

# Avant-propos

Cet avant-propos nous donne une vue d'ensemble des signaux et systèmes, généralités et notion de contrôle et de processus.

## Introduction

L'objectif principal de ce livre est l'analyse et l'étude de signaux et systèmes déterministes, linéaires, invariant dans le temps, de dimension finie et causaux. On s'attachera à définir un ensemble d'outils utiles pour l'automatique et le traitement du signal puis on exposera les méthodes de représentation de systèmes linéaires dynamiques, d'analyse de leur comportement. Enfin on abordera l'identification et la synthèse de lois de commandes dans le but de la stabilisation et la régulation pour le contrôle des systèmes. Le dernier chapitre sera consacré à l'utilisation du robot Nao pour une application dédiée, en l'occurrence, à l'assistance à domicile.

## Signaux et systèmes, généralités

Que ce soit dans le domaine analogique ou numérique, l'étude des propriétés caractéristiques de signaux et systèmes et la connaissance des outils mathématiques et des méthodes de traitement et analyse, prennent ces derniers temps de plus en plus d'importance et ne cessent d'évoluer. La raison en est que l'état actuel de la technique, particulièrement de l'électronique et de l'informatique, rend possible la réalisation de systèmes de traitement très avancés, efficaces et de moins en moins coûteux en dépit de leur complexité. Les finalités et les exigences dépendent en général des applications. La figure 1 présente les relations entre les différentes disciplines, les ressources scientifiques et technologiques pour leur exploitation dans un objectif de traitement

du signal ou automatique pour la conduite ou le développement des applications actuelles<sup>1</sup>.

Dans tous les domaines de la physique, pour l'étude, l'analyse et la compréhension des phénomènes naturels, une étape de modélisation et d'étude de la structure du processus physique est nécessaire. Ceci a conduit au développement des techniques de modélisation, représentation et analyse de systèmes utilisant une terminologie assez générale. Cette terminologie est difficile à introduire de façon claire, mais les notions qu'elle invoque seront définies de manière précise dans les chapitres qui suivent.

Le traitement du signal concerne les diverses opérations effectuées sur une grandeur physique analogique ou numérique dans le but d'une analyse, d'une interprétation ou de l'extraction d'informations. Ces opérations sont schématisées par la figure 2.

La maîtrise et la mise en œuvre des techniques de traitement du signal nécessitent la connaissance de certains outils théoriques. L'objectif de ce livre est d'établir les concepts de base de l'étude théorique et de préciser les méthodes courantes de traitement.

Un processus physique se décompose en plusieurs constituants ou parties formant ce qu'on peut appeler un système. C'est le cas, par exemple, d'un moteur qui est composé d'un amplificateur, d'une alimentation, d'une partie électromagnétique et d'un capteur de position et/ou vitesse. L'entrée du système est la tension appliquée à l'amplificateur et la sortie est, soit la position, soit la vitesse de rotation de l'axe du moteur.

Parmi les objectifs de l'automaticien, on peut noter la modélisation, l'analyse du comportement et la régulation ou l'asservissement, dans le but d'optimiser le comportement du système en dynamique. Le pilotage du système ou asservissement a pour but d'assurer que les variables à régler ou sorties du système suivent une trajectoire désirée (courbe fonction du temps en général) ou ont une dynamique spécifiée par le cahier des charges. Pour la régulation de la température d'une enceinte à une valeur de référence, on peut utiliser l'un des schémas de principe. La conduite d'un véhicule obéit au schéma de principe figure 3.

