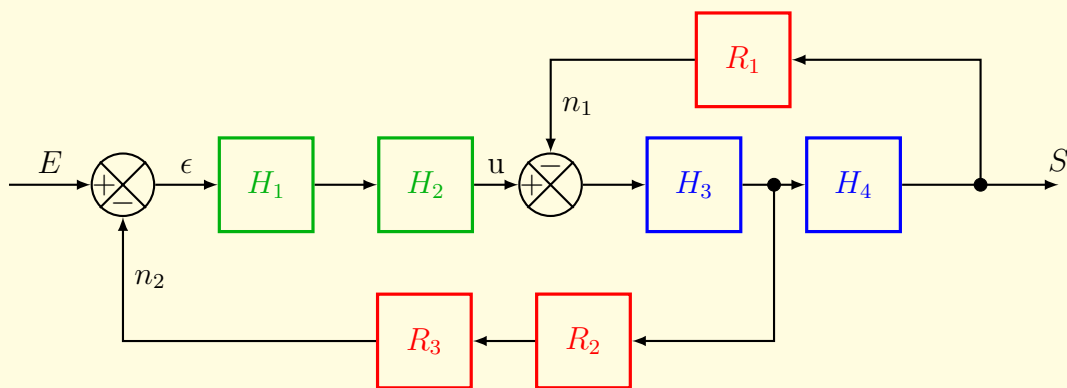


# Systèmes mécaniques et automatiques

*Notes de cours IngéSpé  
Automatique*



ANNÉE 2019–2020



# Systèmes mécaniques et automatiques

*Notes de cours IngéSpé  
Automatique*

Filipe Manuel Vasconcelos

écrit sous L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X, TikZ

v1.0 janvier 2018.

v2.0 été 2018.

v3.0 février-mai 2019.

Ce document est mis à disposition selon les termes de la licence  
Creative Commons “Attribution - Partage dans les mêmes conditions 4.0 International”.



Ce document est destiné aux étudiants du cycle prépa de l'ESME SUDRIA. En constante évolution, il ne pourra que s'améliorer avec votre concours. N'hésitez pas à me communiquer vos remarques et/ou corrections par mail : [filipe.vasconcelos@esme.fr](mailto:filipe.vasconcelos@esme.fr)

# Table des matières

<b>Table des matières</b>	<b>5</b>
<b>Avant-propos</b>	<b>9</b>
<b>Chapitre 1 Systèmes linéaires, continus...</b>	<b>11</b>
1. Introduction	12
2. Définition SLCI	13
2.1. Système	13
2.2. Système à temps continu	14
2.3. Système linéaire	14
2.4. Système causal	14
2.5. Système invariant	15
2.6. Modélisation d'un système linéaire continu et invariant	15
3. Modélisation d'un signal	17
3.1. Propriétés générales des signaux continus (analogiques)	18
3.2. Signaux usuels rencontrés...	19
4. La transformée de Laplace	26
4.1. Définition	26
4.2. Propriétés	27
4.3. Transformées des signaux usuels	30
4.4. Application de la transformée de Laplace	33
5. Fonction de Transfert	38
5.1. Définition	38
5.2. Fonction de transfert et réponse impulsionnelle	38
5.3. Représentation de la fonction de transfert	39
<b>Chapitre 2 Schéma fonctionnels</b>	<b>45</b>
1. Introduction	46
2. Éléments de base des schémas fonctionnels	46
3. Transformation des schémas fonctionnels	48
3.1. Réduction de schéma-bloc	48
3.2. Manipulation de schéma-bloc	51
4. Cas d'entrées multiples	52
5. Réduction de schéma-bloc de grande taille	54
5.1. Exemple à entrée simple	54
5.2. Exemple à entrées multiples	56

6.	Graphe de fluence . . . . .	57
6.1.	Définitions . . . . .	57
6.2.	Algèbre des graphes de fluences . . . . .	58
6.3.	Règle de Mason . . . . .	62
<b>Chapitre 3</b>	<b>Modélisation des SLCI</b>	<b>65</b>
1.	Introduction . . . . .	66
2.	Système du premier ordre . . . . .	67
2.1.	Définition d'un système du premier ordre . . . . .	67
2.2.	Fonction de transfert d'un système du premier ordre . . . . .	67
2.3.	Pôle de la fonction de transfert du premier ordre . . . . .	67
2.4.	Réponses temporelles d'un système du premier ordre . . . . .	67
3.	Système du second ordre . . . . .	71
3.1.	Définition d'un système du second ordre . . . . .	71
3.2.	Fonction de transfert d'un système du second ordre . . . . .	72
3.3.	Pôles de la fonction de transfert du second ordre . . . . .	72
3.4.	Réponses temporelles d'un système du second ordre . . . . .	74
3.5.	Cas particulier de l'oscillateur harmonique . . . . .	88
4.	Autres modèles particuliers . . . . .	90
4.1.	Gain pur . . . . .	90
4.2.	Intégrateur pur . . . . .	90
4.3.	Dérivateur pur . . . . .	91
4.4.	Retard pur . . . . .	92
5.	Généralisation des modèles de SLCI . . . . .	92
<b>Chapitre 4</b>	<b>Analyse fréquentielle</b>	<b>93</b>
1.	Réponse harmonique . . . . .	94
1.1.	Exemple de réponse harmonique dans le domaine temporel . . . . .	96
2.	Représentation graphique de la réponse harmonique . . . . .	98
2.1.	Diagramme de Bode . . . . .	98
2.2.	Diagramme de Nyquist . . . . .	99
2.3.	Diagramme de Black-Nichols . . . . .	100
3.	Analyse fréquentielle des modèles usuels . . . . .	101
3.1.	Diagrammes de Bode : méthodologie générale . . . . .	101
3.2.	Diagrammes de Nyquist : méthodologie générale . . . . .	118
3.3.	Diagrammes de Black : méthodologie générale . . . . .	128
4.	Etude du transitoire de la réponse harmonique . . . . .	128
4.1.	Exemple d'un système du premier ordre . . . . .	129
4.2.	Exemple d'un système du second ordre . . . . .	129
<b>Chapitre 5</b>	<b>Asservissements des systèmes linéaires</b>	<b>131</b>
1.	Introduction . . . . .	132

