Haute Ecole d'Ingénieurs et de Gestion
du canton de Vaud (HEIG-*Vd*)

Département d'électricité et
d'informatique

Filière Génie Electrique

Département des systèmes industriels et
des microtechniques

Filière Microtechnique

REGULATION AUTOMATIQUE (REG)





Michel ETIQUE, mars 2005, Yverdon-les-Bains

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

Table des matières

1 Introduction à la régulation automatique **11**
1.1 Régulation automatique : tentative de définition 11
1.2 Exemples introductifs 12
1.2.1 Régulation automatique de température 13
1.2.2 Régulation automatique de la vitesse d'un moteur DC à excitation séparée constante 18
1.3 Eléments et signaux caractéristiques d'un système de régulation automatique 24
1.3.1 Blocs fonctionnels et sous-systèmes 24
1.3.2 Signaux 25
1.4 Régulation de correspondance et régulation de maintien 29
1.5 Problèmes fondamentaux des systèmes de régulation automatique 30
1.5.1 Stabilité 30
1.5.2 Précision et rapidité 32
1.5.3 Dilemme stabilité-précision 33
1.6 Principe de la régulation numérique 40
1.7 Généralités sur les systèmes 41
1.7.1 Comportement dynamique 42
1.7.2 Comportement statique 43
1.7.3 Système statique 43
1.7.4 Système dynamique 43
1.7.5 Système linéaire 45
1.8 Autres exemples de systèmes asservis 47
1.9 Le projet d'automatique 53
1.10 L'automatique : un domaine important pour tous les domaines de la technique et plus encore 55

2 Modélisation, représentation et simulation des systèmes dynamiques linéaires **57**
2.1 Introduction 57
2.2 Exemples de réponses indicielles typiques 59
2.2.1 Systèmes à retard pur 59
2.2.2 Systèmes à modes apériodiques 60

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

2.2.3 Systèmes à modes oscillatoires et systèmes à déphasage non-minimal . . . 62
2.2.4 Systèmes à comportement intégrateur et dérivateur . . . 64
2.3 Modélisation de connaissance/représentation des systèmes par leurs équations différentielles . . . 67
2.3.1 Exemple : Circuit RLC série . . . 67
2.3.2 Exemple : Filtre passe-bas RC d'ordre 1 . . . 69
2.3.3 Analogies des systèmes électriques et mécaniques . . . 71
2.3.4 Exemple : Moteur DC à excitation séparée constante . . . 77
2.3.5 Généralisation . . . 80
2.4 Représentation par la réponse impulsionnelle . . . 81
2.5 Représentation par la fonction de transfert . . . 81
2.5.1 Définition . . . 81
2.5.2 Forme de $G(s)$ . . . 82
2.5.3 Pôles et zéros, ordre et degré relatif . . . 83
2.5.4 Exemple moteur DC . . . 83
2.5.5 Exemple Intégrateur . . . 84
2.5.6 Configuration pôles-zéros . . . 85
2.5.7 Type α d'un système . . . 86
2.5.8 Présentation des fonctions de transfert . . . 87
2.6 Systèmes fondamentaux . . . 90
2.6.1 Système fondamental d'ordre 1 . . . 90
2.6.2 Système fondamental d'ordre 2 . . . 93
2.A Annexe : Représentation d'un système dynamique linéaire par son modèle d'état. . . . 101
2.A.1 Exemple introductif : circuit RLC série . . . 101
2.A.2 Définition . . . 105
2.A.3 Forme matricielle . . . 108
2.A.4 Schéma fonctionnel . . . 110
2.A.5 Calcul de la fonction de transfert à partir du modèle d'état 111
2.A.6 Application : linéarisation autour d'un point de fonctionnement ([[1], chap.11], [[7], §3.6]) . . . 117

3 Schémas fonctionnels 123
3.1 Introduction . . . 123
3.2 Systèmes en cascade . . . 124
3.3 Systèmes en parallèle . . . 125
3.4 Systèmes en contre-réaction/réaction . . . 126
3.5 Exemple . . . 130
3.6 Exemple : moteur DC . . . 133
3.6.1 Schéma technologique, mise en équations, modèles en t et en s . . . 133
3.6.2 Schéma fonctionnel détaillé . . . 133

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

3.6.3 Réduction du schéma fonctionnel détaillé 134

4 Régulateur PID **137**
4.1 Fonctions de transfert d'un système asservi 137
4.1.1 Fonction de transfert du système à régler $G_a(s)$ 138
4.1.2 Fonction de transfert en boucle ouverte $G_o(s)$ 138
4.1.3 Fonction de transfert en boucle fermée, régulation de correspondance $G_w(s)$ 139
4.1.4 Fonction de transfert en régulation de maintien $G_v(s)$ . . . 140
4.2 Réponse du système asservi travaillant dans les deux modes de régulation 141
4.3 Régulateur PID analogique 142
4.3.1 Introduction 142
4.3.2 Régulateurs non-linéaires 144
4.3.3 Régulateur à action proportionnelle (P) 146
4.3.4 Régulateur à action intégrale (I) 150
4.3.5 Régulateur à action proportionnelle (P) et dérivée (D) . . 161
4.3.6 Régulateur industriel PID 172
4.3.7 "Hit parade" des régulateurs classiques 175
4.4 Méthodes empiriques de synthèse (selon [1]) 176
4.4.1 Méthode de Ziegler-Nichols en boucle ouverte (première méthode de Ziegler-Nichols) 176
4.4.2 Méthode de Ziegler-Nichols en boucle fermée (seconde méthode de Ziegler-Nichols) 177
4.4.3 Auto-ajustement d'un régulateur PID 178

5 Performances des systèmes asservis **183**
5.1 Introduction 183
5.2 Stabilité 183
5.2.1 Définition 183
5.2.2 Etude de la stabilité par la réponse impulsionnelle 184
5.2.3 Condition fondamentale de stabilité 190
5.3 Précision en régime permanent 191
5.3.1 Forme des fonctions de transfert 192
5.3.2 Calcul de l'erreur 192
5.3.3 Cas particulier : erreur statique E_∞ 193
5.3.4 Généralisation : erreurs d'ordre supérieur 194
5.4 Rapidité des systèmes de régulation automatique 197
5.4.1 Cas particulier où $G_w(s)$ est d'ordre 1 fondamental 198
5.4.2 Cas particulier où $G_w(s)$ est d'ordre 2 fondamental 199
5.4.3 Systèmes à temps mort (retard pur) 200
5.5 Qualité 201
5.6 Pôles dominants 202

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

5.6.1 Pôles dominants des systèmes asservis 203

6 Analyse fréquentielle 207
6.1 Introduction 207
6.2 Analyse fréquentielle de systèmes dynamiques, réponse harmonique 207
6.2.1 Calcul de la réponse harmonique 207
6.2.2 Représentation graphique de la réponse harmonique $G(j \cdot \omega)$: lieu de Nyquist 210
6.2.3 Représentation graphique de la réponse harmonique $G(j \cdot \omega)$: diagramme de Bode 212
6.3 Esquisse du diagramme de Bode en boucle fermée, régulation de correspondance 217
6.4 Bande passante en boucle fermée 219
6.5 Allure typique du diagramme de Bode en boucle ouverte 220
6.6 Valeur approximative de la durée de réglage T_{reg} 221
6.7 Systèmes à retard pur 223
6.7.1 Exemple 225
6.8 Etude de la stabilité par la réponse harmonique : critère de Nyquist 227
6.8.1 Critère de Nyquist généralisé 227
6.8.2 Critère de Nyquist simplifié (critère du revers) 234
6.8.3 Quantification du degré de stabilité : distance critique $d_{\min}$, marge de phase φ_m et marge de gain A_m 236
6.9 Méthode de Bode 244
6.9.1 Marche à suivre 244
6.10 Stabilité robuste [7] 246
6.10.1 Incertitude sur la fonction de transfert du système à régler [[7], p.46-47] 247
6.10.2 Théorème de la stabilité robuste [[7], p.53] 249
6.10.3 Exemple 254

7 Synthèse fréquentielle 257
7.1 Introduction 257
7.2 Procédure d'ajustage d'un régulateur PI 258
7.3 Procédure d'ajustage d'un régulateur PD 259
7.4 Procédure d'ajustage d'un régulateur PID 260
7.4.1 Exemple 261

8 Analyse dans le plan complexe 265
8.1 Introduction 265
8.2 Fonctions de transfert 266
8.3 Définition du lieu d'Evans 267
8.4 Exemple 268
8.5 Condition des angles et condition des modules 270

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

8.5.1 Condition des angles 271
8.5.2 Condition des modules 271
8.6 Tracé du lieu d'Evans 272
8.6.1 Exemple 273
8.7 Valeurs particulières du gain k_o 276
8.7.1 Exemple 277
8.8 Marges de stabilité absolue et relative 278
8.A Généralisation du lieu des pôles 280

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

Fiches de cours

eivd Ecole d'ingénieurs du Canton de Vaud	***Régulation automatique***	Département:	***Electricité***
		Filière:	***Electronique***
		Orientation:	***Systèmes automatisés***

Semestre:	1	2	3	4	5	6	Total heures	*Contrôle des connaissances*		
								Contrôle continu	*Propédeutique*	*Final*
	☐	☐	☐	☐	4	☐	72	X	I☐ II☐	☐

OBJECTIFS

a) Maîtriser les méthodes d'analyse des systèmes dynamiques linéaires et les appliquer aux processus industriels.
b) Pouvoir comprendre les problèmes spécifiques d'un système de régulation automatique.
c) Pouvoir formuler le cahier des charges d'un système de régulation automatique.
d) Etre apte à faire la synthèse de régulateurs classiques sur la base de spécifications de performances.

CONTENU (avec dotation approximative en %)

Introduction **10%**

- Exemples d'applications industrielles, définitions générales, régulateurs tout-ou-rien et proportionnel, notion de statisme et de stabilité, linéarité, régulation de correspondance et de maintien, principe de la régulation numérique.

Modélisation et simulation **20%**

- Fonction de transfert, modèle d'état. Systèmes fondamentaux. Schéma fonctionnel. Simulation à l'aide du logiciel MATLAB.

Caractéristiques et performances des systèmes asservis **20%**

- Fonctions de transfert en boucle ouverte et en boucle fermée. Régulateur PID. Méthode de Ziegler-Nichols. Stabilité, rapidité, précision. Condition fondamentale de stabilité. Précision en régime permanent.

Analyse et synthèse fréquentielles **30%**

- Réponse harmonique, lieux de Nyquist et de Bode. Critère de Nyquist. Lieux de Bode en boucle fermée.
- Synthèse de régulateurs P, PI, PD et PID. Méthode de Bode. Compensation pôle-zéro. Régulateurs robustes.

Analyse dans le plan complexe **10%**

- Lieu d'Evans, marges de stabilité. Courbes équi-amortissement.

Analyse des systèmes non-linéaires **10%**

- Non-linéarités essentielles et accidentelles. Méthodes du premier harmonique et du plan de phase

FORME DE L'ENSEIGNEMENT: Cours en classe, exercices en classe et au laboratoire.

LIAISON AVEC D'AUTRES COURS:

***Préalable requis*:** Mathématique, mécanique rationnelle, physique, machines électriques, électronique, électrotechnique, programmation, traitement de signal.

***Préparation pour*:** Régulation numérique, laboratoire de régulation automatique, cours d'entraînements réglés et d'électronique de puissance, projets de semestre et de diplôme.

Voir aussi: Laboratoire de régulation automatique.

SUPPORT DE COURS: Polycopié, exercices avec corrigés détaillés, logiciels d'aide à l'enseignement.

BIBLIOGRAPHIE: Régulation automatique, L. Maret, 1987, PPUR.
Modern Control Systems, Dorf et Bishop, 1995, Addison-Wesley.

10.09.1997/MEE-St (MEE EE régu. automatique)

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

ei•vd Ecole d'ingénieurs du Canton de Vaud	***Régulation automatique***	Département: ***Electricité*** Filière: ***Electronique*** Orientation: ***Systèmes intégrés***

Semestre:	1	2	3	4	5	6	Total heures	*Contrôle des connaissances*		
								Contrôle continu	*Propédeutique*	*Final*
	☐	☐	☐	☐	4	☐	72	X	I☐ II☐	☐

OBJECTIFS

a) Maîtriser les méthodes d'analyse des systèmes dynamiques linéaires et les appliquer aux processus industriels.
b) Pouvoir comprendre les problèmes spécifiques d'un système de régulation automatique.
c) Pouvoir formuler le cahier des charges d'un système de régulation automatique.
d) Etre apte à faire la synthèse de régulateurs classiques sur la base de spécifications de performances.

CONTENU (avec dotation approximative en %)

Introduction **10%**
- Exemples d'applications industrielles, définitions générales, régulateurs tout-ou-rien et proportionnel, notion de statisme et de stabilité, linéarité, régulation de correspondance et de maintien, principe de la régulation numérique.

Modélisation et simulation **20%**
- Fonction de transfert, modèle d'état. Systèmes fondamentaux. Schéma fonctionnel. Simulation à l'aide du logiciel MATLAB.

Caractéristiques et performances des systèmes asservis **20%**
- Fonctions de transfert en boucle ouverte et en boucle fermée. Régulateur PID. Méthode de Ziegler-Nichols. Stabilité, rapidité, précision. Condition fondamentale de stabilité. Précision en régime permanent.

Analyse et synthèse fréquentielles **30%**
- Réponse harmonique, lieux de Nyquist et de Bode. Critère de Nyquist. Lieux de Bode en boucle fermée.
- Synthèse de régulateurs P, PI, PD et PID. Méthode de Bode. Compensation pôle-zéro. Régulateurs robustes.

Analyse dans le plan complexe **10%**
- Lieu d'Evans, marges de stabilité. Courbes équi-amortissement.

Analyse des systèmes non-linéaires **10%**
- Non-linéarités essentielles et accidentelles. Méthodes du premier harmonique et du plan de phase

FORME DE L'ENSEIGNEMENT: Cours en classe, exercices en classe et au laboratoire.

LIAISON AVEC D'AUTRES COURS:

***Préalable requis*:** Mathématique, mécanique rationnelle, physique, machines électriques, électronique, électrotechnique, programmation, traitement de signal.

***Préparation pour*:** Régulation numérique, laboratoire de régulation automatique, cours d'entraînements réglés et d'électronique de puissance, projets de semestre et de diplôme.

Voir aussi: Laboratoire de régulation automatique.

SUPPORT DE COURS: Polycopié, exercices avec corrigés détaillés, logiciels d'aide à l'enseignement.

BIBLIOGRAPHIE: Régulation automatique, L. Maret, 1987, PPUR.
Modern Control Systems, Dorf et Bishop, 1995, Addison-Wesley.

10.09.1997/MEE-St (MEE EE régu. automatique)

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

Préambule

Le présent polycopié de *régulation automatique* n'est au stade actuel qu'un condensé de notes de cours. Il s'inspire très largement de la référence [1].

Pour la filière électronique, ce cours de régulation automatique est enseigné pendant un demi-semestre, à raison de 8 périodes par semaine pour un total de 72 périodes. Environ la moitié de celles-ci est consacrée aux exercices, dont les données sont fournies séparément et pour lesquels un corrigé est distribué. Ce cours est complété par des travaux de laboratoire (*laboratoire de régulation automatique*), réparti sur un semestre (36 périodes au total).

L'orientation systèmes automatisés de la filière électronique voit sa formation en automatique complétée par un cours de *régulation numérique*, donné ensuite avec la même dotation horaire (semestre d'hiver) complété par un laboratoire (*laboratoire de régulation numérique*, 72 périodes, semestre d'été).

Les différents documents distribués sont en principe disponibles sous forme informatique sur le site

http ://iai.eivd.ch/users/mee

où tous les fichiers, y compris les diapositives de présentation, sont accessibles (suivre le lien Régulation automatique).

Pour le travail au laboratoire (exercices et expériences), les étudiants recevront les nom d'utilisateur, mot de passe et nom de domaine nécessaire pour se connecter sur le serveur iAi.

On trouvera à ces références les différents chapitres en format `pdf`, ainsi que la plus grande partie des figures (`*.dsf`, `*.eps`), réalisées avec le logiciel Micrografx Designer, dont l'*eivd* a la licence de site. Lorsque le fichier `pdf` du cours est ouvert, il est possible de télécharger les figures au format `eps` en cliquant sur celles-ci. Les simulations sont faites avec les logiciels MATLAB et SysQuake, qui seront abondamment utilisés dans le cadres des exercices et laboratoires. Un certain nombre des fichiers de simulation sont également accessibles en cliquant sur leur nom dans le document `pdf`.

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

Chapitre 1

Introduction à la régulation automatique

1.1 Régulation automatique : tentative de définition

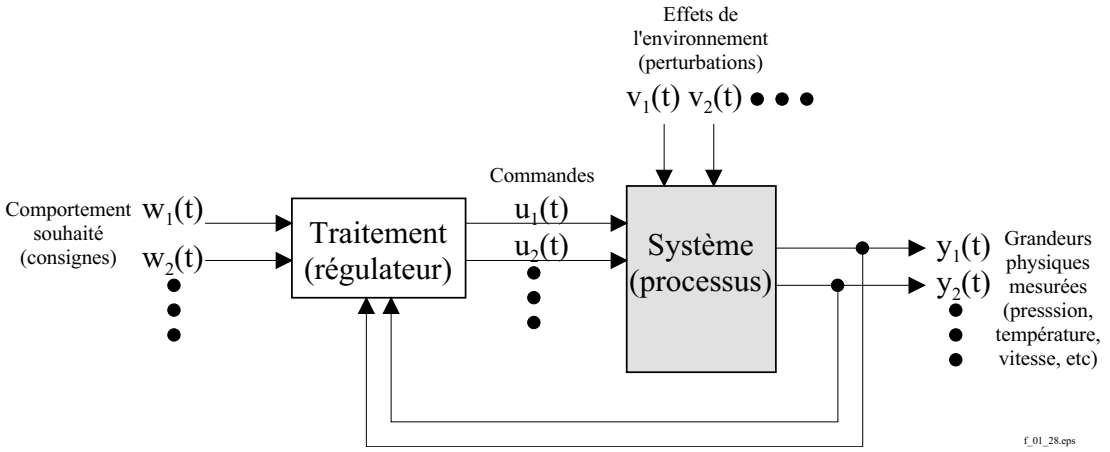


FIG. 1.1 – Structure d'un système de régulation automatique : le fonctionnement de l'installation requiert que certaines grandeurs physiques $y_1(t)$, $y_2(t)$, ... d'un système aient un comportement fixé par les *consignes* $w_1(t)$, $w_2(t)$, ..., malgré la présence de *perturbations* $v_1(t)$, $v_2(t)$, ... d'origine externe et imprévisibles. Dans ce but, $y_1(t)$, $y_2(t)$, ... sont mesurées, traitées puis une action est entreprise sur le système au moyen des *commandes* $u_1(t)$, $u_2(t)$, ... (fichier source).

La régulation automatique (automatic control, Regelungstechnik) est la technique de l'ingénieur offrant les méthodes et les outils nécessaires à la prise de contrôle d'une ou plusieurs grandeurs physiques d'un système en vue d'en impo-

ser le comportement. Les grandeurs physiques, ou *signaux* (vitesse, température, pression, courant, etc), doivent être mesurées afin de vérifier leur état puis de déterminer à l'aide d'un traitement approprié l'action à entreprendre sur le système ou *processus* (installation de production, robot, alimentation électronique stabilisée, disque dur, etc) pour qu'elles se comportent comme souhaité (figure 1.1 page précédente). Avec le qualificatif *automatique*, on admet qu'aucune intervention manuelle n'est nécessaire atteindre cet objectif.