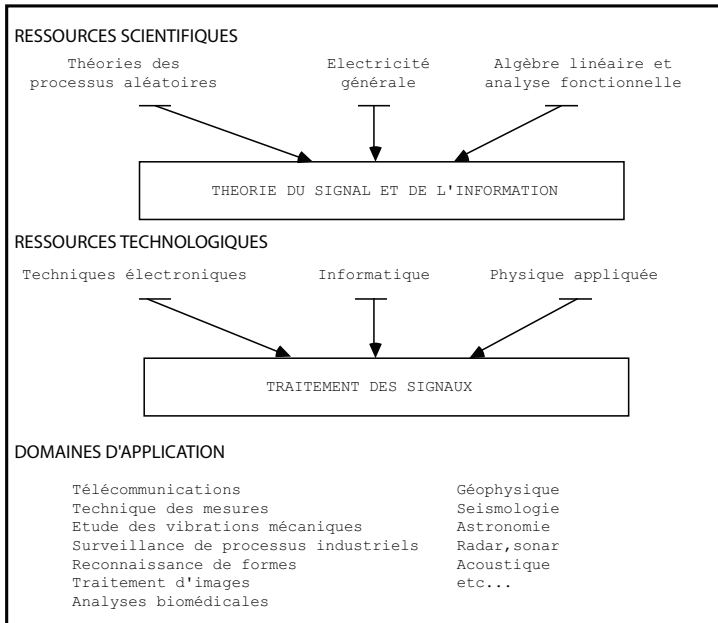
## **Notion de contrôle et de commande de processus**

L'objectif de l'automatique est la conception de systèmes de contrôle et de commande capables d'affecter à un processus dynamique (physique, physico-chimique,

---

1. L'auteur conseille d'éviter le livre *Traitement du signal, Asservissements linéaires* de I. Jelinsky, dans la série Vuibert Technologie, afin d'éviter à ses lecteurs toute mauvaise interprétation et confusion avec les notions présentées dans ce livre.

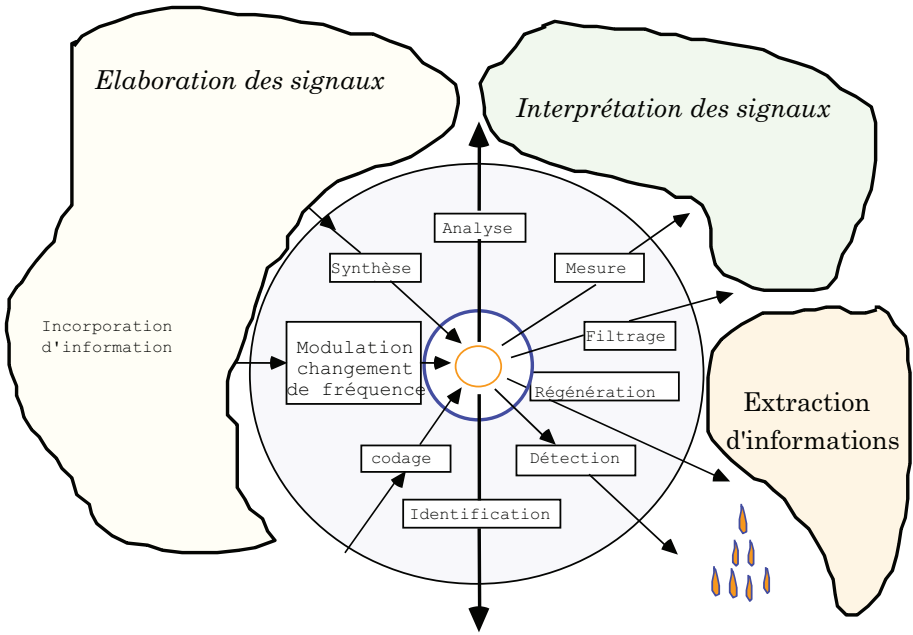
biologique, économique, etc.) un comportement défini à l'avance par l'opérateur sur un cahier des charges. Par exemple, on peut considérer la commande de la vitesse d'une voiture qui donne au processus (la voiture) une vitesse déterminée à l'avance, indépendamment des perturbations qui peuvent se produire (variation de la pente, etc.). Comme autres exemples on peut citer un système de pointage d'antenne radar destiné à suivre la trajectoire d'un avion ou d'un satellite, un climatiseur destiné à stabiliser la température à une valeur constante fixée à l'avance.



