Lycée LA FAYETTE Clermont-Ferrand

CPGE

Analyse et modélisation des systèmes

Cours

v1.2

Lycée La Fayette – 21 Bd Robert Schuman – 63000 Clermont-Ferrand – Académie de Clermont-Ferrand

Compétences visées:

A1-01	Décrire le besoin
A1-02	Traduire un besoin fonctionnel en exigences
A1-03	Présenter la fonction globale
A1-04	Définir les domaines d'application, les critères technico-économiques
A1-05	Identifier les contraintes
A1-06	Identifier et caractériser les fonctions
A1-07	Qualifier et quantifier les exigences
A1-08	Évaluer l'impact environnemental
A2-03	Identifier la nature des flux échangés traversant la frontière d'étude
A3-01	Analyser les architectures fonctionnelle et structurelle
A3-02	Identifier les fonctions des différents constituants
A3-07	Identifier et décrire la chaine d'information et la chaine d'énergie du système
A3-13	Interpréter tout ou partie de l'évolution temporelle d'un système
D1-03	Lire et décoder un diagramme

Table des matières

1 Système industriel **3**
1.1 Notion de système . . . 3
1.2 Classification . . . 3
1.3 Domaine d'application . . . 4
1.4 Critères technico-économiques . . . 4

2 Ingénierie système **5**
2.1 Introduction . . . 5
2.2 Cycle de vie . . . 5
2.3 Frontière d'étude . . . 6
2.4 Cas d'utilisation . . . 6
2.5 Éxigences d'un système . . . 7
2.6 Cahier des Charges Fonctionnel . . . 8
2.7 Représentation des chaînes fonctionnelles . . . 9

3 Triptyque des Sciences de l'Ingénieur **11**

4 Les systèmes automatisés **11**
4.1 Système automatisé - Automatique . . . 11
4.2 Classification des systèmes automatisés . . . 12
4.3 Système logique vs asservi . . . 13
4.4 Système asservis . . . 13
4.5 Commande directe vs asservi . . . 14
4.6 Performances d'un système asservi . . . 15

5 Architecture des systèmes automatisés **20**
5.1 Représentation par blocs . . . 20
5.2 Diagrammes structurels SysML . . . 20

6 Schéma-blocs fonctionnel **22**
6.1 Schéma-blocs acausal . . . 23
6.2 Schéma-blocs causal . . . 23

L'objectif des Sciences de l'Ingénieur est de mettre en place les outils permettant d'analyser et de comprendre le fonctionnement des systèmes complexes industriels afin de valider leurs performances.

1 Système industriel

1.1 Notion de système

Définition *Notion de système*

En Sciences de l'Ingénieur, un **système** sera considéré comme une **association structurée d'éléments en relation entre eux**, de façon à former une entité remplissant une ou plusieurs fonctions, conçu ou à concevoir, **répondant à un besoin** des Hommes.

Exemple:

- système d'équations : plusieurs équations liées entre elles par des inconnues communes ;
- système nerveux : neurones et synapses qui assurent les connexions entre neurones.

Ensemble de pièces

Robot humanoïde

Solveur de Rubixcube

FIGURE 1 – Ce sont les pièces et les relations entre les pièces qui font un système

1.2 Classification

On distingue deux grandes catégories de systèmes :

- les **systèmes naturels** (*système solaire*) ;
- et les **systèmes artificiels**, créés par l'Homme pour remplir une fonction précise. Ces derniers sont appelés **systèmes techniques ou industriels**.

Les systèmes industriels peuvent être de natures différentes mais sont tous caractérisés par une **complexité forte** et une **interdisciplinarité**. La conception d'un système industriel ne doit pas être faite au hasard, au risque d'aboutir à un produit qui n'intéressera ou ne satisfera pas aux exigences des clients.

Pour faciliter l'étude d'un **système complexe**, il sera possible de le **décomposer en sous-systèmes** plus simples. Chaque sous-système pourra alors être considéré comme un système composé d'autres sous-systèmes en relation. Cette décomposition peut être effectuée jusqu'à aboutir aux **composants simples** (FIGURE 2).

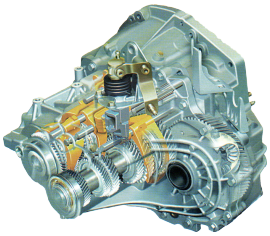
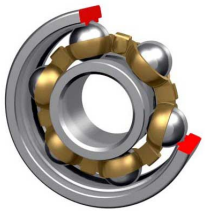
Véhicule	Boîte de vitesses	Roulement à billes
		
BdV, moteur, carrosserie...	carter, fourchettes, engrenages, roulements à billes...	bague intérieure, bague extérieure, billes, cages à billes, billes

FIGURE 2 – Exemple de sous-systèmes appliqué à un véhicule automobile

1.3 Domaine d'application

Le domaine d'application est le milieu physico-économique dans lequel évolue le système et pour lequel il a été conçu. Dans ce milieu, le système est dit **système industriel** (FIGURE 3) ; dans le laboratoire, pour une utilisation dans un cadre pédagogique, il sera appelé **système d'étude**.

La majorité des domaines d'applications seront rencontrés lors de l'étude des systèmes en TD et en TP au cours de l'année : aéronautique, robotique, domotique, médical, recherche, énergie, transport...

IRM, *médical*

Voiture électrique, *transport*

Robot, *conditionnement*

FIGURE 3 – Systèmes associés à leur domaine d'application

1.4 Critères technico-économiques

Des critères technico-économiques sont pris en compte dès la phase de conception du système industriel. On utilise par exemple les critères, de durée de vie, de coût, de fiabilité, de quantité, de faisabilité, d'impact environnemental ...

À titre d'exemple, les solutions techniques qui permettent de satisfaire le besoin « se raser » sont très variées : le rasoir jetable une lame (peu cher et peu robuste), au rasoir électrique sans fil à 3 têtes rotatives, diffuseur de crème hydratante, écran intégré (très cher et le client attend qu'il soit robuste).

2 Ingénierie système

2.1 Introduction

Définition

L'**Ingénierie Système - IS** est une **approche scientifique interdisciplinaire** récente, dont le but est de **formaliser et d'appréhender la conception de systèmes complexes**.

La conception d'un système donne souvent lieu à une accumulation de documentations pluridisciplinaires qui doivent toutes être croisées et mises à jour pour maintenir la cohérence et respecter les spécifications du système. Il existe des outils permettant de regrouper, dans un modèle commun à tous les corps de métiers, les spécifications, les contraintes, et les paramètres de l'ensemble du système. Ceci permet d'éviter tout problème de communication qui engendrerait du retard dans l'élaboration du système.

Le langage utilisé en CPGE est le SysML (Systems Modeling Language). C'est un langage de modélisation permettant de décrire tout ou partie d'un système technique, d'un point de vue exigences, comportemental ou structurel. Il s'articule autour de neuf types de diagrammes que nous aborderons et utiliserons pour présenter et/ou étudier les systèmes.

Remarque

Le programme de MPSI-MP précise que vous devez être capable de lire et comprendre la plupart de ces diagrammes. Il n'est pas nécessaire de connaitre toutes les subtilités d'écriture.

Remarque

Le langage SysML a été élaboré par un organisme à l'origine du langage UML utilisé en informatique. On retrouve de nombreux points communs à ces deux langages.

2.2 Cycle de vie

La notion de « cycle de vie » est indissociable d'un système. Elle exprime les différentes étapes qui vont de l'analyse du besoin jusqu'à l'élimination et/ou le recyclage de ses constituants.

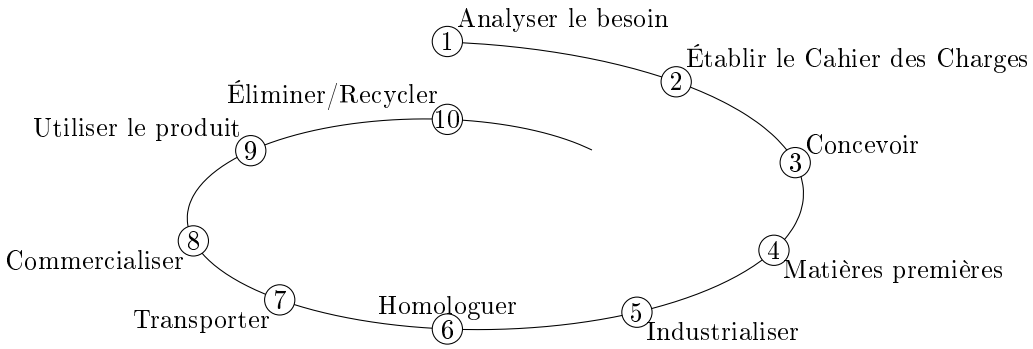


FIGURE 4 – Quelques phases du cycle de vie d'un produit

2.3 Frontière d'étude

Un système est toujours en interaction avec son environnement. L'étude d'un système ne se limite donc pas à l'étude de ses composants et des interactions entre eux mais aussi à l'étude des relations avec les éléments du milieu extérieur. Ces derniers définissent alors les limites (frontière) du système.

