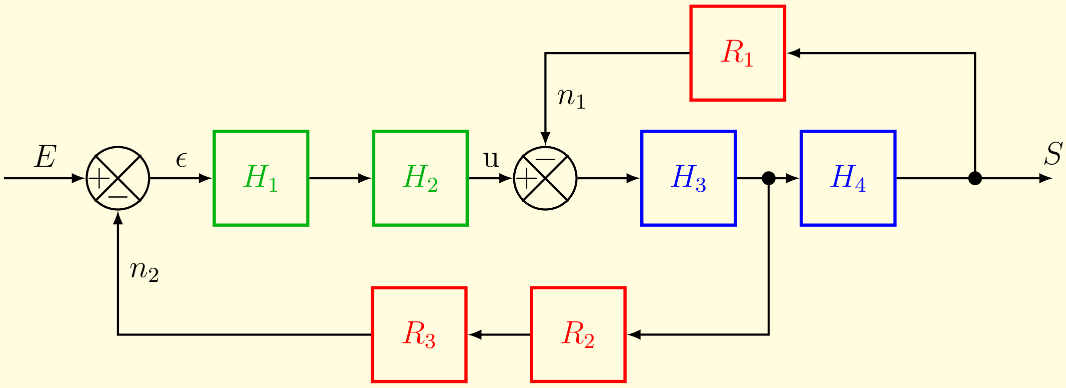
Systèmes mécaniques et automatiques

Notes de cours IngéSpé

Automatique



Année 2019–2020

Systèmes mécaniques et automatiques

Notes de cours IngéSpé
Automatique

Filipe Manuel Vasconcelos

écrit sous LaTeX, TikZ
version de janvier 2020.

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`

Table des matières

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 chacunes 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 pilliers discutés précedemment 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 prérequises ou encore approfondir quelques aspects hors programme pour une deuxième lecture.

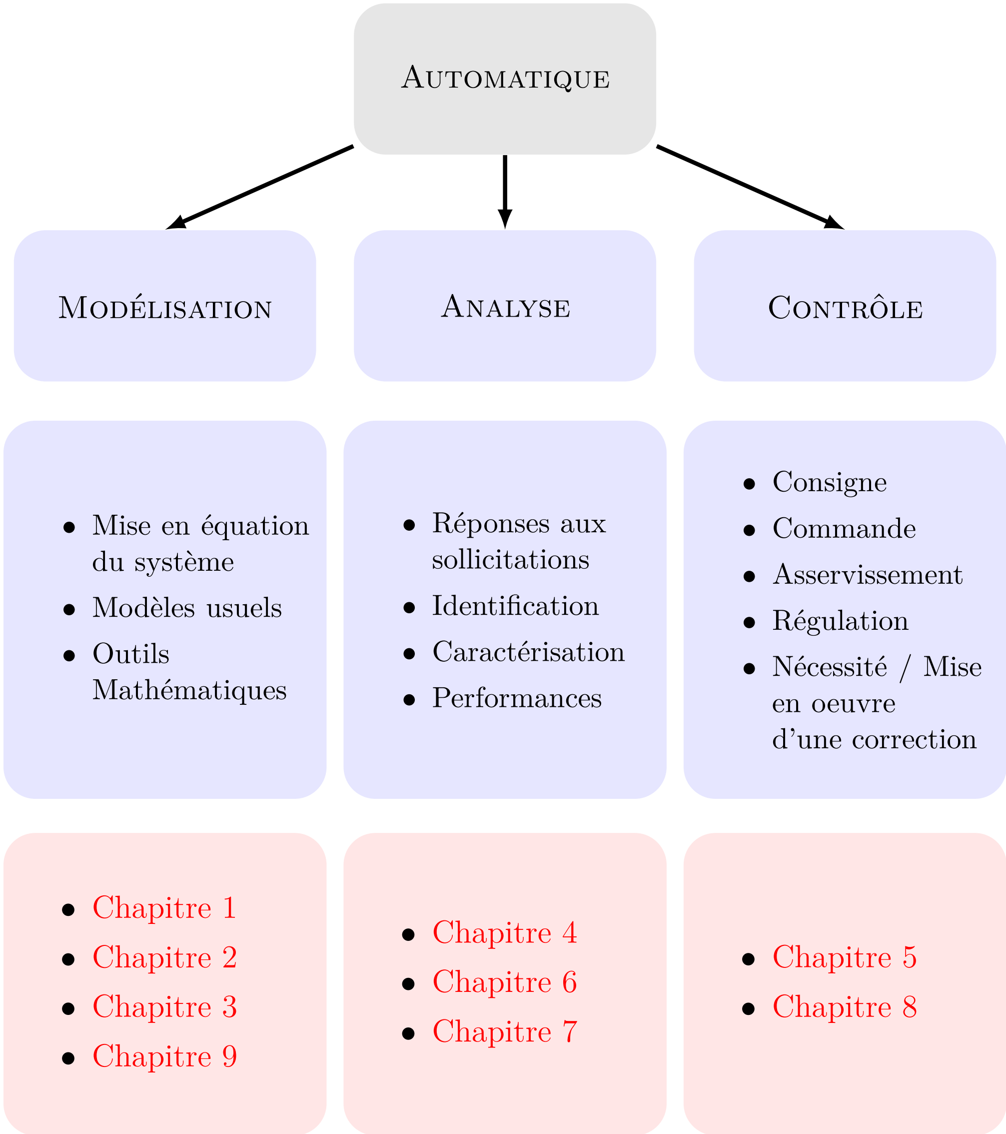


Figure A. – Organisation du document.

2. Schémas fonctionnels et graphes de fluence

Sommaire

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons introduire un outil graphique pour faciliter la représentation des relations mathématiques entre les différents éléments constituants un système linéaire continu et invariant (SLCI). Cet outil est le **schéma fonctionnel** ou également appelé **schéma-bloc**. Les schémas fonctionnels nous seront très utiles pour l'étude des systèmes asservis. Nous introduirons une algèbre de blocs permettant de réduire les schémas-blocs qui nous permettront de s'affranchir de la manipulation d'expression mathématique de grande taille. Nous aborderons également le cas des entrées multiples.
Dans une dernière partie nous introduirons les graphes de fluence, comme présenté dans [15]. Ces derniers sont moins utilisés pour l'étude des SLCI, et peuvent donc être négligés dans une première lecture, l'algèbre qui lui est associée s'avère cependant bien plus éfficace et pourra être utilisée dans d'autres applications (ex : éléctronique, réseaux de neurones).

