CHAPITRE 1

GÉNÉRALITÉS SUR LA STABILITÉ ET LA COMMANDE ADAPTATIVE

1.1 Introduction

La commande non linéaire a fait son apparition dans les années de 1980 avec les travaux d'Isidori [24], plus récemment la commande par backstepping (commande stabilisante non linéaire), l'origine du celui-ci n'est pas tous a fait clair, ceci est dû l'apparition simultané et souvent implicite dans les articles publié des 1980.cependant,il est juste de dure que le backstepping a reçue beaucoup d'attention grâce au travaux de professeur V.kokotovitc et ses collaborateurs [15] d'une part , Kanllkapous et AL d'autre part. durant les années suivantes, des manuels édités sont apparus [20].

L'idée fondamentale du backstepping est de synthétiser une loi de commande d'une manière systématique et récursive. Certaines composantes du vecteur d'état sont considérées comme des commandes virtuelles et des lois de commande intermédiaires élaborée. Le backstepping s'applique aux systèmes non linéaires sous forme triangulaire.

1.2 Systèmes non linéaires incertains

Un système non linéaire est un ensemble d'équations non linéaire décrivant l'évolution temporelle des variables constitutives du système sous l'action d'un nombre fini de variables indépendantes appelées variables de commande, ou simplement commandes.

Dans les systèmes incertains le calcul de la commande passe nécessairement par l'utilisation d'un modèle qui ne peut jamais être une représentation parfaite de la réalité : il y a toujours des incertitudes de modélisation, dont la conséquence est qu'on ne peut pas décrire exactement par un modèle mathématique le comportement d'un système physique. En effet, le modèle mathématique qui peut être issu, soit des équations physiques reflétant notre compréhension des mécanismes mis en jeu, soit d'une procédure d'identification du comportement entrée/sortie du système, dépend de paramètres dont la valeur est souvent mal connue ou évolue au cours du temps. Donc un système physique ne peut jamais être caractérisé exactement par un modèle mathématique, cependant dans certain cas nous avons une estimation de l'exactitude de notre modèle qui pourrait être plutôt imprécise.

1.3 Notion de stabilité

1.3.1 Définitions

1.3.1.1 Équilibre

Physiquement, un système est en équilibre quand il conserve son état en absence de forces externes. Mathématiquement, cela équivaut à dire que la dérivée $\dot{x}$ de son état est nul. Pour un système

$$\dot{x} = f(x) \tag{1.1}$$

L'état (ou les états) d'équilibre x_e est la solution (les solutions) de l'équation algébrique

$$f(x) = 0 \tag{1.2}$$

Pour les systèmes linéaires, on a $f(x) = Ax$ ce qui implique que $x = 0$ est un point d'équilibre pour les systèmes linéaires deux cas diffèrent peuvent souvenir :

- Si A est régulière, alors l'origine est le seul point d'équilibre.
- Si A est singulier ce qui définit un sous-espace où $Ax = 0$, alors il existe une région d'équilibre.

Pour les systèmes non linéaires, la solution n'est pas aussi évidement l'équilibre ne se trouve pas toujours à l'origine. Les régions d'équilibre peuvent être constituées de domaine continus ou de points isolés et /ou la combinaison des deux.

1.3.1.2 Stabilité

Il existe plusieurs définitions de la stabilité dans le domaine d'automatique, parmi ces définitions

Définition 1.3.1. *On dit qu'un système est stable si, déplacé de sa position d'équilibre, il tend à y revenir ; instable, s'il tend à s'en écarter davantage.*

Définition 1.3.2. *Un système est stable si en réponse à une entrée bornée, la sortie du système est bornée.*

Définition 1.3.3. *Un point d'équilibre x_e est dit stable si $\forall \sigma > 0$, il existe $r(\sigma) > 0$ tel que :*

$$si \ \|x_0 - xe\| \leq r \ alors \ \|x(t) - x_e\| \leq \sigma, \ \forall \sigma \geq 0$$

Définition 1.3.4. *Si le système est initialement "légèrement" perturbé de son point d'équilibre le système reste "proche" de ce point d'équilibre [21].*

FIGURE 1.1 – Illustration de la définition intuitive de la stabilité.

1.3.1.3 Stabilité locale

La stabilité locale concerne simplement la position d'équilibre considérée, sans rien préjuger sur le domaine de validité de cette stabilité. C'est une condition nécessaire, mais non suffisante à la stabilité du système dans un certain domaine, contenant cette position d'équilibre.

1.3.1.4 Stabilité globale

On parle de stabilité globale lorsque le système est stable pour toutes les valeurs que peuvent prendre les variables du système. La stabilité globale possède un intérêt pratique beaucoup plus considérable que la stabilité locale. Elle ne dépend pas seulement du système, mais aussi des valeurs que peuvent prendre les variables dans le problème considéré. Ainsi, le même système est stable ou instable globalement, suivant le domaine de variables auquel on s'intéresse.