Le comportement des grandeurs contrôlées $y_1(t)$, $y_2(t)$, ... peut/doit en général satisfaire plusieurs critères :

- on souhaite qu'une certaine grandeur physique (p.ex. vitesse, courant électrique, température) ait une valeur moyenne donnée en régime permanent, malgré l'influence de l'environnement (*perturbations*) ;
- cette même grandeur physique doit passer d'une valeur à une autre en un temps donné, voire avec un profil de variation imposé.

Fait remarquable, les méthodes de l'automatique offrent donc la possibilité de modifier le comportement statique et dynamique d'une ou plusieurs grandeurs physiques d'un processus, afin qu'elles évoluent conformément aux exigences de l'application (figure 1.2 page suivante). D'un certain point de vue, ces méthodes contribuent significativement à augmenter la valeur ajoutée aux produits, en offrant les moyens d'améliorer les performances de ceux-ci.

En s'appuyant fondamentalement sur la technique de la **contre-réaction** (feedback, Rückführung), les méthodes de l'automatique permettent de traiter des situations où interviennent des systèmes

- intrinsèquement lents devant être rendus plus rapides (figure 1.2 page ci-contre) ;
- impossibles à contrôler manuellement (systèmes très rapides (ayant des constantes de temps $\tau < 1\,[\mathrm{s}]$), très précis (1%)) ;
- difficiles, voire impossibles à contrôler manuellement (sustentation et lévitation magnétiques, aviation, etc) devant être rendus stables afin d'être utilisables.

Les applications de la régulation automatique se rencontrent donc dans tous les systèmes dont une (ou plusieurs) grandeur physique (température, pH, débit, pression, courant, vitesse, force, altitude, profondeur, orientation, etc) doit correspondre à une valeur prescrite, la *consigne*, laquelle pouvant être variable, et cela sans intervention manuelle, i.e. de manière complètement automatique.

1.2 Exemples introductifs

On présente ci-après quelques exemples simples de systèmes de régulation automatique. Ceux-ci sont également appelés *systèmes asservis*.

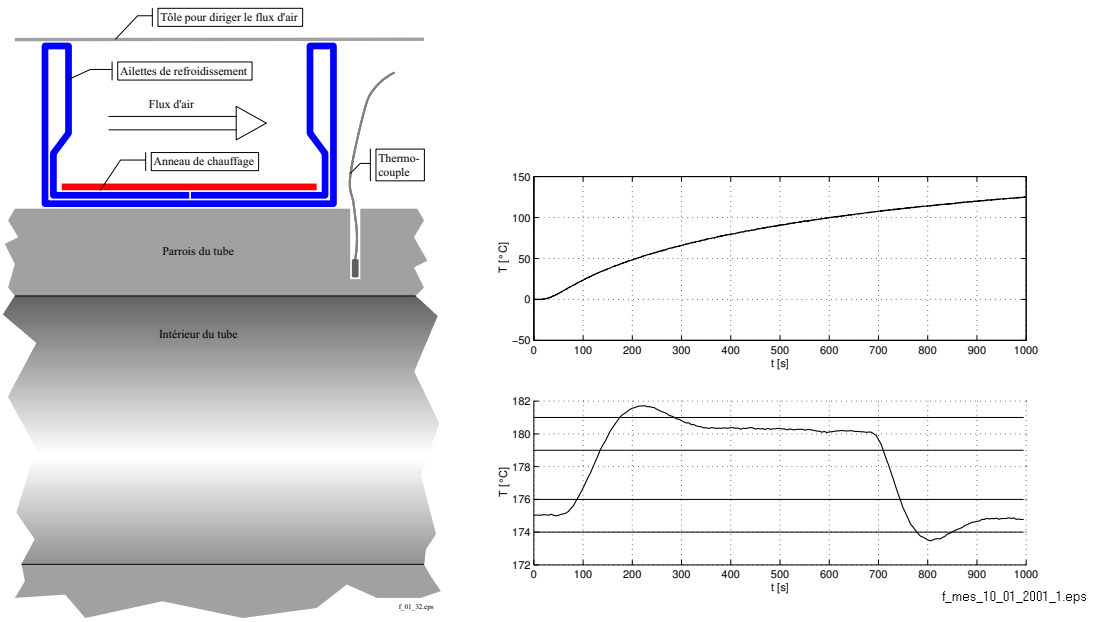


FIG. 1.2 – Régulation de la température d'un processus industriel : en haut, la réponse indicielle du système seul (température T en fonction du temps t suite à l'application d'un saut de puissance thermique), en bas la réponse indicielle en régulation automatique (suite à l'application d'un saut de consigne de température). On observe que l'on parvient, grâce à la contre-réaction, à rendre le système beaucoup plus rapide ! (fichier source)

1.2.1 Régulation automatique de température

Régulation manuelle de température : schéma technologique

La figure 1.3 page suivante représente schématiquement une installation permettant de faire une régulation manuelle de température. L'opérateur agit sur un potentiomètre pour ajuster la tension de commande de l'amplificateur de puissance, lequel alimente un corps de chauffe électrique. Comme les éléments dessinés représentent assez explicitement des dispositifs dépendant de la réalisation technique de l'installation (par exemple, corps de chauffe électrique et non chauffage à gaz), on parle de *schéma technologique*.

Régulation manuelle de température : représentation par schéma fonctionnel

On peut représenter le principe de la régulation manuelle de température par un *schéma fonctionnel*, i.e. découper logiquement la fonction globale "régulation manuelle de température" en une série de sous-fonctions ou composants plus simples, en indiquant la fonction réalisée ainsi que la nature de l'information

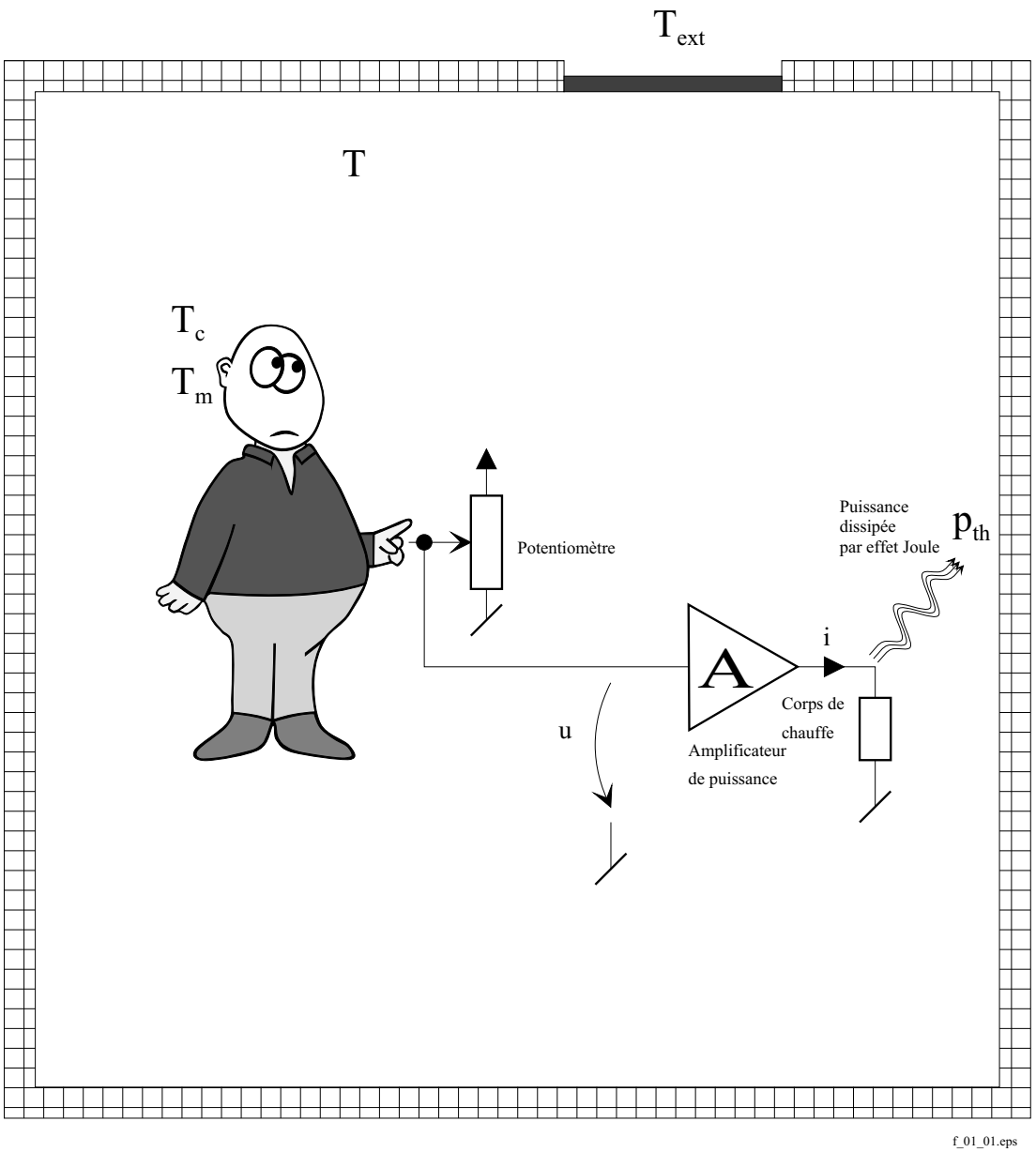


FIG. 1.3 – Régulation manuelle de température : T_c est la température de consigne, i.e. la température souhaitée, T la température effective en [°C]. L'opérateur souhaite que T, du moins la température T_m qu'il perçoit sensoriellement, coïncide avec T_c. Il agit pour cela sur le potentiomètre afin d'ajuster la puissance thermique dissipée par effet Joule dans la résistance du corps de chauffe (fichier source).

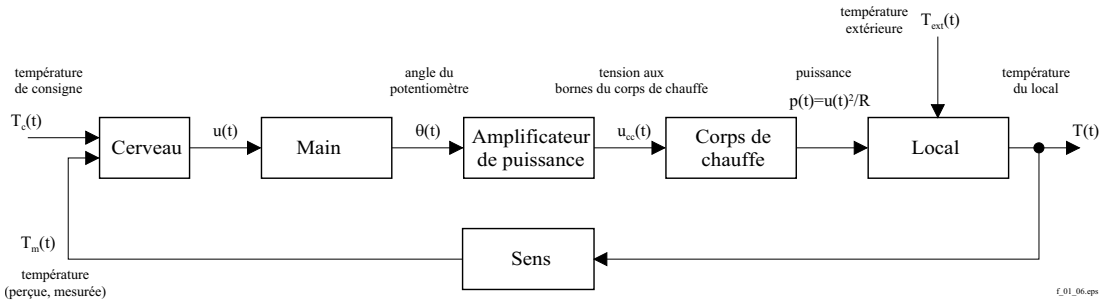


FIG. 1.4 – Représentation par schéma fonctionnel du mode de fonctionnement de l'opérateur en cas de régulation manuelle : l'opérateur compare la température de consigne T_c, i.e. la température souhaitée, avec la température mesurée (perçue) T_m, image aussi fidèle que possible de la température réelle T [°C] (cela dépend de la qualité du capteur : dans cet exemple, c'est opérateur qui perçoit sensoriellement la température T). En fonction du résultat de la comparaison, l'opérateur agit sur le potentiomètre (il le tourne d'un angle θ), ce qui modifie la tension u_{cc} aux bornes du corps de chauffe, la puissance instantanée dissipée $p(t)$ et finalement la température T du local (fichier source).

(signal) entrant et sortant de chacune d'entre-elles. En se livrant à cet exercice pour le schéma technologique de la figure 1.3 page ci-contre, on peut a priori identifier les fonctions suivantes :

- volume d'air du local (entrée puissance de chauffage, sortie température) ;
- corps de chauffe (entrée tension électrique, sortie puissance de chauffage) ;
- amplificateur de puissance (entrée commande de tension, sortie tension amplifiée en puissance) ;
- mesure de température (entrée température, sortie estimation de température) ;
- traitement de la mesure et action sur le potentiomètre.

Graphiquement, le schéma fonctionnel peut ainsi prendre la forme de la figure 1.4. On observe que le schéma fonctionnel de la figure 1.4 fait apparaître une boucle : la température mesurée T_m apparaît en effet :

- au **départ** de l'action sur le potentiomètre : $\theta(t)$ dépend de $T_m(t)$;
- également comme **conséquence** de cette action : $T_m(t)$ dépend de $\theta(t)$.

On dit que la température mesurée T_m est **contre-réactionnée**. Le système de la figure 1.4 présente ainsi une contre-réaction[1].

[1] On dit aussi rétro-action. En anglais : feedback. En allemand : Rückführung.

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

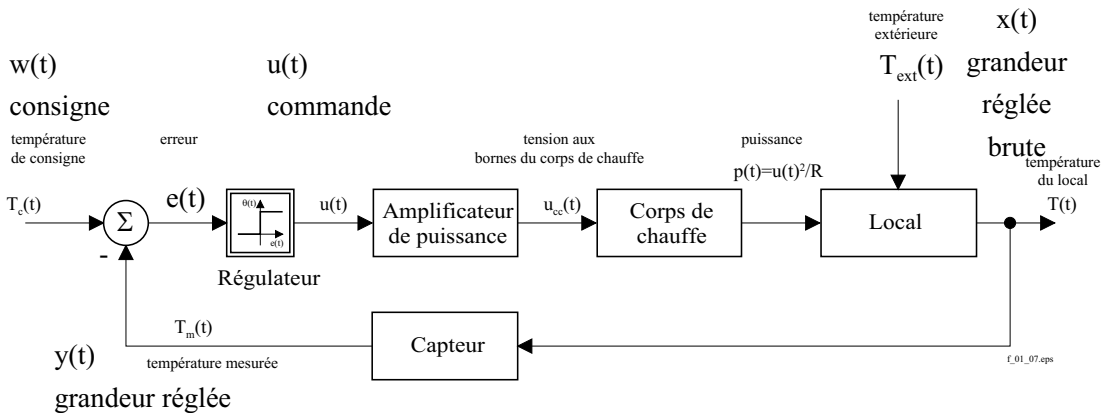


FIG. 1.5 – Représentation par schéma fonctionnel du mode de fonctionnement d'une régulation automatique de température (fichier source).

Adaptation du principe de régulation manuelle en vue d'une automatisation

Il y a plusieurs raisons justifiant le remplacement de l'opérateur par un système entièrement automatique :

- augmentation de la fiabilité et de la répétabilité ;
- augmentation de la rapidité ;
- diminution des coûts ;
- garantie de la sécurité de l'opérateur (lorsque celui devrait par exemple opérer dans une atmosphère de travail explosive ou toxique, etc) ;
- souvent, le système est trop rapide pour être géré par manuellement (entraînements réglés, etc) ;
- amélioration de la sécurité de l'installation elle-même.

Se basant sur les schémas technologique et fonctionnel des figures 1.3 page 14 et 1.4 page précédente, on peut les transformer en vue de rendre la régulation de température complètement automatique (figures 1.6 page ci-contre et 1.5).

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

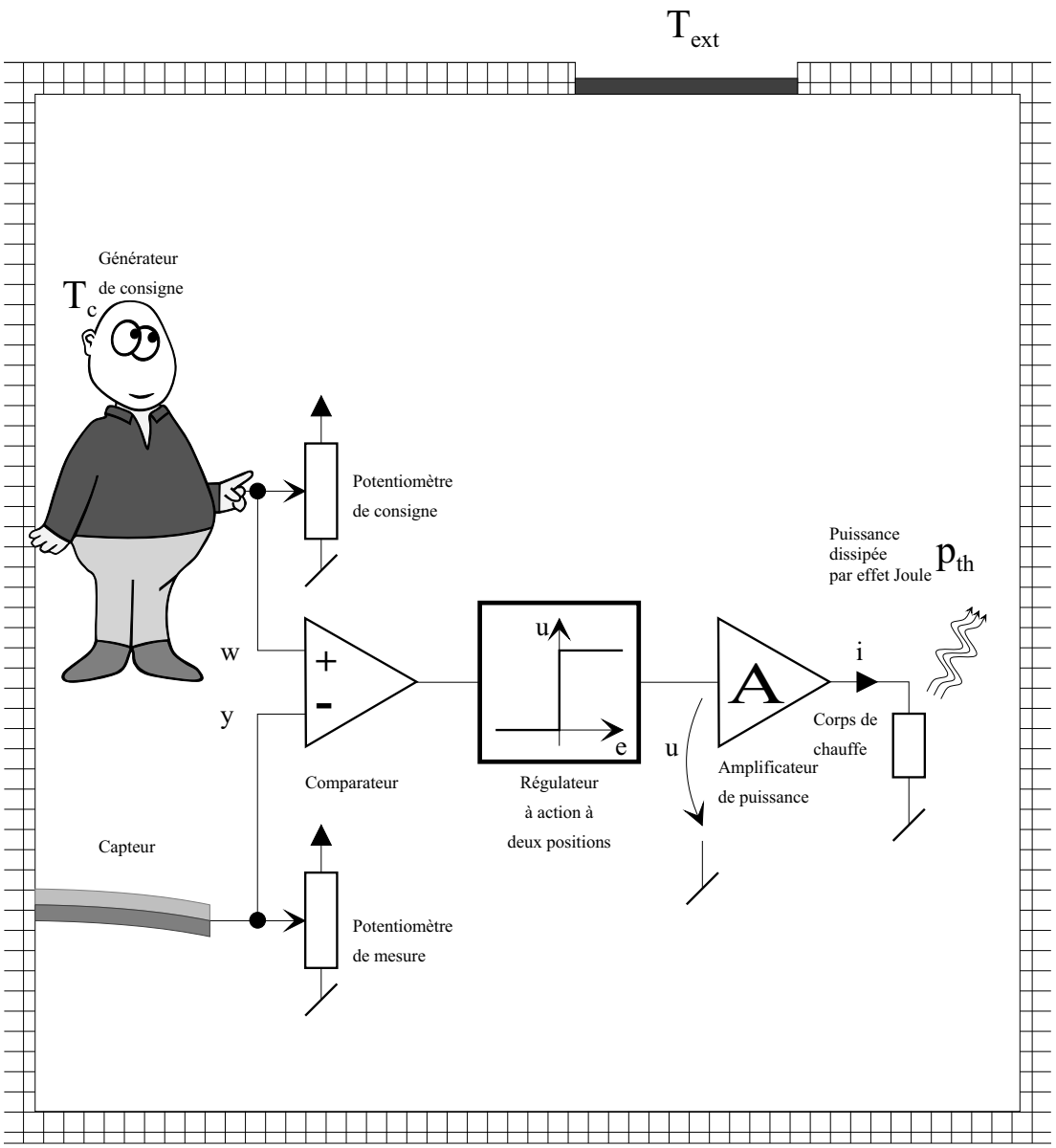


FIG. 1.6 – Schéma technologique d'une régulation automatique de température : le rôle de l'opérateur se limite maintenant à fixer la consigne de température T_c, la comparaison avec la température mesurée T_m par un capteur ad hoc (ici un bilame) étant effectuée par un dispositif appelé **régulateur** qui se charge d'agir sur le corps de chauffe. Ici le régulateur a un comportement de type tout-ou-rien, que l'on nomme parfois *régulateur à action à deux positions* : si l'erreur de température est en-dessous d'une certaine limite, on impose 0 [V] aux bornes du corps de chauffe, sinon, s'il fait trop froid, on applique la tension maximale (fichier source).