Définition

Le **diagramme de contexte** SysML permet de définir les **frontières de l'étude**, et en particulier de préciser la phase du cycle de vie dans laquelle on situe l'étude (généralement la phase d'utilisation) (FIGURE 5).

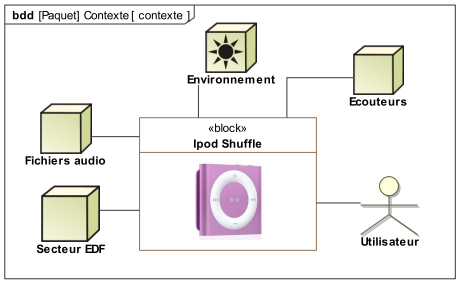


FIGURE 5 – Exemple de diagramme de contexte de l'iPod

Il répond à la question : « Quels sont les acteurs et éléments environnants du système ? ». Il n'y a pas de syntaxe spécifique à utiliser).

2.4 Cas d'utilisation

Définition

Le **diagramme des cas d'utilisation** SysML présente les **différentes fonctionnalités** proposées par le système (FIGURE 6). Ces fonctionnalités peuvent varier selon la phase de vie considérée (utilisation normale du produit, maintenance, recyclage ...)

Il répond à la question « Quels services rend le système aux différents acteurs ».

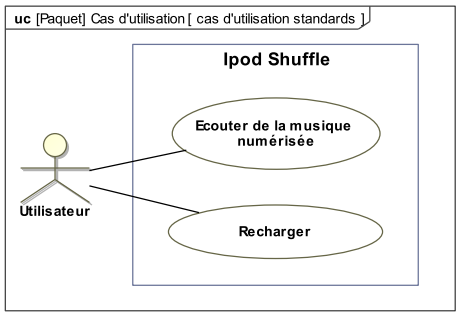


FIGURE 6 – Exemple de diagramme de cas d'utilisation de l'iPod

uc : *Use Case* (cas d'utilisation).
acteur : c'est un utilisateur (stickman) ou bien un élément extérieur (bloc).

2.5 Éxigences d'un système

D'un point de vue le plus général, un système industriel est vu comme générateur de prestations, c'est-à-dire qu'il est conçu pour satisfaire les besoins de l'utilisateur. De nombreux systèmes ou produits permettent de répondre à un même besoin, mais n'ont pas les mêmes exigences (FIGURE 7).

FIGURE 7 – Systèmes répondant à un même besoin avec des exigences différentes

Définition

Le **diagramme des exigences** SysML liste l'ensemble des **capacités** ou des **contraintes** qui doivent être satisfaites par le système (FIGURE 8).

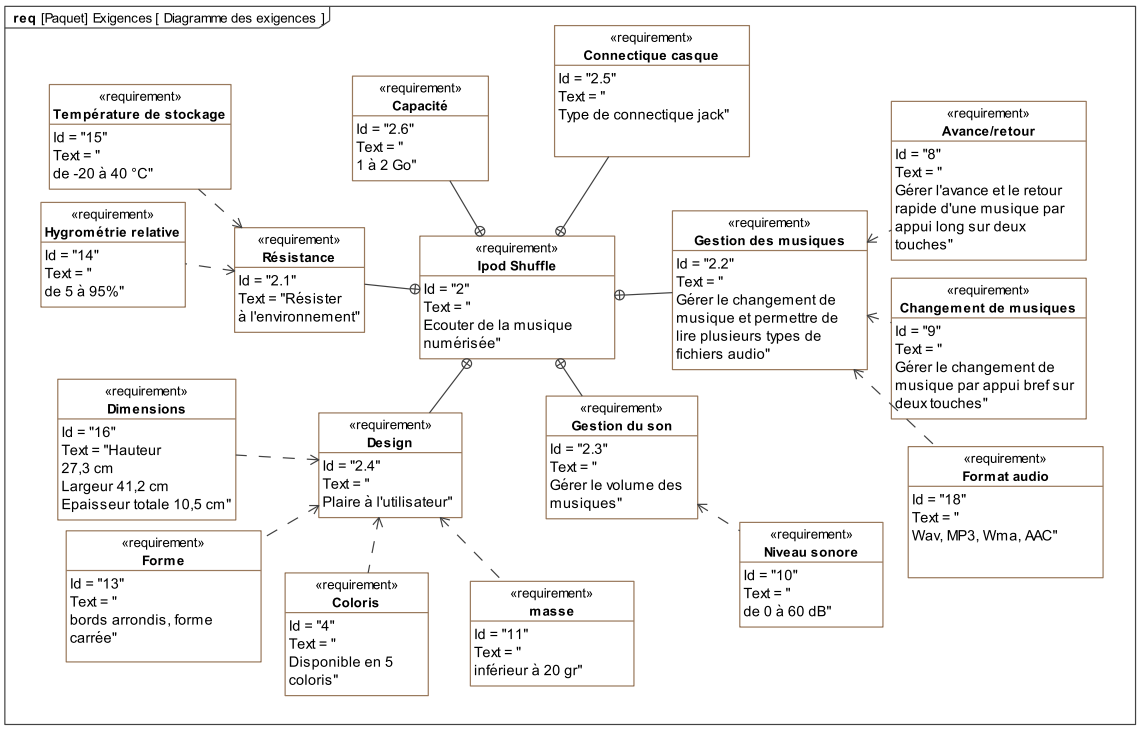


FIGURE 8 – Exemple de diagramme d'exigences de l'iPod

Ces exigences sont ensuite traduites par les ingénieurs en fonctions. Il est alors nécessaire de définir des niveaux de performances, des conditions de fiabilité, de traçabilité... Les exigences servent donc à établir le contrat entre le client et les concepteurs du système. Les fonctions doivent toujours être décrites **à l'aide d'un verbe à l'infinif**.

Dans un premier temps, pour simplifier la lecture des diagrammes, on ne considère que deux types de liaisons entre les blocs (d'autres types de relations seront présentées ultérieurement dans l'année) :

——⊕ indique que l'exigence est incluse dans une autre exigence (contenance) ;

- - - - → indique que l'exigence dépend d'une autre exigence (dépendance).

req : *requirements* (Éxigences).

2.6 Cahier des Charges Fonctionnel

L'identification de la frontière, des cas d'utilisation et des exigences permet ainsi de définir le cahier des charges fonctionnel (CdCF) d'un système.

Définition

Le **cahier des charges fonctionnel** regroupe l'ensemble des fonctions que le système doit (devra) réaliser, et découle de l'analyse des exigences.

À chaque fonction seront associés des critères de validation et leurs niveaux associés, ainsi qu'une éventuelle flexibilité (0 = aucune, 2 = accepté sans condition).

Fonctions	**Critères**	**Niveaux**	**Flexibilité**
Permettre d'écouter de la musique numérisée	Capacité de stockage	1 à 2 Go	0
	Erreur de lecture	Aucune	0
Plaire à l'utilisateur	Coloris	RAL 7035, RAL 5015, RAL 3013, RAL 5007, RAL 4008	0
	Formes arrondies	Rayons > 2 mm	2
	Présence de voyants	Oui	1
	Dimensions :		
	Hauteur	27,3 cm	1
	Largeur	41,2 cm	1
	Épaisseur totale	10,5 cm	1
	Esthétique	90% le trouve beau	0
	Masse	< 20 g	1
Résister au milieu ambiant	Humidité relative	5 à 95 %	1
	Température de stockage	-20 à 45°	1
Permettre de lire tout type de données	Format	MP3, WAV, AAC...	0
Être adapté à l'oreille de l'utilisateur	Volume sonore	Entre 0 et 60 dB	0

FIGURE 9 – Extrait du Cahier des Charges Fonctionnel de l'iPod

2.7 Représentation des chaînes fonctionnelles

Définition

On peut modéliser les systèmes automatisés en mettant en évidence 2 chaînes fonctionnelles :

- **une chaîne d'information** regroupant toutes les fonctions liées aux flux d'information dans le système ;
- **une chaîne d'énergie** regroupant les fonctions qu'elle réalise concernant les flux d'énergie au sein du système.

La chaîne d'information (Figure 10) permet :

- d'**acquérir des informations** :
  - sur l'état d'un produit ou de l'un de ses éléments (en particulier de la chaîne d'énergie) ;
  - issues d'interfaces Homme/Machine ou élaborées par d'autres chaînes d'information ;
  - sur un processus géré par d'autres systèmes (consultation de bases de données, partage de ressources ...) ;
- de **traiter ces informations** ;
- de **communiquer les informations** générées par l'unité de traitement pour réaliser l'assignation des ordres destinés à la chaîne d'énergie et/ou pour élaborer des messages destinés aux interfaces Homme/Machine (ou à d'autres chaînes d'information).

Elle est donc constituée des fonctions génériques : **acquérir**, **traiter** et **communiquer**.