1.3.1.5 Stabilité asymptotique

La stabilité asymptotique exige l'existence d'un voisinage de l'équilibre tel que toute trajectoire ayant pour condition initiale un point de ce voisinage converge vers le point d'équilibre. En somme, on aimerait que le système revienne et s'arrête au point d'équilibre lorsqu'il en est l'égerment perturbé [21].
Point d'équilibre $x_e = 0$ est asymptotiquement stable s'il est stable et attractif, c.-à-d. s'il existe

$$r > 0 \; tel \; que \; \forall w_0 \in B(x_e, r), \lim_{t \to \infty} x(t) = 0$$

1.3.1.6 Stabilité exponentielle

Nous connaissons la stabilité asymptotique : $x(t) \to 0$ lorsque $t \to \infty$ Cependant on veut garantir plus [21] :
On dit que l'origine est un point d'équilibre exponentiellement stable, s'il existe un voisinage de l'origine noté $u(0), \exists \alpha > 0$ et $\exists \lambda > 0$ tel que

$$\|x(t)\| \leq \alpha \|x(0)\| e^{-\lambda(t-t_0)}, \forall x_0 \in u(0), \forall t \geqslant t_0 \geqslant 0$$

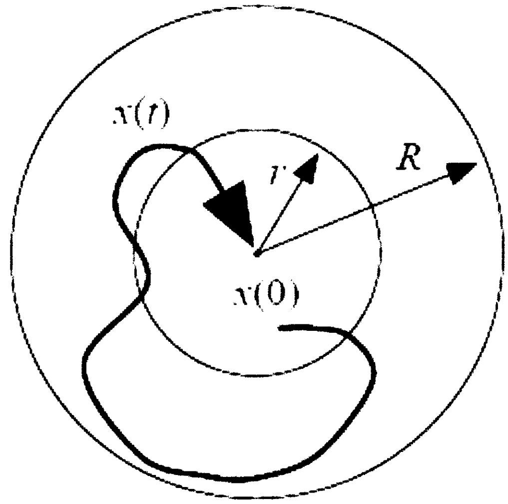

FIGURE 1.2 – Stabilité asymptotique

dans le cas , la constant λ est appelée le taux ou aussi la vitesse de convergence. L'origine $x = 0$ est un point d'équilibre globalement exponentiellement stable si $u(0) = \mathbb{R}^n$ [21, 19].

1.3.1.7 Stabilité de Lyapunov

Soit un système dont l'état est défini par le vecteur x qui possède la position d'équilibre x_e. Ecarté de cette position, et abandonné à lui- même au temps $t = t_0$ avec les conditions initiales $x(t_0)$, le système aura comme état $x(t)$. On dit que la position d'équilibre du système est stable, si pour tout $\varepsilon > 0$, il existe $\delta(\varepsilon) > 0$ tel que si

$$\|x(t) - x_e\|^2 \leq \delta_1$$

On soit certain qu'on aura après un certain temps t et pour toutes les valeurs $t > t_0$

$$\|x(t_0) - x_e\|^2 \leq \varepsilon_1$$

dans le cas contraire (i.e. s'il existe au moins un ε tel que l'on ne puisse pas trouver δ correspondants qui satisfasse aux inégalités) on dit que l'équilibre est instable [8].

1.4 Méthodes d'analyse de la stabilité des systèmes non linéaires

L'étude de la stabilité des systèmes non linéaires est très complexe. L'approche de Lyapunov est l'approche la plus utilisée pour étudier ce problème. Cette approche a été introduite au 19^{ieme} siècle par le mathématicien russe Alexandre Mikhaïlovitch Lyapunov dans son travail intitulé, "The général problem of the motion stabilité".

On distingue deux méthodes de Lyapunov pour l'analyse de la stabilité : La méthode de linéarisation et la méthode directe.

1.4.1 Première méthode de Lyapunov

Pour un système non linéaire, on s'intéresse souvent à son comportement au voisinage des points singuliers. Si la dynamique est linéarisée au tour d'un point d'équilibre, peut-on se prononcer sur la stabilité locale du système ? La réponse est donnée par le théorème de stabilité locale de Lyapunov, connu sous le nom de première méthode [25]. Soit le cas du système décrit par :

$$\dot{x}_1 = ax_1 + bx_2 + \prod_1 (x_1, x_2)$$
$$\dot{x}_2 = cx_1 + dx_2 + \prod_2 (x_1, x_2)$$

D'après Lyapunov, la stabilité de la position d'équilibre de ce système peut s'étudier sur la version Linéarisée, obtenue en négligeant les termes $\prod_1$ et $\prod_2$ qui contiennent des puissances supérieures ou égales à deux en x_1 et x_2.