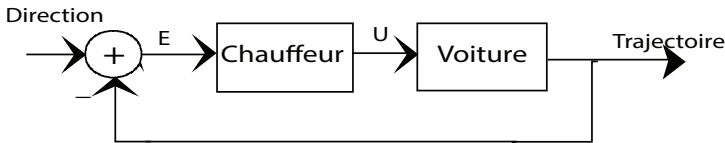
**Figure 1.** Ressources scientifiques et technologiques appliquées

Un processus peut se définir par la mise en relation des grandeurs d'entrées et de sorties (on le définira formellement de plusieurs façons dans ce livre). Il peut être représenté figure 4.

Pour l'exemple de la voiture, la sortie est la vitesse et les entrées peuvent être la position de la pédale d'accélérateur, la pente de la route et/ou toute autre grandeur physique pouvant agir sur la vitesse (la sortie du système). Les entrées se composent de celles sur lesquelles on peut agir (position de la pédale) et de celles sur lesquelles aucune action n'est possible (la pente de la route). Ces dernières sont appelées entrées de perturbations, elles peuvent être mesurables ou non accessibles, aléatoires ou déterministes. Les variables sur lesquelles on peut agir peuvent être utilisées comme entrées de commande.



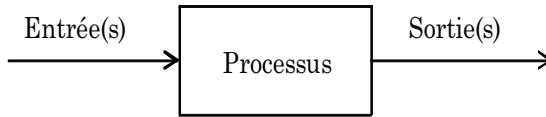
**Figure 2.** Les concepts de base de l'étude théorique et les méthodes de traitement



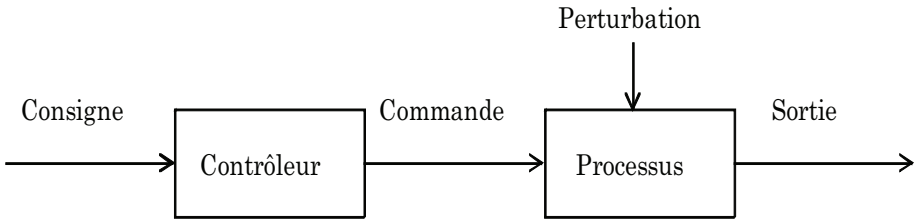
**Figure 3.** Schéma de principe du modèle de la conduite d'un véhicule

Pour maintenir constante la vitesse du véhicule, on doit élaborer un modèle mathématique du processus liant la vitesse du véhicule à la position de la pédale d'accélérateur et ensuite, par inversion de ce modèle, on peut déduire l'entrée nécessaire pour obtenir une vitesse spécifiée. On effectue ainsi, si on ne prend pas en compte la sortie du système, une commande en boucle ouverte (voir figure 5).

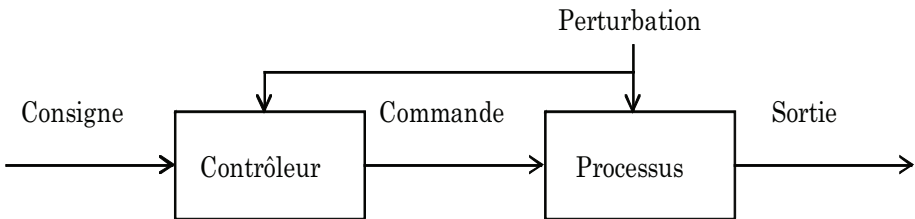
La figure 5 montre que le système de commande ne tient pas compte des perturbations, il ne peut donc fonctionner correctement si, par exemple, le véhicule rencontre différentes pentes. Dans ce cas, la pente est une entrée perturbation pour le processus. Il aurait fallu que le modèle tienne compte de la pente et donc d'un système de mesure de la pente (ainsi on aurait une compensation de perturbations mesurables).