2. Éléments de base des schémas fonctionnels

Les schémas fonctionnels sont composés de quatre éléments de base : **les flèches, les blocs, les comparateurs et sommateurs et les points de prélèvement**

Flèche

Les flèches donnent la direction de l'information (i.e du signal) au sein du schéma-blocs. Elles peuvent être ornées de la grandeur mathématique qui leurs sont associée. Celles-ci peuvent être des grandeurs temporelles ou dans le domaine de Laplace.

$$\xrightarrow{\quad e(t) \quad} \qquad \xrightarrow{\quad E(p) \quad}$$

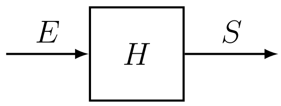
Cependant, nous nous limiterons à l'usage de ces schémas fonctionnelles pour la représentation de grandeur dans le domaine de Laplace.
Pour alléger la notation dans ce chapitre, nous omettrons très souvent la variable p des grandeurs dans le domaine de Laplace désignées par une majuscule.

Bloc

Le bloc est la représentation d'une fonction de transfert entre deux grandeurs dans le domaine de Laplace. Par exemple, la relation entre l'entrée E et la sortie S définit par la fonction de transfert H qui s'écrit formellement,

$$S = HE, \tag{2.1}$$

est équivalente au schéma fonctionnel[1] suivant :

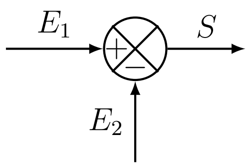


Comparateur/Sommateur :

Les comparateurs ou sommateurs permettent de représenter des opérations simples entre différentes grandeurs. Nous parlerons respectivement de comparateur ou de sommateur dans le cas d'une différence ou d'une somme entre deux grandeurs.
Par exemple, la relation

$$S = E_1 - E_2$$

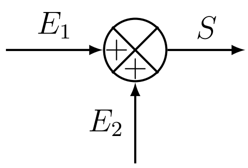
est équivalente au comparateur suivant :



De même la somme de deux grandeurs,

$$S = E_1 + E_2$$

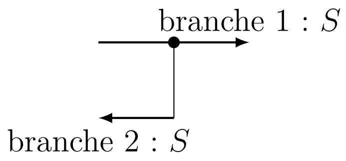
est équivalente au sommateur suivant :



[1] Les schémas-blocs de ce document ont tous étaient réalisés avec les macros Ti*k*Z (`schemabloc`) écrit par R. Papanicola[16]. À noter que des macros Ti*k*Z (`gfluence`) pour représenter les graphes de fluence de ce même chapitre, ont était fortement inspiré par ce même auteur.

Point de prélèvement

Un point de prélèvement (ou point de dérivation ou encore jonction) est un point d'une flèche où une information est prélevée ne modifiant pas sa valeur. Par exemple, la jonction suivante (représentée par un point) donne lieu à deux branches auxquelles sont associées la même grandeur S.



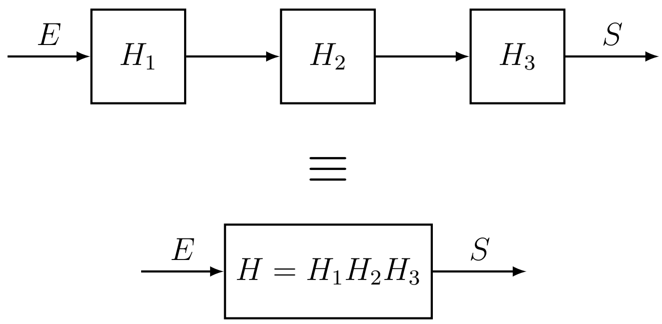
Dans cette configuration, la branche 1 est dite « direct » et la branche 2 est dite de « retour ».

3. Transformation des schémas fonctionnels

3.1. Réduction de schéma-bloc

Blocs en série / produit

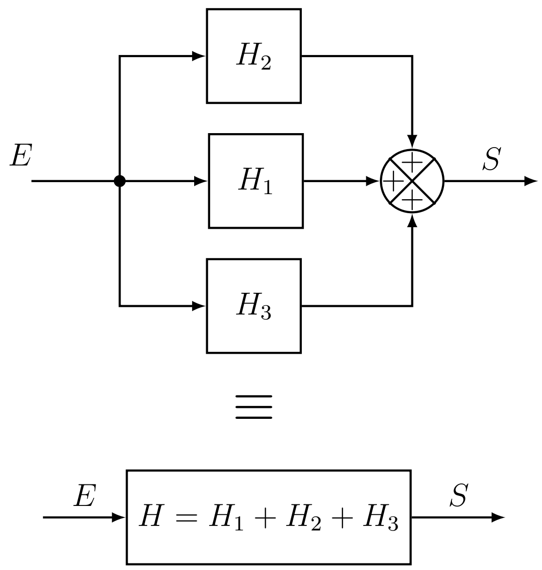
Lorsque les blocs sont placés en série, la fonction de transfert entre la sortie et l'entrée globale est le produit des fonctions de transfert mis en jeu. Par exemple, les deux schémas fonctionnels suivants sont équivalents.



Nous laissons au lecteur la démonstration triviale à partir des relations mathématiques.

Blocs en parallèle

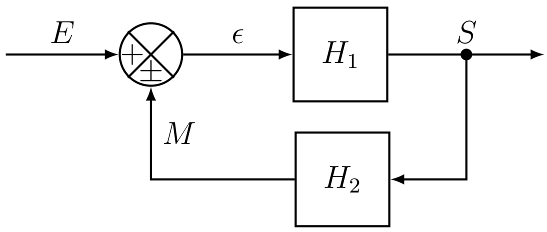
Lorsque les blocs sont placés en parallèle, la fonction de transfert entre la sortie et l'entrée globale est la somme des fonctions de transfert mis en jeu. Par exemple, les deux schémas fonctionnels suivants sont équivalents.



La démonstration est également triviale.

La boucle de contre-réaction (positive ou négative)

La boucle de contre-réaction[2] peut être réduite à une simple fonction de transfert. Considérons un système définit par le schéma-bloc ci-dessous, composé des différents élements de bases.