Théorème 1.1.

- *Si le système linéarisé est asymptotiquement stable, il y a stabilité asymptotique.*
- *Si le système linéarisé est instable, il y a instabilité.*
- *Si le système linéarisé est stable sans l'être asymptotiquement, on ne peut se prononcer. C'est le cas critique de Lyapunov. La stabilité ou l'instabilité dans ce cas dépend des termes de degré supérieur à un, négligés dans l'approximation.*

Du point de vue pratique, ce théorème a cependant une importance limitée. D'une part, il ne permet d'étudier que la stabilité du point singulier (stabilité locale), et ne donne aucune information sur le domaine de stabilité (stabilité globale). D'autre part, il suppose que l'approximation du premier degré existe, autrement dit, que les développements en séries des seconds membres des équations comportent des termes du premier degré. Cette hypothèse exclut un certain nombre de cas importants (organe avec zone morte, plus-ou-moins,etc.).

1.4.2 Deuxième méthode de Lyapunov (Méthode Direct)

Son objectif, est de définir une méthode permettant d'analyser la stabilité d'un système non linéaire sans connaître explicitement les solutions des équations différentielles qui le décrivent. La philosophie de cette méthode n'est que l'extension mathématique d'un phénomène physique observé, car les systèmes mécaniques et électriques perdent de l'énergie pour se stabiliser au point d'équilibre.

La méthode directe de Lyapunov (ou la méthode des fonctions de Lyapunov) est dérivée du critère énergétique de stabilité. En appliquant ce critère indépendamment du concept d'énergie, on remplace alors l'énergie du système par une fonction de Lyapunov qui est définie positive (comme l'énergie).

Soit le système autonome :

$$\dot{x} = f(x), \; x_e = 0 \tag{1.3}$$

Ce système aura un point d'équilibre x_e globalement asymptotiquement stable, s'il existe une fonction scalaire $V(x)$ continue avec une dérivée partielle par rapport au temps $V(x)$ continue ayant les propriétés suivantes :

- $V(0) = 0$.
- $V(x) > 0, \; \forall x \neq 0$.
- $lim_{\|x\| \to \infty} V(x) = \infty$ *(Radialement non borné)*.
- $\dot{V} < 0, \; \forall \dot{x} \neq 0$.

Théorème 1.2. ***Stabilité asymptotique[2]***
S'il est possible de trouver une fonction $V(x)$ de signe définie positive avec $(V(0) = 0)$ dans un domaine $\mathbb{D}$ comprenant la position d'équilibre, et dont la dérivée totale par rapport au temps V soit définie et de signe opposé dans le même domaine, l'équilibre sera asymptotiquement stable dans ce domaine.

Théorème 1.3. ***Instabilité*** *[2]*

S'il est possible de trouver une fonction V dont la dérivée est de signe défini dans un domaine $\mathbb{D}$ *comprenant l'origine et que V soit*

- *Définie de même signe que* $\dot{V}$.
- *Indéfinie en signe l'équilibre est instable.*

Théorème 1.4. ***Stabilité simple*** *[2]*

S'il est possible de trouver une fonction V de signe défini dans un domaine $\mathbb{D}$ *et dont la dérivée totale soit semi-définie et de signe opposé dans le même domaine, l'équilibre est (simplement) stable dans ce domaine.*