1.2.2 Régulation automatique de la vitesse d'un moteur DC à excitation séparée constante

Des applications où une régulation de vitesse est nécessaire sont par exemple :
- la broche d'une machine-outil, afin de garantir la bonne vitesse de coupe ;
- le disque dur d'un ordinateur ;
- l'aide à la conduite de véhicules automobiles ("tempomat", voir exercice) ;
- installation d'impression des journaux : le papier doit défiler devant les rouleaux encreurs (rouge, vert, bleu) à une vitesse déterminée.

Dans l'exemple ci-dessous, le but de la régulation de vitesse de l'arbre d'un moteur à courant continu, manuelle ou automatique, est de garantir que la vitesse $\omega \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right]$ corresponde à la vitesse de consigne ω_c, i.e. la vitesse souhaitée, malgré la présence de couple résistant T_{res} $[\text{N} \cdot \text{m}]$.

Régulation manuelle

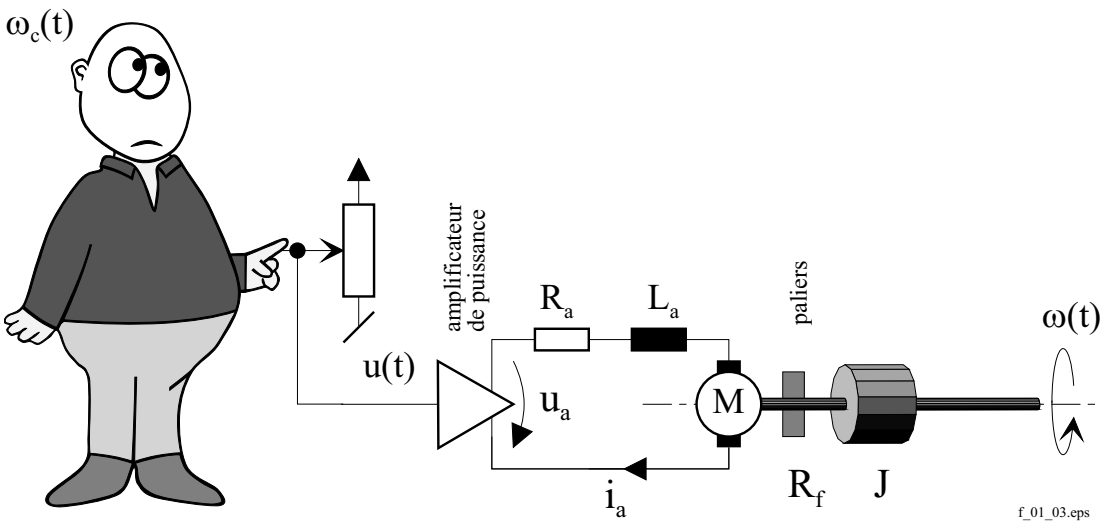


FIG. 1.7 – Régulation manuelle de la vitesse d'un moteur DC : l'opérateur estime (mesure) la vitesse de rotation $\omega \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right]$, la compare avec la vitesse de consigne ω_c et ajuste la tension u_a aux bornes de l'induit par le biais du potentiomètre. Pour la mesure de vitesse, il peut bien sûr disposer d'un appareil ad hoc (fichier source).

La régulation manuelle de vitesse de la figure 1.7 voit l'opérateur agir sur la tension aux bornes du moteur DC afin de tendre à augmenter ou à diminuer sa vitesse, selon la comparaison entre la vitesse souhaitée ω_c et la mesure/l'estimation de la vitesse effective $\omega \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right]$. En modifiant la tension aux bornes du moteur, la caractéristique statique couple-vitesse est en effet modifiée, selon les courbes de la figure 1.8 page suivante.

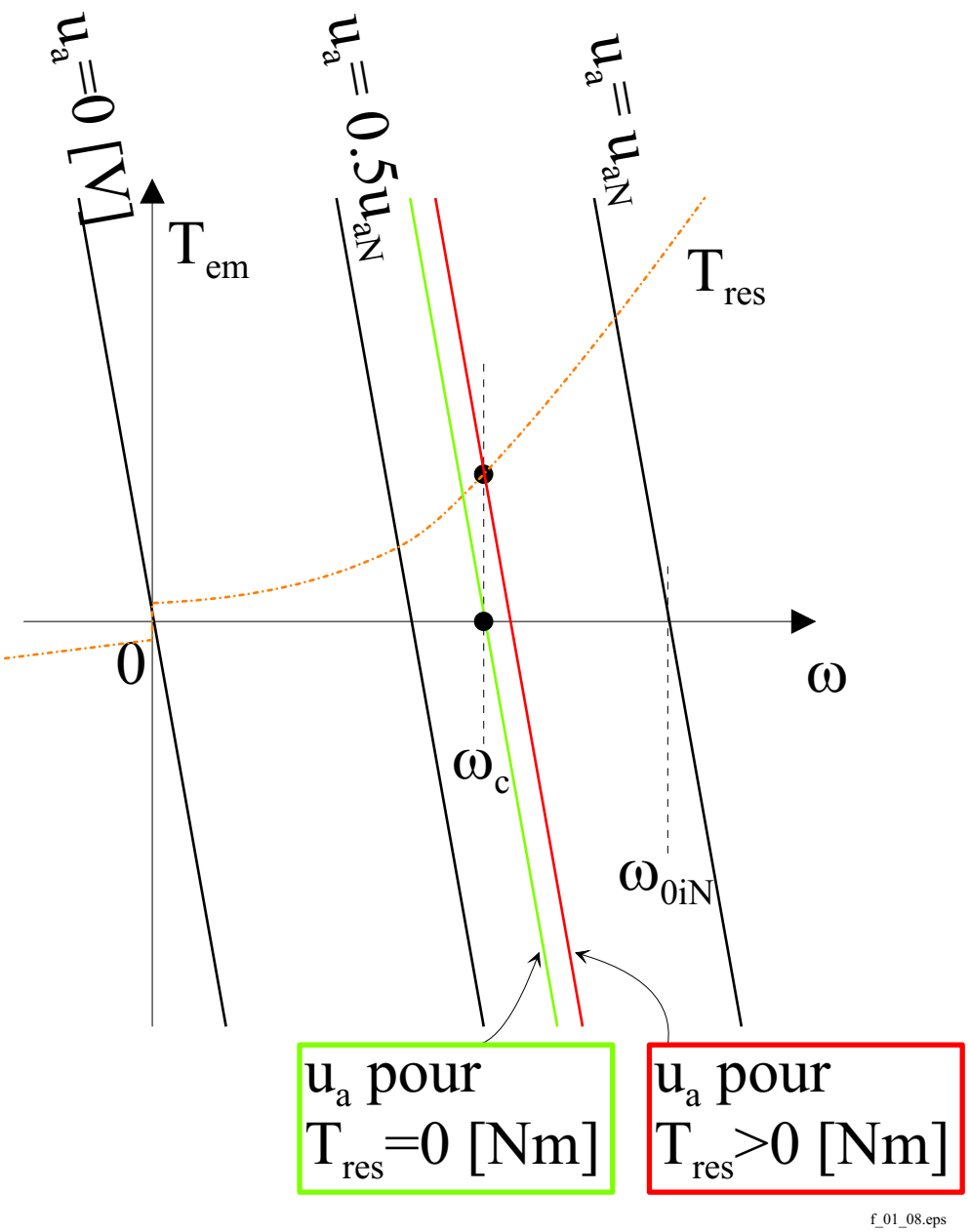


FIG. 1.8 – Caractéristique couple (T_{em} [N · m])-vitesse (ω $\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right]$), régime permanent constant, d'un moteur DC à excitation séparée constante : on observe que la vitesse de rotation ω peut être ajustée en modifiant la tension u_a aux bornes de l'induit. Pour qu'elle corresponde à ω_c, il faut que la tension soit ajustée à des valeurs différentes selon le niveau de couple résistant (frottement sec et visqueux, etc) : ici sont illustrés les cas où $T_{res} = 0\,[\text{N} \cdot \text{m}]$ et $T_{res} > 0\ [\text{N} \cdot \text{m}]$. Le symbole T est utilisé ici comme étant la première lettre de "torque", i.e. *couple* en anglais (fichier source).

Régulation automatique

Régulateur à action à 2 positions L'automatisation de la régulation de vitesse présentée nécessite la mise en place d'un capteur de vitesse délivrant un signal $y(t) = \omega_m(t)$ prenant le plus souvent la forme d'une tension électrique proportionnelle à $\omega(t)$. Un dispositif reproduisant si possible le comportement de l'opérateur doit être construit. Dans une première version (figure 1.9), la stratégie pourrait être :

- si $\omega_c - \omega_m > 0$ alors $u = +u_{\max}$
- si $\omega_c - \omega_m < 0$ alors $u = -u_{\max}$

L'implantation de cettre stratégie de commande s'effectue dans le **régulateur**, qui porte ici le nom de *régulateur à action à 2 positions*, ou *régulateur tout-ou-rien*. La figure 1.10 page suivante montre les résultats de la simulation d'une

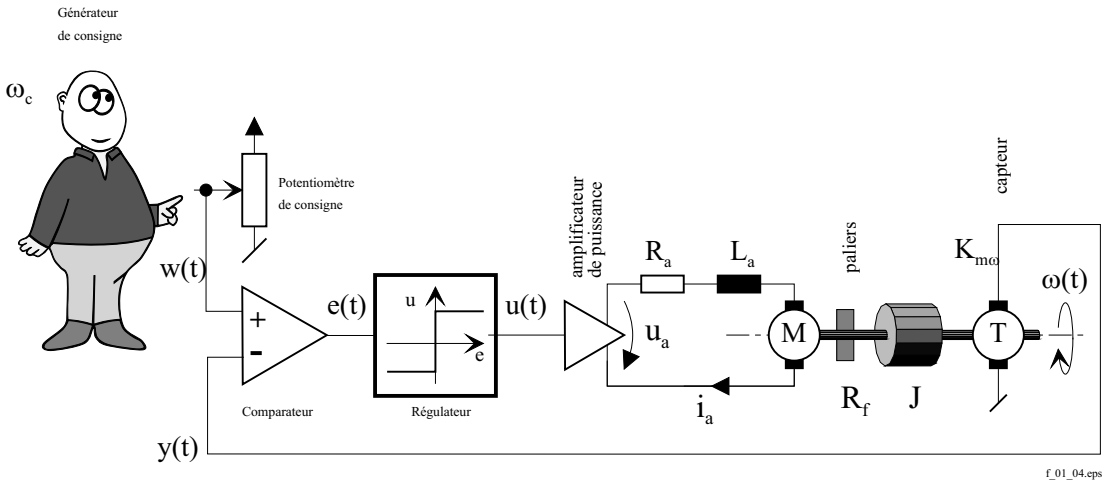


FIG. 1.9 – Régulation automatique de la vitesse d'un moteur DC : l'opérateur est remplacé par un régulateur, ici de type à action à deux positions. La mesure $y(t)$ de la vitesse de rotation ω est réalisée au moyen d'un capteur (une dynamo-tachymétrique dans le cas illustré). La mesure $y(t)$ est contre-réactionnée et comparée à la consigne $\omega_c(t) = w(t)$, l'erreur $e(t) = w(t) - y(t)$ est construite et détermine l'action, i.e. la commande $u(t)$ que le régulateur va entreprendre en vue de l'annuler (fichier source).

telle installation : sans surprise, on observe que la tension de commande $u(t)$ oscille entre ses 2 seuls états possibles $\pm u_{\max}$. Cela provoque une suite continue de changements de signe de l'accélération et ainsi une oscillation de la vitesse autour de sa valeur finale $\omega_\infty = 1$.

La dérivée de la vitesse, i.e. l'accélération, changeant de signe à fréquence élevée, la mécanique peut en souffrir (usure prématurée, augmentation des jeux de transmissions, etc). D'un point de vue électrique, les pointes de courants pro-

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

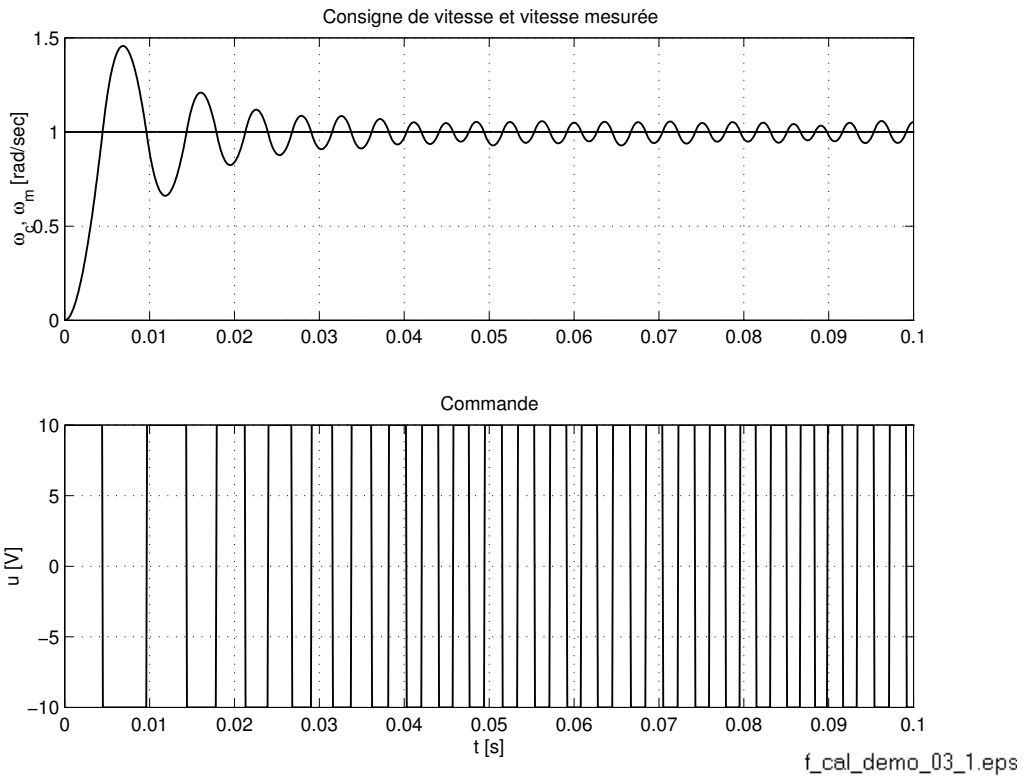


FIG. 1.10 – Régulation automatique de la vitesse d'un moteur DC, avec régulateur à action à deux positions (`Demo_03.mdl, cal_Demo_03.m`). La mesure ω_m de la vitesse de rotation ω coïncide, en régime permanent constant, avec la consigne ω_c, qui a ici la forme d'un saut unité, mais au prix d'une commande u commutant à une fréquence tendant vers l'∞ (fichier source).

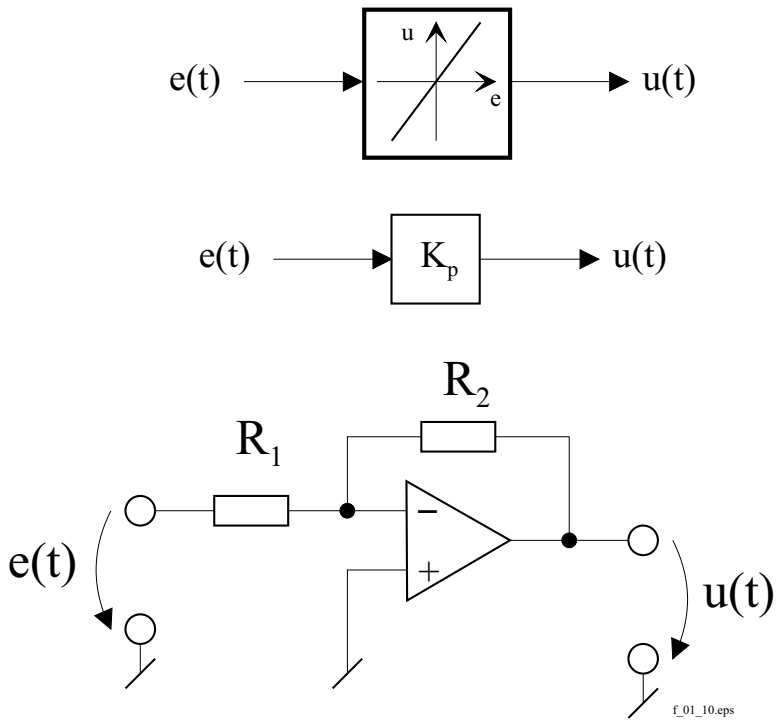


FIG. 1.11 – Schéma fonctionnel d'un régulateur P et schéma de principe (schéma technologique) de sa réalisation électronique (fichier source).

voquées par des changements brusques de la tension de commande peuvent endommager le moteur si celui-ci n'est pas assez selfique alors qu'un échauffement excessif par effet Joule des enroulements est à redouter.

Régulateur à action proportionnelle Une alternative au régulateur à action à deux positions consiste à utiliser un *régulateur à action proportionnelle*, lequel applique une commande $u(t)$ proportionnelle à l'erreur $e(t)$. On l'appelle *régulateur P* :

$$\boxed{u(t) = K_p \cdot e(t)} \tag{1.1}$$

Les figures 1.12 page ci-contre et 1.13 page suivante montrent respectivement le schéma technologique de l'installation ainsi que les résultats de la simulation. Si les oscillations de vitesse ont disparu et la commande est notablement plus douce qu'avec un régulateur à action à 2 positions, on doit en revanche constater que la vitesse mesurée ω_m n'atteint pas exactement la consigne. Ce problème sera examiné au § 1.5.2 page 32.

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

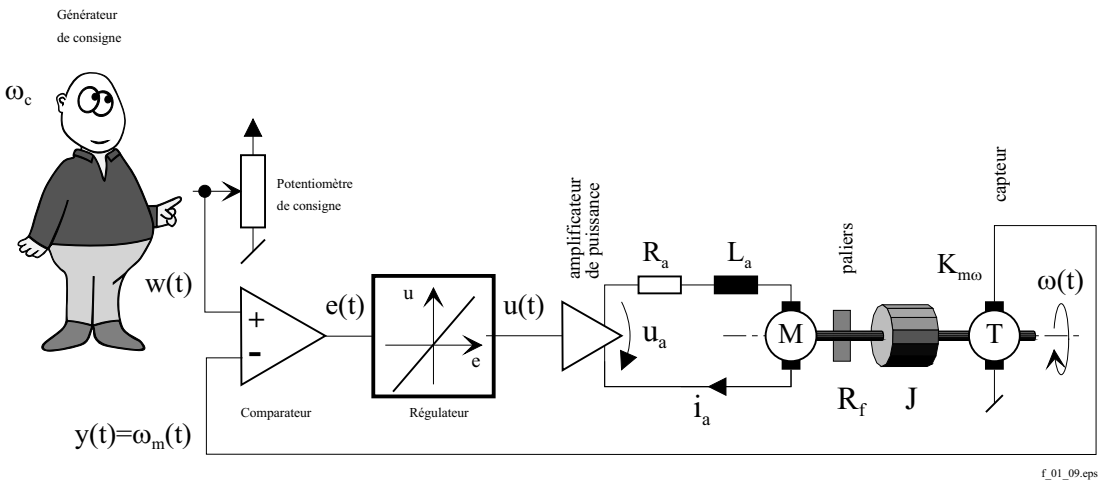


FIG. 1.12 – Régulation automatique de la vitesse d'un moteur DC : le régulateur est ici de type proportionnel, ce qui signifie que la commande $u(t)$ délivrée par le régulateur est proportionnelle à l'erreur $e(t)$ (fichier source).