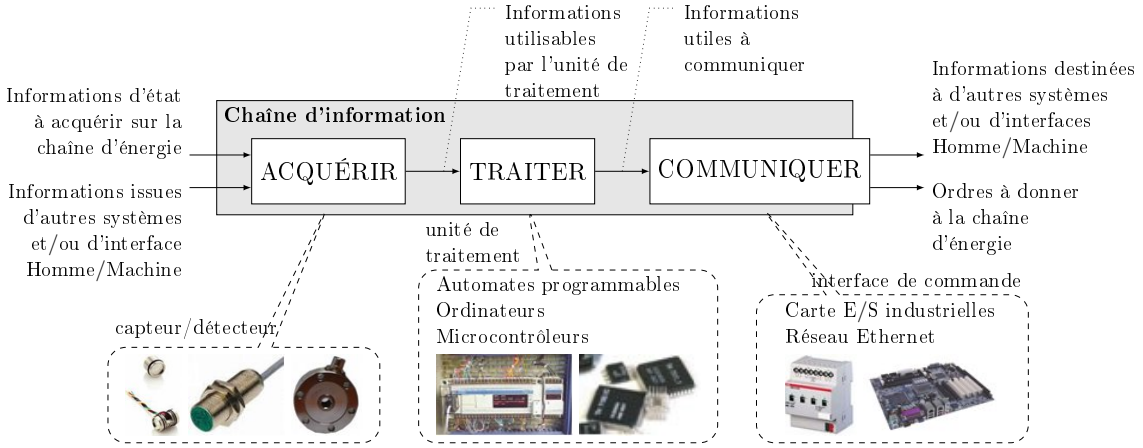


Figure 10 – Chaîne d'information générique d'un système automatisé

La chaîne d'énergie (Figure 11) :

Assure la réalisation d'une fonction de service dont les caractéristiques sont spécifiées dans le cahier des charges. C'est elle qui agit en fonction des ordres donnés par la chaîne d'information.

Elle est constituée des fonctions génériques : **alimenter**, **moduler**, **convertir**, **transmettre** et **adapter** qui contribuent à la réalisation d'une action (**Agir**).

L'action à réaliser impose un flux d'énergie que le système doit transmettre et moduler par sa commande. Les performances dépendent des caractéristiques des divers constituants de la chaîne d'énergie.

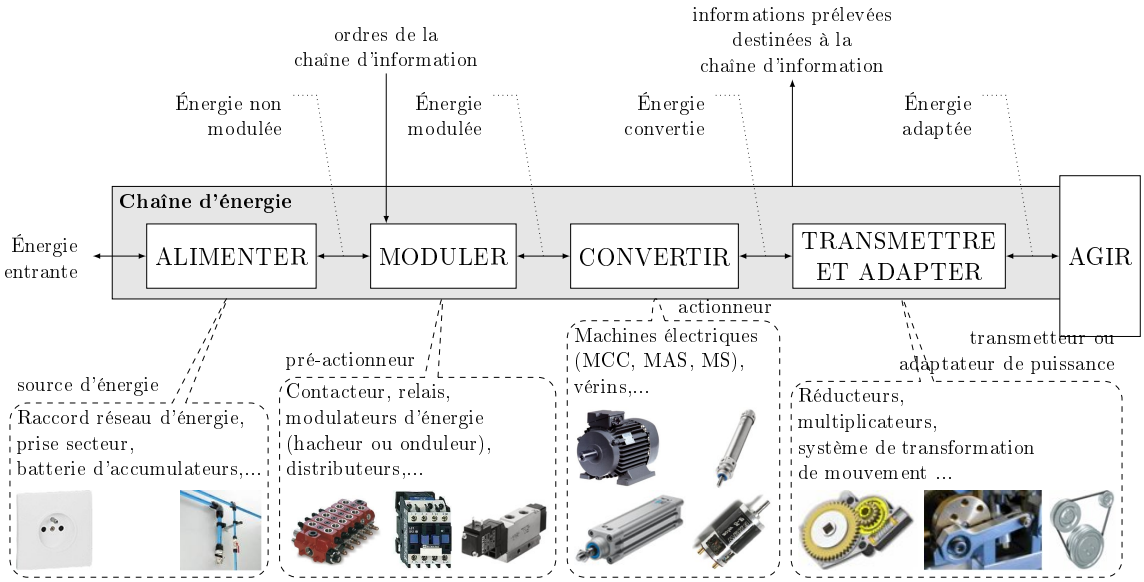


FIGURE 11 – Chaîne d'énergie générique d'un système automatisé

Attention

Les deux chaînes sont toujours reliées entre elles.

Remarque

la représentation des chaînes fonctionnelles est un modèle général dont on se sert comme canevas mais certaines fonctions techniques ne sont pas forcément utiles ou sont dupliquées sur certains systèmes. Il faut adapter la description générique à chaque système. La majorité de ces fonctions et des solutions techniques seront découvertes en TP.

Exemple : Une serrure codée

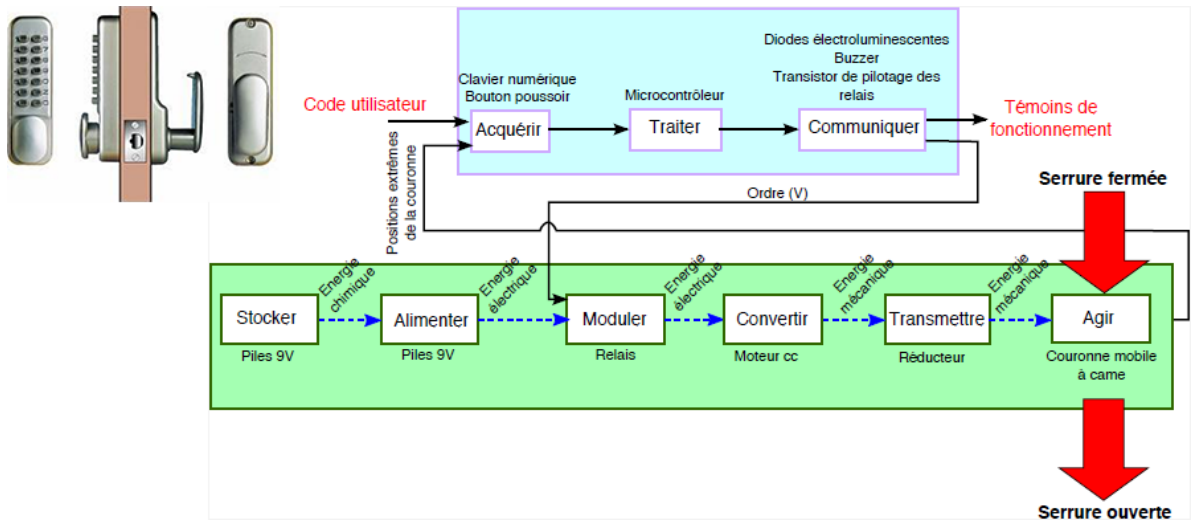


FIGURE 12 – Chaîne d'information et chaîne d'énergie d'une serrure codée

3 Triptyque des Sciences de l'Ingénieur

Le métier de l'ingénieur consiste à poser et à résoudre de manière performante et innovante des problèmes complexes de création, de conception, de réalisation ou de mise en œuvre de produits, de systèmes ou de services au sein d'une organisation compétitive. Il peut aussi éventuellement organiser leur financement ou leur commercialisation.

Les Sciences de l'Ingénieur apportent des méthodes et concepts permettant de répondre à ce besoin. En s'appuyant sur trois domaines d'étude décrits sur la FIGURE 13, les compétences développées durant ces deux années de CPGE seront de :

- **vérifier les performances attendues d'un système complexe réel** ;
- **prévoir les performances d'un système à partir d'une modélisation** ;
- **valider une modélisation à partir d'expérimentations.**