Notons l'utilisation du symbole $\pm$ pour envisager à la fois les comparateurs et sommateurs.
Déterminons la relation entre l'entrée E et la sortie S de ce système. Pour celà réécrivons les relations linéaires simples issus de ce schéma-bloc. On sait que :

$$\epsilon = E \pm M \tag{2.2}$$
$$M = H_2 S \tag{2.3}$$
$$S = H_1 \epsilon \tag{2.4}$$

[2] « Positive or negative feedback », chez nos collègues anglophones.

Introduisons l'équation (2.3) dans (2.2) et le résulat ainsi obtenu dans (2.4) :

$$\begin{aligned}\epsilon &= E \pm H_2 S\\ S &= H_1\big(E \pm H_2 S\big)\\ S &= H_1 E \pm H_1 H_2 S\end{aligned}$$

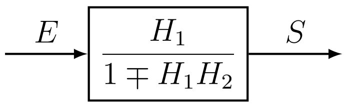
Regroupons les termes dépendant de la sortie ensemble pour déterminer la relation entre l'entrée et la sortie.

$$S\big(1 \mp H_1 H_2\big) = H_1 E$$

On obtient alors la formule de Black[3], reliant la sortie est l'entrée d'une boucle de contre-réaction :

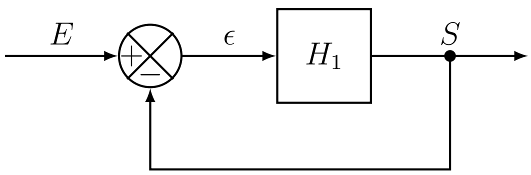
$$S = \frac{H_1}{1 \mp H_1 H_2} E \tag{2.5}$$

Notons l'inversion du signe du dénominateur de la formule selon que la boucle est positive ou négative.
La boucle de contre-réaction est donc équivalente au schéma-bloc simplifié suivant :



Boucle de contre-réaction unitaire

Une boucle de contre-réaction unitaire est une boucle de contre-réaction sans fonction de transfert de retour (ex : dans le cas présenté précedemment $H_2 = 1$).



La formule de Black se simplifie alors de la façon suivante :

$$S = \frac{H_1}{1 + H_1} E \tag{2.6}$$

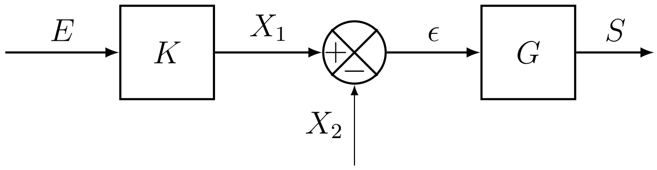
[3]Harold Stephen Black (1898-1983) ingénieur, électronicien américain.

3.2. Manipulation de schéma-bloc

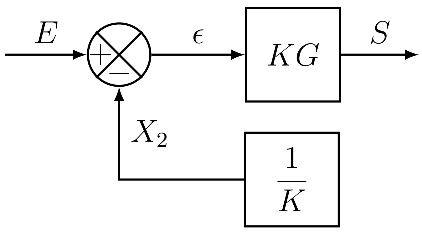
Nous allons ici présenter différentes manipulations que nous pourront appliquer au schéma-bloc. Ces manipulations peuvent être vues comme des opérations d'une **algèbre de blocs**.

Déplacement d'un comparateur vers la gauche

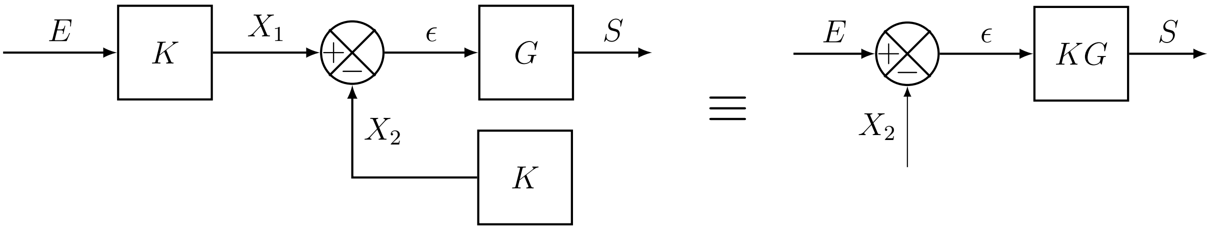
Considérons le schéma-bloc suivant :



Pour pouvoir déplacer le comparateur vers la gauche, il faut introduire le bloc K dans la chaine direct. En conséquence, la chaîne de retour doit être modifiée pour ne pas affecter la sortie globale S. Le schéma fonctionnel précédent est donc équivalent au schéma ci-dessous :

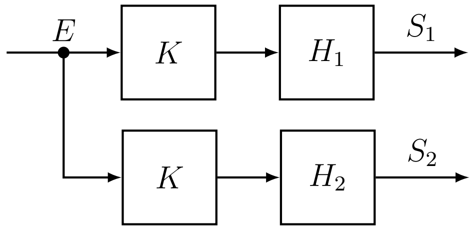


Dans le cas particulier où les deux branches du comparateur sont toutes les deux affectées par la même fonction de transfert, il suffit de déplacer la fonction de transfert après le comparateur. Par exemple, les deux schémas-blocs suivants sont équivalents :

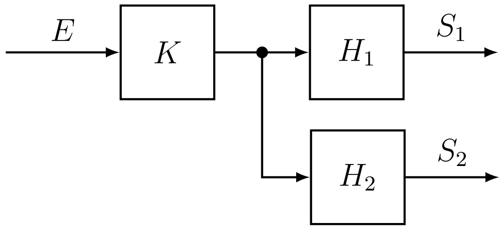


Déplacement d'un point de prélèvement vers la droite

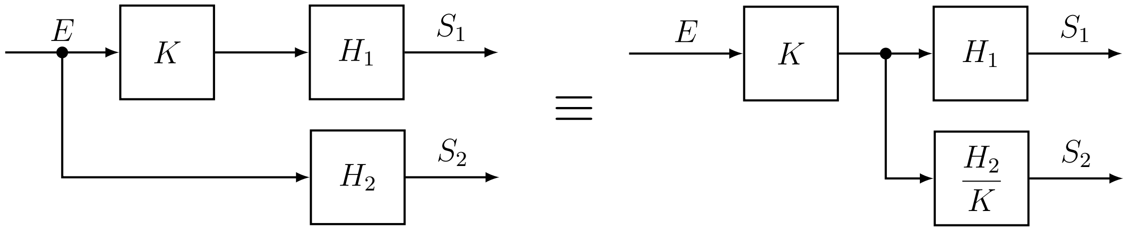
Considérons le schéma-bloc suivant :



