

MPSI - PCSI

Sciences Industrielles de l'Ingénieur

Séquence 1

Analyse et modélisation des systèmes

Table des matières

Cours	0
I Système industriel	1
I.1 Notion de système	1
I.2 Classification	1
I.3 Domaine d'application	1
I.4 Critères technico-économiques	2
II Ingénierie système	2
II.1 Introduction	2
II.2 Cycle de vie	3
II.3 Frontière d'étude	3
II.4 Diagramme des cas d'utilisation (uc)	4
II.5 Diagramme des exigences (req)	5
II.6 Cahier des Charges Fonctionnel (CdCF)	6
III Triptyque des Sciences de l'Ingénieur	6
IV Les systèmes automatisés	7
IV.1 Système automatisé - Automatique	7
IV.2 Classification des systèmes automatisés	7
IV.3 Système logique vs asservi	8
IV.4 Système asservis	9
IV.5 Commande directe vs asservi	9
IV.6 Performances d'un système asservi	10
V Architecture des systèmes automatisés	14
V.1 Représentation par blocs	14
V.2 Diagrammes structurels SysML	15
V.3 Représentation par chaînes fonctionnelles	16
VI Représentation et modélisation des chaînes fonctionnelles	19
VI.1 Schéma-blocs causal	19
VI.2 Schéma-blocs acausal	20
TDs	22
TD 1 : Évaluation des performances	22
TD 2 : Poste de mise en cartons	23
TD 3 : SpeedCam	28
TD 4 : Réglage empennage d'avion	32

L'enseignement en Sciences Industrielles de l'Ingénieur vise à mettre en place les outils permettant d'analyser des systèmes complexes, de les modéliser et de les évaluer afin de comprendre leur fonctionnement, de prévoir leurs performances et de valider leurs critères de conception.

I Système industriel

I.1 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.

Ce sont les éléments et les relations entre ces éléments qui forment un système. On peut d'ailleurs, à partir des mêmes éléments de départ, créer des systèmes différents comme illustré en FIGURE 1.



Ensemble de pièces



Robot humanoïde



Solveur de Rubixcube

FIGURE 1 : Exemples de deux systèmes réalisés à partir du même ensemble de composants

I.2 Classification

On distingue diverses catégories de systèmes tels que les systèmes naturels (ex. système nerveux), les systèmes organisationnels (ex. système éducatif) 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 le client ou ne satisfera pas ses exigences.

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** (voir l'exemple de la voiture en FIGURE 2).

I.3 Domaine d'application

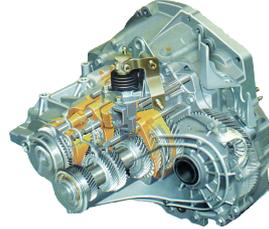
Le domaine d'application est le milieu physico-économique dans lequel évolue le système et pour lequel il a été conçu. Dans ce milieu, le système est dit **système industriel** (FIGURE 3) ; dans le laboratoire, pour une utilisation dans un cadre pédagogique, il sera appelé **système d'étude**.

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...

Véhicule



Boîte de vitesses



Roulement à billes



Boîte de vitesses, 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



IRM, *médical*



Voiture électrique, *transport*



Robot, *conditionnement*

FIGURE 3 : Systèmes associés à leur domaine d'application

I.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 comme par exemple le rasoir jetable une lame (peu cher et peu robuste), le coupe-choux (dont on peut aiguiser la lame pendant des années) ou le rasoir électrique sans fil à 3 têtes rotatives qui envoie de la crème hydratante et qui a un écran intégré (très cher).



II Ingénierie système

II.1 Introduction

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 : Les programmes de MPSI et PCSI précisent que vous devez être capable de lire et comprendre la plupart de ces diagrammes. Il n'est pas nécessaire de connaître 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.

II.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.

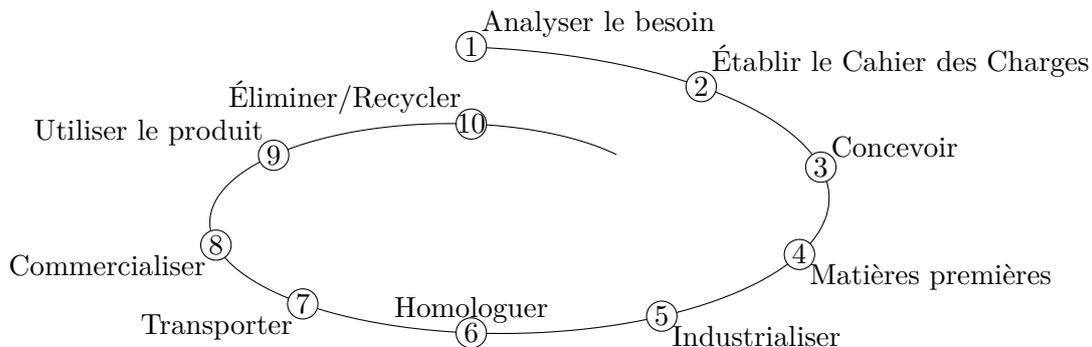


FIGURE 4 : Quelques phases du cycle de vie d'un produit

II.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.

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) (voir exemple de la FIGURE 5).

Il répond à la question : « Quels sont les acteurs humains et éléments extérieurs interagissant avec le système ? ».

Un **acteur** humain est représenté par un stickman. Un élément extérieur est représenté par un cube.

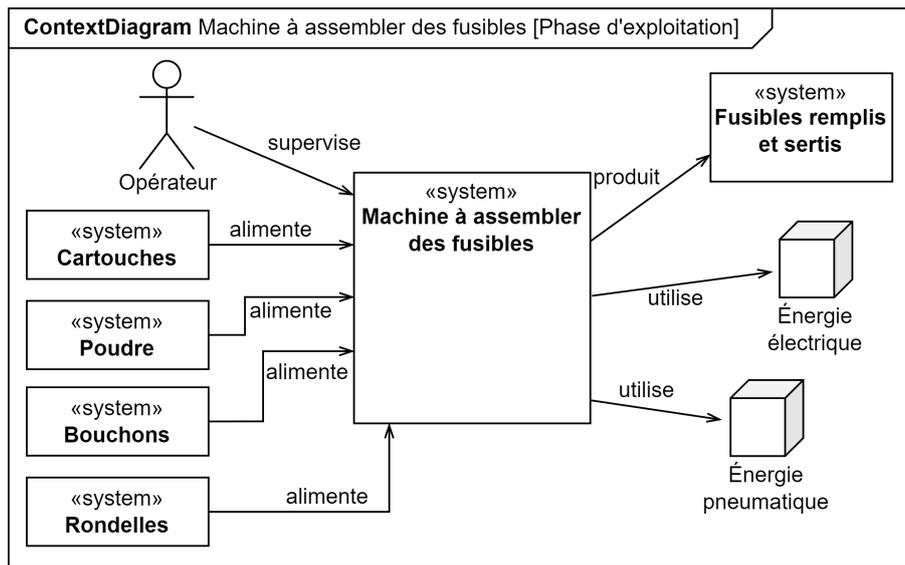


FIGURE 5 : Diagramme de contexte d'une machine à assembler des fusibles

II.4 Diagramme des cas d'utilisation (uc)

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

uc est l'abréviation de *Use Case* (c'est-à-dire, cas d'utilisation).

Le diagramme des cas d'utilisation répond à la question « Quel est ou quels sont les services rendus par le système ? À qui ces services sont-ils rendus ? Quels sont les éléments extérieurs interagissant avec le système ? ».

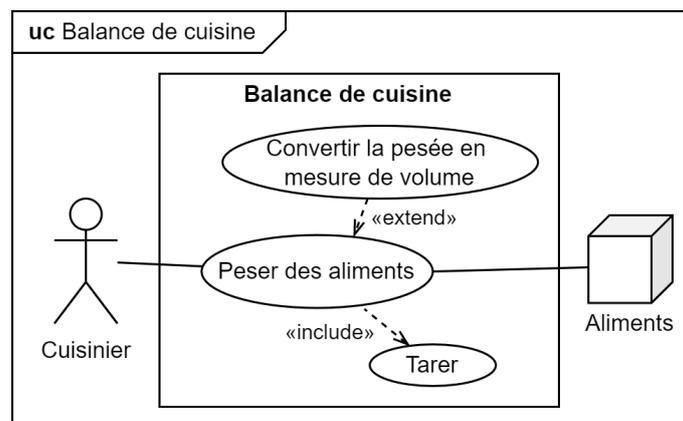


FIGURE 6 : Diagramme de cas d'utilisation (uc) d'une balance alimentaire

Une flèche « **extend** » permet de préciser un cas d'utilisation **optionnel** inclus dans un autre. Une flèche « **include** » permet de préciser un cas d'utilisation **obligatoire** inclus dans un autre.

Exercice d'application : Réaliser le diagramme de cas d'utilisation d'une montre connectée.

II.5 Diagramme des exigences (req)

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 (voir les exemples en FIGURE 7).



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

Ainsi, le système à concevoir est associé à des exigences par les ingénieurs afin de s'assurer que le système qui sera produit puisse réaliser les fonctions attendues dans les conditions souhaitées par le client. La spécification des exigences permettent ainsi de définir le contrat entre le client et les ingénieurs de conception. L'ensemble des exigences d'un système peuvent être présentées dans un diagramme des exigences (généralement, il y a plusieurs diagrammes des exigences partiels).

Le **diagramme des exigences** (abrégé **req**) SysML liste l'ensemble des **capacités** ou des **contraintes** qui doivent être satisfaites par le système (cf. l'exemple de la montre connectée en FIGURE 8).

req est l'abréviation de *requirements* (c'est-à-dire, exigences).

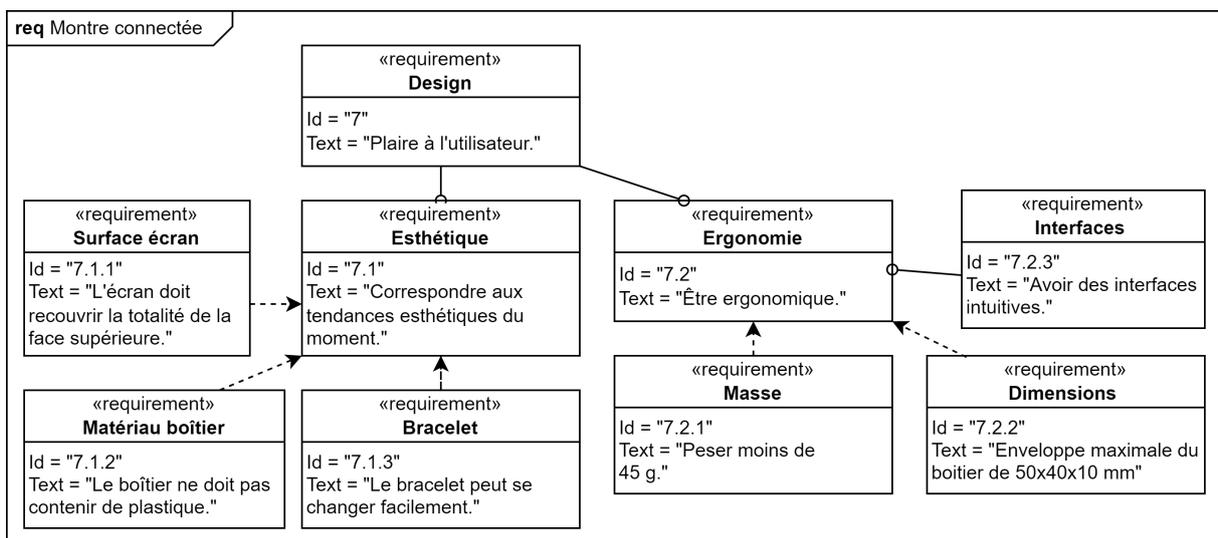


FIGURE 8 : Extrait du diagramme d'exigences (req) d'une montre connectée

On considère deux types de liaisons entre les blocs :

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

Le raffinement \dashrightarrow permet de rajouter des précisions sur une exigence (en particulier, des critères quantitatifs de vérification de l'exigence mère).

Une fois que le système a été conçu ou produit, il faut comparer chaque exigence (par exemple, "masse comprise entre 2 et 2,5 kg") aux performances effectives du système (exemple : on a pesé 2,1 kg donc l'exigence est satisfaite). Si les exigences ne sont pas vérifiées, alors il faut reconcevoir en partie le système.

II.6 Cahier des Charges Fonctionnel (CdCF)

La spécification des exigences de conception pour un système peut également être mis sous la forme d'un cahier des charges fonctionnel (CdCF). Ce dernier peut être décomposé par phase du cycle de vie du système conçu.

Le **cahier des charges fonctionnel** regroupe l'ensemble des fonctions que le système doit (devra) réaliser et spécifie les performances attendues pour chaque fonction.

Les fonctions commencent toujours par **un verbe à l'infinitif**

À chaque fonction est associé un ou plusieurs critères de validation. Chaque critère doit être mesurable et associé à un niveau et, éventuellement, à une flexibilité (grossièrement, on peut dire que 0 = exigence non négociable pour le client, 1 = exigence du client pour laquelle il pourrait faire des concessions et 2 = préférence du client non déterminante).

Fonctions	Critères	Niveaux	Flexibilité
Permettre au combustible d'entraîner le véhicule	Consommation en cycle mixte (WLTP)	5 L pour 100 km maximum	0
	Temps d'accélération entre 0 et 100 km/h	10 s maximum	1
	Puissance maximale	110 kW à 85 km/h maximum	1
Permettre à la batterie d'entraîner le véhicule	Consommation en cycle mixte (WLTP)	13 kWh / 100 km maximum	0
Optimiser la consommation du véhicule	Pourcentage de l'énergie cinétique du véhicule récupérable en énergie électrique lors des freinage	70 % minimum	1
	Puissance maximale absorbée par les composants auxiliaires (climatisation + éclairage + tableau de bord + ...)	4 kW maximum	0

FIGURE 9 : Extrait du cahier des charges fonctionnel (CdCF) d'un véhicule hybride

III 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 10, les compétences développées durant ces deux années de CPGE seront de :

- ✓ vérifier les performances attendues d'un système pluritechnologique complexe réel ;
- ✓ prévoir les performances d'un système à partir de modélisation ;
- ✓ valider les modélisations à partir d'expérimentations.