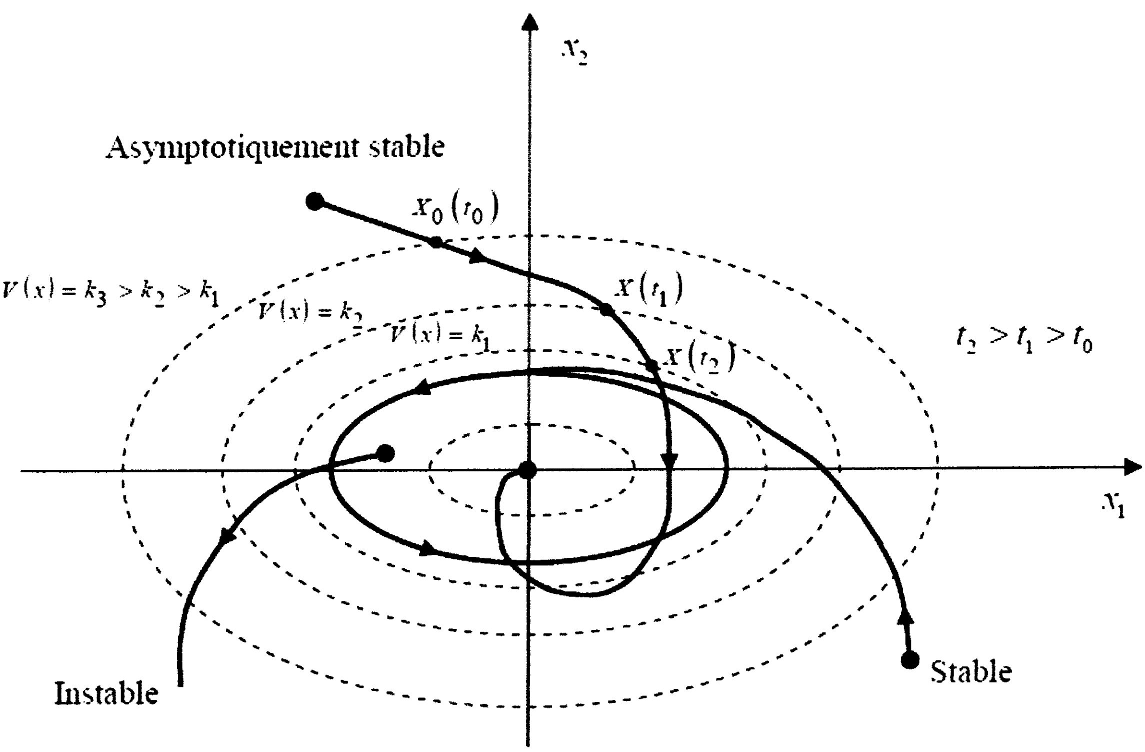

FIGURE 1.3 – Interprétation géométrique du théorème de Lyapunov

1.5 Commande par la méthode directe de Lyapunov

Dans les paragraphes précédents, nous avons étudié la stabilité des systèmes où on a supposé implicitement que la loi de commande a été choisie et notre but était de vérifier la stabilité du système avec cette loi de commande, mais le problème dans cette synthèse est comment trouver cette commande qui stabilisera le système. Nous allons présenter une méthodologie qui combine entre la recherche de la fonction de Lyapunov et la loi stabilisante. En général, il existe deux concepts pour l'application de la méthode directe de Lyapunov pour la synthèse d'une commande stable :

1^{ere} **concept :**

On suppose que la loi de commande existe et on cherche la fonction de Lyapunov.

2^{eme} **concept :**

Cette fois si on fait un choix sur la fonction de Lyapunov candidate $V(x)$, et on cherche la loi de commande qui satisfait les conditions de la stabilité au sens de Lyapunov.

1.5.1 Choix de la fonction de Lyapunov

La théorie de Lyapunov a été pendant longtemps un outil important dans la commande linéaire aussi bien que la commande non-linéaire cependant, son utilisation dans la commande non-linéaire a été entravée par les difficultés pour trouver une fonction de Lyapunov pour un système donné mais la tâche de trouver une telle fonction a été souvent laissée à l'imagination et à l'expertise du concepteur.

Même pour des systèmes simples et en l'absence d'incertitudes le choix de la fonction de Lyapunov, et de la loi de commande n'est pas toujours facile. Aucune règle générale n'existe à ce jour quant au choix d'une telle fonction. Et quand on sait l'influence de ce choix sur le comportement général du système.

1.5.2 Types des fonctions de Lyapunov

1.5.2.1 Fonction quadratique

Soit n'importe quelle matrice symétrique définie positive P (Une condition nécessaire et suffisante pour que la matrice symétrique P soit définie positive est que ses valeurs propres soient toutes positives), alors

$$V(x) = x^T P x$$

Est une fonction candidate de Lyapunov. Les équipotentielles de Lyapunov sont des ellipsoïdes avec des demis axes définis par les valeurs propres et vecteurs propres de

P. La dérivée au long de la trajectoire de V s'écrit :

$$\dot{V}(x) = x^T P f(x) + f(x)^T P x$$

1.5.2.2 Norme de max

Soit la fonction :

$$V(x) = max|x_i|$$

C'est à dire que l'on prend la valeur absolue maximale des coefficients du vecteur x. Les équipotentielles de Lyapunov sont des hyper cubes de cotés parallèles aux axes de l'espace vectoriel.la dérivée le long des trajectoires s'écrit :

$$V(x) = max|x_i| = x_i sing(x_i)$$
$$\dot{V}(x) = f_i(x) sing(x_i)$$

1.5.2.3 Norme dual de max

Soit la fonction :

$$V(x) = \sum |x_i|$$

C'est à dire que l'on prend la somme des valeurs absolues des coefficients du vecteur x. Les équipotentielles de Lyapunov sont des hyper cubes de sommets placés sur les axes de l'espace vectoriel. La dérivée le long des trajectoires s'écrit :

$$V(x) = \sum f_i(x) sing(x_i)$$

1.6 Commande par backstepping

1.6.1 Principe de la commande

Le principe de commande par backstepping consiste à calculer, d'une façon systématique, une loi de commande afin garantir qu'une certaine fonction de Lyapunov soit définie positive et sa dérivée soit toujours négative. Celle-ci permet de garantir la stabilité globale du système compensé tout en travaillant en poursuite et en régulation.