**Figure 4.** *Processus à grandeurs d'entrées et de sorties*



**Figure 5.** *Processus en boucle ouverte*



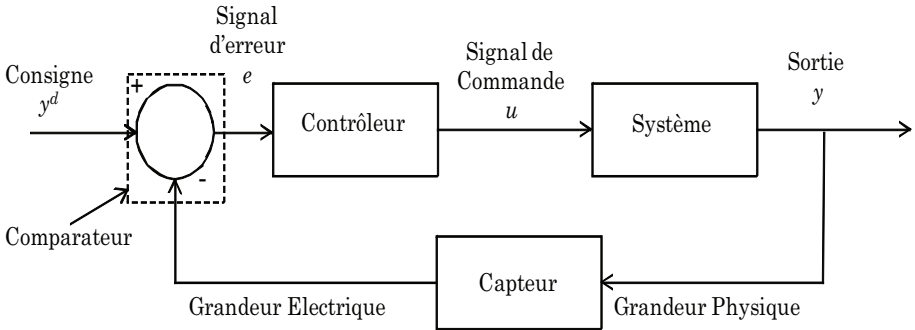
**Figure 6.** *Processus en boucle ouverte avec perturbations*

Pour améliorer le comportement, on peut définir un système de commande qui calcule, en fonction de l'écart vitesse désirée – vitesse obtenue, l'action nécessaire sur la pédale permettant de réguler (stabiliser) la vitesse à une valeur spécifiée par l'opérateur. On aura ainsi un système de pilotage automatique de la vitesse du véhicule. Un capteur mesurant la vitesse obtenue est nécessaire. Ce système réalise automatiquement ce que fait le conducteur : comparer la vitesse de consigne à la vitesse réelle (affichée par le tableau de bord (capteur)) et agir sur l'accélérateur de manière à ramener la différence en vitesse à zéro. On aura alors un *système de commande* ou *système bouclé* ou asservissement (système asservi). Le schéma de principe (fonctionnel) d'un système asservi est donné par la figure 7 :

–  $y^d$  : la consigne est une grandeur électrique qui représente la valeur de la sortie désirée du système ;

–  $\varepsilon$  : le signal d'erreur entre la consigne et la sortie réelle du système ;

- $u$  : le signal de commande généré par le système de commande ;
- $y$  : une grandeur physique qui représente la sortie du système.



**Figure 7.** Schéma de principe d'un système asservi

La grandeur physique  $y$  est mesurée à l'aide d'un capteur qui la traduit en une grandeur électrique. Cette grandeur électrique est comparée à l'aide du comparateur à la consigne.

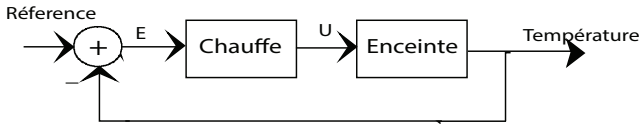
L'un des grands avantages d'un système bouclé par rapport à un système en boucle ouverte réside dans le fait que le système bouclé rejette automatiquement les perturbations. Dans les asservissements, lorsque la consigne (référence) est constante, on parle de *régulation* (par exemple : régulation de température d'un four, régulation de vitesse d'un moteur, etc.) dans le cas où la référence n'est pas constante, on parle de *poursuite* (par exemple : suivi de cible par une antenne, etc.).

Une entrée supplémentaire (mesure de la pente) par rapport à l'équipement existant dans l'exemple précédent, permettrait de compléter ce schéma par une *anticipation* sur l'effet de la perturbation (due à la variation de pente).

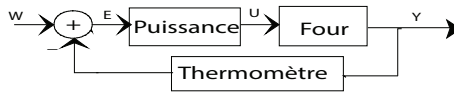
Un système est dit régulé lorsqu'un bouclage entre la sortie ou variable à régler est l'entrée de consigne du système existant. Par exemple, pour le système de chauffage d'une maison ou d'une enceinte, l'entrée est la consigne en température et la sortie la température dans l'enceinte. Un système de chauffage en boucle ouverte est un système qui ne présente pas de bouclage prenant en compte la température effective de l'enceinte. Ainsi, il est sensible aux perturbations extérieures, une élévation de la température extérieure provoquera un excès de chauffage.