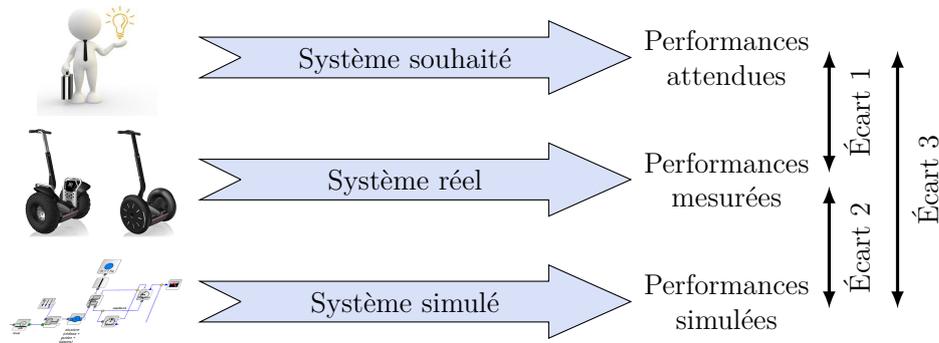


FIGURE 10 : Démarche de l'ingénieur

IV Les systèmes automatisés

IV.1 Système automatisé - Automatique

Un système technique **automatique** ou **automatisé** est un système assurant des opérations avec peu ou sans intervention humaine dans sa phase de vie d'utilisation (en excluant les phases de programmation et de 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 dangereuses, irréalisable par un humain (ex. inspecter des canalisations de centrale nucléaire cf. FIGURE 11(a)), pénibles et répétitives (ex. assembler des pièces dans l'industrie ou conditionner des produits cf. FIGURE 11(b)) ou trop complexes (ex. réaliser une opération chirurgicale très précise cf. FIGURE 11(c)) ...

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

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**.

IV.2 Classification des systèmes automatisés

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

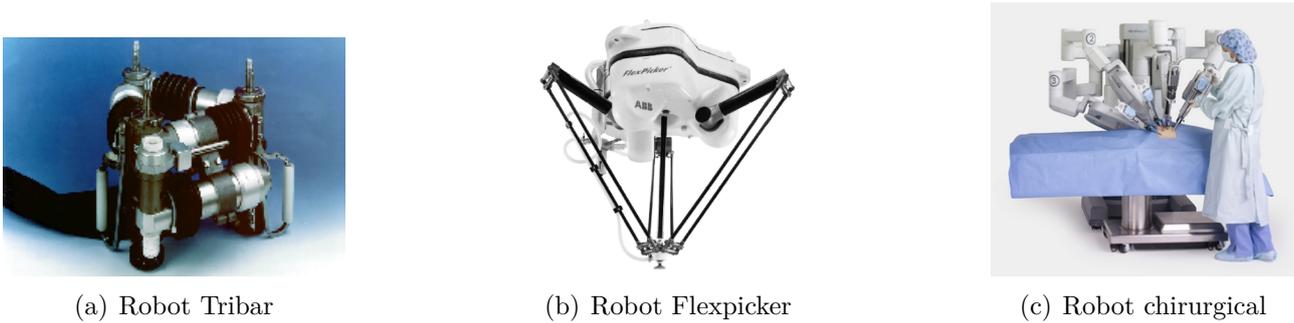


FIGURE 11 : Exemple de systèmes automatisés

IV.2.1 Information analogique vs discrète

Les informations de commande et de mesures peuvent être de deux types : analogiques ou discrètes.

Une **information analogique** peut prendre **toutes les valeurs possibles de manière continue** (cf. FIGURE 12). Un signal analogique peut être représenté par une courbe continue (fonction continue au sens mathématique). Les grandeurs physiques (tension, température, pression...) sont des informations continues.

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

Une information discrète peut prendre deux formes :

- Une **information logique** est associée à l'état d'une variable qui ne peut prendre que deux valeurs (vrai/faux, présence/non présence, 0/1 ...). L'information logique est aussi appelé binaire ou « Tout Ou Rien » (TOR).
- Une **information numérique** est ne peut prendre que certaines valeurs (quantification) qui ne peuvent changer qu'à un certain pas de temps (échantillonnage) (cf. FIGURE 13). Dans tout système informatique, tout signal analogique est codée en signal numérique (en bits) à l'aide d'un CAN (Convertisseur Analogique/Numérique).

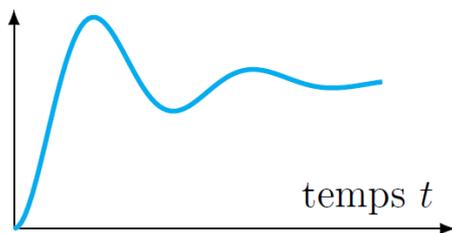


FIGURE 12 : Signal analogique

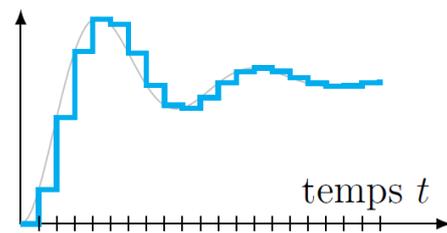


FIGURE 13 : Signal numérique

IV.3 Système logique vs asservi

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

- Les **systèmes logiques à évènements discrets** incluant :
 - les **systèmes à logique combinatoire** pour lesquels 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 (ex. LED de préchauffage d'un four).
 - les **systèmes à logique séquentielle** pour lesquels 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 (ex. porte automatique).

- Les **systèmes asservis** qui sont vus en détail dans la partie suivante. Ces systèmes peuvent être analogiques ou numériques selon la nature des signaux traités (analogiques ou numériques).

IV.4 Système asservis

Un système est dit « **asservi** » quand une **mesure** du signal de sortie est réalisée en permanence afin de piloter l'actionneur du système (ex. moteur, vérin, résistance thermique, pompe...) en fonction de l'écart entre **la consigne** (c'est-à-dire, l'entrée) et la sortie. On parle alors d' **asservissement**.

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 (par exemple, régulation du niveau d'eau d'une piscine, cf. FIGURE 14, ou chauffage thermostatique).



FIGURE 14 : 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 (par ex, un missile à tête chercheuse, cf. FIGURE 15, ou un robot à souder qui va suivre la trajectoire du cordon à réaliser).



FIGURE 15 : Missile à tête chercheuse

IV.5 Commande directe vs asservi

Un **système à commande directe** est un système dont l'actionneur est directement piloté par l'utilisateur en fonction de son ressenti : on dit alors que la commande est **en boucle ouverte**. C'est par exemple le cas d'un radiateur (s'il n'y pas de thermostat) pour lequel l'utilisateur va directement ouvrir le robinet pour faire passer davantage de débit et donc chauffer davantage la pièce (cf. FIGURE 16). Un autre exemple serait la gestion de la vitesse d'un véhicule via les pédales qui pilotent directement l'injection de carburant et le freinage (on considère qu'il n'y a pas de régulateur de vitesse).

Un système en commande directe peut correctement répondre au besoin de l'utilisateur s'il est bien piloté, mais il sera forcément **sensible aux perturbations extérieures** (pour l'exemple du chauffage, si la nuit tombe et qu'il commence à faire froid, alors l'utilisateur sera obligé de toucher de nouveau le robinet et, pour le second exemple, s'il y a une pente, alors le conducteur va devoir appuyer davantage sur l'accélérateur).

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

La boucle de retour d'un système asservi est constituée d'un capteur qui mesure la grandeur de sortie à chaque instant. Cette information est envoyée à la partie commande qui compare alors cette mesure à la consigne. La commande en déduit alors un signal pour commander la partie opérative.

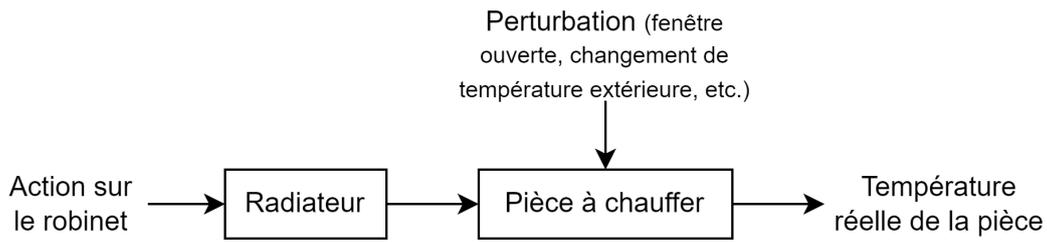


FIGURE 16 : Radiateur en boucle ouverte

Dans l'exemple de la FIGURE 17, la température désirée et définie sur le thermostat, appelée consigne, est comparée à la température réelle de la pièce mesurée par le capteur. La commande déclenche alors une action correctrice, dont le sens de variation et l'amplitude de l'action sur la vanne dépendent de l'écart entre la température désirée et la température réelle de la pièce.

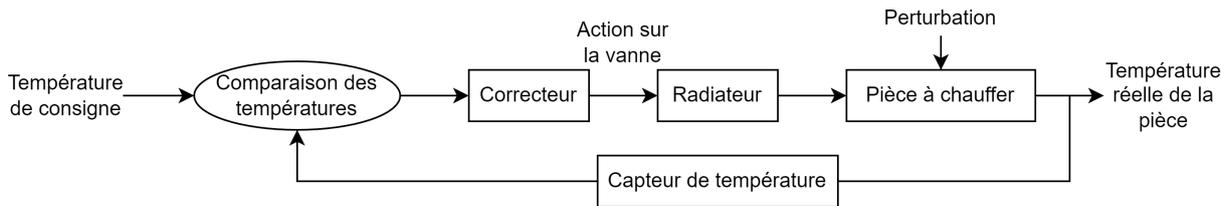


FIGURE 17 : Radiateur en boucle fermée

Le schéma de la FIGURE 18 synthétise la structure d'un système asservi.

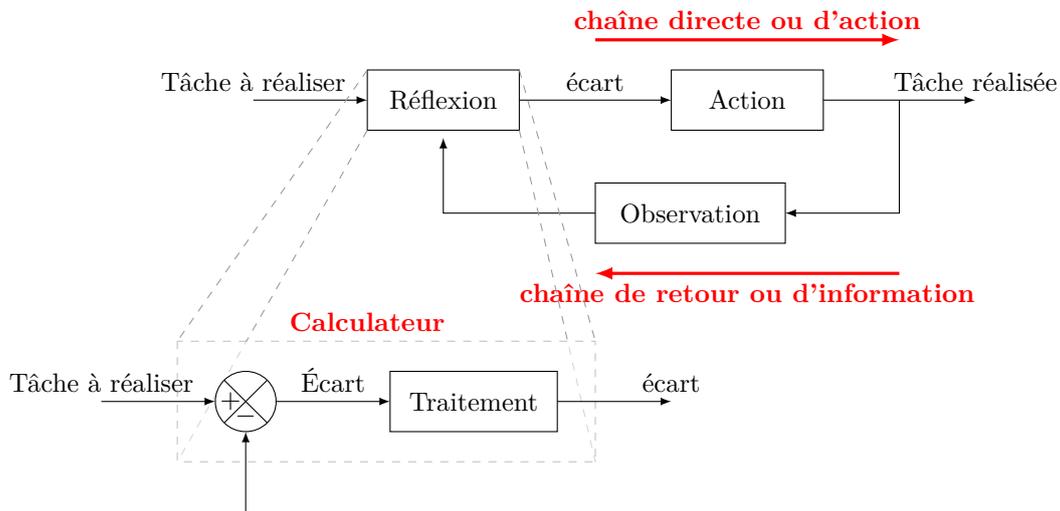


FIGURE 18 : Représentation schématique d'un système asservi

IV.6 Performances d'un système asservi

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

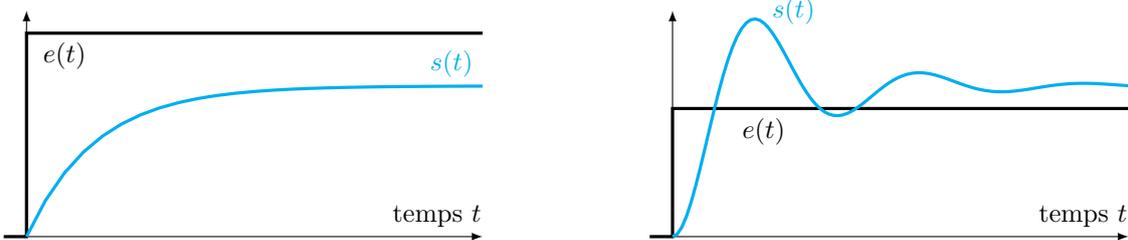
- **Stabilité** – Un système est stable si sa réponse converge pour une entrée constante. Pour une entrée constante, la réponse d'un système instable diverge et la réponse d'un système à la limite de la stabilité est oscillante (sans jamais se stabiliser).
- **Précision** – Un système est précis si sa réponse atteint la valeur de consigne (en absence ou en présence de perturbations).
- **Rapidité** – Un système est rapide si sa réponse converge en un temps inférieur à ce qui est imposé par les exigences.

La réponse d'un système dépend du signal de consigne. Ainsi, les performances sont généralement évalués à partir de signaux standards qui sont généralement des échelons (cf. cours sur la modélisation des SLCI Séquence 2). La fonction échelon est un signal $e(t)$ tel que $e(t) = 0$ si $t < 0$ et $e(t) = E_0$ si $t \geq 0$

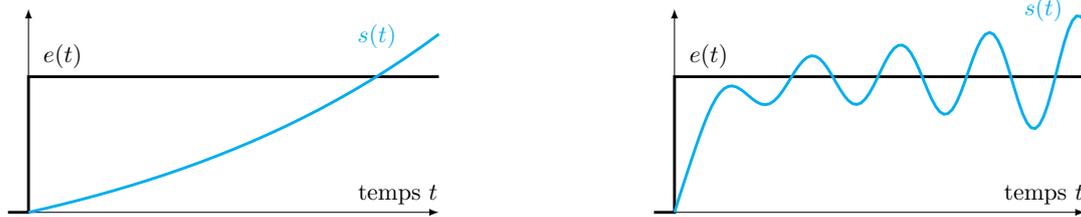
IV.6.1 Stabilité

Un système est stable si, pour un signal d'entrée borné, la réponse du système est bornée.