1.6.2 Algorithme de base

Soit le cas du système non linéaire du troisième ordre suivant :

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 \tag{1.4}$$

$$\dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2) + g_2(x_1, x_2)x_3 \tag{1.5}$$

$$\dot{x}_3 = f_3(x_1, x_2, x_3) + g_3(x_1, x_2, x_3)u \tag{1.6}$$

où, g_i et $f_i (i = 1, 2, 3)$ sont des fonctions non linéaires continues et connues telle que $f_i(0) = 0$ et $g_i(x) \neq 0$, $\forall (x_1, x_2, x_3) \in \mathbb{R}^3$ .On désire faire suivre à la sortie $y = x_1$, le signal de référence y_r, ou sont supposées connues et uniformément bornées. Le système étant du troisième ordre, la conception s'effectue en trois étapes.

Étape 1

On considère d'abord le premier sous-système (1.4). La variable d'état x_2 est traitée comme une commande virtuelle et l'on définit la première valeur désirée

$$\begin{aligned} x_{1d} &= \alpha_0 \\ &= y_r \end{aligned} \tag{1.7}$$

la première variable d'erreur est définie par

$$z_1 = x_1 - \alpha_0 \tag{1.8}$$

sa dérivée est

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= \dot{x}_1 - \dot{\alpha}_0 \\ &= f_1 + g_1 x_2 - \dot{\alpha}_0 \end{aligned} \tag{1.9}$$

on choisit la fonction de Lyapunov

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2 \tag{1.10}$$

sa dérivée le long de la solution est donnée par

$$\dot{V}_1 = z_1 \dot{z}_1 \tag{1.11}$$

afin d'assurer la stabilité du premier sous-système décrit par (1.4), on prend comme valeur de x_2 la fonction α_1 telle que

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= x_2 \\ &= \frac{1}{g_1} (-k_1 z_1 - f_1 + \dot{\alpha}_0) \end{aligned} \tag{1.12}$$

où $k_1 > 0$ est une constante de conception. La dérivée de la fonction de Lyapunov s'écrit

$$\dot{V}_1 = -k_1 z_1^2 \tag{1.13}$$

d'où la stabilité asymptotique de e_1

Étape 2

Dans cette étape on considère les sous-systèmes (1.4) et (1.5) et l'on définit la nouvelle variable d'erreur

$$z_2 = x_2 - \alpha_1 \tag{1.14}$$

à cause du fait que x_2 ne peut être forcée à prendre instantanément une valeur désirée, en l'occurrence α_1, l'erreur e_2 n'est pas instantanément nulle.

La conception dans cette étape consiste alors, à forcer cette erreur à s'annuler avec une certaine dynamique choisie au préalable. Les équations du système à commander, dans l'espace (e_1, e_2), s'écrivent

$$\dot{z}_1 = f_1 + \dot{\alpha}_0 + g_1 (z_2 + \alpha_1) \tag{1.15}$$

$$\dot{z}_2 = f_2 + \dot{\alpha}_1 + g_2 x_3 \tag{1.16}$$

pour lesquelles on choisit la fonction de Lyapunov

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} z_2^2 \tag{1.17}$$

qui a pour dérivée avec remplacement les équations (1.15) et (1.16) on obtient

$$\begin{aligned}
\dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + z_2 \dot{z}_2 \\
&= z_1 (f_1 + g_1 (z_2 + \alpha_1) - \dot{\alpha}_0) + z_2 (f_2 + g_2 x_3 - \dot{\alpha}_1) \\
&= z_1 (f_1 + g_1 \alpha_1 - \dot{\alpha}_0) + z_2 (f_2 + g_1 z_1 + g_2 x_3 - \dot{\alpha}_1) \\
&= -k_1 z_1^2 + z_2 (f_2 + g_1 z_1 + g_2 x_3 - \dot{\alpha}_1)
\end{aligned} \tag{1.18}$$

le choix de la valeur désirée de x_3 est donnée par

$$\begin{aligned}
x_{3d} &= \alpha_2 \\
&= \frac{1}{g_2} (\dot{\alpha}_1 - g_1 z_1 - f_2 - k_2 z_2)
\end{aligned} \tag{1.19}$$

où, $k_2 > 0$ et α_1 se calcule analytiquement

$$\dot{\alpha}_1 = \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1}\dot{x}_1 + \frac{\partial \alpha_1}{\partial y_r}\dot{y}_r + \frac{\partial \alpha_1}{\partial \dot{y}_r}\ddot{y}_r \tag{1.20}$$

un tel choix permet de réduire $\dot{V}_2$ à

$$\dot{V}_2 = -k_1 z_1^2 - k_2 z_2^2 \leqslant 0 \tag{1.21}$$

$\dot{V}_2$ étant une fonction définie négative, ce qui assure la stabilité asymptotique de z_1 et z_2.

