cas d'un procédé stable	83
III.4.2.3	Cas d'un procédé instable	85
III.4.3	Méthode de Ziegler et Nichols	86
III.4.3.1	Réglage par la méthode de Ziegler et Nichols	86
III.4.3.2	Mode opératoire	86
III.4.3.3	Calcul des actions	87
III.4.4	Méthode de Cohen et Coon.....	87
III.5	Conclusion	90
Chapitre IV : Testes de simulation.		
IV.1	Introduction	91

IV.2	Rappel de Simulink	91
IV.3	Simulation de quelques fonctions usuelles dans	95
	le domaine de génie climatique.	
IV.3.1	Fonction de transfert du 1er ordre avec retard	95
IV.3.2	Fonction de transfert du 2eme ordre	106
IV.3.3	Fonction de transfert du 3eme ordre	111
IV.4	Conclusion	115
	Conclusion générale	117
	Annexe1	120
	Annexe 2.....	122
	Annexe 3.....	126
	Bibliographie	129

Table des figures

I.1 La température en fonction du temps.....	6
I.2 La température en fonction du temps.....	7
I.3 Installation de chauffage en boucle ouverte.....	7
I.4 Installation de chauffage en boucle fermée.....	8
I.5 Installation de chauffage en boucle ouverte et fermée.....	9
I.6 Schéma de principe d'une installation (ouverte et fermée)	10
I, 7 Schéma de principe d'un régulateur dans une installation de climatisation.....	10
I.8 La variation de la résistance en fonction des grandeurs physique contrôlées.....	11
I.9 La variation de la tension en fonction des grandeurs physique contrôlées.....	11
I.10 La variation de la résistance en fonction de la température.....	12
I.11 Schéma de principe d'un thermocouple.....	12
I.12 Relation complexe pour le couple de température entre 4°C;27°C.....	13
I.13 Principe de fonctionnement d'une thermistance CTP.....	14
I.14 Principe d'une régulation analogique.....	14
I.15 Emplacements de pont de Wheatstone dans une installation.....	15
I.16 Unité centrale (U.C).....	16
I.17 Exemple de comptage des différents types.....	17
de points d'une centrale de traitement d'air	
I.18 Schéma de principe d'une régulation pneumatique.....	18
I.19 Schéma de principe d'une installation de préparation.....	18
d'eau chaude ou d'eau glacée à régulation pneumatique	
I.20 Schéma de principe d'une régulation proportionnelle.....	19
I.21 Allure des signaux en boucle ouverte avec un régulateur(P).....	19
I.22 Allure des signaux en boucle ouverte avec un régulateur(PI).....	20
I.23 Allure des signaux en boucle ouverte avec un régulateur(PD).....	20
I.24 Allure des signaux en boucle ouverte avec un régulateur(PID).....	21
I.25 Répartition tout ou rien avec hystérésis.....	21
I.26 Allure des signaux d'une régulation tout ou rien.....	22
I.27 Si la température extérieure est de 3°C, la température de l'eau	23
de chauffage est réglée à 70°C	
I.28 Puissance émise par un radiateur en fonction de son débit d'eau.	23
Par exemple si on veut diminuer de 50 % la puissance (T. ext = + 5°C	

au lieu de -10°C), le débit dans le radiateur doit être abaissé à $\pm 20\%$ de son débit nominal

I.29 Puissance émise par un radiateur en fonction de son débit et de la température de l'eau	24
I.30 La température extérieure est de 5° , la température de l'eau alimentant les radiateurs est de 50°C si ceux-ci ont été sélectionnés pour 80°C par -10°C de température extérieure de base	25
I.31 Schéma de principe d'une Vanne à 2	25
I.32 Schéma de principe d'une Vanne à 3 Voies	26
I.33 Schéma de principe de montage d'une installation de chauffage pour réglage de température en fonction de la position de la V3V en mélange et en répartition du débit	27
I.34 Schéma de principe de montage d'une installation de chauffage pour réglage de débit en fonction de la position de la V3V en mélange et en répartition du débit	27
I.35 Les positions de la vanne à 4 voies	28
I.36 Schéma de principe de montage d'une installation de chauffage de deux circuits à l'aide d'une V4V	28
I.37 Installation de chauffage	30
I.38 Régulation d'une installation de chauffage	30
I.39 Présente 1 seule pente de chauffage	31
I.40 Présente deux pentes de chauffage	31
I.41 Installation de climatisation (CTA)	32
I.42 Présente une pente de chauffage et autre de climatisation	32
II.1 Circuit électrique RL	39
II.2 Modèle du circuit électrique	40
II.3 Modèle d'un système hydraulique	41
II.4 Modèle d'un système mécanique en translation	42
II.5 Modèle d'un système mécanique en translation du second ordre	43
II.6 Modèle d'un moteur à courant continu	43
II.7 Circuit électrique RLC	45
II.8 Modèle du circuit électrique	45

II.9	Système mécanique de rotation.....	46
II.10	Représentation du modèle du système mécanique de rotation.....	46
II.11	Représentation du modèle du système mécanique.....	47
II.12	Réponse indicielle du 1er ordre.....	48
II.13	Réponse indicielle du 1er ordre avec retard.....	48
II.14	La réponse indicielle.....	48
II.15	Calcul caractéristique a partir de la R.I.....	49
II.16	Réponse indicielle du 2eme ordre.....	51
II.17	Amortissement d'un système.....	51
II.18	Réponses de modèles de Strejc pour $K = 1, r = 1$	52
II.19	Méthode pour obtenir T_u et T_g	53
II.20	Courbe réelle approché par un modèle de Broïda.....	54
II.21	Courbe réelle approché par un intégrateur retardé.....	55
II.22	Réponse indicielle d'un organe PT1.....	56
II.23	L'enregistrement de la température en fonction du temps.....	60
II.24	Schéma de principe d'un système de chauffage.....	63
II.25	La relation entre la durée de fonctionnement et la puissance.....	63
II.26	Schéma de principe d'une installation de chauffage.....	64
III.1	Schéma de principe d'une installation permettant une régulation proportionnelle en chauffage.....	70
III.2	Loi des signaux et schéma de fonctionnement.....	70
III.3	Schéma de principe d'une installation permettant une régulation proportionnelle en refroidissement.....	71
III.4	Loi des signaux.....	71
III.5	Schéma de principe d'une installation permettant une régulation proportionnelle en climatisation.....	72
III.6	Loi des signaux.....	72
III.7	Action intégrale.....	73
III.8	Evolution de la grandeur physique contrôlée en fonction des actions proportionnelles seules ou des actions proportionnelles et intégrales.....	74
III.9	Etude du temps d'intégrale.....	75
III.10	Etude de la vitesse de déplacement de l'organe de réglage.....	75
III.11	Structure PID en série.....	76
III.12	Structure PID en parallèle.....	77

III.13 Structure PID en mixte	77
III.14 Comportement de l'action P sur un procédé.....	78
III.15 Comportement de l'action I sur un procédé.....	79
III.16 Comportement de l'action D sur un procédé.....	80
III.17 Comportement du procédé avec P	81
III.18 Comportement du procédé avec PID.....	82
III.19 Comportement du procédé avec I.....	83
III. 20 Echelon sur la commande de la vanne et la réponse de la mesure.....	84
III. 21 Echelon sur la commande de la vanne et la réponse de la mesure.....	85
III.22 Identification d'un système par Cohen-Coon.....	88
IV. 1 Commande simulink.....	92
IV. 2 Bibliothèques du simulink.....	92
IV.3 Blocs dans une bibliothèque.....	93
IV. 4 Schéma d'un ensemble des blocs.....	94
IV.5 Réglage le mode de simulation.....	95
IV. (6.....38) Allure de la réponse indicielle de la température à réglée.....	93-112

Liste des tableaux

I 1 Relation complexe pour le couple de température 0°C et 29°C.....	13
I.2 La comparaison entre la régulation numérique et analogique	15
II.1 Estimer l'ordre, la constante de temps et le retard du modèle de Strejc.....	53
III .1 Les actions P, I, D dans les différents structure de PID.....	77
III .2 Calcul les actions avec la méthode de l'identification du procédé	83
(procédé stable)	
III.3 Calcul les actions avec la méthode de l'identification du procédé.....	85
(Procédé instable)	
III.4 Calcul les actions avec la méthode de Ziegler et Nichols.....	86
III.5 Tableau de Cohen et Coon.....	88
III.6 Réglage des paramètres PID d'un système.....	89
IV.4 Contenu d'une bibliothèque.....	93
IV.2 la compatibilité des régulateurs dans les différents types.....	114
de fonction de transfert	

Liste des symboles :

ε : Erreur statique
X : Mesure
Xc : Consigne
Xp : La bande Proportionnelle
P : Régulateur Proportionnelle
I : Intégrateur
D : Dérivateur
PI : Régulateur Proportionnel, Intégral
PD : Régulateur Proportionnel, Dérivé.
PID : Régulateur Proportionnel, Intégral, Dérivé.
Gr,K : Gain proportionnel
Gs : Gain statique
Ti : Temps d'intégration
Td : Temps dérivé
Text : La température extérieure
Qs : Déperdition de la chaleur
Qe : Apports thermiques
V : Une tension
i : L'intensité du courant
R : Résistance
L : L'inductance
C : Capacité
 Ω : La vitesse de rotation
 Γ : Couple appliqué
J : Moment d'inertie
r ou τ : Le retard
T ou θ : La constante de temps.
 ξ : Coefficient d'amortissement
 ω_n : La pulsation naturelle en (rad/s)
 \prod : Produit
Ydep : Le dépassement
Tdep : Le temps du premier dépassement
 ω_p : Pulsation propre
Tu : Temps mort
Tg : La constante de temps.
Tp : Période propre (pseudo-période)
Tc : Temps critique.
Grc : Gain critique
Tosc : Temps oscillation.
Siso : Une seule entrée et une seule sortie
Mimo : Multi entrées et multi sorties

Introduction générale

Les techniques de la régulation ne sont pas seulement un moyen de commander des processus mais aussi un moyen de réduire les pertes de production, d'augmenter la qualité et la quantité des produits, d'augmenter la disponibilité des unités et de diminuer les coûts marginaux de production.

La régulation des procédés relevant du génie climatique regroupe l'ensemble des moyens matériels et techniques mis en œuvre pour maintenir une grandeur physique à régler, égale à une valeur désirée, appelée consigne. Lorsque des perturbations ou des changements de consigne se produisent, la régulation provoque une action correctrice sur une grandeur physique du procédé, appelée grandeur réglante (ou commande).

La majorité des processus industriels nécessitent de contrôler un certain nombre de grandeurs physiques. Il appartient à la chaîne de régulation de maintenir à des niveaux prédéterminés les paramètres qui régissent le fonctionnement du processus.

Toute chaîne de régulation comprend trois maillons indispensables : l'organe de mesure, l'organe de régulation et l'organe de réglage. Il faut donc commencer par mesurer les principales grandeurs servant à contrôler le processus. L'organe de régulation récupère ces mesures et les compare aux valeurs souhaitées, plus communément appelées valeurs de consignes. En cas de non-concordances des valeurs de mesure et des valeurs de consigne, l'organe de régulation envoie un signal de commande à l'organe de réglage (Vanne, moteur, etc.), afin que celui-ci agisse sur le processus. Les paramètres qui régissent le processus sont ainsi stabilisés en permanence à des niveaux souhaités.

Le choix des éléments de la chaîne de régulation est dicté par les caractéristiques du processus à contrôler, ce qui nécessite de bien connaître le processus en question et son comportement.

L'objectif de notre travail porte sur l'étude des régulateurs progressifs et leurs adaptations aux différents systèmes que l'on rencontre en Génie Climatique.

Les régulateurs progressifs répondent à plus de 90% des besoins industriels et le nombre de régulateurs installés dans les processus relevant du Génie climatique se compte par milliers. Malheureusement, malgré l'expérience acquise au fil des ans, les valeurs choisies pour les paramètres de ces régulateurs, ne sont pas toujours satisfaisantes ni adaptées au processus à régler. Notre recherche se propose de décrire les différents régulateurs progressifs exploités et installés au niveau des installations du génie climatique, d'étudier les règles d'adaptation de ces régulateurs et de proposer le réglage optimal.

Le réglage d'une boucle de régulation consiste à choisir la structure du régulateur ainsi que le calcul des paramètres de ce régulateur et ceci doit permettre de répondre au plus grand nombre de contraintes exigées par le cahier de charge du procédé à réguler. Ces contraintes sont liées aux performances du système à régler qui sont de trois ordres : la stabilité, la précision et la rapidité. De nombreuses méthodes de réglage d'une boucle sont possibles selon les besoins de la régulation. Les exigences du cahier des charges sont décrites dans le domaine temporel ; le critère de réglage est alors fixé à partir de la forme de la réponse temporelle souhaitée pour un type d'entrée (par exemple un échelon). Le critère de précision est, bien entendu, intrinsèquement lié à celui du réglage. Le bon réglage est celui qui répondra au meilleur compromis global du cahier des charges.

Notre travail est structuré de la manière suivante :

Après avoir établi une introduction générale dans laquelle les objectifs et la problématique indiqués clairement, le premier chapitre a été consacré aux bases théoriques de la régulation avec la distinction de l'asservissement et la régulation et les différentes boucles que l'on rencontre dans le domaine du réglage. Les éléments fondamentaux qui constituent une chaîne de régulation seront décrits au niveau de ce chapitre.

Le deuxième chapitre portera sur l'identification et la modélisation des processus rencontrés dans le génie climatique. Les modèles auxquels nous nous intéresserons sont des modèles dynamiques linéaires de type fonction de Transfert (modèle de représentation) et qui souvent décrivent le comportement du procédé autour d'un point de fonctionnement particulier ; il ne prend en compte que les petites variations autour de ce point. Les praticiens du réglage ont besoin de ce modèle pour concevoir le régulateur et son réglage à mettre en œuvre afin d'atteindre les objectifs décrits dans le cahier des charges de la régulation d'un procédé. Deux méthodes d'identification seront étudiées : essai en boucle ouverte et un essai en boucle fermée (un régulateur asservi ou régule le système). Une synthèse des différentes fonctions de transfert qui décrivent le mieux les processus du Génie Climatique sera établie et qui regroupera les formes des modèles les plus représentatifs.

Le troisième chapitre sera consacré aux méthodes de réglage expérimentales des régulateurs progressifs et des règles d'adaptation seront élaborées sous forme de tableau et cela pour les différentes structures des régulateurs. Ces méthodes de réglage seront étudiées en boucle ouverte et en boucle fermée. Une synthèse sera élaborée et qui permettra de guider au mieux les praticiens pour le choix du régulateur convenant à un modèle spécifique.

Au quatrième chapitre, des simulations seront élaborées sur les différents modèles qui décrivent au mieux les processus rencontrés en génie climatique. On exploitera le logiciel

SIMULINK et les différentes simulations seront établies sous formes de schémas fonctionnels sur lesquels des tests seront réalisées. Le réglage optimal sera à chaque fois déterminé à partir des résultats établis au troisième chapitre.

Enfin nous terminerons notre étude par une conclusion générale où nous indiquerons notre contribution et surtout les points forts et faibles des approches présentées dans cette étude.

Nous présenterons aussi des perspectives afin de développer ce travail et le concrétiser sur des processus réels du génie climatique.

Chapitre I

Principes de régulation et bases théoriques

I.1 Introduction :

La conduite d'une opération physique ou chimique implique la connaissance et la maîtrise de certains paramètres tels que la pression, la température, le débit, etc... Nous sommes donc amenés à effectuer des "mesures" pour obtenir certaines connaissances indispensables avant d'entreprendre une quelconque action. Dans le domaine de génie climatique, la limitation du champ sensoriel et les possibilités biologiques introduisent des bornes au contrôle direct par l'homme. Ce contrôle sera obtenu par l'intermédiaire d'appareillages spécifiques. Ce sont ces informations qui vont nous permettre de quantifier, comparer et vérifier, dupliquer, recopier, répéter. Ces informations peuvent être locales ou renvoyées en salle de contrôle.

En salle de contrôle on peut accéder à ces informations sur des indicateurs, des enregistreurs et des écrans des consoles sur différentes vues spécifiques.

De façon analogue, les commandes nécessaires à la conduite du procédé s'effectuent soit sur le site, à proximité de l'appareillage, soit à partir de la salle de contrôle-commande, en manuel ou de façon automatique, programmé sur des ordinateurs (régulation numérique).

L'objectif global de la régulation peut se résumer par (mesurer, comparer et corriger)

Cependant, chaque procédé possède ses exigences propres, chaque appareil possède ses propres conditions de fonctionnement. Il est donc indispensable que la régulation soit conçue pour satisfaire aux besoins particuliers liés à la sécurité, aux impératifs de production et aux matériels.

I.2 But et principe

Le but de la régulation est de maintenir automatiquement une grandeur physique à une valeur désirée appelée point de consigne par exemple garantir une température de 22°C dans un local comportant des déperditions en hivers en agissant sur un débit ou sur une température d'eau chaude. Le principe de la régulation est de mesurer en permanence l'écart entre la grandeur physique à régler x et la valeur de consigne x_c :

$$\text{Ecart} = (\text{mesure} - \text{consigne})$$

$$\varepsilon = (X - X_c) \quad (I.1)$$

Et de délivrer ou non un signal de demande d'énergie. Ce signal vient agir sur l'organe de réglage du fluide réglant.

I.3 Définitions :

Grandeur à régler : grandeur physique (température, hygrométrie relative ...) qui doit être maintenue à une valeur déterminée.

Fluide réglant : fluide qui permet d'agir sur la grandeur à régler afin de la maintenir une valeur déterminée, par exemple eau glacée, eau chaude ...

Grandeur perturbatrice : grandeur qui tend à modifier la valeur à régler, par exemple apports thermiques en été, déperditions en hiver. La somme des grandeurs perturbatrices constitue le bilan thermique qui est négatif en hiver et positif en été

Régulation tout ou rien : une machine régulée en tout ou rien fonctionne à pleine puissance ou est à l'arrêt. Ce type de régulation concerne surtout les petites machines (chaudière domestique, climatiseur, réfrigérateur, etc.).

Différentiel : s'applique à la régulation tout ou rien, c'est l'écart de la grandeur physique nécessaire pour passer de l'état 1 à l'état 0. On peut encore dire que c'est l'écart nécessaire pour passer de l'enclenchement au déclenchement de la machine.

Régulation tout ou peu : ce type de régulation permet une puissance intermédiaire entre l'arrêt et la marche à pleine puissance. Une chaudière à deux allures correspond à une régulation tout ou peu.

Régulation étagée : la puissance totale est fractionnée. Dans le cas de condenseurs à air comportant plusieurs ventilateurs, il est possible d'enclencher ou de déclencher en cascade les ventilateurs. Un groupe à eau glacée comportant 6 compresseurs en parallèle et pouvant fonctionner avec 6, 5, 4, 3, 2 ou 1 compresseur correspond à ce type de régulation.

Point de consigne : valeur de la grandeur physique contrôlée qu'il faut maintenir. il a pour symbole X_c

Mesure : valeur instantanée de la valeur à régler. Son symbole est X .

Ecart : différence entre la mesure et la consigne.

EXEMPLES :

Pour une mesure de 24 °C et une consigne de 21 °C, l'écart vaut :

(Mesure – consigne) = (24 – 21) = +3°C il est ici positif

Pour une mesure de 19 °C et une consigne de 21 °C, l'écart vaut

(Mesure – consigne) = (19 – 21) = -2 °C il est ici négatif

Limitation : régulation ou l'on garantit une grandeur maximale ou minimale pour des raisons de confort, d'économie ou de sécurité.

Compensation : régulation ou la valeur de la grandeur physique contrôlée varie proportionnellement à une autre grandeur physique. Par exemple, la température d'un local climatisé peut être modifiée par la température extérieure.

Temps de réponse : retard généré par les inerties des transmetteurs, des régulateurs, des échangeurs, etc. il varie de quelques minutes à quelques heures. Une régulation associée à un chauffage électrique dans une pièce par exemple représente un faible temps de réponse .par contre, une régulation associée un chauffage par le sol représente un temps de réponse important. Ce retard de processus total découle des facteurs suivants :

- des retards purs liés au fait que tout transfert d'énergie demande un temps, un fluide frigoporteur comme l'eau glacée par exemple demande environ 40 s pour être acheminée d'un groupe à eau glacée à une batterie terminale distante de 20 m ;
- des retards capacitifs : une masse d'eau pour s'échauffer demande du temps, les tuyauteries, les échangeurs présentent de l'inertie thermique.

Optimiseurs : dans les bâtiments à usage tertiaire, il est nécessaire de modifier le point de consigne la nuit et le week-end afin de réduire les dépenses énergétiques .ce problème peut être résolu de deux façons : par chronorupteur ou par optimiseur.

Horloge programmable (chronorupteur) : la programmation est la suivante (fig. I.1) enclenchement du régime nuit à 18 h (du 18h à 06h) et enclenchement du régime jour à 06h.les hypothèses suivantes se présentent alors :

- Si la température extérieure est relativement élevée, la température ambiante est obtenue avant 08h, il en découle une dépense d'énergie inutile ;
- Si la température est modérée, la température ambiante est obtenue à l'heure souhaitée (ce qui n'est pas très fréquent) ;
- Si la température extérieure est basse, la température ambiante est obtenue après l'heure d'occupation de bureaux. cette solution est aléatoire. (fig. I.1)

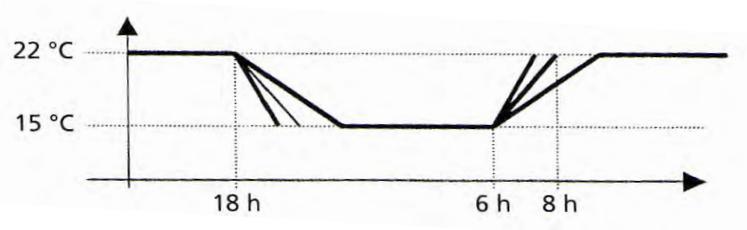


Figure I. 1 la température en fonction du temps

Horloge à mémoire à microprocesseur (optimiseur) : la programmation est la même que pour l'horloge programmable, mais l'appareil est auto-adaptatif. Elle est possible sur une année, un programme différent pouvant être choisi chaque jour. Compte tenu des expériences réalisées durant les jours passés, l'heure de la relance du matin est optimisée afin que la température dans les bureaux soit correcte à l'heure d'occupation. Ce n'est qu'après une semaine environ de raccordement que l'optimiseur commence à avoir un fonctionnement stabilisé. Dans l'exemple (fig. I, 2) la relance du matin est telle que les °C requis à 08h sont effectivement obtenus à cette heure précise. 22°C.

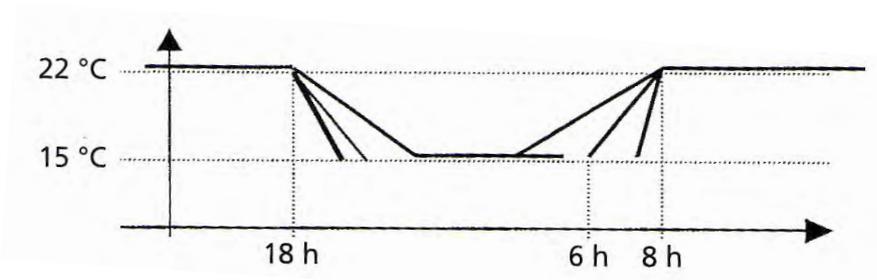


Figure I. 2 la température en fonction du temps

I.4 Les Boucles :

I.4.1 Les boucles ouvertes :

La boucle de régulation de la (Figure. I, 3) constitue une boucle ouverte. La position de l'organe de réglage ne tient compte que de la température extérieure et non de la température du fluide réglant.

Les boucles ouvertes sont possibles si l'on connaît bien la relation entre les grandeurs perturbatrices (ici la température extérieure) et le fluide réglant.

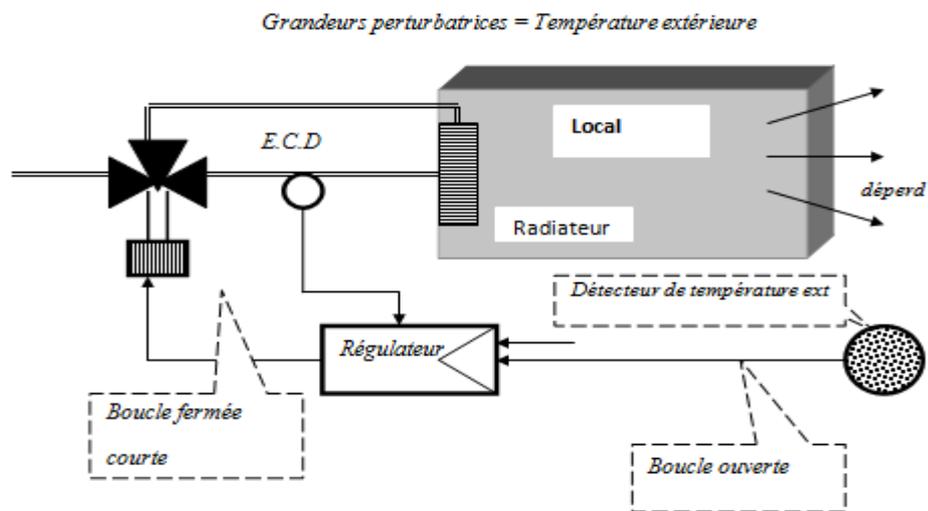


Figure I.3 installation de chauffage en boucle ouverte

I.4.2 Les boucles fermées :

La boucle de régulation de la (fig. I, 4). Constitue une boucle fermée. Lorsque l'écart ($X-X_c$) entre la mesure et la consigne augmente, il y a action sur la vanne 3 voies, et donc sur le fluide réglant, la sonde disposée sur les tuyauteries enregistre cette modification, il y a un retour.

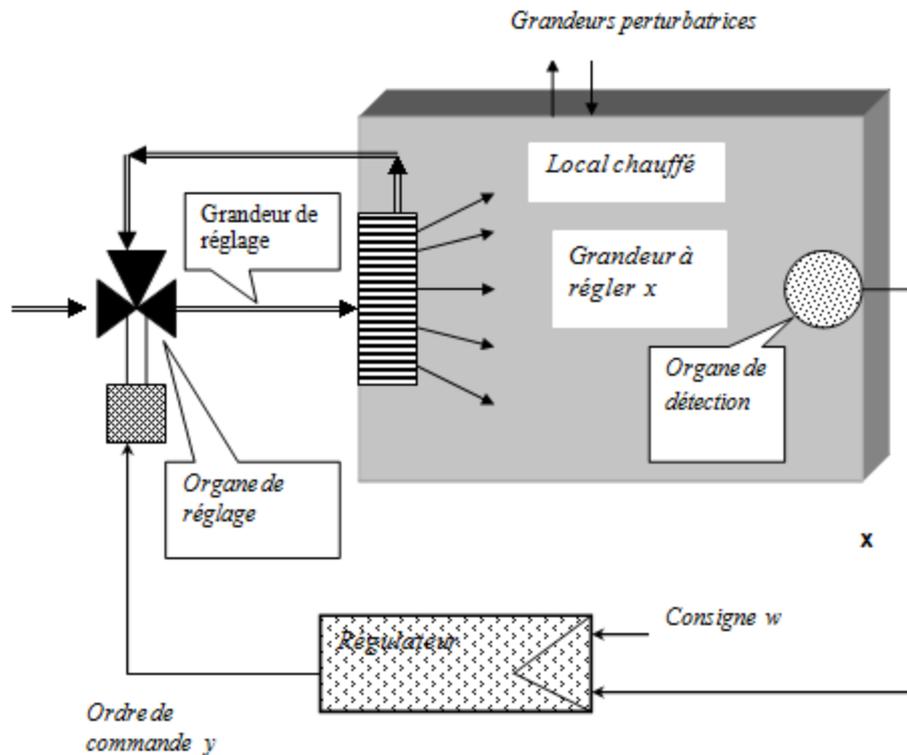


Figure I.4 installation de chauffage en boucle fermée

I.4.3 Association boucle ouverte et boucle fermée :

Les deux boucles sont complémentaires et conjuguent leurs actions par l'intermédiaire du sommateur. En effet la boucle ouverte réagit immédiatement et uniquement aux variations du débit de charge, mais elle ne prend pas en compte la grandeur réglée, elle est donc incapable d'apporter la précision. La boucle fermée par contre prend en compte toutes les perturbations du procédé, mais est incapable de corriger une perturbation au moment où elle se produit, de plus, si le retard du procédé est grand devant sa constante de temps (rapport Θ/τ faible) et si les perturbations sont importantes, son action est limitée.

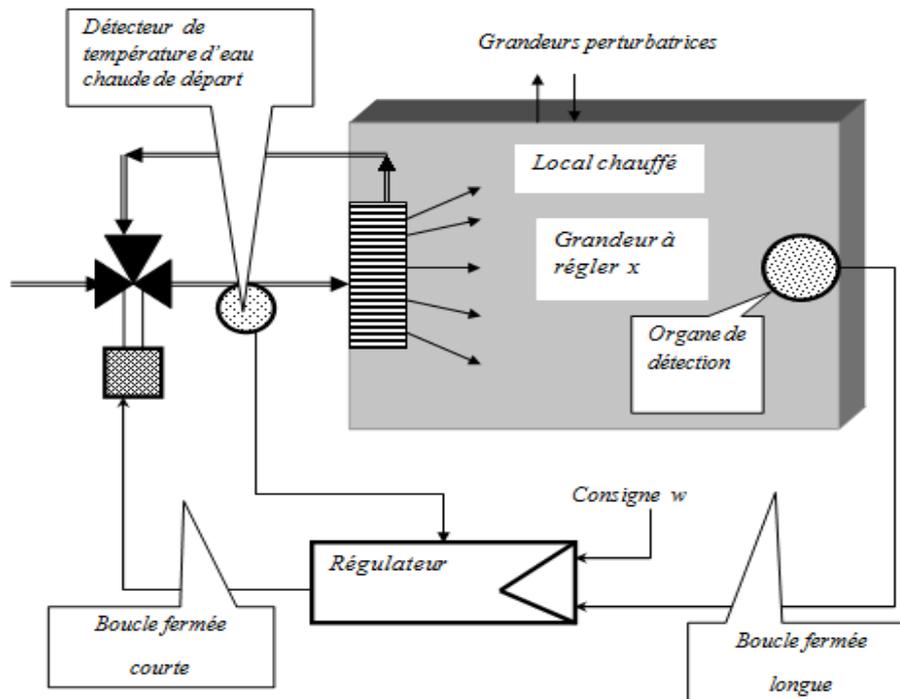


Figure I.5 installation de chauffage en boucle ouverte et fermée

I.4.4 Mise au point de la boucle ouverte :

La mise au point s'effectue en commençant par la boucle ouverte. Une des difficultés de la mise au point réside dans le fait qu'on ne peut pas toujours agir sur la grandeur perturbatrice, dans ce cas il faut attendre qu'une perturbation se produise.

Dans la procédure qui suit, on considère que l'on peut modifier la charge.

Les modules spécifiques au régulateur de la boucle ouverte sont :

Proportionnel, sommateur, avance / retard de phase, commande.

I.4.5 Mise au point de la boucle fermée :

La boucle ouverte est en service, au point de fonctionnement. Pour le réglage de la boucle fermée, utiliser l'une des méthodes de réglages classiques. Il est commode d'utiliser dans le cas d'association boucle fermée plus boucle ouverte, un régulateur appelé régulateur à entrée prédictive (feedforward) dont le schéma de principe est donné par la figure suivante :

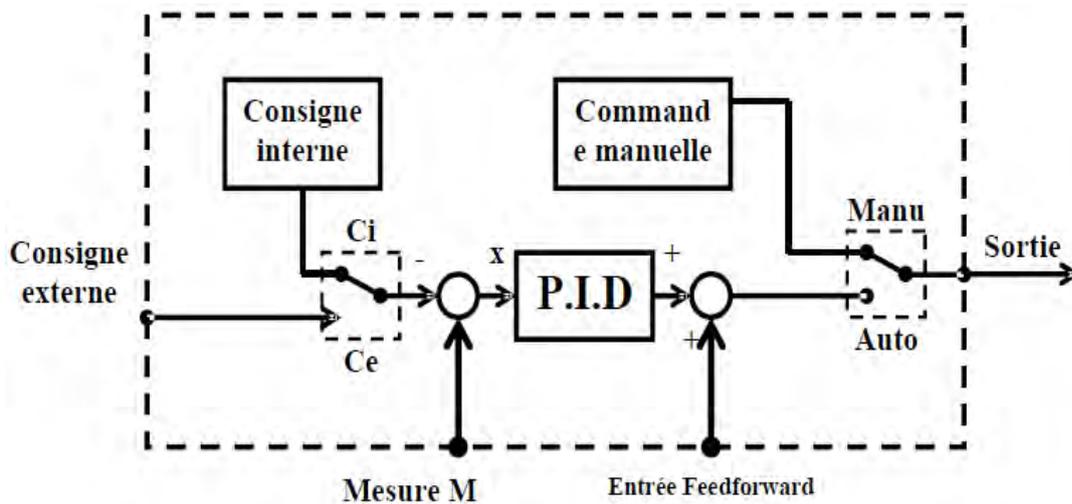


Figure I. 6 schéma de principe d'une installation (ouverte et fermée)

L'entrée boucle ouverte s'ajoute à la sortie du régulateur en auto. L'utilisation de ce régulateur évite l'emploi des modules sommateurs et commande auto/manu séparés.

Pour la mise au point de la boucle ouverte, on peut isoler la boucle fermée en affichant une action proportionnelle minimum (BP% maxi) et une action intégrale minimum (Ti maxi).

I.4.6 Eléments perturbateurs d'une boucle de régulation

Dans le cas d'une boucle fermée à une seule sonde, le régulateur ne reçoit que le signal de la grandeur réglée. Il ne tient pas compte donc des grandeurs perturbatrices, ce qui a pour conséquence l'absence d'action anticipatrice.

Dans l'exemple suivant (fig. I.7). Un régulateur numérique intelligent correctement paramétré agit par anticipation sur le fluide réglant.

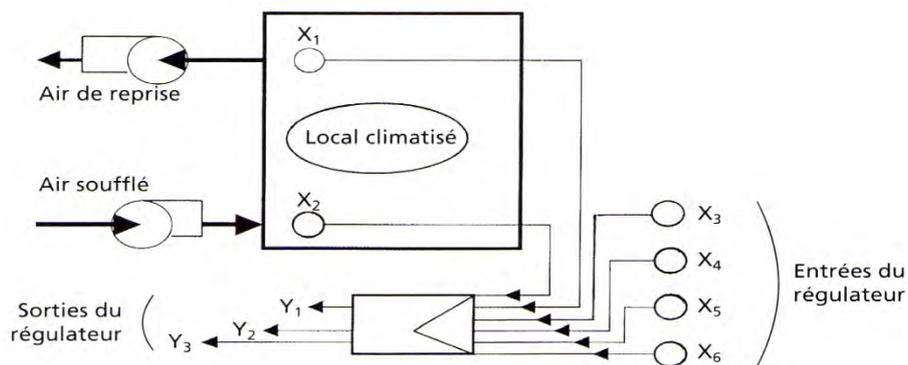


Figure I. 7 schéma de principe d'un régulateur dans une installation de climatisation

X_1 : sonde d'ambiance permettant généralement la régulation, il s'agit d'une boucle fermée longue. X_2 : sonde de soufflage permettant généralement la limitation, il s'agit d'une boucle fermée courte. X_3 : sonde extérieure permettant généralement la compensation, il s'agit d'une

boucle ouverte. X_4 : sonde de soleil, boucle ouverte. X_5 : sonde de vent, boucle ouverte. X_6 : sonde de vitesse de variation de la température, boucle ouverte.

I.5 Les éléments constituant une boucle de régulation

I.5.1 Les organes de détections ou de mesure

I.5.1.1 Sondes passives

Une sonde passive ne produit pas de signal. Généralement sa valeur ohmique varie en fonction de la grandeur physique contrôlée : température, hygrométrie, pression...etc. Figure (I, 8) Les sondes passives sont généralement reliées par deux fils.

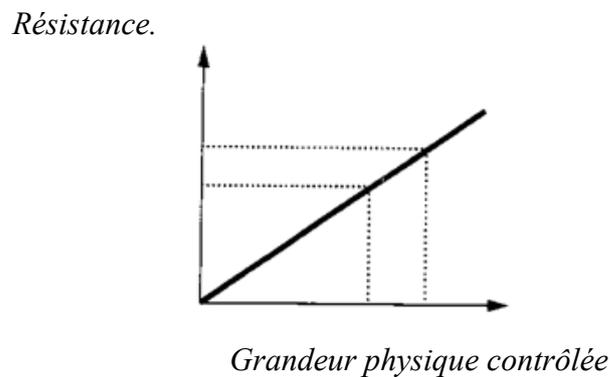


Figure I.8 la variation de la résistance en fonction des grandeurs physique contrôlées.

I.5.1.2 Sondes actives

Les sondes actives génèrent un signal proportionnel à la grandeur physique contrôlée : température, hygrométrie, etc. Figure (I,9) Le signal est une tension ou un courant. Les sondes actives sont généralement raccordées par 3 fils.

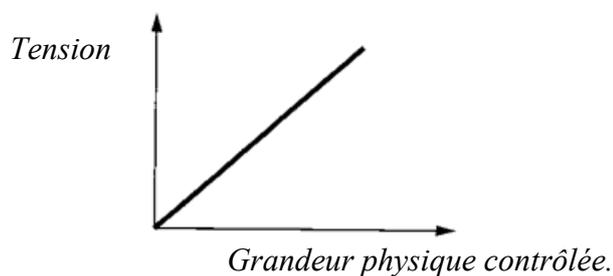


Figure I.9 la variation de la tension en fonction des grandeurs physique contrôlées.

I.5.1.3 Sondes métalliques (passives)

Sur la Figure (I, 10), les droites a, b, c représentent la variation de la résistance des différents métaux en fonction de la température. Les sondes métalliques les plus utilisées sont au platine (Pt) ou au nickel (Ni).

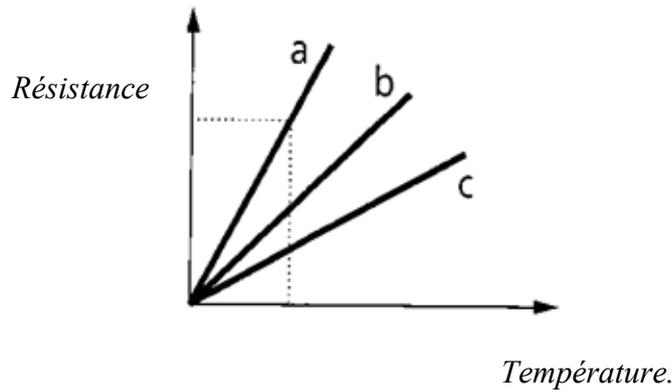


Figure I. 10 la variation de la résistance en fonction de la température

I.5.1.4 Thermocouples

Le principe des thermocouples est basé sur la production d'une force électromotrice proportionnelle à un écart de température entre deux soudures de métaux ou d'alliages différents. Les fabricants proposent un grand nombre de types de thermocouples. Ils sont très utilisés en mesure, très peu en régulation. Ils peuvent travailler sur de grandes plages de température.

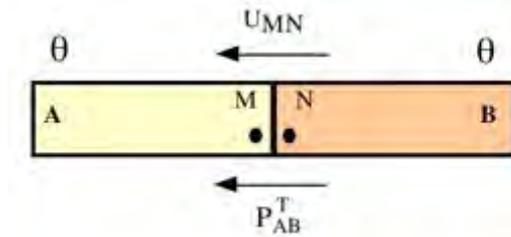


Figure I.11 schéma de principe d'un thermocouple

La jonction de deux conducteurs A et B différents mais à la même température, s'établit une différence de potentiel qui ne dépend que de la nature des conducteurs et de leur température & thêta (effet Peltier).

$$V_m - V_n = P_{AB}^\theta \quad (I.2)$$

Effet Thomson : Une d.d.p apparaît entre les extrémités d'un conducteur métallique lorsque ces extrémités sont portées à des températures différentes (La mobilité des électrons est différente). Cette d.d.p est très faible de l'ordre de $+2,2 \mu\text{V/K}$ pour le cuivre et de $-8,4 \mu\text{V/K}$ pour le Fer.

L'effet Thomson est dit positif pour certains métaux (Cuivre-Zinc), car le métal se refroidit quand le courant circule dans le sens des températures croissantes (il se réchauffe dans le cas contraire). Il est négatif avec d'autres métaux (Fer - Aluminium) : le métal s'échauffe quand le courant circule dans le sens des températures croissantes (et il se refroidit dans le cas contraire). Cet effet se manifeste de la même façon avec les semi-

conducteurs. Avec les semi-conducteurs on peut atteindre $200\mu\text{V/K}$. Les semi-conducteurs les plus utilisés sont : Le sélénure, le Tellure de Bismuth et l'Antimoine.

Application :

Un thermocouple fournit une tension qui est fonction de **deux températures** et de sa nature. Pour les thermocouples normalisés, on dispose de tables de références qui fournissent la F.E.M. en fonction d'une température, l'autre, dite de référence, est fixée à 0°C . Pour déterminer la F.E.M. fournie par un thermocouple, on utilisera donc la table correspondante et la formule de composition des températures

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	50	101	151	202	253	303	354	405	456
10	507	558	609	660	711	762	814	865	916	968
20	1019	1019	1122	1174	1226	1277	1329	1381	1433	1485

Tableau I. 1 relation complexe pour le couple de température 0°C et 29°C

Exemple : On cherche la FEM fournie par le thermocouple pour le couple de température : ($4^\circ\text{C};27^\circ\text{C}$).

On peut représenter les données comme sur la figure I,12 relation de type complexe, représentée ici par un tableau).

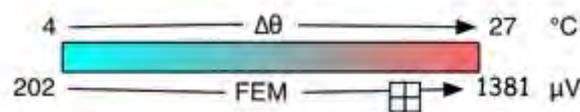


Figure I, 12 relation complexe pour le couple de température entre $4^\circ\text{C};27^\circ\text{C}$

I.5.1.5 Thermistances à coefficient de température positif

Les thermistances de type CTP (coefficient de température positif) ne s'utilisent pratiquement pas en régulation. Leur variation de résistance en fonction de la température n'est pas du tout linéaire. Elles sont par contre très souvent associées au relais de surchauffe. L'une des raisons de cette application est l'augmentation brutale de la résistance au voisinage de la température limite de fonctionnement. Un autre avantage consiste dans le fait que la coupure de la sonde simule un défaut, ce qui est une sécurité supplémentaire.

Sur la (figure I, 13) La zone deux est la zone d'utilisation de la sonde, l'augmentation de la résistivité électrique y est très importante lorsque la température augmente.

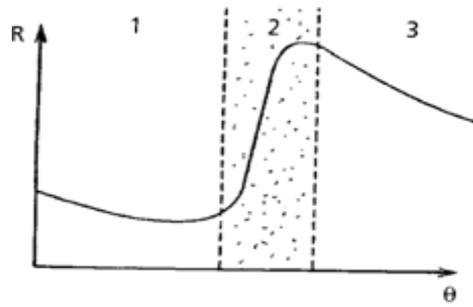


Figure I. 13 Principe de fonctionnement d'une thermistance CTP.

I.5.2 Types de régulation et des régulateurs

I.5.2.1 Types de régulation

I.5.2.1.1 Régulation analogique

Une boucle de régulation analogique comporte les éléments de base donnés Figure I.14

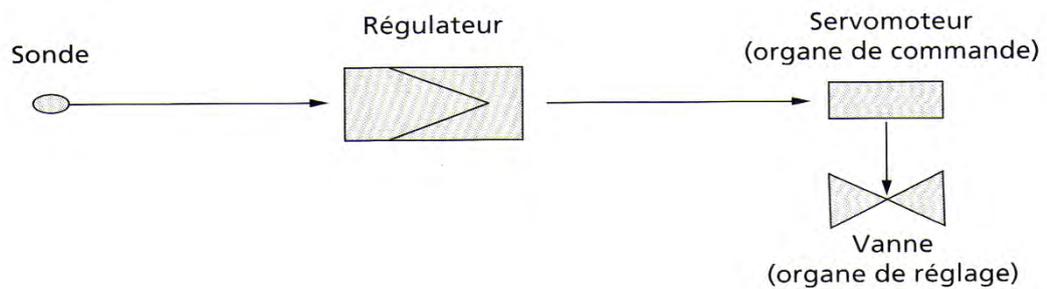


Figure I. 14 principe d'une régulation analogique

Un régulateur analogique est constitué à la base d'un pont de Wheatstone qui produit un signal proportionnel à l'écart entre la mesure X et la consigne X_c . Ce signal est amplifié par un amplificateur opérationnel.