Il est aisé de déplacer le bloc K devant le point de prélèvement :



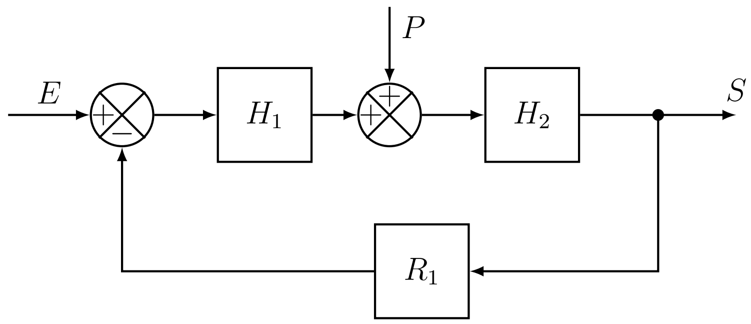
Dans le cas particulier où seul une branche est affectée par le bloc, il faut réduire la branche non affectée après avoir déplacer le point de prélèvement. Ansi les deux schémas-blocs ci-dessous sont équivalents :



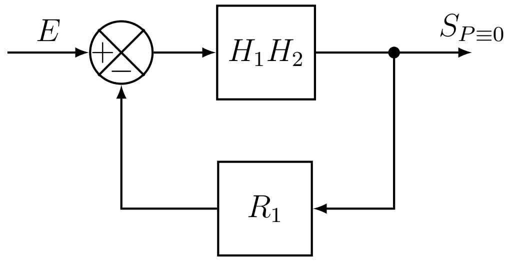
4. Cas d'entrées multiples

Dans le cas d'un système possédant plusieurs entrées, il est possible de simplifier le problème en appliquant le principe de superposition. La réponse totale devient alors la somme des réponses individuelles de chaque entrée lorsque toutes les autres sont considérées comme nulles.

Considérons le schéma-blocs suivant :



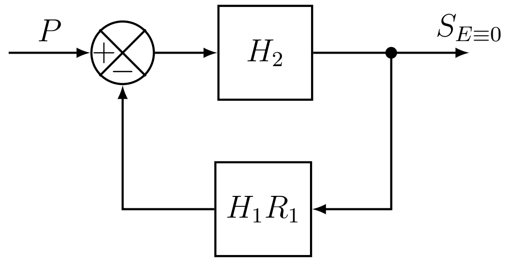
Dans un premier temps, on considère l'entrée P nulle, le schéma-bloc devient :



La sortie $S_{P\equiv0}$ (i.e lorsque $P \equiv 0$) est donc donnée par la formule de Black pour la boucle de contre-réaction ainsi obtenue.

$$S_{P\equiv0} = \frac{H_1H_2}{1 + R_1H_1H_2}E$$

Dans le cas où l'on considère maintenant l'entrée E comme nulle, le schéma-bloc se réduit de la façon suivante :



La sortie $S_{E\equiv0}$ est donc donnée par,

$$S_{E\equiv0} = \frac{H_2}{1 + R_1H_1H_2}P$$

La sortie totale S du système à deux entrées est la somme de ses sorties indépendantes,

$$S = S_{P\equiv 0} + S_{E\equiv 0} \tag{2.7}$$

$$S = \frac{H_1H_2}{1 + R_1H_1H_2}E + \frac{H_2}{1 + R_1H_1H_2}P \tag{2.8}$$

$$S = H_EE + H_PP \tag{2.9}$$

Si E est une entrée de consigne et P une perturbation, H_E et H_P sont respectivement appelées **fonction de transfert d'asservissement** et **fonction de transfert de régulation**. Remarquons que le dénominateur de ces fonctions de transferts sont identiques.

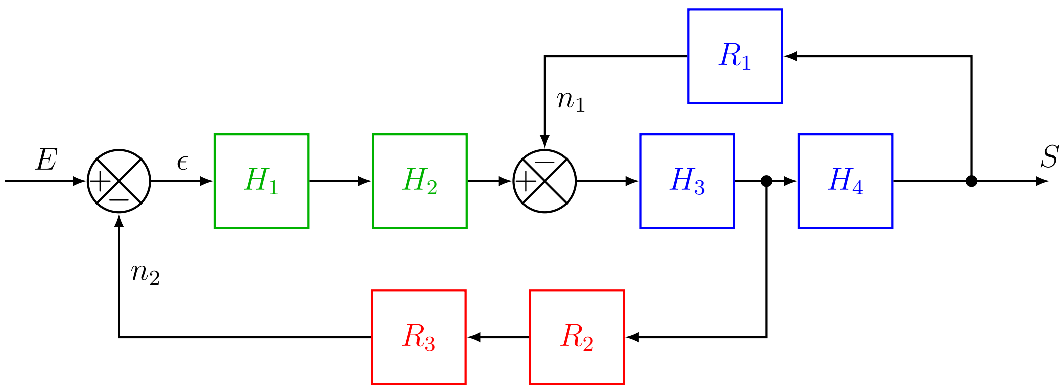
5. Méthodologie générale pour la réduction de schéma-bloc de grande taille

Nous venons de présenter les principales transformations et manipulations qui peuvent être appliquées aux schémas fonctionnels. Nous donnons ici une approche simple pour la réduction de schéma-bloc de grande taille [15] :

1. Regrouper les blocs en parallèle et en série.
2. Éliminer les boucles de contre-réaction locales.
3. Déplacer les sommateurs/comparateurs vers la gauche et déplacer les jonctions vers la droite.
4. Répéter pour obtenir une forme canonique pour une entrée particulière.
5. Dans le cas d'entrée multiple, répéter (1-4) pour chaque entrée.