Exemples de réponse de systèmes stables



Exemples de réponse de systèmes instables



Remarque : Il existe des méthodes permettant de prévoir à partir d'un modèle si un système est stable (voir cours sur l'analyse des performances des SLCI Séquence 3 et cours sur l'analyse fréquentielle des SLCI Séquence 5).

Il existe des systèmes stables pour lesquels la grandeur de sortie dépasse une ou plusieurs fois la valeur finale avant de l'atteindre et d'autres non. Il est donc parfois utile de caractériser (quantifier) l'amortissement d'un système avec le calcul des taux de dépassement.

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.

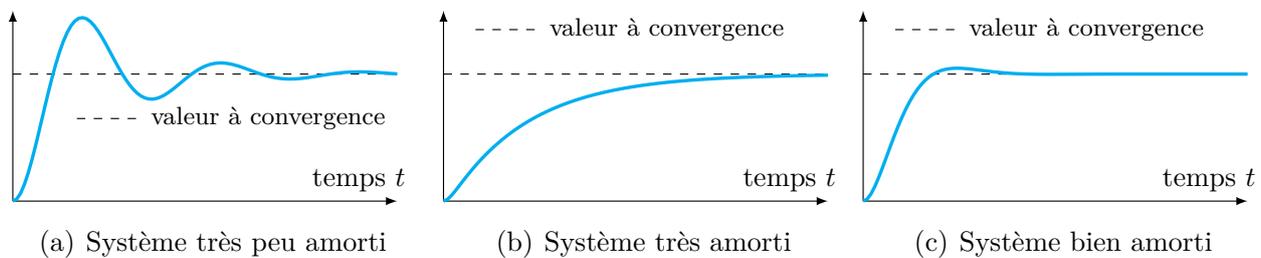


FIGURE 19 : Caractérisation des dépassements de la réponse d'un système

Sur une réponse d'un système à une consigne en échelon, le **taux de dépassement relatif à la première oscillation** (généralement donné en pourcentage) caractérise l'amplitude de la première oscillation et est défini par :

$$D_1^{\%} = \left| \frac{s(t_1) - s_{\infty}}{s_{\infty} - s_0} \right|$$

avec :

- $s_0 = s(t = 0)$ la valeur initiale de $s(t)$, qui est généralement nulle ;
- $s(t_1)$ l'amplitude du premier dépassement (qui est la valeur extrême de $s(t)$ pour un système stable)
- $s_{\infty} = \lim_{t \rightarrow +\infty} s(t)$ la valeur à convergence (asymptotique) de la réponse.

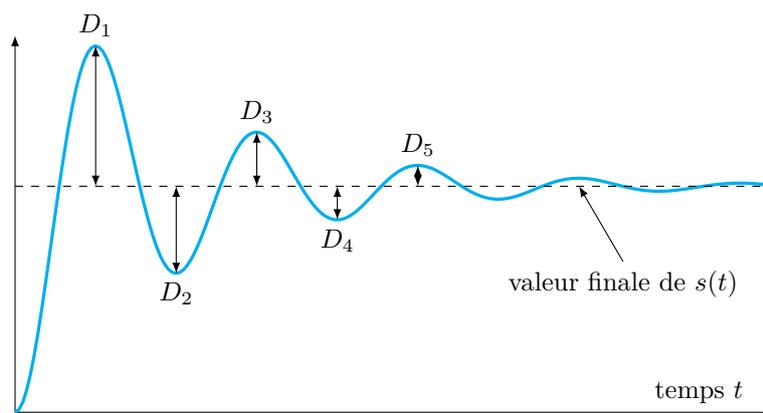


FIGURE 20 : Définition et numérotation des dépassements

Attention : le taux de dépassement relatif est calculé à partir de la valeur finale de la **sortie** (et non pas de la valeur finale de la consigne!).

Remarque : on peut également définir les taux de dépassements relatifs des oscillations suivantes ($D_2^{\%}$, $D_3^{\%}$, etc.) qui correspondent aux extremums locaux successifs. Cependant, comme le premier dépassement est généralement le plus pénalisant pour un système stable, alors on calcule généralement que le taux $D_1^{\%}$.

IV.6.2 Rapidité

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

La valeur finale est souvent atteinte de manière asymptotique ou oscillante. On retient alors comme critère d'évaluation de la rapidité d'un système, le temps de réponse à $n\%$. Dans la pratique, c'est le temps de réponse à 5% qui est le plus souvent utilisé.

Pour une entrée en échelon, le **temps de réponse à 5%** (noté $t_{5\%}$ ou $t_{r5\%}$) correspond au dernier instant après lequel le signal de sortie reste inclus dans un intervalle de $\pm 5\%$ de l'écart entre la valeur à convergence s_{∞} et la valeur initiale s_0 , c'est-à-dire $\pm 0,05 \cdot (s_{\infty} - s_0)$ (cf. FIGURE 21).

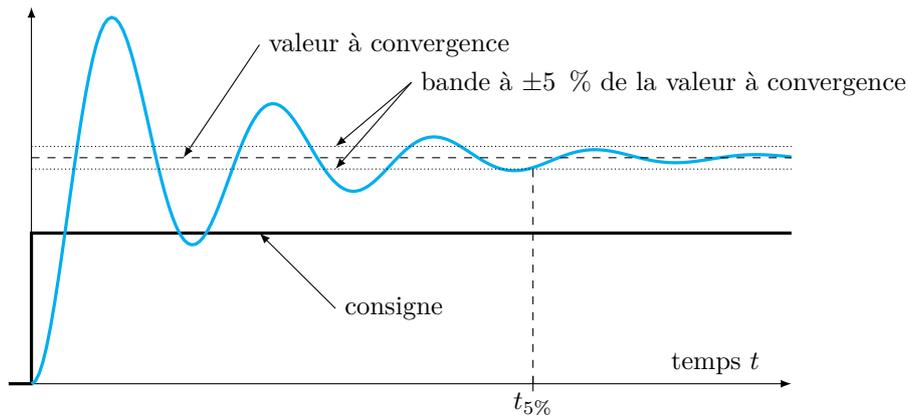


FIGURE 21 : Caractérisation de la rapidité sur le critère du temps de réponse à 5 %

Attention : le temps de réponse à 5% est calculé à partir de la valeur finale de la **sortie** (et non pas de la valeur finale de la consigne!).

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 atteindre la première fois la valeur à convergence.

IV.6.3 Précision

La **précision** d'un système qualifie son aptitude à atteindre la valeur de consigne (avec ou sans 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 : $\lim_{t \rightarrow \infty} \mu(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} (e(t) - s(t))$.

Attention : l'erreur ne peut être déterminée que si les grandeurs d'entrée et de sortie sont de même nature.

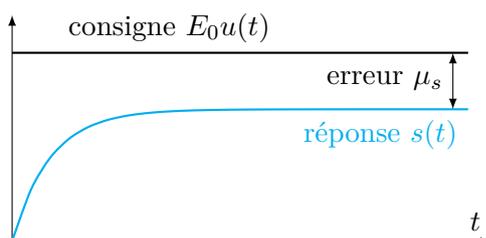
Erreur statique

notée μ_s pour une entrée constante (en échelon).

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

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

Un système est précis pour une entrée en échelon si l'erreur statique est nulle.



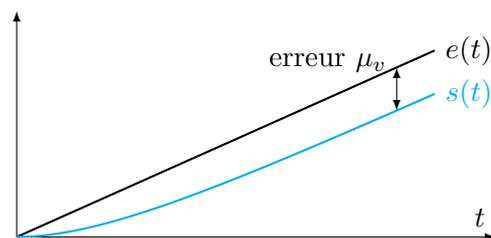
Erreur de trainage ou de poursuite

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

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

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

Un système est précis pour une entrée en rampe si l'erreur de trainage est nulle.



Sensibilité aux perturbations

Pour une entrée constante, un système est **sensible aux perturbations s'il ne converge pas vers la même valeur selon si 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.

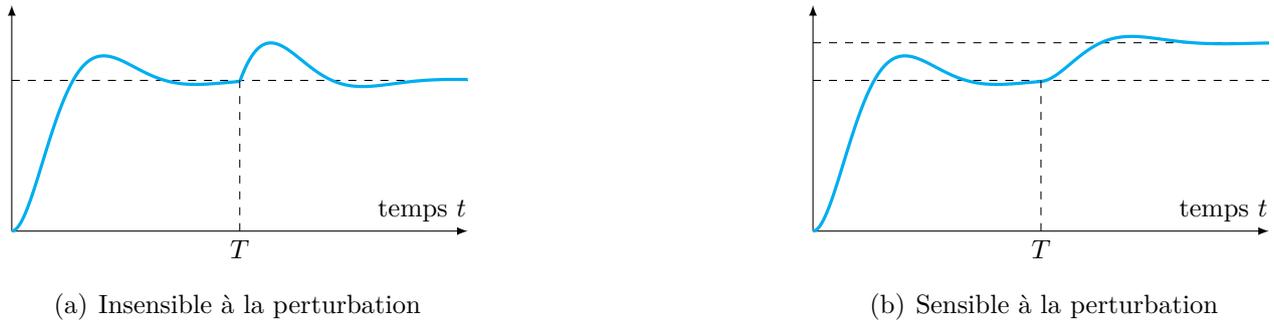


FIGURE 22 : Influence d'une perturbation apparaissant au temps T sur la réponse d'un système

IV.6.4 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. Pour cela, il doit élaborer des modèles et formuler des hypothèses. La suite de ce cours vise à décrire des descriptions structurelle des systèmes en vue de les modéliser.

V Architecture des systèmes automatisés

V.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 prévoir le comportement global du système.

On utilise des **blocs fonctionnels** pour représenter un système, un sous-système, un composant élémentaire, un phénomène, etc. 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 et d'Information (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 - FIGURE 23. 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, a priori plus écologique, moins encombrant.

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, si bien qu'on se demande comment rester à l'équilibre une fois monté sur la plate-forme. Tout comme le cerveau permet à l'homme de se tenir debout sans tomber grâce à l'oreille interne, le système comporte un dispositif d'asservissement d'inclinaison, maintenant la barre d'appui verticale.



FIGURE 23 : Police en Segway

V.2 Diagrammes structurels SysML

V.2.1 Diagramme de définition des blocs (bdd)

Le diagramme de définition des blocs SysML (abrégé **bdd**) présente le système d'un point de vue composé/composant. Il décrit l'**architecture** des composants (constituants) d'un système ou sous-système.

bdd est l'abréviation de *Block Definition Diagram*.

Il est réalisé en répondant à la question « de quels sous-systèmes est composé le système étudié ? » puis en répondant de manière itérative à la question « de quels sous-systèmes et composants sont composés les sous-systèmes identifiés ? » jusqu'à atteindre le niveau de détail souhaité (cf. FIGURE 24).

Les blocs contiennent obligatoirement le nom de l'élément 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 (cardinalité) près des extrémités des traits.

V.2.2 Diagramme de blocs internes (ibd)

Connaître l'architecture d'un système n'est pas suffisant pour décrire son fonctionnement : il faut également comprendre les interactions entre ces constituants.

Le diagramme de blocs internes SysML (abrégé **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.

ibd est l'abréviation de *Internal Block Diagram*.

Les blocs représentent les constituants tandis que les connecteurs carrés appelés **ports** et les traits qui les relient décrivent les flux entre les constituants (cf. FIGURE 25). Un carré vide (*standard port*) représente un lien ou connexion physique entre les constituants sans transfert de flux. Un carré avec des flèches ↔ ou → (*flow port*) représente un flux de matière, d'énergie ou d'information entre deux blocs (qui est dans les deux sens ou mono-directionnel). On indique en général la nature du flux ou du lien sur le trait reliant deux ports. L'imbrication entre un système et ses sous-systèmes (cf. bdd) peut être représenté sur un diagramme **ibd**.