Les signaux produits par ces régulateurs sont généralement des tensions continues de 0 à 10V .des relais internes permettent de convertir des sorties proportionnelles en sorties tout ou rien. Le nombre maximum d'entrées est généralement 3, il en va de même pour les sorties. Ces régulateurs ont des possibilités limitées ; par exemple, en cas de limitation et de compensation, il faut leur associer des modules de limitation et des compensateurs.

Ils sont bien connus, d'un prix compétitif, d'une installation et d'un réglage faciles, mais sont actuellement de plus en plus concurrencés par les régulateurs numériques.

Le régulateur présenté dans la figure. (I, 14) est constitué principalement des éléments suivants :

- Une alimentation transformant le 24 Voltes alternatif (borne 1 et 2) en 6 Voltes continus (bornes 3 et 4) ;

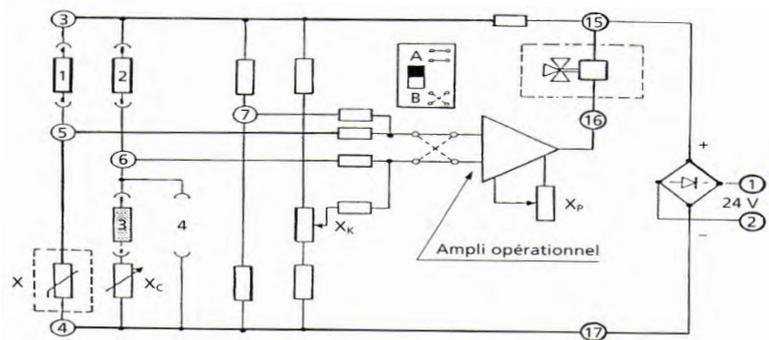


Figure I. 15 emplacement de pont de Wheatstone dans une installation

Un pont de Wheatstone dont une branche comporte une sonde de régulation X , une autre branche est réalisée par le potentiomètre constituant le point de consigne X_c ;

- Un amplificateur opérationnel produisant une tension de sortie continue de 0 à 10 V ;
- Un commutateur d'inversion d'action (A ou B)

Ce régulateur ne comporte qu'une sortie, 3 sorties sont possibles. Ces sorties peuvent être de type proportionnel ou de type tout ou rien (TOR)

Pont de Wheatstone : c'est le cœur des régulateurs analogiques Figure (I, 15)

Si $X = X_c$ (mesure = consigne), le pont est en équilibre, la tension de sortie du pont est nulle ; et Si $X \neq X_c$, le pont n'est plus équilibré, un potentiel apparait entre ses sommets B et D. dans la pratique, cette tension est amplifiée et rendue exploitable par un amplificateur opérationnel

I.5.2.1.2 Régulation numérique

Le tableau suivant donne un aperçu sur les différentes comparaison des systèmes analogiques et numériques :

<i>Analogique</i>	<i>Eléments comparés</i>	<i>numérique</i>
<i>Non</i>	<i>Communication</i>	<i>Oui</i>
<i>Pont de Wheatstone</i>	<i>Principe de fonctionnement</i>	<i>Microprocesseur</i>
<i>Compétitif</i>	<i>Prix (peu de points)</i>	<i>Elevé</i>
<i>Elevé</i>	<i>Prix (beaucoup de points)</i>	<i>Compétitif</i>
<i>Important</i>	<i>Encombrement</i>	<i>Faible</i>
<i>Pas protégé</i>	<i>Protection</i>	<i>Protection par mot de passe ou clé</i>
<i>Limitées</i>	<i>Possibilités</i>	<i>Importantes</i>
<i>Difficiles</i>	<i>Boucles complexes</i>	<i>Aisées</i>
<i>Peu aisée</i>	<i>Modification des réglages</i>	<i>Facile (si formé au préalable)</i>
<i>Facile pour le plus grand nombre</i>	<i>Maintenance</i>	<i>Facile si bonne protection du</i>

<i>(régulation ancienne)</i>		<i>système</i>
<i>Faible</i>	<i>Impact commercial</i>	<i>Bon</i>
<i>Moyen</i>	<i>Niveau de compétence du personnel</i>	<i>Elevé</i>
<i>Faible</i>	<i>Dépendance vis-à-vis du fabricant</i>	<i>Grande</i>
<i>Non</i>	<i>Horloge interne</i>	<i>Oui (en général)</i>
<i>Généralement nécessaire (régulation non communicante)</i>	<i>Personnel sur site</i>	<i>Limité (voir nul : suivi à distance possible)</i>
<i>Complexe</i>	<i>Report d'alarmes</i>	<i>Aisé</i>
<i>Potentiomètre de simulation et documentation du fabricant</i>	<i>Réglage, paramétrage</i>	<i>Logiciel + Pocket ou ordinateur + formation spécifique généralement nécessaire.</i>

Tableau I.2 la comparaison entre la régulation numérique et analogique

Le schéma de principe d'un ensemble numérique :

Le multiplexeur transmet toutes les informations des différentes voies sur une seule voie et convertit les entrées analogiques en signaux binaires afin qu'ils soient exploitables par le microprocesseur (figure. I, 16)

Le démultiplexeur a le rôle inverse de celui du multiplexeur.

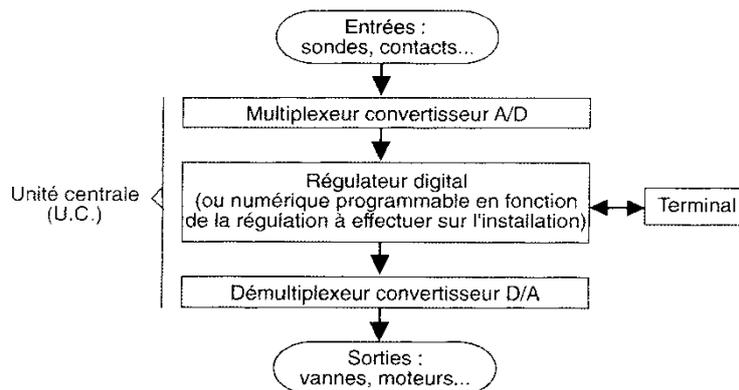


Figure I.16 unité centrale (U.C)

Schéma de principe d'un régulateur numérique :

Le cœur du régulateur analogique était le pont de Wheatstone, le cœur du régulateur numérique est un microprocesseur figure (I, 17).

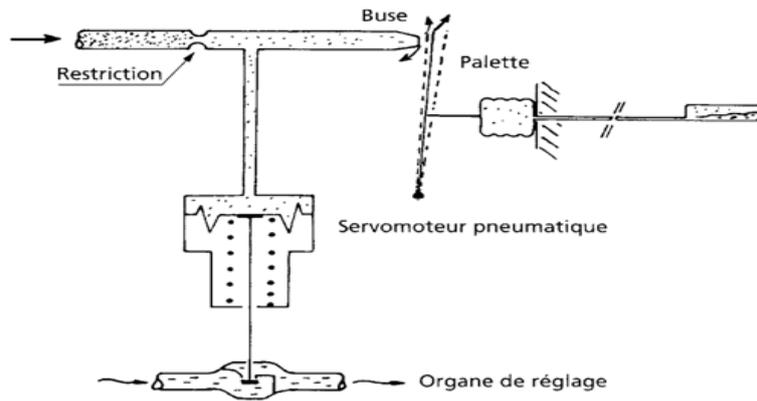


Figure I. 18 schéma de principe d'une régulation pneumatique.

L'installation présentée dans la figure précédente est destinée à alimenter un réseau convecteurs à plusieurs régimes :

- Régime hiver : température d'eau chaude fonction de la température extérieure ;
- Régime transitoire : recyclage tant que la température de l'eau de retour est trop élevée pour être envoyée sur les groupes frigorifiques ;
- Régime été : température d'eau glacée constante.

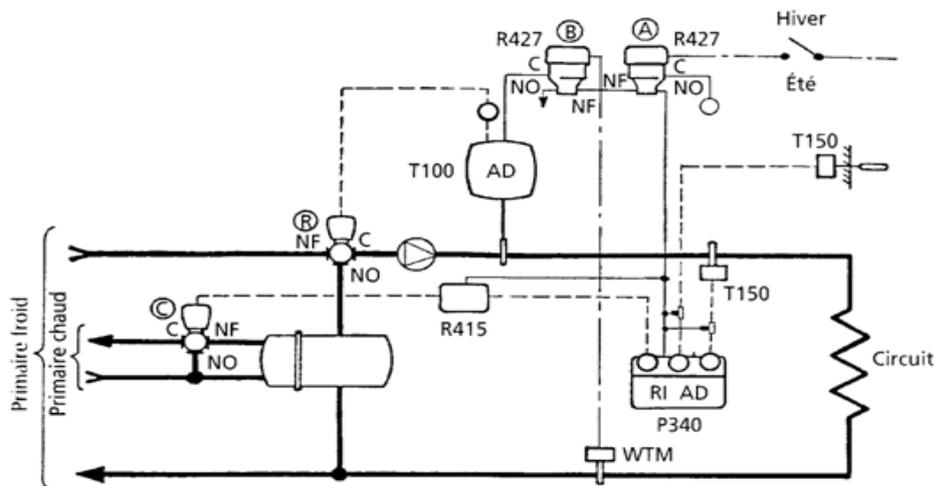


Figure I. 19 schéma de principe d'une installation de préparation d'eau chaude ou d'eau glacée à régulation pneumatique.

Quelques fabricants commercialisent des matériels pneumatiques permettant la régulation, les limitations et les compensations. Certains régulateurs pneumatiques permettent des régulations PID.

I.5.2.2 Les régulateurs :

Il ya deux types de régulateur, qui peuvent être classés selon la nature de leurs actions :

I.5.2.2.1 Régulateurs à action continue (progressifs)

Ils génèrent une action continue en sortie et on en distingue plusieurs types qui sont les suivants :

I.5.2.2.1.1 Régulateur proportionnel :

Le régulateur produit un signal proportionnel à l'écart entre la mesure et la consigne.

Bande proportionnelle : écart de la grandeur physique nécessaire pour provoquer la course complète de l'organe de réglage.

Avec $G = L1/L2$

La grandeur réglée : niveau

La grandeur réglante : débit alimentation

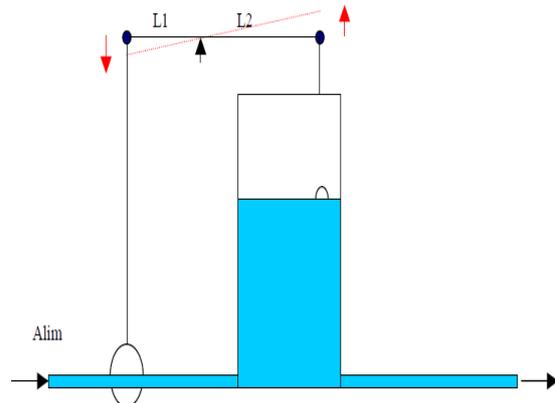


Figure I. 20 schéma de principe d'une régulation proportionnelle

En boucle ouverte, le signal de sortie du régulateur ne doit pas agir sur l'actionneur. Pour cela, il suffit que la sortie du régulateur ne soit pas reliée au convertisseur ou que le convertisseur ne soit pas alimenté en air comprimé

A l'instant $t=0$, on crée un écart mesure – consigne sous forme d'échelon en donnant une impulsion sur la consigne (En général 10%)

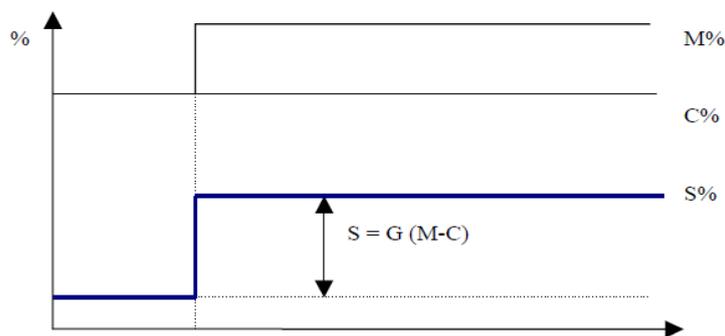


Figure I. 21 allure des signaux en boucle ouverte avec un régulateur(P)

I.5.2.2.1.2 Régulateur proportionnel et intégral (PI) :

Régulation où il est recherché une grandeur physique contrôlée avec peu d'écart. L'action intégrale, toujours associée à l'action proportionnelle, combat l'écart spécifique à l'action proportionnelle.

Exemple :

A l'instant $t=0$. L'écart (mesure – consigne) = $(M - C) = \text{constante}$.

$G=1$

$T_i=1 \text{ min}$

$T_d=0$ (pas d'action dérivée)

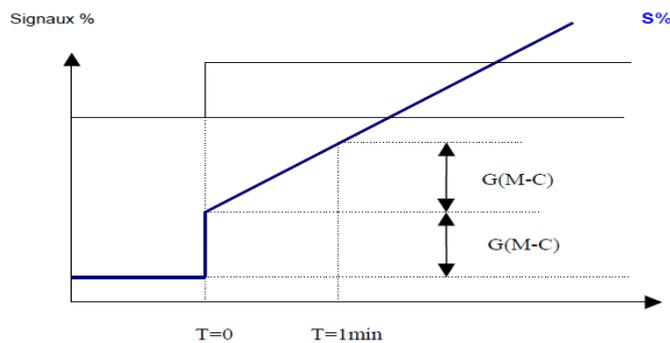


Figure I. 22 allure des signaux en boucle ouverte avec un régulateur(PI)

I.5.2.2.1.3 Régulateur proportionnel et dérivé (PD)

L'action dérivée est une action qui tient compte de la vitesse de variation de la mesure (ou de l'écart Mesure-Consigne). Elle permet d'augmenter la rapidité de la régulation en donnant des impulsions d'ouverture ou de fermeture au signal de sortie. Son usage doit être utilisé avec précaution, ces impulsions ayant tendance à augmenter l'instabilité de la boucle.

Exemple :

A l'instant $t=0$. L'écart (mesure – consigne) = Constante

$T_d=1$

$G = 1$

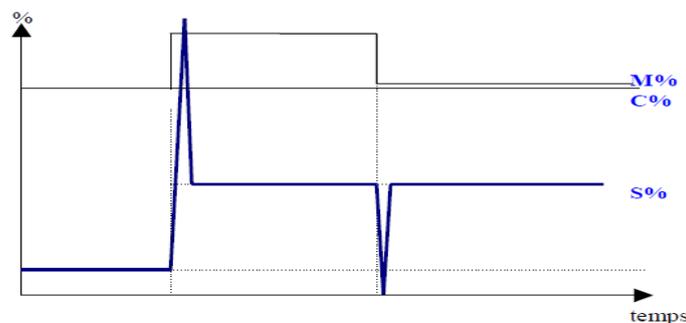


Figure I. 23 allure des signaux en boucle ouverte avec un régulateur(PD)

I.5.2.2.1.4 Régulateur proportionnel intégral et dérivé (PID) :

Régulation où on recherche une grandeur physique contrôlée avec peu d'écart et avec une grande rapidité d'action sur le fluide réglant lors de la variation de l'écart entre la mesure et la consigne. L'action dérivée permet une action anticipatrice sur les besoins.

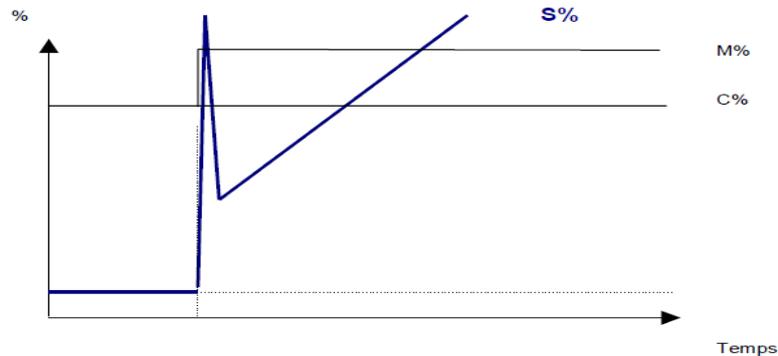


Figure I. 24 allure des signaux en boucle ouverte avec un régulateur(PID)

I.5.2.2.2 Régulateurs à action discontinue

I.5.2.2.2.1 Régulation tout ou rien (discontinue)

Ce mode d'action est essentiellement discontinu. Sa réalisation impose de se fixer une limite inférieure et une limite supérieure.

Lorsque la mesure atteint la limite inférieure, l'actionneur prend une position particulière (arrêt ou marche pour une pompe, ouvert ou fermé pour une vanne). De façon analogue, le fait d'atteindre la limite supérieure place l'actionneur dans la position contraire. La mesure oscille donc entre ces deux valeurs extrêmes et sa variation prend une allure en dents de scie. Ce réglage simple, bon marché présente l'inconvénient d'être peu précis.

D'autre part, ce dispositif ne peut s'appliquer qu'à des installations présentant une inertie suffisamment grande provoquant une fréquence d'oscillation faible afin de ne pas solliciter les organes de commande trop souvent, ce qui réduirait leur durée de vie.

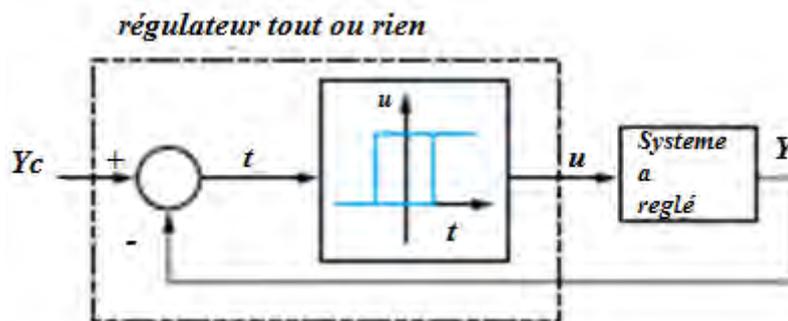


Figure I.25 Répartition tout ou rien avec hystérésis

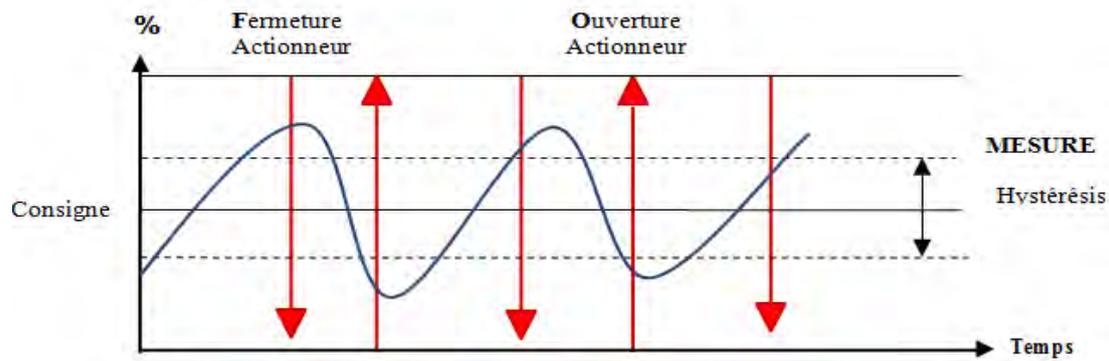


Figure 1.26 Allure des signaux d'une régulation tout ou rien

Principe : la commande u est maximale lorsque la mesure y est inférieure à la consigne y_c . Elle est minimale lorsque la mesure est supérieure à la consigne.

C'est la solution la moins chère et la plus simple, mais qui ne va pas sans quelques inconvénients :

- un risque de collage des contacteurs.
- la nécessité d'avoir une hystérésis pour éviter un battement trop rapide des contacteurs (la coupure ne se fait pas à la même température que le ré enclenchement).
- l'oscillation de la mesure y en permanence autour de la consigne ; l'amplitude de cette oscillation, dépend du réglage de l'hystérésis et de l'inertie thermique du système.

Des variantes existent :

- la régulation avec seuil (bande morte).
- la régulation avec seuil et hystérésis.

I.5.2.2.2 Régulation flottante :

Forme de régulation discontinue ou l'organe de commande (le clapet d'une vanne par exemple) se déplace à une vitesse indépendante de l'importance de l'écart de la valeur désirée. Le déplacement se fait vers l'une ou l'autre des positions extrêmes suivant que l'écart est positif ou négatif.

I.5.3 Les organes de réglage pour les installations de chauffage et de climatisation

I.5.3.1 Les vannes :

Beaucoup d'installations de chauffage sont régulées en fonction d'une ou de plusieurs sondes extérieures. Ce type de régulation établit une correspondance entre la température de l'eau de l'installation et la température extérieure. Cette correspondance est appelée courbe de chauffe.

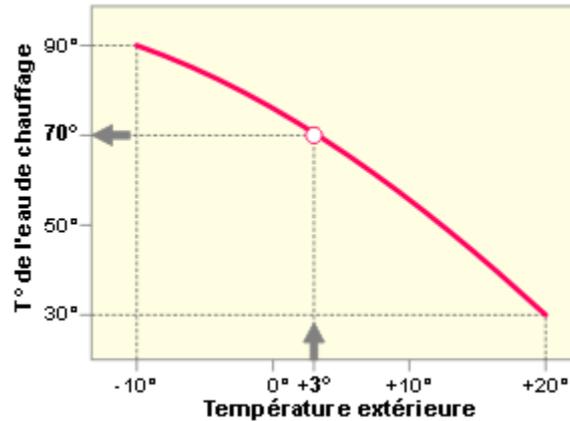


Figure I. 27 Si la température extérieure est de 3°C, la température de l'eau de chauffage est réglée à 70°C.

Adaptation de la puissance des corps de chauffe aux besoins réels ; La puissance calorifique émise par un corps de chauffe donné dépend de la température de l'eau l'alimentant, de son débit d'irrigation et de la température ambiante.

Adaptation du débit en fonction des besoins ; une solution limitée. La première adaptation que l'on pourrait imaginer est la réduction du débit d'eau en fonction des besoins. C'est le rôle qui est généralement dévolu aux vannes thermostatiques. Cette solution est rarement satisfaisante. En effet, la puissance d'un radiateur varie peu en fonction de son débit.

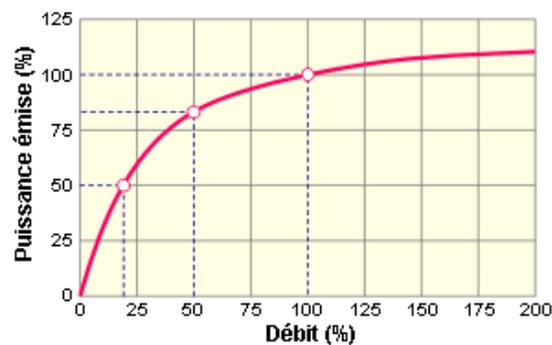


Figure I. 28 Puissance émise par un radiateur en fonction de son débit d'eau. Par exemple si on veut diminuer de 50 % la puissance ($T_{ext} = +5^{\circ}\text{C}$ au lieu de -10°C), le débit dans le radiateur doit être abaissé à $\pm 20\%$ de son débit nominal

La course utile des vannes thermostatiques étant extrêmement petite (environ 0,5 mm), exige d'importantes réductions de débit (plus de 80 %) les oblige à fonctionner dans des conditions extrêmes (moins de 0,1 mm d'ouverture). Cela leur est impossible. Par ailleurs, on

remarque que pour les faibles débits, une petite variation de position de la vanne provoque une importante variation de puissance du radiateur. La température ambiante fluctuera en conséquence. Dans ces conditions, la vanne thermostatique s'ouvrira et se fermera perpétuellement, essayant de corriger ses erreurs. Jamais elle ne trouvera son point d'équilibre. Les vannes thermostatiques ne peuvent donc être utilisées que comme organe de réglage final et non comme réglage principal.

La solution : régler la température de l'eau

Dans nos régions, la puissance des corps de chauffe est généralement dimensionnée pour un régime d'eau de 90/70, c'est-à-dire une température d'entrée de l'eau dans les radiateurs de 90° et une température de sortie de 70°.

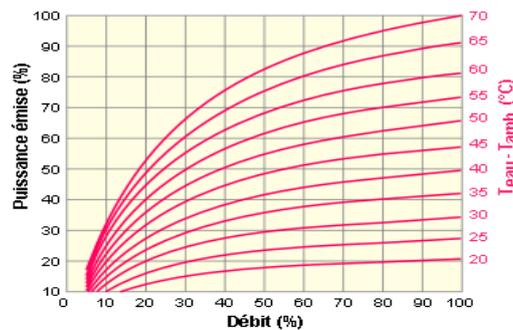


Figure I. 29 Puissance émise par un radiateur en fonction de son débit et de la température de l'eau

On remarque que la puissance peut être réduite de moitié si on abaisse la température de l'eau à 60°C (on a alors $T_{eau} - T_{amb} = 40^{\circ}C$), tout en maintenant le débit nominal (100 %). La courbe de chauffe : besoins variables, température variable. La courbe de chauffe, via un régulateur dit "climatique", établit une correspondance entre les besoins en chaleur du bâtiment et la température de l'eau qui alimente les corps de chauffe. Le plus souvent, la grandeur qui sera prise comme représentative des besoins sera la température extérieure, éventuellement compensée en fonction de l'ensoleillement et/ou de la vitesse du vent si l'orientation du bâtiment l'exige.

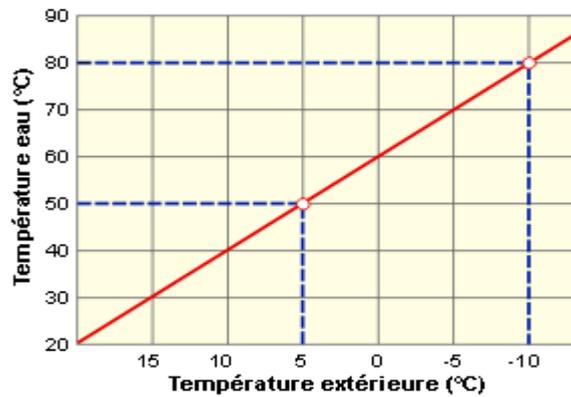


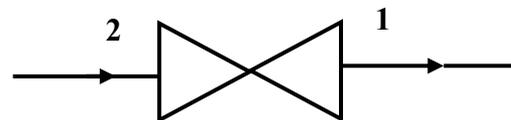
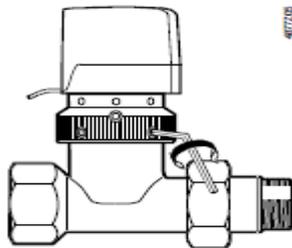
Figure 1. 30 la température extérieure est de 5°, la température de l'eau alimentant les radiateurs est de 50°C si ceux-ci ont été sélectionnés pour 80°C par - 10°C de température extérieure de base

I.5.3.1.1 Vannes motorisées :

Ces positionneurs, associés à la commande ou à un commutateur, pilotent les systèmes de chauffage et les plafonds réfrigérants ; ils indiquent également leur état (ouvert/fermé) et permettent de contrôler instantanément leur montage sur l'adaptateur de vanne.

I.5.3.1.2 La vanne à 2 voies :

Elle permet de régler un débit .le constructeur indique sur le coup de vanne le sens de circulation du fluide .Si ce sens n'est pas respecté, le clapet risque de vibrer au voisinage de la fin de course (fermeture) ou de ne pas assurer l'étanchéité.



Symbole d'une vanne à 2 voies

Figure I.31 Schéma de principe d'une Vanne à 2 Voies

I.5.3.1.3 La vanne à 3 voies :

Selon le sens de passage de fluide, les vannes à 3 voies peuvent être divisées en :

- Vanne de mélange : elle a deux entrées et une sortie commune ; elle est employée pour le réglage de température.
- Vanne de répartition : elle a une entrée commune et deux sorties ; elle est employée pour le réglage de débit.

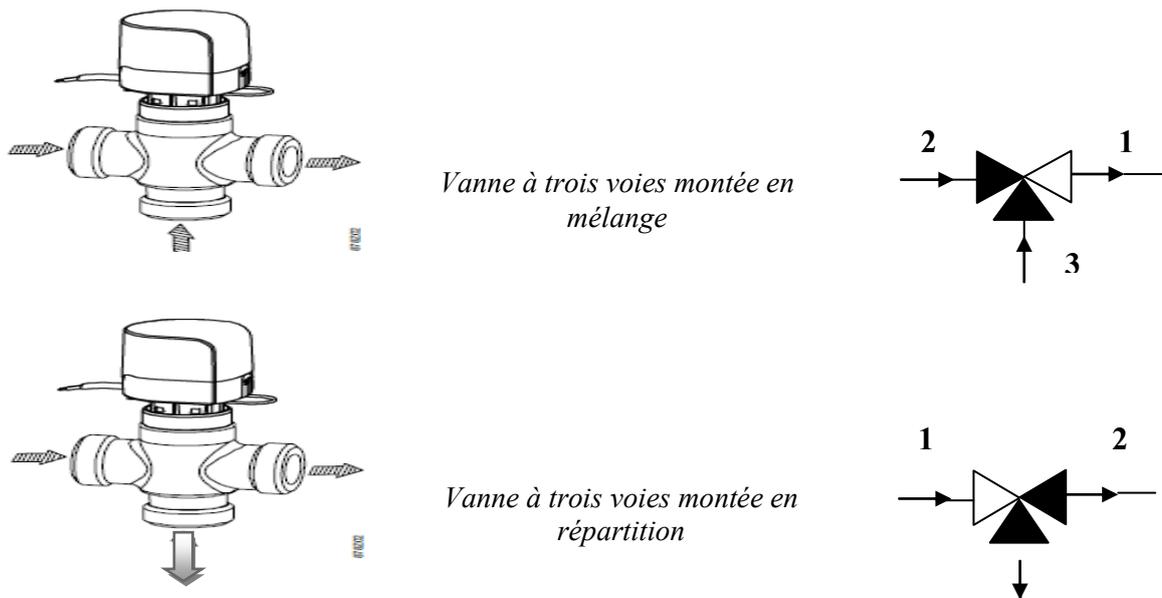


Figure I.32 Schéma de principe d'une Vanne à 3 Voies

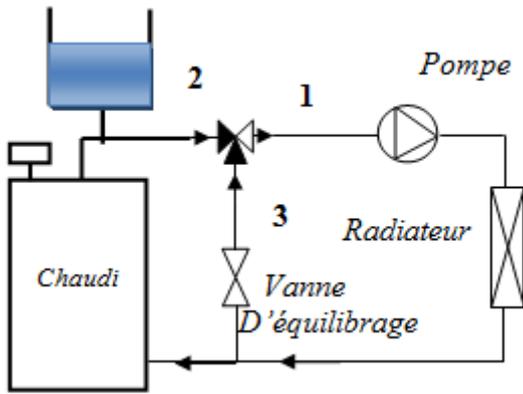
La voie commune est différenciée des autres voies par le dessin .les orifices sont numérotées.

Le constructeur indique généralement le sens de circulation des fluides ou bien il indique clairement l'affectation des voies .En général il est possible d'utiliser la même vanne pour les deux cas d'affectation .Mais un des deux est souvent mieux adapté que l'autre et devra, par conséquent, être recommandé .Il est même des cas où un des montages est prohibé.

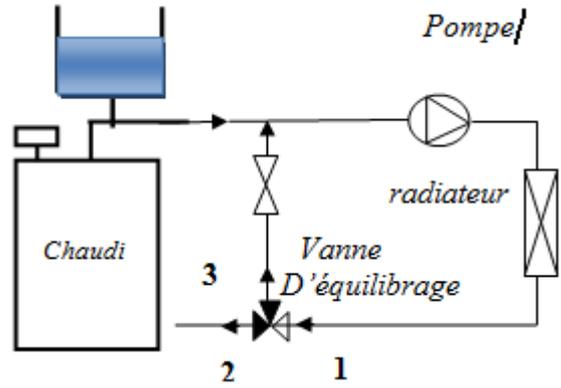
C'est ainsi que le montage mélange est déconseillé pour les vanne à disques et certaines vannes à secteur (risque de soulèvement du disque ou de distributeur sous l'effet de la pression en amont). De même, le montage en répartition est contre -indiqué pour les vannes à siège, car il provoque des vibrations du clapet au voisinage des fins de course.

Les vannes de régulation peuvent être montées aussi bien sur la tuyauterie aller que sur la tuyauterie retour ; il en résulte les quatre schémas classiques suivants

Réglage de température :



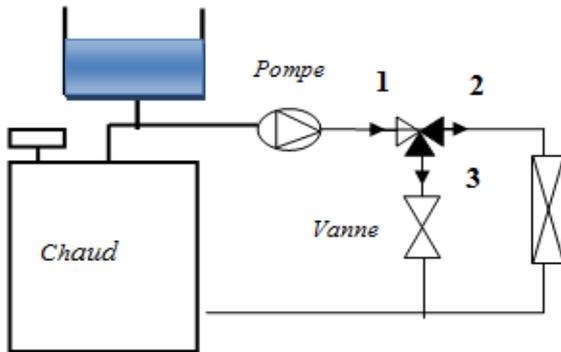
Montage mélange



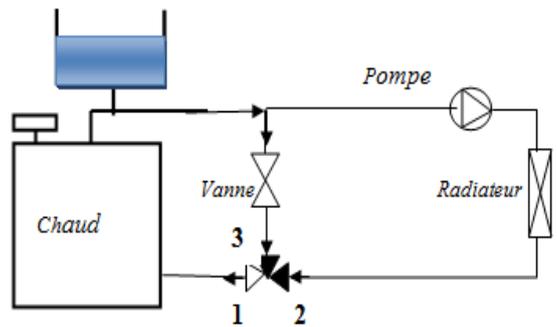
Montage Répartition

Fig. I.33 Schéma de principe de montage d'une installation de chauffage pour réglage de température en fonction de la position de la V3V en mélange & en répartition du débit

Réglage de débit :



Montage Répartition



Montage Mélange

Figure I.34 Schéma de principe de montage d'une installation de chauffage pour réglage de débit en fonction de la position de la V3V en mélange & en répartition du débit

I.5.3.1.4 La vanne à 4 voies :

Cette vanne comporte quatre orifices disposés en croix, un papillon tournant de 90° à l'intérieur de la vanne permet d'établir les communications entre voies contiguës. Cette vanne est utilisée en mélange et permet de régler la température de départ vers l'utilisation.

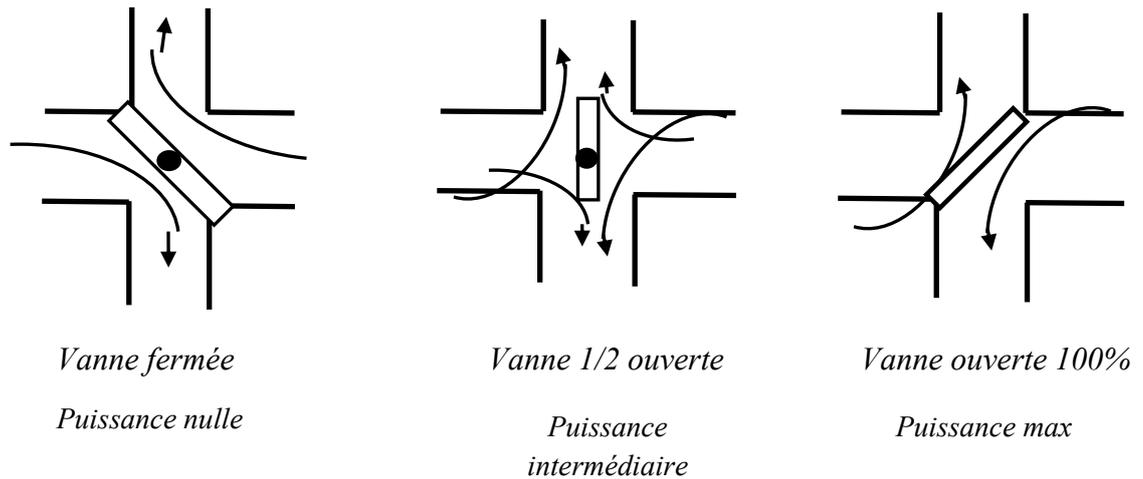


Figure I.35 Les positions de la vanne à 4 voies

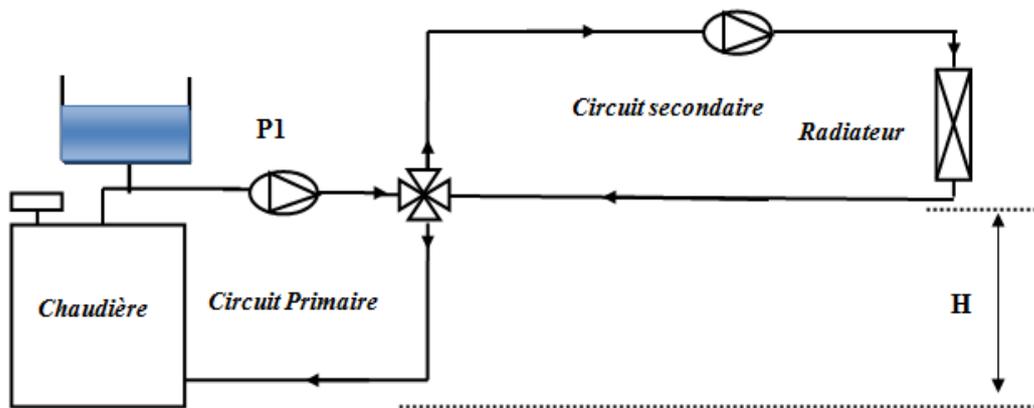


Figure I.36 Schéma de principe de montage d'une installation de chauffage de deux circuits à l'aide d'une V4V

I.5.3.2 Commande de chauffage et climatisation :

Cet actionneur commande les vannes motorisées pilotant les systèmes de chauffage ou les plafonds réfrigérants. Cette commande s'effectue sans bruit. Deux bornes d'entrée sont destinées à des contacts libres de potentiel pour raccorder, par exemple, des détecteurs d'ouverture de fenêtre afin de diminuer les pertes d'énergie.

Pour une application, la commande peut être remplacée par un commutateur qui permet aussi d'envisager une détection d'ouverture de fenêtre, raccordée à une entrée binaire.

I.5.4 Chaîne de régulation complète

Ce Tableau résume les rôles et les principes des différents éléments d'une boucle de régulation :

<i>Sonde</i>	<i>Régulateur</i>	<i>Servomoteur (organe de commande)</i>	<i>Organe de réglage</i>
<p><i>En résumé, les sondes raccordées par 2 fils sont passives, les sondes raccordées par 3 fils sont actives. Elles permettent de contrôler de nombreuses grandeurs physiques.</i></p>	<p><i>Les régulateurs progressifs(P.PI.PID) Qui doivent être étudiés.</i></p> <p><i>Les régulateurs analogiques sont basés sur le pont de Wheatstone, leurs possibilités sont limitées.</i></p> <p><i>Les régulateurs numériques sont à base de microprocesseur, leurs possibilités sont très grandes.</i></p>	<p><i>Leurs principes de fonctionnement sont variés. Leur sélection dépend des forces ou des couples résistants à vaincre, des temps de réponse souhaités, de la fiabilité, du prix, de l'application, du degré de précision souhaité...et aussi des habitudes de la société.</i></p>	<p><i>C'est l'organe qui agit sur le fluide réglant.</i></p> <p><i>Une vanne a une courbe caractéristique qui indique la relation entre le débit et la levée du clapet.</i></p>

I.6 Lois de régulation

I.6.1 Comportement thermique d'un bâtiment :

Le bâtiment représenté figure (I. 37) est l'objet de déperditions en hiver (QS). Si on souhaite une température constante dans ce bâtiment en hiver, il faut alors des apports thermiques internes (QE) égaux aux déperditions : $QE = QS$. Dans la pratique QE est plus grand que QS, et c'est le rôle de la régulation d'ajuster QE à QS. En été, à l'inverse, il convient de combattre des apports thermiques. Le fluide réglant devient alors de l'eau glacée.

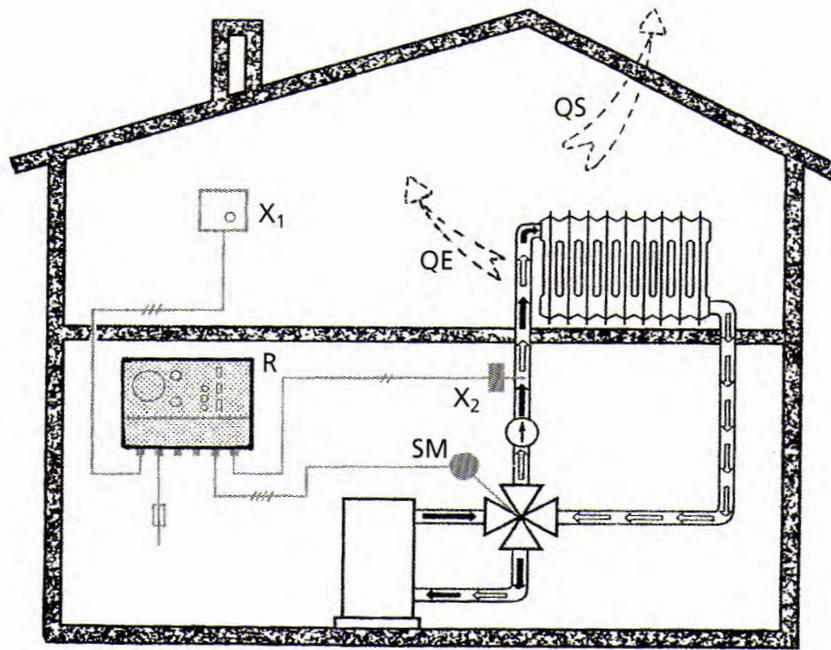


Figure I. 37 installation de chauffage

I.6.2 Lois à une seule pente en chauffage

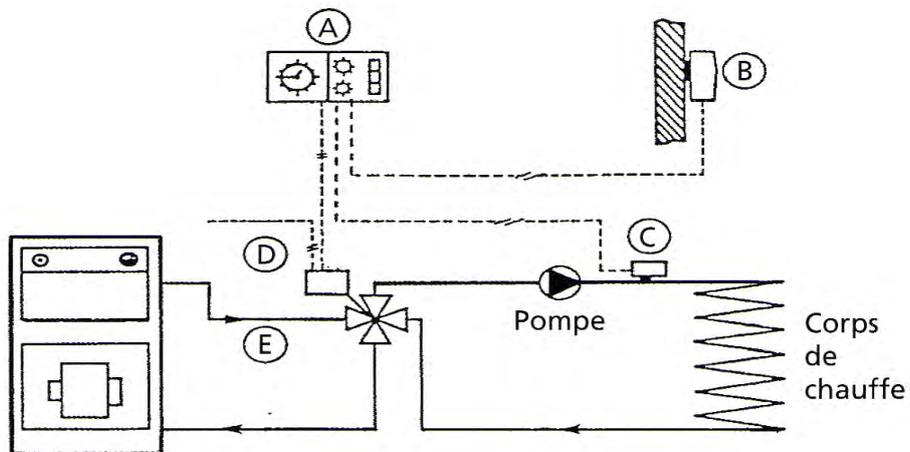


Figure I. 38 régulation d'une installation de chauffage

La loi de la figure (I. 38) est une loi à une seule pente :

$$\text{Pente} = \Delta Y / \Delta X = (80 - 20) / (20 - (-15)) = 60 / 35 = 1,71$$

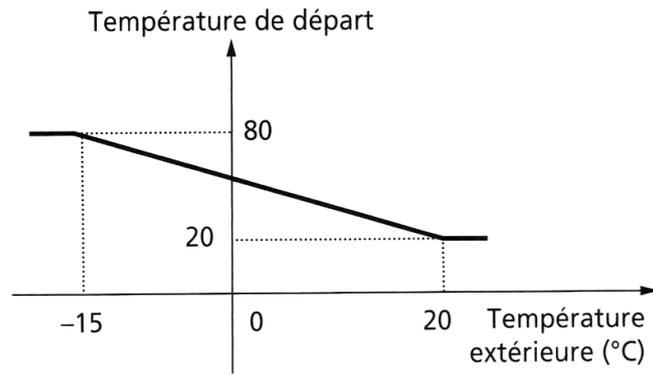


Figure. I. 39 présente l'unique pente de chauffage

I.6.3 Lois à plusieurs pentes en chauffage

Pour adapter de façon optimale la température de départ d'une chaufferie par exemple, il est fréquent de régler des lois à plusieurs pentes.