*Exemples* : asservissement de température d'un four, asservissement de débit d'un fluide ou asservissement de la vitesse et de la trajectoire d'un mobile. Lorsque la trajectoire désirée est réduite à un point, on parle de régulation et non d'asservissement

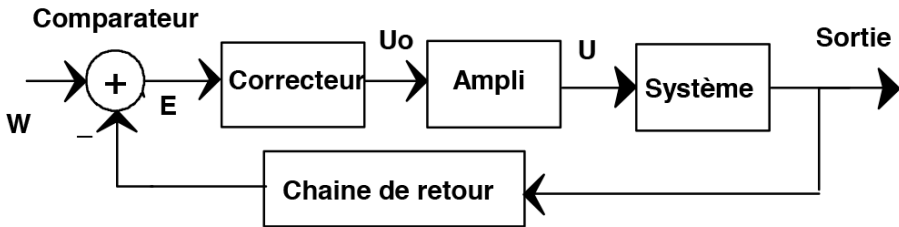
car il s'agit là de stabiliser la sortie du système en un point. Un asservissement peut être qualifié par son degré de stabilité, sa précision, sa vitesse de réponse, sa sensibilité aux perturbations agissant sur le système, sa robustesse vis-à-vis des perturbations sur les mesures et des erreurs ou variations des paramètres caractéristiques du système. La précision d'un système de commande peut se caractériser par l'amplitude maximale de l'erreur de position.



**Figure 8.** Régulation de vitesse d'un moteur



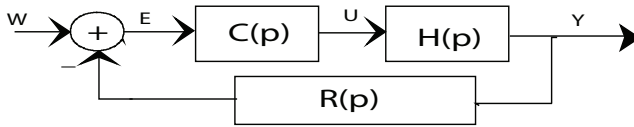
**Figure 9.** Régulation de température d'un four



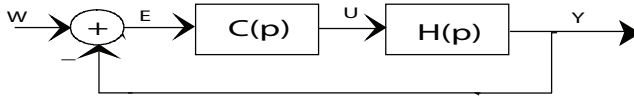
**Figure 10.** Asservissement d'un système avec correction

Pour la définition d'un asservissement, nous noterons les fonctions de transfert comme suit :  $H(p)$  transfert du système à asservir,  $p$  est l'opérateur de Laplace,  $R(p)$  transfert du capteur ou appareil de mesure,  $C(p)$  transfert du correcteur ou organe d'asservissement. La consigne est  $\omega(t)$  et la sortie à asservir  $y(t)$ . La chaîne directe est composée de  $C(p)$  et  $H(p)$ . Le bloc  $R(p)$  constitue la chaîne de retour.  $e(t)$  est l'écart entre la sortie et la consigne appelé aussi erreur de régulation ou erreur de suivi de trajectoire. Afin de simplifier l'étude, on se ramène à un schéma à retour unitaire ou  $R(p) = 1$ .

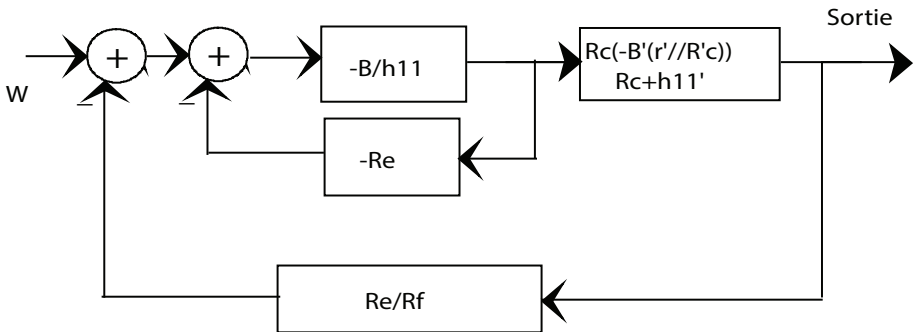
En général, les transferts  $H(p)$  et  $R(p)$  sont connus, estimés ou peuvent être obtenus et le but est la détermination d'un correcteur  $C(p)$  permettant de satisfaire les performances exigées pour le système en boucle fermée (transfert de  $w$  à  $y$ ).