2.	Organisation d'un asservissement . . . . .	133
2.1.	Schémas fonctionnels associés aux systèmes asservis . . . . .	133
2.2.	Fonctions de transferts associées à un système asservi . . . . .	137
3.	Asservissement des SLCI modèles . . . . .	138
3.1.	Asservissement d'un intégrateur . . . . .	138
3.2.	Asservissement d'un système du premier ordre . . . . .	139
3.3.	Asservissement d'un système du second ordre . . . . .	140
4.	Performances des systèmes en boucle ouverte . . . . .	141
4.1.	Stabilité en boucle ouverte . . . . .	141
4.2.	Précision en boucle ouverte . . . . .	141
4.3.	Rapidité en boucle ouverte . . . . .	141
4.4.	Dépassement en boucle . . . . .	141
<b>Chapitre 6</b>	<b>Précision et rapidité des systèmes asservis</b>	<b>141</b>
1.	Définitions de la précision . . . . .	142
2.	Précision en boucle fermée . . . . .	142
<b>Chapitre 7</b>	<b>Stabilité des systèmes asservis</b>	<b>143</b>
1.	Définitions de la stabilité . . . . .	144
2.	Critère de stabilité . . . . .	145
2.1.	Critère algébrique de Routh . . . . .	147
2.2.	Critère graphique du revers . . . . .	152
2.3.	Critère de Nyquist . . . . .	158
<b>Chapitre 8</b>	<b>Correction des systèmes asservis</b>	<b>163</b>
<b>Chapitre 9</b>	<b>Initiation à la représentation d'état</b>	<b>165</b>
<b>Annexes</b>		<b>169</b>
<b>Annexe A</b>	<b>Alphabet Grec</b>	<b>169</b>
<b>Annexe B</b>	<b>Unités du Système International</b>	<b>171</b>
<b>Annexe C</b>	<b>Pierre-Simon de Laplace</b>	<b>173</b>
<b>Annexe D</b>	<b>Transformation de Laplace</b>	<b>175</b>
1.	Définitions . . . . .	175
2.	Propriétés . . . . .	175
3.	Table des transformées de Laplace . . . . .	178
<b>Annexe E</b>	<b>Rappel sur les nombres complexes</b>	<b>181</b>
<b>Annexe F</b>	<b>Équations différentielles à coefficients constants</b>	<b>187</b>
1.	Résolution équation différentielle du premier ordre . . . . .	187
1.1.	Sans second membre . . . . .	188
<b>Annexe G</b>	<b>Décomposition en éléments simples</b>	<b>191</b>
1.	Contexte . . . . .	191
2.	Fractions rationnelles rencontrées en automatique . . . . .	191
3.	Décomposition en éléments simples . . . . .	192

4.	Détermination des coefficients de la DES . . . . .	193
4.1.	Par identification . . . . .	193
<b>Annexe H</b>	<b>Systèmes du second ordre</b>	<b>195</b>
1.	Abaques . . . . .	196
2.	Réponses temporelles . . . . .	197
3.	Analyse fréquentielle . . . . .	199
<b>Annexe I</b>	<b>Initiation à Scilab</b>	<b>201</b>
1.	Présentation générale . . . . .	201
2.	Syntaxe : console . . . . .	202
3.	Polynômes et fractions rationnelles . . . . .	203
4.	Vecteurs et matrices . . . . .	206
5.	Tracer de figures . . . . .	209
6.	Programmation . . . . .	210
7.	SLCI avec Scilab . . . . .	212
7.1.	Définition d'un système linéaire . . . . .	212
7.2.	Simulation temporelle d'un système linéaire . . . . .	213
7.3.	Système du premier ordre . . . . .	214
7.4.	Carte des pôles et zéros . . . . .	217
7.5.	Asservissement . . . . .	217
8.	Scilab-Xcos . . . . .	218
8.1.	Lancer Xcos . . . . .	218
8.2.	Diagramme simple . . . . .	218
8.3.	Simulation . . . . .	219
8.4.	Blocs « To Workspace » ou « From Workspace » . . . . .	219
<b>Annexe J</b>	<b>Échelle logarithmique et le décibel</b>	<b>221</b>
1.	Rappel sur le logarithme décimal . . . . .	221
2.	Échelle logarithmique décimale . . . . .	222
3.	Le décibel . . . . .	223
4.	Diagramme de Bode . . . . .	223
5.	Tracé d'un diagramme de Bode avec Scilab . . . . .	226
<b>Annexe K</b>	<b>Transformée de Laplace inverse</b>	<b>227</b>
1.	Contexte . . . . .	227
2.	Méthode de Gaver-Stehfest . . . . .	227
3.	Méthode de Talbot fixe . . . . .	227
	<b>Références</b>	<b>229</b>
	<b>Glossaire</b>	<b>231</b>
	<b>Liste des Symboles</b>	<b>233</b>



# Avant-propos

## Programme

Ce cours est une introduction à l'**automatique** pour des étudiants de deuxième année de classe préparatoire scientifique.