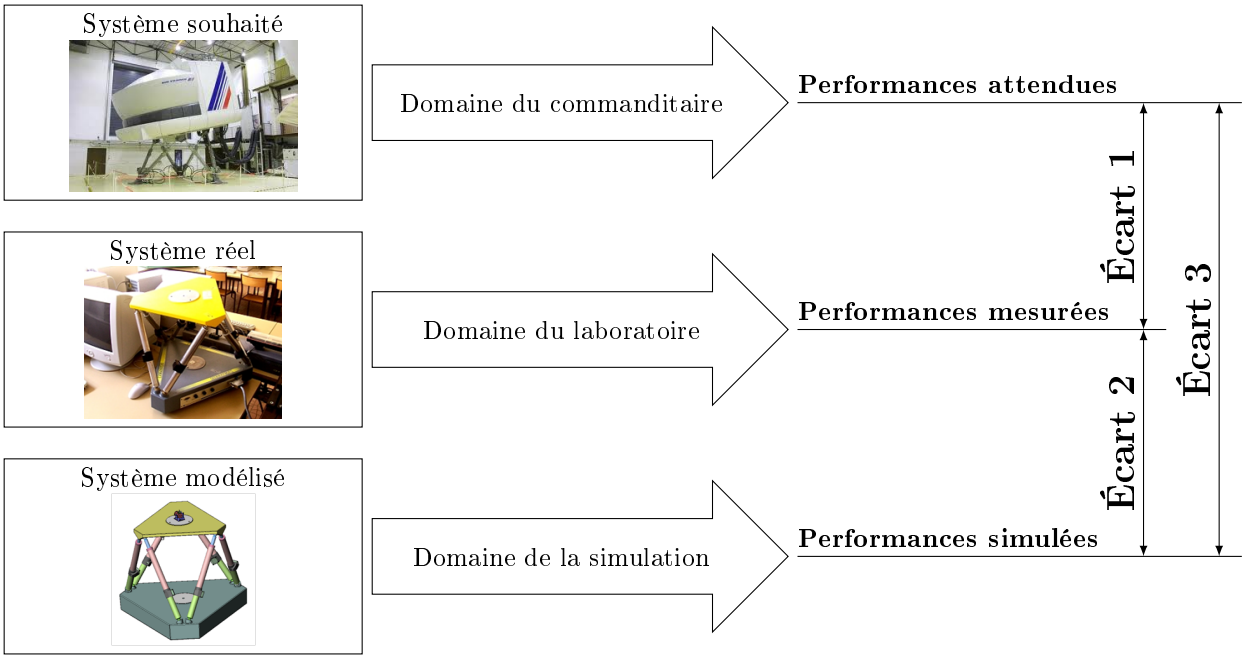


FIGURE 13 – Démarche de l'ingénieur (dans l'industrie, domaine du laboratoire = domaine réel)

4 Les systèmes automatisés

4.1 Système automatisé - Automatique

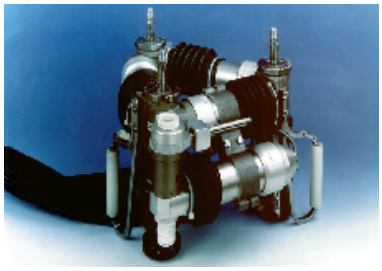
Définition *Système automatisé*

Un système technique **automatique** ou **automatisé** est un système assurant des opérations avec peu ou sans intervention humaine (programmation et/ou réglage du système).

Les entrées, appelées **causes**, sont des grandeurs issues du milieu extérieur. Les sorties, appelées **effets**, fournissent la réponse du système à la ou les causes.

Les objectifs de ces systèmes automatisés sont de réaliser des tâches trop complexes ou dangereuses pour l'Homme, voire irréalisables (inspection des canalisations de centrale nucléaire - FIGURE 14a), de réaliser des tâches pénibles et/ou répétitives (assemblage de pièces dans l'industrie, conditionnement de produit - FIGURE 14b), d'accroître la précision des tâches (FIGURE 14c) ...

Un système automatique est généralement constitué d'une **partie commande** (appelé aussi système de commande) et d'une **partie opérative**.



(a) Robot Tribar

(b) Robot Flexpicker

(c) Robot chirurgical

FIGURE 14 – Exemple de systèmes automatisés

Définition *Automatique*

L'**automatique** est la discipline scientifique traitant, d'une part, de la **description des systèmes automatisés** et, d'autre part, de la **conception** et de la **réalisation des systèmes de commande**.

4.2 Classification des systèmes automatisés

Les systèmes automatisés sont souvent classés en fonction de la nature des informations/signaux de commande (causes) et de mesure (effets).

Ces informations peuvent être de deux types : **analogiques** ou **discrètes**.

Définition *Information analogique*

Une **information analogique** peut prendre **toutes les valeurs possibles de manière continue**. Un signal analogique peut être représenté par une courbe continue. Les grandeurs physiques (tension, température, pression, ...) sont des informations continues.

Définition *Information discrète*

Une **information discrète** ne peut prendre qu'**un nombre fini de valeurs**.

Une information discrète peut prendre deux formes :

Information logique

Cette information est associé à l'état d'une variable qui ne peut prendre que deux valeurs (vrai/faux, noir/blanc, présence/non présence, 0/1 ...). L'information logique est aussi appelé (binaire ou « Tout Ou Rien » - TOR.

Information numérique

Cette information numérique est généralement issue d'un traitement (échantillonnage et codage) d'informations analogiques à l'aide d'un CAN (Convertisseur Analogique Numérique). L'information numérique s'écrit sous la forme d'un mot binaire constitué de plusieurs variables binaires (bit).

4.3 Système logique vs asservi

Il est donc possible de distinguer deux familles de systèmes automatisés :

Systèmes logiques à évènements discrets

- Système à logique combinatoire : un signal logique (ou une combinaison de signaux logiques) conduit toujours à un unique état de la sortie du système. Dans ces systèmes, l'information logique est traitée de manière instantanée (*digicode*).
- Système à logique séquentielle : la sortie du système est élaborée à partir d'un ensemble de signaux logiques d'entrée mais prend également en compte la chronologie des événements logiques (*chaîne d'assemblage d'un véhicule*).

Systèmes asservis ou asservissements

Les signaux traités sont analogiques ou numériques et leurs valeurs des grandeurs d'entrée (causes) ne peuvent pas être prédéterminées à l'avance pour une grandeur de sortie imposée (effet). Une mesure du signal de sortie est réalisée en permanence, sa valeur est **comparée** à l'entrée puis **corrigée**. La distinction système asservi analogique ou numérique tient compte uniquement du type d'information (analogique ou numérique).

4.4 Système asservis

Là encore, il est possible de classer les systèmes asservis en deux grandes familles :

Systèmes régulateurs

Ils sont destinés à maintenir une sortie constante pour une consigne d'entrée constante en luttant contre les perturbations (régulation du niveau d'eau d'une piscine ou d'un château d'eau, régulation de température...).

FIGURE 15 – Régulation du niveau d'eau

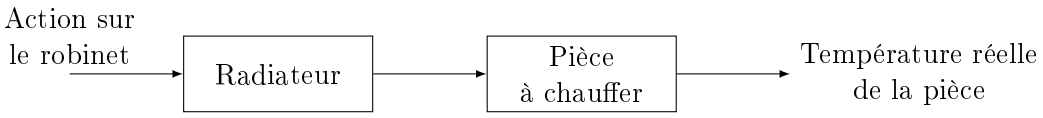
Systèmes suiveurs ou en poursuite

Ils sont destinés à ajuster en permanence le signal de sortie au signal d'entrée qui varie en permanence (missile à tête chercheuse).

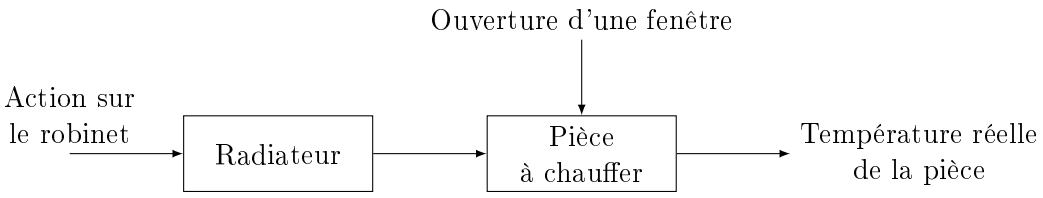
FIGURE 16 – Missile à tête chercheuse

4.5 Commande directe vs asservi

Un système bien conçu peut être tout à fait satisfaisant du point de vue de son comportement s'il n'est pas perturbé. C'est l'utilisateur qui commande directement le système en fonction de son ressenti (le système n'est donc pas automatisé). On dit alors que la commande est en boucle ouverte ou en commande directe.



Cependant lorsque le système est perturbé par un événement extérieur (appelé perturbation), la valeur de la sortie ne correspond pas à la valeur attendue et peut être très éloignée de cette valeur.

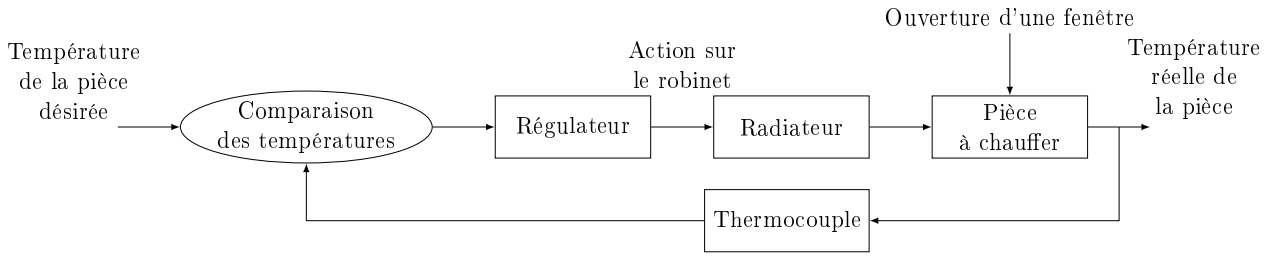


Pour automatiser le système sans intervention humaine (sans action permanente sur le robinet dans l'exemple), on introduit une boucle de retour (ou rétroaction). Le système est alors dit en **boucle fermée**.