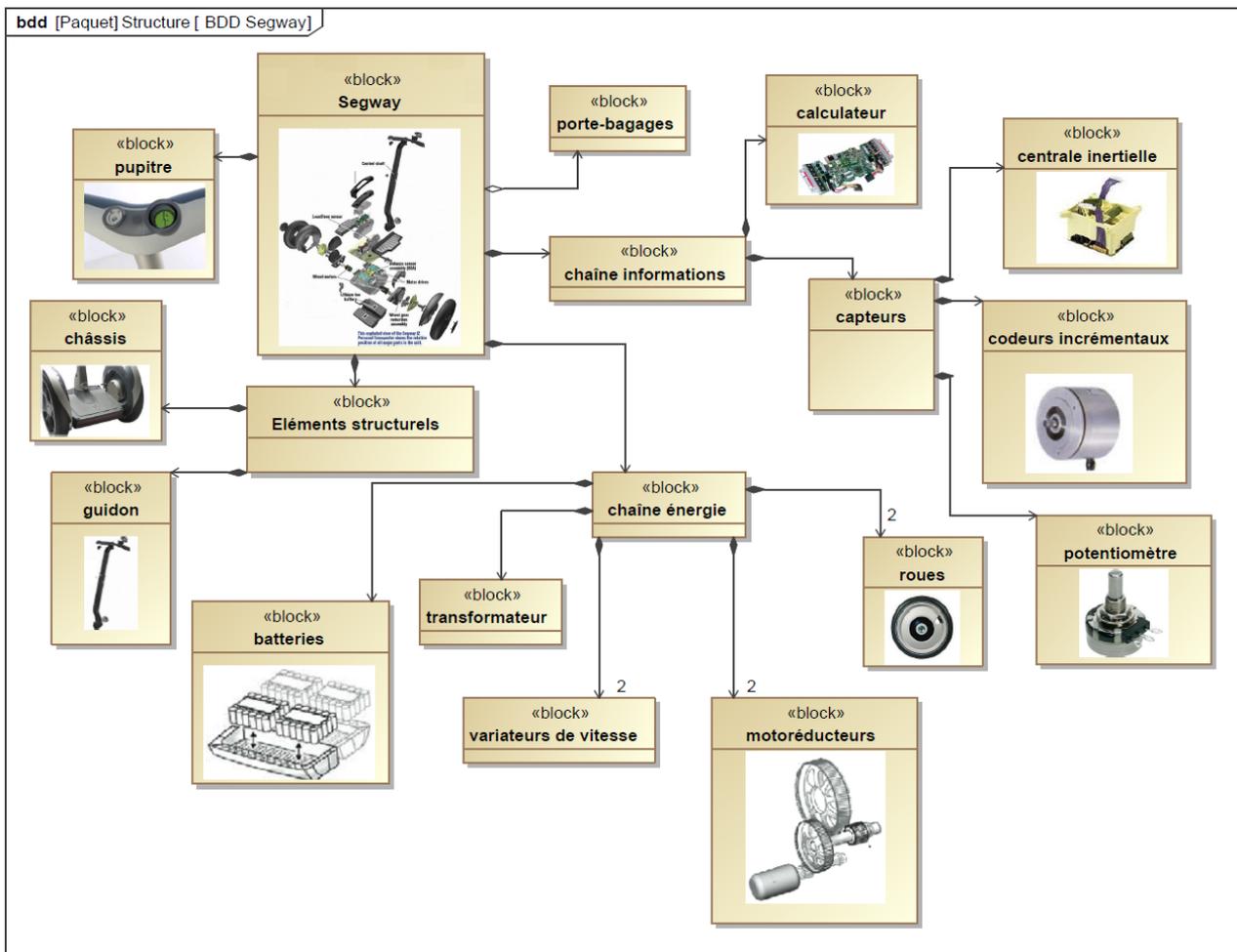


FIGURE 24 : Diagramme SysML de définition de blocs (bdd) du Segway

V.3 Représentation par chaînes fonctionnelles

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 de puissance** (anciennement, chaîne d'énergie) regroupant les fonctions qu'elle réalise concernant les flux d'énergie au sein du système.

La chaîne d'information (cf. FIGURE 26) permet :

- **d'acquérir des informations** :
 - sur l'état d'un produit ou de l'un de ses éléments (en particulier de la chaîne de puissance) ;
 - 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 de puissance 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**.

La chaîne de puissance (cf. FIGURE 27) assure la réalisation d'une fonction de service définie dans le cahier des charges. Elle réalise cette action en fonction des ordres donnés par

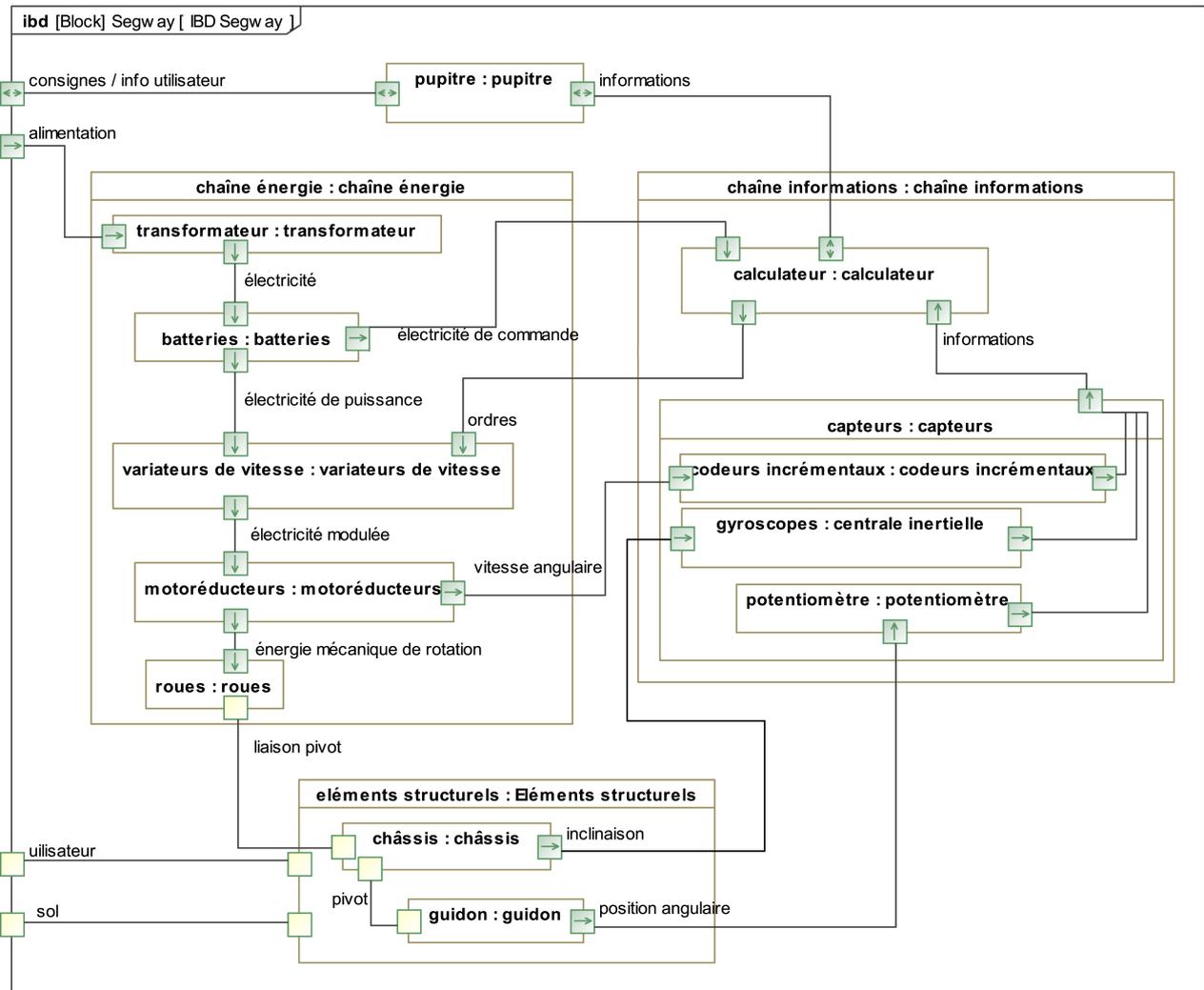


FIGURE 25 : Diagramme SysML de blocs internes (**ibd**) du Segway

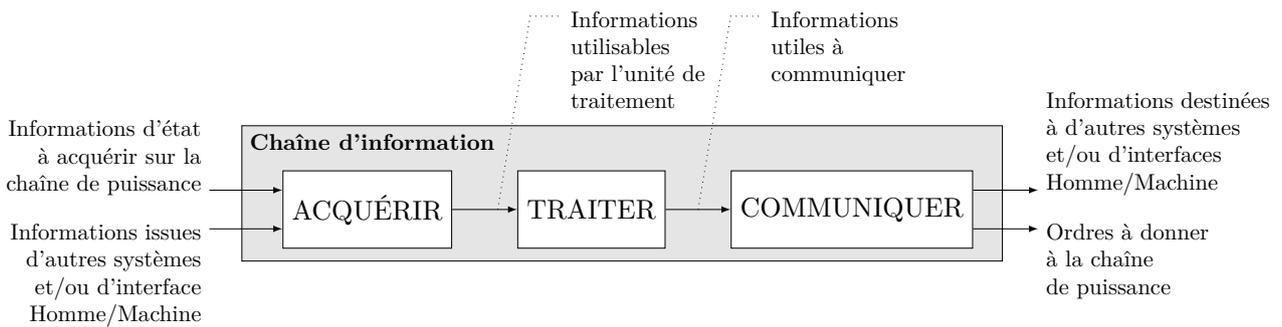


FIGURE 26 : Chaîne d'information générique d'un système automatisé

la chaîne d'information. La chaîne de puissance est constituée des fonctions génériques : **ali-menter**, **moduler** (aussi appelée distribuer), **convertir** et **transmettre** qui permettent ainsi d'**agir** afin de réaliser l'action souhaitée.

La FIGURE 28 et la FIGURE 29 montrent les chaînes fonctionnelles d'une serrure codée et du gyropode Segway. **Attention** : Les deux chaînes sont toujours reliées entre elles.

Remarque : Le modèle proposé de chaînes fonctionnelles doit être systématiquement adapté au système étudié. Par exemple, il peut y avoir plusieurs chaînes d'informations ou certaines fonctions peuvent être absentes.

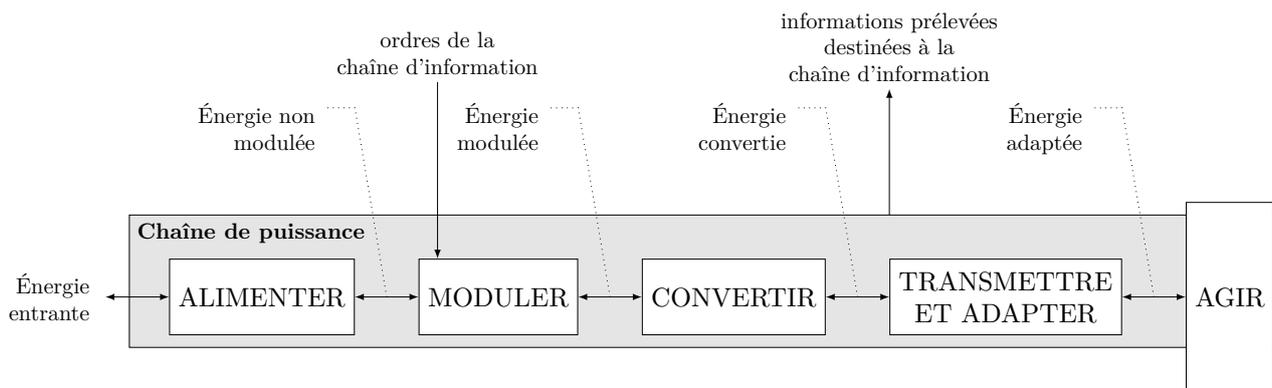


FIGURE 27 : Chaîne de puissance générique d'un système automatisé

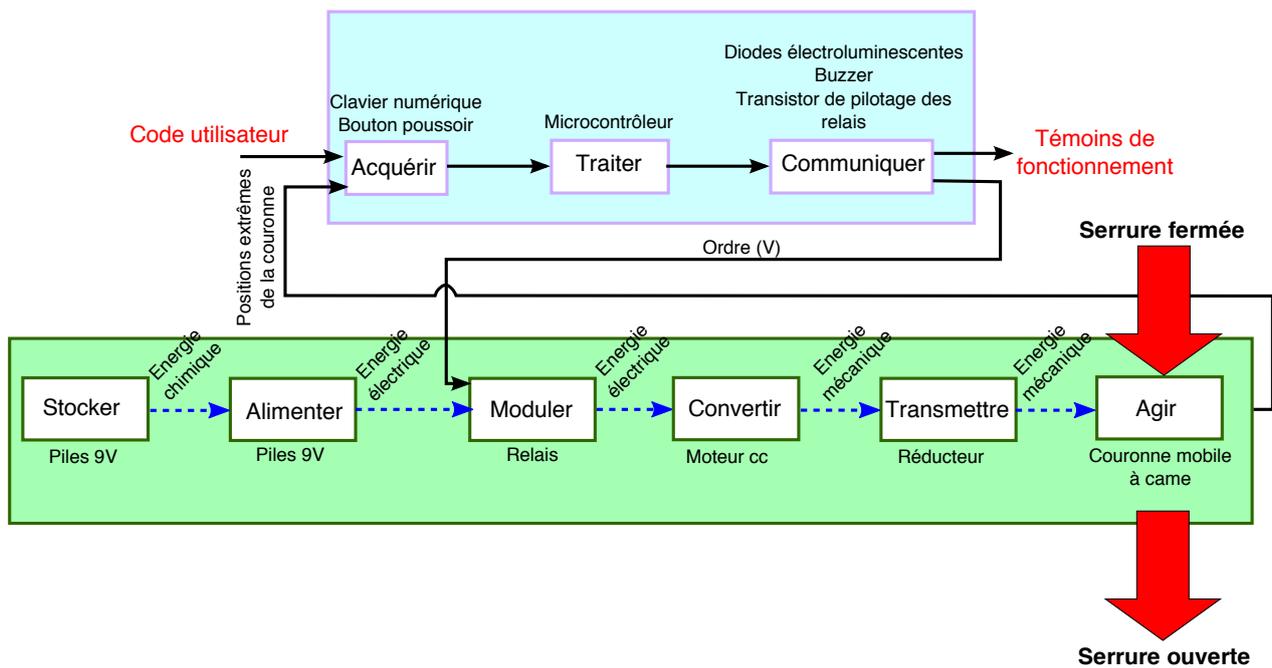


FIGURE 28 : Chaîne fonctionnelles d'une serrure codée

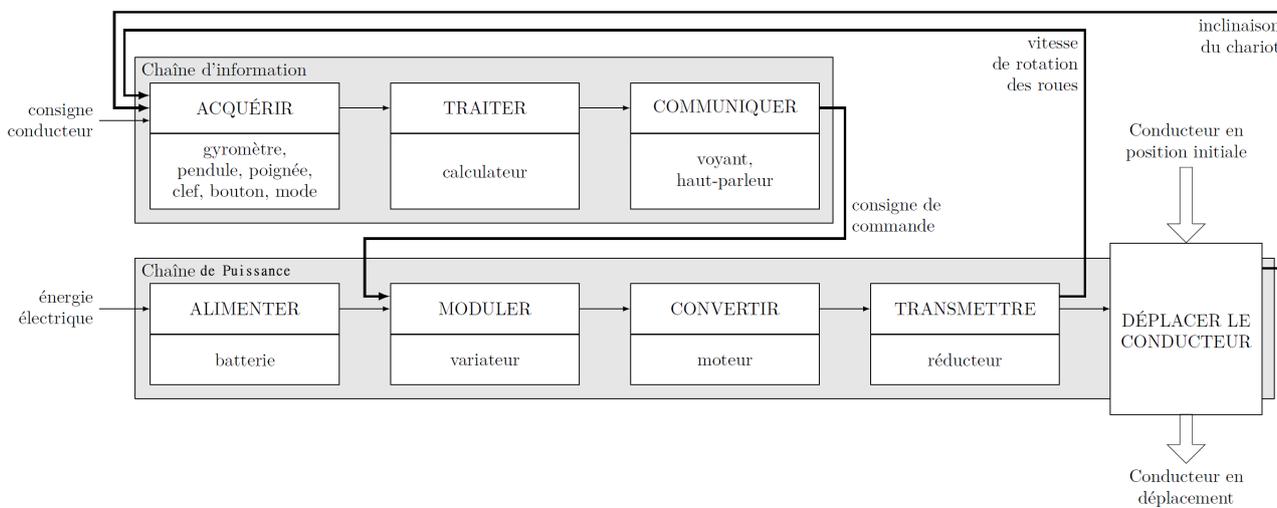


FIGURE 29 : Chaînes fonctionnelles du gyropode Segway

VI Représentation et modélisation des chaînes fonctionnelles

Les descriptions présentées précédemment, notamment avec les chaînes fonctionnelles permettent de décrire un système, mais ils ne permettent pas de simuler son comportement afin de prévoir ses performances. Pour faire cela, nous utiliserons des schéma-blocs qui permettent d'associer un modèle mathématique à chaque constituant afin d'obtenir un modèle global du système. Deux types de schéma-blocs sont distingués selon si les blocs sont causaux ou acausaux.