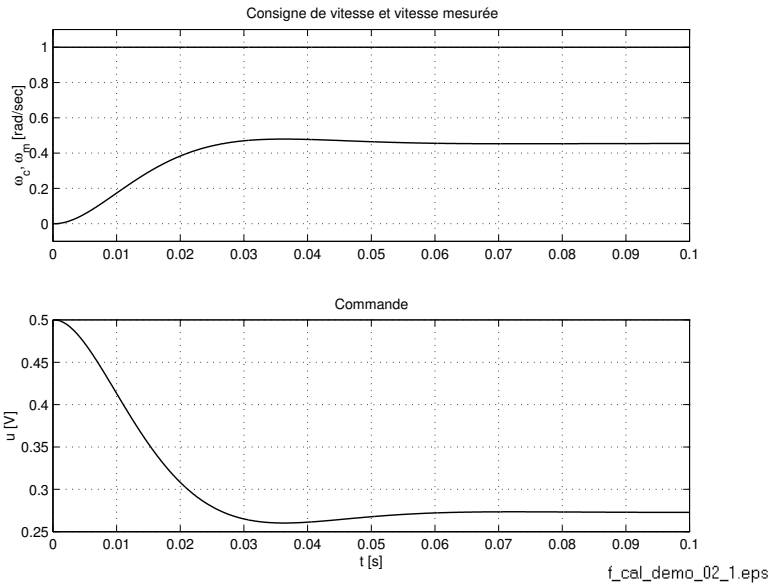


FIG. 1.13 – Régulation automatique de la vitesse d'un moteur DC, avec régulateur P, $K_p = 0.5$ (`Demo_02.mdl, cal_Demo_02.m`). La commande ne varie pas aussi brutalement qu'avec un régulateur à action à deux positions, mais la grandeur réglée (mesure) ω_m ne coïncide pas parfaitement avec la consigne ω_c en régime permanent constant. Il subsiste ce qu'on appelle une **erreur statique** de valeur $E_\infty \approx 55\%$ (fichier source).

1.3 Eléments et signaux caractéristiques d'un système de régulation automatique

Par les quelques exemples introductifs du paragraphe précédent, plusieurs termes nouveaux sont apparus. La figure 1.14 les reprend dans le cadre d'un système de régulation automatique présenté sous forme générale, où apparaissent des blocs fonctionnels ainsi que des signaux.

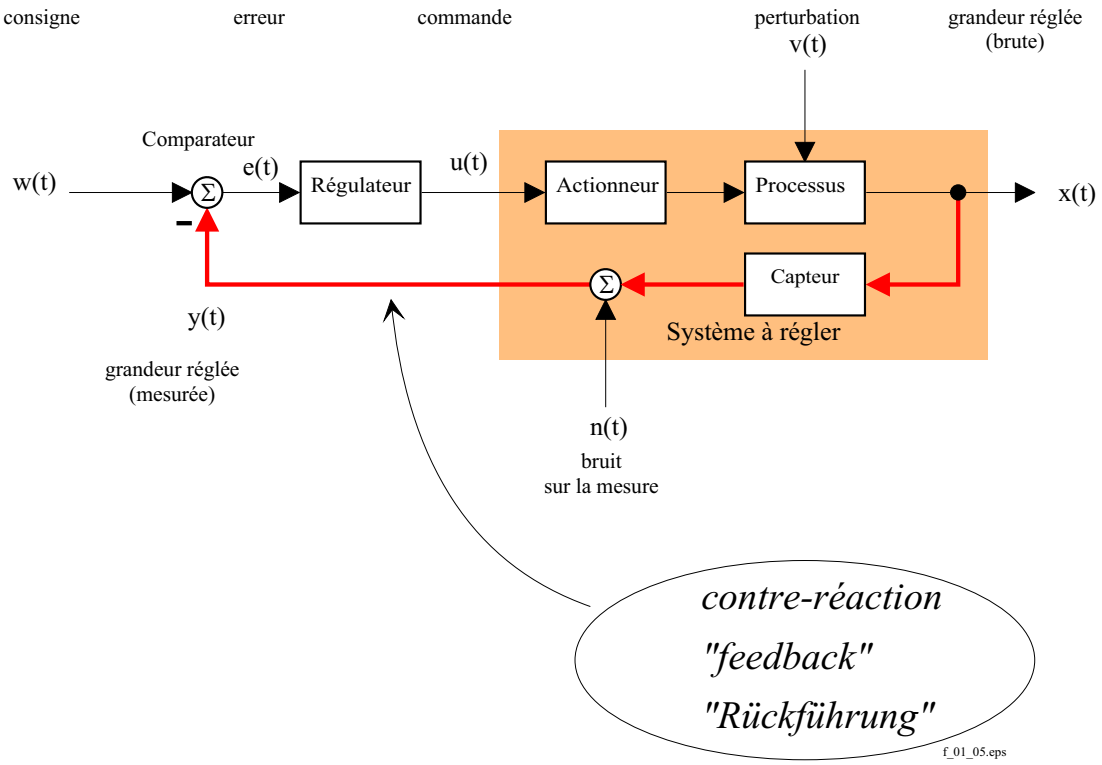


FIG. 1.14 – Schéma fonctionnel mettant en évidence les éléments et signaux caractéristiques d'un système de régulation automatique (fichier source).

Les sous-systèmes ainsi que les signaux intervenant dans la figure sont détaillés dans les paragraphes ci-après.

1.3.1 Blocs fonctionnels et sous-systèmes

On distingue essentiellement 4 sous-systèmes :

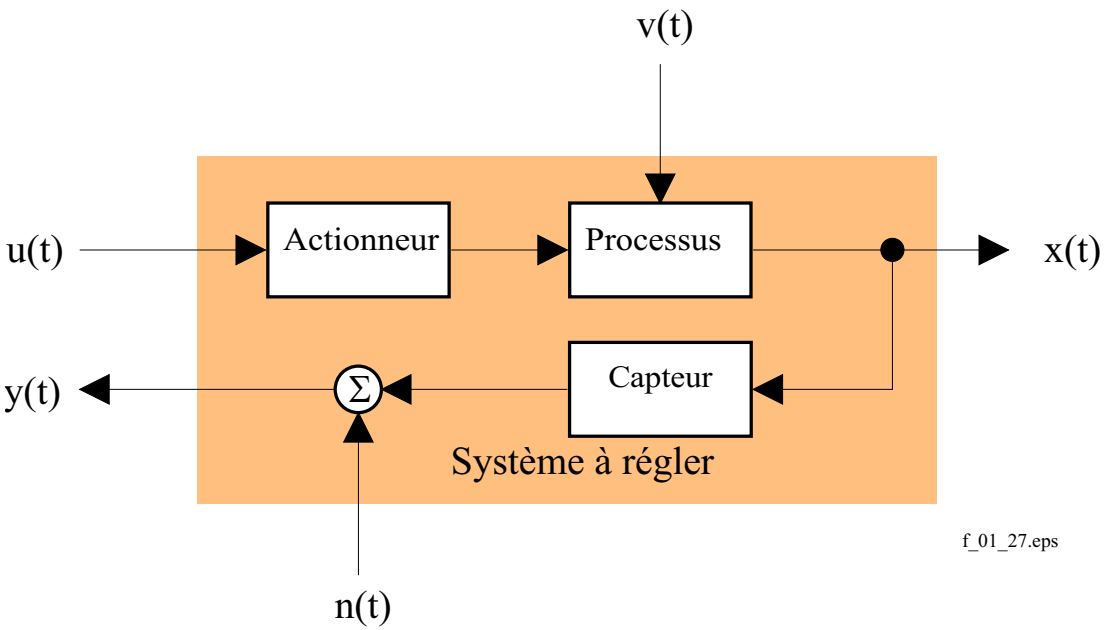


FIG. 1.15 – Système à régler (fichier source).

Elément	Fonction
Comparateur	Construit le signal d'erreur $e(t) = w(t) - y(t)$
Régulateur	Traite le signal d'erreur $e(t)$ et en déduit le signal de commande $u(t)$ destiné à diminuer $e(t)$
Amplificateur de puissance	Amplifie en puissance le signal de commande $u(t)$ de façon à ce qu'il soit applicable au processus
Processus	Installation à asservir
Capteur	Forme une image $y(t)$ aussi fidèle que possible de la grandeur réglée brute $x(t)$

TAB. 1.1 – Blocs fonctionnels et sous-systèmes.

On note qu'avec le schéma adopté, le **système à régler** comprend tous les éléments (actionneur, processus, capteur, etc) se trouvant entre la commande $u(t)$ délivrée par le régulateur et la grandeur réglée (mesurée) $y(t)$, y compris le capteur (figure 1.15).

1.3.2 Signaux

Les signaux intervenant dans le schéma général d'un système de régulation automatique sont résumés ci-dessous.

Signal	Notation	Remarques
Consigne	$w(t)$	Signal à poursuivre, à caractère généralement déterministe, par opposition à aléatoire : ce signal est défini pour une application donnée
Grandeur réglée brute	$x(t)$	Grandeur physique réglée, dans son unité physique propre ($\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right]$, [°C], etc). Seule une image peut en être obtenue, par l'intermédiaire d'un capteur
Grandeur réglée mesurée	$y(t)$	Image de la "vraie" grandeur réglée fournie par le capteur, i.e. image de la grandeur réglée brute $x(t)$. C'est la seule information dont dispose le régulateur, lequel asservit donc en réalité la grandeur réglée mesurée $y(t)$ et non directement la grandeur réglée brute $x(t)$. C'est pourquoi la qualité de la mesure (capteur et traitement lui étant associé) est primordiale en automatique
Commande	$u(t)$	Signal délivré par le régulateur au système à régler. Ce signal doit normalement tendre à faire diminuer l'erreur
Perturbation	$v(t)$	Signal aléatoire représentant les perturbations intervenant sur le système à régler
Bruit sur la mesure	$n(t)$	Signal aléatoire représentant le bruit intervenant sur la mesure ($n \Leftarrow$ **n**oise)
Erreur ou écart	$e(t)$	Différence entre consigne $w(t)$ et grandeur réglée $y(t)$: $e(t) = w(t) - y(t)$

TAB. 1.2 – Signaux principaux d'un système de régulation automatique.

Signaux d'entrée et signaux de sortie Les signaux d'entrée du système de régulation automatique sont les suivants :

- consigne $w(t)$ (plusieurs en régulation multivariable)
- perturbation $v(t)$ (perturbation de charge, pouvant être de différentes natures et intervenant à plusieurs endroits dans le système)
- bruit de mesure $n(t)$ (perturbation de signal), voir figure 1.16 page suivante

Pour les signaux de sortie, on a :

- grandeur réglée $y(t)$ (plusieurs en régulation multivariable)

Unités physiques des signaux Il est important de relever qu'un système de régulation automatique ne réalise pas directement l'asservissement de la grandeur réglée brute $x(t)$, mais bel et bien de l'image $y(t)$ donnée de celle-ci par le capteur. $y(t)$ est alors le plus souvent un signal ayant une autre nature physique que la grandeur réglée brute $x(t)$: pour des raisons d'implantation, l'unité physique de $y(t)$ est typiquement le [V]. Comme le régulateur effectue la comparaison de

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

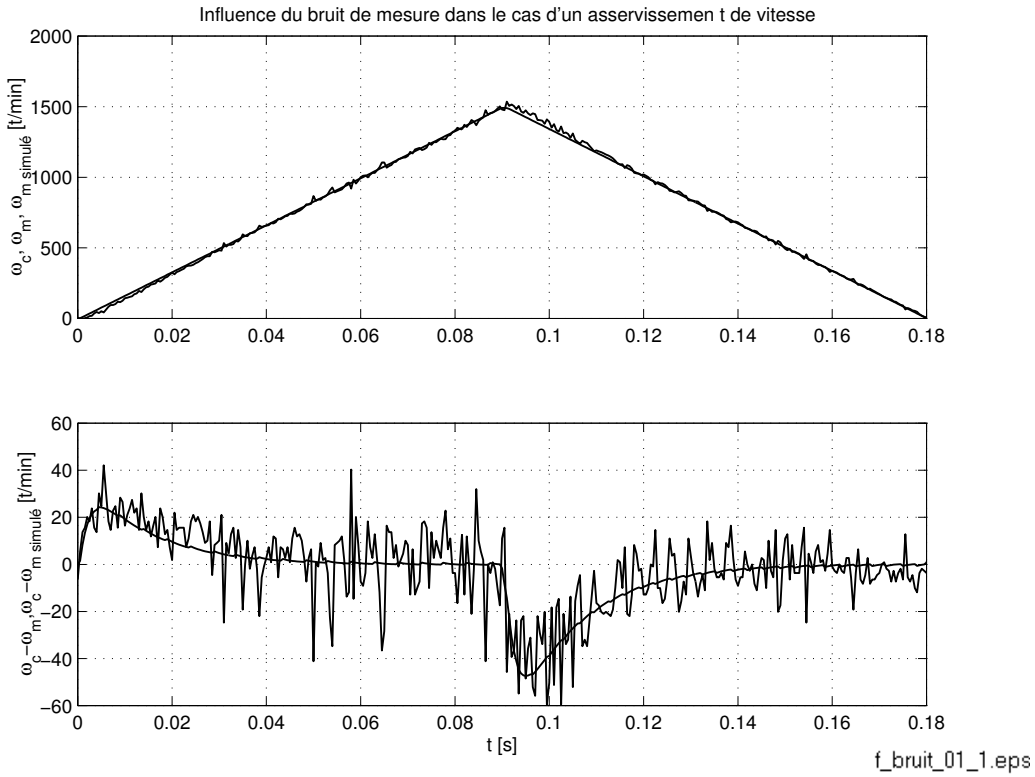


FIG. 1.16 – Visualisation du bruit de mesure dans le cas d'un asservissement de vitesse (`bruit_01.m`). La consigne de vitesse a la forme d'un triangle (accélération constante puis freinage-arrêt). On compare ici la vitesse réglée effective et sa simulation de façon à bien mettre en évidence le bruit (fichier source).

$w(t)$ et de $y(t)$, il s'ensuit que la consigne $w(t)$ a impérativement la même unité physique que la grandeur réglée mesurée $y(t)$.

Signal	**Notation**	**Unité physique**	**Régulation de température**	**Régulation de vitesse**
Consigne	$w(t)$	Correspond à l'unité physique de la grandeur réglée $y(t)$ fournie par le capteur. Typiquement des [V] ou des [A]	$[T_c] = \text{V}$	$[\omega_c] = \text{V}$
Grandeur réglée mesurée	$y(t)$	Correspond à la nature du signal de sortie du capteur. Typiquement des [V]	$[T_m] = \text{V}$	$[\omega_m] = \text{V}$
Grandeur réglée brute	$x(t)$	Grandeur physique réglée, dans son unité	$[T] = °\text{C}$	$[\omega] = \frac{\text{rad}}{\text{s}}$
Commande	$u(t)$	Correspond à l'unité physique du signal de sortie du régulateur, tel qu'il est réalisé. Typiquement des [V]	$[u] = \text{V}$	$[u] = \text{V}$
Perturbation	$v(t)$	Dépend de l'endroit où la perturbation intervient	$[v] =$ [W]	$[v] = \text{N} \cdot \text{m}$
Bruit sur la mesure	$n(t)$	Correspond à l'unité de $y(t)$	$[n] = \text{V}$	$[n] = \text{V}$
Erreur	$e(t)$	Correspond à la nature du signal de sortie du capteur. Typiquement des [V]	$[e] = \text{V}$	$[e] = \text{V}$

TAB. 1.3 – Unités physiques des principaux signaux d'un système de régulation automatique. Par unité physique, on entend celle du signal lui-même, définie par la réalisation du système, et non celle de l'information qu'il porte. Ainsi le signal de mesure de vitesse ω_m fourni par exemple par un capteur de type dynamo-tachymétrique a pour unité des [V] et non des $\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right]$.

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

1.4 Régulation de correspondance et régulation de maintien

On peut envisager deux modes de régulation automatique :

– la *régulation de correspondance* ("tracking", "poursuite"), où le but essentiel est de poursuivre une consigne $w(t)$ variable (figure 1.17) ;

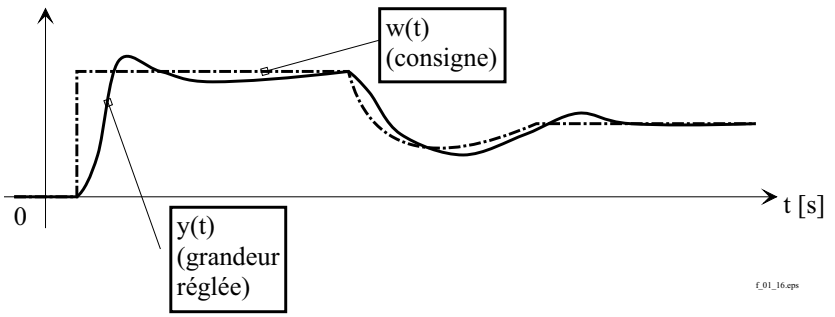


FIG. 1.17 – Régulation de correspondance (fichier source).

– la *régulation de maintien*, où le régulateur a pour tâche principale de maintenir la grandeur réglée $y(t)$ égale à la consigne $w(t)$ malgré la présence de perturbations $v(t)$ (figure 1.18).

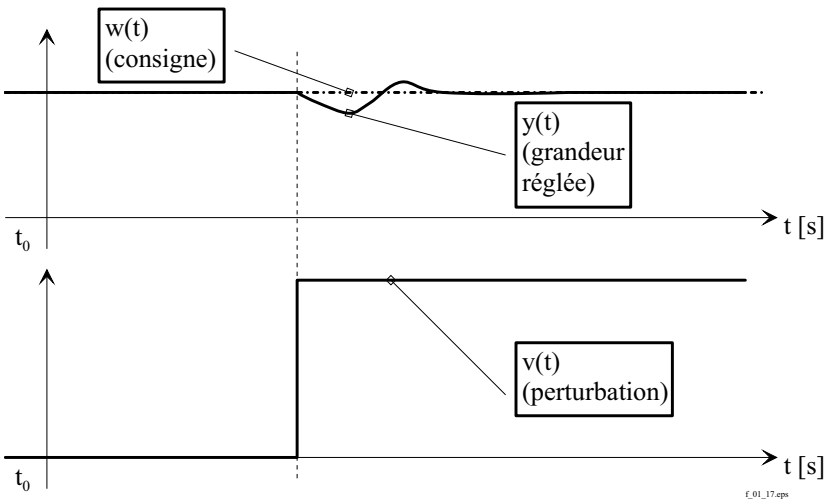


FIG. 1.18 – Régulation de maintien (fichier source).

Dans la réalité, les 2 modes coexistent le plus souvent, le régulateur réagissant à toute forme d'erreur, quelle qu'en soit sont la cause (consigne variable ou perturbation aléatoire).

1.5 Problèmes fondamentaux des systèmes de régulation automatique

1.5.1 Stabilité

La stabilité d'un système de régulation automatique (voir définition rigoureuse chap.5) est une condition impérative afin que l'installation soit utilisable. Or, tout système contre-réactionné est potentiellement instable. La cause en est due au retard parfois trop important que peut subir un signal (ou certaines de ses composantes spectrales) se propageant à travers la boucle le ramenant vers l'entrée, i.e. la boucle de contre-action.