La boucle de retour, constituée de capteur, permet d'évaluer la situation à chaque instant et fournit un état de la sortie (grandeur qui nous intéresse) à la partie commande. Cette information est analysée par la partie commande et comparée à la consigne. Cette dernière élabore alors un signal qui permet de commander la partie opérative.

Remarque

Lorsque la boucle de retour est constituée d'un capteur, que l'information délivrée par ce capteur est utilisée et que la nature de la grandeur de sortie est identique à celle de consigne, on parle **d'asservissement**. Il existe des systèmes qui sont physiquement et naturellement bouclés (moteur, vérin...), c'est à dire que la boucle de retour ne correspond pas à un capteur ajouté par l'Homme. Dans ces conditions, on parle juste de **boucle fermée** mais pas d'asservissement.



Dans cet exemple, la température désirée, appelée consigne (température souhaitée et fixée par un thermostat), est comparée à la température réelle de la pièce mesurée par le thermocouple. Le régulateur déclenche alors une action correctrice, dont le sens de variation et l'amplitude de l'action sur le robinet dépendent de l'écart entre la température souhaitée et la température de la pièce.

Le schéma FIGURE 17 synthétise la structure d'un système asservi.

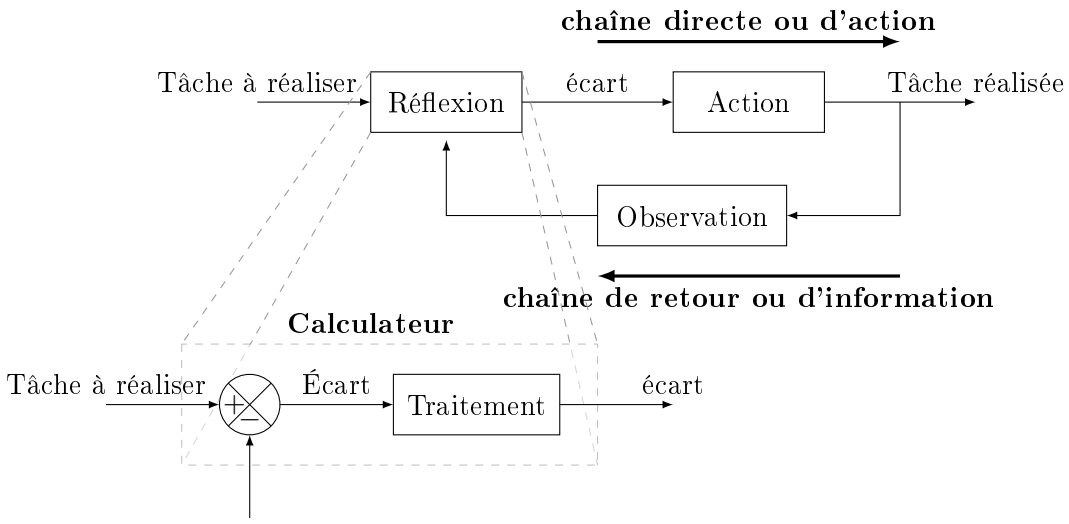


FIGURE 17 – Représentation schématique d'un système asservi

4.6 Performances d'un système asservi

Définition *Performances d'un système asservi*

Le comportement d'un système asservi est évalué suivant différents critères de performance :

- **Stabilité** : la réponse du système converge-t-elle pour une entrée constante ? Certains systèmes peuvent être instables, dans ce cas, leurs réponses divergent ou oscillent sans jamais se stabiliser.
- **Précision** : le système asservi atteint-il la valeur de consigne en l'absence de perturbation(s) ? le système asservi atteint-il la valeur de consigne en présence de perturbation(s) ?
- **Rapidité** : combien de temps faut-il au système pour se stabiliser ?

Sachant que la réponse dépend évidement du signal d'entrée, les niveaux de ces performances sont généralement évalués à partir de la réponse à une entrée standard : une entrée constante nommée échelon (voir cours sur la modélisation des systèmes asservis).

4.6.1 Stabilité

Définition *Stabilité*

Un système est stable si à une entrée **bornée** correspond une sortie **bornée**.

Remarque

le programme de deuxième année vous apportera des méthodes afin de prévoir si un système est stable.

Exemples de réponse de systèmes stables :

Exemples de réponse de systèmes instables :

Il existe des systèmes stables pour lesquels la grandeur de sortie dépasse la valeur finale avant de l'atteindre et d'autres non. Il est donc nécessaire de caractériser (quantifier) cette stabilité.

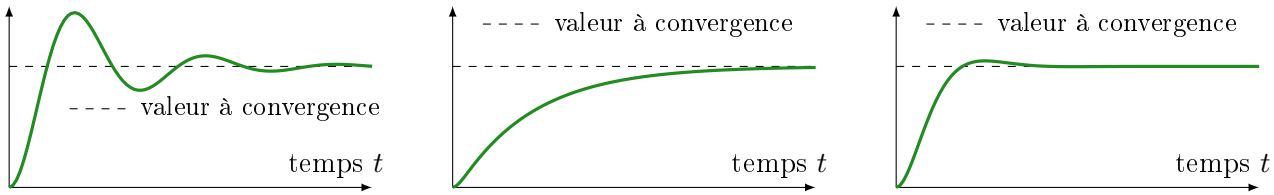
Caractérisation des systèmes stables

Pour caractériser la stabilité, on peut retenir dans un premier temps les critères de l'amortissement et le taux de dépassement.

- Amortissement :

Définition *Amortissement*

L'amortissement est caractérisé par le rapport entre les amplitudes successives des oscillations de la sortie. Plus ces oscillations s'atténuent rapidement, plus le système est amorti.



(a) Système mal amorti (b) Système très amorti (c) Système bien amorti

FIGURE 18 – Caractérisation des dépassements de la réponse d'un système

- Taux de dépassement relatif :

Définition *Taux de dépassement relatif*

Le taux de dépassement relatif (en pourcentage) caractérise l'amplitude maximale de la première oscillation est défini par :

$$D_1(\%) = 100 \times \left| \frac{s(t_1) - s_\infty}{s_\infty} \right|$$

avec $s(t_1)$ l'amplitude du premier dépassement (maximal pour un système stable) et s_∞ la valeur à convergence (asymptotique) de la réponse.

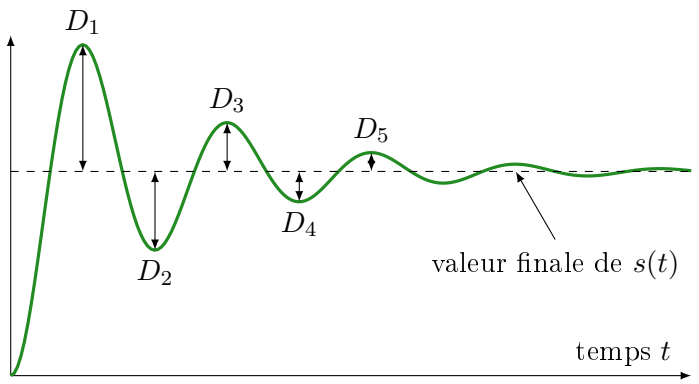


FIGURE 19 – Définition et numérotation des dépassements

Remarque

on peut également définir les taux de dépassements relatifs $D_2(\%)$, $D_3(\%)$... correspondant aux maxima ou minima locaux successifs. Le premier dépassement est quasiment toujours le plus pénalisant pour un système stable et donc celui qui est pris en compte.

4.6.2 Rapidité

Définition *Rapidité*

Un système est dit rapide s'il converge en un temps court au regard de son contexte d'utilisation.

Dans la plupart des cas, la valeur finale est atteinte de manière asymptotique voire oscillante, on retient alors comme critère d'évaluation de la rapidité d'un système, le temps de réponse à $n\%$.

Définition *Temps de réponse à 5%*

Dans la pratique, c'est le temps de réponse à 5% (noté $t_{5\%}$ ou $t_{r5\%}$) qui est le plus souvent utilisé. Il correspond au temps mis par le système pour atteindre la valeur à convergence appelée aussi valeur finale (donc en régime permanent) à $\pm 5\%$ près et à y rester (FIGURE 20).

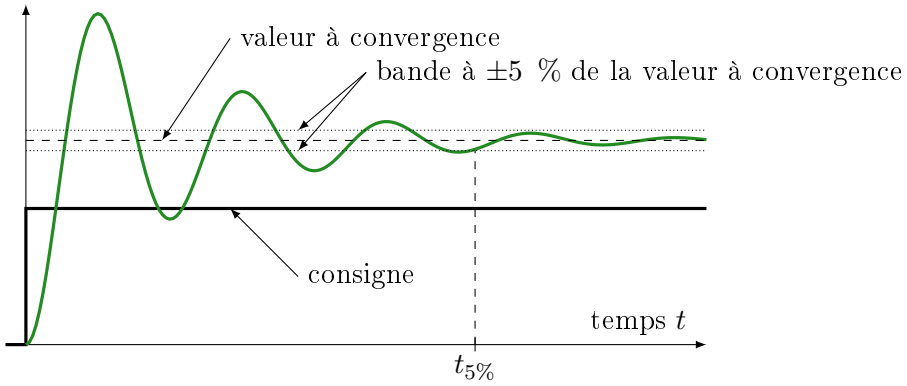


FIGURE 20 – Caractérisation de la rapidité d'un système sur le critère du temps de réponse à 5 %.