On parle de causalité lorsque le lien entre la cause et l'effet d'un phénomène est clairement établi.

VI.1 Schéma-blocs causal

Pour un bloc causal, on définit à l'avance la grandeur d'entrée (cause) et la grandeur de sortie (effet) du composant en les choisissant parmi les grandeurs physiques intervenant dans son comportement et en respectant la notion de causalité.

Pour réaliser un schéma-blocs fonctionnel causal, on place la variable de la grandeur d'entrée à gauche et celle de la grandeur de sortie à droite (pour un système asservi, on a donc la grandeur de consigne à gauche et la grandeur réelle qui est asservie à droite). Ensuite, on place dans des blocs le nom de tous les composants (ou phénomène physique) intervenant entre ces deux grandeurs et on les relie avec les grandeurs intermédiaires qui apparaissent.

Exemple : Asservissement de la vitesse de rotation d'un bras de robot (FIGURE 31).

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].

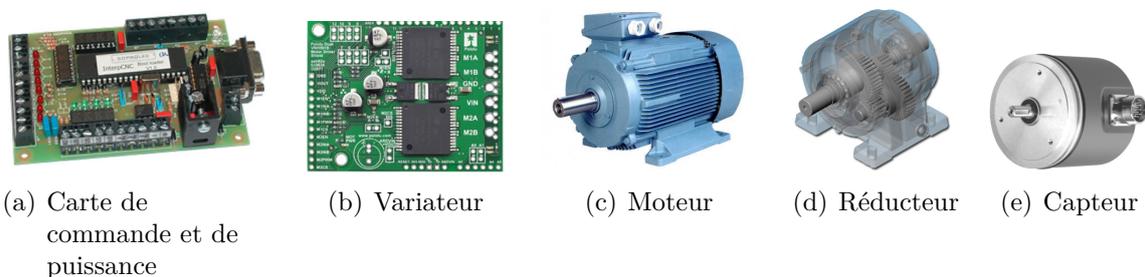


FIGURE 30 : Éléments constitutifs de l'asservissement de vitesse (la carte de commande et de puissance réalise les fonctions de l'adaptateur, du comparateur et du correcteur)

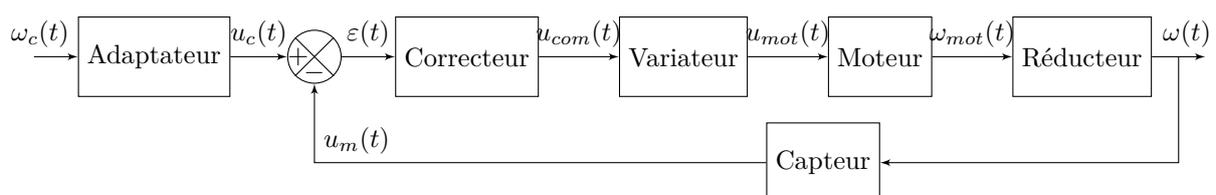
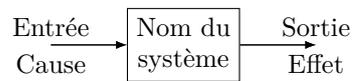


FIGURE 31 : Modélisation fonctionnelle et structurale d'un asservissement de vitesse

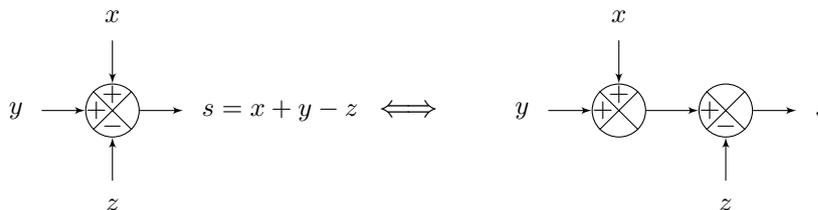
Remarque : On notera que la source d'énergie n'est pas représentée sur un schéma-blocs causal, même si elle est indispensable pour que le système puisse fonctionner.

On distingue trois types d'éléments graphiques principaux :

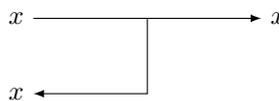
- **le bloc** contient un nom et possède une ou plusieurs entrées / sorties. Le nom du bloc peut être le nom d'un composant (moteur, réducteur, roue...) ou un opérateur mathématique (par exemple, l'opérateur f peut être utilisé pour passer d'une vitesse à une position). Les variables d'entrée (cause) et de sortie (effet) de chaque bloc sont décrites par des flèches entrantes ou sortantes.



- **le bloc de sommation (ou sommateur, soustracteur, comparateur)** réalise des additions et soustractions entre plusieurs signaux d'entrée (qui doivent donc être de même nature).



- **le point de prélèvement ou de jonction** permet d'utiliser une variable dans plusieurs blocs différents.



VI.2 Schéma-blocs acausal

Les schéma-blocs acausaux ne fixent pas à l'avance les grandeurs d'entrées (causes) et de sorties (effets) des composants.

Les schéma-blocs acausaux peuvent être utilisés en simulation numériques (cf. exemple pour le Segway en FIGURE 32). Ils permettent de réaliser un modèle proche de l'architecture du système (cf. chaînes d'énergies et d'informations). Chaque bloc est un composant et les traits qui les relient représentent soit des fils électriques, des arbres mécaniques, des flux ...

Un modèle acausale d'un système peut être considéré comme plus visuel et plus flexible qu'un modèle causal. En revanche, le problème de ce genre de schéma-blocs est la transparence puisque les modèles des constituants sont cachés (les équations n'apparaissent pas). Une autre limite est qu'il est possible que les blocs disponibles dans le logiciel de simulation ne correspondent pas à ce qui est présent dans le système étudié.

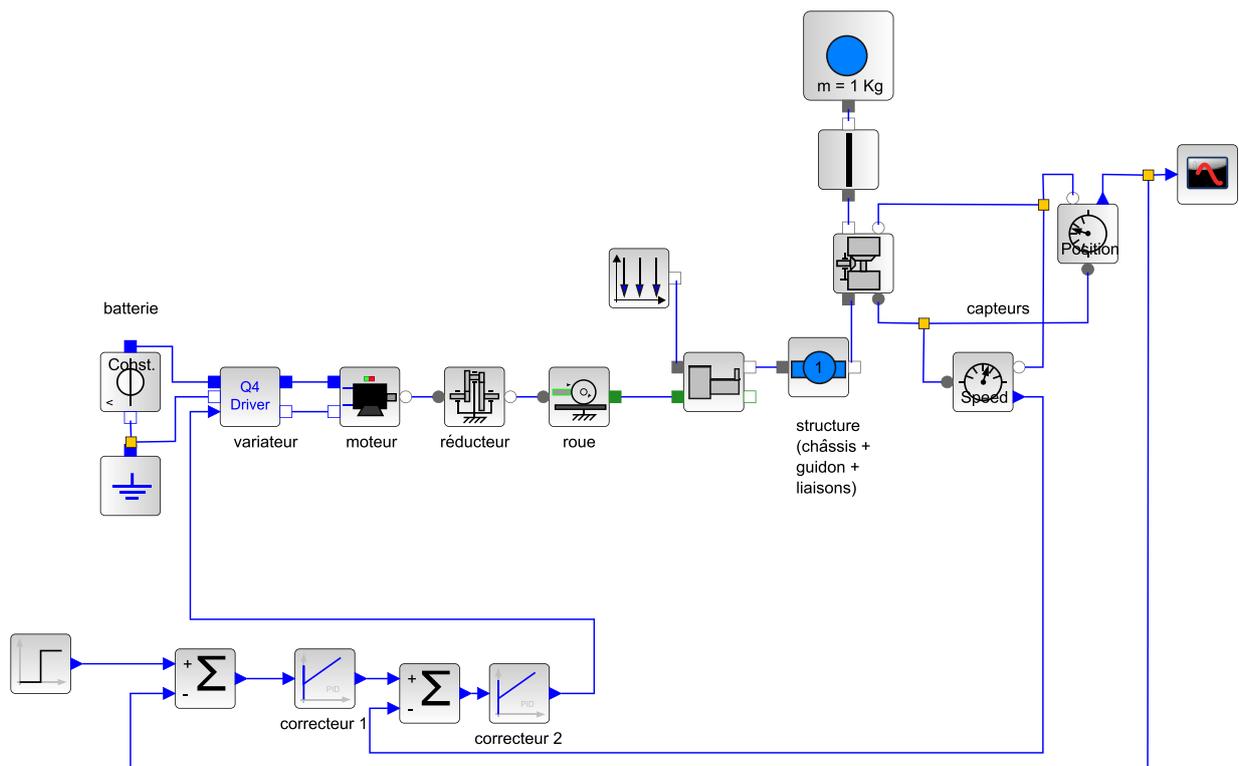


FIGURE 32 : Modélisation par schéma-blocs acausal du Segway

TD 1 – Évaluation des performances

La position angulaire $\theta(t)$ d'un axe d'un robot est asservi. Différents tests ont été réalisés pour vérifier que les choix de conception sont bien adaptés aux exigences formulées.

La FIGURE 1 présente la réponse de l'axe à une consigne en échelon d'amplitude $\theta_0 = 10^\circ$.

La FIGURE 2 présente la réponse de l'axe à une consigne en rampe de pente $\omega_0 = 20^\circ/s$.

La FIGURE 3 présente la réponse de l'axe à une consigne en échelon d'amplitude $\theta_0 = 10^\circ$ et avec apparition d'une perturbation constante à partir de $t_p = 150 \text{ ms}$.

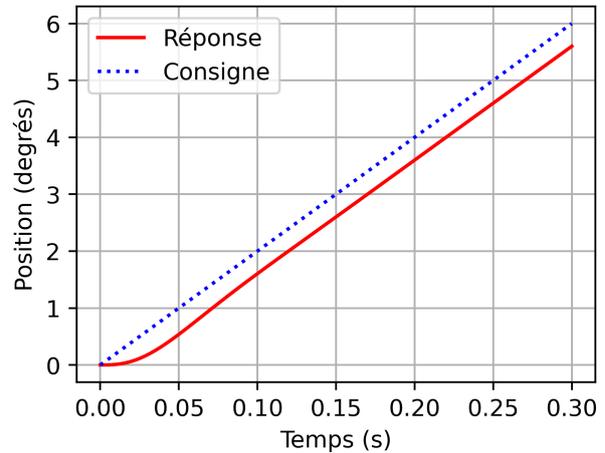
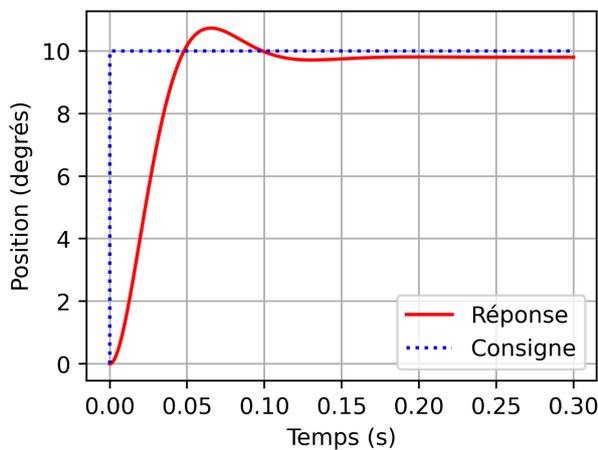


FIGURE 1 : Réponse de l'axe du robot à une consigne en échelon

FIGURE 2 : Réponse de l'axe du robot à une consigne en rampe

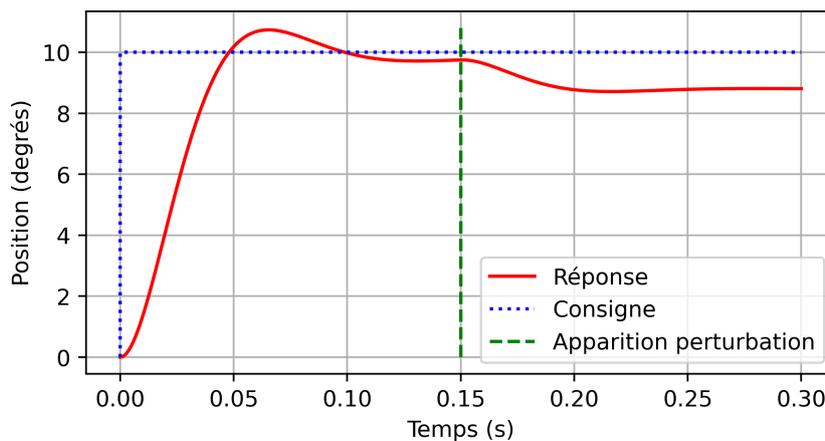


FIGURE 3 : Réponse de l'axe du robot à une consigne en échelon avec perturbation

Q1. Justifier que le système asservi est stable.