L'exemple de la douche illustre cela de manière intuitive (figure 1.19). En

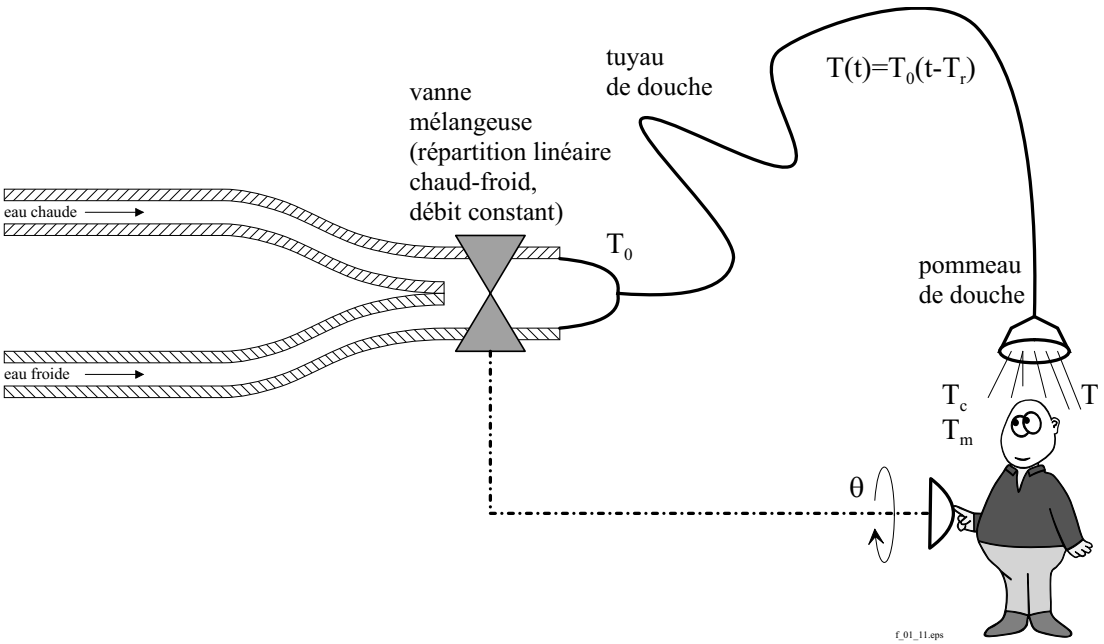


FIG. 1.19 – Régulation manuelle de la température d'une douche : schéma technologique. Pour l'exemple, on suppose que le débit est constant et que seule la répartition chaud-froid est modifiée (fichier source).

négligeant les pertes thermiques dans le tuyau, on a simplement :

$$T(t) = T_0(t - T_r) \tag{1.2}$$

où T_r est le temps nécessaire à l'eau pour se propager à travers le tuyau de douche. Dans le vocabulaire des systèmes asservis, on l'appelle *retard pur* (§ 5.4.3 page 200).

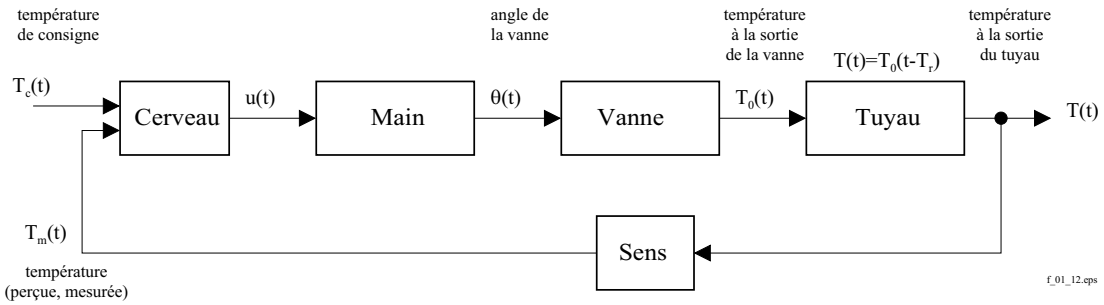


FIG. 1.20 – Régulation manuelle de la température d'une douche : schéma fonctionnel (fichier source).

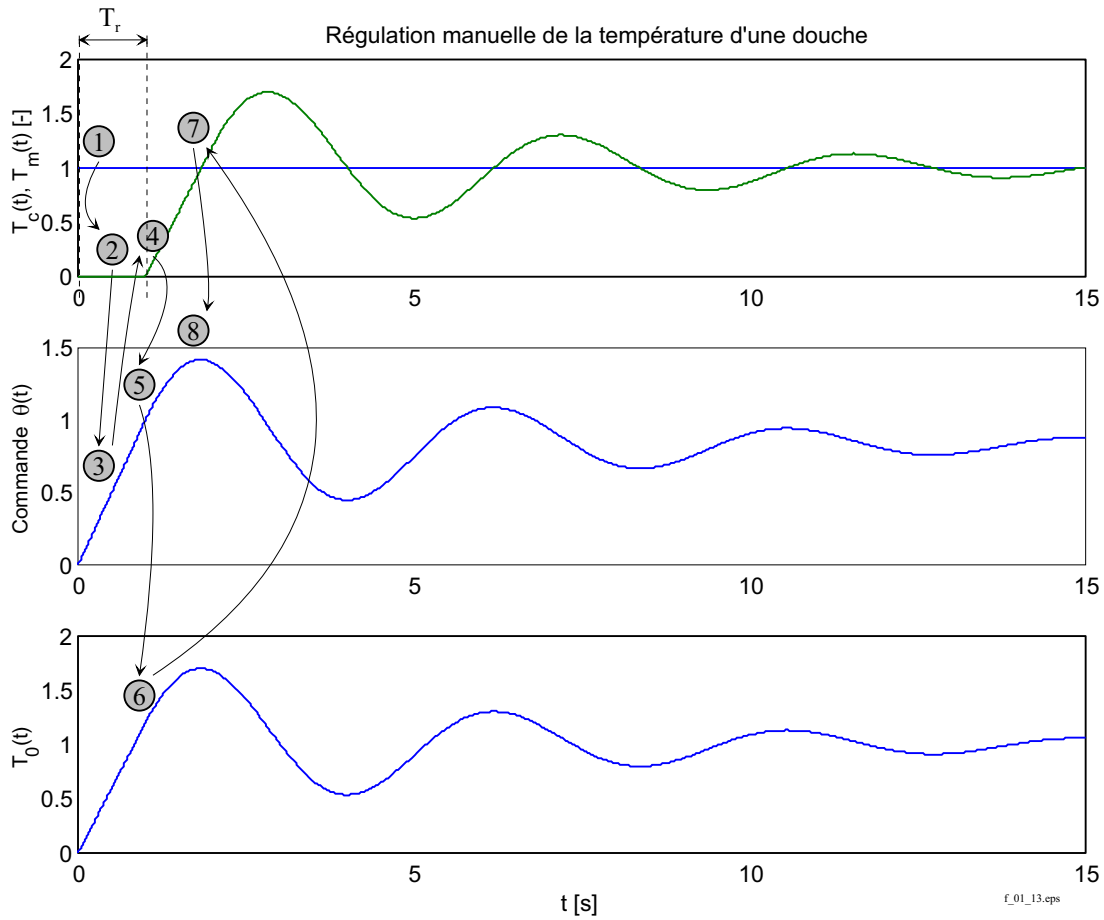


FIG. 1.21 – Régulation manuelle de la température d'une douche (`Demo_05.mdl`, `cal_Demo_05.m`) : cas de l'opérateur "pressé", i.e. d'un régulateur à gain élevé (fichier source).

Il y a donc dans cet exemple un **retard pur** T_r [s] entre l'action entreprise par l'opérateur sur la vanne pour modifier la température $T_m(t)$ et l'effet résultant. C'est le cas de l'opérateur "pressé" (figure 1.21 page précédente) qui met en évidence le phénomène d'instabilité :

1. L'opérateur commence sa douche et désire que l'eau soit à la température T_c ;
2. L'opérateur s'aperçoit que la température T_m de l'eau est bien inférieure à la valeur souhaitée T_c ;
3. L'opérateur ouvre modérément la vanne mélangeuse ;
4. L'opérateur s'aperçoit que l'ouverture de la vanne mélangeuse est sans effet notable ;
5. L'opérateur ouvre davantage la vanne mélangeuse ;
6. La température T_0 de l'eau directement à l'entrée du tuyau est alors à une valeur élevée ;
7. L'eau de température élévée parvient à l'opérateur : la température de l'eau T_m dépasse alors largement la consigne T_c ;
8. L'opérateur réagit en tournant la vanne dans l'autre sens.

Et le pire est à venir : l'eau beaucoup trop chaude parvient au bout du tuyau, provoquant une réaction vive de l'opérateur. Si celui-ci se comporte de manière symétrique (que l'eau soit trop chaude ou trop froide), l'eau va devenir exagérément froide et une oscillation de plus ou moins longue durée peut s'ensuivre. Le système observé ici n'est pas instable, mais présente des signes alarmants de tendance vers l'instabilité : il peut devenir incontrôlable si un opérateur encore plus pressé prend sa douche ...

1.5.2 Précision et rapidité

L'exemple de la régulation de vitesse (figure 1.13 page 23) avec régulateur P montre que même en régime permament constant (consigne constante, etc), une erreur subsiste : ce phénomène est malheureusement normal puisqu'en effet, pour que le moteur DC tourne, même à vide, à une vitesse non-nulle correspondant si possible à la consigne, il faut l'alimenter par une tension $u_a(t)$ aux bornes de l'induit que l'on s'imagine facilement différente de zéro. Or :

- $u_a(t) \approx u(t)$ dans le cas d'un amplificateur de puissance idéal ;
- $u_a(t) \neq 0\,[\mathrm{V}] \Longleftrightarrow u(t) \neq 0\,[\mathrm{V}]$;
- $u(t) \neq 0\,[\mathrm{V}] \Longleftrightarrow e(t) = \frac{u(t)}{K_p} \approx \frac{u_a(t)}{K_p} = E_\infty \neq 0\,[\mathrm{V}]$.

L'erreur E_∞ observée s'appelle **erreur statique**. On dit que le système asservi a du **statisme**. Dans le cas simple du moteur à vide, la tension $u_a(t)$ doit équilibrer la FEM (tension induite de mouvement) $e_m(t) = K_E \cdot \omega(t)$. On en déduit la valeur

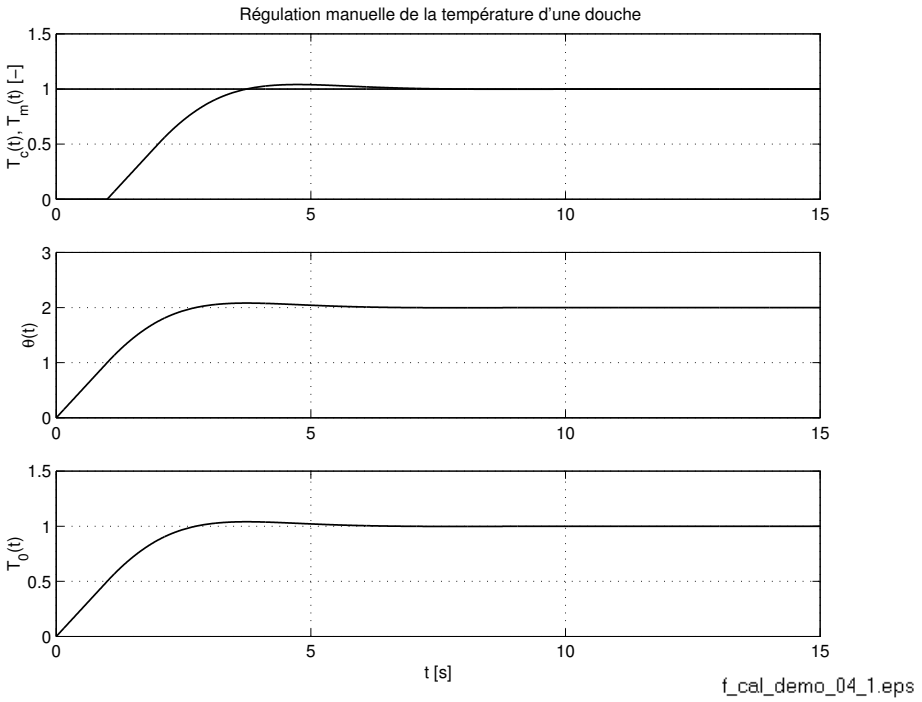


FIG. 1.22 – Régulation manuelle de la température d'une douche (`cal_Demo_04.m`) : cas de l'opérateur "calme" (fichier source).

de l'erreur E_∞ :

$$E_\infty = \frac{e_m(t \to \infty)}{K_p} = \frac{K_E \cdot \omega(t \to \infty)}{K_p} = \frac{K_E}{K_p} \cdot \omega(t \to \infty) \tag{1.3}$$

Pour diminuer la valeur de l'erreur statique E_∞, il faut logiquement augmenter le gain proportionnel K_p du régulateur. Ce faisant, l'action entreprise par le régulateur en présence d'erreur est de plus en plus énergique et la rapidité du système est également améliorée (figure 1.23 page suivante).

1.5.3 Dilemme stabilité-précision

Si, appliquant les conclusions du paragraphe précédent, on tente d'améliorer la précision et la rapidité en augmentant encore le gain K_p du régulateur proportionnel à 53, un phénomène analogue à celui observé avec la douche (figure 1.21 page 31) apparaît (figure 6.23 page 237) : le système asservi oscille de manière apparemment entretenue à une fréquence voisine de 129 [Hz], l'amplitude de l'oscillation ayant tendance à croître indéfiniment : le système est pratiquement instable. On peut comprendre intuitivement la cause de cette instabilité en

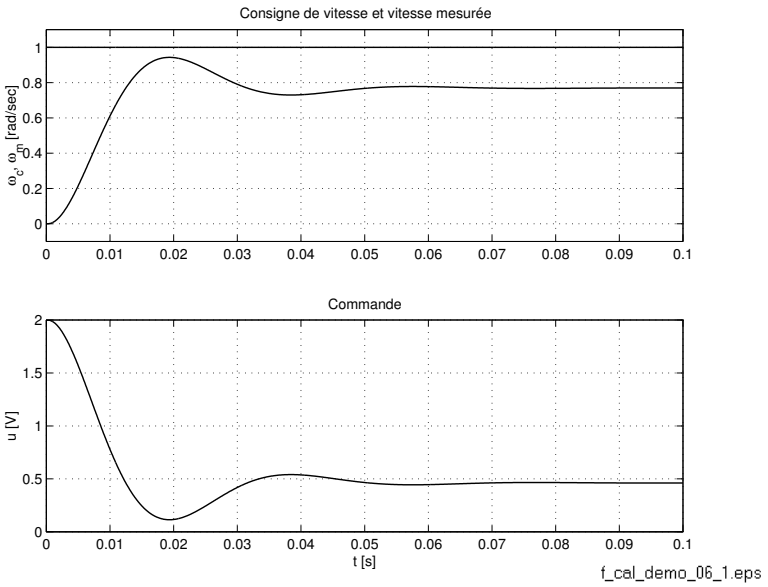


FIG. 1.23 – Régulation automatique de la vitesse d'un moteur DC, avec régulateur P, $K_p = 2$ (`Demo_02.mdl, cal_Demo_06.m`). L'erreur statique $E_\infty \approx 25\%$ est inférieure à celle de la figure 1.13 page 23 et le système est plus rapide (cal_demo_06.m).

examinant la réponse fréquentielle du système asservi en boucle ouverte, i.e. le comportement fréquentiel de la chaîne d'éléments (figure 1.25 page 36) allant de l'entrée du régulateur (l'erreur $e(t)$) à la sortie du capteur (la grandeur réglée $y(t)$). Le diagramme de Bode la figure 6.22 page 236 montre en effet qu'un signal d'erreur :

- ne subit, la fréquence d'environ 129 [Hz], aucune atténuation ou amplification, le gain de boucle à cette fréquence étant de $0\,[\text{dB}] = 1$;
- est déphasé, i.e. retardé, d'exactement -180 [°] à cette même fréquence.

En conséquence, la composante spectrale à 129 [Hz] du signal d'erreur $e(t)$ se propageant dans la boucle voit tout simplement son signe inversé, ce qui implique qu'à cette fréquence, il n'est pas contre-réactionné, mais réactionné (figure 1.27 page 38) : du fait de la structure bouclée, une augmentation de la grandeur de commande $u(t)$ provoque une augmentation de la grandeur réglée $y(t)$ qui provoque à son tour une augmentation de l'erreur $e(t)$ et par suite de la grandeur de commande. Le système s'emballe, n'est plus sous contrôle, ce qui peut aboutir à sa destruction si des limites physiques n'interviennent pas suffisamment tôt (échauffement du moteur, dépassement de la vitesse limite des roulements, etc). Les exemples de la douche (§ 1.5.1 page 30) et de la régulation de vitesse montrent que plus l'action du régulateur est violente (cas de l'opérateur "pressé",

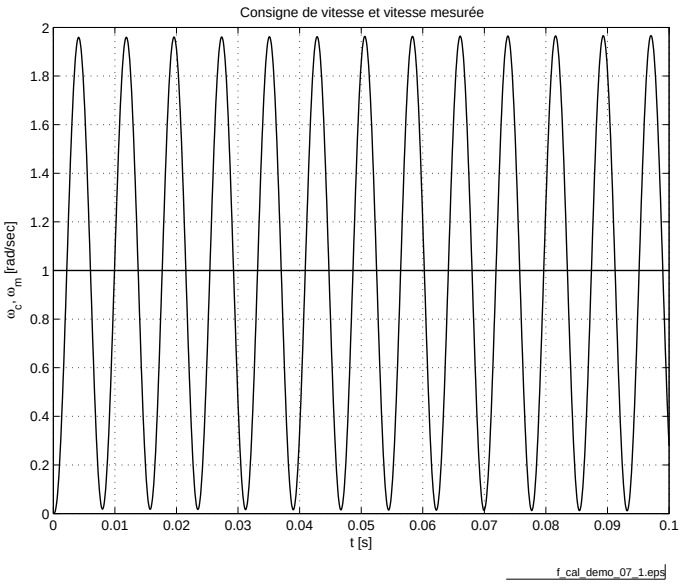


FIG. 1.24 – Régulation automatique de la vitesse d'un moteur DC, avec régulateur P, $K_p = 53$ (`Demo_02.mdl, cal_Demo_07.m`). Le système asservi est quasi instable (cal_demo_07.m).

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

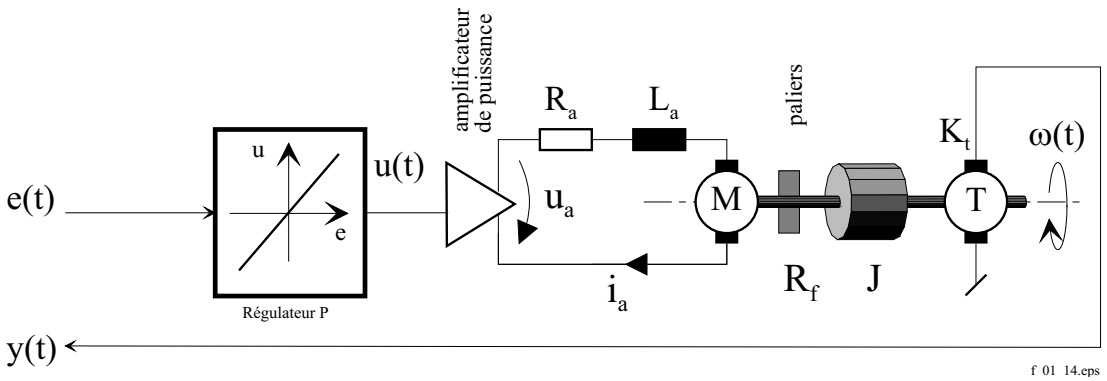


FIG. 1.25 – Obtention de la réponse harmonique en boucle ouverte : le signal d'entrée est l'erreur $e(t)$ et celui de sortie la grandeur réglée $y(t)$. Le résultat est donné sur la figure 6.22 page 236 (fichier source).

respectivement cas du régulateur P de vitesse avec $K_p = 53$), i.e. plus le gain du régulateur est élevé, plus il y a risque d'instabilité. Pour des raisons de stabilité, et par suite de sécurité de l'installation, il y a donc en principe intérêt à travailler avec des gains modestes.