Remarque

il est également possible d'utiliser le temps de montée comme critère de rapidité qui est grossièrement assimilable au temps que met le système pour couper la première fois la valeur à convergence.

4.6.3 Précision

Définition *Précision*

La précision d'un système qualifie son aptitude à atteindre la valeur visée (consigne), indépendamment des éventuelles perturbations. Elle est caractérisée par l'**erreur en régime permanent** qui correspond à l'écart entre la valeur de la **consigne visée** et la valeur **réellement atteinte** par la grandeur de sortie :

$$\mu(t) = e(t) - s(t)$$

Attention

l'erreur ne peut être déterminée que si les grandeurs d'entrée et de sortie sont **de même dimension** (même unité).

Erreur statique

notée μ_s pour une entrée constante (en échelon).

Définition *Erreur statique*

L'erreur statique μ_s est la différence entre la consigne constante E_0 et la réponse $s(t)$ en régime permanent.

$$\mu_s = \lim_{t\to\infty} E_0 u(t) - s(t) = \lim_{t\to\infty} E_0 - s(t)$$

Erreur de trainage ou de poursuite

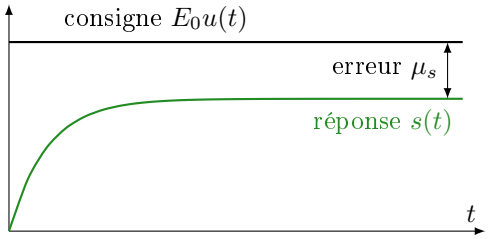
notée μ_v pour une entrée non constante (affine le plus souvent).

Définition *Erreur de poursuite*

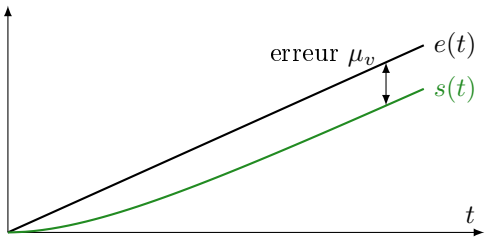
L'erreur de poursuite μ_v est la différence entre la consigne variable et la réponse en régime permanent.

$$\mu_v = \lim_{t\to\infty} e(t) - s(t)$$

Un système est précis si l'erreur statique est nulle.



Un système suiveur est précis si l'erreur de traînage est constante et la plus faible possible.



Remarque

l'entrée retenue pour tester la précision est généralement de la forme : $e(t) = at$ avec $a = cte$.

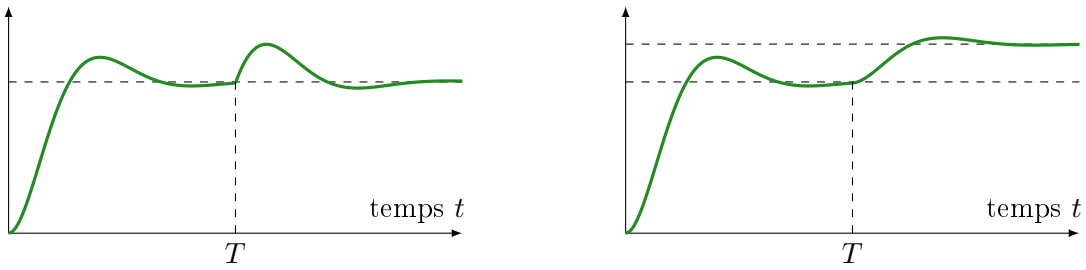
4.6.4 Sensibilité aux perturbations

Définition *Sensibilité aux perturbations*

Un système est dit sensible aux perturbations s'il ne converge pas vers la même valeur selon qu'une perturbation extérieure est présente ou non.

Remarque

La sensibilité aux perturbations n'est définie que pour les valeurs à convergence, donc en régime permanent, et non en régime transitoire.



(a) Insensible à la perturbation (b) Sensible à la perturbation

FIGURE 21 – Influence d'une perturbation apparaissant au temps T sur la réponse d'un système

4.6.5 Bilan

Un système automatisé idéal est un système qui aurait une bonne stabilité, une bonne précision et un régime transitoire rapide et bien amorti. De tels critères de performance ne sont (malheureusement) pas toujours compatibles. Tout l'art de l'automaticien sera de réaliser une partie commande permettant de respecter au mieux ces critères.

5 Architecture des systèmes automatisés

5.1 Représentation par blocs

Les systèmes industriels étant par nature complexes, il est nécessaire de décomposer le système en sous-systèmes plus faciles à analyser ou à modéliser. Par assemblage des différents modèles associés à chaque sous-système, il sera alors possible de déduire le comportement global du système.

On utilise la notion de **blocs fonctionnels** pour représenter un système, un sous-système, un composant élémentaire, un phénomène... Ces blocs possèdent un comportement et permettent de décrire les relations entre une ou plusieurs entrées et une ou plusieurs sorties ou bien de montrer les **flux de Matière, d'Énergie ou d'Informations (MEI)** entre les éléments.

La capacité à décrire un système par blocs est indispensable pour pouvoir prévoir le comportement global d'un système. Cette description par blocs permet d'associer différentes disciplines scientifiques et d'avoir une vision d'ensemble afin d'aborder des problèmes complexes.

☞ **Support de cours :** Gyropode *Segway* (voir FIGURE 22)

Il s'agit d'un moyen de transport motorisé qui permet de se déplacer en ville. En termes de prestations, il est moins rapide qu'une voiture ou qu'un scooter, plus maniable, plus écologique, moins encombrant et nettement plus moderne.

La conduite du *Segway* se fait par inclinaison du corps vers l'avant ou vers l'arrière, respectivement afin d'accélérer ou freiner le mouvement. Les virages à droite et à gauche sont, quant à eux, commandés par l'inclinaison du guidon.

La spécificité de ce véhicule est d'avoir deux roues qui ont le même axe de rotation, avec son centre de gravité situé au dessus de l'axe commun des roues. Tout comme le cerveau et l'oreille interne pour l'homme, le système comporte un dispositif d'asservissement d'inclinaison, maintenant la barre d'appui verticale.

FIGURE 22 – Police en *Segway*

5.2 Diagrammes structurels SysML

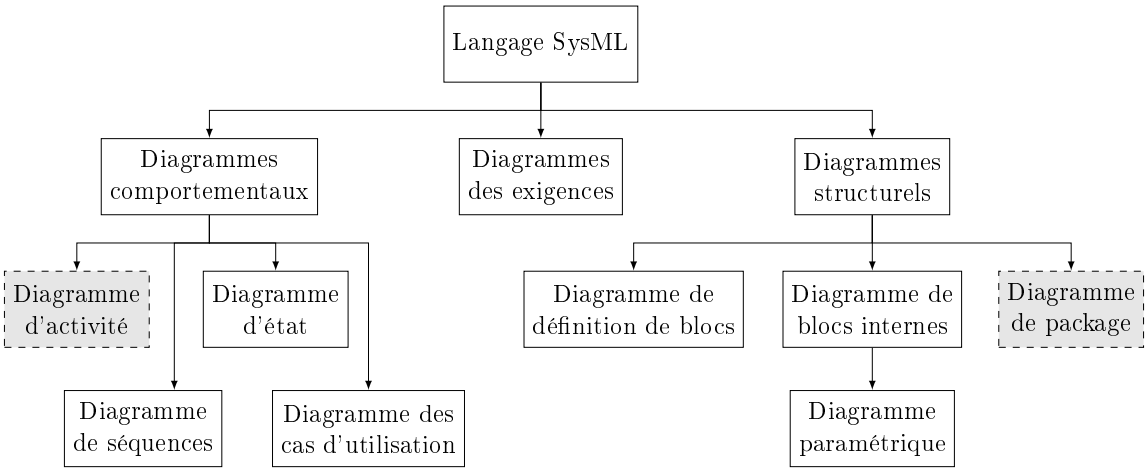


FIGURE 23 – Les différents diagrammes SysML

5.2.1 Diagramme de Définition des Blocs (Block Definition Diagram / bdd)

Définition *bdd*

Le diagramme SysML **bdd** présente le système d'un point du vue composé/composant. Il décrit seulement la liste des composants (constituants) d'un système ou sous-système.

Il répond aux questions « qui contient quoi ? » et « de quoi est composé le système ou sous-système ». Il permet de visualiser rapidement la composition globale du système. Les blocs contiennent obligatoirement le nom du composant et, de manière facultative ses propriétés.

Les traits avec les extrémités en losange indiquent une appartenance d'un élément à un autre :
- ◆—— : le losange est plein (composition), l'élément est obligatoire,
- ◇—— : le losange est vide (agrégation), l'élément est facultatif.