Q2. À l'aide des figures précédentes, évaluer le taux de dépassement relatif à la première oscillation $D_1\%$, le temps de réponse à 5% $t_{5\%}$, l'erreur statique μ_s et l'erreur de trainage μ_t .

Q3. Est-ce que le système asservi étudié est sensible à une perturbations constante? Justifier.

TD 2 – Poste de mise en cartons

Mise en situation et contexte : une usine de fabrication de flacons en verre pour parfum possède un poste de mise en cartons qui est l'objet de la présente étude (voir FIGURE 1 et FIGURE 3).

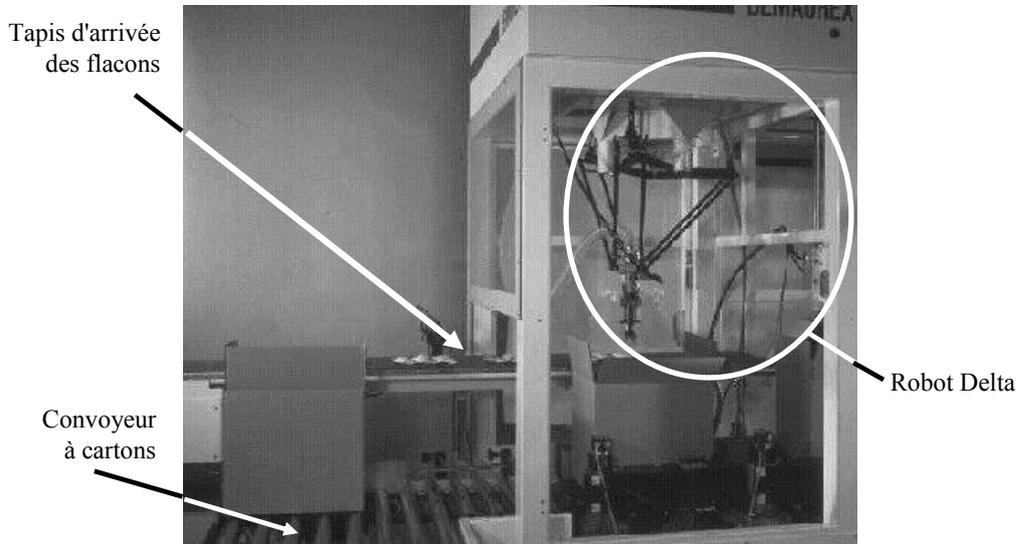


FIGURE 1 : Vue d'ensemble du poste de mise en cartons

Les flacons, qui sortent du four de cuisson, sont disposés les uns derrière les autres sur un tapis roulant qui les achemine jusqu'à un poste de conditionnement. Une caméra, associée à un logiciel de reconnaissance de formes, s'assure de la conformité géométrique des flacons. Les flacons non conformes (présentant un défaut géométrique, renversés, cassés ...) sont évacués vers l'extérieur sur le même tapis roulant. Chaque flacon conforme est saisi par un des deux robots « Delta » et est placé dans une alvéole du carton. Les deux robots Delta travaillent en parallèle sous la conduite d'une même partie commande. Ils saisissent les flacons sur le tapis roulant commun qui achemine les flacons et remplissent chacun un carton différent. Chaque carton plein contient 48 flacons. Les éléments constitutifs du poste de mise en cartons sont présentés sur la FIGURE 3 (à l'exception de la caméra).

Les images issues de la caméra permettent aussi à la partie commande de donner un ordre d'orientation du flacon au robot qui l'a saisi de façon à ce que le flacon rentre aisément dans l'alvéole correspondante de forme parallélépipédique (voir FIGURE 2).

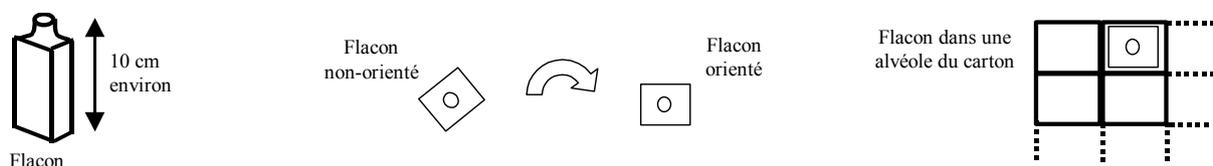


FIGURE 2 : Flacon et orientation du flacon

Les cartons vides sont acheminés sur la zone de chargement (zone ZC1 ou ZC2 de la FIGURE 3) par l'intermédiaire d'un convoyeur à rouleaux et de vérins pousseurs. Les cartons remplis

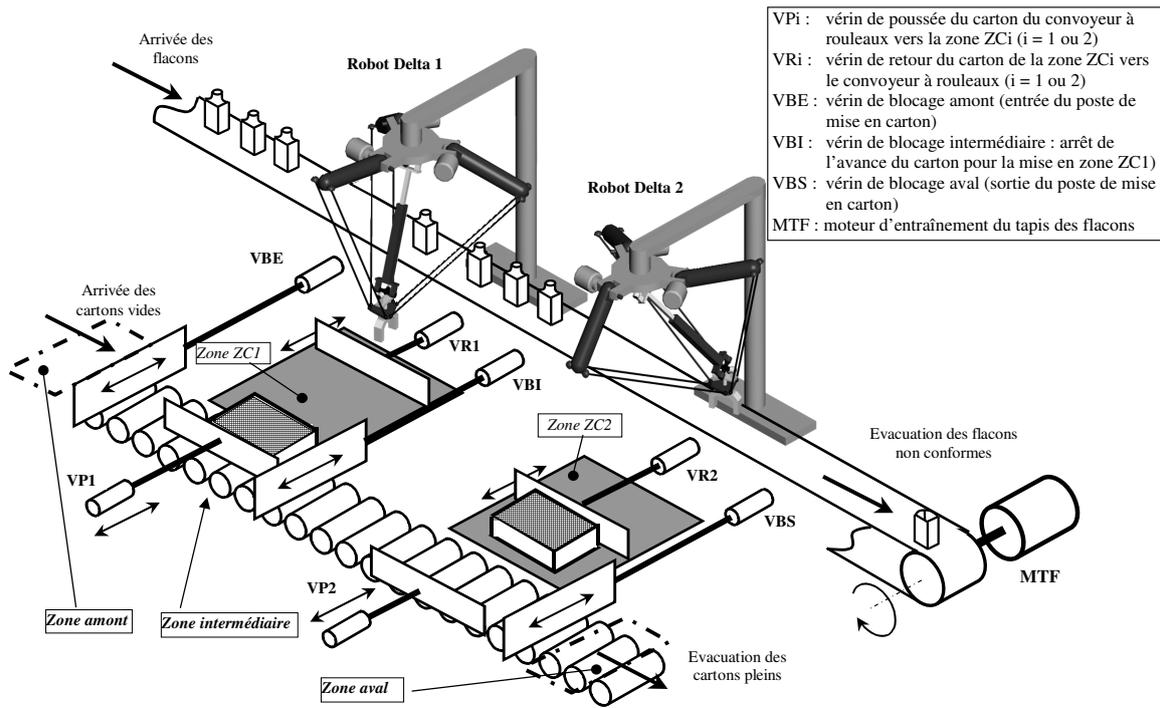


FIGURE 3 : Description du poste de mise en cartons (hors caméra)

sont évacués vers l'extérieur par ce même convoyeur. Les opérations de fermeture, de marquage et de palettisation des cartons pleins ne sont pas étudiées dans ce sujet.

Q1. Proposer un diagramme SysML de cas d'utilisation du système de poste de mise en cartons.

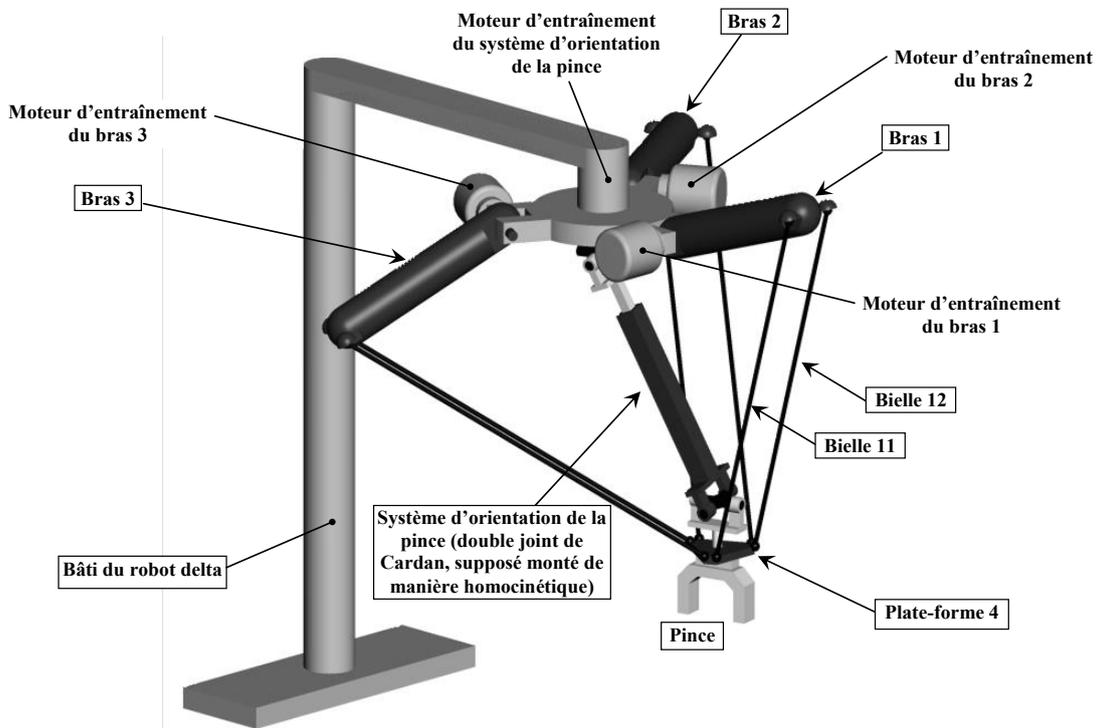


FIGURE 4 : Robot à structure parallèle de type « Delta »

Les deux robots utilisés sont de type Delta à architecture parallèle (FIGURE 4). Ces robots sont à quatre axes (en robotique, un axe est une liaison motorisée) équipé :

- de trois moteurs électriques assurent le déplacement de la plate forme mobile en agissant sur les trois bras 1, 2 et 3 (c'est la structure Delta tri-motorisée) ;
- d'un moteur électrique assure l'orientation de la pince, via un axe cinématique d'orientation.

La fermeture et l'ouverture de la pince pour la saisie des flacons sont assurées par un vérin pneumatique.

Le cahier des charges impose, vis à vis de la fonction principale du poste de mise en cartons, les performances suivantes :

Critères	Valeurs
Mise en cartons de 48 flacons	Durée < 60 s
Accélération maximale du centre de gravité d'un flacon pour éviter une détérioration de celui-ci	< $8g \approx 80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

Hypothèses simplificatrices :

- Un seul robot « Delta » fonctionne et remplit seul un carton.
- Le déplacement de la pince avec un flacon jusqu'au carton est rectiligne et supposé toujours le même d'un flacon à l'autre (la distance à parcourir est $D = 0,8 \text{ m}$). On note, $x(t)$ l'évolution temporelle de la position du centre de gravité du flacon, $v(t)$ sa vitesse et $a(t)$ son accélération.
- La prise et la dépose d'un flacon durent 0,1 s chacune.
- Les moteurs du robot sont commandés de manière à obtenir l'évolution de la vitesse $v(t)$ du centre de gravité du flacon au cours d'un aller-retour, de la FIGURE 5.

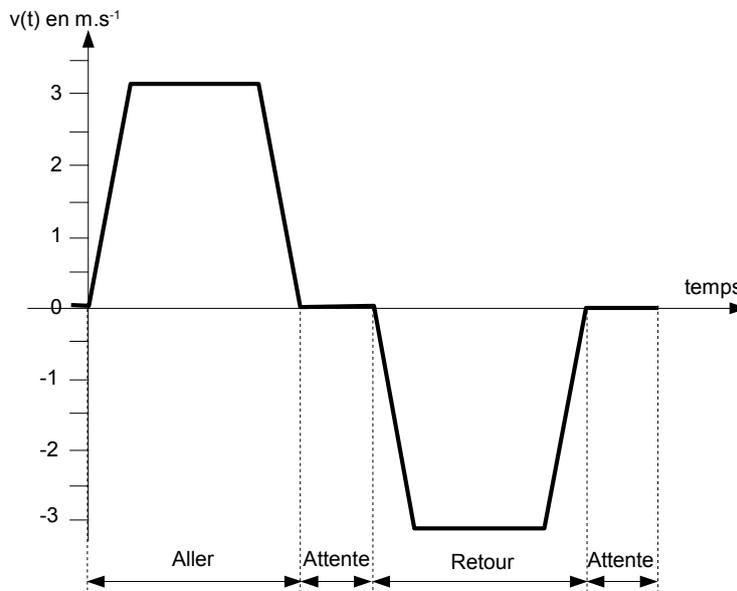


FIGURE 5 : Cycle de vitesse $v(t)$ de la pince

La durée des phases d'accélération et de décélération est égale à $t_a = 0,06 \text{ s}$.

Q2. Justifier à l'aide de la courbe de la FIGURE 5 que l'accélération et la décélération sont inférieures à l'accélération maximale spécifiée dans le cahier des charges.

Q3. Calculer la durée T mise pour réaliser un aller (ou un retour) connaissant la distance D d'un flacon au carton et l'évolution de la vitesse $v(t)$.

Q4. En déduire la durée d'un cycle. Conclure quand au respect du cahier des charges.