L'objectif principal de l'automatique est de permettre le contrôle des **systèmes dynamiques** de toutes natures que ce soient : mécanique, chimique, électronique, optique, thermique, acoustique... Tout en respectant certaines contraintes de performances (rapidité, précision, stabilité...).

Nous limiterons notre étude aux **systèmes linéaires continus et invariants**.

La **modélisation** de ces systèmes passe par la mise en équation du comportement physique des systèmes sous forme d'équations différentielles. Cette étape ne fait pas à proprement parler partie d'un cours d'automatique, en effet chacune des disciplines construisent cette modélisation en se basant sur les principes et les hypothèses les plus adaptés à un problème donné. La modélisation permet une étude systématique des équations différentielles en proposant des modèles généraux et ce quelque soit la nature du procédé.

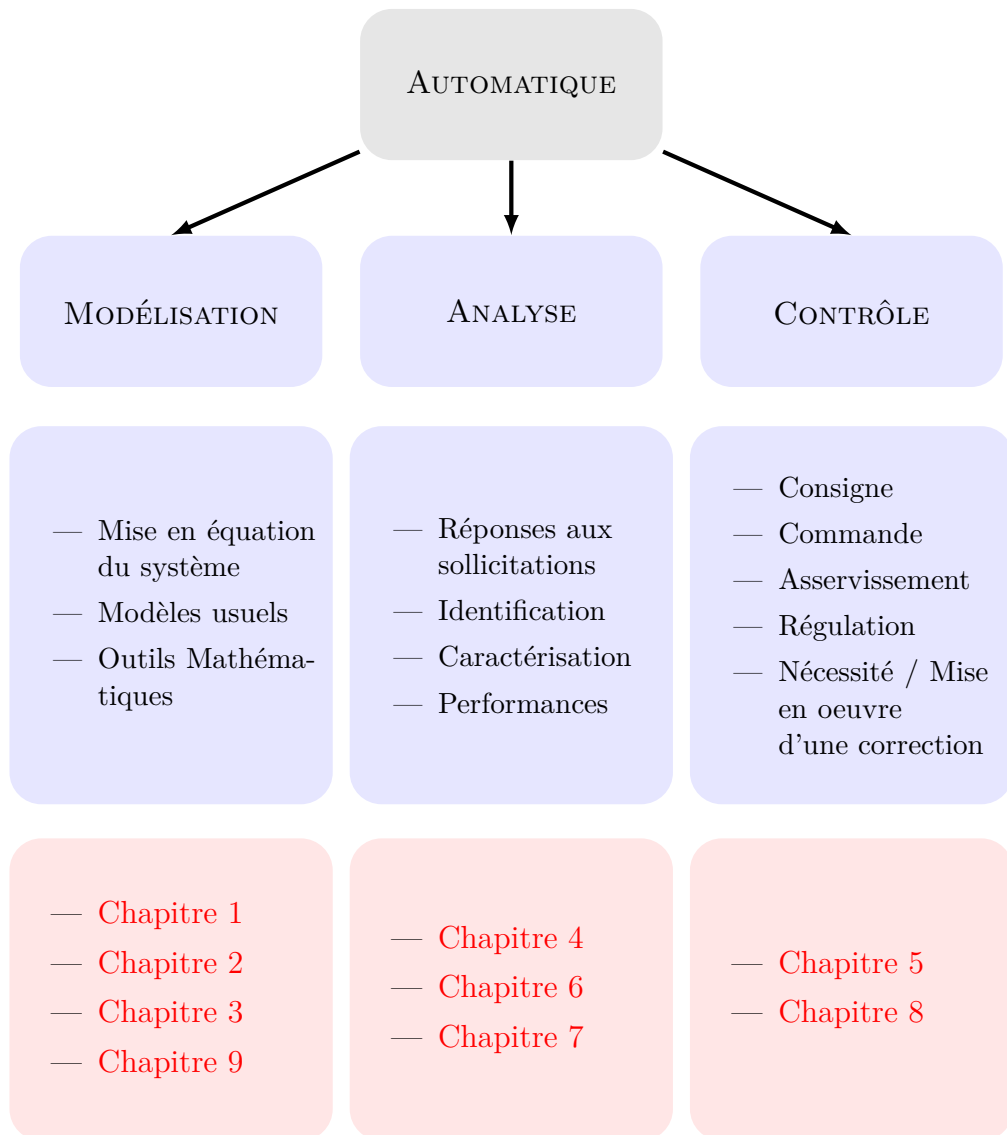
L'**analyse** nous permettra de caractériser et d'identifier ces modèles à partir des réponses aux sollicitations et de leurs performances.

Le **contrôle** est un concept très générale permettant de regrouper toutes les méthodes et techniques permettant de commander un système dynamique. Dans ce cours nous présenterons que les principes d'asservissement et de régulation. Nous verrons comment il est possible d'élaborer une commande adaptée (corrigée) pour un procédé quelconque, notamment lorsque ceux-ci présenterons des défauts de performance.