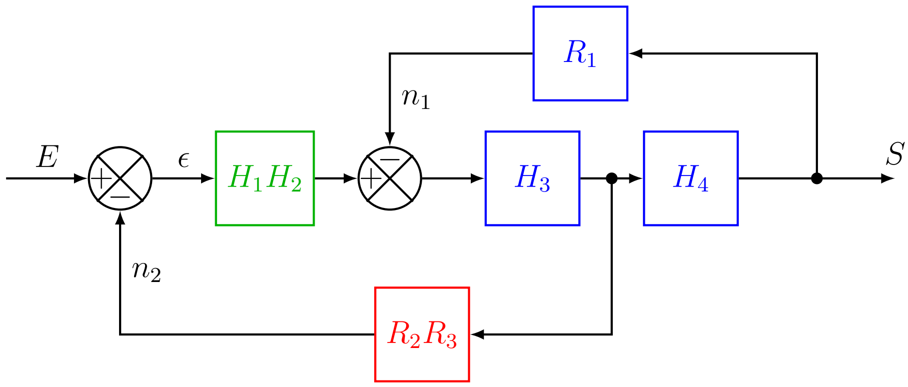
5.1. Exemple à entrée simple

Nous allons appliquer étape par étape cette méthodologie à la réduction du schéma-bloc, à une seule entrée, suivant :



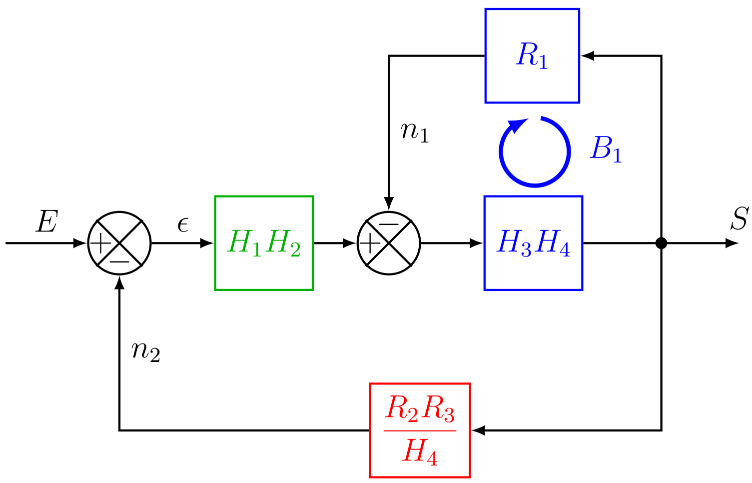
Étape 1

Regroupons d'abord les blocs en cascades :

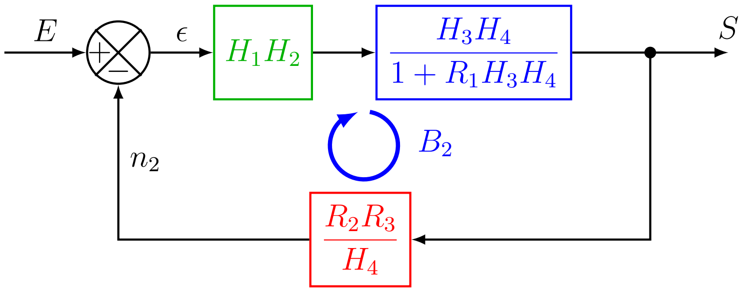


Étape 2

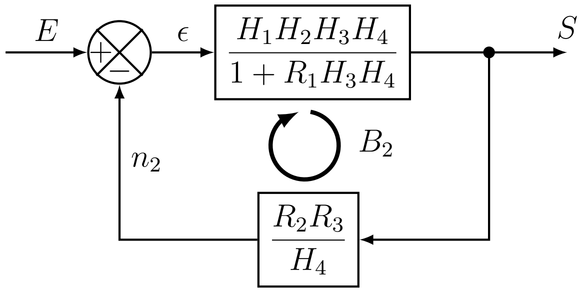
Déplaçons le point de prélèvement de la boucle de retour inférieur vers la droite :



L'étape précédente nous permet d'identifier une boucle de contre-réaction locale (B_1). Après réduction de cette boucle, le schéma-blocs dévient :

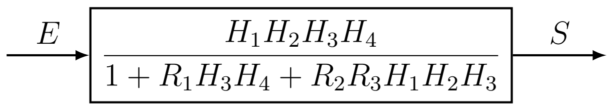


À nouveau il est possible d'identifier une boucle de contre-réaction B_2 :



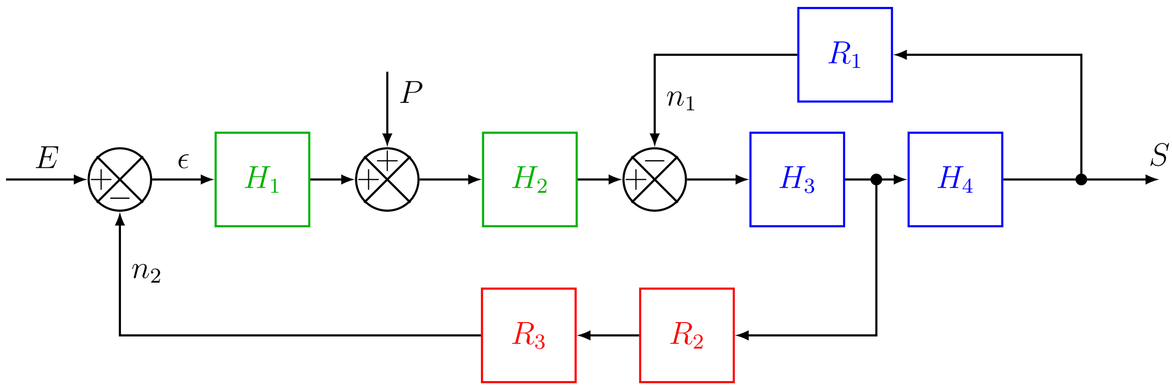
Étape 3

Enfin, il nous suffit de réduire la boucle de contre-réaction B_2 par la formule de Black :



5.2. Exemple à entrées multiples

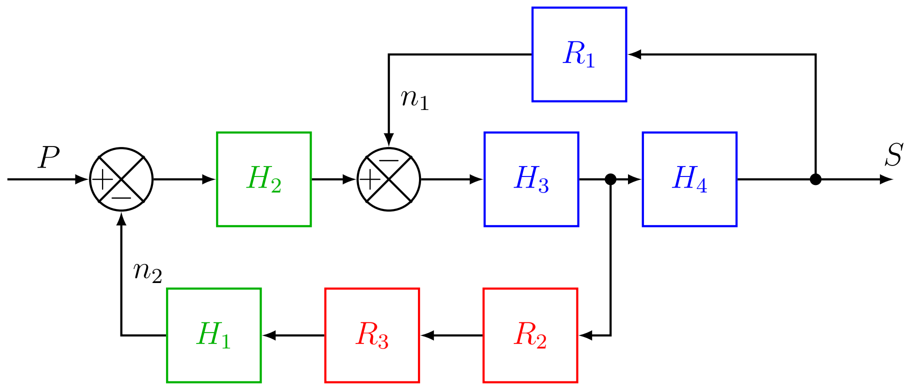
On considère le schéma fonctionnel suivant qui est exactement celui traité précédemment mais en ayant incorporer une nouvelle entrée P.