On peut également préciser le nombre d'entités près des extrémités des traits (cardinalité).

☞ **Support de cours :** la FIGURE 24 montre un exemple de diagramme de définition de blocs.

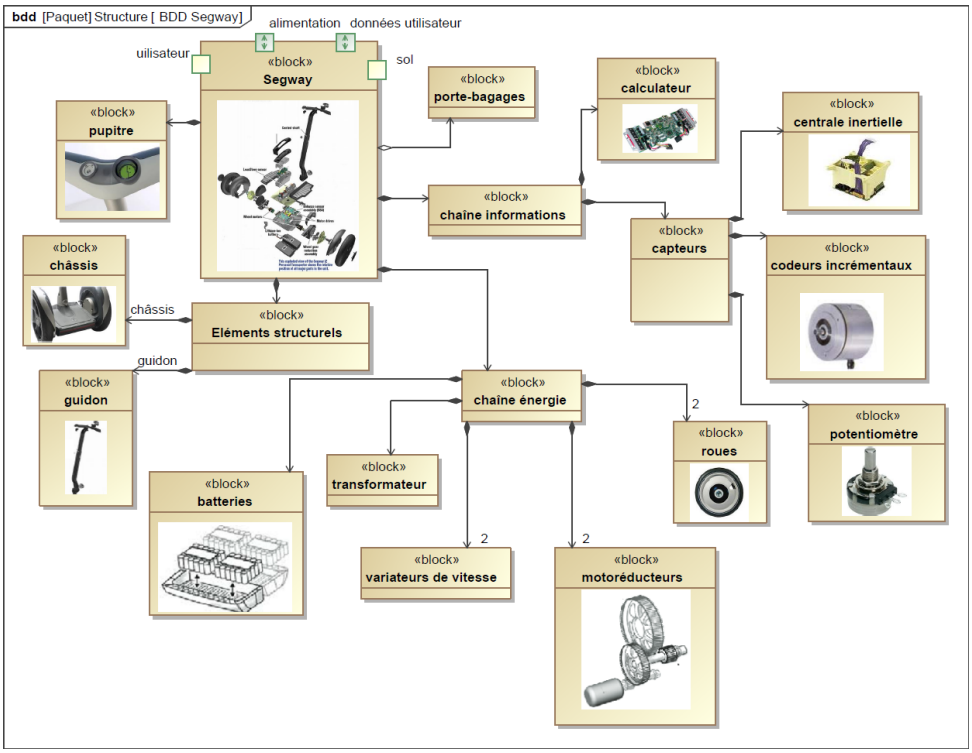


FIGURE 24 – Diagramme SysML de définition de blocs (**bdd**) du *Segway*

5.2.2 Diagramme de Blocs Internes (Internal Block Diagram / ibd)

Connaître la composition d'un système n'est pas suffisante très souvent, et il est nécessaire de décrire l'organisation de ces constituants (voir définition d'un système technique).

Définition *ibd*

Le diagramme SysML **ibd** permet de représenter les échanges de matière, d'énergie et d'information entre les blocs d'un même niveau. Il précise donc les architectures matérielle et structurelle d'un système.

Les blocs représentent les constituants tandis que les connecteurs carrés appelés **ports** permettent de décrire les flux entre les constituants et leur(s) sens. Un carré vide (*standard port*) représente un lien ou connexion physique entre les constituants sans transfert de flux. Un carré avec des flèches (*flow port*) représente un flux de matière, d'information ou d'énergie entre deux blocs. On indique en général la nature du flux ou du lien sur le trait reliant deux ports. Chaque bloc d'un diagramme **bdd** contenant d'autres blocs peut être représenté par un diagramme **ibd**.

☞ **Support de cours :** la FIGURE 25 montre un exemple de diagramme de blocs internes du *Segway*

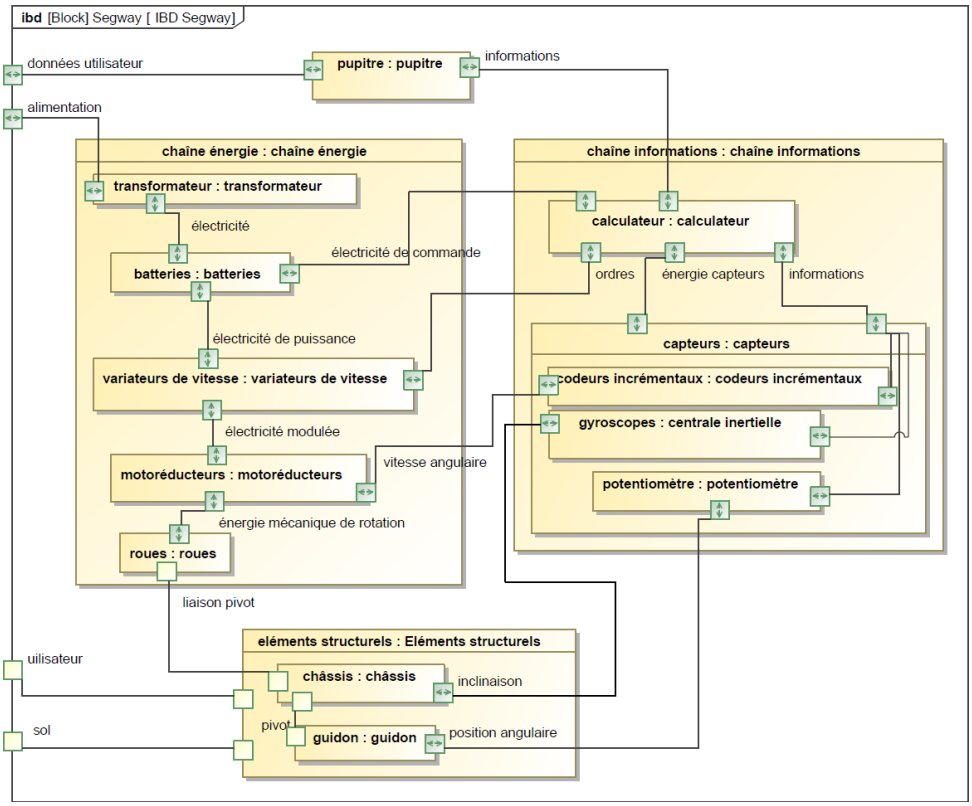


FIGURE 25 – Diagramme SysML de blocs internes (**ibd**) du *Segway*

6 Schéma-blocs fonctionnel

Les descriptions présentées précédemment permettent le plus souvent de décrire ou spécifier un système, ils ne sont pas utilisés pour simuler le comportement d'un système. Pour cela, il est nécessaire d'associer un modèle à chaque constituant et d'être capable de traiter simultanément l'ensemble de ces modèles. C'est le rôle du schéma-blocs qui permet d'avoir une vision graphique du comportement du système décrit par des équations.

6.1 Schéma-blocs acausal

Définition *Schéma-blocs acausal*

Les schéma-blocs dits acausaux ne présupposent pas à l'avance des grandeurs d'entrées (causes) et de sorties (effets) à choisir pour un composant.

Le schéma-blocs acausal est très proche de l'architecture du système (cf. chaînes d'énergies et d'informations) et nécessite de savoir traiter un très grand nombre d'équations. Cette description est récente compte-tenu de l'évolution des ordinateurs.

☞ **Support de cours :** La FIGURE 26 montre une représentation par schéma-blocs acausal du *Segway*.