## Organisation du document

Les chapitres suivent un découpage classique autour des trois piliers discutés précédemment que sont la **modélisation**, l'**analyse** et le **contrôle**. (c.f **Figure A**).

Le lecteur pourra s'appuyer sur un grand nombre d'annexes qui ont pour objectifs de rappeler et de détailler des notions prérequis ou encore approfondir quelques aspects hors programme pour une deuxième lecture.



**Figure A.** – Organisation du document.



# 5. Asservissements des systèmes linéaires

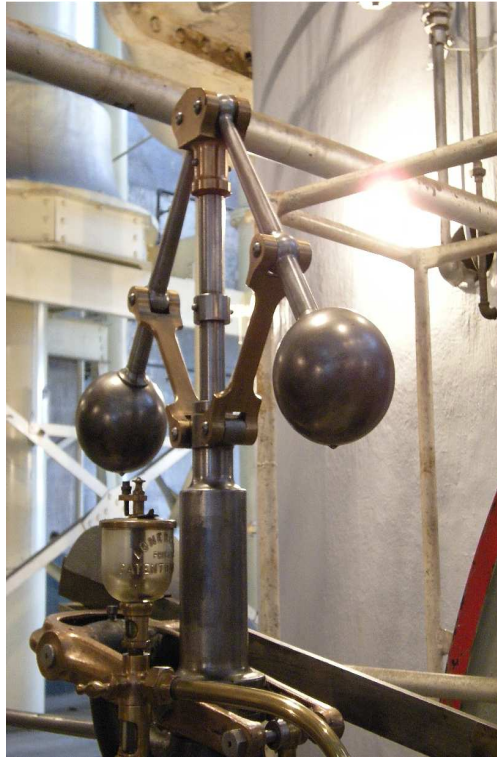
## Sommaire

---

<b>1.</b>	<b>Introduction</b>	<b>132</b>
<b>2.</b>	<b>Organisation d'un asservissement</b>	<b>133</b>
2.1.	Schémas fonctionnels associés aux systèmes asservis	133
2.2.	Fonctions de transferts associées à un système asservi	137
<b>3.</b>	<b>Asservissement des SLCI modèles</b>	<b>138</b>
3.1.	Asservissement d'un intégrateur	138
3.2.	Asservissement d'un système du premier ordre	139
3.3.	Asservissement d'un système du second ordre	140
<b>4.</b>	<b>Performances des systèmes en boucle ouverte</b>	<b>141</b>
4.1.	Stabilité en boucle ouverte	141
4.2.	Précision en boucle ouverte	141
4.3.	Rapidité en boucle ouverte	141
4.4.	Dépassement en boucle	141

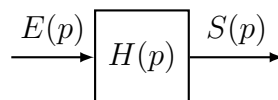
---

## 1. Introduction



**Figure 5.1.** — Exemple historique de régulateur : Régulateur de vitesse de Watt (d'après [11])

Les chapitres précédents nous ont permis de caractériser, modéliser et analyser la réponse temporelle des systèmes linéaires. Nous allons maintenant aborder la possibilité du **contrôle** de ces systèmes par l'intermédiaire de l'**asservissement** et de **régulation**. L'idée sous-jacente est de permettre le contrôle automatique d'un système sans l'intervention d'un opérateur humain dans l'établissement d'une commande d'un système. En effet, jusqu'à présent nous nous sommes intéressés à l'étude de système linéaire « isolé » (de fonction de transfert  $H(p)$ ) qui pour une entrée  $E(p)$ , élaborait une sortie  $S(p)$ <sup>1</sup>.

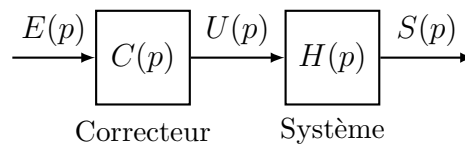


<sup>1</sup>On conserve la représentation dans le domaine de Laplace de nos systèmes linéaires et des signaux mis en jeu physiquement dans le domaine temporel

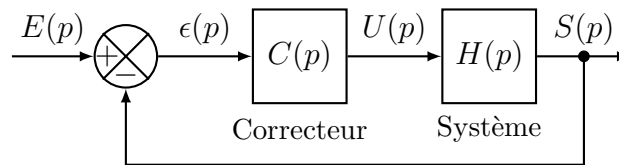
Nous avons pu caractériser la sortie en fonction de différentes performances : rapidité, précision, stabilité et dépassement. La question est de savoir maintenant comment agir sur le signal  $E(p)$  pour contrôler la sortie  $S(p)$  en fonction de critères de performances choisis initialement.

Il existe deux approches pour élaborer la commande d'un système linéaire : en boucle ouverte ou en boucle fermée.

- En boucle ouverte : on place un correcteur  $C(p)$  en amont du système pour élaborer la commande (que nous noterons  $U(p)$ ) du système que l'on souhaite contrôler. À noter que l'entrée du système appelée dans le cadre de l'asservissement consigne est maintenant l'entrée du correcteur.



- En boucle fermée : le principe consiste à mesurer le signal de sortie pour ajuster le signal de commande. Pour cela, on place le système (corrigée ou non) dans une boucle de contre-réaction **chapitre 2**.