Pour atteindre les performances définies précédemment et notamment le cycle de vitesse de la FIGURE 5 $v(t)$, les robots doivent être correctement asservis.

Les critères de performances de l'asservissement de chaque axe d'un robot, définis dans le cahier des charges, sont les suivants :

Critères	Valeurs
Précision	Écart statique nul
Rapidité	$t_{5\%} < 0,1 \text{ s}$
Premier dépassement	$D_1^{\%} < 5 \%$

Le relevé de la FIGURE 6 correspond à la position angulaire d'un des axes soumis à une consigne de position à atteindre de 10° .

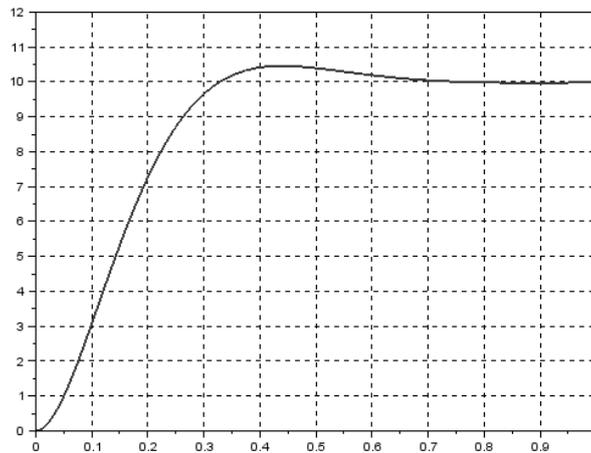


FIGURE 6 : Relevé de la position angulaire pour une entrée échelon d'amplitude 10°

Q5. Valider le cahier des charges en précisant les valeurs atteintes par rapport à celles attendues dans le cahier des charges.

On donne sur la FIGURE 7 un diagramme **bdd** du poste de mise en cartons.

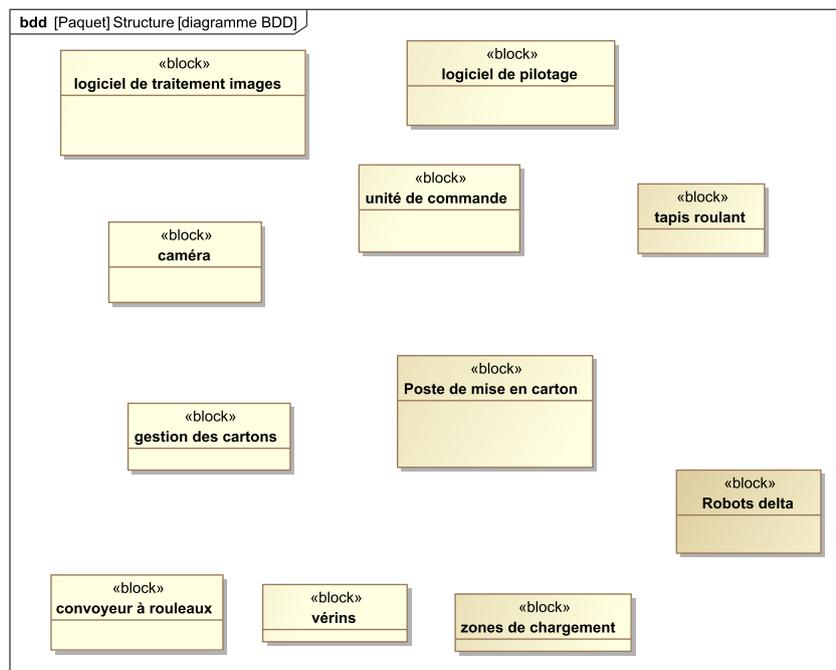


FIGURE 7 : Diagramme de définition des blocs

Q6. À l'aide de la description initiale du système, relier les blocs au poste de mise en cartons. Attention à bien prendre en compte les contenances internes, sur la FIGURE 7.

Le diagramme **ibd** de la FIGURE 8 propose une modélisation des flux du poste de mise en cartons.

Q7. En vous aidant à nouveau de la description du système, relier les ports de flux entre eux et préciser la nature des flux, sur la FIGURE 8.

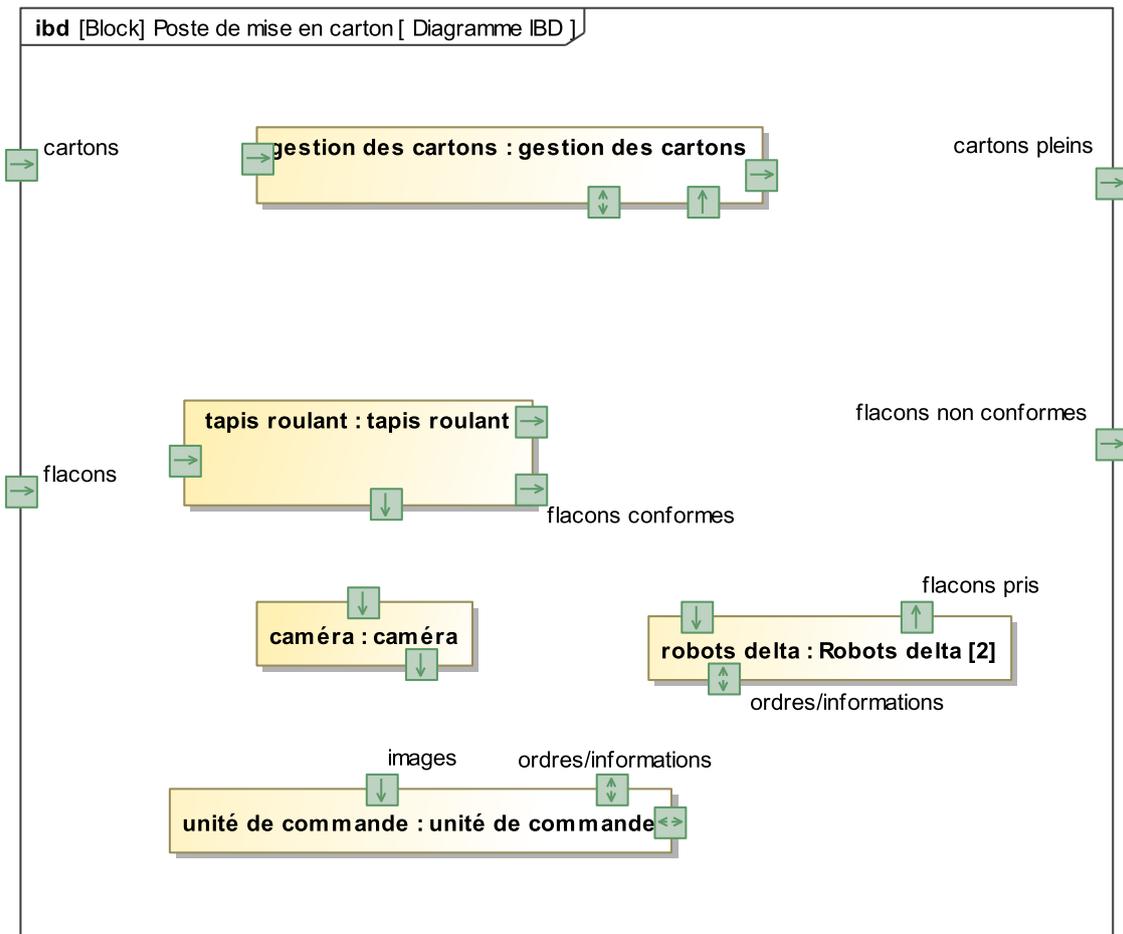


FIGURE 8 : Diagramme de blocs internes

Analyse de la structure de l'axe d'orientation d'un robot Delta

L'orientation de la pince doit être précise pour permettre un bon placement des flacons dans les cartons. Pour cela, un asservissement est réalisé.

Un **codeur incrémental monté directement sur l'arbre moteur** mesure les informations de position et de vitesse de rotation de l'axe du moteur (rotor). Cette information numérique est utilisée par le **calculateur** qui la compare à une **valeur de consigne issue de l'analyse d'images**. Le calculateur, réglé au préalable par l'utilisateur via une **interface de commande**, donne des ordres à un modulateur d'énergie DC-DC (**hacheur**) qui distribue l'énergie électrique au **moteur à courant continu**. Le mouvement de rotation est ensuite réduit par un **réducteur de vitesse** puis transmis à la **pince** par le **double joint de cardan**.

Q8. Réaliser un schéma d'architecture en détaillant les chaînes de puissance et d'information.

TD 3 – Caméra de poursuite d'athlètes

Présentation du système

L'étude porte sur la caméra de poursuite SPEEDCAM utilisée aux championnats du monde d'athlétisme pour filmer le sprint final des athlètes en tête de la course. La caméra est fixée sur un chariot se déplaçant sur un rail. Ce rail est le plus petit au monde permettant d'atteindre des vitesses supérieures à 15 m.s^{-1} .



FIGURE 1 : Caméra de poursuite sur son rail

Q1. Proposer un diagramme de cas d'utilisation du système Speedcam.

Deux fonctions relatives au cas d'utilisation nous intéressent dans ce TD : « Suivre l'athlète » et « Filmer l'athlète ».

On s'intéresse à la réalisation de la fonction « Suivre l'athlète » et plus particulièrement à la fonction technique « Déplacer la caméra » qui est réalisée à l'aide d'un asservissement sur la vitesse de translation de la caméra. Le diagramme de définition de blocs suivant liste l'ensemble des constituants intervenant dans l'asservissement de vitesse.

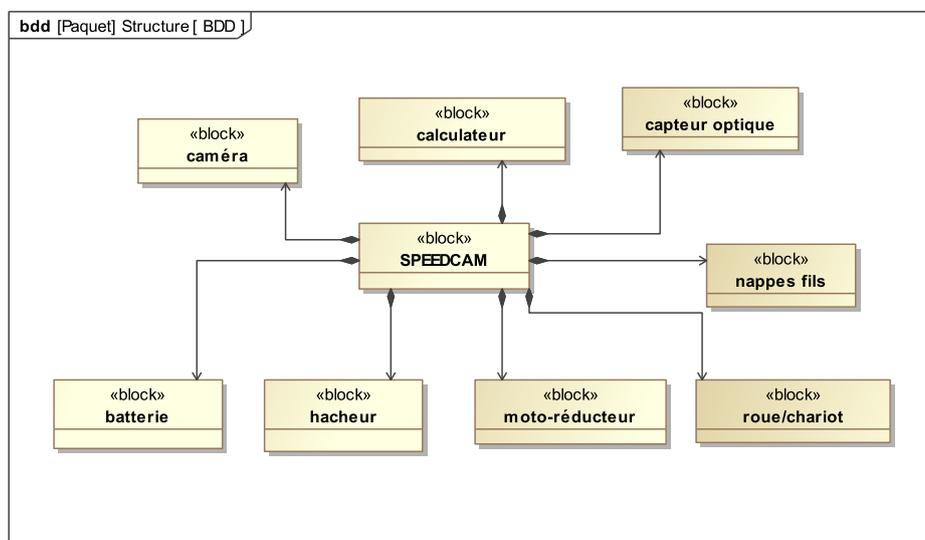


FIGURE 2 : Diagramme BDD du système Speedcam

Un capteur optique permet de mesurer la position linéaire du chariot supportant la caméra. Cette information est transmise à un ordinateur qui détermine la consigne nécessaire pour suivre le coureur en fonction de la position de celui-ci renvoyée par la caméra. Celle-ci est transmise sous forme de tension de commande à l'asservissement du chariot. Le chariot est mis en mouvement par un moto-réducteur (moteur + réducteur) alimenté par une batterie suivie d'un hacheur. Des paramètres de réglage de l'asservissement du chariot peuvent être modifiés.

Q2. À partir de la description du système et du diagramme de définition de blocs, compléter les chaînes de puissance et d'informations du système de caméra de poursuite Speedcam.

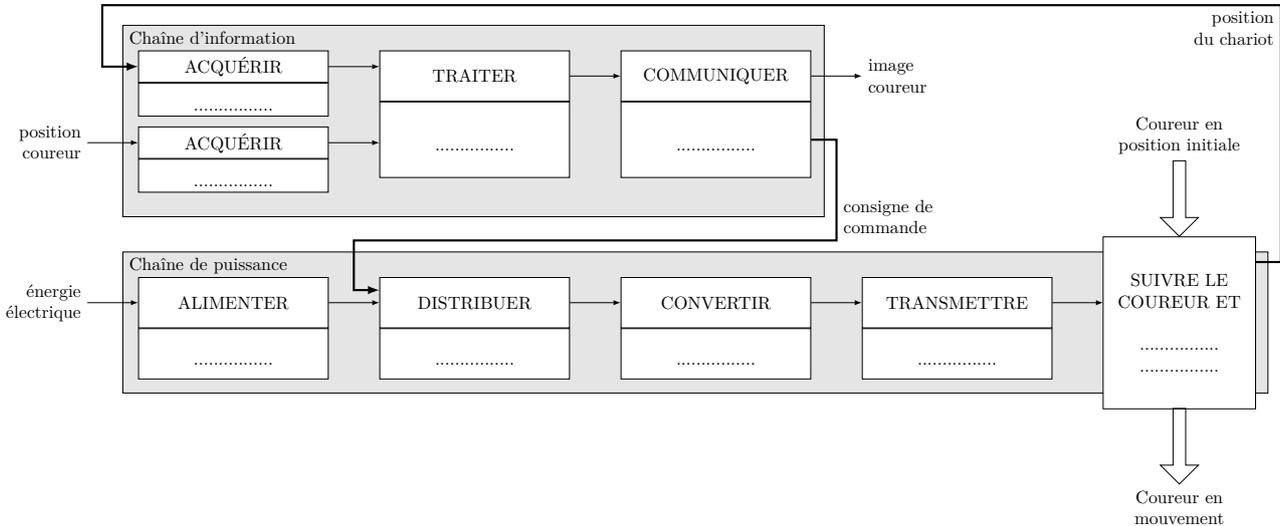


FIGURE 3 : Diagramme des chaînes fonctionnelles du système Speedcam

Le cahier des charges fonctionnel partiel lié à la réalisation de cette fonction « Déplacer la caméra » est le suivant :

Critères	Niveaux
Erreur statique sur la vitesse atteinte	$\mu_s = 0$
Rapidité de la caméra	$t_{5\%} < 0,4 \text{ s}$
Stabilité de la caméra	Absolue

Modélisation de l'asservissement

Pour réaliser cet asservissement, la « vitesse linéaire de consigne » $v_c(t)$ est convertie en « tension de consigne » $u_c(t)$ à l'aide d'un convertisseur. Cette tension de consigne est comparée à la « tension mesurée » $u_e(t)$, image de la « vitesse » réelle $v(t)$ obtenue par un capteur, pour former un écart noté $\varepsilon(t)$. Cet écart est ensuite adapté par un correcteur et amplifié par un amplificateur pour délivrer la « tension moteur » $u_m(t)$. Finalement, cette tension moteur permet de faire varier la vitesse de rotation du moteur et donc du chariot qui se déplacera à la vitesse $v(t)$.