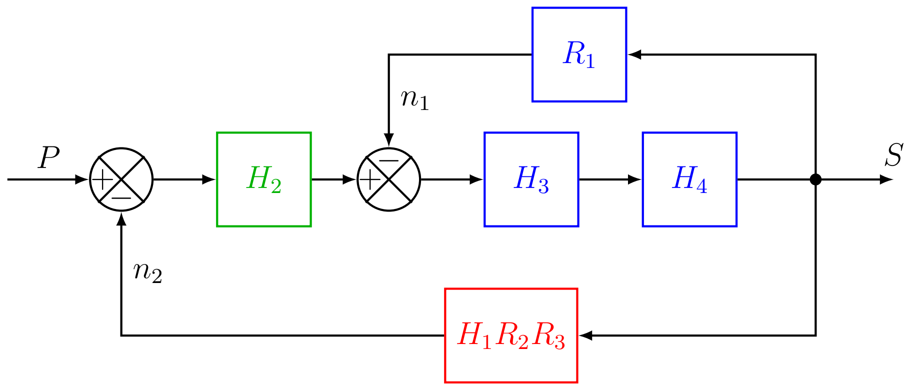
La première étape consiste à déterminer la fonction de transfert globale entre la sortie S et E pour $P \equiv 0$. Celle-ci correspond à la fonction de transfert déterminée précédemment, soit :

$$S_{P\equiv 0} = \frac{H_1H_2H_3H_4}{1+R_1H_3H_4+R_2R_3H_1H_2H_3}E$$

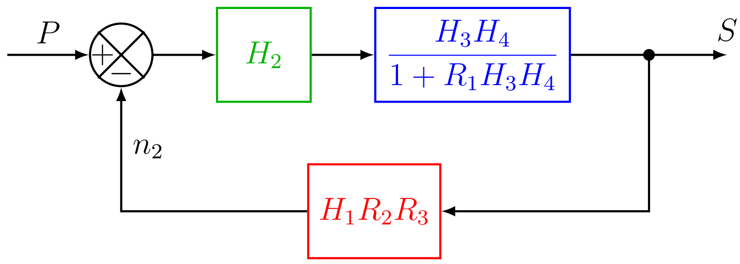
Le schéma fonctionnel réduit pour $E \equiv 0$ est maintenant :



Déplaçons le point de jonction situé entre les blocs H_3 et H_4 vers la droite et réduisons les blocs en série :



La réduction de la boucle de contre réaction interne nous donne :



La réduction de cette dernière boucle de contre réaction nous donne alors la fonction de transfert globale pour $E \equiv 0$. En utilisant le principe de superposition, on montre alors que la fonction de transfert globale pour les deux entrées est :

$$S = S_{P\equiv 0} + S_{E\equiv 0}$$

$$S = \frac{H_1H_2H_3H_4}{1+R_1H_3H_4+R_2R_3H_1H_2H_3}E + \frac{H_2H_3H_4}{1+R_1H_3H_4+R_2R_3H_1H_2H_3}P$$

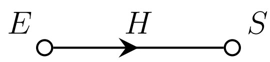
6. Graphe de fluence

Nous discutons ici d'une approche sensiblement différente pour la représentation graphique des relations mathématiques intervenants dans les SLCI. Cette partie est largement inspirée de [15]. Elle peut être omise au cours d'une première lecture. L'algèbre de ces graphes de fluence est cependant très éfficace et trouve de nombreuses applications en dehors de l'automatique.

6.1. Définitions

Branche et noeud

Dans l'application qui nous intéresse, un graphe de fluence peut être vu comme un schéma fonctionnel allégé. En effet, le graphe de fluence ne comporte que deux éléments de base : le **noeud** et la **branche orientée**. Les noeuds portent les variables du système (entrée, sortie, perturbation, commande...). Une branche reliant deux noeuds peut être ornée du facteur multiplicatif ou de la fonction de transfert.
L'équation (2.1) reliant une entrée et sortie par l'intermédiaire d'une fonction de transfert se représente par le graphe de fluence suivant :



$$S = HE$$

Source, puits et parcours

Nous allons condidérer le graphe de fluence suivant, pour illustrer différentes définitions :

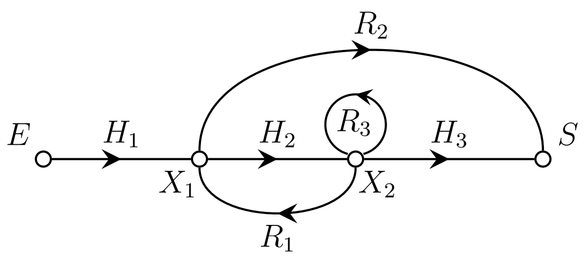


Figure 2.1. – Graphe de fluence présentant les différents éléments de bases, types de noeuds et de branches.

- Une **source** ou noeud d'entrée est un noeud dont toutes les branches sont divergentes. Exemple : le noeud E est une source.

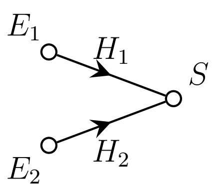
- Un **puits** ou noeud de sortie est un noeud dont toutes les branches sont convergentes. Exemple : le noeud S est un puits.
- Un **parcours** est une succession continue, unidirectionnelle de branches. Exemples : $\{E \to X_1 \to X_2 \to S\}$, $\{E \to X_1 \to S\}$, $\{X_1 \to X_2 \to S\}$, $\{E \to X_1 \to X_2 \to X_1 \to S\}$
- Un **parcours ouvert** est un parcours le long duquel chaque noeud n'est franchi qu'une fois. Exemples : $\{E \to X_1 \to X_2 \to S\}$, $\{E \to X_1 \to S\}$
- Un **parcours fermé** ou **boucle** est un parcours qui aboutit au noeud dont il est parti, chaque autre noeud n'étant franchi qu'une seule fois. Exemples : $\{X_1 \to X_2 \to X_1\}$, $\{X_2 \to X_2\}$ (cette dernière est appelée boucle élémentaire)

6.2. Algèbre des graphes de fluences

Nous présentons ici 7 opérations de bases liées à l'algèbre des graphes de fluence.