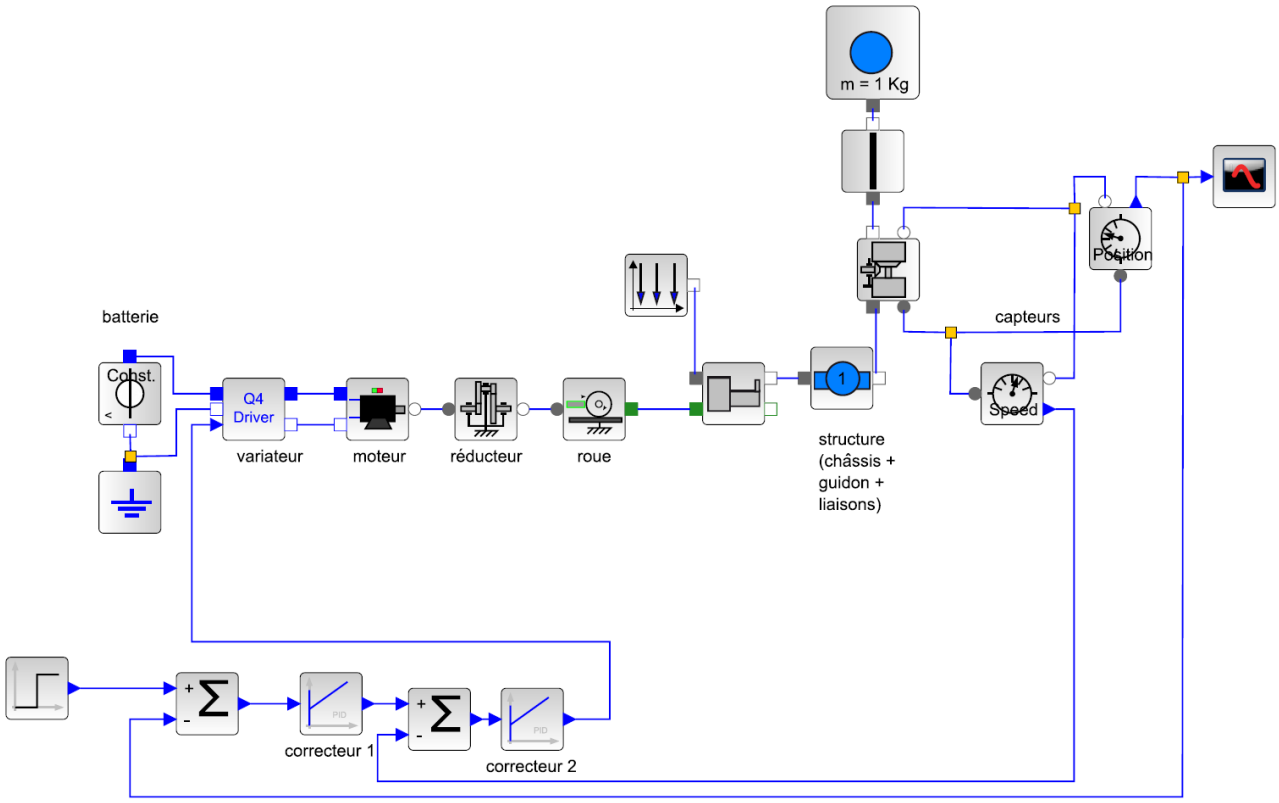


FIGURE 26 – Modélisation par schéma-blocs acausal du Segway

Les traits entre les blocs matérialisent soit des fils électriques, des arbres mécaniques, des flux...

La difficulté posée par ce genre de schéma-blocs est de comprendre les modèles des constituants (équation « cachée » et associée à chaque bloc) de manière à pouvoir saisir les paramètres demandés. Il peut également être complexe de trouver parmi les blocs disponibles dans les librairies des logiciels de simulation ceux qui correspondent au système étudié.

6.2 Schéma-blocs causal

Définition *Schéma-blocs causal*

Pour les schéma-blocs causaux, on définit à l'avance la grandeur d'entrée (cause) et la grandeur de sortie (effet) de chaque composant en les choisissant parmi les grandeurs physiques intervenant dans le comportement d'un constituant et en se basant sur la notion de causalité.

Définition *Causalité*

On parle de causalité lorsque l'entrée précède nécessairement la sortie (principe de cause à effet).

Le schéma-blocs causal est indispensable pour améliorer un système (notamment si l'on souhaite définir les paramètres de la commande). Il repose sur des techniques mathématiques qui seront vues pendant ces deux années puis complétées en école d'ingénieur.

☞ **Support de cours :** la FIGURE 27 montre une représentation par schéma-blocs causal du *Segway*.

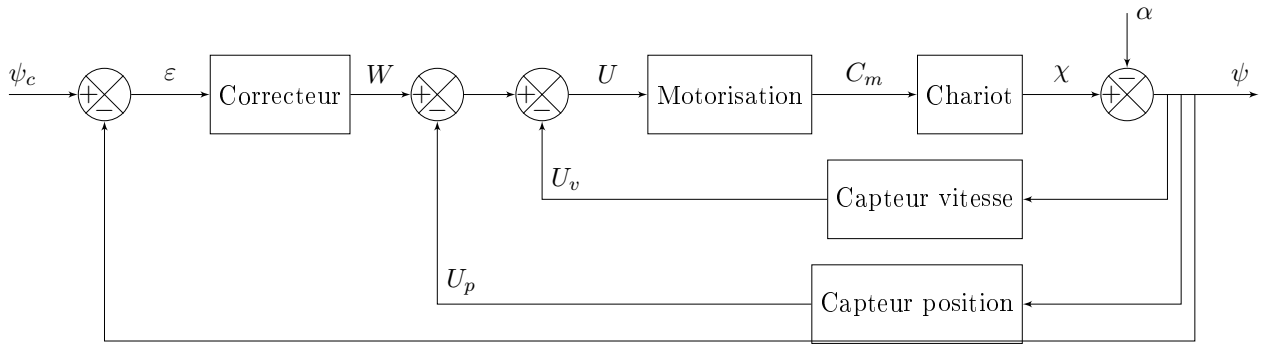


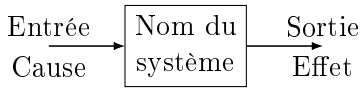
FIGURE 27 – Modélisation par schéma-blocs causal du Segway

Remarque

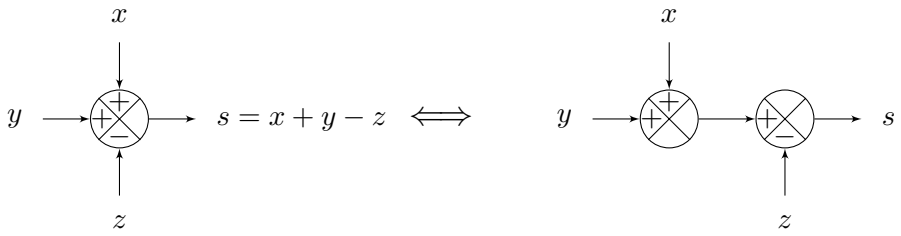
on notera que sur le schéma-blocs causal, la source d'énergie n'est pas représentée, elle est cependant indispensable pour que le système puisse fonctionner.

On distingue trois types d'éléments graphiques principaux :

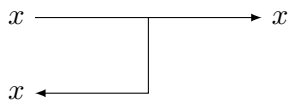
- **le bloc** qui contient un nom ou une fonction et possède une ou plusieurs entrées / sorties choisies parmi les grandeurs physiques qui interviennent dans le comportement du constituant. Le nom du bloc est en général le nom du composant (moteur, réducteur, roue...) ou bien encore l'opérateur mathématique associé à une fonction particulière (exemple : l'opérateur $\int$ pour décrire une intégration du type passage d'une vitesse à une position mais qui n'a pas de matérialisation physique). Les variables d'entrée et sortie de chaque bloc sont décrites par des flèches entrantes ou sortantes.



- **le point de sommation (ou sommateur, soustracteur, comparateur)** qui réalise des opérations mathématiques (linéaire ou non) du type addition, soustraction, seuil ... (opérations réalisées par la partie commande en général).



- le **point de prélèvement ou de jonction** : une variable est réutilisée comme entrée d'un bloc (ne pas confondre avec les schémas électriques !)



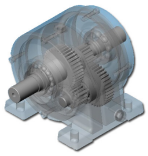
Pour réaliser un schéma-blocs, on place la grandeur de consigne tout à gauche et la grandeur que l'on souhaite étudiée à droite, puis on relie les blocs entre eux. Outre la construction du schéma-blocs à partir de la chaîne fonctionnelle, vous devez être capable de construire un schéma-blocs à partir d'une description littérale d'un système, voire même en présence visuelle d'un système.

Exemple : description de l'asservissement en vitesse de rotation d'un bras de robot.

Une consigne de vitesse de rotation ω_c [rad.s^{-1}] est adaptée à l'aide d'un adaptateur en une tension de consigne u_c [V]. Cette tension de consigne est comparée à la tension u_m [V] délivrée par le capteur de type génératrice tachymétrique, proportionnelle à la vitesse réelle ω [rad.s^{-1}]. L'écart de tension ε [V] est corrigé par un correcteur qui fournit la tension de commande u_{com} [V] au variateur pilotant le moteur par une tension u_{mot} [V]. Le moteur convertit cette tension en vitesse de rotation ω_{mot} [rad.s^{-1}], puis cette vitesse est adaptée par un réducteur pour obtenir la vitesse de sortie ω [rad.s^{-1}].

(a) Carte de commande et de puissance (comprenant l'adaptateur, le comparateur et le correcteur)

(b) Moteur



(c) Réducteur

(d) Capteur

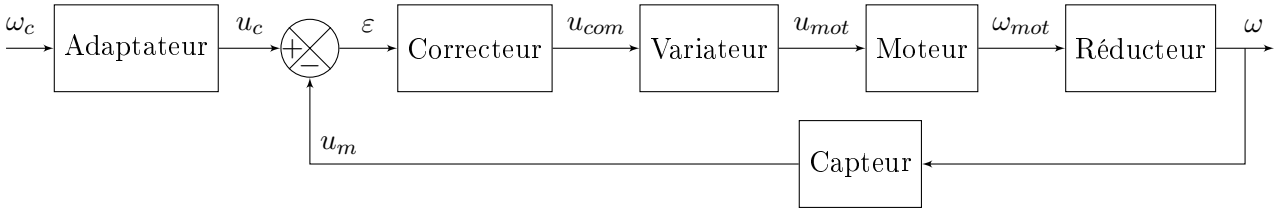



FIGURE 28 – Éléments constitutifs de l'asservissement de vitesse