En d'autre mot, Dans un sens, le signal  $e(t)$  est la commande du système De tel système

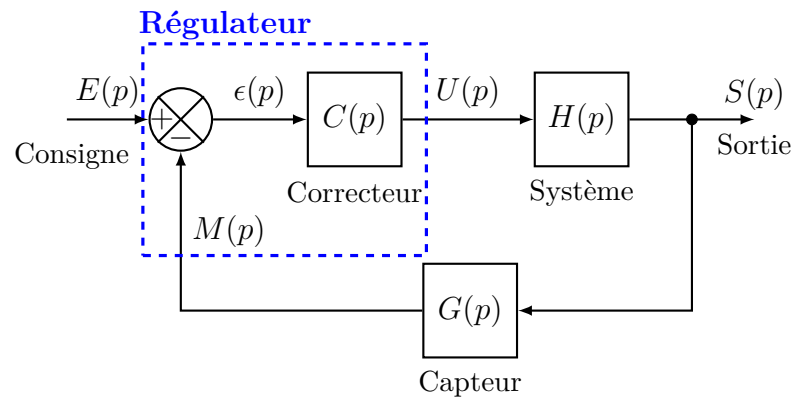
La **régulation** consiste à contrôler la sortie d'un système pour une consigne fixe quelque soit les perturbations variables au cours du temps.

L'**asservissement** consiste à suivre une consigne variable au cours du temps.

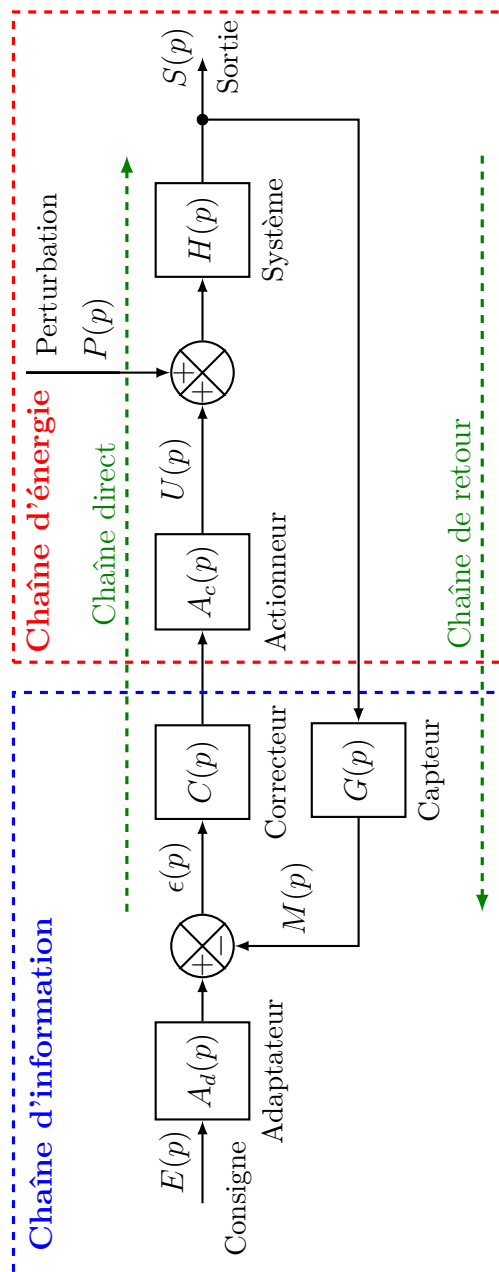
Imaginons que l'on souhaite étudier la température de l'eau fournie par une douche. Dans ce chapitre, nous allons aborder la notion d'asservissement des systèmes linéaires que nous avons maintenant caractérisé, modélisé et analysé dans les chapitres précédents. L'idée d'asservissement

## 2. Organisation d'un asservissement

### 2.1. Schémas fonctionnels associés aux systèmes asservis



**Figure 5.2.** – Schéma fonctionnel classique de l'asservissement d'un système présentant un correcteur et un capteur.



**Figure 5.3.** – Décomposition en chaîne d'information et chaîne d'énergie d'un schéma bloc d'asservissement complet



Composants	Description	Fonction de transfert ou signal associés
Consigne/Entrée	La valeur que l'on souhaite atteindre en sortie du système asservi. Cette consigne peut être constante ou dépendante du temps.	$E(p)$
Adaptateur	Adapte le signal de consigne à l'image de la sortie.	$A_d(p)$
Correcteur	Élabore à partir du signal d'écart $\epsilon(p)$ la commande $U(p)$ ou la grandeur réglante du système.	$C(p)$
Actionneur	L'organe d'action qui apporte l'énergie au système.	$A_c(p)$
Commande	Le signal de commande du système élaboré par l'actionneur ou le correcteur.	$U(p)$
Système	Le système que l'on souhaite contrôler et/ou asservir	$H(p)$
Régulateur	Le régulateur se compose d'un comparateur qui élabore le signal d'écart $\epsilon(p)$ à partir de la consigne et de la mesure, formellement le régulateur incorpore le correcteur et du correcteur.	$\epsilon(p)$
Perturbation	Phénomène physique intervenant sur le système qui en modifie la sortie	$P(p)$
Capteur	Le capteur prélève la sortie pour en donner une image (la mesure) utile au régulateur. Intervenant dans la boucle ouverte, son étude est indispensable pour la caractérisation des performances du système asservi.	$G(p)$
Mesure	Le signal de la mesure de la sortie ou image de la sortie élaboré par le capteur.	$M(p)$
Sortie	Le signal de sortie du système que l'on souhaite régulé et/ou asservir	$S(p)$