Dans l'exemple figure (I. 39). La pente est majorée aux basses températures pour combattre l'influence des parois froides :

- Pente à mi-saison (entre 20 et 5 °C en extérieur) :

$$S = \Delta Y / \Delta X = (46 - 20) / (20 - 5) = 26 / 15 = 1,73$$

- Pente lors des basses températures extérieures (entre +5 et -15 °C) :

$$S = (90 - 46) / (5 - (-15)) = 44 / 20 = 2,2$$

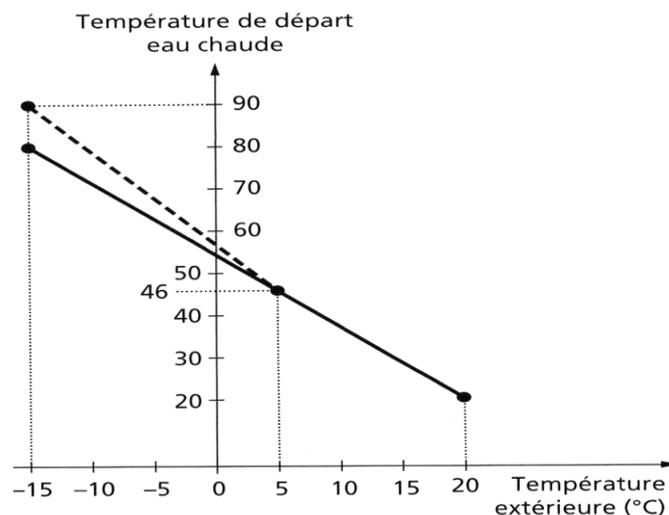


Figure I. 40 présente deux pentes de chauffage

I.6.4 Lois en climatisation

La figure (I. 40).représente une installation de climatisation dont le point de consigne est influencé par la température extérieure. La sonde de régulation X est disposée sur la reprise de l'air. La sonde d'influence Z renseigne le régulateur sur la température extérieure. La figure (I. 41) correspond à une régulation numérique puisque certains éléments permettent la

compensation. En régulation analogique, la sonde d'influence serait raccordée à un compensateur.

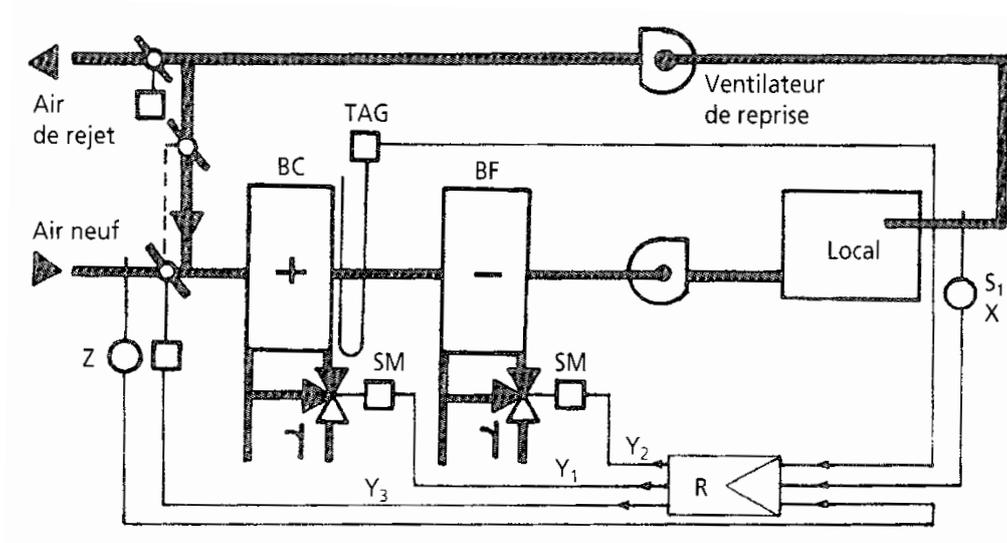


Figure I. 41 installation de climatisation (CTA)

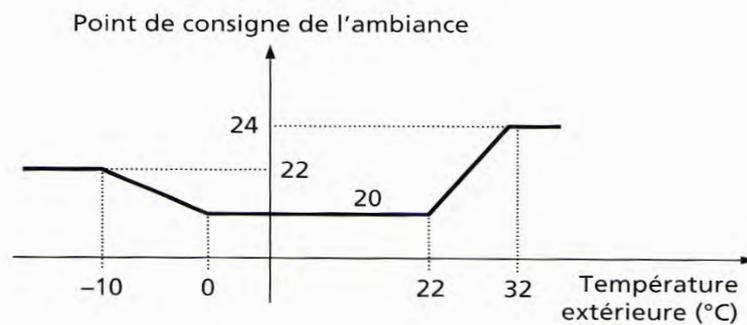


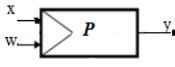
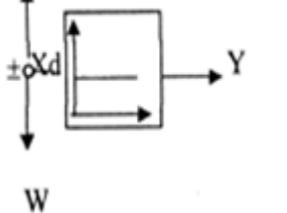
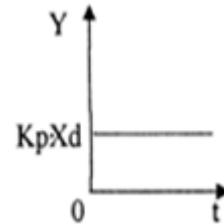
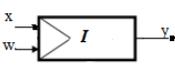
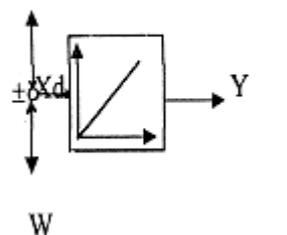
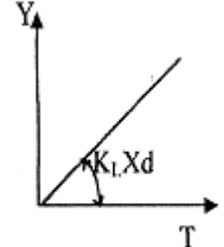
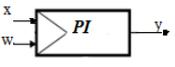
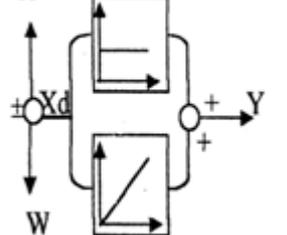
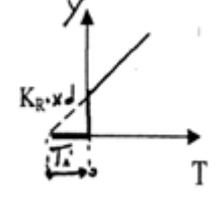
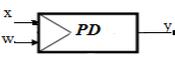
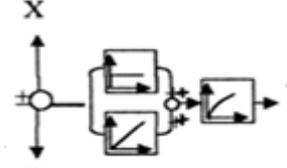
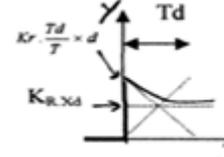
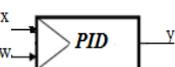
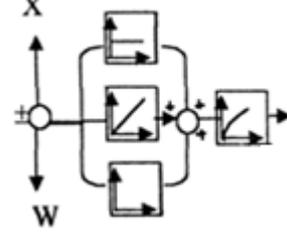
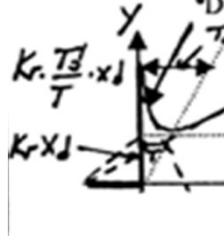
Figure I. 42 présente une pente de chauffage et autre de climatisation

En hiver, la compensation va dans le sens d'une plus grande consommation pour combattre l'influence des parois froides. en été, afin d'éviter les chocs thermiques, il convient de réduire l'écart de température entre l'extérieur et l'intérieur .cela va dans le sens des économies d'énergie.

Tableau résume les différents types des régulateurs :

Pour terminer ce 1^{er} chapitre, nous allons résumer les différents régulateurs progressifs qui seront exposés dans notre travail.

Dénomination	Schéma logique	Réponse indicielle	remarques
Symbole		Paramètre du régulateur	

<p>Régulateur P</p> 		 <p>Réponse indicielle valable pour point d'étalonnage à charge nulle $X_p = 1/K_R = \text{plage } P^l$</p>	<p>Inconvénient : écart de réglage permanent subordonné à la charge.</p> <p>Exemple d'application : régulation de la température ambiante</p>
<p>Régulateur I</p> 		 <p>$K_I = \text{facteur d'intégration}$</p>	<p>Avantage : pas d'écart de réglage permanent.</p> <p>Inconvénient : comportement horaire défavorable pour des applications CVC</p> <p>Exemple d'application : les régulateurs I ne s'utilisent guère dans la technique CVC</p>
<p>Régulateur PI</p> 		 <p>$X_p = 1/X_R = \text{bande } P^l$ $T_i = \text{temps d'intégration}$</p>	<p>Avantage : comportement horaire favorable grâce à la part P, pas d'écart de réglage permanent grâce à la part I</p> <p>Exemple d'application : régulation de la température de départ, régulation de la climatisation</p>
<p>Régulateur PD</p> 	 <p>Elément PT_1 du régulateur avec la constante du temps d'amortissement T</p>	 <p>$X_p = 1/K_R = \text{bande } P^l$ $T_d = \text{temps dérivation}$</p>	<p>Avantage : plus rapide qu'un régulateur P grâce à l'effet stabilisateur de la part D</p> <p>Inconvénient : écart de réglage subordonné à la charge. (un peu plus favorable qu'avec un régulateur P)</p> <p>Exemple d'application : régulation de la température de départ.</p>
<p>Régulateur PID</p> 	 <p>Organe PT_1 du régulateur avec la constante de temps d'amortissement T</p>	 <p>$X_p = 1/K_R = \text{plage } P^l$ $T_i = \text{temps d'intégration}$ $T_d = \text{temps dérivation}$</p>	<p>Avantage : rapide grâce à l'effet de stabilisateur de la part D, pas d'écart de réglage permanent grâce à la part I, convient pour les milieux réglés compliqués</p> <p>Exemple d'application : régulation de climatisation, régulation de condenseur, régulation d'eau mélangée</p>

I.7 Conclusion :

Après un rappel des bases nécessaires en régulation en génie climatique, ce chapitre donne tous les éléments méthodologiques et technologiques pour concevoir les systèmes de régulation adaptés aux installations de climatisation et de chauffage, ce qui permettra de mettre en œuvre les régulateurs (entrées/sorties, réglage, paramétrage). L'importance de la régulation est bien souvent sous-estimée et considérée comme une option, pas comme une nécessité. Il est vrai que notre système fonctionnera parfaitement sans cette régulation. Vous pouvez l'allumer, l'éteindre et régler la température du chauffage et de l'eau chaude sanitaire au panneau de commande de la chaudière proprement dite. Mais ce n'est pas la solution idéale. Dans ce chapitre on a étudié les différents types de boucles et les éléments qui les constituent, à savoir, les organes de détections, de réglages, et les régulateurs (continu et discontinu). par exemple le régulateur tout ou rien est un régulateur discontinu malgré que c'est la solution la moins chère et la plus simple, mais qui ne va pas sans quelques inconvénients comme un risque de collage des contacteurs et la nécessité d'avoir une hystérésis pour éviter un battement trop rapide des contacteurs (la coupure ne se fait pas à la même température que le ré enclenchement).

Par contre le régulateur continu (les régulateurs progressifs), c'est le régulateur idéal dans les installations de génie climatique. Il règle la température de la chaudière et la batterie froide en fonction de la température extérieure. Une sonde extérieure distincte est reliée au thermostat. Ce dernier « réfléchit » et optimise la régulation de la température de départ (= la température de l'eau dans les canalisations) de notre installation de chauffage et de climatisation. Cela signifie que, s'il fait plus froid à l'extérieur, la sonde extérieure en informe la chaudière plus tôt, donc avant qu'il fasse plus froid à l'intérieur. La chaudière augmente donc la température de chauffage à temps, tout en gardant une température plus basse possible afin de consommer moins d'énergie.

Chapitre II

Identification et Modélisation des systèmes.

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, on s'intéressera principalement à l'étude des systèmes linéaires invariants dans le temps. Par invariance dans le temps, on entend que les paramètres du modèle sont constants et indépendants du temps. Mathématiquement, un système linéaire invariant est gouverné par des équations différentielles linéaires à coefficients constants. Ces équations différentielles relient la sortie à l'entrée. L'identification des grandeurs d'entrée et de sortie pour un processus ainsi que l'établissement d'équations les reliant constitue l'étape de modélisation mathématique du système à étudier.

La restriction aux systèmes physiques linéaires (gouvernés par des équations différentielles linéaires) est due au fait que seules ces dernières disposent de solutions analytiques connues. Cependant, il est évident que la plupart des systèmes physiques étudiés sont fondamentalement non linéaires. Certains systèmes non linéaires peuvent être linéarisés et peuvent ainsi être étudiés, sous certaines hypothèses, dans le cadre de la théorie des systèmes linéaires. En réalité, le modèle d'un processus donné n'est jamais parfait; par conséquent, on commet inévitablement une erreur de modélisation.

Prenons, pour simplifier l'exposé, le cas des systèmes linéaires où on ne s'intéresse qu'à une seule grandeur d'entrée et une seule grandeur de sortie (Single-Input-Single-Output ou SISO).

II.2 Modélisation des systèmes linéaires

II.2.1. Définition de la notion de système

Un système est défini par ses constituants et les interactions qui existent entre eux, l'ensemble représentant une entité individualisée. Par système, on signifie souvent processus. L'importance de la notion de système réside dans sa généralité. En effet, un système ou un processus peuvent être de nature quelconque : mécanique, électrique, électromécanique, biologique, chimique, physico chimique, sociologique, économique, industriel, etc.

Pour ce qui concerne la théorie des systèmes, on considère le système (ou le processus) évoluant dans son environnement et pouvant interagir avec lui. A priori, le système peut être considéré comme une boîte noire ou black box en anglais. Il est dès lors important, en premier lieu, de distinguer les grandeurs d'entrée (inputs) et les grandeurs de sortie (outputs) du

système étudié. Ensuite, il importe d'essayer de déterminer les relations qui les relient et de connaître la nature et les modes d'interaction avec l'environnement.

Par grandeur de sortie, on entend la grandeur que l'on souhaite réguler ou asservir. Par grandeur d'entrée, on entend les signaux qui permettent d'agir sur le système, c'est-à-dire qui affectent l'état de sa grandeur de sortie. La grandeur de sortie peut être modifiée par l'action des grandeurs d'entrées ou sous l'effet de perturbations provenant de l'environnement ou encore sous l'effet de la variation des constituants du système lui-même.

Un exemple, qui va nous intéresser particulièrement, est le problème de la régulation de la température d'une salle de classe. Le système à réguler est constitué de la salle de classe avec les échangeurs de chaleur, les murs, les fenêtres, les personnes et les objets qui sont à l'intérieur.

La grandeur de sortie de ce système est la température à l'intérieur de la salle, c'est la grandeur que l'on veut réguler. La grandeur d'entrée est constituée par le débit d'eau chaude qui circule dans les échangeurs pour réchauffer la salle. Bien entendu, il y'a des relations thermodynamiques qui relient la température ambiante dans la salle au débit du liquide chauffant. Par ailleurs, ce système est soumis à des perturbations, interne comme le nombre d'étudiants, et externe comme ouverture de la porte, etc.

L'idée de base dans le contrôle des systèmes est qu'il faut d'abord déterminer (identifier) un modèle du système à asservir. Une fois qu'un modèle est disponible, il s'agit d'étudier son comportement et de déterminer des dispositifs de contrôle. L'étude du comportement du système consiste essentiellement à déterminer comment la sortie du système réagit aux sollicitations des entrées et aux perturbations.

II.2.2 Fonction de transfert d'un système linéaire

Si l'on revient sur la transformée de Laplace, on peut convenir qu'il est plus pratique d'utiliser les techniques du calcul opérationnel pour résoudre les équations différentielles qui modélisent les systèmes linéaires à étudier

On sait qu'un système donné par son équation différentielle dans l'espace temporelle peut être de manière équivalente représentée dans le plan de Laplace par une équation algébrique. Ainsi, on convient de caractériser le système dans l'espace de Laplace par une fonction que l'on appelle la fonction de transfert du système. Cette fonction est définie comme le rapport entre la transformée de Laplace de la sortie sur la transformée de Laplace de l'entrée sous l'hypothèse que les conditions initiales sont toutes nulles.

Le système étant linéaire, la relation liant $e(t)$ et $s(t)$ est une équation différentielle à coefficients constants.

$$\sum_0^n B_n \frac{d^n s(t)}{dt^n} = \sum_0^m A_m \frac{d^m e(t)}{dt^m} \quad (\text{II.1})$$

Soit en appliquant la transformée de Laplace :

$$E(p) = \mathcal{L}(e(t)) \quad \text{et} \quad S(p) = \mathcal{L}(s(t))$$

$$\frac{S(p)}{E(p)} = \frac{\sum A_m \cdot P^m}{\sum B_n \cdot P^n} = F(p) \quad , \quad \text{fonction de transfert du système.}$$

Elle peut se mettre sous la forme d'une fraction rationnelle en p :

$$F(p) = \frac{N(p)}{D(p)} = \frac{A_m \cdot P^m + \dots A_1 \cdot p + A_0}{B_n \cdot P^n + \dots B_1 \cdot p + B_0} \quad (\text{II.2})$$

$$N(p) = 0 \quad \Rightarrow \quad \text{on a } m \text{ zéros : } p_i$$

$$D(p) = 0 \quad \Rightarrow \quad \text{on a } n \text{ pôles : } p_j$$

Soient p_j et p_i les pôles et les zéros de $F(p)$; (ce sont des complexes)

En transformant l'expression (II.2), en faisant apparaître les parties constantes et les parties variables on aura :

$$F(p) = \frac{A_m}{B_n} \cdot \frac{\prod_{i=1}^m (p - p_i)}{\prod_{j=1}^n (p - p_j)} = \frac{A_m}{B_n} \cdot \frac{\prod_{i=1}^m (-p_i)}{\prod_{j=1}^n (-p_j)} \cdot \frac{\prod_{i=1}^m (1 - \frac{p}{p_i})}{\prod_{j=1}^n (1 - \frac{p}{p_j})} \quad (\text{II.3})$$

Les différents composés de $F(p)$ pouvant être :

- Racine réelle $-\frac{1}{m}$, d'ordre u : $(1+mp)^u$
- Racine imaginaire $-a \pm jb$ d'ordre v : $(1 + \frac{2a \cdot p}{a^2+b^2} + \frac{p^2}{a^2+b^2})^v \quad p_{1,2} = -a \pm jb$
- Racine nulle d'ordre w : p^w

Exemple1 : Soit donc donnée une équation différentielle qui représente le modèle d'un système physique:

$$\frac{dy}{dt} + 2y = x \quad (\text{II.4})$$

La sortie du système est $y(t)$ et l'entrée est $x(t)$. Si on considère que la condition initiale est nulle, on obtient après application de la transformée de Laplace l'équation algébrique:

$$pY(p) - y(0) + 2Y(p) = X(p) \quad (\text{II.5})$$

avec les conditions initiales est nulles $y(0)=0$ donc on a

$$pY(p) + 2Y(p) = X(p) \quad (\text{II.6})$$

En effectuant le rapport de la sortie sur l'entrée, on obtient la fonction de transfert du système considéré

$$F(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{1}{p+2} \quad (\text{II.7})$$

Exemple 2: Soit donnée une équation différentielle qui représente le modèle d'un système physique

$$\frac{d^2y}{dt^2} + 2 \frac{dy}{dt} + y = 5 \frac{dx}{dt} + x \quad (\text{II.8})$$

La sortie est $y(t)$ et l'entrée est : $x(t) = 5 \frac{dx}{dt} + x$ (II.9)

Par application de la transformée de Laplace, on obtient :

$$y(t) \xrightarrow{\mathcal{L}} Y(p)$$

$$\frac{dy}{dt} \xrightarrow{\mathcal{L}} pY(p) - y(0)$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} \xrightarrow{\mathcal{L}} p^2Y(p) - py(0) - y'(0)$$

$$x(t) \xrightarrow{\mathcal{L}} X(p)$$

$$\frac{dx}{dt} \xrightarrow{\mathcal{L}} pX(p) - x(0)$$

Avec les conditions initiales sont nulles $y(0)=0$, $y'(0)=0$, $x(0)=0$ et $x'(0)=0$ on aura :

$$p^2Y(p) + 2pY(p) + Y(p) = 5pX(p) + X(p) \quad (\text{II.10})$$

d'où la fonction de transfert du système considéré :

$$F(p) = \frac{5p+1}{p^2+2p+1} \quad (\text{II.11})$$

Remarque :

On peut passer d'une représentation par équation différentielle à une représentation par fonction de transfert et vice-versa. Il existe aussi d'autres représentations comme la

représentation par variables d'états et la représentation sous forme de pôles et zéros. Pour obtenir l'équation différentielle d'un système dont on connaît la fonction de transfert, il suffit

de remplacer s par l'opérateur de dérivation $p \xrightarrow{\mathcal{L}^{-1}} \frac{d}{dt}$, $p^2 \xrightarrow{\mathcal{L}^{-1}} \frac{d^2}{dt^2}$ et en général :

$$p^n \xrightarrow{\mathcal{L}^{-1}} \frac{d^n}{dt^n}$$

II.3 Modèles de quelques systèmes linéaires

Dans ce paragraphe nous allons étudier en détail les systèmes du premier ordre et du deuxième ordre car ce sont les formes les plus usuelles qui caractérisent les fonctions de transferts.

II.3.1 Systèmes du premier ordre

II.3.1.1 Exemple d'un circuit électrique

Soit l'exemple d'un circuit électrique élémentaire qui est constitué d'une résistance R et d'une self L . Ce circuit peut servir de modèle pour un chauffage électrique à résistance, pour un moteur électrique à courant continu, pour un filtre électrique en télécommunications, etc. Pour obtenir le modèle de ce système, il faut :

- ✓ Déterminer l'entrée et la sortie.

Dans ce genre de problèmes, la sortie est l'intensité du courant i qui circule dans le circuit. S'il s'agit d'un chauffage par résistance, le courant i est la grandeur de sortie puisque c'est ce courant qui détermine la température dans la pièce. S'il s'agit d'un moteur à courant continu, ce courant est la grandeur que l'on souhaite contrôler puisqu'il est directement relié au couple qui agit sur le moteur pour avoir une vitesse de rotation constante.

L'entrée est la tension V . C'est la grandeur qui permet d'agir et de modifier la grandeur de sortie i . En effet, par modification de la tension d'entrée, on modifie l'intensité du courant i .

- ✓ Trouver le lien entre la sortie et l'entrée.

C'est immédiat, il suffit d'appliquer les lois de Kirchoff.

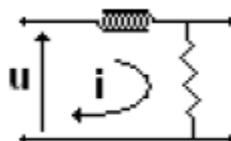


Figure II.1 circuit électrique RL

$$V = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (\text{II.12})$$

La relation obtenue, reliant la sortie à l'entrée, est une équation différentielle du premier ordre à coefficients constants. Ces équations constituent le modèle mathématique du système électrique étudié.

✓ Fonction de transfert.

En appliquant la transformée de Laplace à l'équation différentielle du système électrique, on obtient :

$$V(p) = (R + Lp)I(p) \quad (\text{II.13})$$

On peut en déduire la fonction de transfert du système, notée F(s):

$$F(p) = \frac{I(p)}{V(p)} = \frac{1}{R+L.p} \quad (\text{II.14})$$

Dans la représentation des systèmes que l'on utilisera, un système sera représenté graphiquement par un rectangle (voir Figure II.2). Le rectangle contiendra souvent la fonction de transfert.

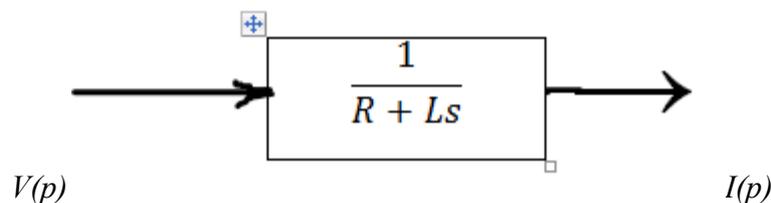


Figure II.2 modèle du circuit électrique

II.3.1.2 Exemple d'un système Hydraulique

Comme pour l'exemple du circuit électrique, soit un système hydraulique constitué d'un réservoir qui est alimenté par une conduite d'arrivée du liquide et qui délivre en sortie un certain débit du liquide. Le réservoir a une surface A et le niveau du liquide est repéré par la hauteur x. Le débit de la conduite qui amène le liquide est noté V_{in} , le débit du liquide quittant le réservoir est noté V_{out} .

Pour obtenir le modèle de ce système, il faut :

✓ Déterminer l'entrée et la sortie.

La grandeur que l'on souhaite contrôler dans le contexte de ce problème est la hauteur du niveau du liquide dans le réservoir. C'est donc la grandeur de sortie. L'entrée

est le débit V_{in} du liquide alimentant le réservoir. On peut même définir l'entrée comme la différence entre le débit entrant et le débit sortant : $(V_{in} - V_{out})$.

- ✓ Trouver le lien entre la sortie et l'entrée.

Le modèle mathématique est obtenu en utilisant le principe de la conservation de la matière. La variation de volume dans le réservoir est donnée par la relation :

$$A \cdot \frac{dx}{dt} = V_{in} - V_{out} \quad (II.15)$$

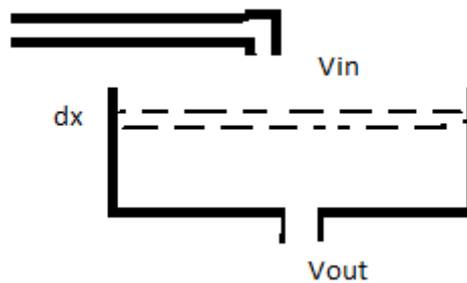


Figure II.3 modèle d'un système hydraulique

- ✓ Fonction de transfert.

En appliquant les techniques du calcul opérationnel, on obtient :

$$A \cdot p \cdot X(p) = V_{in} - V_{out} = V(p) \quad (II.16)$$

D'ou l'expression de la fonction de transfert :
$$F(p) = \frac{X(p)}{V(p)} = \frac{1}{A \cdot p} \quad (II.17)$$

II.3.1.3 Exemple d'un système Mécanique en translation

On veut modéliser le mouvement d'un système mécanique du genre véhicule sur roues. Si on néglige l'inertie des roues et si on considère que les frottements sont proportionnels à la vitesse et s'opposent à la direction du mouvement. Le problème se ramène à celui d'une masse m et du frottement de coefficient f . Pour obtenir le modèle de ce système, il faut :

- ✓ Déterminer l'entrée et la sortie.

La sortie que l'on souhaite contrôler est la vitesse V du véhicule, l'entrée est la force appliquée u , développée par le moteur.

- ✓ Trouver le lien entre la sortie et l'entrée.

La relation qui relie la sortie à l'entrée est obtenue par application des lois de la dynamique de Newton.

$$m \cdot \frac{dv}{dt} + f \cdot v = u \quad (\text{II.18})$$

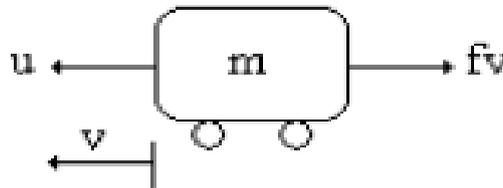


Figure II.4 modèle d'un système mécanique en translation

✓ La fonction de Transfert

Pour obtenir la fonction de transfert du système donné, on applique les règles du calcul opérationnel. On obtient:

$$m \cdot pV(p) + fV(p) = U(p) \quad (\text{II.19})$$

D'où on obtient la fonction de transfert :

$$F(p) = \frac{V(p)}{U(p)} = \frac{1}{mp+f} \quad (\text{II.20})$$

D'après le tableau (II, 1) ,[voir Annexe]

Cela conduit à écrire :

$$Y(p) = \frac{K}{1+Tp} \quad (\text{II.21})$$

II.3.2 Systèmes du second ordre

II.3.2.1 Exemple d'un système Mécanique de translation

Il s'agit du problème classique d'un système mécanique de translation constitué d'une masse m qui peut être mise en mouvement par action d'une force extérieure e . cette masse est reliée à un ressort de constante de raideur k . Lorsque la masse entre en mouvement, il se développe une force de frottement de coefficient f qui s'oppose à ce mouvement.

✓ Déterminer l'entrée et la sortie.

La sortie est la position du centre de gravité de la masse m . L'entrée est la force extérieure appliquée $e(t)$.

✓ Trouver le lien entre la sortie et l'entrée.

Cette relation est obtenue en appliquant la loi de Newton de la dynamique. On obtient l'équation différentielle du second ordre suivante :

$$m \frac{dx^2}{dt^2} + f \frac{dx}{dt} + kx = e(t) \quad (\text{II.22})$$

✓ La fonction de Transfert

Pour obtenir la fonction de transfert du système donné, on applique les règles du calcul opérationnel. On obtient:

$$m.p^2.X(p) + f.p.X(p) + kX(t) = E(p) \quad (\text{II.23})$$

D'où la fonction de transfert :

$$F(s) = \frac{X(p)}{E(p)} = \frac{1}{mp^2+fp+k} \quad (\text{II.24})$$

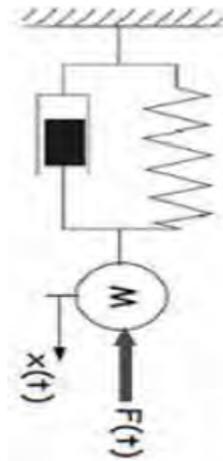


Figure II.5 modèle d'un système mécanique en translation du second ordre

II.3.2.2 Exemple d'un système électromécanique

Il s'agit de la modélisation d'un système pour le contrôle de la vitesse d'un moteur à courant continu. Ce modèle peut représenter celui d'un moteur qui commande une articulation d'un bras de robot. Il est très fréquent dans les asservissements. Son schéma est le suivant :

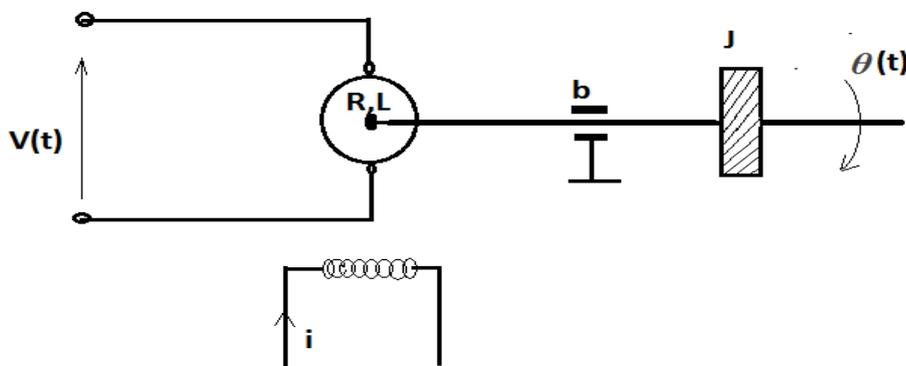


Figure II.6 modèle d'un moteur à courant continu

Le moteur est alimenté par une tension V . Le moteur avec son bobinage est équivalent à un circuit électrique de résistance R , d'inductance L et d'une force contre-électromotrice V_e . Le moteur actionne un système mécanique de moment d'inertie J , incluant le rotor et la charge. Il y a un frottement de coefficient b . Le système mécanique tourne d'un angle θ . On considère que les constantes sont telles que K_t (constante caractérisant l'armature) est égale à K_e (Constante du moteur) : $K=K_e=K_t$.

✓ Déterminer l'entrée et la sortie.

La grandeur de sortie est la position angulaire de l'articulation, l'angle θ que l'on souhaite contrôler. La grandeur d'entrée du système est la tension V appliquée au moteur.

✓ Trouver le lien entre la sortie et l'entrée.

Le moment appliqué par le couple moteur, T , est proportionnel au courant des armatures, i , par un facteur constant K_t . La force contre électromotrice e , V_e , est reliée à la vitesse de rotation par les équations suivantes:

$$T = K_t \cdot i \quad (\text{II.25})$$

$$e = K_t \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{II.26})$$

En appliquant les lois de Newton et de Kirchoff, on obtient les équations suivantes :

$$J\theta^{**} + b\theta^* = K_i \quad (\text{II.27})$$

$$L \frac{di}{dt} + Ri = V_e - K\theta^* \quad (\text{II.28})$$

✓ Fonction de transfert

En appliquant les techniques du calcul opérationnel, les équations ci-dessus s'écrivent :

$$p(Jp + b)\theta(p) = K \cdot I(p) \quad (\text{II.29})$$

$$(Lp + R) \cdot I(p) = V_e - K \cdot p \cdot \theta(p) \quad (\text{II.30})$$

En éliminant $I(p)$ des deux équations, on obtient la Fonction de Transfert, qui est le rapport de la vitesse de rotation (sortie) sur la tension V (l'entrée) :

$$\frac{p\theta(p)}{V(p)} = \frac{K}{(Jp+b)(Lp+R)+K^2} \quad (\text{II.31})$$

II.3.2.3 Exemple d'un système Electrique de second ordre

Soit l'exemple d'un circuit électrique RLC qui est constitué d'une résistance R, d'une self L et d'une Capacité C. Pour obtenir le modèle de ce système, il faut :

- ✓ Déterminer l'entrée et la sortie.

La grandeur que l'on souhaite contrôler est la tension $v(t)$ aux bornes de la capacité C. $v(t)$ est donc la sortie du système électrique donnée. La grandeur d'entrée est la tension $e(t)$.

- ✓ Trouver le lien entre la sortie et l'entrée.

Pour cela, on utilise les lois de Kirchhoff, ce qui donne les deux équations suivantes:

$$e(t) = s(t) + R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} \quad (\text{II.32})$$

Et
$$i(t) = C \frac{ds}{dt} \quad (\text{II.33})$$

En remplaçant $i(t)$ dans la première équation à l'aide de son expression de la deuxième équation, on obtient l'équation différentielle qui relie la sortie à l'entrée et qui représente le modèle du système donné.

$$LC \frac{ds^2}{dt^2} + RC \frac{ds}{dt} + s = e(t) \quad (\text{II.34})$$

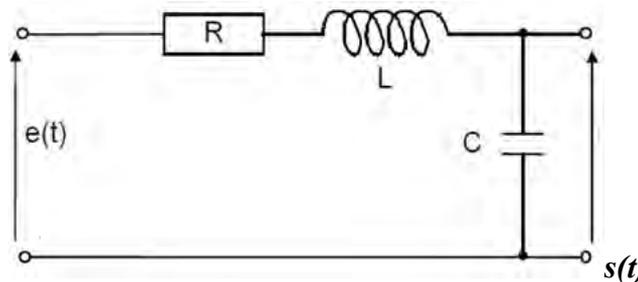


Figure II.7 circuit électrique RLC

- ✓ Fonction de transfert

En appliquant les techniques du calcul opérationnel, la fonction de transfert est :

$$F(p) = \frac{S(p)}{E(p)} = \frac{1}{LCp^2 + RCp + 1} \quad (\text{II.35})$$

On rappellera qu'elle peut être représentée par le schéma ci-après.



Figure II.8 modèle du circuit électrique

II.3.3 Systèmes pouvant être du premier ou du deuxième ordre

Les systèmes suivants peuvent être considérés comme ceux du premier ordre ou du second ordre selon la grandeur de sortie à laquelle on s'intéresse. Ceci montre que la grandeur de sortie d'un système dépend du contexte dans lequel on considère le problème.

II.3.3.1 Exemple d'un système mécanique de rotation

On considère un moteur qui fait tourner à la vitesse de rotation Ω une roue de moment d'inertie J . Le système est soumis à un frottement visqueux de coefficient f . Γ est le couple appliqué à l'arbre portant la roue.

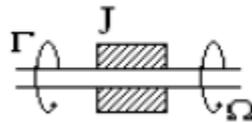


Figure II.9 système mécanique de rotation

- ✓ Déterminer l'entrée et la sortie.

Si on souhaite réguler la vitesse de rotation de la roue, la grandeur de sortie est alors vitesse de rotation du moteur Ω . L'entrée du système est le couple appliqué Γ .

- ✓ Trouver le lien entre la sortie et l'entrée.

La relation entrée-sortie est une équation différentielle qui est établie en appliquant les lois générales de la dynamique. On obtient l'équation différentielle du premier ordre :

$$\Gamma = f \Omega + J \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{II.36})$$

- ✓ La fonction de transfert

Est obtenue en appliquant le calcul opérationnel :

$$F(p) = \frac{\Omega(p)}{\Gamma(p)} = \frac{1}{f + Js} \quad (\text{II.37})$$

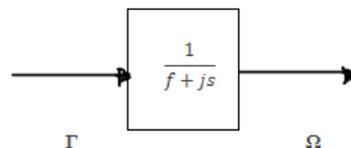


Figure II.10 représentation du modèle du système mécanique de rotation

Si on s'intéresse au contrôle de la position angulaire θ de la roue au lieu de sa vitesse, c'est la position angulaire qui devient la sortie du système donné. Comme la vitesse est la dérivée de la position, on a :

$$\Omega(t) = \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{II.38})$$

Et
$$\Omega(p) = p \cdot \theta(p) \quad (\text{II.39})$$

L'équation différentielle de ce système devient :

$$\Gamma = f \frac{d\theta}{dt} + J \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (\text{II.40})$$

Elle est du second ordre. La fonction de transfert correspondante est :

$$F(p) = \frac{\theta(p)}{\Gamma(p)} = \frac{1}{p(f+Jp)} \quad (\text{II.41})$$

Le système du point de vue du contrôle de la position angulaire est représenté par deux blocs en cascade.

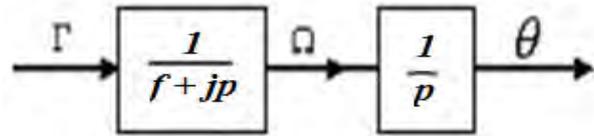


Figure II.11 représentation du modèle du système mécanique

II.4 Identification en Boucle Ouverte

Identifier un système hydraulique ou thermique réel (appelé objet) c'est caractériser un autre système (appelé modèle), à partir de la connaissance expérimentale des entrées et sorties de manière à obtenir identité de comportement

Le modèle peut être un système physique (au sens de simulateur analogique ou numérique et de modèle réduit), ou bien un système abstrait (modèle mathématique, système d'équations algébriques ou différentielles). Dans la suite de ce chapitre, nous rechercherons enfin de compte un modèle mathématique, recherche qui peut cependant comporter comme étape une simulation (le passage par un modèle physique).

II.4.1 Les différents modèles d'identification des systèmes

II.4.1.1 Modèle du 1^{er} ordre :

En identité la réponse indicielle en BO du système à celle d'un modèle dont la forme est prédéfinie avec certains paramètres. La méthode consiste à calculer les meilleurs paramètres en fonction de la forme de la réponse réelle.

Modèle du 1er ordre

$$G(p) = \frac{K}{1+\tau.p} \quad (\text{II.42})$$

Où K est le gain statique et τ la constante de temps.

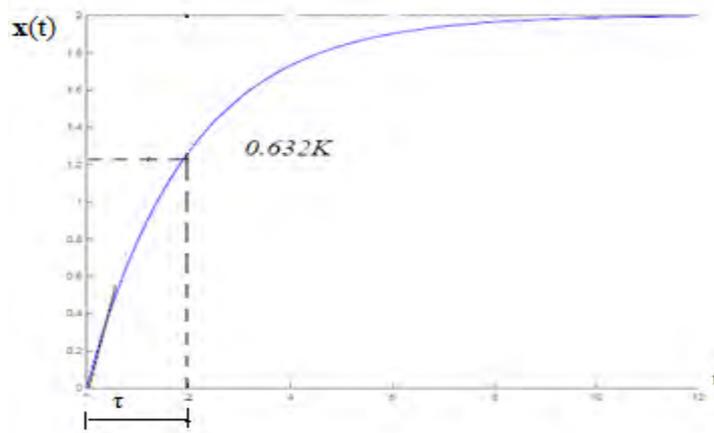


Figure. II.12 Réponse indicielle d'un 1er ordre

La forme canonique du modèle du 1er ordre avec retard s'écrit :

$$T(p) = \frac{K.e^{-rp}}{1+\tau p} \quad (II.43)$$

Où r représente le retard

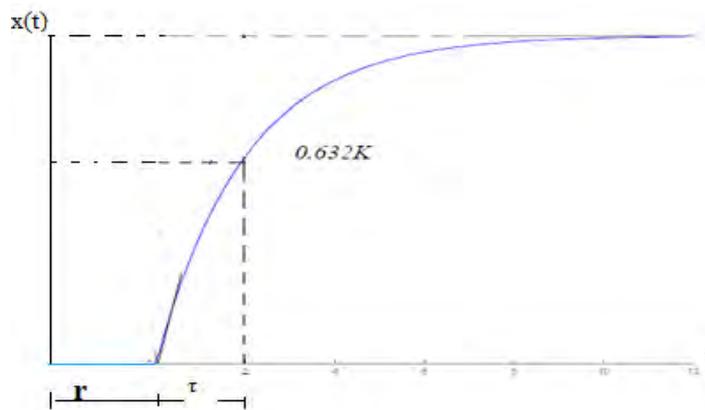


Figure. II.13 Réponse indicielle d'un 1er ordre avec retard

II.4.1.1.1 Exemple d'un système du 1^{er} ordre retardé, système thermique (soufflerie) :

D'après les tests [1] Sur la soufflerie de séchage convectif on trouve :

Ils constatent que leur système peut être représenté par un modèle du premier ordre avec un retard pur représenté par la fonction de transfert

$$G(p) = \frac{K.e^{-\tau p}}{1+Tp}$$

Avec : K le gain statique ; τ le retard et T la constante de temps.

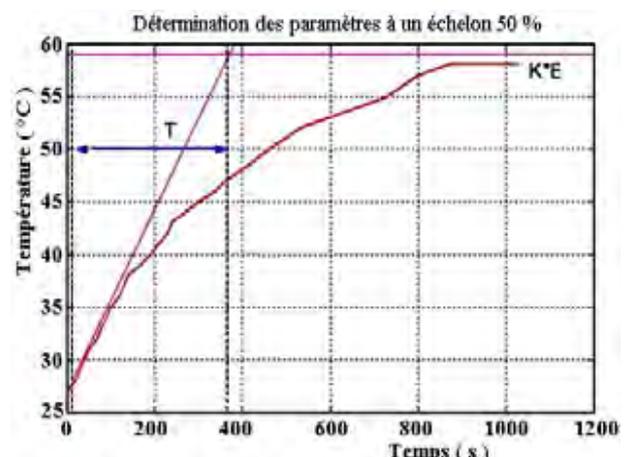


Figure II.14 La réponse indicielle

Une méthode graphique a été adoptée pour déterminer les différents paramètres du modèle et ce pour une réponse à un échelon de 50 %, (Figure II.15).

D'après le graphique de la figure II.15, les paramètres du modèle mathématique déterminés se détaillent comme suit :

Le gain statique : $K = 1.16$; le retard : $\tau = 10$ et la constante de temps : $T = 350$ s.

La figure II.15 montre les deux courbes représentant le modèle et la réponse indicielle du processus pour même échelon.