Mais l'amélioration de la précision et de la rapidité de la régulation de vitesse évoquée au § 1.5.2 page 32 montre au contraire tout le bénéfice qu'il y a à augmenter les gains du régulateur, i.e. la *raideur* de l'asservissement.

Ces intérêts contraires constituent ce qui est communément appelé le *dilemme stabilité-précision*. Tout l'art de l'ingénieur automaticien consiste à trouver une solution satisfaisant simultanément les exigences de stabilité et de précision.

En pratique, un autre dilemme rend le travail de l'ingénieur-automaticien plus complexe : on pourrait l'appeler **dilemme précision-bruit**, lequel limite souvent les performances du système asservi bien avant celui de stabilité-précision. En effet, les performances des systèmes asservis sont souvent limitées non pas par des questions de stabilité, mais par des problèmes de bruit sur la commande, qui est en fait dû essentiellement à l'amplification (par exemple par le gain K_p d'un régulateur P) du bruit de mesure. Si $n(t)$ est ce bruit, sa propagation au travers du régulateur le transforme en un bruit de valeur $K_p \cdot n(t)$ de valeur d'autant plus élevée que le gain K_p est élevé, i.e. que les performances exigées sont de haut niveau (figure 4.36 page 168). Dans le cas ou la commande a une influence directe sur une grandeur mécanique, le bruit qu'elle contient devient même audible et peut par exemple accélérer des phénomènes d'usure. Pour des systèmes 100% électriques, le bruit de la commande peut provoquer un échauffement supplémentaire.

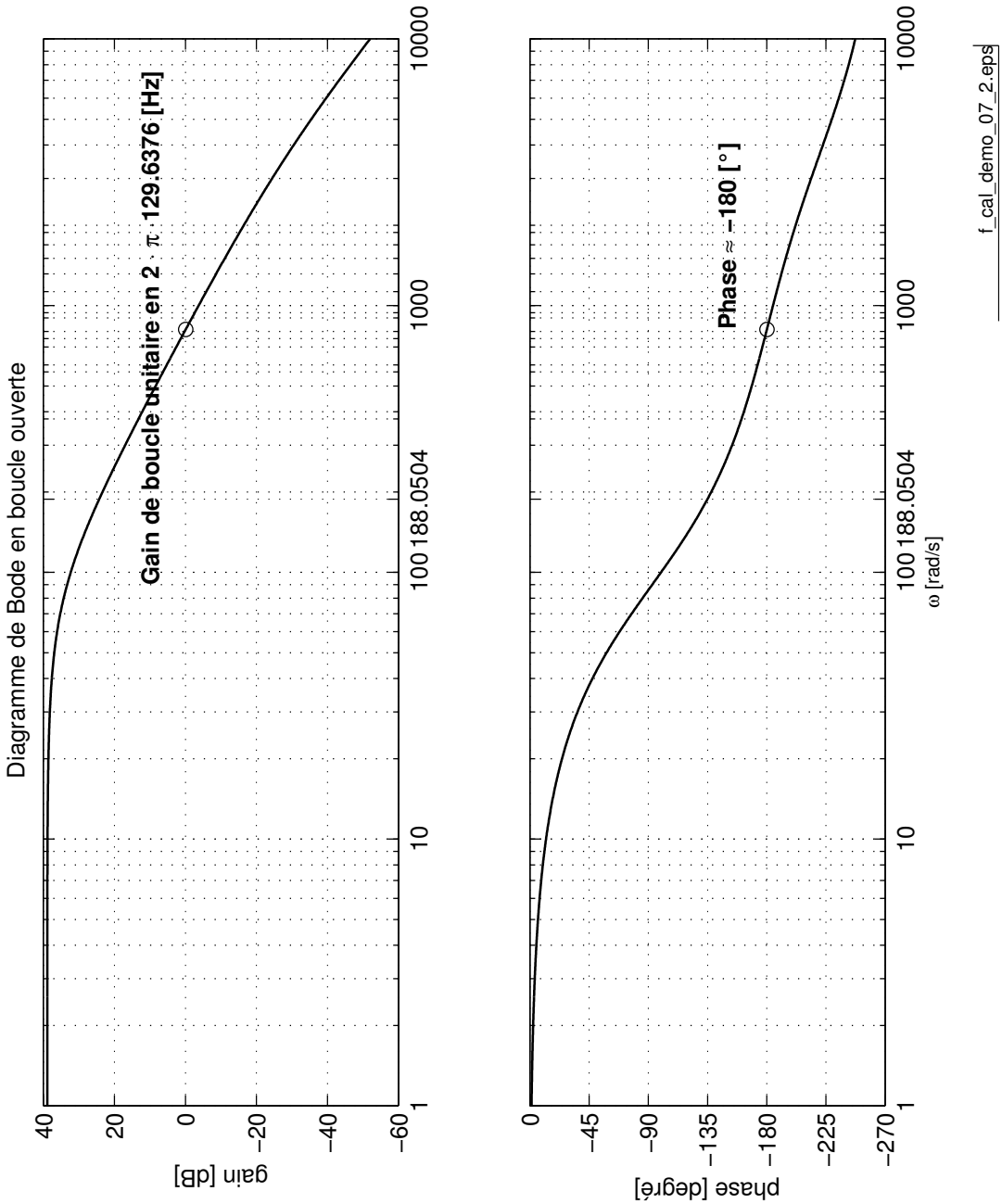


FIG. 1.26 – Réponse fréquentielle du système de régulation de vitesse en boucle ouverte (`Demo_02.mdl`, `cal_Demo_07.m`, $K_p = 53$) (fichier source).

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

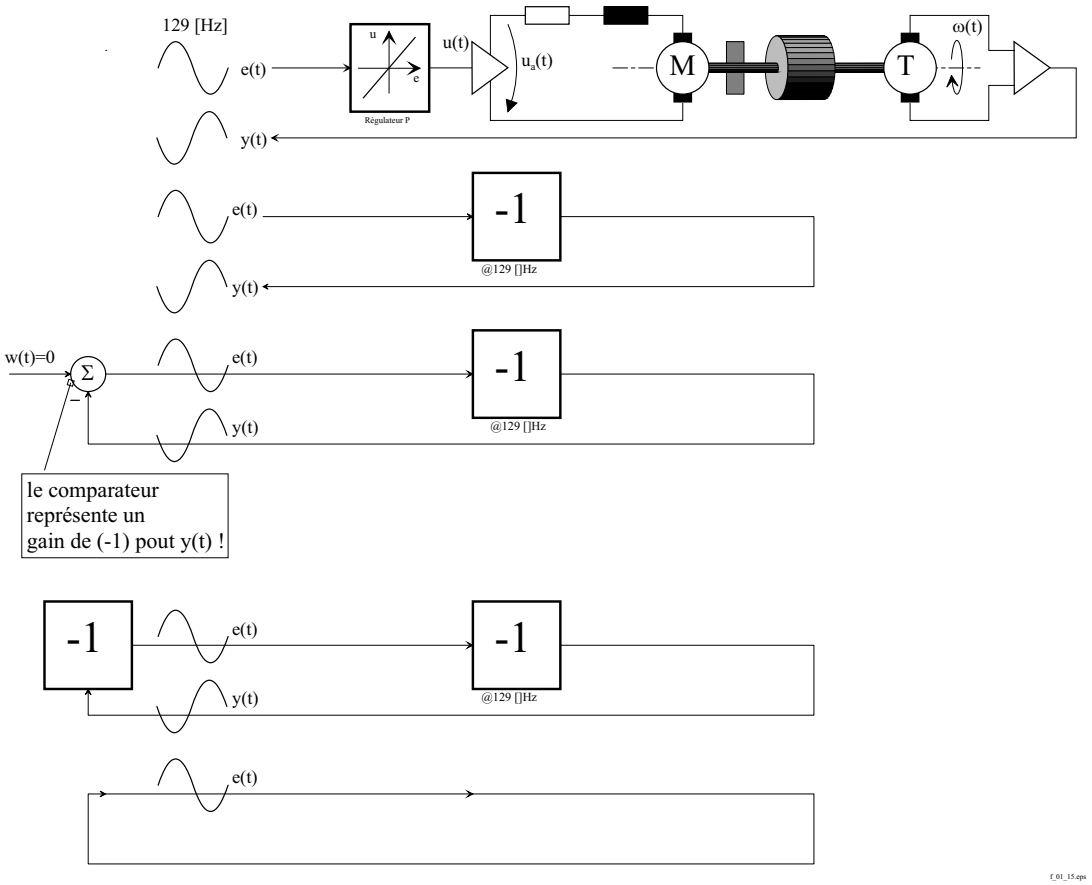


FIG. 1.27 – Régulation automatique de vitesse (`Demo_02.mdl, cal_Demo_07.m`) : pour $K_p = 53$, la composante spectrale à 129 [Hz] du signal d'erreur $e(t)$ voit tous les éléments de la boucle qu'elle traverse comme un simple gain $A(\omega)|_{\omega=2\cdot\pi\cdot 129\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right]} = -1$. La contre-réaction devient, pour cette fréquence, de la réaction (fichier source).

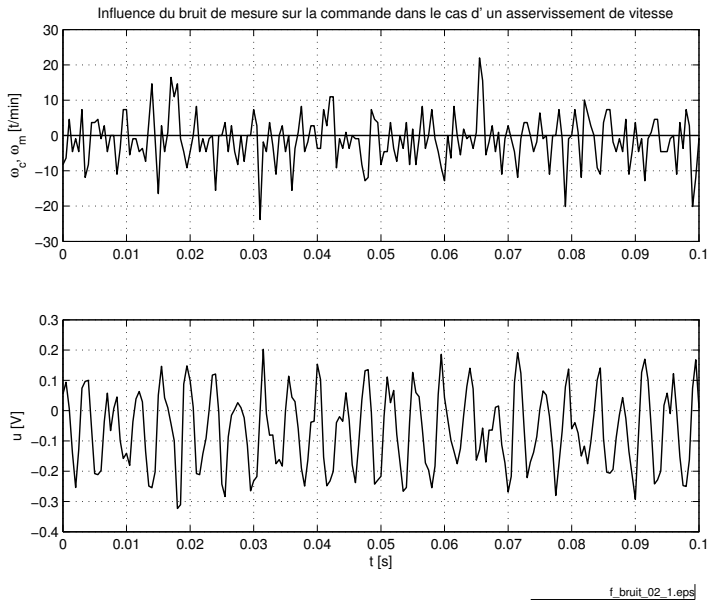


FIG. 1.28 – Influence du bruit de mesure d'un asservissement de vitesse (`bruit_02.m`). Bien que la consigne de vitesse ω_c soit à zéro, la vitesse mesurée ω_m s'en écarte continuellement, le régulateur réagissant au bruit de mesure (fichier source).

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

1.6 Principe de la régulation numérique

En régulation numérique, le régulateur est réalisé sous la forme d'un algorithme de traitement, programmé par exemple en langage C, s'exécutant à intervalles réguliers h [s]. h est la *période d'échantillonnage*. Cela signifie que la grandeur réglée $y(t)$ est échantillonnée, i.e. $y(t)$ n'est observée qu'aux instants d'échantillonnage

$$0 \cdot h, 1 \cdot h, 2 \cdot h, \ldots k \cdot h, \ldots \tag{1.4}$$

auxquels une conversion A/D est effectuée. L'algorithme du régulateur est alors exécuté et délivre une grandeur de commande $u(k \cdot h)$ également à intervalles réguliers h. L'avantage principal de la régulation numérique est la souplesse d'emploi,

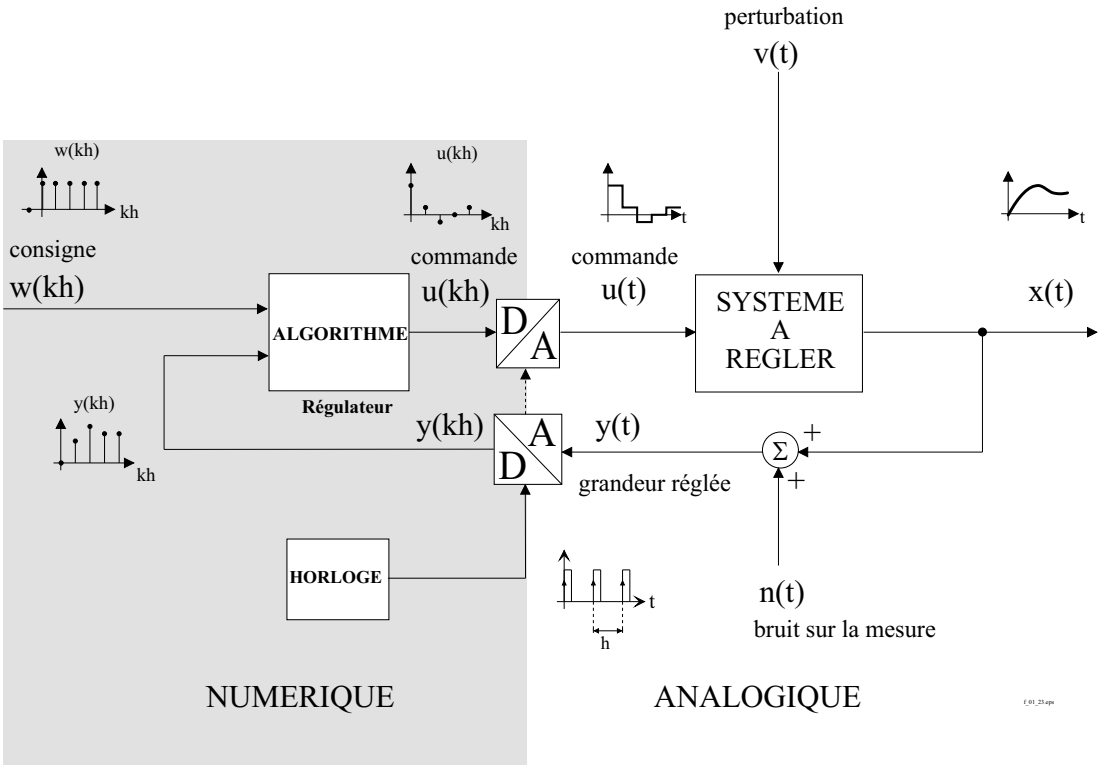


FIG. 1.29 – Principe de la régulation numérique : le régulateur prend la forme d'un algorithme programmé sur microprocesseur et exécuté en temps réel, i.e. impérativement à chaque période d'échantillonnage h. Les valeurs typiques de h vont de 10 [s] pour des systèmes de régulation de température à 50 [μs] pour des asservissements de courants dans les entraînements réglés. Pour ces derniers, une implantation du régulateur en assembleur sur processeur de signal (DSP) est quasi indispensable (fichier source).

puisqu'aussi bien les paramètres du régulateur que sa structure peuvent être ai-

sément adaptés à l'application [10].

```
void regulateur_PI()
{
      static float e[2] = {0.0,0.0};
      static float u[2] = {0.0,0.0};

      /* Lit le contenu du registre de sortie du convertisseur A/D */
      AD_Conv(&y);

      e[0] = w[0] - y[0]; /* forme l'écart */

      /* Calcule la commande u[k] */
      u[0] = u[1] + b0 * e[0] + b1 * e[1];

      /* Commande la conversion D/A de u[k] */
      DA_Conv(u[0]);

      u[1] = u[0];          /* mise à jour, gestion de la pile u */
      e[1] = e[0];          /* mise à jour, gestion de la pile e */
}
```

1.7 Généralités sur les systèmes

D'un point de vue technique, tout ensemble d'éléments, de composants, dispositifs, etc associés un but spécifié constitue un système (figure 1.30). Un système peut être simple ou complexe.

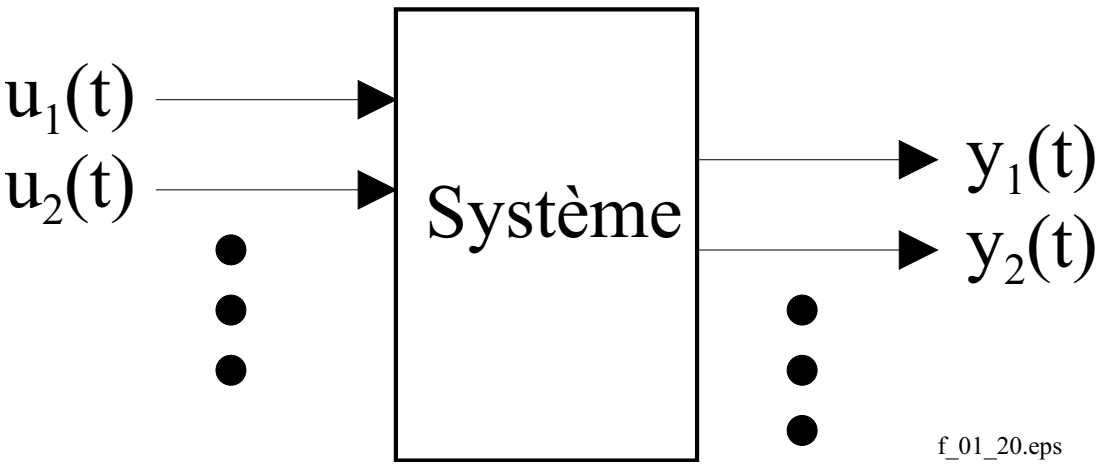


FIG. 1.30 – Système quelconque, multi-variable (fichier source).

Afin de pouvoir contrôler (régler, asservir) un système, il est nécessaire de connaître un certain nombre de ses propriétés :

- nombre et nature des entrées et des sorties ;
- comportement statique ;
- comportement dynamique (temps de montée, nombre et période des oscillations, etc) ;
- linéarité ou non-linéarités ;
- stabilité ;
- etc

On se limite ci-après à l'étude de systèmes mono-variable (1 entrée $u(t)$, 1 sortie $y(t)$, figure 1.31).

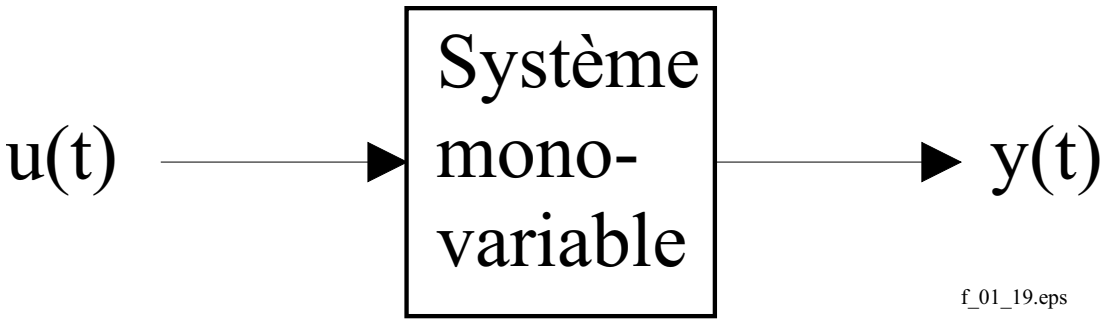


FIG. 1.31 – Système monovariable. Dans un contexte général, le signal d'entrée est appelé $u(t)$ et celui de sortie $y(t)$ (fichier source).