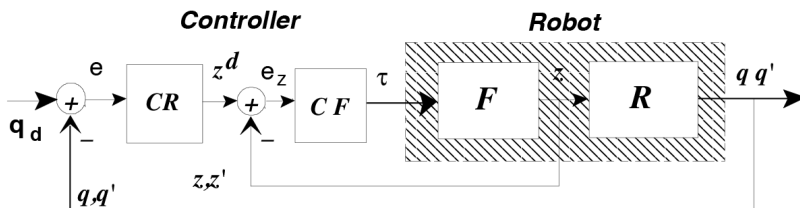
**Figure 11.** Fonction de transfert asservie avec chaîne de retour



**Figure 12.** Fonction de transfert asservie sans chaîne de retour



**Figure 13.** Asservissement avec correction d'un système en boucle fermée



**Figure 14.** Asservissement avec correction d'un système robotisé

On distingue différents types de systèmes :

- les systèmes continus pour lesquels toutes les grandeurs mesurées sont continues ;



– les systèmes discrets pour lesquels toutes les grandeurs mesurées ne le sont qu'à des instants bien précis (discontinues ou discrètes), on parle de système échantillonnés ou numériques ;

– les systèmes linéaires (ils peuvent être décrits par des équations différentielles linéaires) ;

– les systèmes non linéaires (décrits par des équations différentielles non linéaires). On peut, souvent en première approximation, linéariser des systèmes non linéaires autour d'un point de fonctionnement (équilibre), en considérant des petites variations autour de ce point ;

– les systèmes invariants dans le temps (décrits par des équations différentielles à coefficients constants) et les systèmes variables dans le temps (décrits par des équations différentielles à coefficients variables dans le temps).

Dans ce livre, nous considérons des systèmes linéaires invariants dans le temps, continus et échantillonnés.

**NOTATIONS 1.** Considérons un système continu à  $r$  entrées notées  $u$  et  $m$  sorties  $y$  :

$$u \in U \subset R, y \in Y \subset R \quad [1]$$

$$u \in U \rightarrow \boxed{\text{Système}} \rightarrow y \in Y \quad [2]$$

Une représentation d'état minimal de ce système sera notée :

$$\dot{X} = A.X + Bu \quad [3]$$

$$y = C.X + D.u \quad [4]$$

Sa fonction de transfert :

$$G(p) = C(pI - A)^{-1}B + D \quad [5]$$

est notée :

$$G(p) = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = [A, B, C, D] \quad [6]$$

A est stable : les valeurs propres de A sont à partie réelle  $< 0$ .

$G(p)$  est stable : les pôles de  $G(p)$  sont dans  $Re(p) < 0$ .

$G(p)$  est antistable : les pôles de  $G(p)$  sont dans  $Re(p) > 0$ .

$$\tilde{G}(p) = G(-p).$$

$G(p)$  est une fonction de transfert propre si  $G(\infty)$  est fini.

$G(p)$  est une fonction de transfert strictement propre si  $G(\infty) = 0$ .

$A^T$  est la matrice transposée de :

$$A = [a_{ij}] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \quad [7]$$

$$A^T = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} \\ a_{12} & a_{22} \end{bmatrix} \quad [8]$$

$A^{-T}$  est la matrice inverse transposée de A.

$A^*$  est la matrice transposée conjuguée de  $A = [a_{ij}]$  (ou matrice adjointe de A).  
 $A^* = [a_{ij}^*]$ .

$\lambda_i(A)$  est la valeur propre de A.

$\sigma_i(A)$  est la ième valeur singulière de A.

$\underline{\sigma}(A)$  et  $\bar{\sigma}(A)$  sont les valeurs singulières minimales et maximales de A.

$Diag(a_i)$  est la matrice diagonale dont les éléments diagonaux sont les  $a_i$ .

$C_-$  est l'ensemble des nombres complexes à partie réelle négative.

$C_+$  est l'ensemble des nombres complexes à partie réelle positive.

$C^m$  est l'ensemble des vecteurs complexes à éléments dans C.

$C^{n \times m}$  est l'ensemble des matrices complexes de dimension  $(n \times m)$  à éléments dans C.

$\langle x, y \rangle$  est le produit scalaire de  $x$  et  $y$ .

$h \otimes u$  est le produit de convolution de  $h(t)$  et de  $u(t)$ .

$\mathcal{F}$  est l'opérateur transformation de Fourier.