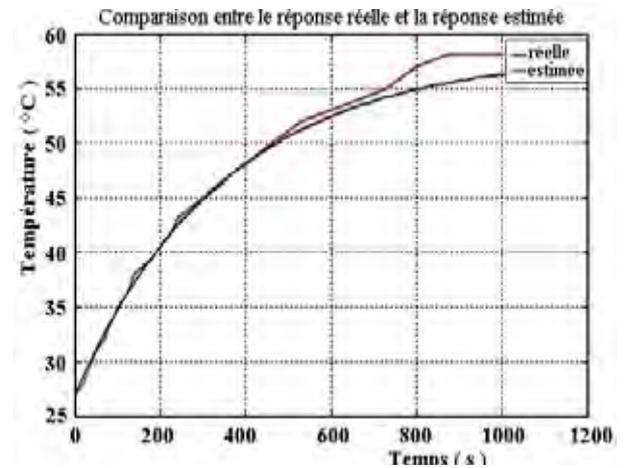


Figure II.15 Calcul caractéristique a partir de la R.I

On constate que les deux courbes sont pratiquement confondues. L'enregistrement des réponses indicielles de notre système à différents échelons de puissance appliqués au système nous a permis de tirer les résultats suivants :

Le retard pur est constant, $\tau = 10$. La constante de temps est constante, $T = 350$ s.

Le gain statique K varie en fonction de l'échelon appliqué.

L'évolution du gain statique suivant de différents échelons.

On constate alors que c'est un système non linéaire et qu'il peut se présenter sous la forme d'un modèle non linéaire de type Hammerstein.

Donc d'après les calculs le modèle de cette expérience est définie par

$$G(p) = \frac{1.16. e^{-10p}}{1 + 350p}$$

II.4.1.2 Modèle du 2eme ordre

Dans les systèmes du second ordre deux cas sont possibles :

- ✓ Système oscillant

Dans les procédés industriels ce genre de réponse n'est pas souvent rencontré lorsqu'il s'agit d'une chaîne ouverte. On rencontre cette réponse surtout en chaîne fermée, et l'identification sert alors à vérifier le réglage obtenu. Le modèle proposé est celui d'un système du second ordre avec retard, autorégulant ou intégrateur

$$F(p) = \frac{Ke^{-\tau p}}{1 + \frac{2\xi}{\omega_n}p + \frac{p^2}{\omega_n^2}} \quad (II.44)$$

K est le gain statique du système

$\omega_n > 0$ est la pulsation naturelle en (rad/s)

$0 < \xi < 1$ est le coefficient d'amortissement.

τ ou r représente le temps mort

L'identification des paramètres de cette fonction de transfert se fera à partir de la courbe (figure II.16) qui représente la réponse indicielle on détermine les paramètres du système dans l'ordre suivant :

Etape 1 - A partir de la réponse à un échelon, on note les éléments suivants : le temps du premier dépassement noté t_{dep} , le dépassement Y_{dep} telle que $Y_{dep} = (Y_{max} - Y_{finale}) / Y_{finale}$

Etape 2 - On calcule ensuite le coefficient d'amortissement par la formule :

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{\ln(Y_{dep})}\right)^2}} \quad (\text{II.45})$$

Etape 3 - Enfin, la pulsation naturelle est déduite :

$$\omega_n = \frac{\pi}{t_{dep} \sqrt{1 - \xi^2}} \quad (\text{II.46})$$

La pulsation naturelle peut être également calculée à partir de la pulsation propre notée ω_p .

On entend par pulsation propre (également appelée pseudo-pulsation) la pulsation correspondant aux oscillations aperçues sur la réponse à un échelon. Si ces oscillations possèdent une période propre (appelée aussi pseudo-période) notée T_p , alors la pulsation propre est :

$$\omega_p = 2\pi f_p = \frac{2\pi}{T_p} \quad (\text{II.47})$$

La relation entre la pulsation naturelle et la pulsation propre est :

$$\omega_n = \frac{\omega_p}{\sqrt{1 - \xi^2}} \quad (\text{II.48})$$

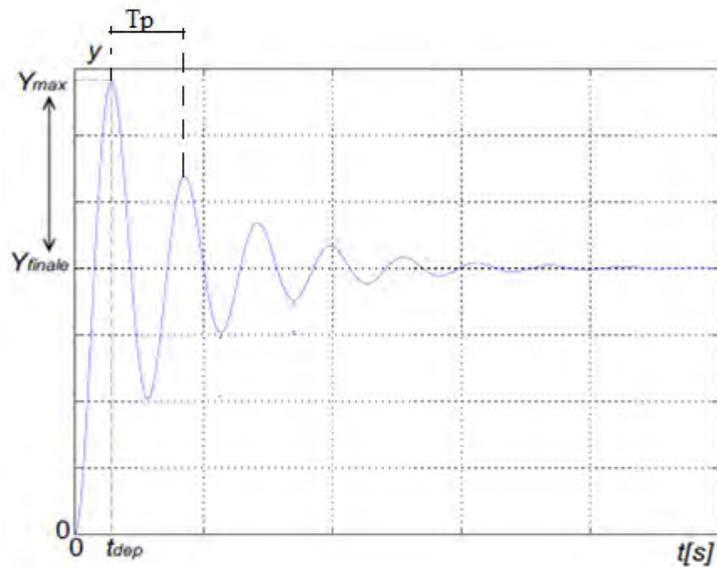
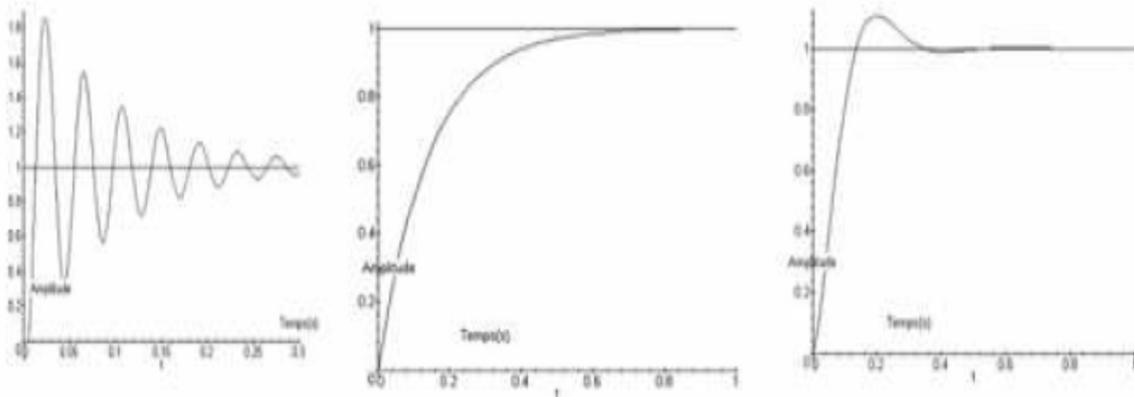


Figure. II.16 Réponse indicielle du 2eme ordre

Nous rappelons que suivant la valeur du coefficient d'amortissement ξ on aura trois régimes de fonctionnement représentés par les figures suivantes :



a) Système peu amorti

b) Système fortement amorti

c) Système bien amorti

Figure II.17 amortissement d'un système

✓ Système apériodique

Lorsque le système du second ordre est non-oscillant (apériodique), il est équivalent à la mise en série, ou à la multiplication, de deux systèmes du premier ordre. On peut donc l'écrire sous la forme suivante :

$$G(p) = \frac{Y(p)}{U(p)} = \frac{K}{a.p^2+b.p+1} = \frac{K}{\tau_1.p+1} \cdot \frac{1}{\tau_2.p+1} = \frac{K}{\tau_1.\tau_2.p^2+(\tau_1+\tau_2).p+1} \quad (\text{II.49})$$

Ce modèle nous intéressera lorsque nous allons étudier le modèle de Strejc dans le paragraphe qui suit.

II.4.2 Méthode de Strejc

Cette méthode peut s'appliquer aux systèmes dont la réponse indicielle ne présente pas de dépassement. et identifiée à une fonction de la forme :

$$T(p) = \frac{K.e^{-r.p}}{(1+\tau p)^n} \quad (\text{II.50})$$

Les paramètres à identifier sont donc :

- le gain statique K_s , le retard r , la constante de temps τ , et l'ordre n .

La figure (II.18) représente les réponses indicielles pour plusieurs jeux de paramètres.

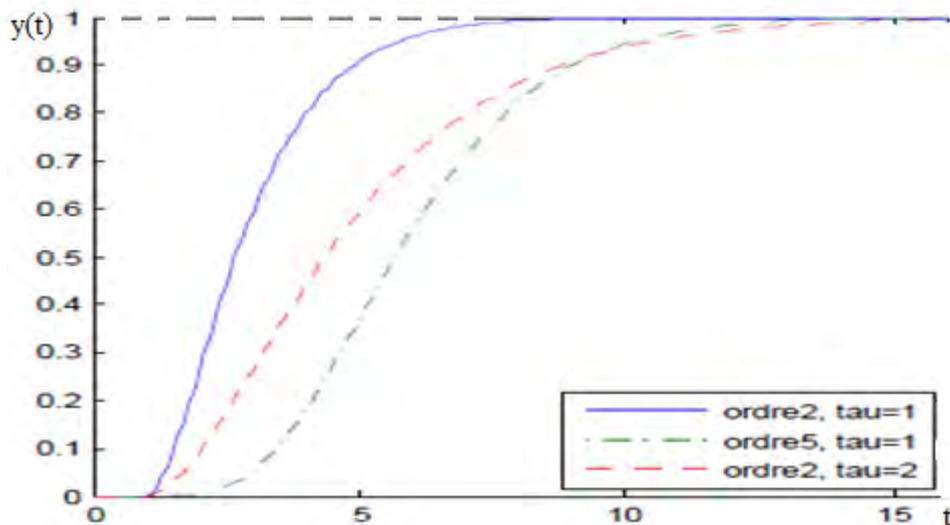


Figure II.18 Réponses de modèles de Strejc pour $K = 1, r = 1$

La méthode :

Pour identifier le système, la méthode peut se décomposer en :

- Le gain statique est mesuré directement par la valeur finale de la sortie. Celle-ci vaut $K.E_0$ où E_0 est l'amplitude de l'échelon d'entrée.
- On trace la tangente au point d'inflexion I pour déterminer deux valeurs : T_u et T_g . Voir figure (II.19) pour la mesure de ces deux temps.
- Relever T_u et T_g en déduire l'ordre n en utilisant le tableau II.1. Entrée Deux lignes du tableau, on choisit la valeur de n la plus petite.
- Déterminer la constante de temps τ à partir de T_g/τ du tableau.
- Déterminer le retard r quand il existe à partir de la différence entre la valeur de T_u mesurée et celle donnée par la colonne T_g/τ du tableau.

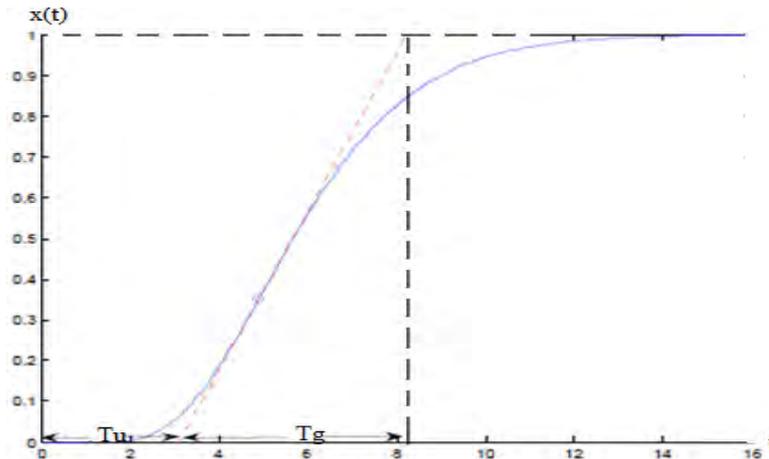


Figure II.19 Méthode pour obtenir T_u et T_g

n	T_u/τ	T_g/τ	T_u/T_g
1	0	1	0
2	0,28	2,72	0,1
3	0,8	3,7	0,22
4	1,42	4,46	0,32
5	2,10	5,12	0,41
6	2,81	5,70	0,49

Table II.1 Tableau de Strejc permettant de déduire l'ordre et la constante de temps du modèle

II.4.3 Méthode de Broïda

Le modèle proposé pour approcher le comportement du système est un premier ordre avec un retard pur. Sa fonction de transfert est :

$$T(p) = \frac{K.e^{-r.p}}{1+\tau p} \quad (\text{II.51})$$

Le principe n'est pas de faire coïncider la tangente au point d'inflexion (souvent imprécis) mais d'ajuster les paramètres τ et r pour que les courbes de réponse du modèle et du processus aient deux points communs judicieusement choisis. Les points communs C1 et C2 habituellement utilisés correspondent respectivement à 28% et 40% de la valeur finale. Le modèle de Broïda donne les points C1 et C2 pour les dates suivantes :

$$\frac{s(t)}{K.E_0} = 0.28 \Rightarrow \frac{t-r}{\tau} = 0.328$$

$$\frac{s(t)}{K \cdot E_0} = 0.40 \Rightarrow \frac{t - r}{\tau} = 0.510$$

La méthode d'Identification s'appuie sur les résultats précédents. Soient t_1 et t_2 les temps au bout desquels la réponse expérimentale atteint respectivement 28% et 40% de la valeur finale. On va simplement résoudre le système donné par :

$$\frac{t_1 - r}{\tau} = 0.328 \Rightarrow t_1 - r = 0.328 \cdot \tau$$

$$\frac{t_2 - r}{\tau} = 0.510 \Rightarrow t_2 - r = 0.510 \cdot \tau$$

La résolution de ces équations donne :

$$\tau = 5.5(t_2 - t_1)r = 2.8t_1 - 1.8t_2$$

Le gain K est déterminé comme dans la méthode de Strejc avec la valeur finale de la sortie. L'identification avec la méthode de Broïda est appliquée à la réponse indicielle donnée par la figure (II.20) :

$$T(p) = \frac{5 \cdot e^{-0.375p}}{(1 + 1.12p)} \quad (II.52)$$

La figure (II.20) donne les courbes de réponse du système réel et du modèle de Broïda. La concordance des deux points C1 et C2 est bien vérifiée,

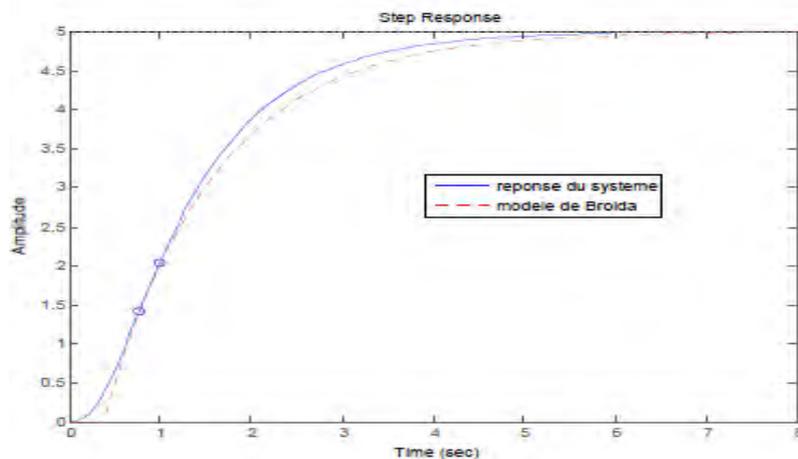


Figure II.20 Courbe réelle approchée par un modèle de Broïda

Les systèmes contenant un intégrateur ont une réponse indicielle en rampe, en régime permanent. L'asymptote de cette réponse est une droite d'équation $y = a(t - t_1)$ de pente a et qui coupe l'axe des abscisses pour $t = t_1$ voir figure (II.21).

En identifiant la réponse du système réel à la réponse d'un système intégrateur pur avec retard c'est-à-dire avec la fonction de transfert suivante :

$$T(p) = \frac{K \cdot e^{-r \cdot p}}{p} \quad (II.53)$$

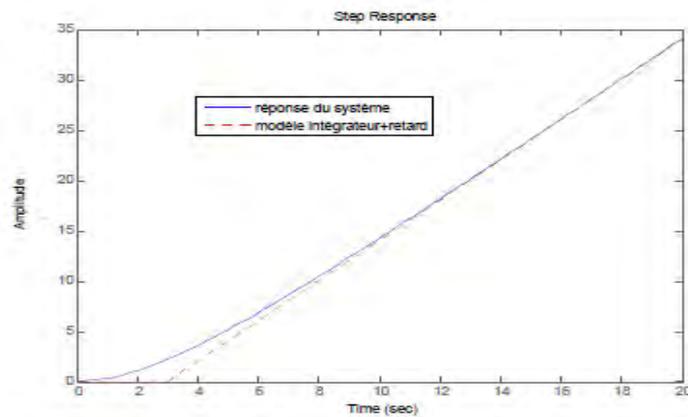


Figure II.21 Courbe réelle approché par un intégrateur retard

Les paramètres de ce système sont donnés par :

$$K = \frac{a}{E_0} r = t_1$$

Où E_0 est l'amplitude de l'échelon appliqué en entrée

II.5 Eléments de transfert

Le résumé présente les 6 éléments de transfert permettant de décrire tous les processus de la technique de régulation. Il est ainsi possible de remplacer par exemple une réponse indicielle enregistrée expérimentalement par l'interconnexion de différents éléments de transfert et d'en faire de cette manière une description mathématique aussi exacte que possible. Nous expliquerons ci-après les réponses indicielles des différents éléments de transfert et nous donnerons une explication physique et mathématique.

II.5.1 Élément P

L'élément P n'est rien d'autre qu'un amplificateur qui amplifie le signal d'entrée x_e d'un facteur proportionnel K_p sans temporisation, au signal de sortie x_a . En cas d'un saut à l'entrée de zéro à x_e , on obtient une sortie sans temporisation à la sortie. $x_a = K_p \cdot X_e$ l'élément P peut facilement se comparer à un amplificateur de puissance sous la forme d'un levier : la force F_e est amplifiée à la force F_a selon le rapport du bras de levier a/b (=facteur proportionnel).

II.5.2 Élément PT1

L'élément PT1 également appelé organe de temporisation du premier ordre, retarde le signal d'entrée d'une manière bien déterminée. En cas d'un saut à l'entrée de zéro à une

valeur x_e , la grandeur de sortie x_s tend vers le nouvel état d'équilibre avec un retard T et la description mathématique de ce comportement est donnée par la formule suivante :

$$x_s = K_p \cdot x_e \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (\text{II.54})$$

T représente la constante de temps de l'élément, définissant une variation de la sortie de 63% par rapport à l'état d'équilibre. K_p représente le facteur de proportionnalité. 98% du nouvel état d'équilibre ne sont atteints qu'après quatre constantes de temps $4T$. (Théoriquement, on ne parvient jamais à 100%, car il s'agit d'un processus asymptotique et pratiquement on supposera que l'on atteint la nouvelle position d'équilibre après une durée de $5T$).

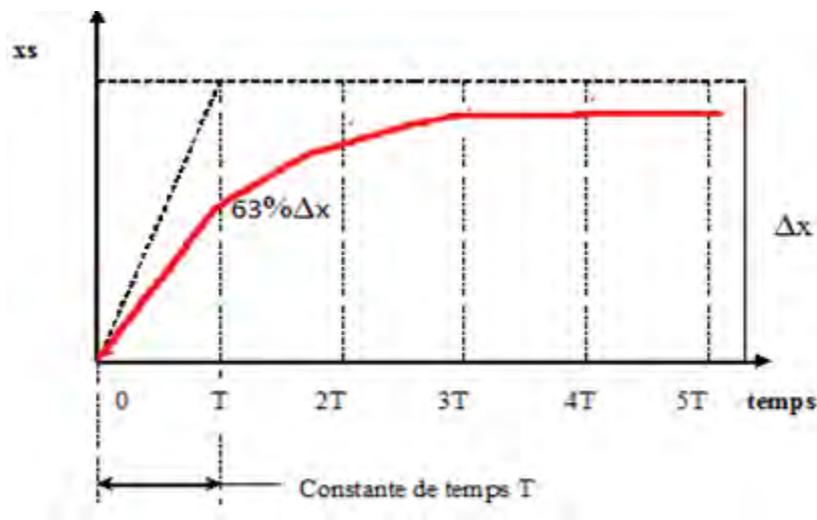


Figure II .22 réponse indicielle d'un organe PT1

II.5.3 Elément I

L'élément I répond à un saut de la grandeur d'entrée de zéro à x_e par une augmentation progressive de la grandeur de sortie x_s sous forme d'une droite (comportement intégral).

$$x_s = K_i \cdot x_e \cdot t \quad (\text{II.55})$$

La pente de la droite dépend d'une part de la grandeur du saut et d'autre part du paramètre de l'organe I, à savoir le facteur d'intégration K_i . Un élément I caractéristique est par exemple un réservoir d'eau qui se remplit et se vide simultanément : le niveau de l'eau augmente et descend constamment en fonction du rapport des quantités d'eau qui entrent et sortent du réservoir.

II.5.4 Élément DT1

L'élément DT1 réagit comme suit à un saut de l'entrée de zéro à une valeur x_e ; la grandeur de sortie augmente tout d'abord sans temporisation à une valeur déterminée, puis retombe à la valeur zéro selon la formule mathématique :

$$x_s = \frac{K_D}{T} \cdot x_e \cdot e^{-\frac{\tau}{T}} \quad (\text{II.56})$$

Les grandeurs caractéristiques sont en l'occurrence la constante de temps T et le facteur de dérivation K_D . De purs organes DT1 sont rares, mais la comparaison la plus simple consiste à envisager un organe RC : le condensateur n'est tout d'abord pas chargé et donc totalement conducteur, lorsque la charge du condensateur augmente, sa résistance augmente en tendant vers l'infini conformément à un élément PT1 ; inversement, la tension de sortie diminue en tendant vers zéro .

II.5.5 Élément D

En rendant la constante de temps d'un élément PT1 infiniment petite, on obtient un élément P. Par analogie, on obtient un élément D en rendant infiniment petite la constante de temps d'un élément DT1. Sa réponse indicielle peut se déduire de celle d'un élément DT1 avec une constante de temps infiniment petite : il en résulte une fonction d'impulsion mathématique qui est infiniment élevée et infiniment étroite. La grandeur caractéristique d'un organe D est le facteur de dérivation K_d .

II.5.6 Élément à temps mort

Un organe à temps mort transmet un signal d'entrée amplifié du facteur proportionnel K_p uniquement après un certain temps mort T_t . La réponse indicielle correspond à celle d'un élément P, mais avec un décalage équivalent au temps mort. Ces temps morts se produisent toujours au sein des processus de transport. Un exemple caractéristique est constitué par le transport du caloporteur depuis le lieu de réglage (Mélangeur) jusqu'au lieu de mesure (Sonde).

II.6 Les milieux réglés :

II.6.1 Délimitation des milieux réglés

Le milieu réglé commence au lieu de réglage, c'est-à-dire à l'endroit où la grandeur de réglage intervient dans le flux des masses ou dans le flux énergétique et se termine au lieu de mesure, c'est-à-dire à l'endroit où se trouve la sonde de mesure destinée à saisir la grandeur à régler. Le servomoteur fait partie de l'équipement de réglage, car il influence par exemple d'une manière déterminante le comportement horaire des ensembles directeurs par plus ou moins (il agit comme un élément I) ; par contre, l'organe de réglage fait partie du milieu réglé. La sonde de mesure appartient très clairement au milieu réglé, car elle n'est pas exempte d'inertie, mais peut influencer sensiblement le comportement dans le temps du milieu réglé.

II.6.2 Fonction de transfert des milieux réglés

La fonction de transfert des milieux réglés doit s'analyser en fonction de deux questions : Comment le milieu réglé réagit-il à une brusque modification d'une grandeur de réglage ?

Comment le milieu réglé réagit-il à une brusque modification d'une grandeur perturbatrice ?

La façon la plus simple de répondre aux deux questions expérimentalement consiste à se baser sur des réponses indicielles.

En enregistrant la réponse indiciaire de la grandeur de réglage, en tenant compte que cette grandeur de réglage y est brusquement modifiée, on observe la réaction de la grandeur réglée x . Dans ce cas, les grandeurs perturbatrices Z doivent rester aussi constantes que possible durant l'essai.

En enregistrant la réponse indiciaire de la grandeur perturbatrice, on modifie une grandeur perturbatrice Z (ou plusieurs grandeurs perturbatrices se manifestant simultanément) de façon brusque et l'on observe la réponse de la grandeur réglée x . La grandeur de réglage y et d'éventuelles autres grandeurs perturbatrices non participantes doivent en l'occurrence rester constantes.

L'utilisation de l'une ou l'autre de ces deux réponses indicielles dépend du cas d'espèce. Si l'on s'interroge sur le comportement pilote (par exemple comment réagit le milieu réglé à un abaissement nocturne), la réponse indiciaire de la grandeur de réglage est

importante. Si l'on veut par contre analyser le comportement perturbateur (par exemple comment réagit le milieu réglé à un brusque rayonnement solaire), il faut alors examiner la réponse indicielle de la grandeur perturbatrice.

On distingue deux sortes de milieu à régler :

- Les milieux réglés statiques : après modification d'une grandeur d'entrée, la grandeur réglée reprend une valeur d'équilibre. On distingue plusieurs types de ces milieux selon l'ordre du processus (nombre d'accumulateurs) et les temps morts présents au sein du processus.
- Les milieux réglés astatiques : Après modification d'une grandeur d'entrée, la grandeur réglée ne prend pas une nouvelle valeur d'équilibre, mais s'éloigne continuellement de la valeur initiale. Le milieu réglé comporte un élément I efficace.

II.6.3 Milieux réglés statiques

Si après chaque modification d'une grandeur d'entrée, la grandeur réglée revient à un état d'équilibre, on parle en technique de régulation d'un milieu réglé statique. Si nous considérons les éléments du transfert, un milieu réglé statique ne doit donc pas comporter d'élément I efficace. À l'aide des autres éléments de transfert, on peut alors établir des schémas logiques pour différents milieux réglés

II.6.3.1 Milieux réglés statiques de 1^{er} ordre :

Un tel système se compose d'un seul élément PT1. La réponse indicielle correspond donc à celle d'un organe PT1 avec constante de temps T et un facteur proportionnel K_s dénommé dans ce contexte de facteur de transfert du milieu réglé K_s . Cette fonction de transfert est caractéristique de milieux réglés avec un accumulateur.

On propose un réservoir avec de l'eau chauffé par un corps de chauffe électrique. Le seul accumulateur important est constitué par l'eau les autres accumulateurs (corps de chauffe, réservoir, thermomètre) sont tellement petits qu'ils peuvent être négligés.

II.6.3.2 Courbes caractéristiques de milieux réglés statiques

Nous avons vu qu'avec des milieux réglés statiques, la grandeur réglée revient à un nouvel état d'équilibre après un certain temps à chaque modification de la grandeur de réglage. À l'état d'équilibre, une certaine grandeur réglée correspond donc à chaque grandeur de réglage. Graphiquement, tous les points correspondants forment la courbe caractéristique du milieu à régler.

Si cette courbe caractéristique est une droite, on parlera d'un milieu réglé P auquel on peut appliquer un facteur de transfert constant de :

$$K_s = \frac{\Delta x}{\Delta y} = \text{constante}$$

Pour le calcul de K_s , on pourra donc tenir compte d'une part de la totalité des effets de réglage et d'autre part de la totalité de la grandeur de réglage.

$$K_s = \frac{X_h}{Y_h}$$

Avec : X_h =effet de réglage (du milieu réglé)

Y_h =page de la grandeur de réglage

Les milieux réglés de la technique de Chauffage, Climatisation, présentent cependant souvent des courbes non linéaires qui sont plus ou moins incurvées. Le facteur de transfert K_s n'est donc naturellement pas une constante, mais une valeur variable .on a donc

$$K_s = \frac{\Delta x}{\Delta y} \neq \text{constante}$$

On devrait précisément éviter cela, car le milieu réglé est alors beaucoup plus difficile à maîtriser. Une courbe caractéristique non linéaire inversée de l'organe de réglage peut en l'occurrence apporter une aide précieuse. Et l'on sait ainsi parfaitement pourquoi l'organe de réglage fait partie du milieu réglé.

II.7 Identification expérimentale d'un milieu réglé statique :

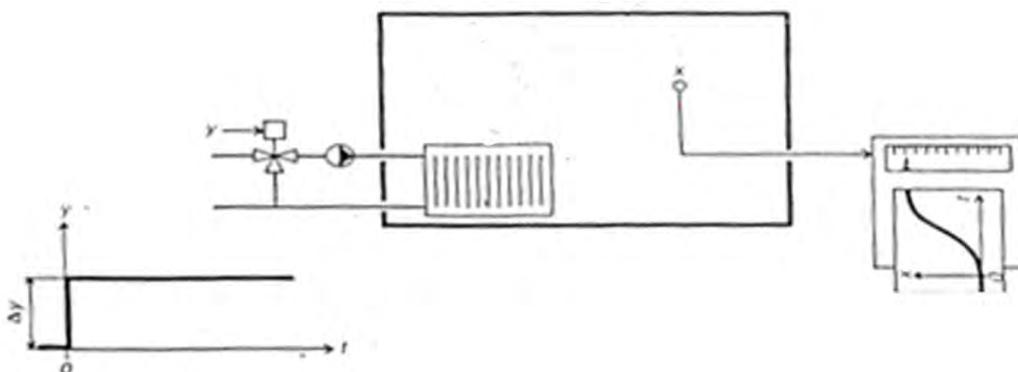
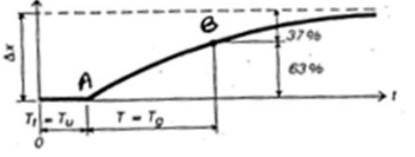
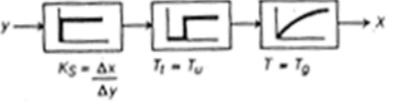
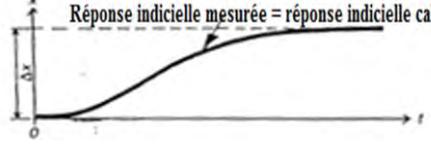
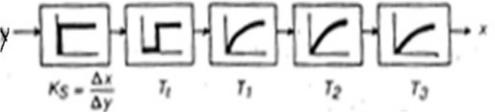


Figure II.23 l'enregistrement de la température en fonction du temps.

Au moment $t=0$, déplacer brusquement la grandeur de réglage de Δy .

Reporter la modification de la grandeur réglée x en fonction du temps.

II.7.1 Réponse indicielle de la grandeur de réglage.

Méthode A	Méthode B
<p>3. Reporter la tangente au point d'inflexion dans la réponse indicielle et déterminer le temps de retard T_u, le délai d'inertie T_g ainsi que la modification de la grandeur réglée Δx :</p>  <p>4. Etablir la fonction de substitution avec T_u comme temps mort et T_g comme constante de temps d'un élément PT1 :</p>  <p>5. Il est ainsi possible de décrire le milieu réglé par approximation avec un élément P, un élément à temps mort et un élément PT1</p>  <p>6. Le milieu réglé est donc entièrement déterminé par les trois paramètres facteur de transfert K_s, temps de retard T_u, et délai d'inertie T_g.</p>	<p>3. à l'aide d'un catalogue de réponse indicielle (par exemple [3]) ou d'une simulation sur ordinateur, on remplace la réponse indicielle mesurée aussi exactement que possible par une réponse indicielle calculée.</p>  <p>4. le milieu réglé peu ainsi se décrire avec un schéma logique beaucoup plus précis qu'avec la méthode A :</p>  <p>La méthode B fournit par conséquent un plus grand nombre de paramètres que la méthode A, à savoir dans l'exemple ci-dessus : facteur de transfert du milieu réglé K_s, temps mort T_t ainsi que les trois constantes de temps T_1, T_2 et T_3.</p>

Le résumé de la Figure II.24 présente la manière de saisir expérimentalement la réponse indicielle d'une grandeur de réglage. A l'instant zéro, l'organe de réglage est brusquement réglé à la valeur Δy . La réponse de la grandeur réglée x est par exemple enregistrée par un enregistreur à tracé continu. Comme il s'agit d'un milieu réglé statique, la grandeur réglée x varie et tend vers un nouvel état d'équilibre décalé de Δx . Deux méthodes se prêtent à l'évaluation des variations de la grandeur à régler x :

Avec la méthode A , on détermine dans la réponse indicielle mesurée , la tangente au point d'inflexion ainsi que le temps de retard T_u et le délais d'inertie T_g . Il est possible d'en tirer une fonction de substitution se composant d'un élément à temps mort T_u et d'un élément de type PT1 avec constante de temps T_g . Les facteurs de transfert des deux éléments peuvent être réunis en un élément P ayant comme facteur de transfert du milieu réglé K_s . Comme il s'agit par approximation d'un milieu réglé P avec une courbe caractéristique linéaire, celui-ci peut se calculer à partir de Δx et Δy suivant le rapport $K_s = \frac{\Delta x}{\Delta y}$. Il est ainsi possible de décrire complètement un milieu réglé par les trois paramètres : T_u , T_g et K_s .

Avec la méthode B , il est possible d'analyser des milieux réglés quelconques (y compris le cas échéant des milieux réglés astatiques). On cherche en l'occurrence à remplacer la réponse indicielle mesurée aussi précisément que possible par une réponse indicielle calculée. Des documents cités en bibliographie donnent les catalogues des réponses indicielles d'une façon complète ainsi que la théorie nécessaire pour une simulation sur ordinateur.

II.8 Identification d'un système de chauffage avec SIMTRAIN

Nous allons étudier une identification expérimentale à partir du logiciel SIMTRAIN (voir annexe 2) qui sera développée sur un local étudié possédant un volume de 180m³. Il est ventilé à 0.6 vol/h (soit 108m³/h) de façon permanente, caractérisé par un coefficient de déperdition $G1=0.362$. W/K/m³ et chauffé électriquement.

La batterie électrique délivre 3390 W au maximum, elle a été dimensionnée de telle sorte qu'on obtient la température de confort de 19 C lorsqu'il fait -7 C à l'extérieur, avec une marge de sécurité de 25 %.

La température au sein de la pièce est contrôlée par un régulateur de type PI (proportionnelle-intégral) qui commande de façon chrono proportionnelle le fonctionnement de la batterie électrique.

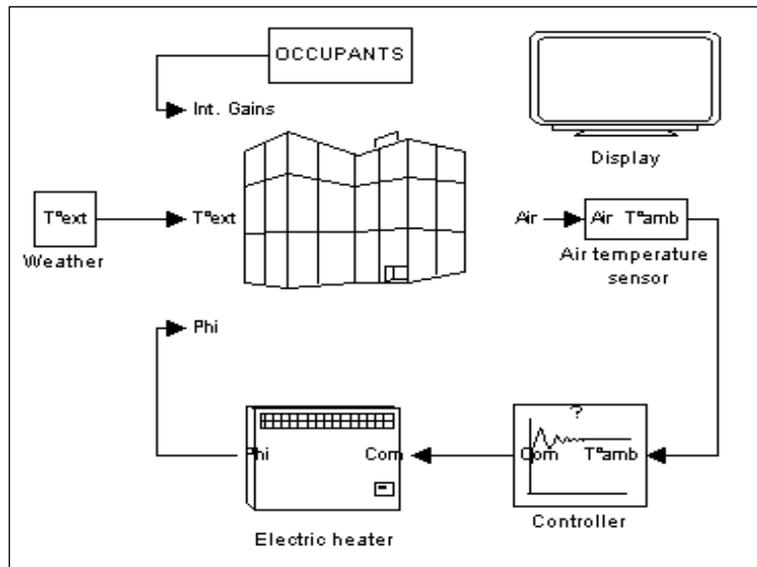


Figure II.24 schéma de principe d'un système de chauffage

Savoir ajuster les paramètres de la boucle de régulation, comprendre leur influence sur le confort obtenu et la consommation d'énergie, sont les objectifs de ce essai.

Principe de la régulation :

Le réglage se fait en enclenchant ou en déclenchant l'alimentation électrique de la résistance de chauffage. La commande de la puissance du chauffage électrique est par principe "tout ou rien".

L'organe de réglage est un interrupteur statique (tirac) qui peut supporter un très grand nombre d'enclenchement et que l'on peut commander à des cadences très rapides (cycles marche-arrêt de durée très courte τ).

La durée d'enclenchement t_e au sein d'un cycle, ou durée de temps de marche, est modifiée proportionnellement à l'écart entre la température mesurée et la consigne.

On obtient ainsi un réglage progressif, ou tout ou rien modulé en temps comme le montre la figure suivante.

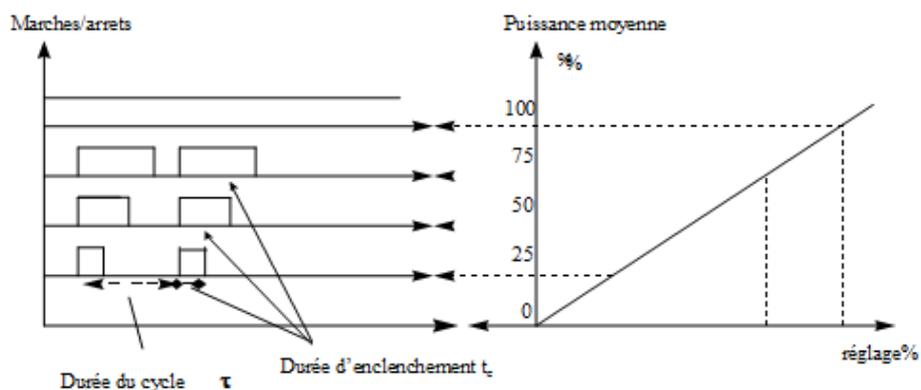


Figure II.25 la relation entre la durée de fonctionnement et la puissance

En résumé, le fonctionnement chrono-proportionnel consiste à moduler la commande, donc l'énergie de chauffage délivrée, par des temps d'enclenchements proportionnels au besoin.

Le principe de cette régulation est résumé sur la figure ci-dessous.

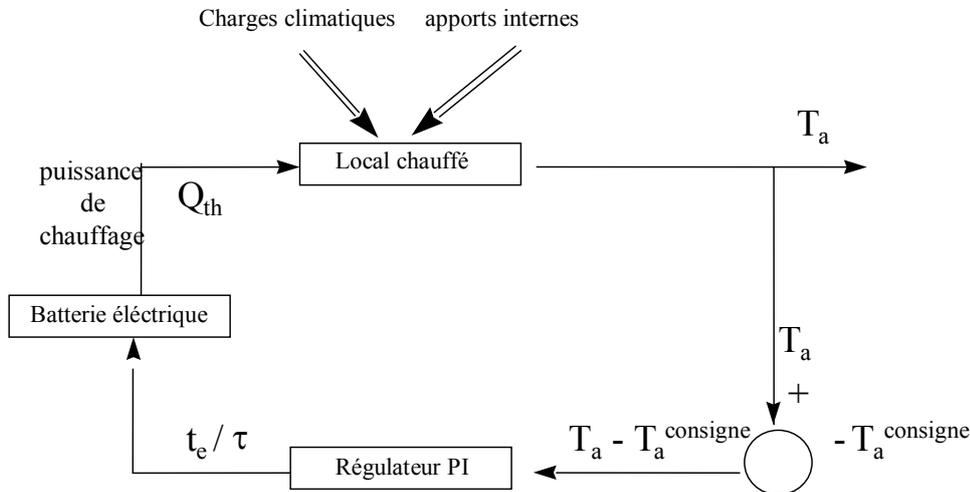


Figure II.26 schéma de principe d'une installation de chauffage

Le réglage de la puissance moyenne est réalisé par le rapport t_e/τ .

Avec t : durée d'enclenchement.

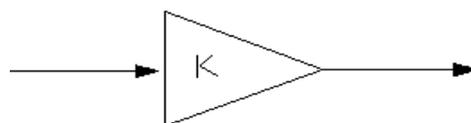
τ : durée du cycle.

Ce rapport t_e/τ est la sortie du régulateur PI, fonction de l'écart constaté entre la consigne et la température ambiante.

L'action proportionnelle apporte une correction proportionnelle à la grandeur de l'écart.

La valeur de K définit la sensibilité du régulateur et est inversement proportionnelle à la bande proportionnelle du régulateur. la bande proportionnelle est la variation de la grandeur réglée (température intérieure) nécessaire pour faire varier la position de l'organe de réglage sur toute sa plage, soit t_e variant entre 0 et τ .

Elle est exprimée dans notre cas (régulation d'ambiance) en K° ou C° . Ainsi le gain K s'exprime en $1/K^\circ$ ou $1/C^\circ$.



L'action intégrale apporte une correction d'autant plus rapidement que l'écart est grand.

Le dosage de cette action se fait par la constante de temps d'intégration T_i , qui s'exprime en secondes.

Tant qu'il subsiste un écart, il existe une correction. L'action intégrale permet donc d'annuler l'écart, ce qui ne réalise pas l'action proportionnelle.

Nous allons développer les graphes de la réponse indicielle sur deux exemples l'un du premier ordre et l'autre du deuxième ordre.

a) Exemple 1 : modèle du premier ordre retardé.

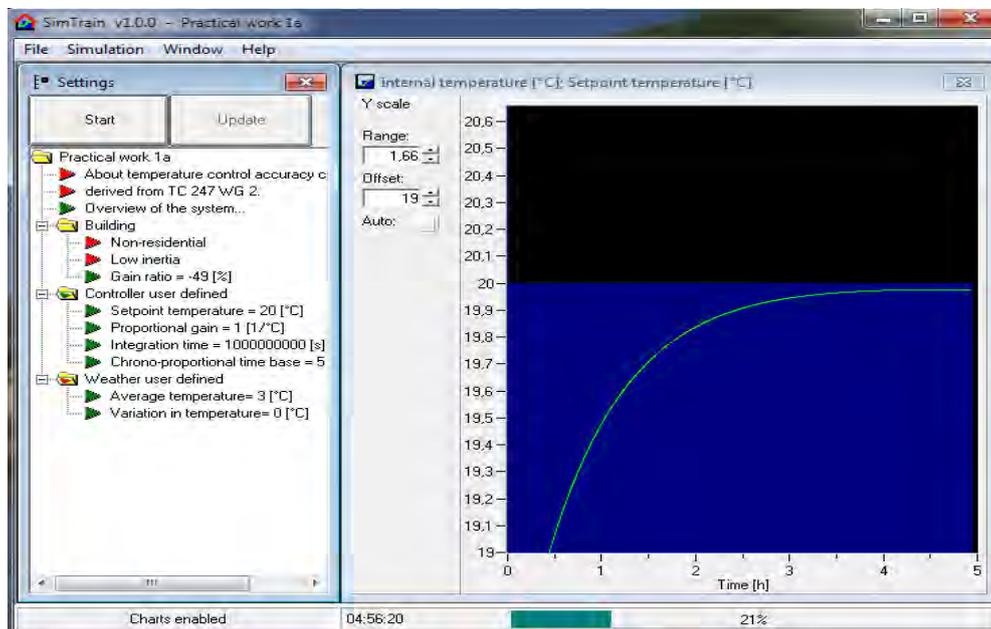
- en utilisant le logiciel SIMTRAIN (voir annexe 2)

On suppose que la température extérieure est de 3 °C , et le ventilo-convecteur travaille avec un régime de 51 % de sa puissance.

- On choisit le travail pratique 1a par un clic sur la touche simulation
- Pour vérifier si l'installation est du chauffage on clic sur la flèche verte « overview of the système »
- Le réglage de la température désirée est de 20°C
- Pour annuler l'action PI, on met une valeur de 1 pour le gain proportionnelle et une valeur très grande pour le temps d'intégration $T_i=10^9$ s

On suppose que le ventilo-convecteur travaille à 51% de sa puissance.