Étape 3

Considérons maintenant le système global (1.4)-(1.6). La troisième variable d'erreur est

$$z_3 = x_3 - \alpha_2 \tag{1.22}$$

les équations du système dans l'espace des erreurs (z_1, z_2, z_3) sont données par

$$z_3 = f_1 - \dot{\alpha}_0 + g_1(z_1 + \alpha_1) \tag{1.23}$$

$$z_3 = f_2 - \dot{\alpha}_1 + g_2(z_2 + \alpha_2) \tag{1.24}$$

$$z_3 = f_3 - \dot{\alpha}_2 + g_3 u \tag{1.25}$$

on choisit la fonction de Lyapunov

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2}z_3^2 \tag{1.26}$$

Sa dérivée le long de la solution de (1.23)-(1.25) devient

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &= \dot{V}_2 + z_3\dot{z}_3 \\ &= -k_1 z_1^2 - k_2 z_2^2 - z_3\left(f_3 + g_2 x_2 + g_3 u - \dot{\alpha}_2\right) \end{aligned} \tag{1.27}$$

le choix approprié de la commande se donne par

$$u = \frac{1}{g_3}\left(-\dot{\alpha}_2 - f_3 - g_2 z_2 - k_3 z_3\right) \tag{1.28}$$

où, $k_3 > 0$ et $\dot{\alpha}_2$ se calcule analytiquement

$$\dot{\alpha}_2 = \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1}\dot{x}_1 + \frac{\partial \alpha_2}{\partial y_r}\dot{y}_r + \frac{\partial \alpha_2}{\partial \dot{y}_r}\ddot{y}_r + \frac{\partial \alpha_2}{\partial \ddot{y}_r}\dddot{y}_r \tag{1.29}$$

Il en résulte que

$$\dot{V}_3 = -k_1 z_1^2 - k_2 z_2^2 - k_3 z_3^2 < 0 \tag{1.30}$$

D'où la stabilité asymptotique en boucle fermée du système original z_1, z_2, z_3 et la régulation à zéro de l'erreur de poursuite $(y - y_r)$.

1.6.3 Système d'ordre n

L'application récursive de la commande par backstepping permet l'extension de la procédure de conception aux systèmes triangulaires de la forme :

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1 &= f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 \\
\dot{x}_2 &= f_2(x_1, x_2) + g_2(x_1, x_2)x_3 \\
&\vdots \\
\dot{x}_n &= f_n(x_1, \ldots, x_{n-1}) + g_{n-1}(x_1, \ldots, x_{n-1})x_n \\
\dot{x}_n &= f_n(x_1, \ldots, x_n) + g_n(x_1, \ldots, x_n)u
\end{aligned} \tag{1.31}$$

où, $f_i(0) = 0$ et $g_i \neq 0, (1 \leq i \leq n)$. La procédure de conception commence avec la première équation. Le changement de variable adéquat à chaque étape i permet d'appliquer le backstepping récursivement, en rajoutant l'équation $i + 1$. Partant de α_0, on construit les différents α_i et V_i. Ce qui résulte en

$$\begin{aligned}
x_{1d} &= \alpha_0 = y_r \\
x_{i+1d} &= \alpha_i \\
&= \frac{1}{g_i}\left(\varphi_i - g_{i-1}z_{i-1} - \omega_i - k_i z_i\right) \\
u &= \frac{1}{g_n}\left(\varphi_{n-1} - g_{n-1}z_{n-1} - \omega_n - k_n z_n\right)
\end{aligned} \tag{1.32}$$

où

$$\begin{aligned}
z_i &= x_i - \alpha_i \\
\varphi_i &= \sum_{k=1}^{i}\left(\frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial x_i} g_k x_{k+2} + \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial y_r^{(k-1)}} y_r^{(k)}\right) - \omega_i, \; i = 1, \ldots, n \\
\omega_i &= f_i - \sum_{k=1}^{i} \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial x_i} f_k
\end{aligned} \tag{1.33}$$

les différentes fonctions de Lyapunov sont données par

$$V_i = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n} z_i^2 \tag{1.34}$$

La commande u , qui permet d'atteindre les objectifs de conception pour le système global est donnée par la dernière commande virtuelle α_n [25].