1.7.1 Comportement dynamique

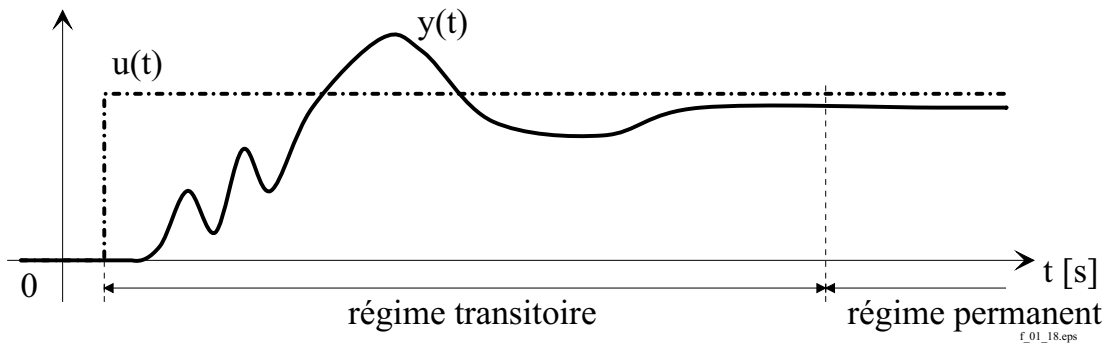


FIG. 1.32 – Exemple de réponse indicielle d'un système dynamique (fichier source).

Le comportement dynamique, i.e. en régime transitoire, est souvent difficile à qualifier (quantifier) sur la base de l'analyse temporelle seule. Il faut des outils

spécifiques tel que les transformations de Fourier et de Laplace.

1.7.2 Comportement statique

On considère le système étudié en régime permanent constant, i.e. lorsque $u(t) = \text{const.}$ et que $t \to \infty$. On peut alors en calculer le **gain statique** K :

$$K = \left. \frac{\lim_{t\to\infty} y(t)}{\lim_{t\to\infty} u(t)} \right|_{u(t)=\text{const.}} \tag{1.5}$$

1.7.3 Système statique

Un système est statique si sa sortie $y(t)$ à l'instant t ne dépend que de l'entrée $u(t)$ au même instant t.

Un tel système réagit donc instantanément, sans retard, sans régime transitoire ou temps d'établissement. Il est sans mémoire puisque le passé n'influence pas sa sortie présente. Un exemple de système statique est la résistance électrique idéale (figure 1.33).

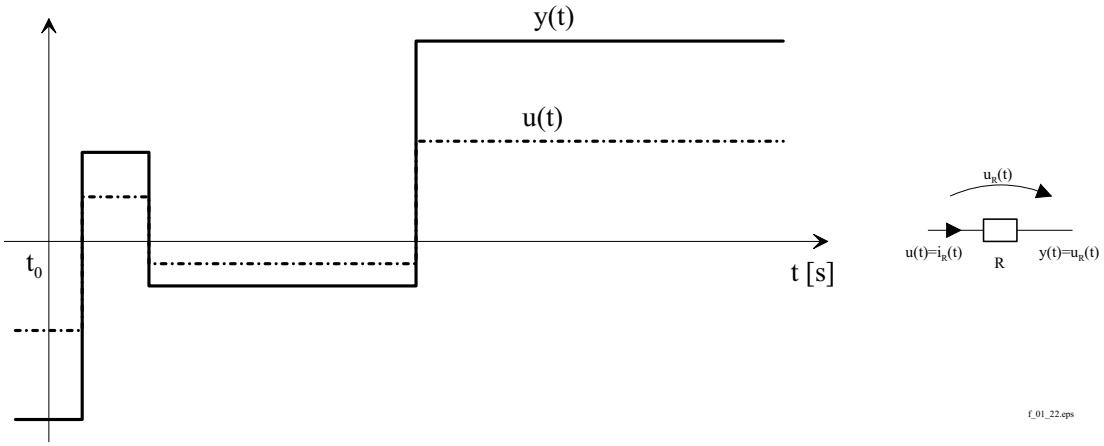


FIG. 1.33 – Exemple de système statique (fichier source).

Du point de vue de l'automaticien, un système statique peut sans autre être décrit, i.e. représenté, par son gain statique K.

1.7.4 Système dynamique

Un système est dynamique si sa sortie $y(t)$ dépend non seulement de l'entrée présente $u(t)$ mais aussi des entrées (sorties) passées.

Un exemple est la capacité électrique : définissant le courant de charge $i_c(t)$ comme signal d'entrée et la tension aux bornes $u_c(t)$ comme signal de sortie, on a :

$$y(t) = u_c(t) = \frac{1}{C} \cdot \int_{-\infty}^{t} i_c(\tau) \cdot d\tau = \frac{1}{C} \cdot \int_{-\infty}^{t} u(\tau) \cdot d\tau \tag{1.6}$$

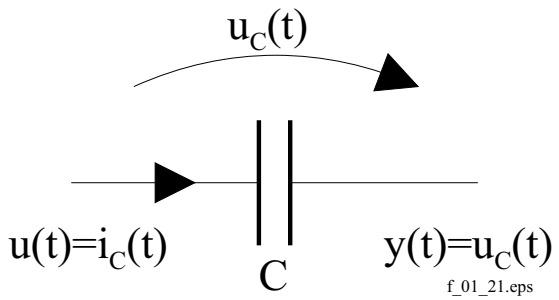


FIG. 1.34 – Exemple de système dynamique (fichier source).

Un système dynamique est représentable mathématiquement par n équations différentielles d'ordre 1, linéaires ou non. Dans le cas ou des paramètres tels que la résistance, l'inertie, etc peuvent être définis sans trop s'éloigner de la réalité physique, le système est à *constantes localisées* et les équations différentielles sont aux dérivées totales.

$$\begin{aligned}
\frac{dx_1}{dt} &= f_1\left(x_1(t), \ldots, x_n(t)\right) + g_1\left(u(t)\right) \\
\frac{dx_2}{dt} &= f_2\left(x_1(t), \ldots, x_n(t)\right) + g_2\left(u(t)\right) \\
&\vdots \\
\frac{dx_n}{dt} &= f_n\left(x_1(t), \ldots, x_n(t)\right) + g_n\left(u(t)\right) \\
y(t) &= h\left(x_1(t), \ldots, x_n(t)\right) + d\left(u(t)\right)
\end{aligned} \tag{1.7}$$

Dans la négative (propagation de la chaleur, lignes de transmission, mécanique des fluides, etc), on a affaire à un système à paramètres distribués et sa représentation doit se faire par des équations aux dérivées partielles. L'ordre de tels systèmes est infini, ce qui entraîne des difficultés importantes pour l'application des méthodes de régulation automatique. Cependant, pour des raisons pratiques, les systèmes à paramètres distribués sont dans la majorité des cas *approximés* par des systèmes à constantes localisées d'ordre élevé. Cette approximation est normalement effectuée par la méthode des éléments finis, largement utilisée dans les logiciels CAO.

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

1.7.5 Système linéaire

Un système est linéaire s'il obéit au **principe de superposition** :

- additivité : les causes ajoutent leurs effets (si $u_1(t) \rightarrow y_1(t)$ et $u_2(t) \rightarrow y_2(t)$, alors $u_1(t) + u_2(t) \rightarrow y_1(t) + y_2(t)$) ;
- homogénéité : il y a proportionnalité de l'effet à la cause (si $u(t) \rightarrow y(t)$ alors $a \cdot u(t) \rightarrow a \cdot y(t)$.

On se limitera, dans le cadre de ce cours, essentiellement aux systèmes linéaires, dynamiques, à constantes localisées, représentables dans le cas général par n équations différentielles linéaires d'ordre 1 :

$$\begin{aligned}
\frac{dx_1}{dt} &= a_{11} \cdot x_1(t) + a_{12} \cdot x_2(t) + \ldots + a_{1n} \cdot x_n(t) + b_1 \cdot u(t) \\
\frac{dx_2}{dt} &= a_{21} \cdot x_1(t) + a_{22} \cdot x_2(t) + \ldots + a_{2n} \cdot x_n(t) + b_2 \cdot u(t) \\
&\ldots \\
\frac{dx_n}{dt} &= a_{n1} \cdot x_1(t) + a_{n2} \cdot x_2(t) + \ldots + a_{nn} \cdot x_n(t) + b_n \cdot u(t)
\end{aligned} \tag{1.8}$$

Ces n équations peuvent aussi être présentées sous la forme d'une seule équation différentielle d'ordre n :

$$\begin{aligned}
\frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \cdot \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \ldots + a_1 \cdot \frac{dy}{dt} + a_0 \cdot y(t) = \\
b_m \cdot \frac{d^m u}{dt^m} + b_{m-1} \cdot \frac{d^{m-1} u}{dt^{m-1}} + \ldots + b_1 \cdot \frac{du}{dt} + b_0 \cdot u(t)
\end{aligned} \tag{1.9}$$

L'*ordre* d'un système dynamique linéaire est le nombre d'équations différentielles d'ordre 1 nécessaires à sa modélisation.

Des exemples de non-linéarités se trouvent dans des cas de figures tels que :

- la saturation magnétique provoquant une variation de la constante de couple d'un moteur électrique : $K_T \left[\frac{\text{N·m}}{\text{rad}}\right] = K_T(i)$ (figure 1.35 page suivante) ;
- le frottement sec ou visqueux agissant sur l'arbre d'un moteur électrique dépend typiquement de la vitesse de rotation $T_{\text{frottement}} = T_{\text{frottement}}(\omega, \text{signe}(\omega))$ (figure 1.36 page suivante) ;

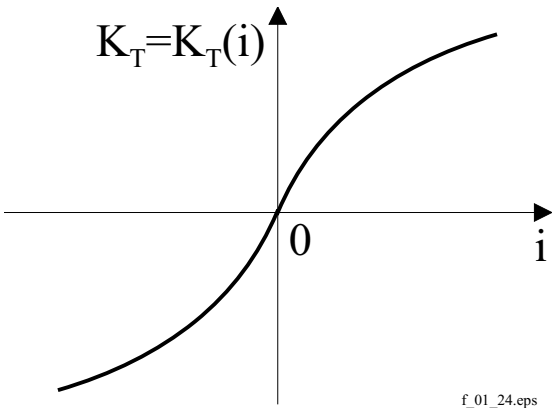


FIG. 1.35 – Non-linéarité de la constante de couple K_T d'un moteur électrique consécutive à la saturation magnétique (fichier source).

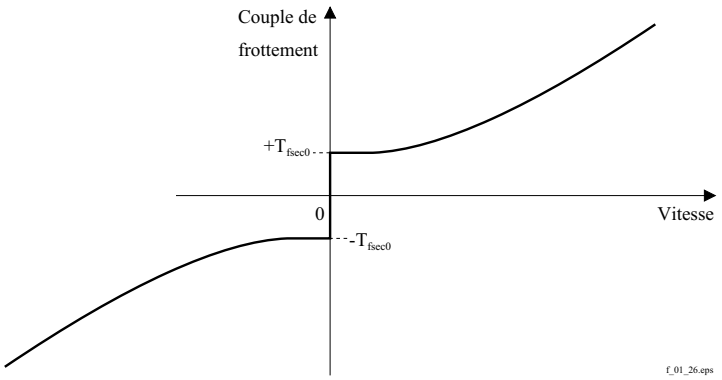


FIG. 1.36 – Non-linéarité due au frottement sec (fichier source).

– la limitation de la grandeur de commande $u(t)$ est nécessaire pour protéger le système à régler : dans le cas où $u(t)$ entre en limitation, le système de régulation devient non-linéaire (figure 1.35) ;

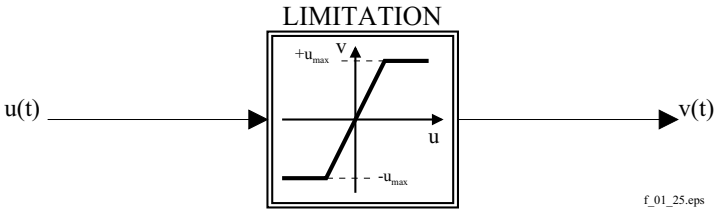


FIG. 1.37 – Non-linéarité due à la limitation nécessaire du signal de commande (fichier source).

– un bras articulé de robot se déployant voit son inertie J varier en fonction de la position : $J = J(\theta)$ (voir exemple au § 2.A.6 page 117).

Dans tous ces cas, on vérifie en effet que le principe de superposition ne s'applique pas.

Une méthode de linéarisation de tels systèmes sera présentée au § 2.A.6 page 117.

1.8 Autres exemples de systèmes asservis

On cite pêle-mêle ci-dessous d'autres exemples pratiques faisant intervenir de la régulation automatique :

Positionnement du bras d'un robot ou d'un élément d'une machine La position est mesurée au moyen d'un capteur adhoc (resolver, encodeur incrémental, règle optique, potentiomètre rotatif, etc, voir [9]), comparée à la consigne. Après traitement par le régulateur, la commande de l'actionneur (moteur) devrait tendre à diminuer l'erreur de position. Lorsque la consigne position évolue dans le temps, il faut alors la poursuivre, i.e. on parle de poursuite de trajectoire ou de "tracking".

Alimentation stabilisée Par exemple, les stabilisateurs de tension LM78XX permettent de garantir, sous certaines conditions et avec des précisions statique et dynamique données, une tension d'alimentation à par exemple $V_{cc} = 5\,[\mathrm{V}]$ (figure 1.38 page suivante).

La "trotinette" Segway Ce véhicule de transport révolutionnaire (figure 1.39) ne peut être maintenu en position verticale que par la mise en oeuvre des techniques de la régulation automatique. Le problème du maintien en équilibre vertical est analogue à celui de la fusée ou du célèbre pendule inversé.

Pilote automatique d'un avion Permet notamment à celui-ci de se maintenir à une altitude spécifiée malgré les effets de vents ascendants par exemple.

Régulateur de vitesse pour voiture de tourisme Appelé également "tempomat" (voir exercice). L'ABS (système anti-blocage) est également un exemple de système de régulation automatique, de même que les dispositifs de parcage automatique. Dans un autre registre, des projets visent à organiser, par exemple sur les trajets autoroutiers, les véhicules en convoi, chaque véhicule suivant automatiquement celui qui le précède à une distance ajustée en fonction de la vitesse.

Climatisation d'immeubles, de véhicules

Paliers magnétiques Magnetic bearings voir http ://www.mecos.com et http ://www.revolve.com/Technology/technology.html Dans certaines applications, les contraintes de vitesse, d'usure, de propreté, de fiabilité, de vibrations ou d'échauffement sont telles que les paliers mécaniques ou à air ne conviennent pas. Ils sont remplacés par des paliers magnétiques, un système de régulation assurant le centrage de l'axe (rotor ferromagnétique) en

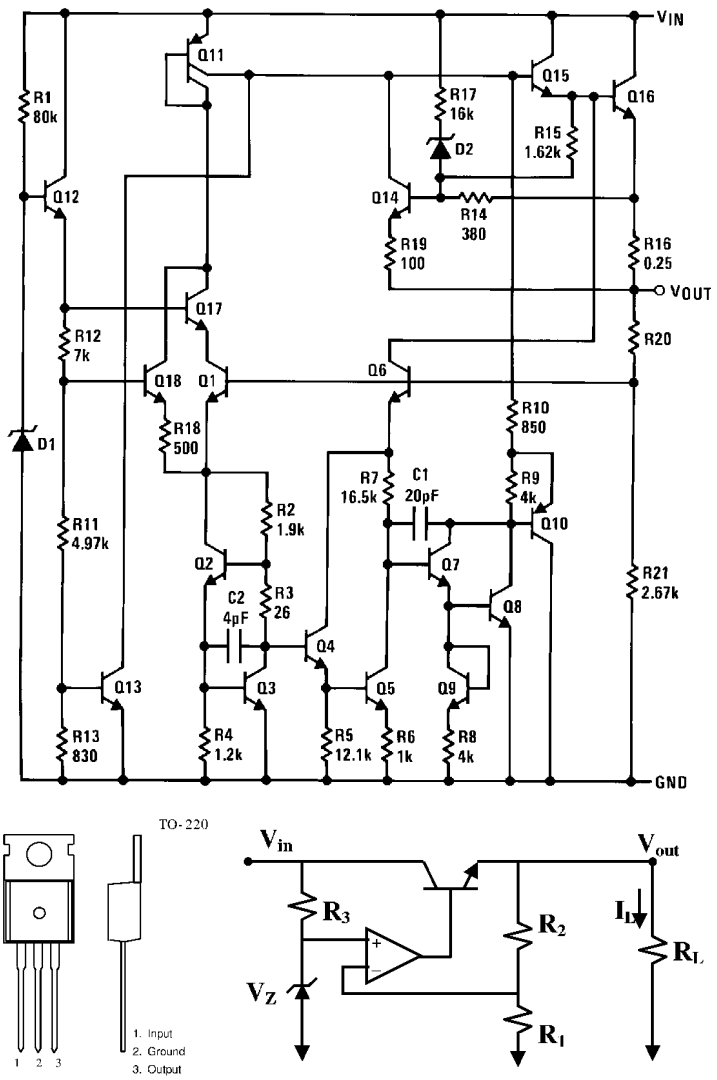


FIG. 1.38 – Régulateur de tension LM78XX, schéma équivalent du circuit intégré, boîtier, schéma technologique équivalent.





FIG. 1.39 – Véhicule inédit "Segway" (http ://www.segway.com/, figure de droite selon http ://www.control.lth.se/ bjorn/controlalpha/calpha.html, lettre B, "The control alphabet").

rotation en agissant sur un champ d'induction. Pour ces applications, les régulateurs sont typiquement numériques et implantés sur des DSPs (Digital Signal Processors).

Convertisseur R/D Les convertisseurs R/D (resolver to digital) fonctionnement selon ce principe [9] (figure 1.41 page 51). Ces méthodes sont largement mises en oeuvre dans d'autres applications pour produire des mesures indirectes de grandeurs physiques (*methods for estimating the value of an unknown quantity by repeated comparison to a sequence of known quantities*).

Convertisseurs A/D à compensation Appelés aussi convertisseurs de type "tracking". Voir figure 1.42 page 52.

Convertisseurs A/D delta sigma Voir figure 1.43 page 52.

PLL La boucle asservie en phase (PLL) est un exemple de système asservi (figure 1.44 page 53).

Circuits électroniques L'amplificateur opérationnel, par exemple en montage suiveur, n'est autre qu'un système asservi dont la grandeur réglée est la tension de sortie et la consigne la tension appliquée sur l'entrée +.

L'être humain en position verticale A noter que ce même être humain est en difficulté dans cette tâche lorsque que ses réflexes ou son attention sont diminués (pour cause de fatigue, alcool, médicaments) : il est plus lent à réagir, et son comportement peut devenir oscillatoire (titubant . . .), par un phénomène identique à celui décrit au § 1.5.1 page 30.