On va faire la simulation avec ces valeurs ; on obtient le graphe de la réponse indicielle suivant :



On trouve que ce graphe indique un modèle de 1^{er} ordre avec la forme suivante :

$$T(p) = \frac{K.e^{-\tau.p}}{1+Tp} \quad (II.57)$$

Par les calculs

$$\left. \begin{array}{l} K=1 \\ \tau = 0.47h \\ T= 1.4h \end{array} \right\} \Rightarrow T(p) = \frac{e^{-0.47p}}{1+1.4p} \quad (II.58)$$

b) Exemple N° 2 : modele du deuxième ordre retardé

Température ambiante $T_{int} = 20^{\circ}\text{C}$

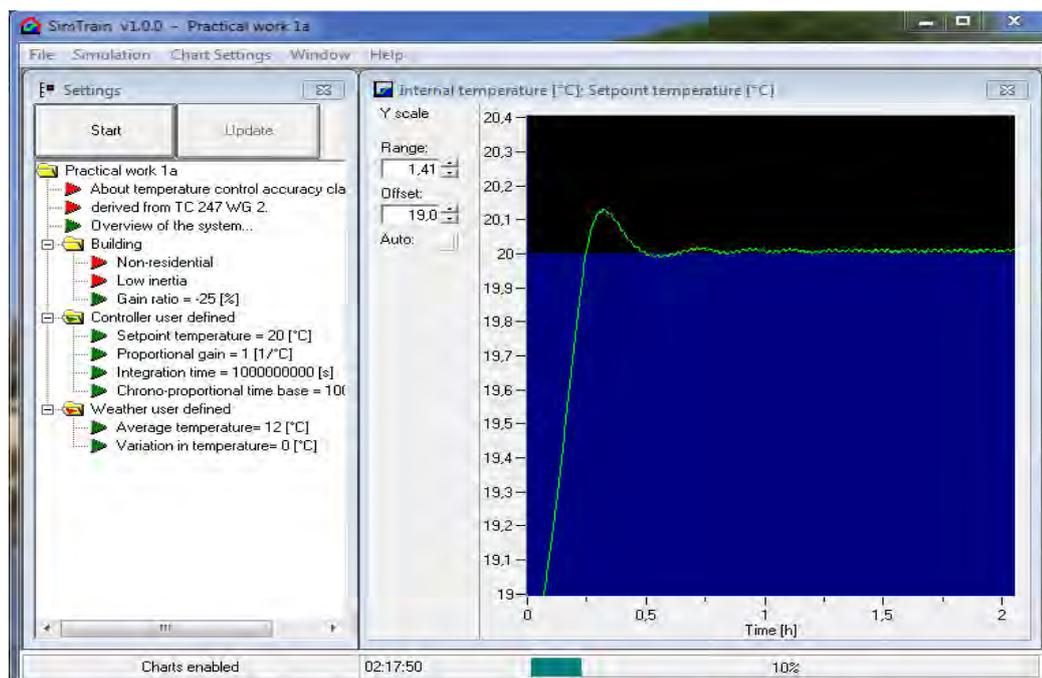
Température extérieur $T_{ext} = 12^{\circ}\text{C}$

Gain proportionnel $P=1$

Temps d'intégration $T_i=10^9(1/s)$

Dans ce cas on suppose que le ventilo-convecteur travaille à 75% de sa puissance.

On trouve que ce graphe indique un modèle de 2^{eme} ordre est que ce système est un oscillant de cette forme



$$F(p) = \frac{Ke^{-\tau p}}{1 + \frac{2\xi}{\omega_n}p + \frac{p^2}{\omega_n^2}} \quad (II.60)$$

Par les calculs on trouve:

$$\tau = 0.06h$$

$$K = 1$$

$$\begin{array}{l}
 Y_{\max} = 20.13^{\circ}\text{C} \\
 Y_{\text{final}} = 20^{\circ}\text{C} \\
 T_{\text{dep}} = T_{p1} = 0.325\text{h} \\
 T_{p2} = 0.715\text{h} \\
 \xi = 0.8484 \\
 \omega_n = 0.0051
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} Y_{\max} \\ Y_{\text{final}} \\ T_{\text{dep}} \\ T_{p2} \\ \xi \\ \omega_n \end{array}} \right\} \Rightarrow Y_{\text{dep}} = 0.13^{\circ}\text{C}$$

$$\left. \vphantom{\begin{array}{l} T_{\text{dep}} \\ T_{p2} \end{array}} \right\} \Rightarrow T_p = 0.39\text{h}$$

$$F(p) = \frac{e^{-0.06p}}{0.007P^2 + 0.094P + 1} \quad (\text{II.61})$$

Nous pouvons constater quelques formes usuelles des fonctions de transfert qui décrivent au mieux les installations de génie climatique, sont résumés dans le tableau suivant :

Type de la fonction de transfert	La forme de la fonction de transfert	Système
Model du 1 ^{er} ordre	$F(p) = \frac{K \cdot e^{-\tau \cdot p}}{1 + Tp}$	Si $\tau \neq 0$, => système avec retard Si $\tau = 0$, => système sans retard
Model du 2 ^{eme} ordre	$F(p) = \frac{K e^{-\tau p}}{1 + \frac{2\xi}{\omega_n} p + \frac{p^2}{\omega_n^2}}$	Si $\tau \neq 0$, => système avec retard Si $\tau = 0$, => système sans retard Si $\xi < 1$ => système sous-amortie (oscillant) Si $\xi \geq 1$ => système hyper-amortie (apériodique)
Model du 3 ^{eme} ordre	$F(p) = \frac{K \cdot e^{-\tau \cdot p}}{(1 + Tp)^3}$	Si $\tau \neq 0$, => système avec retard Si $\tau = 0$, => système sans retard
Model du n ^{eme} ordre	$F(p) = \frac{K \cdot e^{-\tau \cdot p}}{(1 + Tp)^n}$	Si $\tau \neq 0$, => système avec retard Si $\tau = 0$, => système sans retard
Model d'un intégrateur	$F(p) = \frac{K \cdot e^{-\tau \cdot p}}{p}$	Si $\tau \neq 0$, => système avec retard Si $\tau = 0$, => système sans retard
Model du 2 ^{eme} ordre	$F(p) = \frac{K \cdot e^{-\tau \cdot p}}{(1 + Tp)p}$	Si $\tau \neq 0$, => système avec retard Si $\tau = 0$, => système sans retard
Model du 3 ^{eme} ordre	$F(p) = \frac{K \cdot e^{-\tau \cdot p}}{(1 + Tp)p^2}$	Si $\tau \neq 0$, => système avec retard Si $\tau = 0$, => système sans retard
Model du 3 ^{eme} ordre	$F(p) = \frac{K \cdot e^{-\tau \cdot p}}{p(1 + Tp)^2}$	Si $\tau \neq 0$, => système avec retard Si $\tau = 0$, => système sans retard
Model du n ^{eme} ordre	$F(p) = \frac{K \cdot e^{-\tau \cdot p}}{p(1 + Tp)^{n-1}}$	Si $\tau \neq 0$, => système avec retard Si $\tau = 0$, => système sans retard

II.9 Conclusion :

Pour dimensionner une boucle de réglage, il faut tout d'abord connaître les caractéristiques du milieu réglé. On doit établir un schéma logique avec les différentes constantes de temps et les facteurs de transfert correspondants qui décrivent le milieu réglé aussi bien que possible. On peut procéder soit théoriquement, soit expérimentalement en enregistrant la réponse indicielle des grandeurs de réglage ou des grandeurs perturbatrices.

A partir de cet enregistrement de la réponse indicielle on a utilisé plusieurs méthodes pour calculer les paramètres tels que le retard, la constante de temps, facteur d'amortissement et l'ordre, avec ces paramètres on a obtenu les fonctions de transferts de quelques installations de chauffage et de climatisation.

Chapitre III

Méthodes de réglage des régulateurs et leurs actions.

III.1 Introduction :

La plupart des régulateurs utilisés dans les applications industrielles et les installations de chauffage et de climatisation sont des régulateurs de type proportionnel, intégral et dérivé. Ils sont adaptés à la commande des systèmes déjà stable et avec des comportements qui s'apparentent à un système du premier ou du deuxième ordre et même pour les systèmes d'ordre élevé de degré n . Dans ce chapitre on va étudier tous les régulateurs progressifs et les différentes méthodes de réglage pour l'amélioration du fonctionnement des installations de génie climatique en agissant sur le dispositif de réglage.

De nombreuses méthodes de réglage d'une boucle sont possibles selon les besoins en régulation ou en asservissement. Les exigences du cahier des charges seront décrites dans le domaine temporel. Le critère de réglage est alors fixé à partir des marges de stabilité. Le critère de précision est, bien entendu, intrinsèquement lié à celui du réglage. Le bon réglage est celui qui répondra au meilleur compromis global du cahier des charges.

III.2 Les actions des régulateurs progressifs :

III.2.1 Action proportionnelle



La sortie de ce bloc produit un signal proportionnel au signal placé en entrée

Le facteur de proportionnalité est appelé gain qui est défini par :

$$s(t) = Gr. e(t) \quad (III.1)$$

Les points clés pour l'action proportionnelle :

- Réaction immédiate
- Laisse un écart permanent entre mesure et consigne si elle est utilisée seule dans un régulateur en service.
- L'annulation de l'écart se fera avec un BIAS

BIAS : décalage éventuel

- L'action proportionnelle peut être exprimée sous forme de bande proportionnelle Bp %

$$Bp = \frac{100}{Gr}$$

Bp : la bande proportionnelle

Gr : gain statique du système

III.2.1.1 Régulation proportionnelle

La régulation proportionnelle analyse constamment l'écart entre la mesure X et la consigne X_c . Le signal élaboré, proportionnel à l'écart, est transmis à un servomoteur (organe de commande) qui agit sur un organe de réglage (le clapet d'une vanne 3 voies par exemple). Le fluide réglant agit donc proportionnellement à l'écart entre la mesure et la consigne.

III.2.1.2 Régulation proportionnelle en chauffage

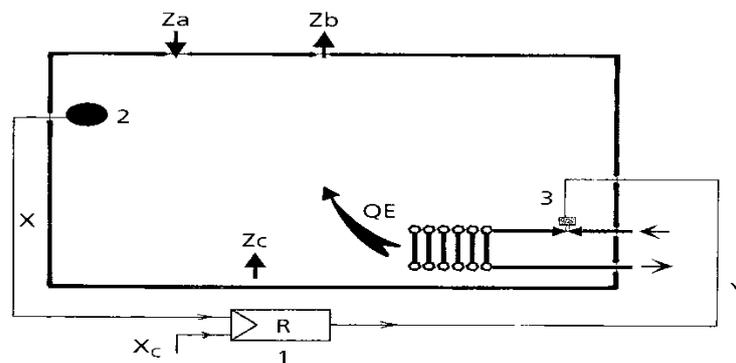


Figure III. 1 Schéma de principe d'une installation permettant une régulation proportionnelle en chauffage.

1 : régulateur, 2 : sonde de température, 3 : servomoteur, X_c : point de consigne,
 X : grandeur réglée, Y : grandeur de réglage. Z_a , Z_b , Z_c : grandeurs perturbatrices.

QE : apport de chaleur du fluide réglant

Le signal de sortie de régulateur (ΔY) est proportionnel à la variation de la grandeur physique contrôlée (ΔX) figure (III.2)

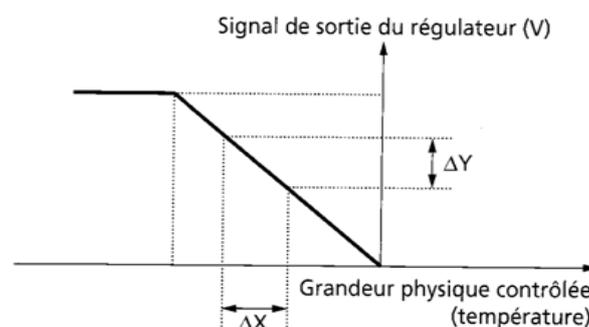


Figure III. 2 Loi des signaux et schéma de fonctionnement.

III.2.1.3 Régulation proportionnelle en refroidissement

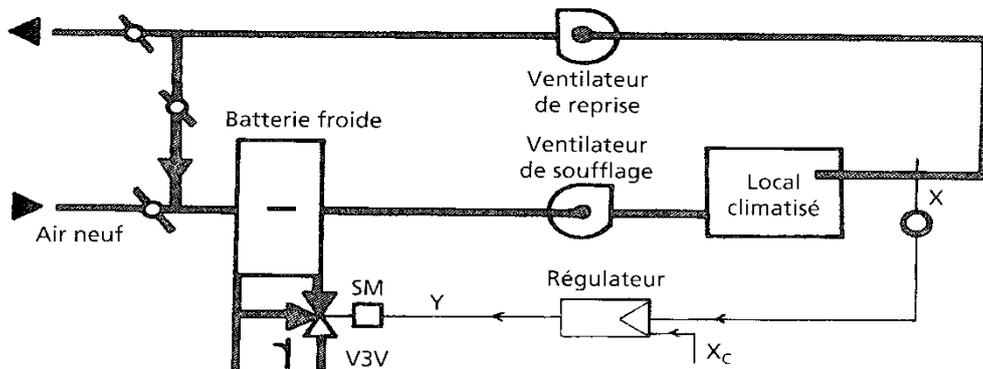


Figure III.3 Schéma de principe d'une installation permettant une régulation proportionnelle en refroidissement

X : grandeur physique contrôlée (mesure), X_c : point de consigne, Y : signal de sortie du régulateur.

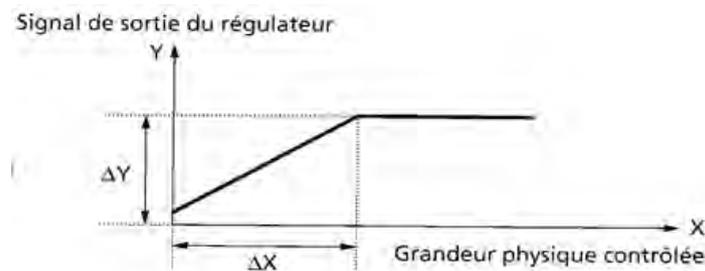


Figure III. 4 Loi des signaux.

III.2.1.4 Bande proportionnelle

La bande proportionnelle (BP) est la variation de la grandeur physique contrôlée qui provoque la course complète de l'organe de réglage Figure (III.6). à 20°C, la vanne de chauffage est en début d'ouverture, à 18°C, elle est en pleine ouverture.

La bande proportionnelle en chauffage est de 2°C. On trouve ici la même bande proportionnelle en refroidissement.

Les bandes proportionnelles sont réglables. De trop faibles bandes proportionnelles conduisent au pompage, les vannes sont très sollicitées, se qui est néfaste.

De trop grandes bandes proportionnelles conduisent à de trop grands écarts.

La pratique et le bon sens sont utiles ici. Les bandes proportionnelles sont correctes lorsque les écarts sont en accord avec les valeurs imposées du CCTP.

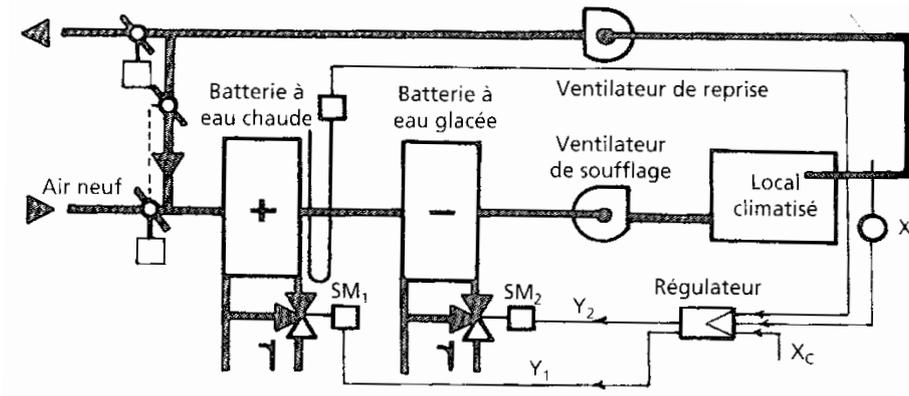


Figure III. 5 Schéma de principe d'une installation permettant une régulation proportionnelle en climatisation

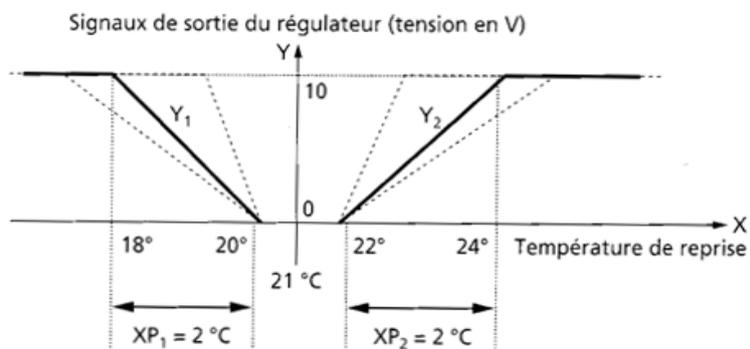
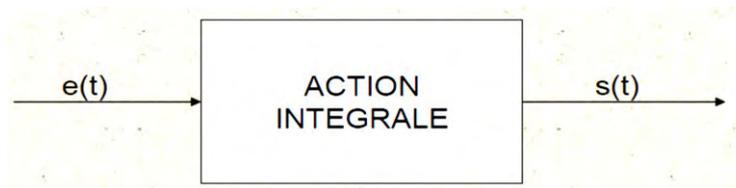


Figure III. 6 Loi des signaux.

III.2.2 Action intégrale



La sortie de ce bloc produit un signal proportionnel à l'intégration, par rapport au temps, du signal placé en entrée

Le facteur de proportionnalité est l'inverse d'un temps $\frac{1}{T}$

$$s(t) = \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \quad (III.2)$$

Les points clés pour l'action INTEGRALE :

- 1- Réaction progressive.
- 2- Annule l'écart entre MESURE et CONSIGNE.

- 3- Produit un effet mémoire.
- 4- action intégrale (régulation PI)

L'action intégrale est une action qui, associée à l'action proportionnelle, permet de combattre l'écart (mesure – consigne) propre à l'action proportionnelle. Jamais utilisée seule, elle est toujours associée à l'action proportionnelle.

III.2.2.1 Essai de concrétisation de l'action intégrale

Sur la figure, le point de consigne correspond à N_0 . Sans l'action intégrale, le niveau est maintenu entre N_{max} et N_{min} . L'action intégrale associée à l'action proportionnelle va permettre de maintenir le niveau au voisinage de N_0 : les écarts sont réduits.

Il s'agit ici de maintenir un niveau d'eau dans un bac dans lequel s'effectue un puisage variable figure (III.7). La grandeur perturbatrice QS est combattue par une grandeur réglante QE, qui consiste en un appoint d'eau par l'organe de réglage (OR). Au temps t_0 , il y a augmentation de la grandeur perturbatrice QS. A cause des différents jeux, inerties, etc., la variation de QE ne se manifeste qu'au temps t_1 .

Le niveau baisse rapidement entre t_0 et t_1 . L'augmentation de la grandeur réglante se manifeste après t_1 . L'action intégrale commence à se manifester après t_2 . l'augmentation de la grandeur réglante est accélérée grâce à l'action intégrale. A l'instant t_4 , le niveau commence à remonter jusqu'à tendre vers N_0 à l'instant t_6 .

L'action intégrale associée à l'action proportionnelle permet donc de maintenir un niveau d'eau relativement constant. Sur la figure (III.7). L'influence de l'action intégrale sur le fluide réglant est représentée par l'aire hachurée

QE : grandeur réglante. QS : grandeur perturbatrice. OR : Organe de réglage. D : permet de régler la bande proportionnelle vue précédemment. AI : élément produisant l'action intégrale.

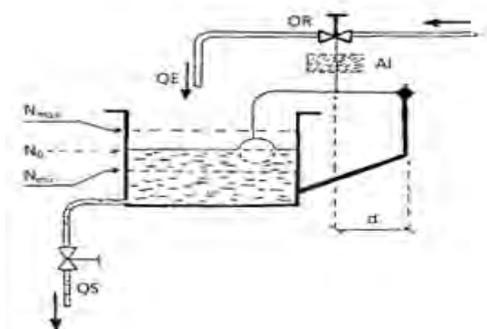


Figure III. 7 Action intégrale.

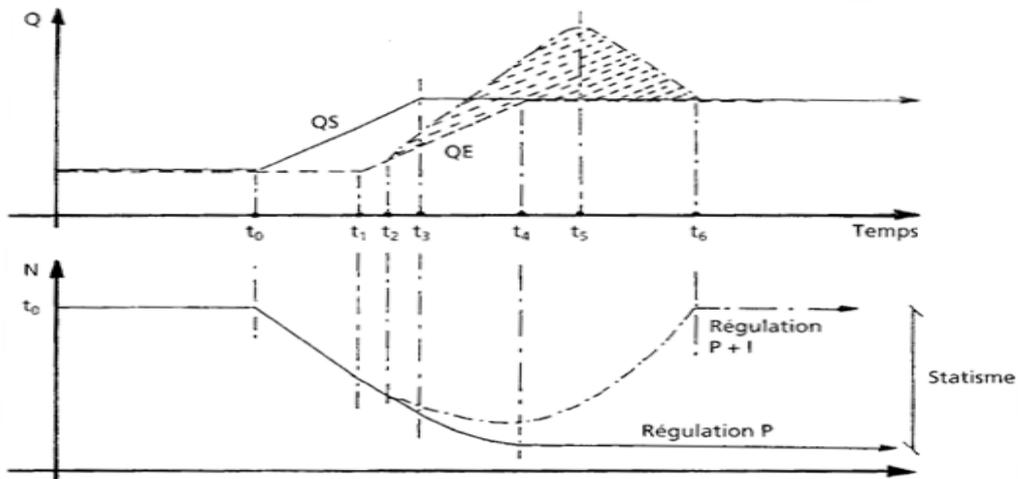


Figure III. 8 Evolution de la grandeur physique contrôlée en fonction des actions proportionnelles seules ou des actions proportionnelles et intégrales.

III.2.2.2 Temps d'intégrale

Les régulateurs comportant l'action correctrice supplémentaire intégrale comportent un réglage supplémentaire repéré T_n et gradué en minutes (pour les régulateurs analogiques). Le temps d'intégrale est le temps nécessaire pour reproduire le signal élaboré par l'action proportionnelle.

Hypothèse : au temps t_0 , l'écart entre la mesure et la consigne est tel que l'action proportionnelle produise un signal de sortie du régulateur égal à une unité figure (III.8).

Considérons la droite a. le temps d'intégrale correspondant est de 1 minute ; au temps t_0+1 minute, l'action intégrale reproduit 1 unité, le signal de sortie de régulateur est donc de 2 unités.

Considérons la droite b. le temps d'intégrale correspondant est de 2 minutes ; au temps t_0+2 minutes, l'action intégrale reproduit 1 unité, le signal de sortie de régulateur est donc de 2 unités.

Considérons la droite c. le temps d'intégrale correspondant est de 4 minutes ; au temps t_0+4 minutes, l'action intégrale reproduit 1 unité, le signal de sortie de régulateur est donc de 2 unités.

En conclusion, un temps d'intégrale court conduit à une action rapide de l'organe de réglage : il y a risque de pompage. Un temps d'intégrale long conduit à une influence faible de l'action intégrale.

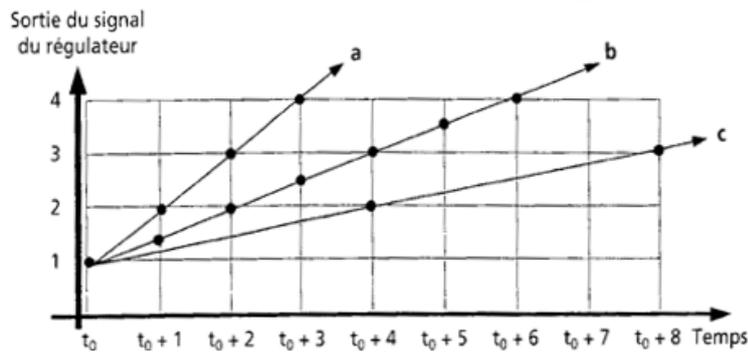


Figure III. 9 Etude du temps d'intégrale.

III.2.2.3 Vitesse de déplacement de l'organe de réglage

Avec l'action intégrale, la vitesse de l'organe de réglage dépend de l'écart (mesure – consigne).

Hypothèse : le temps d'intégrale est réglé à 2 minutes figure (III.9).

Considérons la droite a. l'action proportionnelle en fonction de l'écart produit un signal de sortie de régulateur égal à 1 unité. Au temps t_0+2 minutes, l'action intégrale reproduisant le même signal de sortie que l'action proportionnelle, le signal de sortie du régulateur sera donc de $(1 + 1) = 2$ unités.

Considérons la droite b. l'action proportionnelle en fonction de l'écart produit un signal de sortie de régulateur égal à 0,5 unité. Au temps t_0+2 minutes, l'action intégrale reproduisant le même signal de sortie que l'action proportionnelle, le signal de sortie du régulateur sera donc de $(0,5 + 0,5) = 1$ unité.

Considérons la droite c. l'action proportionnelle en fonction de l'écart produit un signal de sortie de régulateur égal à 0,25 unité. Au temps t_0+2 minutes, l'action intégrale reproduisant le même signal de sortie que l'action proportionnelle, le signal de sortie du régulateur sera donc de $(0,25 + 0,25) = 0,5$ unité.

Il apparaît clairement que la vitesse de l'organe de réglage dépend de l'écart entre la mesure et la consigne.

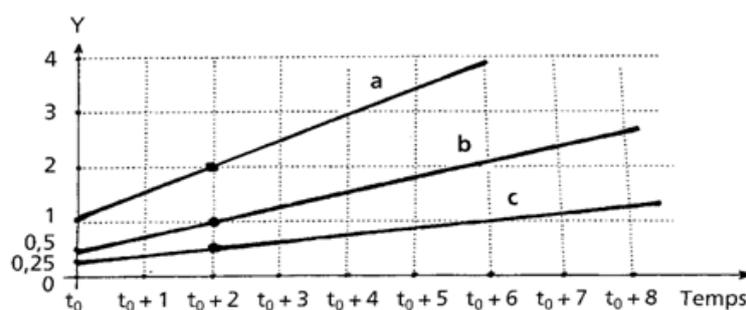
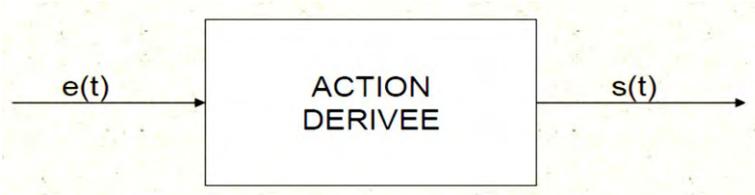


Figure III. 10 Etude de la vitesse de déplacement de l'organe de réglage.

III.2.3 Action dérivée



La sortie de ce bloc produit un signal proportionnel à la dérivée, par rapport au temps, du signal placé en entrée.

Le facteur de proportionnalité homogène avec un temps **Td**

$$s(t) = Td \cdot \frac{d(e(t))}{dt} \quad (\text{III.3})$$

Les points clés pour l'action dérivée :

- Réaction immédiate et proportionnelle à la variation de la MESURE ou de L'ECART
- Effet d'anticipation

III.2.4 Actions PID

a) en série

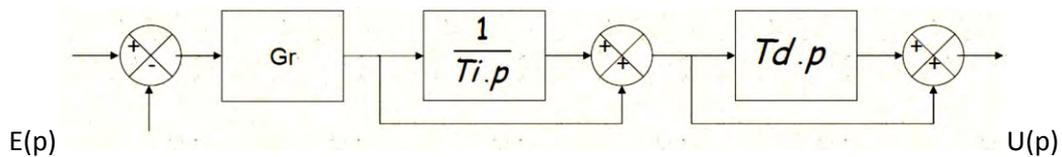


Figure III.11 Structure PID en série

La fonction de transfert qui caractérisera cette structure sera définie par :

$$\frac{U(p)}{E(p)} = Gr \cdot \left(1 + \frac{1}{Ti.p}\right) \cdot (1 + Td.p) \quad (\text{III.4})$$

$$\frac{U(p)}{E(p)} = Gr \cdot \frac{Ti.p+1}{Ti.p} \cdot (1 + Td.p) \quad (\text{III.5})$$

$$\frac{U(p)}{E(p)} = \frac{Gr.Ti.p+Gr+Gr.Ti.Td.p+p+Gr.Td.p}{Ti.p} \quad (\text{III.6})$$

$$\frac{U(p)}{E(p)} = \frac{Gr.(Ti+Td)}{Ti} + \frac{Gr}{Ti.p} + Gr.Td.p \quad (\text{III.7})$$

b) en parallèle

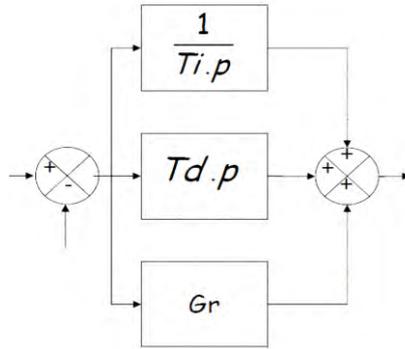


Figure III.12 Structure PID en parallèle

$$\frac{U(p)}{E(p)} = Gr + \frac{1}{Ti.p} + Td.p \quad (III.8)$$

c) Mixte

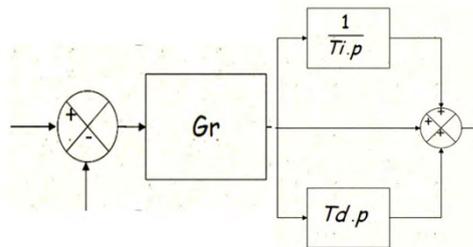


Figure III.13 Structure PID en mixte

$$\frac{U(p)}{E(p)} = Gr \left(\frac{1}{Ti.p} + 1 + Td.p \right) \quad (III.9)$$

$$\frac{U(p)}{E(p)} = Gr + \frac{Gr}{Ti.p} + Gr.Td.p \quad (III.10)$$

Ce tableau montre l'effet de chaque paramètre sur les différentes actions.

	<i>SERIE</i>			<i>PARALLELE</i>			<i>MIXTE</i>		
	<i>P</i>	<i>I</i>	<i>D</i>	<i>P</i>	<i>I</i>	<i>D</i>	<i>P</i>	<i>I</i>	<i>D</i>
Gr ↑	↑	↑	↑	↑	--	--	↑	↑	↑
Ti ↑	↓	↓	--	--	↓	--	--	↓	--
Td ↑	--	--	↑	--	--	↑	--	--	↑

Tableau III.1 les actions P, I, D dans les différents structure de PID

III.3 Rôle des actions dans les boucles

III.3.1 Rôle de l'action proportionnelle (P)

Le rôle de l'action proportionnelle est d'accélérer la réponse de la mesure, ce qui a pour conséquence de réduire l'écart entre la mesure et la consigne. L'étude de l'action proportionnelle sur un système **naturellement stable** en boucle fermée, montre que lors d'un changement de consigne, le régime permanent atteint un écart résiduel

$$\varepsilon = \Delta C / (1 + G_s \cdot G_r) \quad (\text{III.11})$$

Avec :

$$\Delta C = 10 \% , G_r = 2 , G_s = 1.5$$

on obtient $\varepsilon = 2.5 \%$

G_r : gain du régulateur

G_s : gain du procédé.

ΔC : variation de consigne

Une augmentation de G_r , accélère la réponse du procédé, provoque une diminution de l'écart résiduel ε , mais rend la mesure de plus en plus oscillatoire. La valeur optimale de G_r est celle qui donne la réponse la plus rapide, avec un bon amortissement (ne dépassant pas 15 %). L'étude de l'action proportionnelle sur un procédé instable (aussi appelé intégrateur), montre que lors d'une variation de consigne, la mesure rejoint la consigne dans tous les cas. Lors d'une perturbation, la mesure s'écarte de la consigne, la régulation proportionnelle tend à la ramener tout en laissant subsister un écart résiduel, lorsque le régime permanent est atteint.

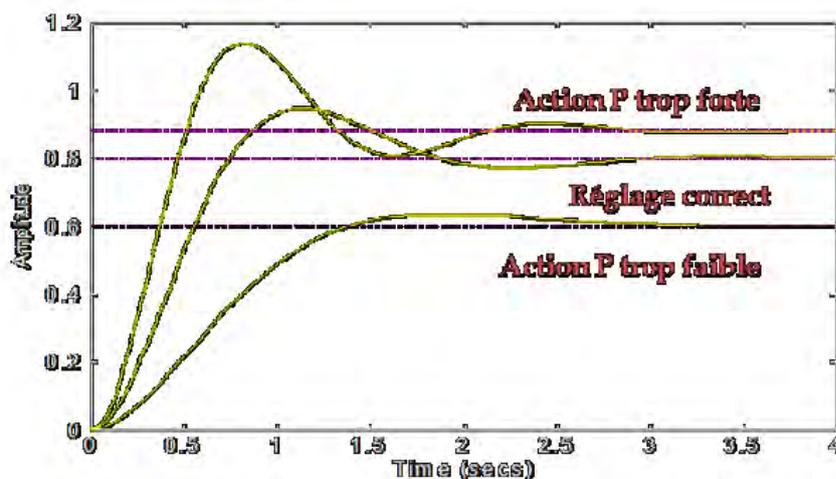


Figure III. 14 Comportement de l'action P sur un procédé

III.3.2 Rôle de l'action Intégrale :

Le rôle de l'action intégrale est d'annuler l'écart entre la mesure et la consigne. Le signal de sortie du régulateur en intégrateur seul est proportionnel à l'intégrale de l'écart mesure-consigne. L'action intégrale est généralement associée à l'action proportionnelle. Comme dans le cas de l'action proportionnelle, une augmentation excessive de l'action intégrale (diminution de T_i) peut être source d'instabilité. L'étude de l'action intégrale sur un système stable est donnée par les figures suivantes pour un test en asservissement et un autre en régulation.

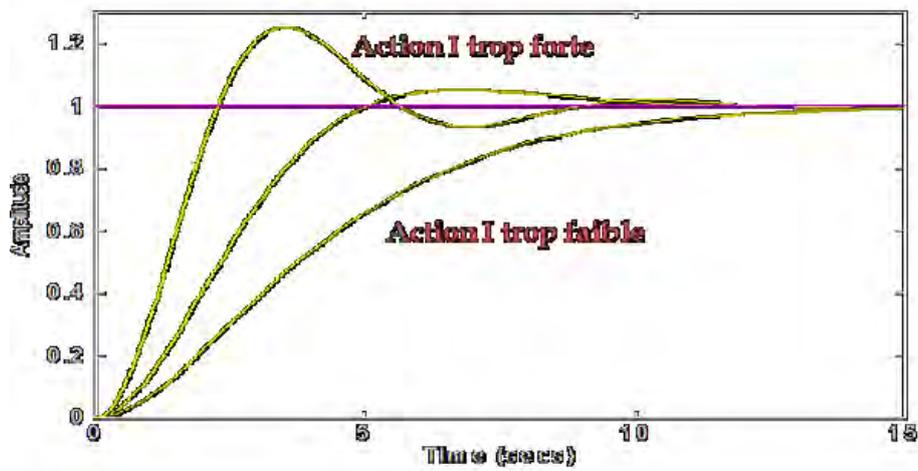


Figure III. 15 Comportement de l'action I sur un procédé

Le comportement de l'action intégrale sur un procédé instable, est sensiblement le même que sur un procédé stable. Il faut noter que l'action intégrale est nécessaire en asservissement sur un procédé instable pour annuler l'écart, suite à des perturbations. Lors de changement de consigne, son intérêt est moindre car l'écart s'annule naturellement du fait que le procédé est lui même intégrateur. Dans ce cas l'action intégrale donne une réponse plus rapide qu'en régulation à action proportionnelle seule.

III.3.3 Rôle de l'action dérivée :

Le rôle de l'action dérivée est de compenser les effets du temps mort (retard) du procédé. Elle a un effet stabilisateur mais une valeur excessive peut entraîner l'instabilité.

Son rôle est identique quelle que soit la nature du procédé. La sortie du dérivateur est proportionnelle à la vitesse de variation de l'écart. Notons que l'action dérivée ne peut pas être utilisée seule. L'étude de l'action dérivée sur un système stable est donnée par les figures suivantes pour un test en asservissement et un autre en régulation.

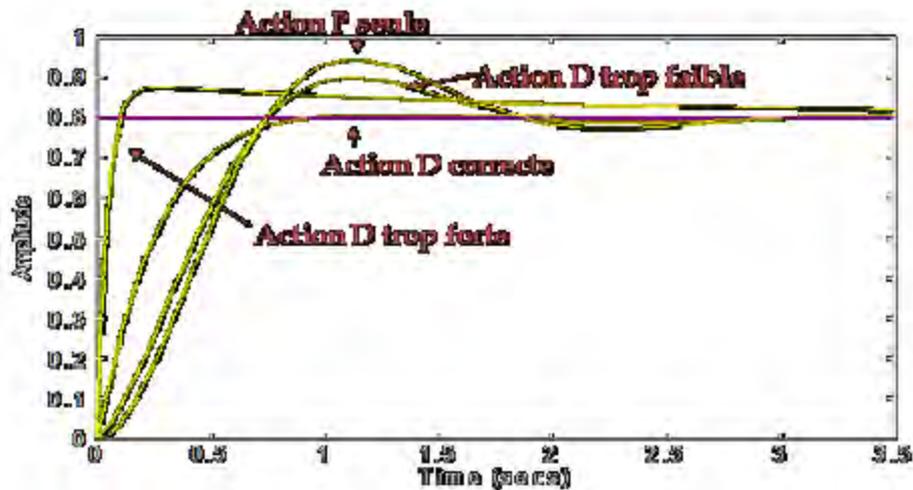


Figure III. 16 Comportement de l'action D sur un procédé

Dans le cas d'un signal de mesure bruité, la dérivée amplifie le bruit, ce qui rend son utilisation délicate ou impossible. La solution à ce problème consiste, soit à filtrer le signal de mesure, soit à utiliser un module de dérivée filtrée avec un gain transitoire réglable.

Dans tous les algorithmes PID, la dérivée est filtrée, mais la valeur du filtre (gain transitoire), est rarement réglable sur les régulateurs monoblocs ; elle l'est parfois, sur les modules PID des systèmes numériques.

III.4 Méthodes de réglage des actions

Avant de commencer les réglages d'une boucle de régulation, il faut s'assurer que le sens d'action du régulateur est correct. Nous rappelons que quelle que soit la méthode de réglage utilisée, les réglages ne sont adaptés qu'au point de fonctionnement du système.

Il existe différentes méthodes de réglage des actions d'un régulateur P.I.D. suivant le type de procédé et les contraintes de fabrication.

III.4.1 Méthode par approches successives

Elle consiste à modifier les actions du régulateur et à observer les effets sur la mesure enregistrée, jusqu'à obtenir la réponse optimale. 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.

III.4.1.1 Réglage par approches successives

Le procédé est d'abord conduit en manuel pour stabiliser la mesure au point de consigne. De petites variations sur la vanne permettent d'observer les réactions naturelles du procédé, afin de dégrossir les actions à mettre sur le régulateur au début de chaque réglage.

Les actions seront réglées dans l'ordre P, D, I. Les critères de performance retenus pour la régulation sont une réponse bien amortie (dépassement de 10 à 15 %) avec une rapidité maximum (temps d'établissement minimal).

La majorité des boucles de régulation correspondent à des boucles fermées où l'on utilise un seul régulateur. Le mode de régulation souvent utilisé dans ces régulateurs, est le mode PID.

En pratique le réglage par étape des actions proportionnelle, intégrale, dérivée, tout en observant l'évolution de la mesure, suite à des changements de consigne (tests en asservissement), ou suite à des variations de grandeurs perturbatrices (tests en régulation).

III.4.1.2 Réglage de l'action proportionnelle

La procédure à suivre est la suivante :

- Stabiliser la mesure au point de fonctionnement.
- Mettre le régulateur en P seul, ($T_i = \max.$ ou $n = 0$ et $T_d = 0$).
- Afficher un gain Gr faible ($Gr < 1$).
- Egaler la consigne à la mesure, passer le régulateur en automatique.
- Effectuer un échelon de consigne de 5 à 10 %.
- Observer l'enregistrement de l'évolution du signal de mesure.

Si elle est sur amortie (apériodique), augmenter le gain Gr (ou diminuer BP %).

Si elle présente plus de deux oscillations, diminuer le gain Gr (ou augmenter BP %).

Au cours des réglages, les observations suivantes peuvent être faites.

La mesure ne rejoint pas la consigne.

L'écart diminue avec le gain mais la stabilité se dégrade.

La réponse s'accélère en augmentant le gain.

Il faut trouver un compromis entre rapidité et stabilité.

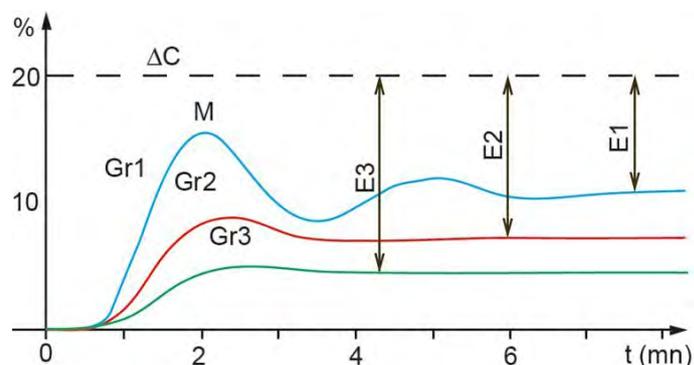


Figure III. 17 Comportement du procédé avec P

III.4.1.3 Réglage de l'action dérivée

- L'action dérivée ne se justifie que si la mesure a un certain retard.
- Conserver la valeur de l'action proportionnelle déterminée précédemment et l'intégrale minimale.
- Afficher une action dérivée faible (T_d égal à quelques secondes ($tr/3$)).
- Egaler la consigne à la mesure, passer le régulateur en automatique.
- Effectuer un échelon de consigne de 5 à 10 %.
- Si la réponse ne s'amortie pas, augmenter T_d .
- Si la réponse est oscillante ou si elle est plus lente, diminuer T_d .

L'action dérivée a un effet anticipatif

L'action dérivée stabilise la réponse du procédé

La réponse s'accélère en augmentant l'action dérivée

Il faut trouver un compromis entre rapidité et stabilité.

La présence de l'action dérivée, permet d'augmenter l'action proportionnelle (environ 10 % de plus, soit 1,1. Gr ou 0,9. BP%)

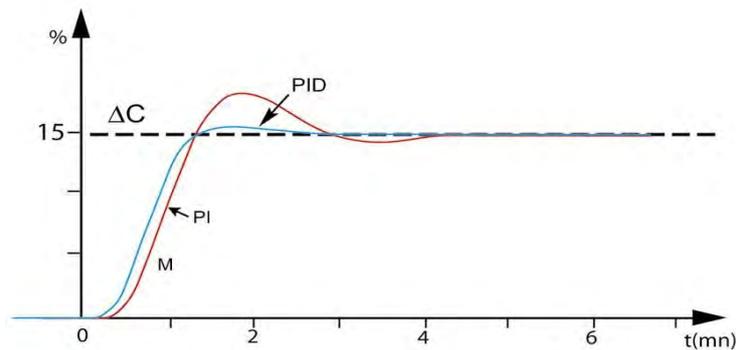


Figure III. 18 Comportement du procédé avec PID

III.4.1.4 Réglage de l'action intégrale

- Conserver les valeurs des actions proportionnelle et dérivée déterminées précédemment.
- Afficher une action intégrale faible.
- Pour un premier essai afficher T_i = quelques minutes
- Egaler la consigne à la mesure, passer le régulateur en automatique.
- Effectuer un échelon de consigne de 5 à 10 %.
- Si la réponse est sur amortie ou trop lente, diminuer T_i .
- Si la réponse présente un dépassement trop important, on augmente T_i .

L'action intégrale donne la précision statique la mesure rejoint la consigne la réponse

s'accélère en augmentant l'action intégrale Il faut trouver un compromis entre rapidité et stabilité

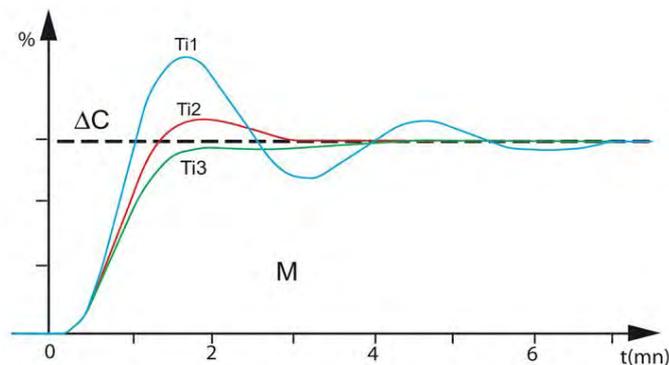


Figure III. 19 Comportement du procédé avec I

III.4.2 Méthode nécessitant l'identification du procédé

Si l'on connaît 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. Cette méthode nécessite un enregistreur à déroulement rapide. Elle est de préférence utilisée sur des procédés à grande inertie.