1.7 Commande adaptative

La commande adaptative est définie comme une commande permettant au régulateur de s'adapter de lui-même aux changements du processus. En conséquence, l'objectif de la commande adaptative est l'ajustement automatique en ligne et des régulateurs des boucles de commande, afin de réaliser ou maintenir de façon identique un certain niveau de performances, quand les paramètres du procédé à commander varient dans le temps. Un système adaptatif peut également s'envisager comme une structure à deux boucles, une boucle principale classique qui prend en compte les variations des signaux d'entrée et de sortie, et une boucle secondaire qui réagit aux variations des paramètres du processus : c'est elle qui rend le système adaptatif. Les différentes méthodes de commande adaptative se différencient par la structure choisie pour réaliser la remise à jour en temps réel des paramètres du régulateur en fonction des variations du processus à commander [3].

La figure 1.4 représente le principe général d'un système dans une plage donnée de commande adaptative

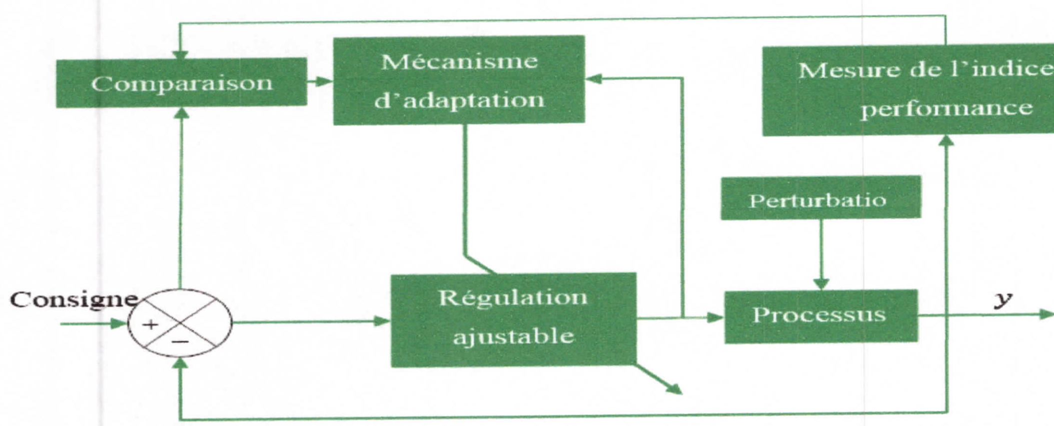

FIGURE 1.4 – Principe d'un système de commande adaptative

1.7.1 Commande adaptative indirecte

Le principe de la Commande Adaptative Indirecte repose sur l'identification d'un modèle du système en ligne et. Puis, avec ce nouveau modèle calculé, le régulateur permettant de satisfaire les spécifications nominales est de nouveau élaboré.

Comme il a été mentionné ci-dessus, cette stratégie se base sur les principes de séparation et d'équivalence certaine.

Un régulateur adaptatif est conçu selon le principe de séparation, si l'estimation du modèle du processus a lieu séparément de la recherche du régulateur : seul le critère sur la commande intervient pour la synthèse du régulateur, sans considération de performances de l'estimation, et vice et versa. Le principe de l'équivalence certaine s'inscrit dans le prolongement du principe de séparation, en considérant que les paramètres du modèle issus de la phase d'identification caractérisent parfaitement le comportement du système, autrement dit toute erreur d'identification nécessairement présente n'est pas prise en compte pour la phase de synthèse de la loi de commande. Ce principe permet donc de séparer totalement les deux étapes (justifiant par ailleurs la terminologie de commande adaptative indirecte), identification puis commande. Le schéma de principe de ce type de commande est illustré Figure 1.5.