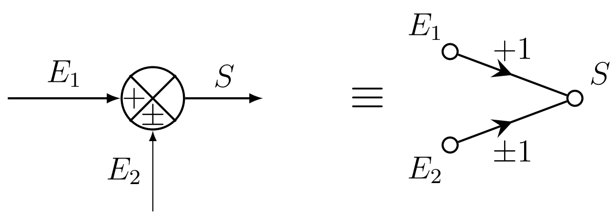
1. Addition en un noeud

La valeur d'un noeud est égale à la somme de tous les signaux convergeant vers ce noeud.



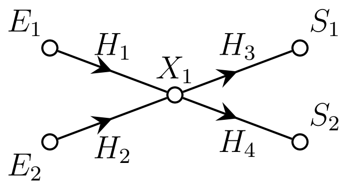
$$S = H_1E_1 + H_2E_2$$

Le comparateur/sommateur présentait précedemment est équivalent au graphe de fluence suivant :



2. Distribution par un noeud

La valeur d'un noeud est transmise par chaque branche quittant ce noeud.

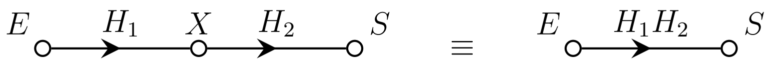


Ce graphe représente les équations suivantes :

$$\begin{aligned} X_1 &= H_1E_1 + H_2E_2 \\ S_1 &= H_3X_1 = H_1H_3E_1 + H_2H_3E_2 \\ S_2 &= H_4X_1 = H_1H_4E_1 + H_2H_4E_2 \end{aligned}$$

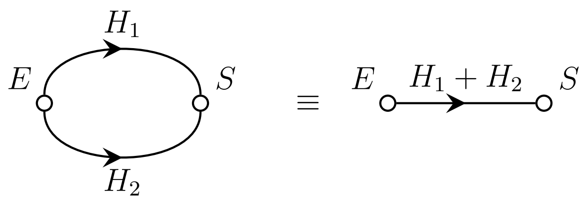
3. Branches en série

Un suite de branches en série peut étre réduite à une unique branche, dont la fonction de transfert est égale au produit des fonctions de transfert des diverses branches.



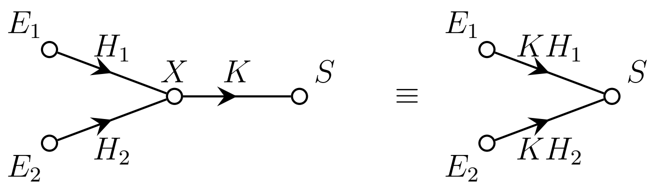
4. Branche en parallèle

Deux ou plusieurs branches connectées en parallèle, reliant le même noeud d'origine au même noeud extrémité, peuvent être réduites par une branche unique, dont la fonction de transfert est égale à la somme des fonctions de transfert des diverses branches.



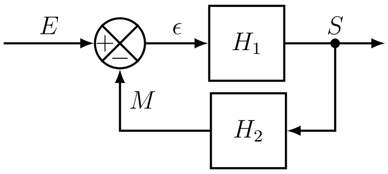
5. Absorption d'un noeud

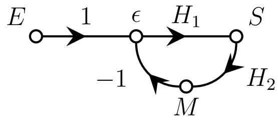
Un noeud qui n'est ni une source ni un puits peut être supprimé de la manière suivante :



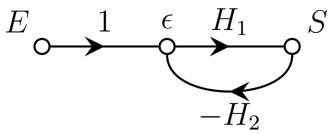
6. Boucles de contre-réaction

Considérons la boucle de contre-réaction définit par le schéma fonctionnel et le graphe de fluence équivalent :

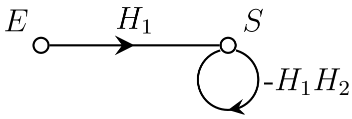




La variable M du graphe de fluence peut être réduit, ce qui donne :



Il est possible d'éliminer le noeud porté par la variable ϵ :



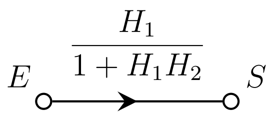
Ce dernier graphe exprime la relation suivante :

$$S = H_1E - H_1H_2S$$

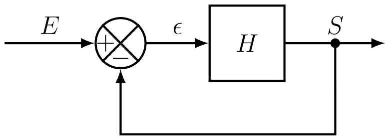
d'où l'expression déjà établie :

$$S = \frac{H_1}{1 + H_1H_2}E,$$

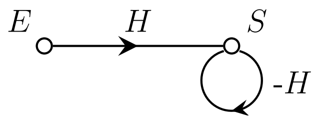
qui se représente simplement par le graphe de fluence :



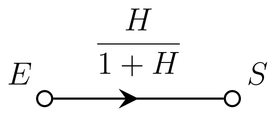
Comme nous l'avons déjà discuté, dans le cas d'une boucle de contre-réaction unitaire, la branche de retour est égale à 1



De la même manière que précedemment, le graphe de fluence se limite à deux noeud et deux branches (dont une boucle élémentaire).



La fonction de transfert est simplement représentée par le graphe suivant[4]



7. Le gain d'un parcours

Le gain d'un parcours est le produit des toutes les fonctions de tranfert des branches parcourues.