III.4.2.1 Réglage à partir de l'identification du procédé

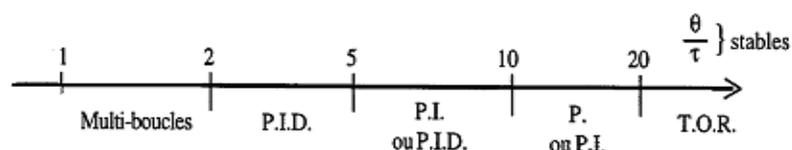
L'identification d'un procédé permet d'obtenir les paramètres caractéristiques (gain statique, constante de temps, ...). A partir de ces paramètres, on calcule les actions à afficher sur le régulateur, ce calcul dépend :

- Du modèle choisi pour l'identification;
- De la structure du régulateur utilisé (série, parallèle...)
- Du mode de régulation choisi (P, PI, PID...)

III.4.2.2 Cas d'un procédé stable :

Après avoir identifié le procédé suivant le modèle d'un premier ordre retardé, on utilise le tableau suivant pour calculer les actions à afficher sur un régulateur compte tenu de sa structure.

$$Hr(p) = \frac{Gs.e^{-\tau p}}{1+\theta.p} \quad (III.12)$$



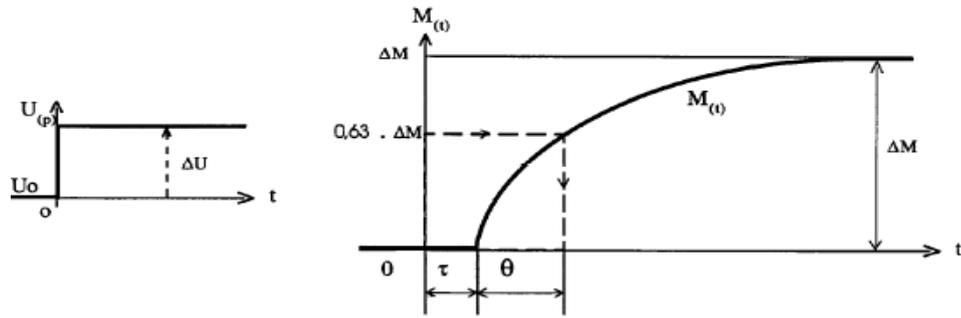


Figure III.20 Echelon sur la commande de la vanne et la réponse de la mesure

Le choix du mode de régulation est lié à la réglabilité du système déterminé par le rapport θ/τ .

Si θ/τ est compris entre 10 et 20 : régulation P

Si θ/τ est compris entre 5 et 10 : régulation PI

Si θ/τ est compris entre 2 et 5 : régulation PID

Si θ/τ est supérieur à 20 : régulation tout ou rien

Si θ/τ est inférieur à 2 : régulation multi boucles, régulation numérique

Régulateurs paramètres	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	$\frac{0,8 \cdot \theta}{G_s \cdot \tau}$	$\frac{0,8 \cdot \theta}{G_s \cdot \tau}$	$\frac{0,8 \cdot \theta}{G_s \cdot \tau}$	$\frac{0,85 \cdot \theta}{G_s \cdot \tau}$	$\frac{(\frac{\theta}{\tau}) + 0,4}{1,2 \cdot G_s}$	$\frac{(\frac{\theta}{\tau}) + 0,4}{1,2 \cdot G_s}$	$\frac{(\frac{\theta}{\tau}) + 0,4}{1,2 \cdot G_s}$
Ti	--	θ	$\frac{G_s \cdot \tau}{0,8}$	θ	$\frac{G_s \cdot \tau}{0,75}$	$\theta + 0,4 \cdot \tau$	$\theta + 0,4 \cdot \tau$
Td	--	--	--	$0,4 \cdot \tau$	$\frac{0,35 \cdot \theta}{G_s}$	$\frac{\theta \cdot \tau}{\tau + 2,5 \cdot \theta}$	$\frac{0,35 \cdot \theta}{G_s}$

Tableau III .2 Calcul des actions avec la méthode de l'identification du procédé.(procédé stable)

Après calcul et affichage des actions, il est nécessaire d'effectuer un test sur une variation de consigne, pour vérifier l'allure de la réponse. Si les résultats obtenus ne sont pas satisfaisants, refaire l'identification, s'assurer de la structure du régulateur ou retoucher les actions.

III.4.2.3 Cas d'un procédé instable :

Après avoir identifié le procédé suivant le modèle d'un intégrateur pur retardé, on utilise le tableau suivant pour calculer les actions à afficher sur un régulateur compte tenu de sa structure.

$$HR(p) = \frac{Gs.e^{-\tau p}}{p(1+\theta_1 p)(1+\theta_2 p)\dots\dots(1+\theta_n p)} = \frac{Gs.e^{-\tau p}}{p} \quad (\text{III.13})$$

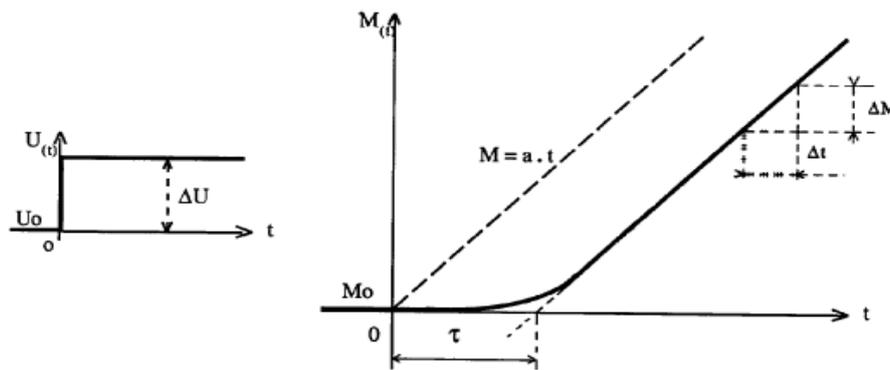
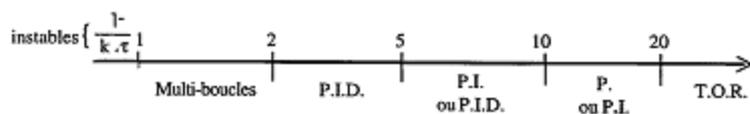


Figure III. 21 Echelon sur la commande de la vanne et la réponse de la mesure

- Le temps mort du modèle est déterminé graphiquement
- Coefficient d'intégration du procédé : $k = \Delta M\% / (\Delta U\% \cdot \Delta t)$

Le choix du mode de régulation est lié à la réglabilité du système déterminé par le rapport $k \cdot \tau$

- Si $k \cdot \tau$ est compris entre 0.05 et 0.1 : régulation P
- Si $k \cdot \tau$ est compris entre 0.1 et 0.2 : régulation PI
- Si $k \cdot \tau$ est compris entre 0.2 et 0.5 : régulation PID
- Si $k \cdot \tau$ est inférieur à 0.05 : régulation tout ou rien
- Si $k \cdot \tau$ est supérieur à 0.5 : régulation multi boucles, régulation numérique



Régulations	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	$\frac{0,8}{K \cdot \tau}$	$\frac{0,8}{K \cdot \tau}$	$\frac{0,8}{K \cdot \tau}$	$\frac{0,85}{K \cdot \tau}$	$\frac{0,9}{K \cdot \tau}$	$\frac{0,9}{K \cdot \tau}$	$\frac{0,9}{K \cdot \tau}$
Ti	--	5. τ	$\frac{K \cdot \tau^2}{0,15}$	4,8. τ	$\frac{K \cdot \tau^2}{0,15}$	5,2. τ	5,2. τ
Td	--	--	--	0.4. τ	$\frac{0,35}{K}$	0.4. τ	$\frac{0,35}{K}$

Tableau III.3 calcul les actions avec la méthode de l'identification du procédé. (Procédé instable)

Après calcul et affichage des actions, il est nécessaire d'effectuer un test sur une variation de consigne, pour vérifier l'allure de la réponse. Si les résultats obtenus ne sont pas satisfaisants, refaire l'identification, s'assurer de la structure du régulateur ou retoucher les actions.

III.4.3 Méthode de Ziegler et Nichols

Elle nécessite l'observation de la réponse du procédé et la connaissance de la structure du régulateur. C'est une méthode qui permet le calcul des actions, sans la détermination des paramètres du procédé.

III.4.3.1 Réglage par la méthode de Ziegler et Nichols

Cette méthode est identique pour procédés stables et instables, mais elle n'est pas adaptée pour les boucles de régulation rapides (débit par exemple) et les procédés à retard important.

La méthode consiste à mettre la boucle de régulation en oscillations entretenues. La période des oscillations T_{osc} et le gain du régulateur critique G_{rc} qui occasionne ces oscillations, permettent de calculer les actions à afficher sur le régulateur. Ce calcul dépend de la structure du régulateur utilisé et du mode de régulation choisi (P, PI, PID)

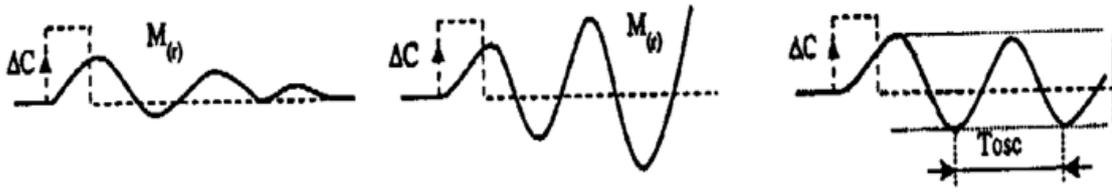
Le critère de performance choisi par Ziegler et Nichols donne une réponse avec un amortissement par période de l'ordre de 0,25.

III.4.3.2 Mode opératoire

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 ($T_i = \text{maxi}$ ou $n = 0$ et $T_d = 0$)
- Passer le régulateur en automatique

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



*GR trop petit
BP% trop grande*

*GR trop grand ou
BP% trop petite*

*GR correct
BP% correcte*

- Relever la période des oscillations T et le gain critique du régulateur G_{rc} .
- Calculer les actions du régulateur à l'aide du tableau suivant.

III.4.3.3 Calcul des actions

La méthode de Ziegler et Nichols développera ce tableau pour calculer les actions P.I.D à l'aide de la période des oscillations et le gain critique du régulateur G_{rc} .

Régulations	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)
G_r	$\frac{G_{rc}}{2}$	$\frac{G_{rc}}{2,2}$	$\frac{G_{rc}}{2,2}$	$\frac{G_{rc}}{3,3}$	$\frac{G_{rc}}{1,7}$	$\frac{G_{rc}}{1,7}$	$\frac{G_{rc}}{1,7}$
T_i	--	$\frac{T}{1,2}$	$\frac{2.T}{G_{rc}}$	$\frac{T}{4}$	$\frac{0,85.T}{G_{rc}}$	$\frac{T}{2}$	$\frac{T}{2}$
T_d	--	--	--	$\frac{T}{4}$	$\frac{G_{rc}.T}{13,3}$	$\frac{T}{8}$	$\frac{G_{rc}.T}{13,3}$

Tableau III. 4 Calcul les actions avec la méthode de Ziegler et Nichols

III.4.4 Méthode de Cohen et Coon

La méthode de Cohen-Coon est une variation de la méthode de la courbe de réaction de Ziegler-Nichols. Comme la première méthode de Ziegler-Nichols, cette technique s'applique à des systèmes dont la réponse ressemble à celle d'un système de premier ordre.

- La boucle de régulation doit être ouverte (régulateur en mode manuel).
- Attendre la stabilisation (régime établi) du procédé.

- Augmenter brutalement le signal de sortie du régulateur (commande du procédé) afin d'appliquer un échelon au procédé.
- Enregistrer le signal de mesure (réponse du procédé à l'échelon).

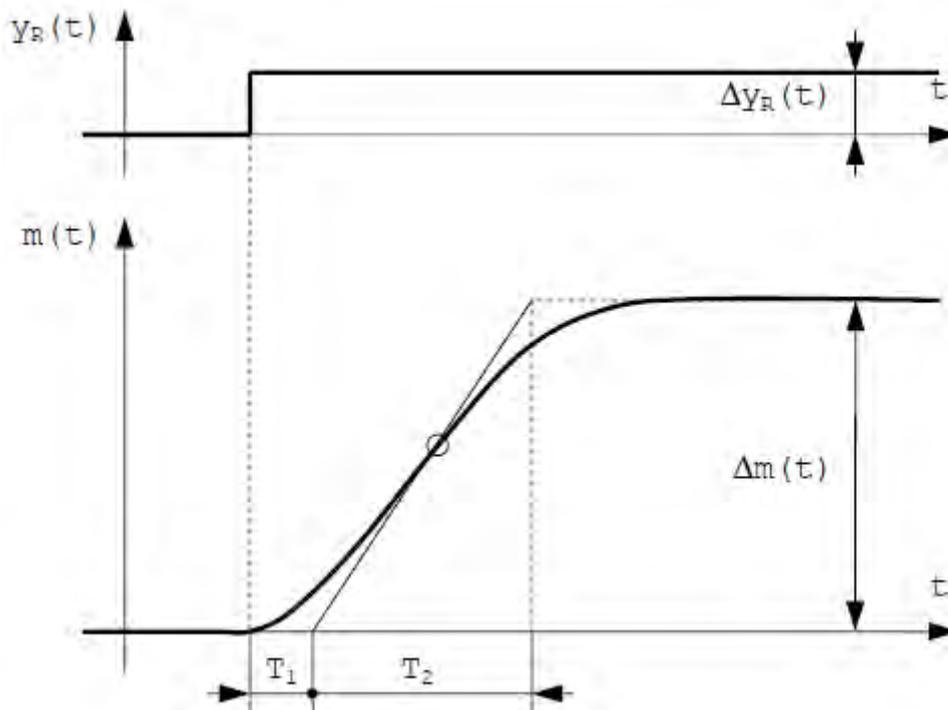


Figure III.22 identification d'un système par Cohen-Coon

- Attendre la stabilisation (régime établi) du procédé.
- Tracer la tangente au point d'inflexion de la réponse.
- Mesurer Δm , T_1 (retard du procédé) et T_2 (constante de temps du procédé). T_1 est normalement inférieur à T_2 .
- Calculer le gain statique du procédé $K = \Delta m / \Delta y_R$. (Δy_R est connu).
- Calculer les réglages à l'aide du tableau ci-dessous :

Type de régulateur	X_p	T_i	T_d
P	$\frac{K \cdot T_1}{T_2} \cdot 100$	-	-
PI	$\frac{1,1 \cdot K \cdot T_1}{T_2} \cdot 100$	$3,3 \cdot T_1$	-
PD	$\frac{0,8 \cdot K \cdot T_1}{T_2} \cdot 100$	--	$0,3 \cdot T_1$
PID	$\frac{0,8 \cdot K \cdot T_1}{T_2} \cdot 100$	$2,5 \cdot T_1$	$0,4 \cdot T_1$

Tableau III.5 Tableau de Cohen et Coon

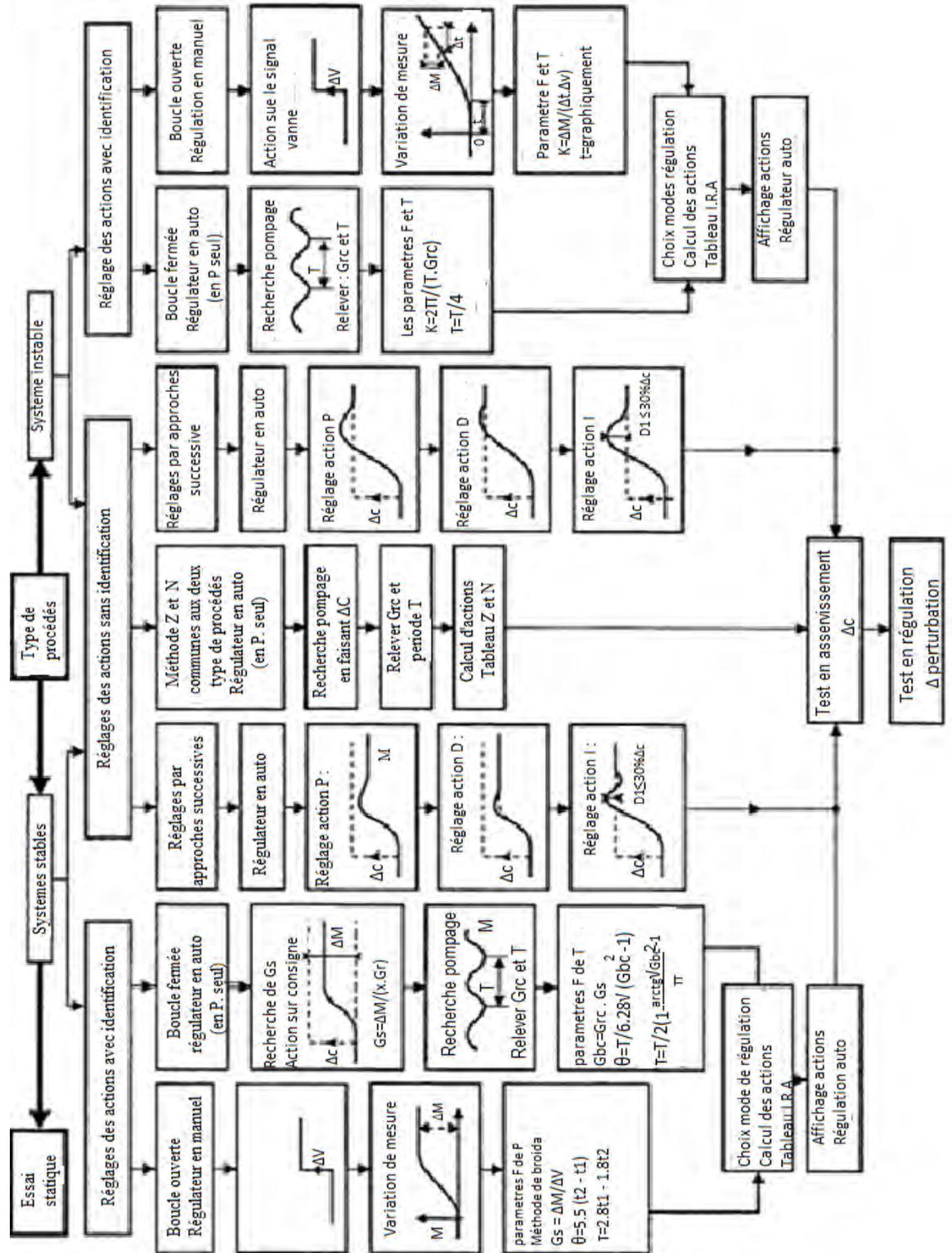


Tableau III.6 Réglage des paramètres PID d'un système.

Cet organigramme présente les différentes solutions et les différentes étapes pour la mise au point et le réglage des actions des régulateurs pour un procédé quelconque selon leur stabilité et instabilité.

III.5 Conclusion

On retient de l'étude de la boucle ouverte de différentes fonctions des systèmes de génie climatique, que les systèmes présentent de mauvaises performances : nos systèmes sont de différents ordres, lents et même à des réponses indicielles instables.

En effet, il est évident pour une installation de chauffage ou bien de climatisation de choisir une méthode spécifique pour le réglage des actions (P, I, D) afin de stabiliser le système, le rendre rapide et minimiser l'écart de mesure.

Chapitre IV

Tests de simulations

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre la on va procéder à des applications directes sur des installations de génie climatique (chauffage et climatisation) et maîtrisées quasiment par tous : le correcteur PID. Nous rappelons que le régulateur PID (Proportionnel, Intégrateur, Dérivateur) commence à apparaître en 1890 avec des premiers exemples en 1911 et une première étude théorique en 1922. Depuis c'est devenu le correcteur d'asservissement le plus utilisé dans l'industrie. Tout le jeu est donc d'arriver à régler les trois paramètres pour arriver au mieux à notre but. Afin de nous aider, Ziegler et Nichols ont développé, en 1942, une méthode pour caler ces paramètres en analysant la réponse du système asservi.

Comme simulation, nous allons choisir des installations de chauffage et de climatisation des vannes et des organes de réglage et essayer d'avoir les meilleurs résultats (la rapidité, la stabilité, la précision). Pour établir cette simulation des installations et de son asservissement, nous utilisons le logiciel Simulink de Matlab

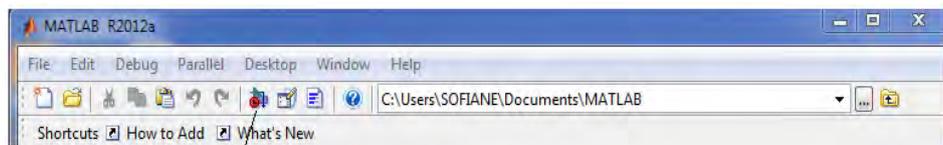
IV.2 Rappel de Simulink

Simulink c'est un outil de Matlab qui permet d'introduire un modèle à l'aide d'une interface d'utilisateur visuel. Simulink s'intègre ainsi dans Matlab comme un nouvel environnement. Dans cet environnement, plusieurs boîtes à outils sont disponibles. Dans chaque boîte à outils ils existent des éléments communément utilisés dans l'automatique déjà prêts à utiliser comme intégrateurs, additionneurs, gains, fonction de transfert, etc. L'utilisateur n'a qu'à choisir les composants qui vont former son modèle puis à les interconnecter. Simulink offre aussi des possibilités de communication avec l'environnement Matlab, enregistrement des résultats ou des variables et, finalement, différentes possibilités d'affichage. Dans ce procédurier nous allons utiliser Simulink afin de simuler l'ensemble électromécanique Machine synchrone - Générateur à courant continu - Moteur à courant continu du laboratoire numéro 2. La démarche à suivre est très simple: à partir des équations différentielles et algébriques qui représentent chacun des éléments de l'ensemble, vous trouverez à l'aide de la transformée de Laplace le diagramme des blocs équivalent. Vous

rentrez ce diagramme dans Simulink puis vous serez en mesure d'exécuter les différents essais et simulations demandés dans le procédurier du laboratoire. Vous trouverez par la suite des informations relatives à l'utilisation de Simulink.

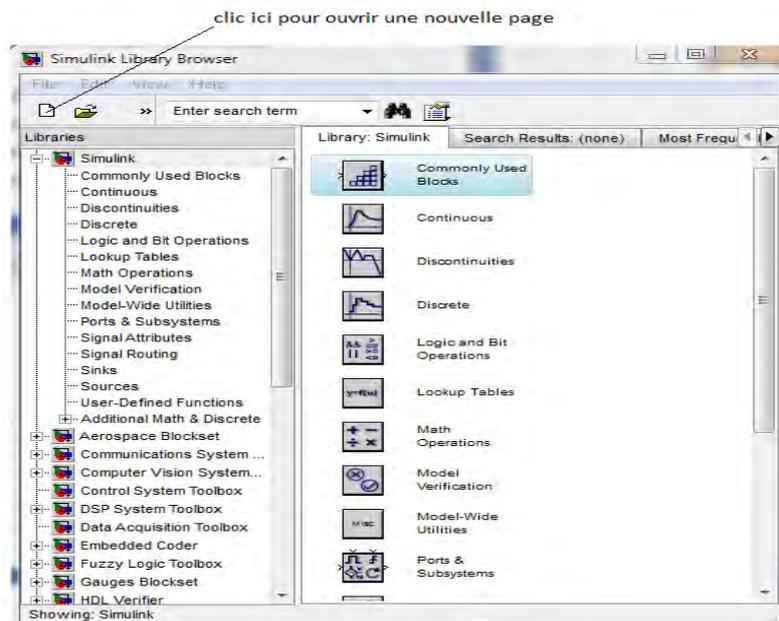
Démarrage de Simulink :

Pour démarrer Simulink à partir de Matlab, il suffit de taper la commande "Simulink". Deux nouvelles fenêtres (la fenêtre des bibliothèques disponibles Simulink et une fenêtre de modèle Simulink vierge) apparaîtront



clic 1 fois pour ouvrir la page de simulink

Figure IV. 1 commande simulink



clic ici pour ouvrir une nouvelle page

Figure IV. 2 bibliothèques du simulink.

COLLECTION	CONTENU	BLOCS LES PLUS UTILISÉS
Sources	sources de signaux	générateurs de signaux, horloges, chargement de données d'un fichier ou du workspace
Sinks	affichage, stockage	afficheurs de signaux, stockage de données dans un fichier ou dans le workspace
Continuous	blocs continus	intégrateur, fonction de transfert, représentation d'état, retards
Discrète	blocs discrets	intégrateur, fonction de transfert, représentation d'état, bloqueurs, filtres
Math	opérateurs mathématiques	fonctions trigonométriques, signe, valeur absolue, gains, somme, produit
Function& Tables	fonctions, interpolation	expression générique, tableaux d'interpolation, fonction MATLAB, S-fonctions
Nonlinear	blocs non-linéaires	frottements, jeux, saturations, commutateurs
Signals&Systems	portes, connections	sous-système, porte d'entrée et de sortie pour un modèle ou un sous-système, signal vectoriel → signaux scalaires (demux) et vice versa (mux)

Tableau IV.1 contenu d'une bibliothèque

Construction d'un diagramme SIMULINK

Les étapes de base sont les suivantes

- pour commencer, dans le menu File, sélectionner New Model (pour la version 2012 a sur Windows,

Cliquer sur l'icône « feuille blanche » : une fenêtre de travail Untitled s'ouvrira ;

- choisir les blocs dont on a besoin pour construire le diagramme

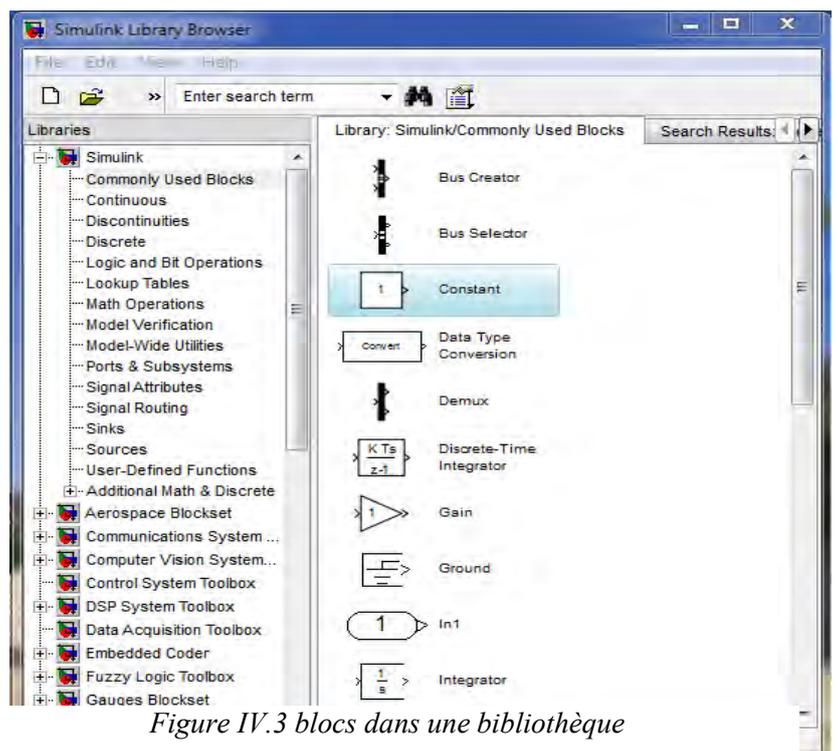


Figure IV.3 blocs dans une bibliothèque

dans les collections de la bibliothèque, et les faire glisser un par un dans la fenêtre de travail,
– faire des liaisons entre les blocs à l'aide de la souris ;

– cliquer sur les blocs dont on veut changer les paramètres : une fenêtre de dialogue s'ouvrira pour permettre cette opération ;
– sauvegarder le schéma ainsi obtenu dans un fichier *.mdl.

Un exemple très simple

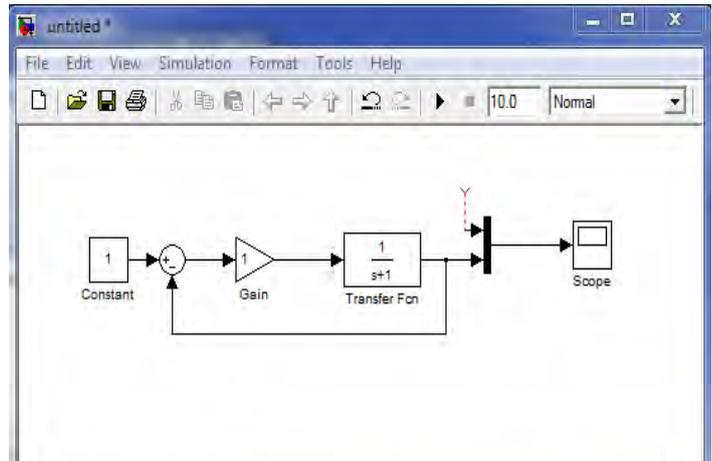


Figure IV. 4 schéma d'un ensemble des blocs

D'habitude, on commence par mettre ensemble des sous-systèmes plus simples. Ces sous systèmes doivent avoir des portes d'entrée (bloc In) et de sortie (bloc Out), pour relier les sous-systèmes au schéma principal. On crée des sous-systèmes par l'entrée Createsubsystem du menu Edit, après avoir cadré les blocs qu'on veut regrouper à l'aide de la souris. Une deuxième façon consiste à copier un groupe de blocs à l'intérieur d'un bloc Subsystem dans la fenêtre du schéma principal.

Dans le schéma principal, il faut se poser la question de comment gérer le passage des données de et vers l'espace de travail. Plusieurs solutions s'offrent : on peut utiliser des blocs des collections Sourceset Sinks ou bien encore des portes d'entrée-sortie.

Simulation d'un diagramme SIMULINK

Une fois le modèle composé, il faut ajuster les paramètres de la simulation dans le menu Simulation

Paramètres.

Paramètres du solveur

Pour faire des premiers essais on peut se contenter des paramètres proposés par défaut, en choisissant juste la durée désirée de la simulation. Cependant, ce menu a une influence énorme sur la qualité de la simulation pour des systèmes à peine compliqués et il faut apprendre à bien s'en servir.

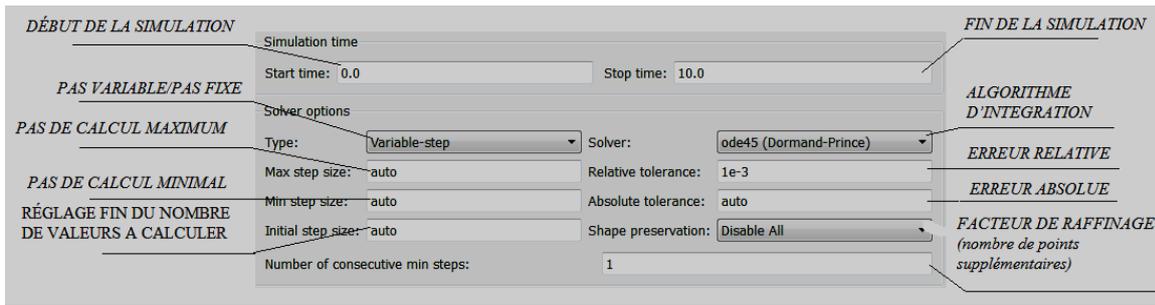


Figure IV.5 réglage le mode de simulation

IV.3 Simulation de quelques fonctions usuelles dans le domaine de génie climatique.

Tenant compte du tableau établi au chapitre deux, définissant les principales fonctions de transfert qui décrivent au mieux les installations de génie climatique, nous allons procéder aux différents testes de simulation qui nous permettent de choisir le meilleur régulateur et d'avoir un réglage optimal.

IV.3.1 Fonction de transfert du 1er ordre avec retard

- Fonction de transfert du 1^{er} ordre avec retard de 5s et une constante de temps de 5s en boucle ouverte

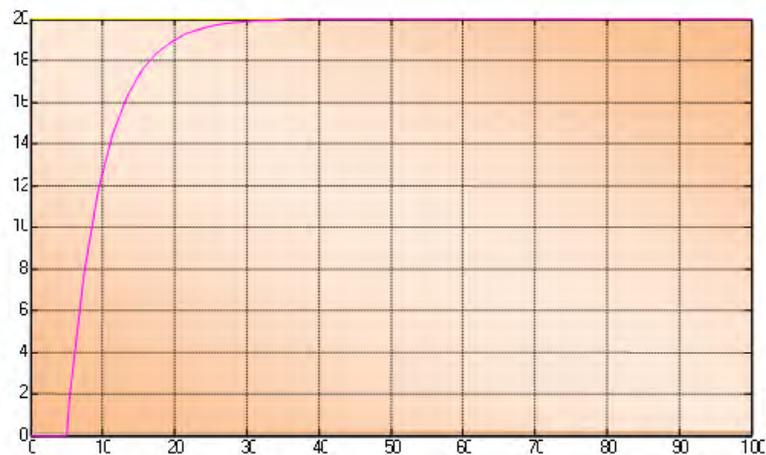
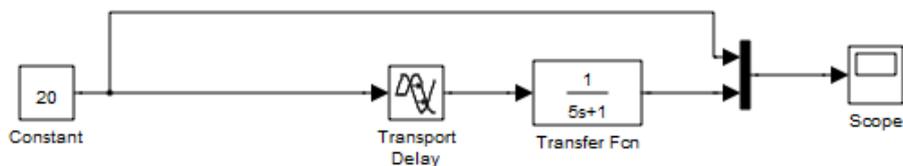


Figure IV. 6 Allure de la réponse indicielle de la température à régler.

Cette figure présente la réponse indicielle de la température contrôlée dans une installation de chauffage avec un retard de 5s et une constante de temps de 5s dans une boucle ouverte. On voit que le temps de réponse est 20s sans dépassement de la réponse indicielle. Pour gérer cette installation en régulation numérique elle doit être en boucle fermée.

- Fonction de transfert du 1^{er} ordre avec retard de 5s et une constante de temps de 5s en boucle fermée.

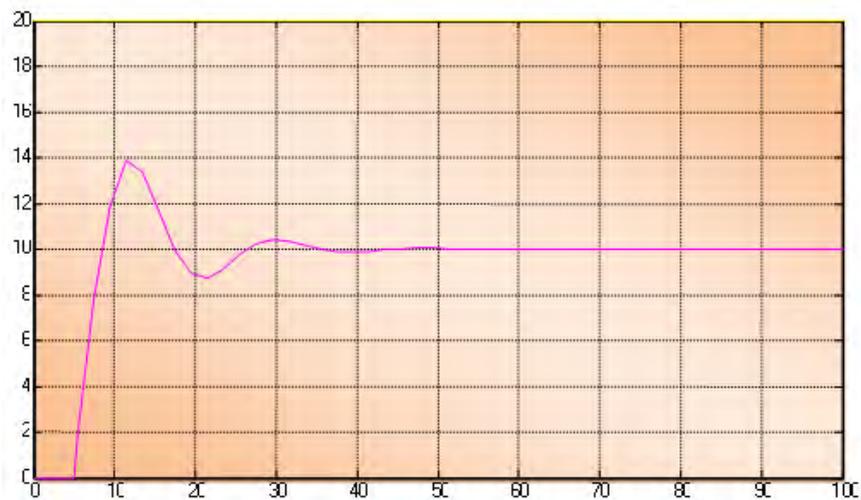
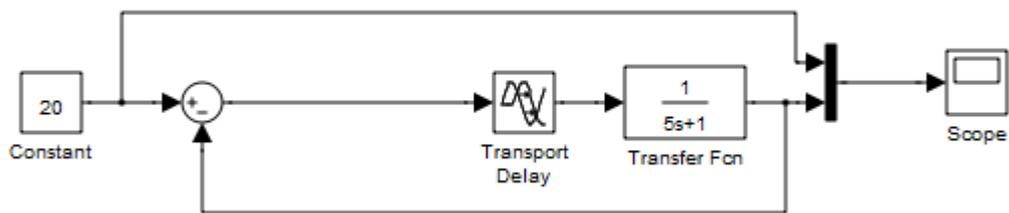
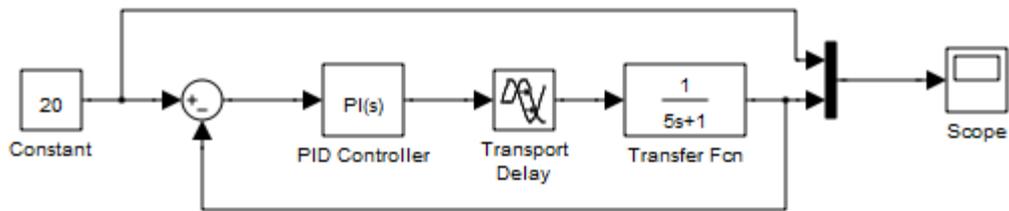


Figure IV. 7 Allure de la réponse indicielle de la température à régler.

Lorsqu' on a mis cette installation en boucle fermée on voit que la réponse indicielle stabilise à 10°C donc très grande erreur. D'après ce résultat on utilise un régulateur progressif.

- Fonction de transfert du 1^{er} ordre avec retard de 5s et une constante de temps de 5s en boucle fermée, et un régulateur PI



Avec $G_r=0.21$ $T_i=0.28$ régulateur PI est mixte

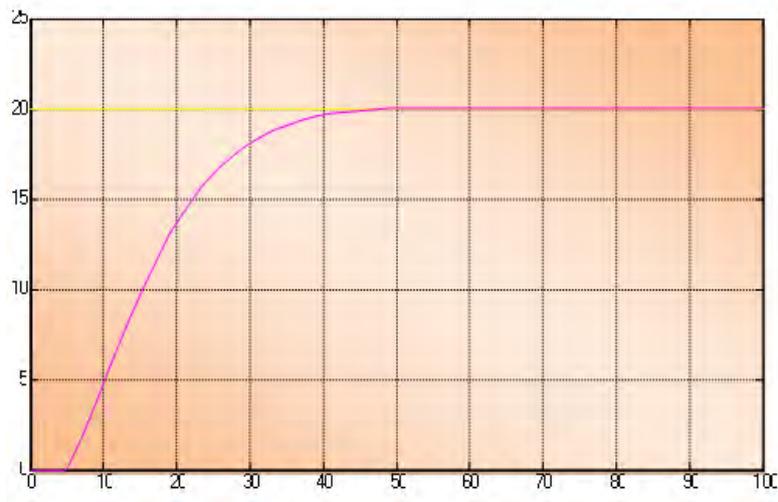
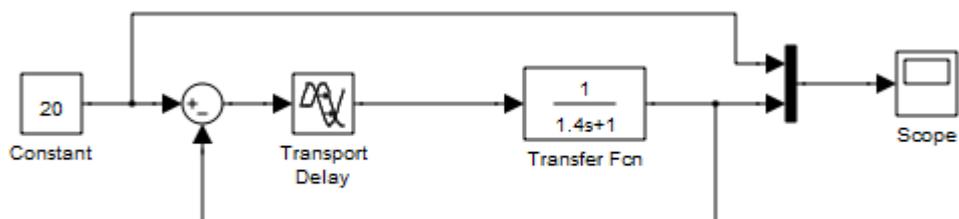


Figure IV. 8 Allure de la réponse indicielle de la température à régler.

Lorsqu'on a utilisé le régulateur PI qui est le régulateur le plus compatible dans cette installation on trouve que la stabilité de ce système est à 20°C mais le temps de réponse est à 32s.

- Fonction de transfert du 1^{er} ordre avec retard de 0.47s et une constante de temps de 1.4s en boucle fermée.



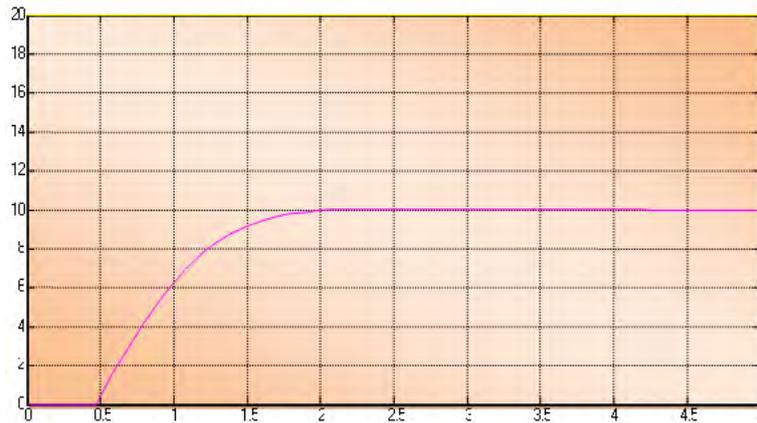


Figure IV. 9 Allure de la réponse indicielle de la température à régler.

Cette fonction de transfert est adoptée d'après une modélisation à partir de Simtrain lorsqu' on a mis cette installation en boucle fermée la réponse indicielle est stabilisée à 10°C .donc on fait la même étape que la simulation précédente.

- Fonction de transfert du 1^{er} ordre avec retard de 0.47s et une constante de temps de 1.4s en boucle fermée, et un gain de 3

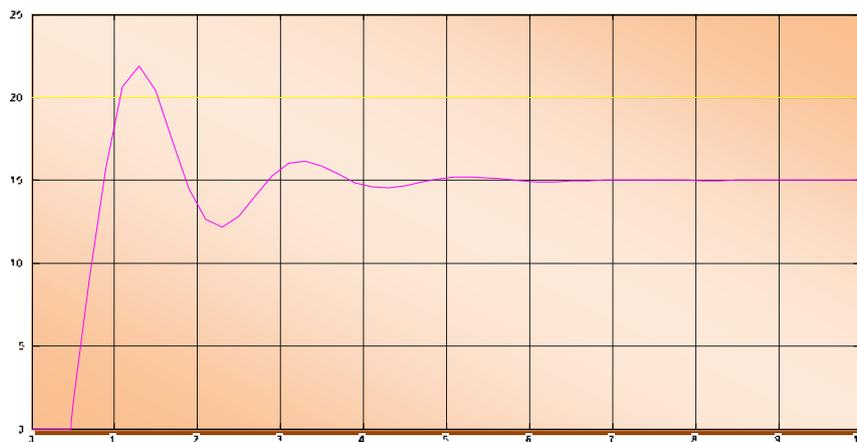
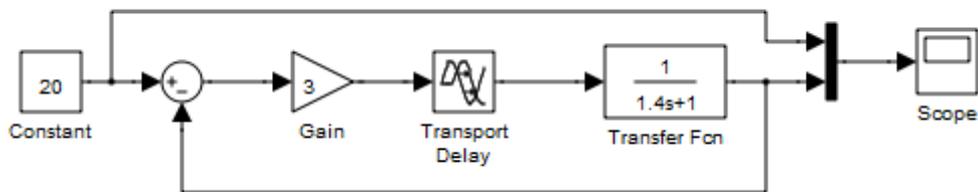
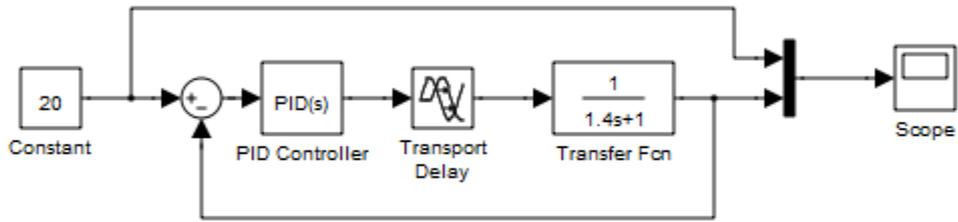


Figure IV. 10 Allure de la réponse indicielle de la température à régler.

- Fonction de transfert du 1^{er} ordre avec retard de 0.47s et une constante de temps de 1.4s en boucle fermée , et un régulateur PI.