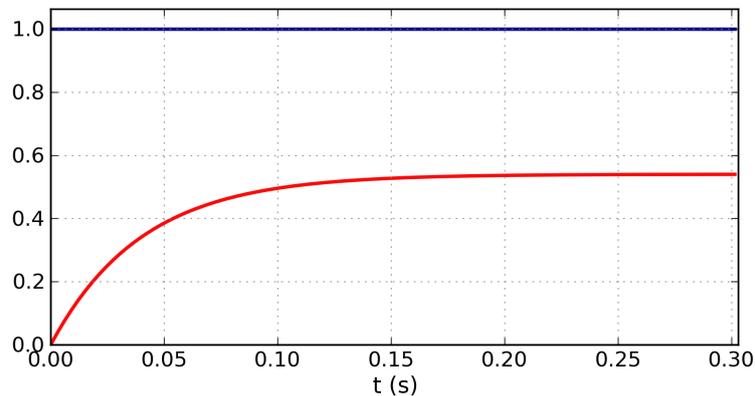
Q3. Justifier à la lecture de la description du système qu'il s'agit bien d'un asservissement. Mettre en place le schéma-blocs causal fonctionnel de cet asservissement.

Vérification des performances

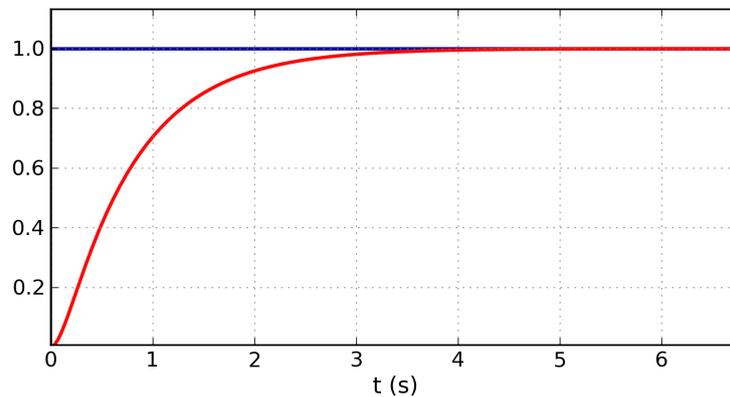
Un des objectifs des ingénieurs-concepteurs est de déterminer le correcteur qui permet de respecter les exigences décrites dans le cahier des charges. Pour cela, on réalise des simulations du modèle du système en le soumettant à un échelon de vitesse de 1 m.s^{-1} pour différents types de correcteur et réglages de la correction.

Q4. Pour chaque réponse indicielle ci-dessous, caractériser la vérification de la fonction « Déplacer la caméra ».

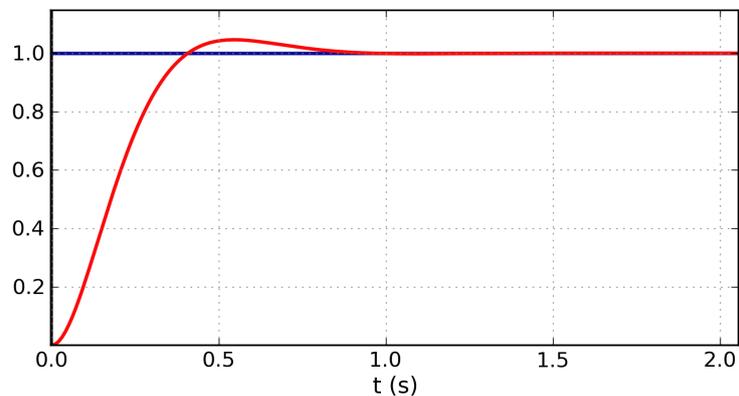
Correction proportionnelle



Correction intégrale



Correction intégrale modifiée



Q5. Faire un choix de correcteur à implanter sur le système de caméra Speedcam afin de respecter le cahier des charges de la fonction « Déplacer la caméra ».

En réalité, et pour satisfaire la fonction « Filmer l'athlète », on utilise un asservissement de position en plus de l'asservissement de vitesse (l'asservissement de vitesse est alors une boucle à l'intérieur de la boucle de l'asservissement de position).

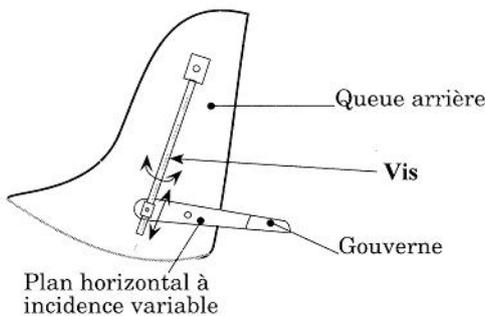
Q6. Justifier simplement que l'asservissement de vitesse ne permet pas nécessairement de vérifier la fonction « Suivre l'athlète ».

Q7. Compléter le schéma fonctionnel de l'asservissement de vitesse élaboré à la question 3 en ajoutant l'asservissement de position (on notera $x_c(t)$ la consigne de position et $x(t)$ la position réelle). Quel est le composant qui permet de réaliser la mesure de la position linéaire réelle $x(t)$?

TD 4 – Commande d’un plan horizontal réglable d’empennage d’avion¹

Un empennage d’avion est composé principalement de deux parties :

- la première, le plan horizontal et la gouverne, qui assure la stabilité en profondeur de l’avion ;
- la deuxième, la queue arrière, qui assure la stabilité en direction de l’avion.

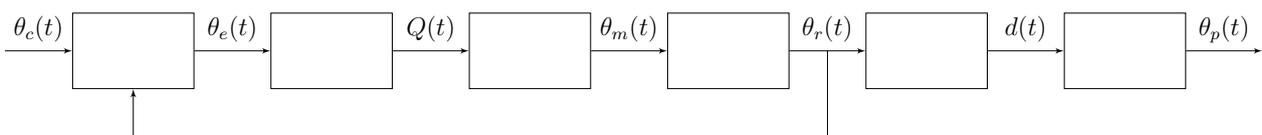


Nous nous intéressons dans ce sujet au système qui permet d’asservir en position le plan horizontal à incidence variable (qui entraîne dans son mouvement la gouverne). Les mouvements relatifs plan horizontal/gouverne ne seront pas étudiés.

La commande en position du plan horizontal est assurée par un vérin à vis. Un moteur hydraulique asservi en position, à partir d’une consigne délivrée par un servomoteur, entraîne un réducteur, constitué d’un réducteur à roues coniques et d’un différentiel, lié à la vis du vérin à vis. La rotation de cette vis entraîne la translation d’un écrou qui permet le déplacement du plan horizontal.

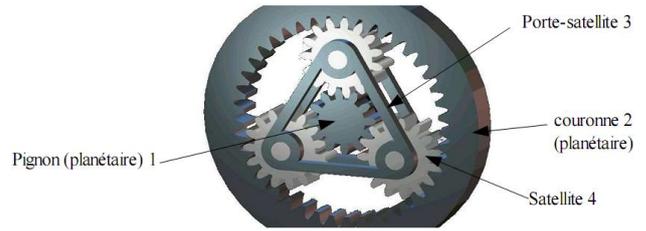
L’inclinaison du plan horizontal est assurée par un vérin à vis. La rotation de cette vis $\theta_r(t)$ entraîne la translation $d(t)$ d’un écrou qui permet alors le déplacement $\theta_p(t)$ du plan horizontal par une structure articulée. Un moteur hydraulique commandée par un distributeur (débit noté $Q(t)$) génère un mouvement de rotation $\theta_m(t)$. Ce mouvement de rotation est transmis par l’intermédiaire d’un réducteur à la vis du vérin à vis. Un boîtier comparateur permet d’adapter l’angle de commande $\theta_c(t)$ du distributeur à partir de l’angle de consigne $\theta_e(t)$ et de l’angle $\theta_r(t)$ mesuré en sortie du réducteur.

Q1. Compléter le schéma-blocs fonctionnel décrivant la structure du système.



1. Adapté de CCP MP 2005

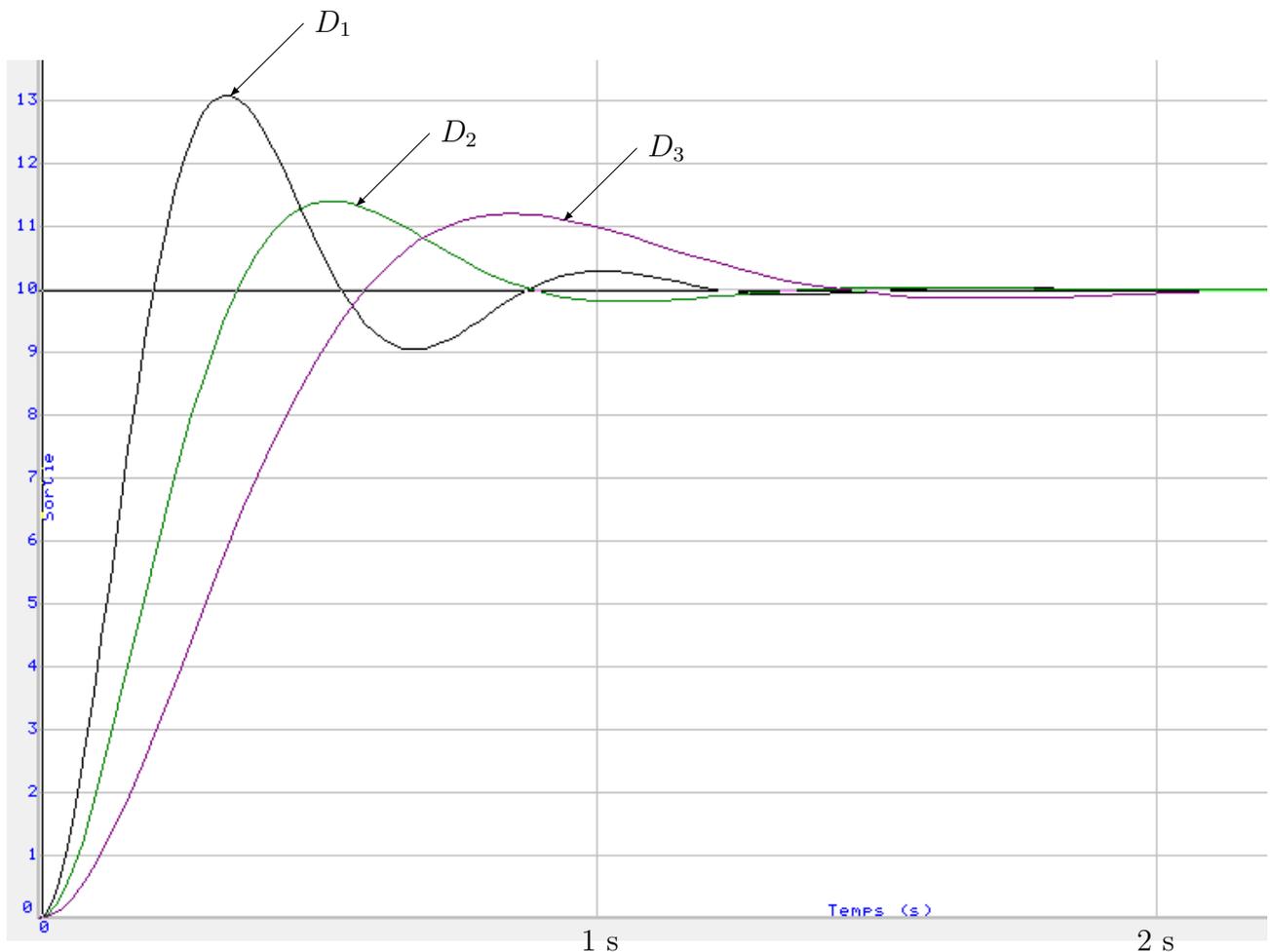
La solution retenue pour le boîtier comparateur est un train épicycloïdal, dispositif de transmission mécanique. Ce système a la particularité de posséder 3 degrés de liberté, c'est à dire qu'il associe trois mouvements de rotation possibles. En utilisant le nombre de dents des roues intervenant dans ce système, on peut montrer que la relation caractéristique du train épicycloïdal est donnée par : $3\theta_e + \theta_r - 4\theta_c = 0$.



Q2. Proposer une modification du schéma-blocs précédent, au niveau du boîtier comparateur, en utilisant la relation précédente et un symbole de comparaison.

Le cahier des charges impose un **taux de dépassement $D_1^{\%}$ maximal de 20%** et un **système précis**. Le système doit être rapide également mais ce n'est pas le critère fondamental ($t_{5\%} < 2$ s). Il doit bien évidemment être stable.

Lors de la conception, plusieurs distributeurs sont disponibles. Des simulations numériques utilisant trois distributeurs différents (D_1, D_2, D_3) ont donné les réponses indicielles suivantes (entrée échelon de 10°) :



Q3. Après l'analyse des performances obtenues par simulation pour les 3 distributeurs, proposer un choix (justifié) qui permet au système de répondre le mieux possible au cahier des charges. Vous prendrez soin de déterminer les performances (précision, stabilité, rapidité) pour chaque résultats de simulation.