**Tableau 5.1.** – Terminologie et définition associés à l'asservissement des systèmes.

## 2.2. Fonctions de transferts associées à un système asservi

### Fonction de transfert de la chaîne directe

La **fonction de transfert de la chaîne directe (FTCD)**, que nous noterons  $H_{CD}(p)$  est liée à la chaîne d'action de l'asservissement. Elle lie la sortie  $S(p)$  à l'écart  $\epsilon(p)$ . Formellement,

$$H_{CD}(p) = \frac{S(p)}{\epsilon(p)} \quad (5.1)$$

### Fonction de transfert de la chaîne de retour

La **fonction de transfert de la chaîne de retour (FTCR)**, que nous noterons  $H_{CR}(p)$  est liée à la chaîne de mesure de l'asservissement. Elle lie l'image de la sortie  $M(p)$  à la sortie  $S(p)$ . Formellement,

$$H_{CR}(p) = \frac{M(p)}{S(p)} \quad (5.2)$$

Dans le cas d'un retour unitaire  $H_{CR}(p) = 1$ , c'est à dire que la sortie est la consigne sont de même nature.

### Fonction de transfert en boucle ouverte

La **fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO)**, que nous noterons  $H_{BO}(p)$  correspond à la fonction de transfert du système non asservi. Elle lie l'image de la sortie  $M(p)$  à l'écart  $\epsilon(p)$ . Formellement,

$$H_{BO}(p) = \frac{M(p)}{\epsilon(p)} = \frac{M(p)}{S(p)} \frac{S(p)}{\epsilon(p)} = H_{CR}(p) H_{CD}(p) \quad (5.3)$$

Dans le cas d'un retour unitaire on obtient  $H_{BO}(p) = H_{CD}(p)$

### Fonction de transfert en boucle fermée

La **fonction de transfert en boucle fermée (FTBF)**, que nous noterons  $H_{BF}(p)$  correspond explicitement à la fonction de transfert du système asservi. Elle lie la sortie du système  $S(p)$  à la consigne  $E(p)$ . Formellement et en appliquant la réduction des schémas blocs (c.f [section 3.1](#)),

$$H_{BF}(p) = \frac{S(p)}{E(p)} = \frac{H_{CD}(p)}{1 + H_{CR}(p)H_{CD}(p)} = \frac{H_{CD}(p)}{1 + H_{BO}(p)} \quad (5.4)$$

Remarquons que dans le cas d'une boucle de contre réaction unitaire (c.a.d  $H_{CR}(p) = 1$ ), la **FTBF** se réduit à :

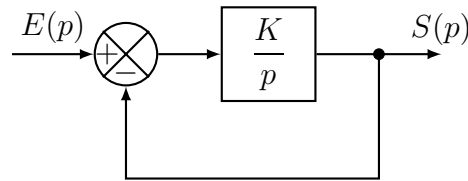
$$H_{BF}(p) = \frac{H_{BO}(p)}{1 + H_{BO}(p)}$$

### 3. Asservissement des SLCI modèles

Dans cette partie, nous présentons les asservissements par boucle de contre-réaction unitaire par de systèmes modèles déjà introduits au **chapitre 3**. Nous pourrions dégager la règle générale suivante : **l'ordre  $n$  d'une fonction de transfert en boucle ouverte  $H_{BO}(p)$  est conservé en boucle fermée par l'asservissement.**

#### 3.1. Asservissement d'un intégrateur

Considérons un système intégrateur asservi et régi par le schéma-bloc suivant :



La fonction de transfert en boucle ouverte  $H_{BO}(p)$  est telle que :

$$H_{BO}(p) = \frac{K}{p}$$

avec  $K$  le gain statique. La **FTBF** est alors donnée :

$$H_{BF}(p) = \frac{H(p)}{1 + H(p)} = \frac{K}{p + K} = \frac{1}{\tau_{BF}p + 1}$$

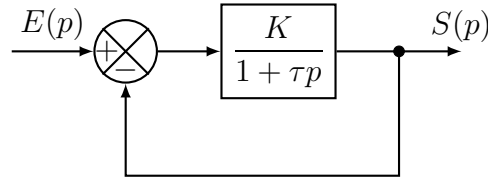
Remarquons qu'un intégrateur asservi devient un système du premier ordre de gain statique unité et de constante de temps  $\tau_{BF} = \frac{1}{K}$  où  $K$  est le gain statique de la **FTBO**<sup>2</sup>.

<sup>2</sup>Un intégrateur étant un système du premier ordre particulier, nous avons bien l'ordre de  $H_{BO}(p)$  qui est égal à l'ordre de  $H_{BF}(p)$ .

Au **chapitre 3**, nous avons pu conclure que les systèmes du premier ordre sont fondamentalement stable (du moins pour  $\tau > 0$ ) et que les intégrateurs sont instables. Ainsi, nous observons que **l'asservissement permet de stabiliser un système intrinsèquement instable**.