Gr=1 Ti =1

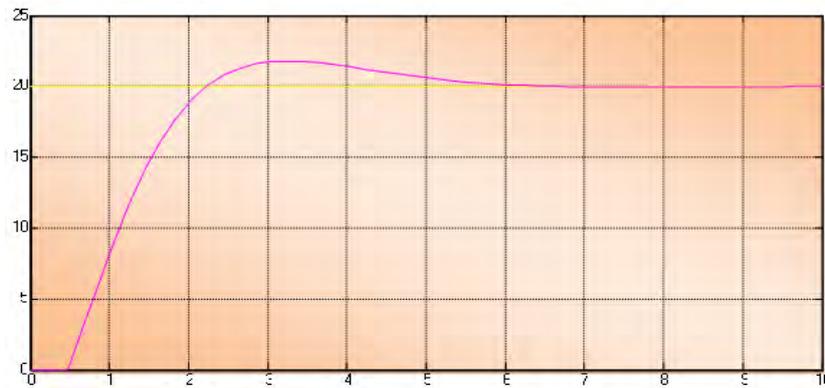


Figure IV. 11 Allure de la réponse indicielle de la température à régler.

Avec un régulateur PI on trouve un dépassement de 1°C et le temps de réponse à 3.2s donc il faut modifier le régulateur pour obtenir des résultats meilleurs.

Gr=1 Ti =1 Td =1

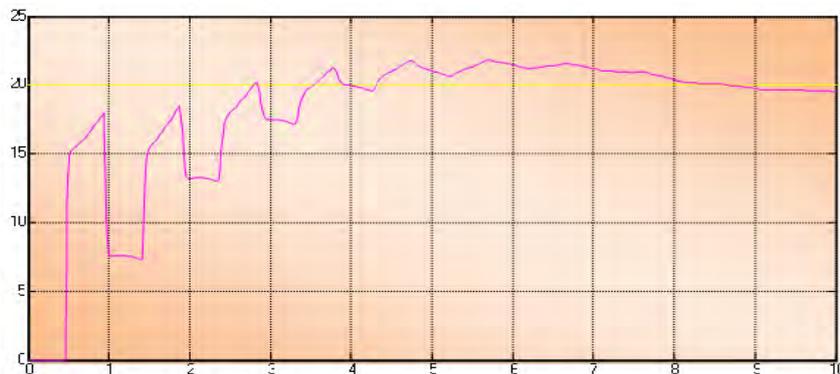


Figure IV. 12 Allure de la réponse indicielle de la température à régler.

Lorsqu'on utilise le PID on trouve que le système est mal réglé.

$$Gr=1 \quad Ti =0.7 \quad Td=0$$

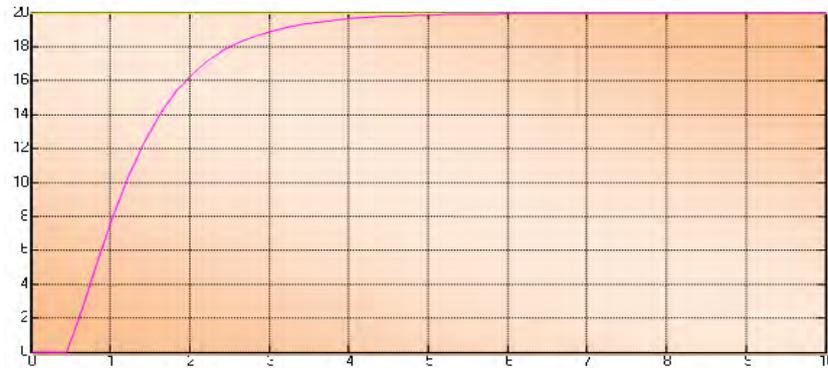


Figure IV. 13 Allure de la réponse indicielle de la température à régler.

Dans ce cas on trouve que la stabilité de cette fonction à PI mais elle est limitée à $Gr=1$ et $Ti =0.7$ avec une erreur statique trop faible et le temps de réponse est égal à 3s. C'est le meilleur résultat obtenu.

- Fonction de transfert du 1er ordre avec une constante de temps de 5s multipliée par un intégrateur en boucle ouverte

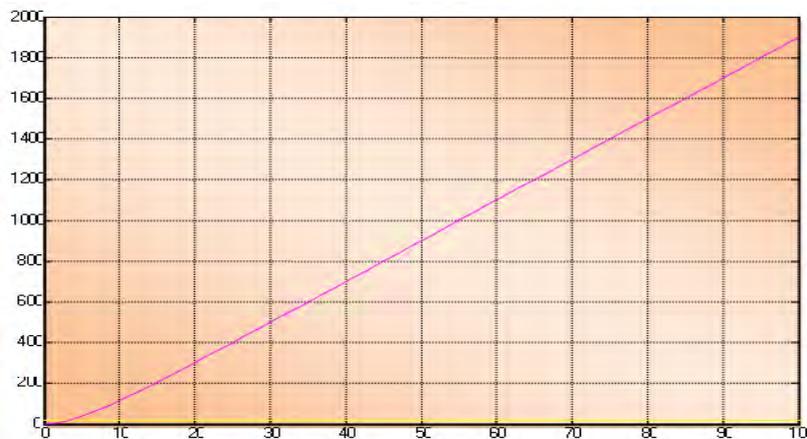
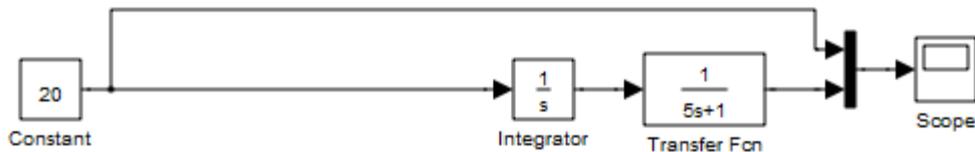


Figure IV. 14 Allure de la réponse indicielle de la température à régler.

On trouve que la réponse indicielle de la température à régler est en état d'instabilité, elle prend des valeurs très élevées Dans ce cas on met ce système en boucle fermée.

- Fonction de transfert du 1er ordre avec une constante de temps de 5s multipliée par un intégrateur en boucle fermée.

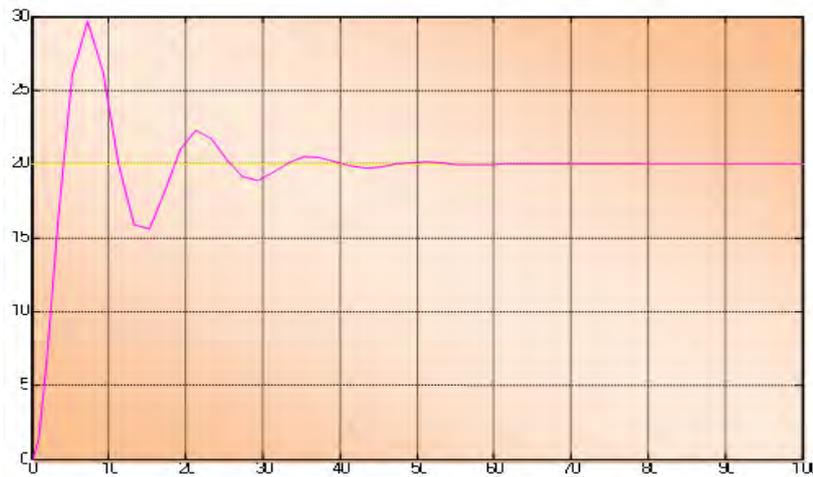
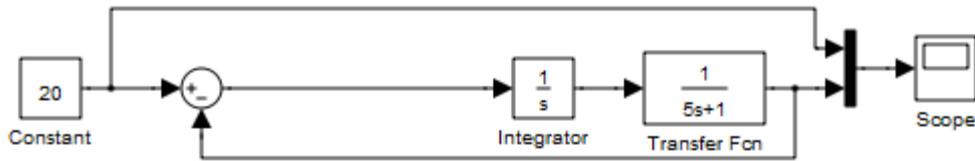
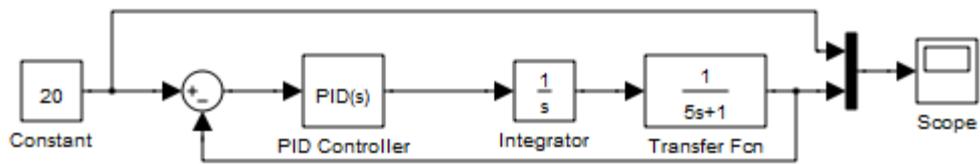


Figure IV. 15 Allure de la réponse indicielle de la température à régler.

Lorsqu' on a mis cette installation en boucle fermée on voit que la réponse indicielle stabilise à 10°C donc très grande erreur .d'après ce résultat on utilise un régulateur progressif.

- Fonction de transfert du 1er ordre avec une constante de temps de 5s multipliée par un intégrateur en boucle ouverte et avec un régulateur PID.



$G_r=1 \quad T_i=1 \quad T_d=1$

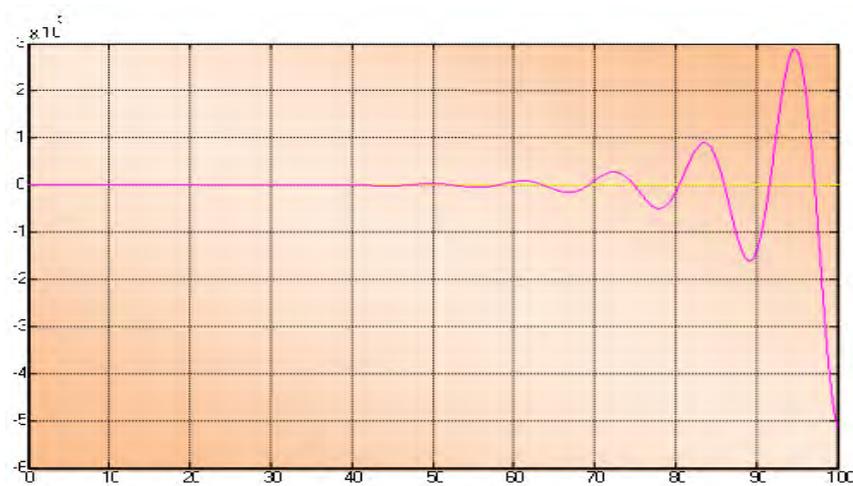
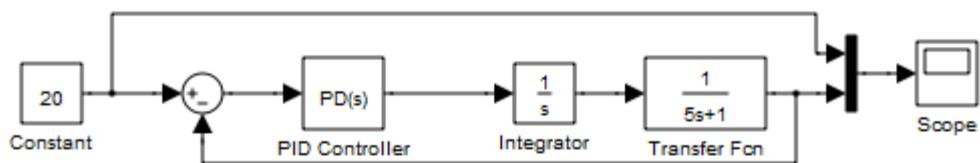


Figure IV. 16 Allure de la réponse indicielle de la température à régler.

La mesure est d'une allure instable divergente

- Fonction de transfert du 1er ordre avec une constante de temps de 5s multipliée par un intégrateur en boucle ouverte et un régulateur PD.



$G_r=0.5 \quad T_d=2$

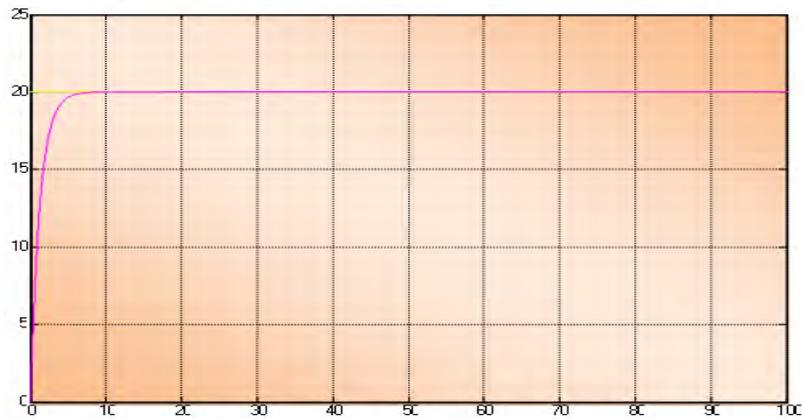


Figure IV. 17 Allure de la réponse indicielle de la température à régler.

Dans ce cas on trouve que la stabilité de cette fonction à PD mais elle est limitée à $Gr=0.5$ et $Td=2$ avec une erreur statique trop faible et le temps de réponse est égal à 3.4s. C'est le meilleur résultat obtenu.

- Fonction de transfert du 1er ordre avec une constante de temps de 5s et un retard de 5s multipliée par un intégrateur en boucle ouverte

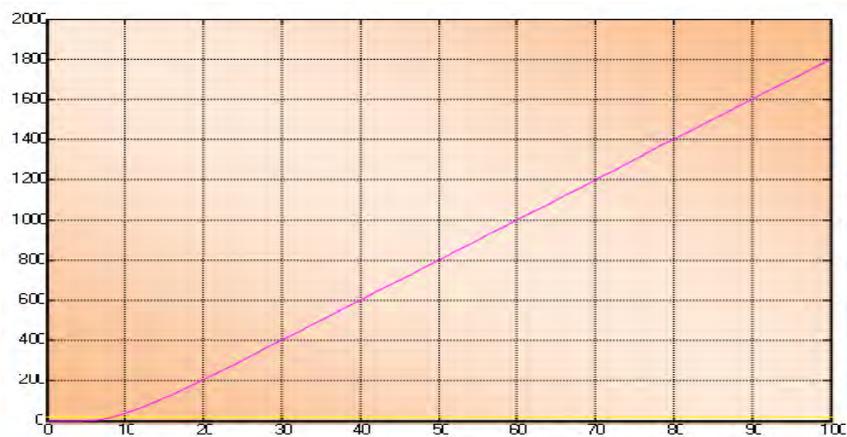
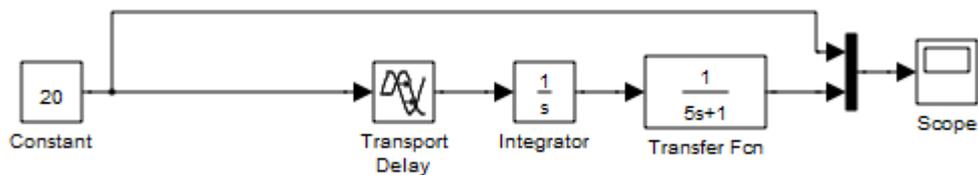


Figure IV. 18 Allure de la réponse indicielle de la température à régler.

- Fonction de transfert du 1er ordre avec une constante de temps de 5s et un retard de 5s multipliée par un intégrateur en boucle fermée.

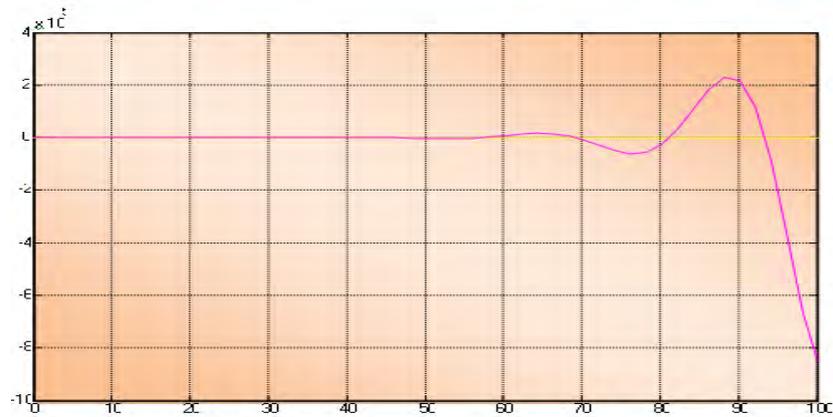
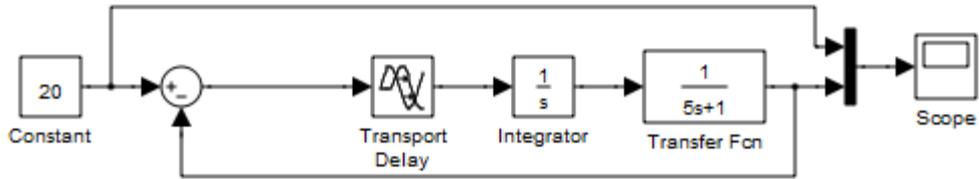
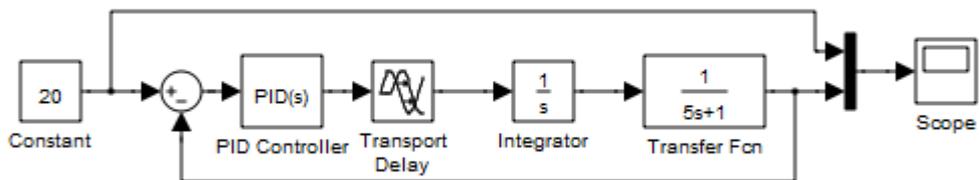


Figure IV. 19 Allure de la réponse indicielle de la température à régler.

- Fonction de transfert du 1er ordre avec une constante de temps de 5s et un retard de 5s multipliée par un intégrateur en boucle fermée, et un régulateur PID.



$G_r=1$, $T_i=1$, $T_d=1$.

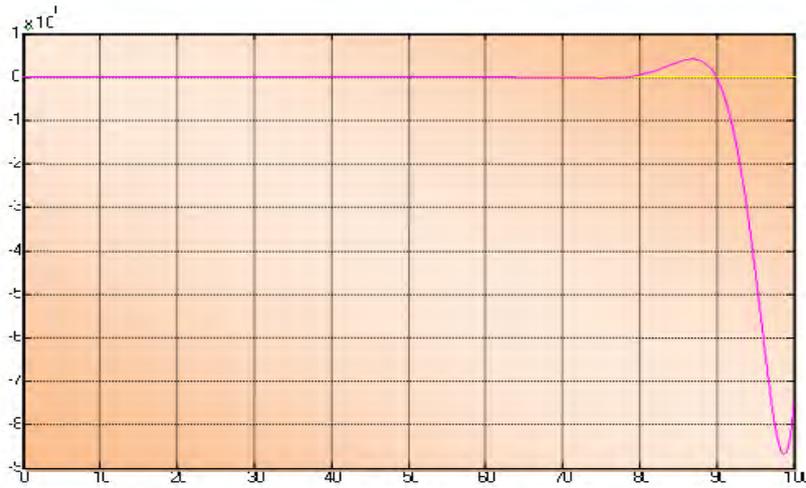
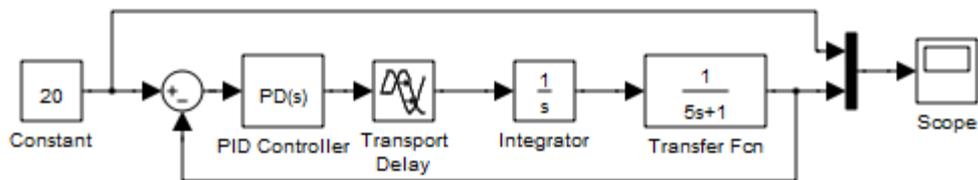


Figure IV. 20 Allure de la réponse indicielle de la température à régler.

- Fonction de transfert du 1er ordre avec une constante de temps de 5s et un retard de 5s multipliée par un intégrateur en boucle fermée, et un régulateur PD.



$G_r=0.05$ $T_d=\text{valeur trop petite}=0.01$ et moins

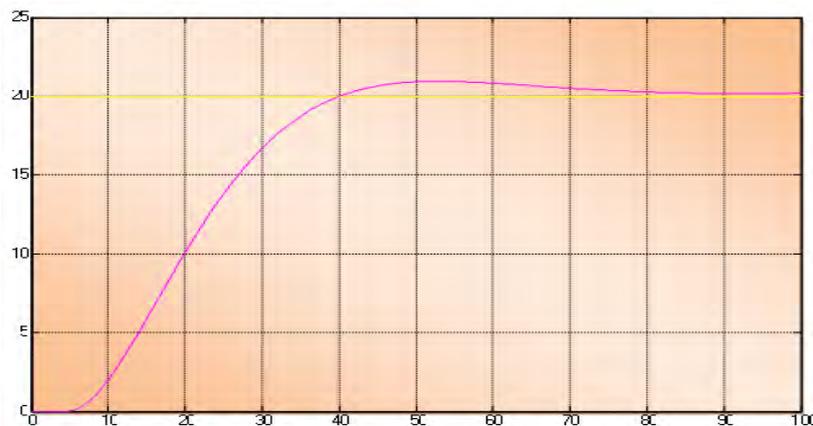


Figure IV. 21 Allure de la réponse indicielle de la température à régler.

Pour $T_d=0$

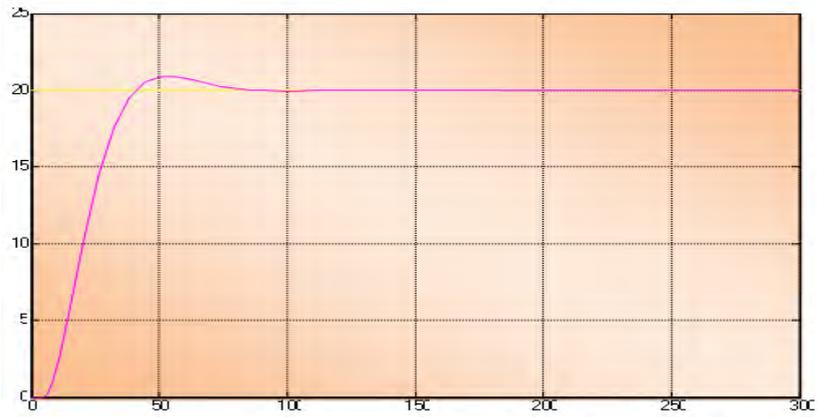


Figure IV. 22 Allure de la réponse indicielle de la température à régler.

IV.3.2 Fonction de transfert du 2eme ordre

- Fonction de transfert du 2eme ordre (model de broida) multipliée par un intégrateur en boucle ouverte.

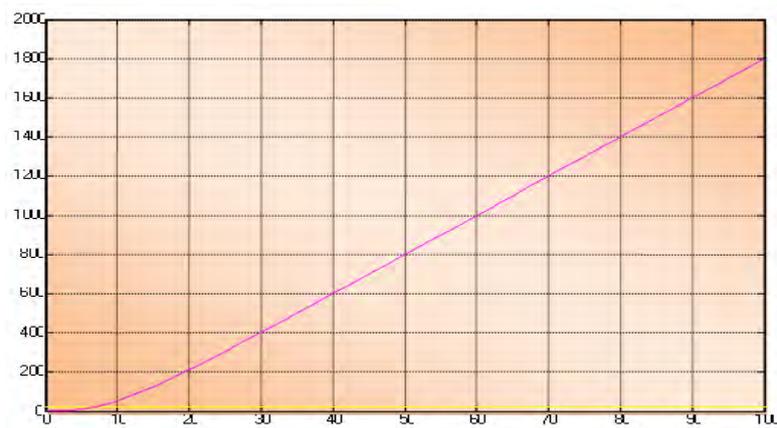
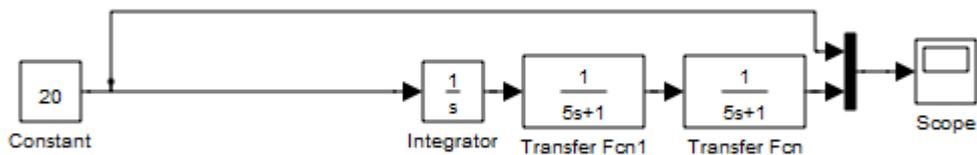


Figure IV. 23 Allure de la réponse indicielle de la température à régler.

- Fonction de transfert du 2eme ordre (model de broida) multipliée par un intégrateur en boucle fermée.

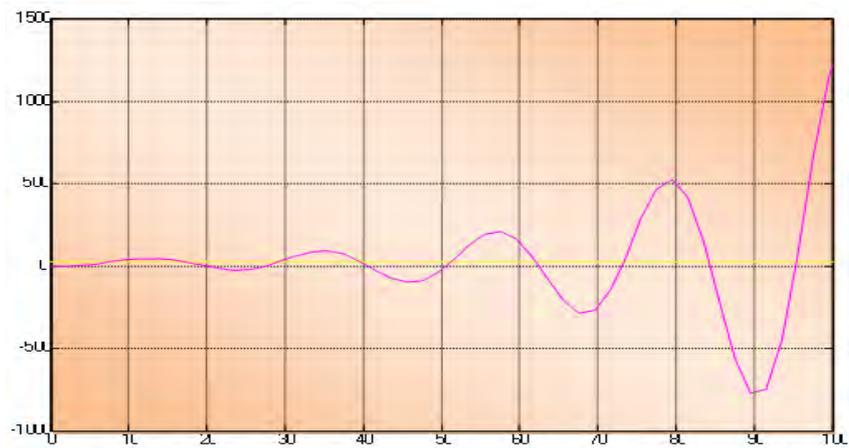
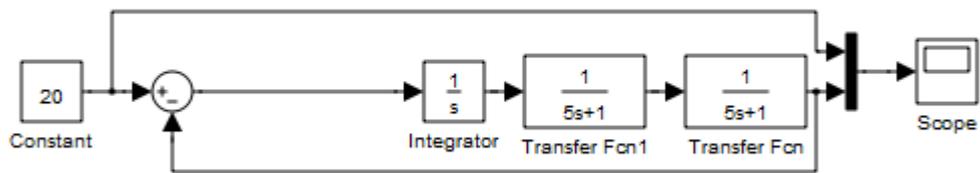
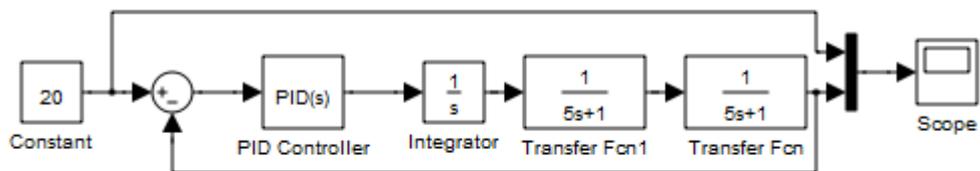


Figure IV. 24 Allure de la réponse indicielle de la température à régler.

- Fonction de transfert du 2eme ordre avec une constante de temps de 5s multipliée par un intégrateur en boucle fermée, et un régulateur PID



Avec un régulateur PID $G_r=1$ $T_i=1$ $T_d=1$

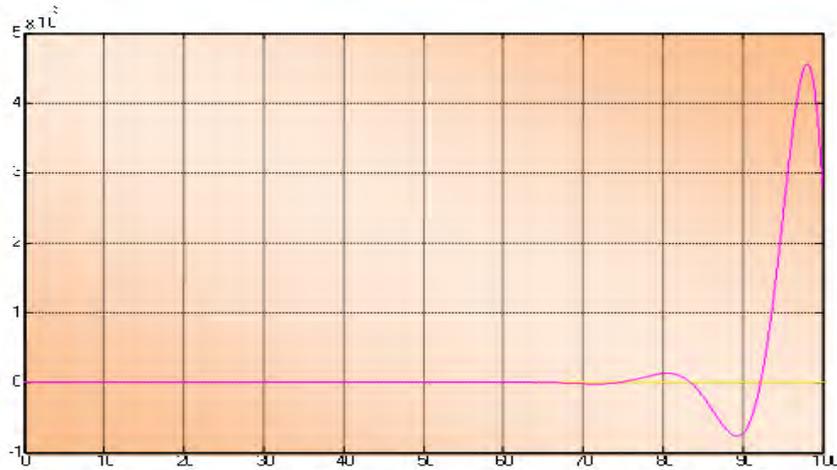
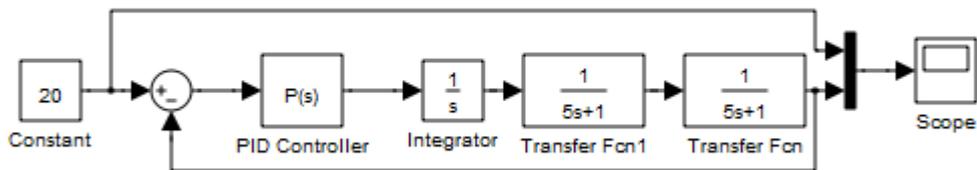


Figure IV. 25 Allure de la réponse indicielle de la température à régler.

- Fonction de transfert du 2eme ordre avec une constante de temps de 5s multipliée par un intégrateur en boucle fermée, et un régulateur P.



$G_r=0.03$ si on utilise l'action dérivée elle doit être trop petite

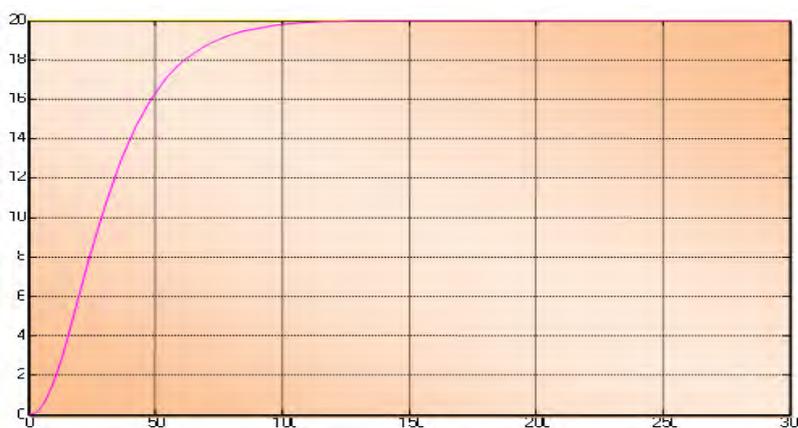


Figure IV. 30 Allure de la réponse indicielle de la température à régler.

- Fonction de transfert du 2eme ordre avec une constante de temps de 5s et un retard de 5s multipliée par un intégrateur en boucle ouverte.

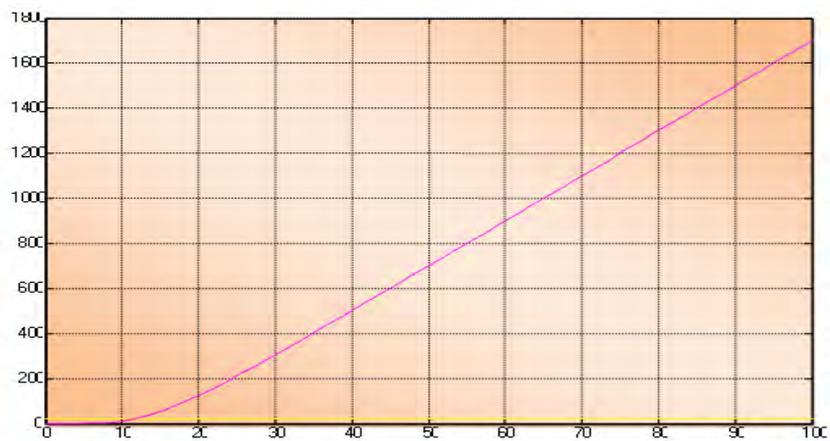
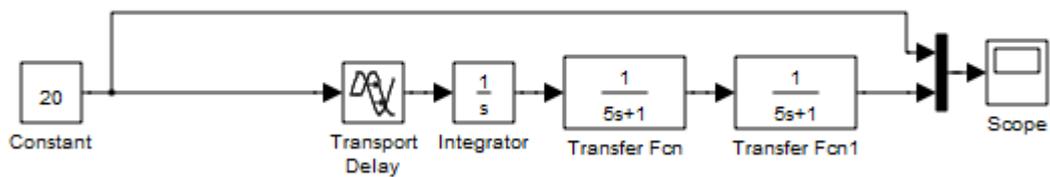
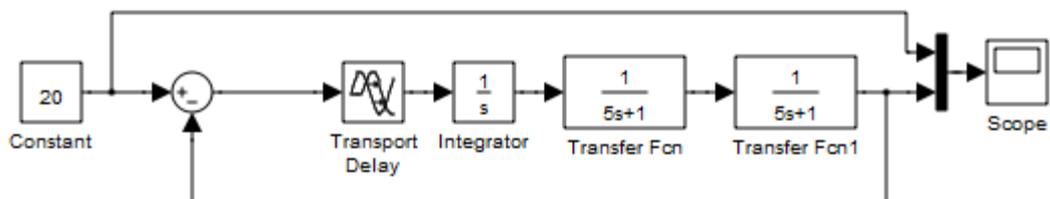


Figure IV. 31 Allure de la réponse indicielle de la température à régler.

- Fonction de transfert du 2eme ordre avec une constante de temps de 5s et un retard de 5s multipliée par un intégrateur en boucle fermée.



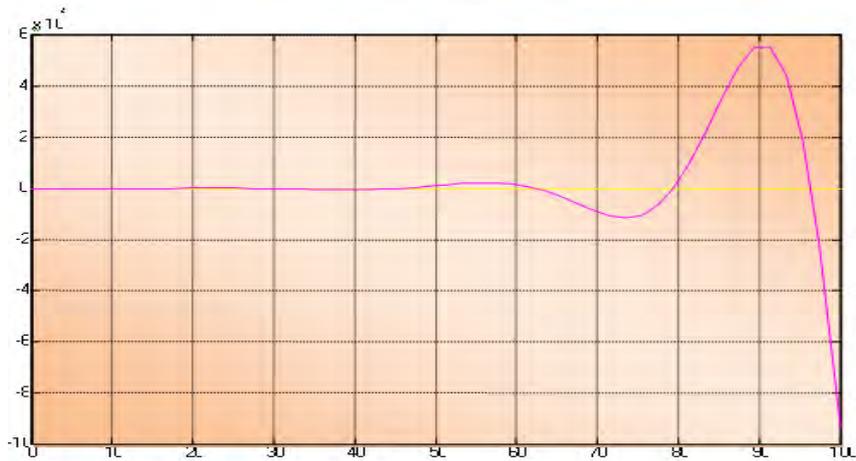
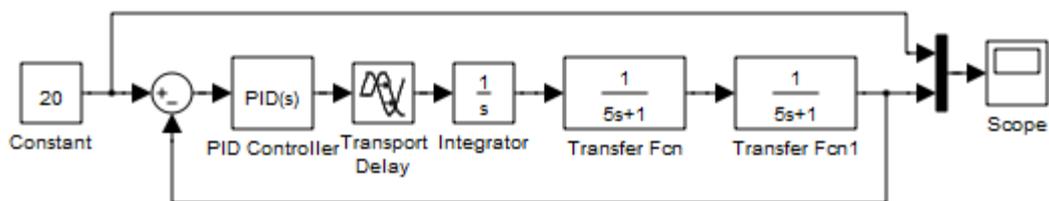


Figure IV. 32 Allure de la réponse indicielle de la température à régler.

- Fonction de transfert du 2eme ordre avec une constante de temps de 5s et un retard de 5s multipliée par un intégrateur en boucle fermée, et un régulateur PID.



Gr=1 Ti=1 Td=1

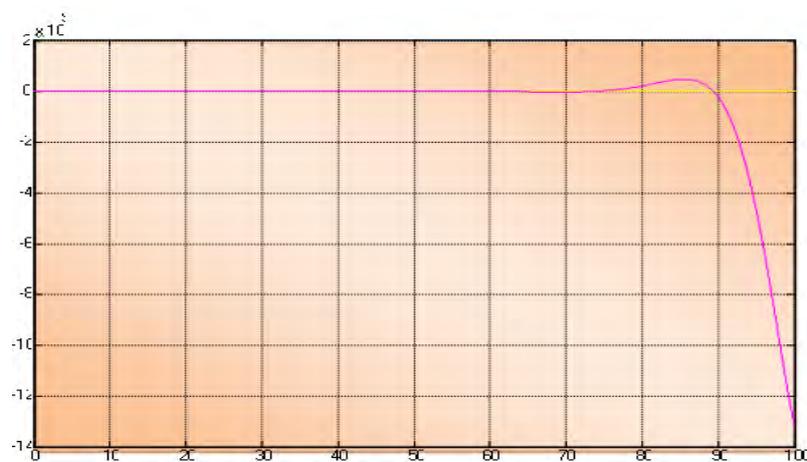
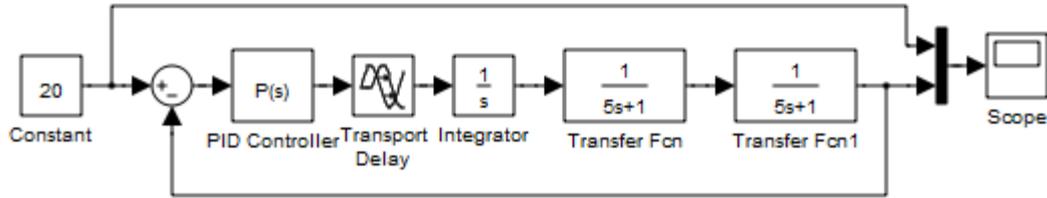


Figure IV. 33 Allure de la réponse indicielle de la température à régler.

- Fonction de transfert du 2eme ordre avec une constante de temps de 5s et un retard de 5s multipliée par un intégrateur en boucle fermée, et un régulateur P.



Gr=0.03 si on utilise l'action dérivée elle doit être trop petite

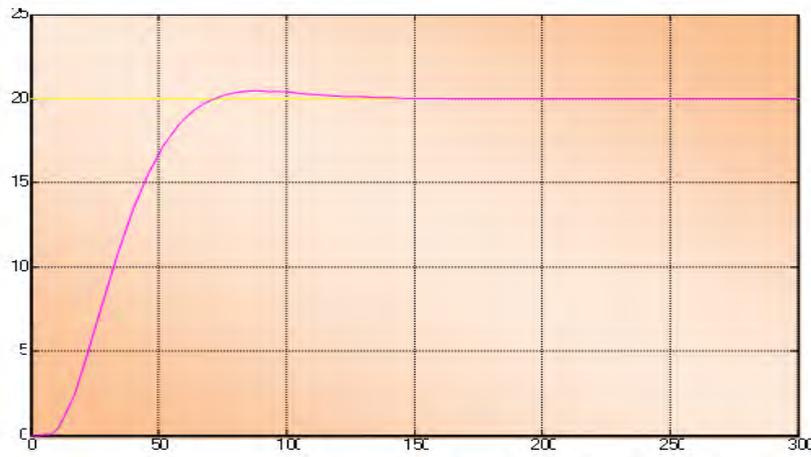
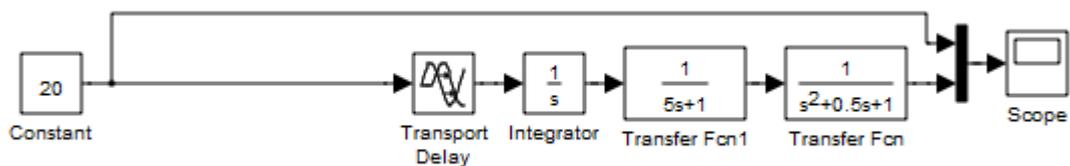


Figure IV. 34 Allure de la réponse indicielle de la température à régler.

IV.3.3 Fonction de transfert du 3eme ordre

- Fonction de transfert du 3eme ordre (une série de deux fonctions la première est une fonction du 1^{er} ordre avec un retard de 5s et une constante de temps de 5s et la deuxième est une fonction du 2eme ordre avec $h=0.25$ et $\omega_n = 1$) multipliée par un intégrateur, en boucle ouverte.



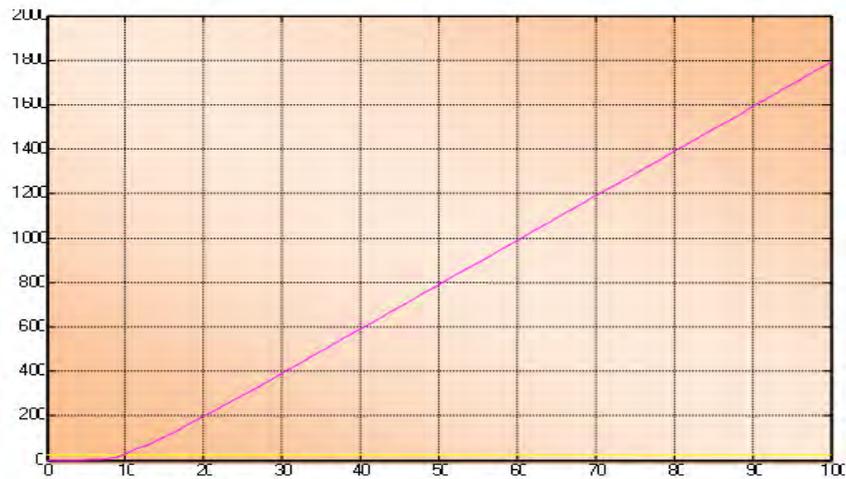


Figure IV. 35 Allure de la réponse indicielle de la température à régler.

- Fonction de transfert du 3eme ordre (une série de deux fonctions la première est une fonction du 1^{er} ordre avec un retard de 5s et une constante de temps de 5s et la deuxième est une fonction du 2eme ordre avec $h=0.25$ et $\omega_n = 1$) multipliée par un intégrateur, en boucle fermée.

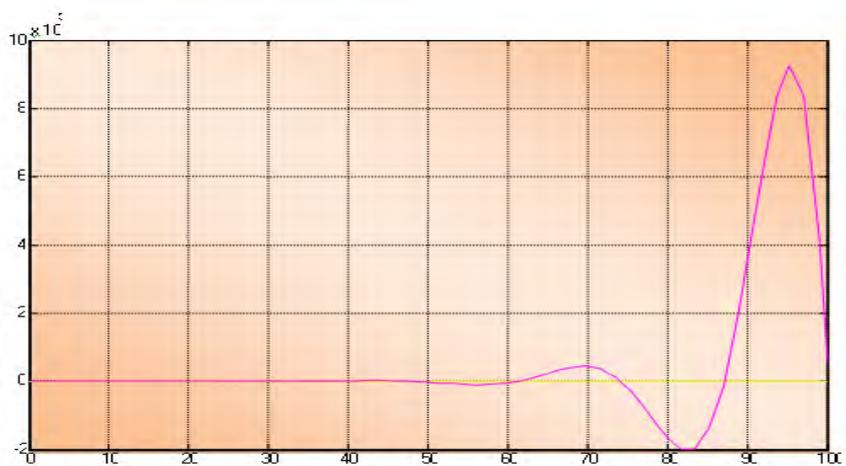
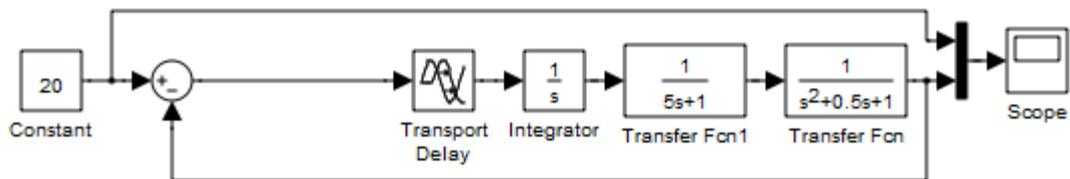


Figure IV. 36 Allure de la réponse indicielle de la température à régler.

- Fonction de transfert du 3eme ordre (une série de deux fonctions la première est une fonction du 1^{er} ordre avec un retard de 5s et une constante de temps de 5s et la deuxième est une fonction du 2eme ordre avec $h=0.25$ et $\omega_n=1$) multipliée par un intégrateur, en boucle fermée, avec un régulateur PID.