FIG. 1.40 – Paliers magnétiques : principe, actionneur magnétique radial, exemple d'une pompe turbomoléculaire aux paliers magnétiques, exemple d'une soufflante pour laser CO_2 de puissance.

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

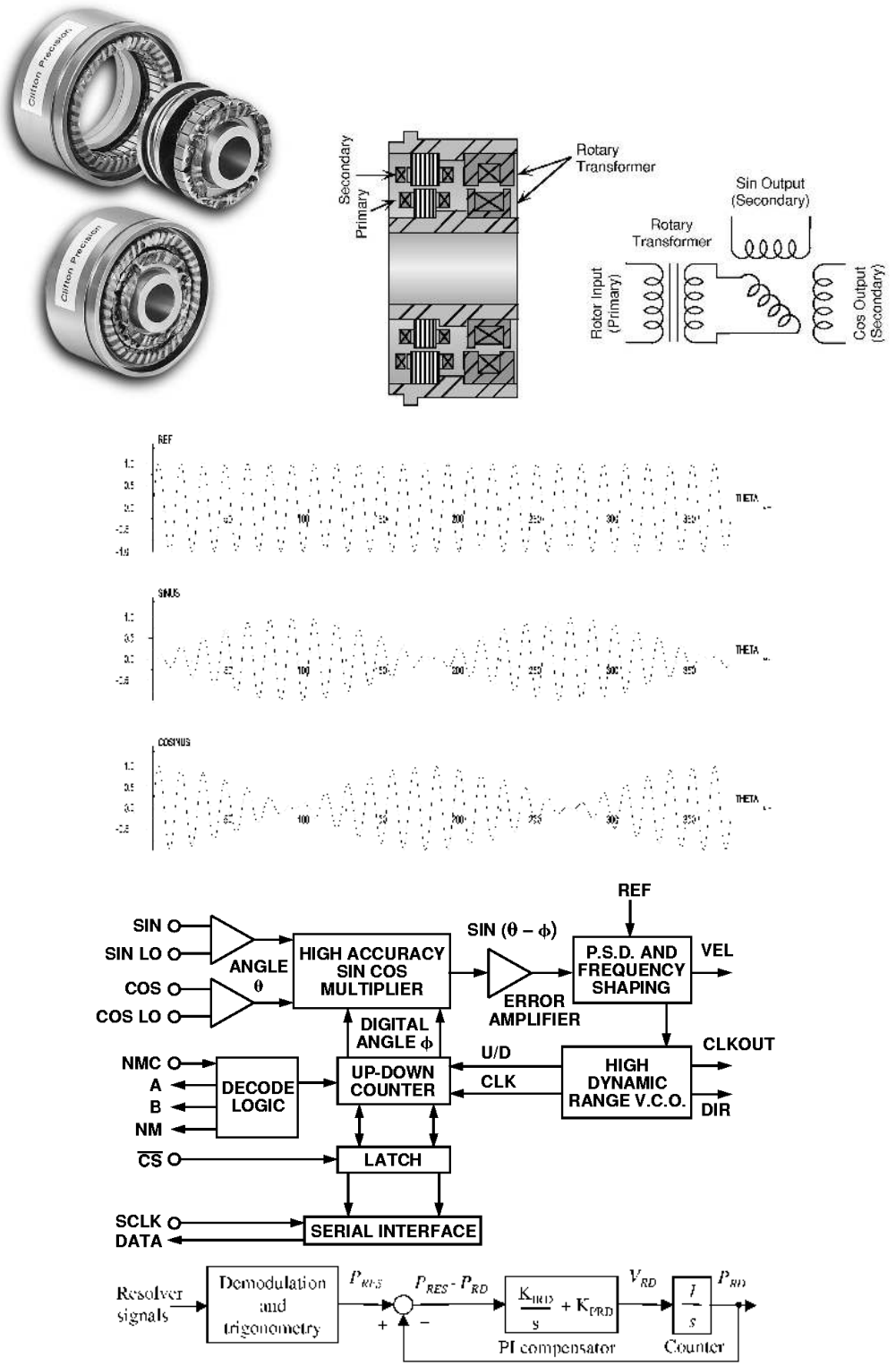


FIG. 1.41 – Resolver : construction, signaux, circuit AD2S90 d'Analog Devices permettant extraire la position angulaire, schéma fonctionnel.

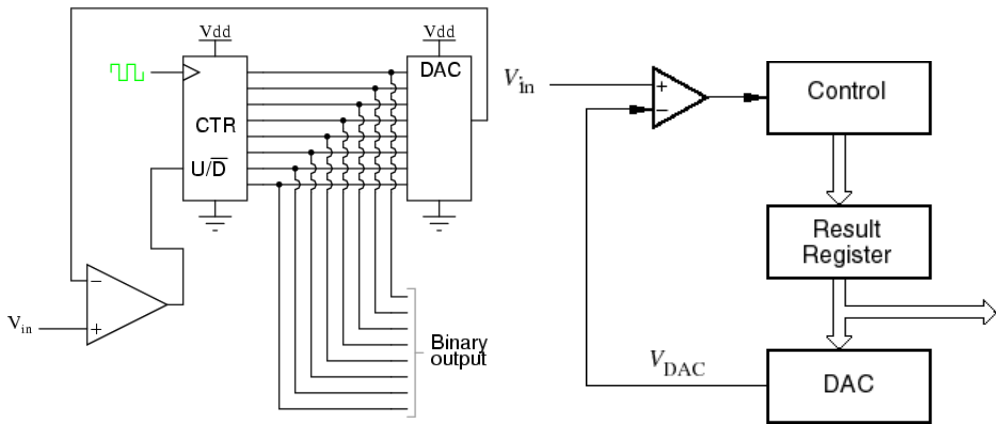


FIG. 1.42 – Convertisseurs A/D de type "tracking".

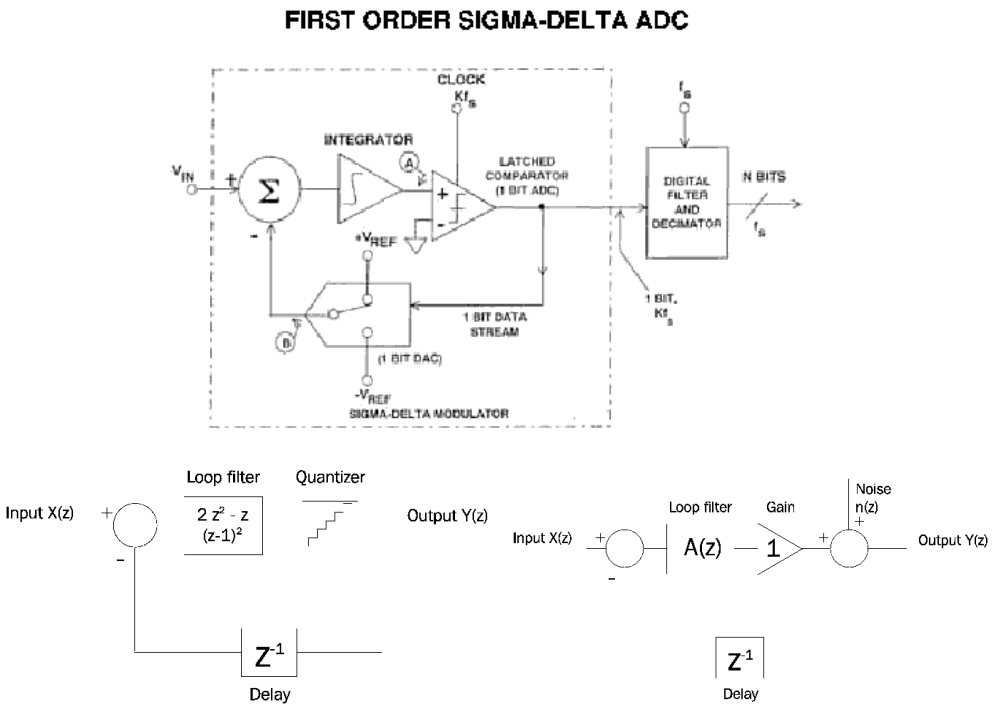


FIG. 1.43 – Convertisseurs A/D delta sigma : principe, schéma fonctionnels équivalents.

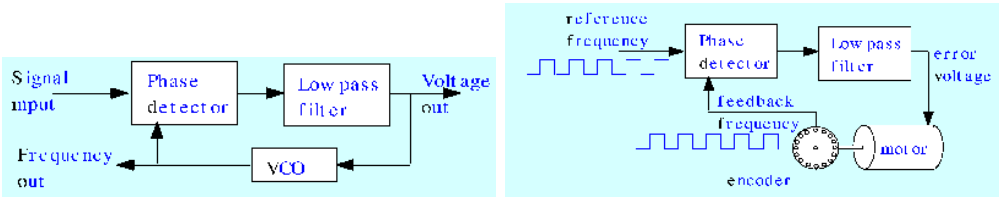


FIG. 1.44 – PLL, schéma fonctionnel et application à l'asservissement de position d'un moteur www.hep.ph.ic.ac.uk/ hallg/.

L'être humain conduisant son véhicule La consigne est la trajectoire à suivre, les yeux sont les capteurs reconstituant la situation exacte du véhicule sur la route et la commande consiste à ajuster la pédale des gaz.

1.9 Le projet d'automatique

De manière schématique, un projet de régulation automatique fait intervenir les tâches suivantes :

Analyse et conception : compréhension du fonctionnement de l'installation et des ses applications. Le plus souvent, l'installation existe et l'ingénieur chargé de l'automatisation devra "faire avec". Un contexte plus favorable se présente lorsque l'installation est en phase de conception. Il n'est alors pas trop tard pour influencer le développement afin de faciliter l'automatisation et par conséquent augmenter les performances. La présence de non-linéarités, rendant l'analyse de l'installation et la conception des régulateurs beaucoup plus difficiles, doit ainsi être limitée autant que possible. De même, le choix des capteurs est une phase importante où l'avis de l'automaticien doit être pris en compte, notamment par rapport à leur dynamique et à leur résolution ;

Elaboration du cahier des charges : sur la base des connaissances des applications visées, détermination du cahier des charges spécifiant les performances à atteindre (précision, rapidité, etc) ;

Modélisation : modélisation du comportement dynamique de l'installation au moyen des lois physiques la gouvernant. La complexité du modèle à obtenir dépend des spécifications du cahier des charges (rapidité, bande passante en boucle fermée, etc). Plus celui-ci sera exigeant (par exemple un temps de régulation très court), plus l'effort de modélisation se devra d'être important ;

Identification : détermination des valeurs numériques des paramètres du modèle, par des essais sur l'installation, par l'obtention de données catalogue, par des analyses de type éléments finis pour le calcul de structures complexes ;

Design du régulateur : choix de la stratégie de régulation, compte tenu des résultats des phases d'identification et de modélisation, des performances du matériel où sera implanté cette stratégie ainsi que du cahier des charges ;

Simulation : si cette phase révèle des difficultés quant au respect du cahier des charges, celui-ci peut/doit être revu, de même que la conception de l'installation si c'est encore possible. De même, les actionneurs (moteurs électriques par exemple) peuvent être dimensionnés avec un maximum d'informations (couple dynamique nécessaire, etc) ;

Implantation : implantation de la stratégie de régulation. Le plus souvent, il est nécessaire de spécifier, concevoir et réaliser un circuit électronique de commande, i.e. le régulateur, ou de programmer le microcontrôleur ou le processeur de signal où le code du régulateur numérique sera exécuté, etc ;

Validation : test in situ, validation.

On relève que le projet d'automatique se rapporte à l'ensemble du système et non pas à un composant unique. Par ailleurs, il n'est pas fait mention d'une technologie ou d'une classe de processus particuliers : il s'agit là en effet de caractéristiques notables de l'automatique,

- l'**approche système**, exigeant notamment une définition claire des entrées et des sorties de chaque sous-système (réalisés souvent dans des technologies différentes : mécanique, électronique, logiciel, pneumatique, etc) ainsi que des relations statiques et dynamiques entre-elles ;
- l'indépendance quasi totale des méthodes et outils vis-à-vis de la technologie mise en oeuvre (mécanique, chimie, électronique, etc), requérant néanmoins de l'ingénieur en automatique des **compétences pluridisciplinaires** avérées. Typiquement, l'ingénieur en automatique contribuera à la réalisation de l'électronique et/ou du logiciel de commande.

En pratique, la démarche énoncée ci-dessus n'est pas toujours suivie à la lettre, principalement pour des raisons de temps mais parfois également de méconnaissance de l'automatique. Il en résulte en certains cas l'impossibilité de satisfaire le cahier des charges, les limites de performances provenant de l'installation elle-même, dont la conception n'a pas tenu compte des aspects d'automatisation. Le temps initialement gagné lors de cette phase est perdu lors de celle de mise en service et de test. Dans le meilleur des cas, les défauts de l'installation peuvent élégamment être compensés de manière active par l'électronique de commande, i.e. le régulateur, mais ce n'est malheureusement pas toujours possible. Une des difficultés rencontrées est que l'automatisation de la machine est souvent réalisée par des fournisseurs externes, lesquels ne sont en général pas impliqués directement dans la phase de conception.

Une des raisons de cet état de fait est que l'automatique manque de visibilité : il s'agit d'une technique "cachée", non clairement matérialisable, prenant la forme d'algorithmes de traitement (régulateurs) et d'analyses mathématiques.

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

1.10 L'automatique : un domaine important pour tous les domaines de la technique et plus encore ...

Fait remarquable, l'application des méthodes de l'automatique ne se limite pas aux domaines de l'ingénierie mais s'étend sans difficulté aux systèmes biologiques comme le corps humain, dont on cherche par exemple à contrôler, i.e. à réguler le taux de sucre dans le sang ou la pression artérielle. Il en va de même des systèmes économiques, pour lesquels des données (i.e. des variables, des signaux) comme le taux de chômage ou l'inflation sont par exemple influencés par la politique fiscale des gouvernements [11].

Un avantage indirect apporté par un bon asservissement est l'optimisation du rendement énergétique : avec un régulateur bien ajusté, la commande de l'actionneur tend vers celle qui correspond à la puissance instantanée strictement nécessaire. L'exemple de la figure 1.45 page suivante montre la consommation d'énergie électrique nécessaire pour effectuer avec un servo-moteur un mouvement de rotation de 100 [rad], le contrôle du courant étant de performance moyenne (la commande scalaire) dans un cas et de qualité supérieure dans l'autre (commande vectorielle). On observe clairement tout le bénéfice qu'il y a à mettre en oeuvre une stratégie de commande bien adaptée. Comme environ les 50% de la consommation d'énergie électrique des pays occidentaux est imputable aux moteurs électriques entraînant aussi bien des machines de production industrielle que des installations domestiques (e.g. machines à laver le linge), la régulation automatique de ceux-ci constitue un élément déterminant dans la rationalisation de l'utilisation de l'énergie. Des considérations analogues peuvent être faites au sujet du dimensionnement d'organes de machines ou de véhicules : grâce aux techniques de l'automatique, des choix plus économiques et plus rationnels peuvent être effectués.

S'il ne fallait retenir qu'une seule des compétences qu'offrent les méthodes et les techniques de l'automatique, c'est assurément celle permettant d'analyser, de comprendre et d'influencer la dynamique des systèmes en général qui serait choisie. Cela constitue bel et bien l'apport majeur de l'enseignement de l'automatique dans la formation d'un ingénieur, justifiant l'importance quantitative lui étant accordée dans la plupart des filières.

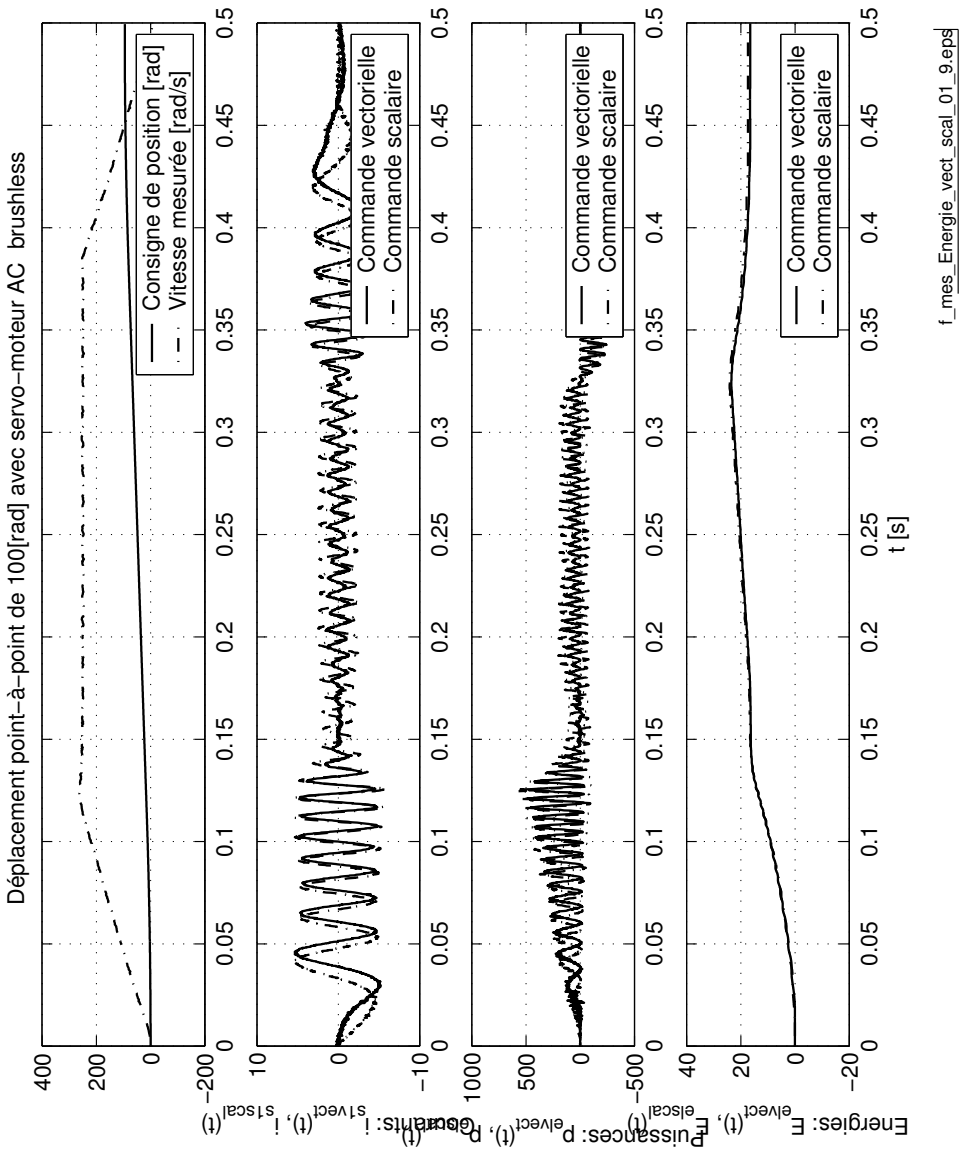


FIG. 1.45 – Consommation d'énergie électrique dans le cas d'un mouvement de 100 [rad]. Le profil de position a l'allure de 2 arcs de parabole raccordés par une rampe, celui de vitesse prenant la forme d'un trapèze. On observe qu'en palier, i.e. à vitesse constante, un courant notable est consommé dans le cas de la commande scalaire, résultant en une consommation d'énergie plus importante pour le même mouvement. Outre le surcoût occasionné par cette dépense d'énergie, le problème est l'évacuation des pertes thermiques supplémentaires ainsi provoquées.