### 3.2. Asservissement d'un système du premier ordre

Considérons un système du premier ordre asservi et régi par le schéma-bloc suivant :



La fonction de transfert en boucle ouverte  $H_{BO}(p)$  du procédé est alors tel que :

$$H_{BO}(p) = \frac{K}{1 + \tau p}$$

où  $K$  est le gain statique et  $\tau$  la constante de temps du système en boucle ouverte. La **FTBF** est alors donnée :

$$H_{BF}(p) = \frac{H(p)}{1 + H(p)} = \frac{K}{(1 + K) + \tau p}$$

Remarquons que comme attendu la **FTBF** reste du premier ordre. Sous sa forme canonique cette fonction de transfert devient :

$$H_{BF}(p) = \frac{\frac{K}{1 + K}}{1 + \frac{\tau}{1 + K}p} = \frac{K_{BF}}{1 + \tau_{BF}p}$$

où  $K_{BF}$  est le gain statique et  $\tau_{BF}$  la constante de temps du système boucle fermée. Par identification, on alors les relations suivantes entre les paramètres du premier ordre de la **FTBO** et les paramètres du premier ordre de la **FTBF** :

$$K_{BF} = \frac{K}{1 + K}$$

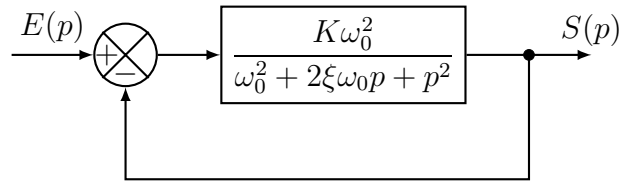
$$\tau_{BF} = \frac{\tau}{1 + K}$$

Constatons que le gain statique en boucle ouverte  $K$  intervient dans la définition du gain statique  $K_{BF}$  et de la constante de temps  $\tau_{BF}$  en boucle fermée. Ainsi en

modifiant le paramètre  $K$ , il est possible de jouer sur les deux paramètres régissant la boucle fermée. Pour  $K > 0$ , le domaine de définition des paramètres du système en boucle fermée sont  $K_{BF} \in [0, 1[$  et  $\tau_{BF} \in ]0, \tau]$

### 3.3. Asservissement d'un système du second ordre

Considérons un système du second ordre asservi et régi par le schéma-bloc suivant :



La fonction de transfert en boucle ouverte du procédé  $H_{BO}(p)$  est tel que :

$$H_{BO}(p) = \frac{K\omega_0^2}{\omega_0^2 + 2\xi\omega_0 p + p^2}$$

où  $K$  est le gain statique,  $\omega_0$  la pulsation propre et  $\xi$  le coefficient d'amortissement du système en boucle ouverte. La **FTBF** est donnée par :

$$H_{BF}(p) = \frac{H(p)}{1 + H(p)} = \frac{K\omega_0^2}{\omega_0^2(1 + K) + 2\xi\omega_0 p + p^2}$$

Une nouvelle fois, nous constatons que la fonction de transfert en boucle fermée est du même ordre que celle en boucle ouverte. Sous une forme canonique la **FTBF** devient :

$$H_{BF}(p) = \frac{K\omega_0^2}{\omega_0^2(1 + K) + 2\xi\omega_0 p + p^2} = \frac{K_{BF}\omega_{0,BF}^2}{\omega_{0,BF}^2(1 + K_{BF}) + 2\xi_{BF}\omega_{0,BF} p + p^2}$$

Par identification, on a alors les relations suivantes entre les paramètres du premier ordre de la **FTBO** et les paramètres du premier ordre de la **FTBF** :

$$\begin{aligned} K_{BF} &= \frac{K}{1 + K} \\ \omega_{0,BF} &= \omega_0 \sqrt{1 + K} \\ \xi_{BF} &= \frac{\xi}{\sqrt{1 + K}} \end{aligned}$$

## **4. Performances des systèmes en boucle ouverte**

- 4.1. Stabilité en boucle ouverte**
- 4.2. Précision en boucle ouverte**
- 4.3. Rapidité en boucle ouverte**
- 4.4. Dépassement en boucle**



# Annexes





## **A. Alphabet Grec**

Nom	Minuscule	Majuscule	Correspondance latine	Usages courants
alpha	$\alpha$	A	a	angles
bêta	$\beta$	B	b	angles
gamma	$\gamma$	$\Gamma$	g	angles
delta	$\delta$	$\Delta$	d	variations
epsilon	$\epsilon, \varepsilon$	E	e	petite quantité
zéta	$\zeta$	Z	z	-
êta	$\eta$	H	é (long)	rendement
thêta	$\theta, \vartheta$	$\Theta$	th	angles
iota	$\iota$	I	i	-
kappa	$\kappa, \varkappa$	K	k	-
lambda	$\lambda$	$\Lambda$	l	longueur, densité linéique
mu	$\mu$	M	m	masse réduite
nu	$\nu$	N	n	fréquence
ksi	$\xi$	$\Xi$	ks	coefficient sans dimension
omicron	o	O	o	-
pi	$\pi, \varpi$	$\Pi$	p	$\Pi$ : plan
rhô	$\rho, \varrho$	P	r	densité volumique
sigma	$\sigma, \varsigma$	$\Sigma$	s	$\sigma$ : densité surfacique, $\Sigma$ : Système
tau	$\tau$	T	t	temps, durée relative
upsilon	$\upsilon$	Y	u	-
phi	$\phi, \varphi$	$\Phi$	f, ph	angles
khi	$\chi$	X	kh	coefficients
psi	$\psi$	$\Psi$	ps	fonction d'onde
oméga	$\omega$	$\Omega$	ô	vitesse angulaire, angle solide