$\theta_h$  opérateur convolution par  $h(t)$ , on notera  $H(p)$  est la transformée de Laplace de  $h(t)$ .

$\Lambda_{Hg} = H(p).g(p)$  est l'opérateur de Laurent ou multiplication dans le domaine fréquentiel.

$\oplus$  somme directe de deux espaces.

$H_2^\perp$  espace orthogonal à  $H_2$ , avec l'ensemble  $H_2 = \{H(p) \text{ fonction matricielle analytique dans } \operatorname{Re}(p) > 0\}$ .

$\Pi_1$  est la projection orthogonale sur  $H_2$  et  $\Pi_2$  la projection orthogonale sur  $H_2^\perp$ .

**NOTATIONS 2.**  $\mathcal{B}(x, r) \equiv$  Boule de rayon  $r$ , centrée en  $x$  de l'espace ; l'exemple  $\mathcal{B}(0, 1)L_2 = \mathcal{B}L_2$  désigne la Boule de rayon unité de l'espace  $L_2$ .  $L_2$  est l'ensemble des fonctions de carré sommable.

Dans la littérature, on désigne par fonction de transfert réelle rationnelle une fonction de transfert rationnelle à coefficients réels.

## Robot Nao : application à l'assistance à domicile

Forte de ces considérations et dans la continuité des travaux passés et actuels, la finalité de cette section est la perception pour la compréhension conjointe de l'espace et du milieu par un robot personnel autonome, cognitif et sociable. Ce robot Nao va classiquement agir en fonction d'un schéma planifié d'actions, s'assurer de la viabilité de celles-ci, de la cohérence des modèles courants et de la présence d'entités contrariant son plan initial, tout en interagissant avec le monde physique grâce à la perception. La démarche retenue, qui vise clairement à l'intégration de fonctions perceptuelles sur des plateformes robotiques, s'appuie sur une modélisation probabiliste afin de considérer des percepts multiples et incertains. Au niveau sensoriel, ces percepts seront principalement issus de la vision embarquée sur le robot. Ces fonctions perceptuelles sont à décliner selon les capacités d'autonomie, de cognition et de sociabilité mises en exergue pour notre robot Nao.

Une situation de plus en plus préoccupante avec le vieillissement de la population est celle de l'augmentation du nombre de personnes âgées vivant seules, éloignées de

leurs proches, parfois fragilisées physiquement et/ou mentalement. Des études recommandent, sur le plan social comme sur le plan économique, le maintien à domicile des personnes, avec recours éventuel à des aides (ménages, soins, jardinages, etc.), pour préserver autant que faire se peut les repères et le réseau social de la personne. Toutefois, le coût de l'aide à domicile étant relativement lourd, les temps de présence sont limités et ne suffisent pas toujours à lutter contre la solitude. De plus, lorsque la personne âgée présente des risques d'accidents (chute, AVC, etc.), ou lorsqu'elle fait l'objet d'un traitement médical, un suivi basé uniquement sur l'aide à domicile devient risqué, voire insuffisant (l'hospitalisation étant alors préférée).

Pour lutter plus efficacement contre l'isolement et la dépendance des personnes âgées, le système présenté vise à réaliser un prototype de système automatisé et robotisé pour l'assistance à domicile. Sans prétendre recréer ou remplacer de véritables contacts humains, le système proposé, basé sur l'intégration de plusieurs technologies, permettra de créer une présence à domicile permanente, conviviale et rassurante. Grâce à l'utilisation de moyens de communication audio/vidéo modernes (reconnaissance de la parole, synthèse vocale, etc.), du robot mobile humanoïde Nao de chez Aldebaran Robotics et de caméras fixes permettant de percevoir l'environnement, il s'agit de fournir un ensemble de services permettant d'assister une personne âgée dans ses tâches quotidiennes (mise en relation avec des proches, consultation médicale à distance, recherche d'objets, rappels de prise de médicaments, etc.), de la divertir (jeux, exercices physiques, présence amicale, etc.) et de détecter des situations dangereuses ou anormales (chutes, inactivités prolongées, comportements inhabituels, etc.) pour alerter le médecin et les proches.