6.3. Règle de Mason

Ces opérations de bases vont nous permettre d'introduire la règle de Mason[5]. Cette régle permet de réduire le graphe de fluence et déterminer la fonction de transfert entre l'entrée et la sortie d'un graphe de fluence.
La fonction de transfert globale H entre la source E et le puits S d'un graphe de fluence est égale à

$$H = \frac{S}{E} = \frac{1}{\Delta}\sum_k G_k \Delta_k \tag{2.10}$$

où

[4]Remarquons que le graphe précédent exprime la relation $S = H(E - S)$ qui nous donne bien la fonction de transfert $\frac{H}{1+H}$. Cependant, cette expression exprime une grandeur que l'on cherche en fonction d'elle même. En remplaçant, S par sa définition $H(E - S)$, on obtient

$$S = HE - H(H(E - S)) = HE - H^2E + H^2S = H(1 - H)E + H^2S.$$

En procédant de même avec cette nouvelle expression, on obtient une relation de récurrence.

$$S = EH\sum_k^n (-1)^k H^k + (-1)^{(n+1)}H^{n+1}S$$

Pour $n \to \infty$, on reconnaît la série géométrique $\sum_k^n (-1)^k H^k = \frac{1}{1+H}$ et $H^{n+1} \to 0$ pour $|H| < 1$. La sortie S tend donc bien vers la fonction de transfert attendue, seulement si $|H| < 1$. Cette dernière condition pourra être interprétée comme une limite de stabilité du gain de la fonction de transfert dans le cas d'un système dans une boucle de contre réaction.

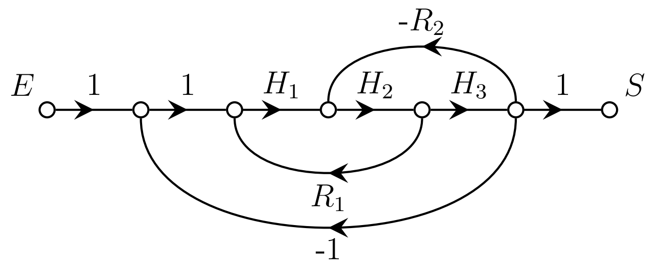
[5]Samuel Jefferson Mason (1921-1974), électronicien américain.

- k dénombre les parcours ouverts entre E et S,
- G_k est le gain du k-ème parcours ouverts
- Δ est le **déterminant du graphe**, donné par :

$$\Delta = 1 - \sum_i B_i - \sum_{i,j} B_i B_j - \sum_{i,j,k} B_i B_j B_k \dots \tag{2.11}$$

  où les B_i sont les gains des boucles du graphe de fluence, d'abord pris séparemment ($\sum_i B_i$) puis deux à deux ($\sum_{i,j} B_i B_j$), puis par trois ($\sum_{i,j,k} B_i B_j B_k$) et ainsi de suite. On ne prend en compte que les produits de boucles disjoints, c'est à dire n'ayant aucun noeud en commun.
- Δ_i est le déterminant du graphe obtenu en supprimant le parcours ouvert de gain G_i.

Exemple 1



Ce graphe de fluence possède trois boucles de gain :

- $-H_1H_2H_3$
- $R_1H_1H_2$
- $-R_2H_2H_3$

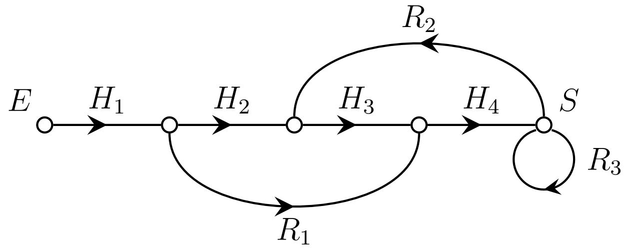
et un parcours ouvert $H_1H_2H_3$ de déterminant $\Delta_k = 1$. Les boucles étant toutes disjointes, le determinant du graphe est donc simplement donné par :

$$\Delta = 1 - R_1H_1H_2 + H_1H_2H_3 + R_2H_2H_3$$

La fonction de transfert de ce graphe de fluence est donc :

$$H = \frac{H_1H_2H_3}{1 - R_1H_1H_2 + H_1H_2H_3 + R_2H_2H_3}$$

Exemple 2



Ce graphe de fluence présente 2 boucles non disjointes de gain R_3 et $R_2H_3H_4$ et 2 parcours ouverts de gain $H_1H_2H_3H_4$ et $R_1H_1H_4$. Le déterminant du graphe est donc donné par

$$\Delta = 1 - R_3 - R_2H_3H_4$$

La fonction de transfert associé à ce graphe de fluence est donc :

$$H = \frac{H_1H_2H_3H_4 + R_1H_1H_4}{1 - R_3 - R_2H_3H_4}$$

Annexes

A. Alphabet Grec

Nom	Minuscule	Majuscule	Correspondance latine	Usages courants
alpha	α	A	a	angles
bêta	β	B	b	angles
gamma	γ	Γ	g	angles
delta	δ	Δ	d	variations
epsilon	ϵ, ε	E	e	petite quantité
zéta	ζ	Z	z	-
êta	η	H	é (long)	rendement
thêta	θ, ϑ	Θ	th	angles
iota	ι	I	i	-
kappa	κ, $\varkappa$	K	k	-
lambda	λ	Λ	l	longueur, densité linéique
mu	μ	M	m	masse réduite
nu	ν	N	n	fréquence
ksi	ξ	Ξ	ks	coefficient sans dimension
omicron	o	O	o	-
pi	π, ϖ	Π	p	Π :plan
rhô	ρ, ϱ	P	r	densité volumique
sigma	σ, ς	Σ	s	σ : densité surfacique, Σ : Système
tau	τ	T	t	temps, durée relative
upsilon	υ	Y	u	-
phi	ϕ, φ	Φ	f,ph	angles
khi	χ	X	kh	coefficients
psi	ψ	Ψ	ps	fonction d'onde
oméga	ω	Ω	ô	vitesse angulaire, angle solide

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

Références

[1] Régulation automatique (analogique) (REG). http://php.iai.heig-vd.ch/~mee/.

[2] http://www.demosciences.fr/projets/scilab-xcos/-utilisation/premiers-pas.

[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. Orieux. *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.

[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.

Index

Glossaire

SLCI Système Linéaire Continu et Invariant

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
$\mathscr{L}\left\{f(t)\right\}$	Transformation de Laplace de la fonction $f(t)$
$\mathscr{L}^{-1}\left\{F(p)\right\}$	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
ω	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
ω_0	Pulsation propre

$\mathrm{Im}[H(j\omega)]$	Partie imaginaire du nombre complexe $H(j\omega)$
$\mathrm{Re}[H(j\omega)]$	Partie réelle du nombre complexe $H(j\omega)$
ξ	Coefficient d'amortissement
$G(\omega)$	Gain naturel de la réponse harmonique en fonction de la pulsation
$G_{dB}(\omega)$	Gain en dB 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%