**Tableau A.1.** – Lettres de l'alphabet Grec et leurs usages (non exhaustif) courants en physique



# Références

- [1] Régulation automatique (analogique) (REG). <http://php.iai.heig-vd.ch/~mee/>.
- [2]
- [3] Xcos pour les vrais debutants. <https://scilab.developpez.com/tutoriels/debuter/apprendre-xcos-debutant/>.
- [4] Denis Arzelier. Représentation et analyse des systèmes lineaires (pc7bis), 2005.
- [5] B. Bayle and J. Gangloff. Systèmes et asservissements à temps continu, 2009.
- [6] S. L. Campbell, J.-P. Chancelier, and R. Nikoukhah. *Modeling and Simulation in Scilab/Scicos*. Springer, 2006.
- [7] H. Garnier. <http://w3.cran.univ-lorraine.fr/hugues.garnier/?q=content/teaching>.
- [8] Y. Granjon. *Automatique : systèmes linéaires, non linéaires, à temps continu, à temps discret, représentation d'état, événements discrets*. Dunod, Paris, 2015.
- [9] E. Laroche and H. Halalchi. Asservissement des systèmes lineaires à temps continu. <http://eavr.u-strasbg.fr/~laroche/student>.
- [10] O. Le Gallo. *Automatique des systèmes mécaniques : Cours, travaux pratiques et exercices corrigés*. Sciences de l'ingénieur. Dunod, 2009.
- [11] Joe Mabel. Régulateur à boules au Georgetown PowerPlant Museum à Seattle. CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5694146>.
- [12] B. Marx. Outils Mathématiques pour l'ingénieur - Traitement du Signal. <http://w3.cran.univ-lorraine.fr/perso/benoit.marx/enseignement.html>.
- [13] B. Marx. Contrôle des systèmes linéaires. <http://w3.cran.univ-lorraine.fr/perso/-benoit.marx/enseignement.html>.
- [14] F. Orioux. *Automatique : Systèmes linéaires et asservissements*. Notes de Cours, Master 2 Outils et systèmes de l'astronomie et de l'Espace, 20017-1018.

- [15] E. Ostertag. *Systèmes et asservissements continus : Modélisation, analyse, synthèse des lois de commande*. Ellipses Marketing, 2004.
- [16] R. Papanicola. Schéma-blocs avec PGF/TIKZ. <https://sciences-indus-cpge.papanicola.info/IMG/pdf/schema-bloc.pdf>.
- [17] R. Papanicola. *Sciences industrielles PCSI : Mécanique et automatique*. Ellipses Marketing, 2003.
- [18] R. Papanicola. *Sciences industrielles PSI : Mécanique et automatique*. Ellipses Marketing, 2010.
- [19] Marsyas-Travail personnel. Clepsydre athénienne reconstituée, Musée de l'Agora antique d'Athènes. CC BY-SA 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=476174>.
- [20] Consortium Scilab. Introduction to Scilab. [www.scilab.org/content/download/247/1702/file/introscilab.pdf](http://www.scilab.org/content/download/247/1702/file/introscilab.pdf).
- [21] S. Steer and Y. Degré. *Scilab : De la théorie à la pratique - II. Modéliser et simuler avec Xcos*. Éditions D-BookeR, 2014.
- [22] C. Sueur, P. Vanheeghe, and P. Borne. *Automatique des systèmes continus*. Editions Technip.
- [23] E. Thomas. TP Scilab. [http://cpgeptljg.free.fr/scenari/TP\\_INFO/TP\\_info\\_12\\_ordre/co/module\\_TP\\_1\\_2\\_ordre\\_5.html](http://cpgeptljg.free.fr/scenari/TP_INFO/TP_info_12_ordre/co/module_TP_1_2_ordre_5.html).

# Glossaire

**FTBF** Fonction de Transfert en Boucle Fermée

**FTBO** Fonction de Transfert en Boucle Ouverte

**FTCD** Fonction de Transfert de la Chaîne Directe

**FTCR** Fonction de Transfert de la Chaîne de Retour





# Liste des Symboles

$t$	Variable temporelle
$p$	Indéterminée de polynôme
$s(t)$	Fonction/Signal dans le domaine temporel
$S(p)$	Fonction/Signal dans le domaine de Laplace de la fonction $s(t)$
$u(t)$	Fonction échelon unité ou de Heaviside
$\delta(t)$	Distribution de Dirac
$r(t)$	Fonction rampe unité
$\mathcal{L}\{f(t)\}$	Transformation de Laplace de la fonction $f(t)$
$\mathcal{L}^{-1}\{F(p)\}$	Transformation de Laplace inverse de la fonction $F(p)$
$H(p)$	Fonction de transfert
$N(p)$	Polynôme du numérateur d'une fraction rationnelle
$D(p)$	Polynôme du dénominateur d'une fraction rationnelle
$\omega$	Pulsation
$H(j\omega)$	Nombre complexe associé à la fonction de transfert $H(p)$
$E_0$	Paramètre dimensionnelle d'amplitude de l'entrée
$K$	Gain statique
$\omega_0$	Pulsation propre

$\text{Im}[H(j\omega)]$	Partie imaginaire du nombre complexe $H(j\omega)$
$\text{Re}[H(j\omega)]$	Partie réelle du nombre complexe $H(j\omega)$
$\xi$	Coefficient d'amortissement
$G(\omega)$	Gain naturel de la réponse harmonique en fonction de la pulsation
$G_{dB}(\omega)$	Gain en decibel de la réponse harmonique en fonction de la pulsation
$\phi(\omega)$	Déphasage de la réponse harmonique en fonction de la pulsation
$D_k$	k-ème dépassement
$t_{5\%}$	Temps de réponse à 5%