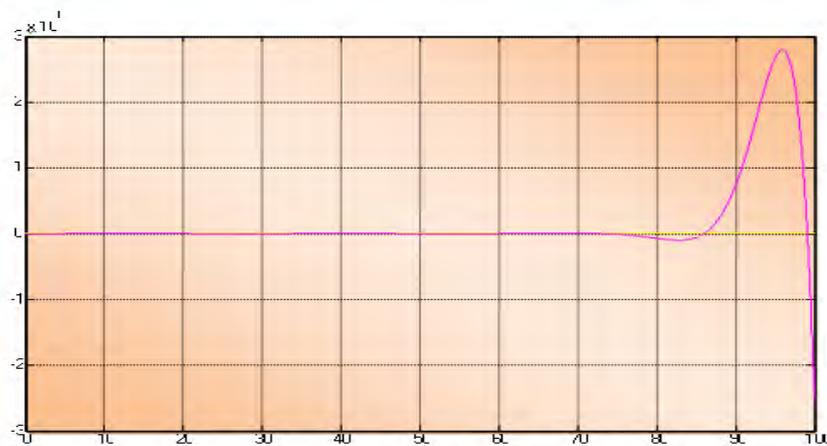
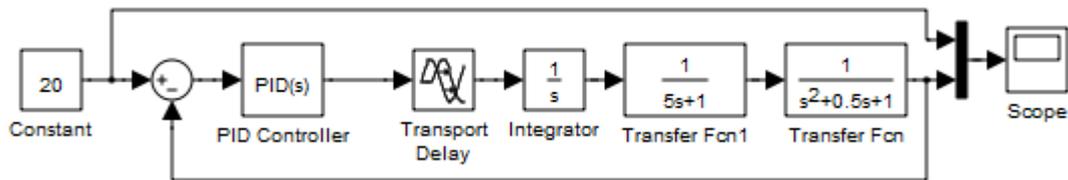
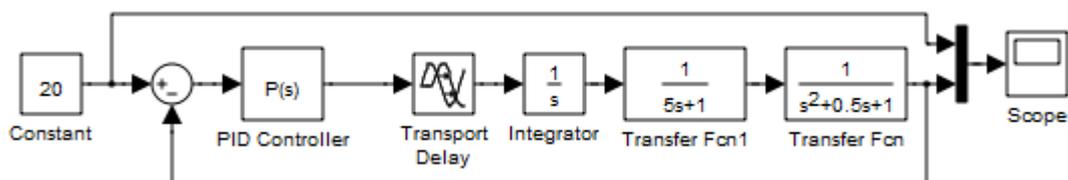


Figure IV. 37 Allure de la réponse indicielle de la température à régler.

- Fonction de transfert du 3eme ordre (une série de deux fonctions la première est une fonction du 1^{er} ordre avec un retard de 5s et une constante de temps de 5s et la deuxième est une fonction du 2eme ordre avec $h=0.25$ et $\omega_n=1$) multipliée par un intégrateur, en boucle fermée, avec un régulateur P.



$G_r=0.04$ si on utilise l'action dérivée elle doit être trop petite.

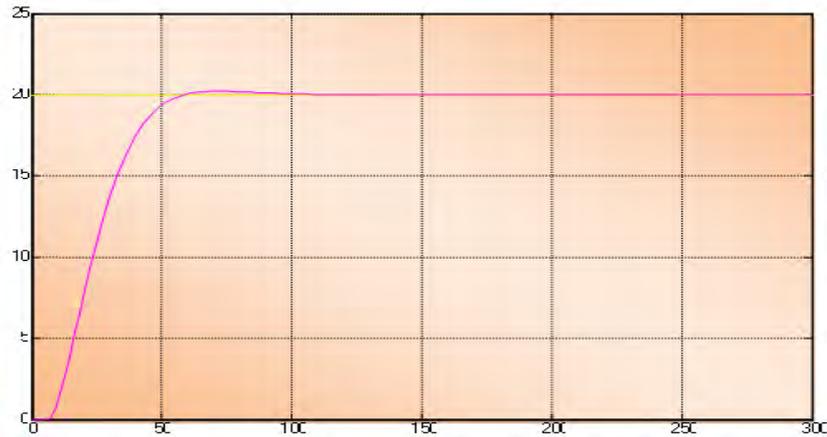


Figure IV. 38 Allure de la réponse indicielle de la température à régler.

Après avoir fait les simulations, presque pour toutes les fonctions de transferts usuelles qui caractérisent les installations du génie climatique (chauffage, climatisation) on a établi le tableau suivant qui représente les actions des différents régulateurs progressifs (P, PI, PD, PID) et leurs rôles à stabiliser ces fonctions :

Régulateur \ F(p)	P	PI série	PI parallèle	PD série	PD Parallèle	PID série	PID parallèle	PID mixte
$F(p) = \frac{K}{1 + Tp}$	Stabilité absolue	Stabilité absolue	Stabilité absolue	--	--	Stabilité limitée	Stabilité limitée	Stabilité limitée
$F(p) = \frac{K \cdot e^{-\tau \cdot p}}{1 + Tp}$	--	Stabilité limitée	Stabilité limitée	--	--	Stabilité limitée	Stabilité limitée	Stabilité limitée
$F(p) = \frac{K}{1 + \frac{2\xi}{\omega_n}p + \frac{p^2}{\omega_n^2}}$	Stabilité absolue	Stabilité limitée	Stabilité limitée	Stabilité absolue	Stabilité absolue	Stabilité limitée	Stabilité limitée	Stabilité limitée
$F(p) = \frac{K e^{-\tau p}}{1 + \frac{2\xi}{\omega_n}p + \frac{p^2}{\omega_n^2}}$	Stabilité limitée							
$F(p) = \frac{K}{(1 + Tp)^3}$	Stabilité absolue	Stabilité limitée	Stabilité limitée	Stabilité absolue	Stabilité absolue	Stabilité limitée	Stabilité limitée	Stabilité limitée
$F(p) = \frac{K \cdot e^{-\tau \cdot p}}{(1 + Tp)^3}$	Stabilité limitée							
$F(p) = \frac{K}{(1 + Tp)^n}$	Stabilité absolue	Stabilité limitée	Stabilité limitée	Stabilité absolue	Stabilité absolue	Stabilité limitée	Stabilité limitée	Stabilité limitée
$F(p) = \frac{K \cdot e^{-\tau \cdot p}}{(1 + Tp)^n}$	Stabilité limitée							
$F(p) = \frac{K}{p}$	Stabilité absolue	Stabilité limitée						

$F(p) = \frac{K \cdot e^{-\tau \cdot p}}{p}$	Stabilité limitée	--	--	Stabilité limitée				
$F(p) = \frac{K}{(1 + Tp)p}$	Stabilité absolue	--	--	Stabilité absolue	Stabilité absolue	Stabilité limitée	Stabilité limitée	Stabilité limitée
$F(p) = \frac{K \cdot e^{-\tau \cdot p}}{(1 + Tp)p}$	Stabilité limitée	--	--	Stabilité limitée	Stabilité limitée	--	--	--
$F(p) = \frac{K}{(1 + Tp)p^2}$	--	--	--	Stabilité limitée				
$F(p) = \frac{K \cdot e^{-\tau \cdot p}}{(1 + Tp)p^2}$	--	--	--	--	--	--	--	--
$F(p) = \frac{K}{p(1 + Tp)^2}$	Stabilité limitée	--	--	Stabilité limitée				
$F(p) = \frac{K \cdot e^{-\tau \cdot p}}{p(1 + Tp)^2}$	Stabilité limitée	--	--	Stabilité limitée	Stabilité limitée	--	--	--
$F(p) = \frac{K}{p(1 + Tp)^{n-1}}$	Stabilité limitée	--	--	Stabilité limitée				
$F(p) = \frac{K \cdot e^{-\tau \cdot p}}{p(1 + Tp)^{n-1}}$	Stabilité limitée	--	--	Stabilité limitée				
$F(p) = \frac{K}{(1 + Tp)^2}$	Stabilité absolue	Stabilité limitée	Stabilité limitée	Stabilité absolue	Stabilité absolue	Stabilité limitée	Stabilité limitée	Stabilité limitée
$F(p) = \frac{K \cdot e^{-\tau \cdot p}}{(1 + Tp)^2}$	Stabilité limitée							

Tableau IV.2 : Compatibilité des régulateurs dans les différents types de fonctions de transfert

IV.4 Conclusion

On a vu dans ce chapitre que la plupart des systèmes en boucle fermée ont des réponses indicielles soit instables soit un temps de réponse trop élevé. C'est pour cela que l'on utilise les régulateurs progressifs afin d'avoir des résultats meilleurs. Mais on a vu que chaque système ou chaque fonction de transfert a son propre régulateur. Ça veut dire que chaque installation de chauffage ou climatisation nécessitent un régulateur spécifique.

Dans l'exemple de chauffage ou la fonction de transfert est présentée par la formule (II.58).

Lorsqu'on a mis cette installation en boucle fermée on trouve que l'écart est de 10°C on a utilisé un gain de trois ou bien un régulateur proportionnel P, mais cette utilisation stabilise le système avec un écart de 5°C voir figure (IV.10).

Le régulateur proportionnel permet de réduire les variations de température ambiante et la bande proportionnelle peut être sélectionnée de manière à ce que l'écart de réglage permanent ne soit pas trop grand. Après l'utilisation d'un régulateur PID on trouve que le système est

mal réglé, par contre avec le régulateur PI qui a un gain de 1 et un temps d'intégral de 0.7s, le système est stable, l'erreur statique presque nul, et le temps de réponse égal à 3s, voir figure (IV.13). Donc ce type de régulateur associe l'avantage du régulateur proportionnel (stabilité) à celui du régulateur intégral (précision), la partie proportionnelle provoque une modification immédiate de la grandeur de réglage, et la partie intégrale se charge de la régulation de l'écart de réglage qui subsiste.

Les régulateurs proportionnels intégraux sont utilisés lorsque les exigences en régulation sont élevées (par exemple, pour les installations de chauffage et de la climatisation).

Avec un intégrateur, la sortie du régulateur est l'intégrale du signal d'entrée.

On voit, qu'on a ajouté un pôle au système et augmenté l'ordre du système. Ce qui veut dire que si le système est de ordre zéro, avec une erreur statique, cette erreur statique sera nulle puisque le système est maintenant de ordre un. Par contre, le régulateur intégral peut rendre un système instable, et il est rarement utilisé seul. figure (IV.14). (IV.18). (IV.23). (IV.31)

On peut réduire l'instabilité relative du régulateur intégral en combinant les deux, P et I.

Pour un régulateur dérivateur, on dérive le signal à l'entrée. Ceci veut dire que pour un changement abrupt du signal à l'entrée, le signal de contrôle peut être très élevé.

On utilise généralement le régulateur D avec d'autres composantes (PD ou PID). De façon pratique, le régulateur D peut présenter certains inconvénients,

L'utilisation des régulateurs proportionnels dérivés est surtout pour les systèmes associés d'un intégrateur, voir figures (IV.17). (IV.22). (IV.34). (IV.38).

Conclusion générale.

Notre travail a été axé sur la méthodologie permettant de paramétrer un régulateur. Par un choix des actions et de leurs paramètres, il est possible d'obtenir un comportement désiré en boucle fermée, traduisant les performances souhaitées et formulées dans un cahier des charges.

De manière qualitative, les critères à satisfaire sont les suivants :

- Les effets de perturbations doivent être minimisés ou encore mieux, ils doivent être effacés complètement et ce le plus rapidement possible.
- Les changements de consigne doivent être suivis rapidement et avec une bonne précision.

De manière quantitative, il s'agit de proposer les actions (P, I, D) du régulateur et de fixer les valeurs à donner aux paramètres (Gr, T_i , T_d) répondant le mieux possible aux spécifications d'un cahier des charges.

Le problème du choix et de la détermination des régulateurs est connu par la synthèse des systèmes bouclés. Les méthodes de synthèse sont très nombreuses et une classification rigoureuse n'est pas une tâche facile. Néanmoins, dans le cadre de ce travail on a fait ressortir deux types de méthodes :

- Les méthodes dites empiriques ne nécessitant pas une connaissance parfaite du modèle du procédé à commander. Les paramètres du régulateur seront calculés à partir des observations expérimentales sur le procédé (Relevé de la réponse indicielle). L'intérêt majeur de ces méthodes réside dans leur simplicité. Elles sont largement utilisées dans le domaine industriel et plus particulièrement en Génie Climatique. Elles sont dans la plus part des cas suffisantes mais ne permettent pas un réglage fin.
- Les méthodes basées sur la connaissance du modèle du système sous forme de fonction de transfert. Les actions du régulateur seront calculées de façon à obtenir la fonction de transfert souhaitée en boucle ouverte ou en boucle fermée.

Les méthodes empiriques de ZIEGLER & NICHOLS sont basées sur deux approches expérimentales destinées à fixer rapidement les paramètres des régulateurs progressifs. La première nécessite l'enregistrement de la réponse indicielle du système à régler, alors que la deuxième exige d'amener le système en boucle fermée à sa limite de stabilité. Des simulations ont été réalisées avec les deux méthodes sur plusieurs situations et qui ont donné des résultats satisfaisants.

Tenant compte des différents essais effectués dans notre travail de recherche, nous pouvons résumer l'influence d'un régulateur PID sur le système qu'il corrige si l'on augmente séparément l'action (P), l'action intégrale (I) et l'action dérivée (D) :

- ✓ Lorsque l'on augmente l'action proportionnelle avec son gain G_r , le temps de montée est plus court mais il y a un dépassement plus important. Le temps d'établissement varie peu et l'erreur statique se trouve améliorée.
- ✓ Lorsque le temps d'intégration T_i augmente, le temps de montée est plus court mais il y a un dépassement plus important. Le temps d'établissement au régime stationnaire s'allonge mais dans ce cas on assure une erreur statique nulle. Donc plus ce paramètre est élevé plus la réponse du système est ralentie.
- ✓ Lorsque le temps de dérivation T_d , paramètre qui caractérisera l'action dérivée, augmente, le temps de montée change peu mais le dépassement diminue. Le temps d'établissement au régime stationnaire est meilleur. On n'a pas d'influence sur l'erreur statique. Si ce paramètre est trop élevé dans un premier temps il stabilise le système en le ralentissant trop mais dans un deuxième temps le régulateur anticipe trop et un système à temps mort élevé devient rapidement instable.

Pour ces trois paramètres, le réglage au-delà d'un seuil trop élevé a pour effet d'engendrer une oscillation du système de plus en plus importante menant à l'instabilité.

En conclusion générale sur les méthodes pratiques qui ont été présentées dans ce travail, on peut souligner que leur grand avantage réside dans le fait qu'elles sont simples à mettre en œuvre et qu'elles ne nécessitent pas une connaissance parfaite du modèle du procédé à commander. On apprécie forcément ce point quand on connaît la difficulté de disposer d'un modèle précis. Les performances auxquelles elles conduisent peuvent être suffisantes au regard d'un cahier des charges même exigeant. Il appartient au régulateur de la boucle d'intervenir dans le bon sens sur les réglages recommandés de manière à améliorer les performances de celle-ci.

Afin de développer ce travail et de le perfectionner encore d'avantage nous proposons les perspectives suivantes

- ✓ Développer ces méthodes de réglage des paramètres du régulateur PID sur des installations réelles (Chauffage et Climatisation) afin de confirmer le réglage optimal.
- ✓ En collaboration avec les spécialistes du contrôle faire des comparaisons avec les techniques de régulation avancée (Adaptative, Flou et prédictive).

- ✓ Retrouver avec des essais pratiques les paramètres de réglage des régulateurs progressifs recommandés par ZIEGLER & NICHOLS (Boucle ouverte et Boucle fermée) .

Annexe 1 : Transformation de Laplace

A1.1 Définition

La transformée de Laplace associée à un signal $x(t)$ est une fonction $X(p)$ définie par :

$$X(p) = \int_0^{\infty} x(t)e^{-pt} dt$$

La variable p est un nombre complexe appelé variable de Laplace. $X(p)$ est appelée transformée de Laplace de $x(t)$.

On note aussi : $X(p) = \mathcal{L}[x(t)]$

A1.2 Propriétés

A1.2.1 Théorème N° 1 : transformation d'une dérivée

Toute multiplication par p équivaut dans le domaine temporel à une dérivée en fonction du temps.

$$\mathcal{L}\left[\frac{dx(t)}{dt}\right] = p \cdot X(p) - x(0)$$

Remarque : L'expression mathématique de ce théorème est en fait :

$$\mathcal{L}\left[\frac{dx(t)}{dt}\right] = p \cdot X(p) - x(0), \text{ mais } x(0)=0 \text{ en régulation}$$

A1.2.2 Théorème no 2 : transformation d'une primitive

Toute division par p se traduit dans le domaine temporel par une intégration en fonction du temps.

$$\mathcal{L}\left[\int x(t) \cdot dt\right] = \frac{X(p)}{p}$$

A1.2.3 Théorème no 3 : Théorème de la valeur finale

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot X(p)$$

A1.2.4 Théorème no 4 : Linéarité

D'autre part, la transformée de Laplace est une transformation linéaire : Soit λ et μ deux constantes réelles :

$$\mathcal{L}[\lambda \cdot x(t) + \mu \cdot y(t)] = \lambda \cdot X(p) + \mu \cdot Y(p)$$

A1.2.5 Théorème no 5 : Retard

Transformée de Laplace d'une fonction retardée d'un retard T :

$$\mathcal{L}[x(t - T)] = X(p) \cdot e^{-T \cdot p}$$

A1.3 Transformées de Laplace des principaux signaux utilisés en régulation

Ce tableau e document donne les transformées de Laplace couramment utilisées en régulation.

x(t)	X(p)
Impulsion A.u(t)	1
Echelon A.u(t)	$\frac{A}{p}$
At.u(t)	$\frac{a}{p^2}$
$e^{-at}.u(t)$ avec $a \geq 0$	$\frac{1}{p+a}$
$t.e^{-at}.u(t)$ avec $a \geq 0$	$\frac{1}{(p+a)^2}$
$\sin(\omega t).u(t)$	$\frac{\omega}{p^2 + \omega^2}$
$\cos(\omega t).u(t)$	$\frac{p}{p^2 + \omega^2}$
$e^{-at} \sin(\omega t).u(t)$ avec $a \geq 0$	$\frac{\omega}{(p+a)^2 + \omega^2}$
$e^{-at} \cos(\omega t).u(t)$ avec $a \geq 0$	$\frac{p+a}{(p+a)^2 + \omega^2}$

Transformées de Laplace des fonctions usuelles

Transformation de Laplace inverse avec $q = \sqrt{\frac{p}{a}}$

$\theta(p) = L\{T(t)\}$	T(t)
$\frac{1}{p}$	1
1	$\delta(t)$ Dirac
$\frac{1}{p+\beta}$	$e^{-\beta t}$
$\frac{\omega}{p^2 + \omega^2}$	$\sin(\omega t)$
$\frac{p}{p^2 + \omega^2}$	$\cos(\omega t)$
$\frac{b}{p(b + \sqrt{p})}$	$1 - \exp(b^2 t) \operatorname{erfc}(b\sqrt{t})$

$\theta(p) = L\{T(t)\}$	T(t)
$\frac{\ln(p)}{p}$	$-\ln(t) - \gamma$: $\gamma = 0,57721$
$\frac{1}{\sqrt{p}}$	$\frac{1}{\sqrt{\pi t}}$
$\frac{1}{p\sqrt{p}}$	$\frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{t}$
$\frac{\omega}{p^2 - \omega^2}$	$\operatorname{sh}(\omega t)$
$\frac{p}{p^2 - \omega^2}$	$\operatorname{ch}(\omega t)$
$\frac{1}{p^n}$ n = 1, 2, 3...	$\frac{t^{n-1}}{(n-1)!}$

Annexe 2 : Le logiciel SimTrain

Des rappels sont proposés sur des notions illustrées dans les différentes simulations du logiciel SimTrain. Néanmoins, ces rappels sont succincts et il est conseillé aux utilisateurs d'approfondir leurs connaissances des domaines suivants :

- les principes de la régulation, en particulier la régulation en boucle fermée, les modes de réglage, le régulateur proportionnel intégral (PI),
- l'action chrono-proportionnelle.
- le paramétrage des régulateurs PI.
- le bien-être ou confort thermique.
- les comportements statique et dynamiques d'un bâtiment chauffé, les déperditions, les phénomènes d'inertie.
- les principes de la programmation de l'intermittence de chauffage, par une horloge, par un calcul des durées de relance, les gains par l'intermittence du chauffage.
- les modes d'occupation et les régimes de chauffage.

A2.1 Principes de la régulation

Le réglage se fait en enclenchant ou en déclenchant l'alimentation électrique de la résistance de chauffage. La commande de la puissance du chauffage électrique est par principe "tout ou rien".

L'organe de réglage est un interrupteur statique (triac) qui peut supporter un très grand nombre d'enclenchements et que l'on peut commander à des cadences très rapides (cycles marche-arrêt de durée très courte τ).

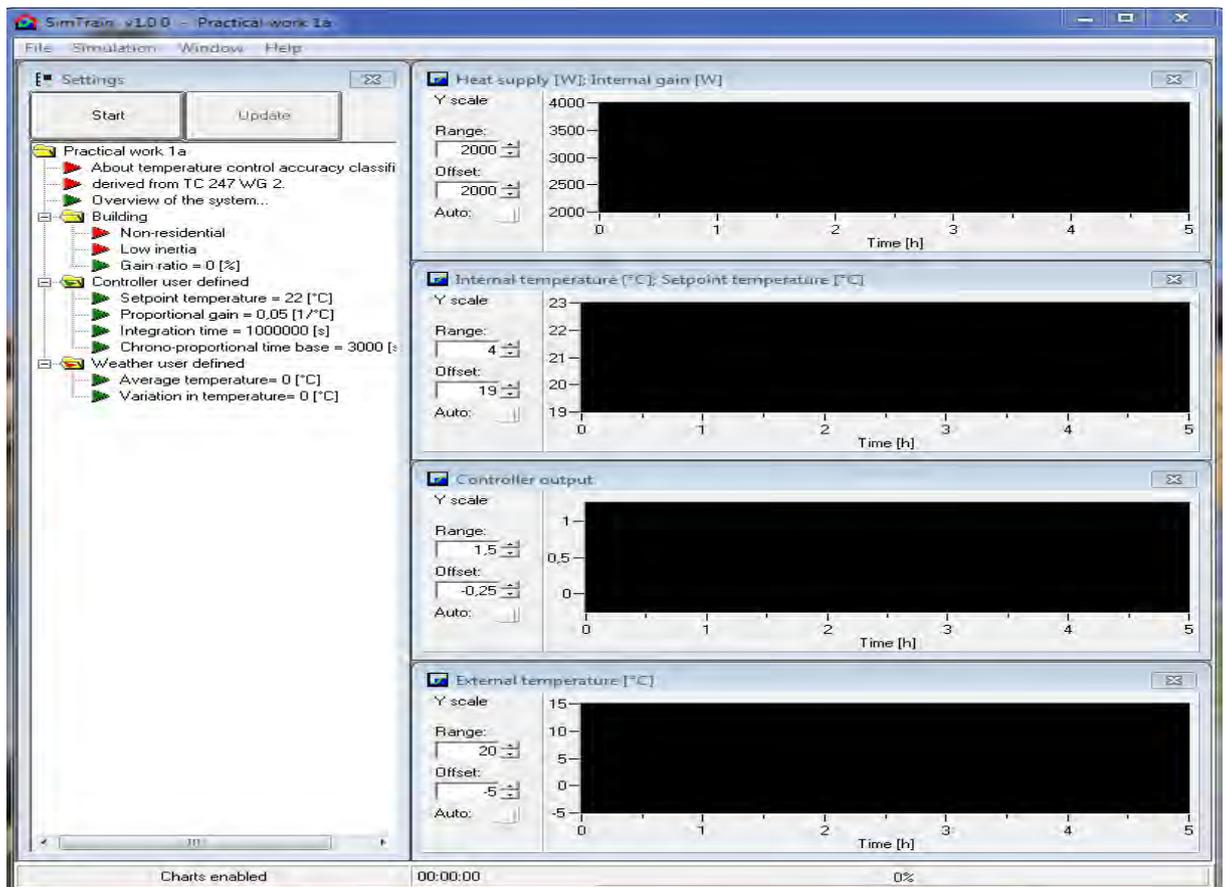
La durée d'enclenchement t_e au sein d'un cycle, ou durée de temps de marche, est modifiée proportionnellement à l'écart entre la température mesurée et la consigne.

On obtient ainsi un réglage progressif, ou tout ou rien.

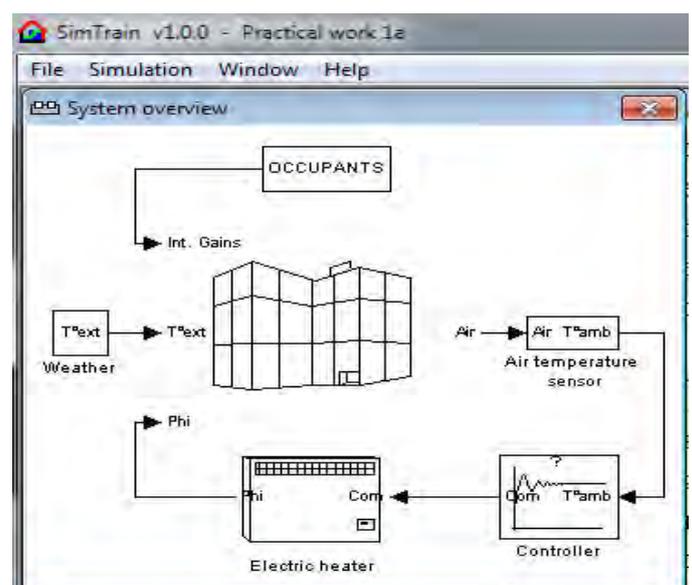
A2.2 L'utilisation de logiciel SimTrain

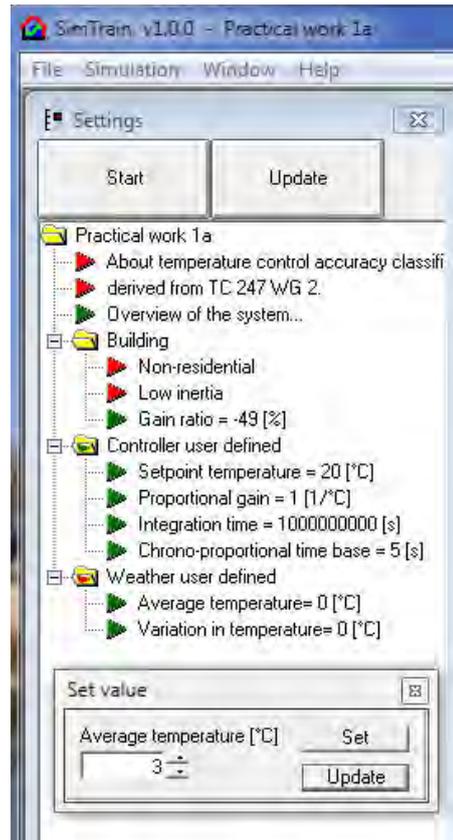
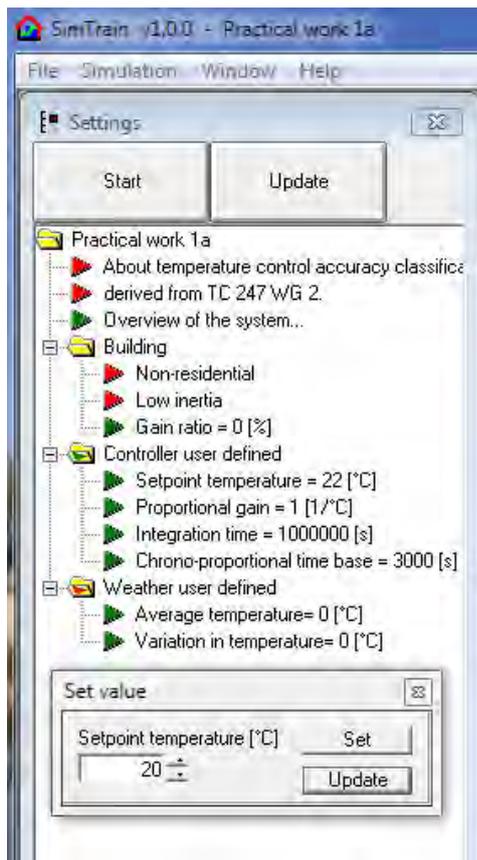
1- en utilisant le logiciel SIMTRAIN

On suppose que la température extérieure est de $3\text{ }^{\circ}\text{C}$, et le ventilo-convecteur travaille avec un régime de 51 % de sa puissance.

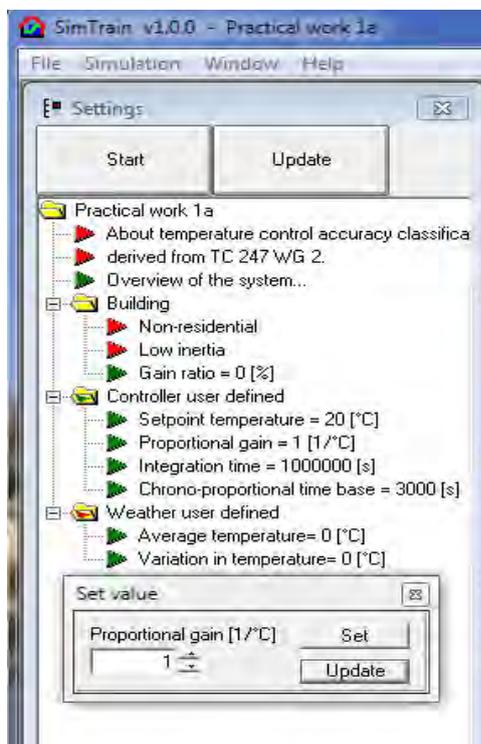


- 2- On choisit le travail pratique 1a par un clic sur la touche simulation
- 3- Pour vérifier si l'installation est du chauffage on clic sur la flèche verte « overview of the système »
- 4- Le réglage de la température désirée est de 20°C



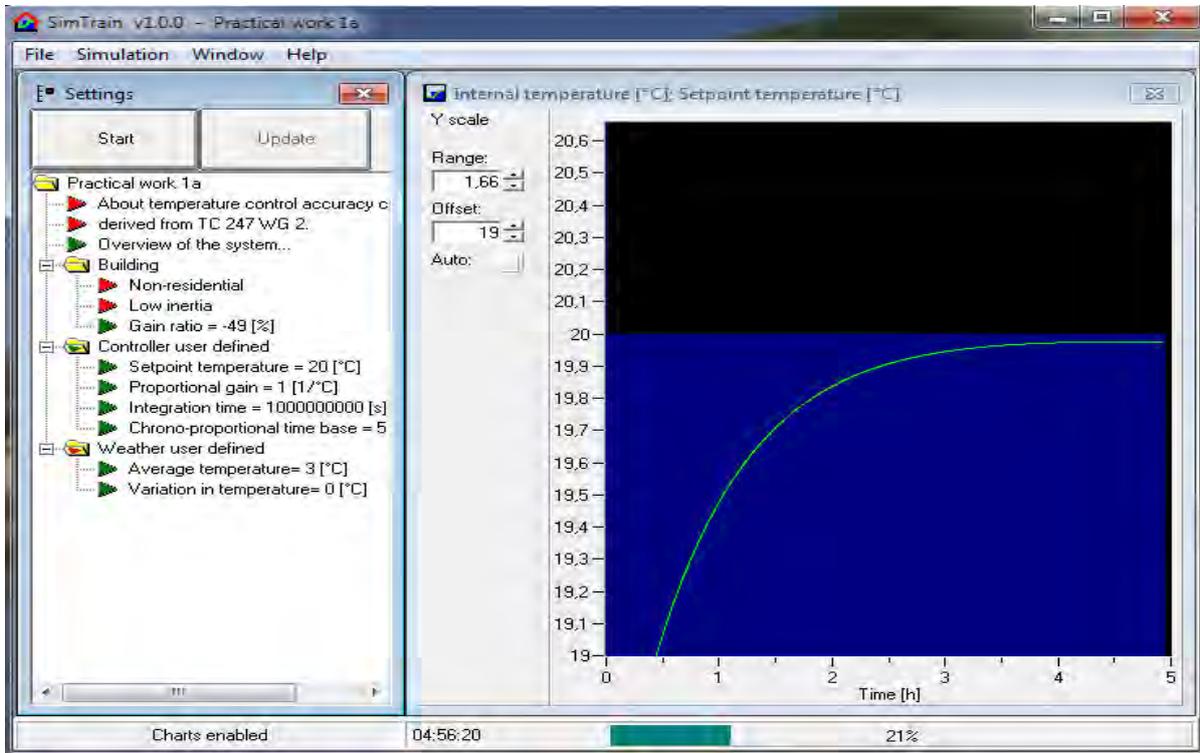


- 1- Pour annuler l'action PI on met une valeur de 1 pour le gain proportionnelle et une valeur très grande pour le temps d'intégration $T_i=10^9$ s



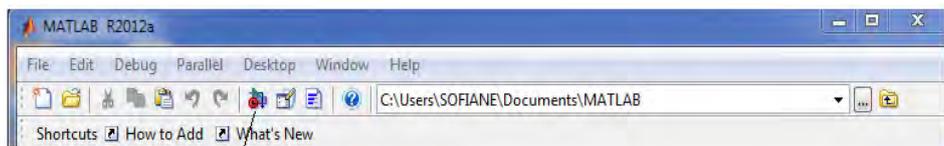
En suppose que le ventilo-convecteur travail à 51% de sa puissance.

On va faire la simulation avec ces valeurs on obtient le graphe de la réponse indicielle suivant :

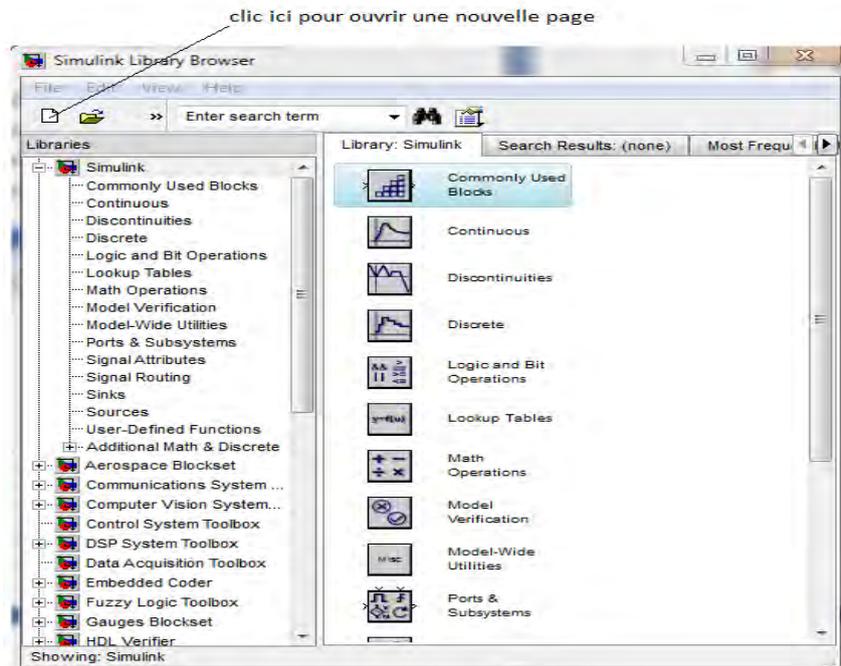


Annexe 3 : Matlab et Simulink

Pour démarrer Simulink à partir de Matlab, il suffit de taper la commande "Simulink". Deux nouvelles fenêtres (la fenêtre des bibliothèques disponibles Simulink et une fenêtre de modèle Simulink vierge) apparaîtront



clic 1 fois pour ouvrir la page de simulink



clic ici pour ouvrir une nouvelle page

A3.1 Construction d'un diagramme SIMULINK

Les étapes de base sont les suivantes

- pour commencer, dans le menu File, sélectionner New Model (pour la version 2012 a sur Windows,

Cliquer sur l'icône « feuille blanche ») : une fenêtre de travail Untitled s'ouvrira ;

- choisir les blocs dont on a besoin pour construire le diagramme dans les collections de la bibliothèque, et les faire glisser un par un dans la fenêtre de travail,

- faire des liaisons entre les blocs à l'aide de la souris ;

- cliquer sur les blocs dont on veut changer les paramètres : une fenêtre de dialogue s'ouvrira pour permettre cette opération ;

- sauvegarder le schéma ainsi obtenu dans un fichier *.mdl.

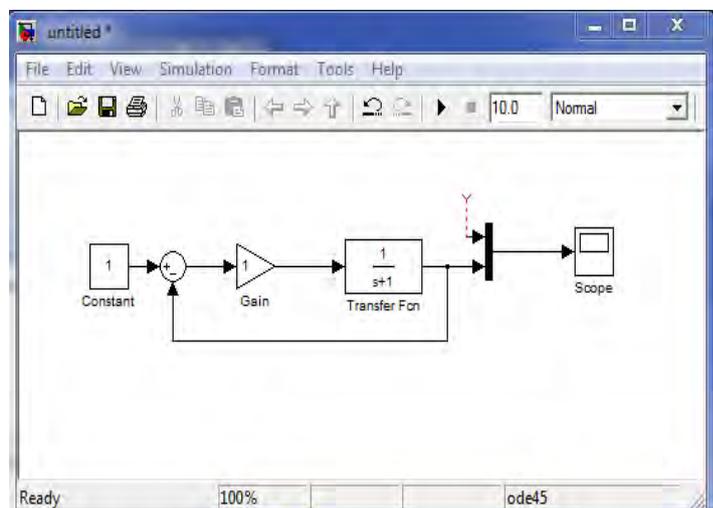
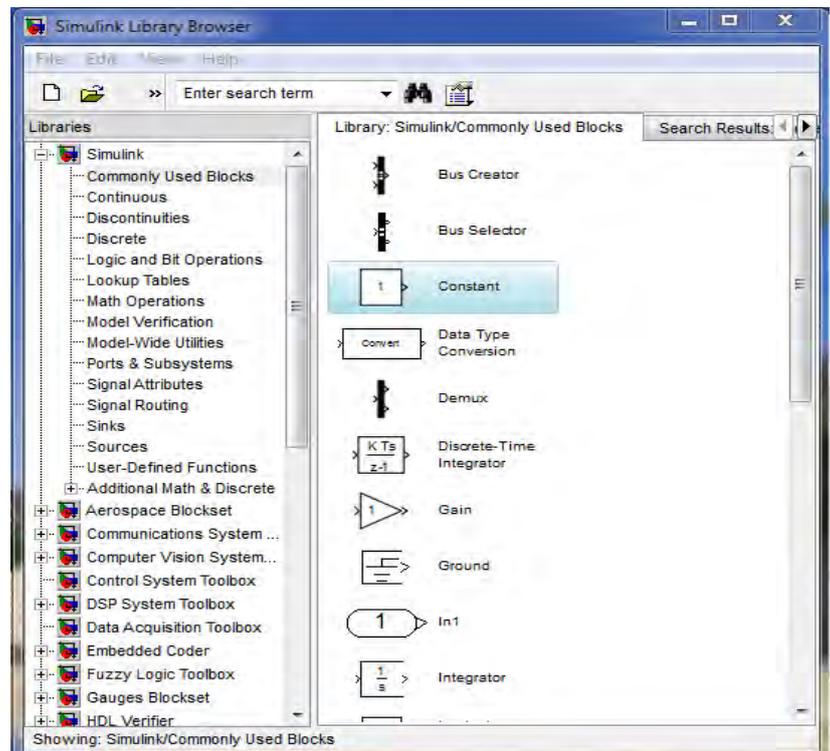
A3.2 Un exemple très simple

D'habitude, on commence par mettre ensemble des sous-systèmes plus simples.

Ces sous systèmes doivent avoir des portes

d'entrée (bloc In) et de sortie (bloc Out), pour relier les sous-systèmes au schéma principal.

On crée des sous-systèmes par l'entrée Createsubsystem du menu Edit, après avoir cadré les blocs qu'on veut regrouper à l'aide de la souris. Une deuxième façon consiste à copier un groupe de blocs à l'intérieur d'un bloc Subsystem dans la fenêtre du schéma principal.



Dans le schéma principal, il faut se poser la question de comment gérer le passage des données de et vers l'espace de travail. Plusieurs solutions s'offrent : on peut utiliser des blocs des collections Sourceset Sinks ou bien encore des portes d'entrée-sortie.

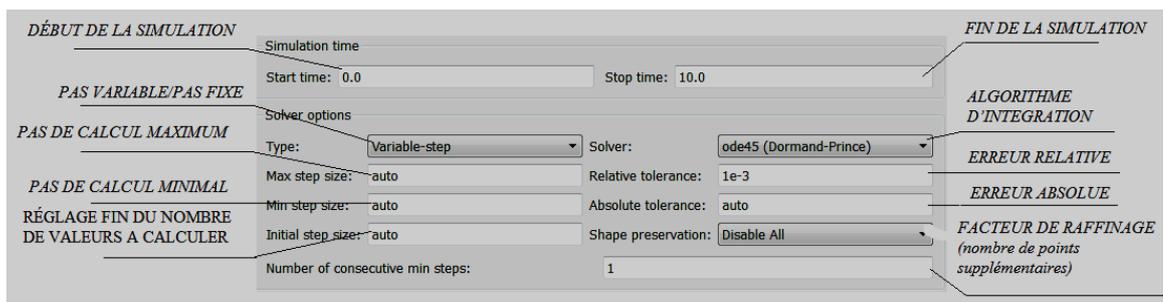
Simulation d'un diagramme SIMULINK

Une fois le modèle composé, il faut ajuster les paramètres de la simulation dans le menu Simulation

A3.3 Paramètres.

A3.3.1 Paramètres du solveur

Pour faire des premiers essais on peut se contenter des paramètres proposés par défaut, en choisissant juste la durée désirée de la simulation. Cependant, ce menu a une influence énorme sur la qualité de la simulation pour des systèmes à peine compliqués et il faut apprendre à bien s'en servir.



Bibliographie

- [1] Ginestet S., Simulation dynamique des systèmes de climatisation, application aux régulations innovantes des CTA, Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2005
- [2] Morisot O., C. Laruelle, S. Markovic, D. Marchio, et S. Ginestet, Garantie et maintien des performances : Implantation et test de méthodes de retro & ongoing commissioning, mode de valorisation des prestations de garantie des performances énergétiques, rapport final août 2004
- [3] Ouderni M., Modélisation et simulation des régulations dans les codes de calcul thermique du bâtiment, Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 1990
- [4] Salvatore Morreale Technique de chauffage Structure et fonctions d'installations d'HVAC Technique de régulation Technologie informatique
- [5] M. Kamoun, 'Identification et Commande des Systèmes Linéaires Discrets: Approche Globale et par Décomposition', Thèse de doctorat, ENSET, Tunis.
- [6] Bouteraa, M. Ouali1 et N. Kechaou: Développement d'un système de commande et de régulation de la température de l'air d'une soufflerie de séchage convectif Revue des Energies Renouvelables SMSTS'08 Alger (2008) 67 – 77
- [7] V. RICHALET : Caractérisation énergétique des bâtiments sur site. Identification de modèles dynamiques. Méthodes de signature Energétique. Thèse de doctorat, INPG, 1991.
- [8] J.J. ROUX : Proposition de modèles simplifiés pour l'étude du comportement thermique des bâtiments. Thèse de doctorat, INSA Lyon, 1984.
- [9] D. PETIT : Réduction de modèles de connaissance et identification de modèles d'ordre réduit. Thèse de doctorat, Université de Provence (Aix-Marseille I), 1991.
- [10] C. MENEZO : Contribution à la modélisation du comportement thermique des bâtiments par couplage de modèles réduits. Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 1999.
- [11] L. LARET : Contribution au développement de modèles mathématiques du comportement thermique transitoire des structures d'habitation. Thèse de doctorat, Université de LIEGE, 1980.
- [12] I. D. LANDAU, A. BESANÇON-VODA : Identification des systèmes. Hermes Science,2001.

- [13] A. A. El AZHER : Identification des systèmes à deux échelles de temps et application au chauffage optimal des bâtiments. Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 1992.
- [14] C. ZAYANE : Identification d'un modèle de comportement thermique de bâtiment à partir de sa courbe de charge thèse doctorat l'École nationale supérieure des mines de Paris 2011
- [15] Mohamed bouacida : Identification des procédés industriels contacte
- [16] Cours_05 SYS823_E2011
- [17] Gabriel Cormier chapitre 7. Contrôleurs GELE5313
- [18] HEBP – 2EMS – Automatismes – Edition 2008-2009 – Chapitre 22
- [19] DGO4 · Architecture et Climat - Avertissements et copyrights

Les sites web

www.specialautom.net

www.auto_cira.net

<http://theses.insa-lyon.fr>

La page web HVAC