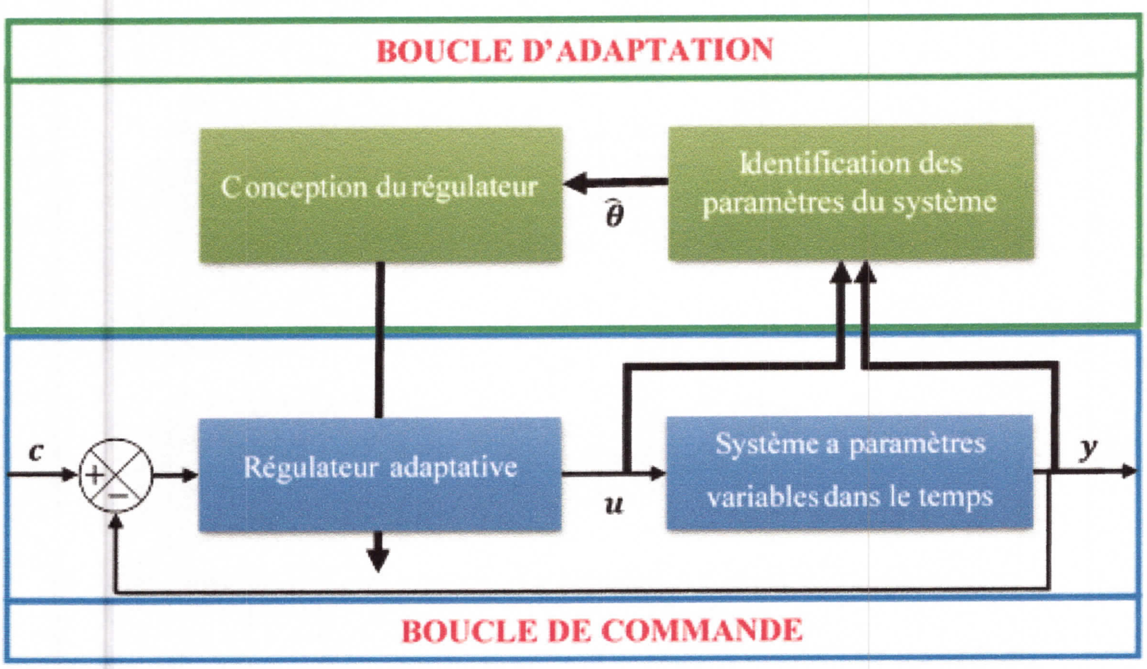

FIGURE 1.5 – Structure de la commande adaptative indirecte

1.7.2 Commande adaptative directe

La Commande Adaptative Directe est une approche moins intuitive que la précédente. L'idée consiste à recalculer les paramètres du régulateur, mais sans identifier explicitement les paramètres du système, donc en une seule étape, justifiant ainsi la terminologie de commande directe.

Le schéma de la Figure 1.6 illustre ce type de commande, pour laquelle les performances de la boucle fermée sont spécifiées par l'intermédiaire d'un modèle de référence choisi par l'utilisateur de façon cohérente avec les possibilités intrinsèques du système.

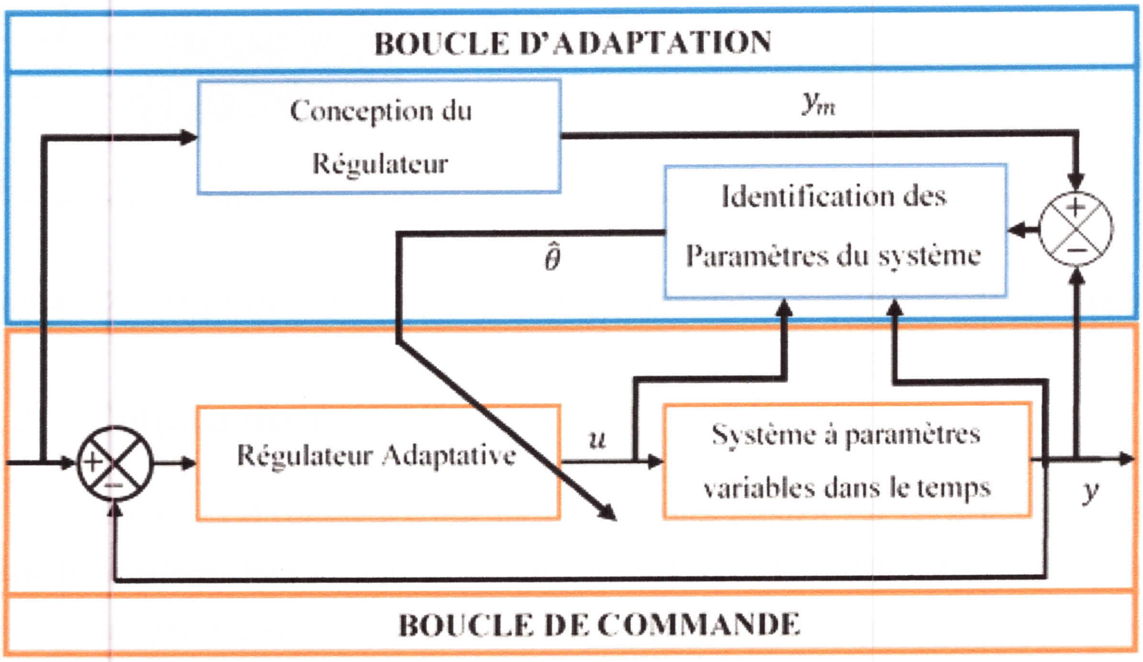

Figure 1.6 – Structure de la commande adaptative directe

1.7.3 Commande adaptative à modèle de référence

La commande adaptative avec modèle de référence consiste à adopter l'organe de commande d'une façon à ce que le processus se comporte comme le modèle de référence. La détermination d'une loi de commande adaptative permet à la repense du système de suivre celle du modèle même en présence des perturbations en agissant sur les performances dynamiques du système. Le principe de cette commande est illustré dans la figure 1.7.

Dans ce que reste de ce mémoire nous nous intéressons par la commande adaptative indirecte synthétisé par la procédure de backstepping.