

# Régulation

## Table des matières

1. Introduction.....	2
2. Notion de Système.....	3
3. Systèmes asservis.....	4
3.1. Commande d'un système en chaîne ouverte.....	4
3.2. Notion de perturbations.....	4
3.3. Solution face aux perturbations : le bouclage.....	5
3.4. <i>Systèmes automatisés asservis</i> .....	6
3.5. Représentation d'un système asservi.....	8
3.6. Exemple de schéma-blocs fonctionnel d'un système.....	9
4. Classifications des systèmes.....	10
4.1. Systèmes automatisés à logique combinatoire.....	10
4.2. <i>Systèmes automatisés à logique séquentielle</i> .....	13

La régulation concerne la mise en œuvre de l'ensemble des moyens théoriques, matériels et techniques pour maintenir chaque grandeur physique essentielle égale à une valeur désirée, appelée consigne, par action sur une grandeur réglante, et ce, malgré l'influence des grandeurs perturbatrices du système.



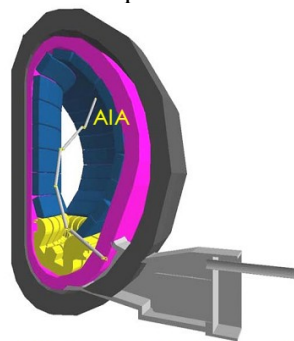
# 1. Introduction

Le contrôle est un concept de sens commun. On en trouve des exemples dans le monde naturel, dans le monde vivant (par exemple la régulation de la température du corps humain). Les premières réalisations datent de l'antiquité (régulation de niveau d'eau). Il a toutefois fallu attendre le 19<sup>ème</sup> siècle pour que les propriétés des boucles de régulation soient étudiées de manière formelle.

La Régulation est une partie de la science technique appelée Automatique. On considère généralement que l'automatique (et donc la régulation) a débuté dans les années 1930, avec les premiers asservissements de position et surtout une première définition de la stabilité ; naturellement, des systèmes à fonctionnement « autonome » existaient auparavant (les automates), mais ils n'étaient pas théorisés. Après ces premiers pas, tout s'accéléra, avec le développement des premières méthodes de synthèse de correcteurs au cours de la décennie 1940-1950, puis dès 1960, avec l'explosion de l'informatique.

Exemples :

Bras articulé pour inspection visuelle et recherche de fuite pour le Tokamak d'Iter.



Articulated Inspection Arm

**AIA**  
 élancement : 8m  
 charge en bout : 10 kg  
 Vide et température  
 (120°C)

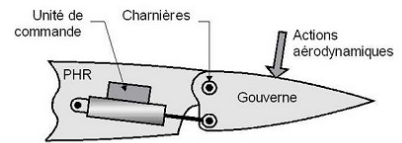
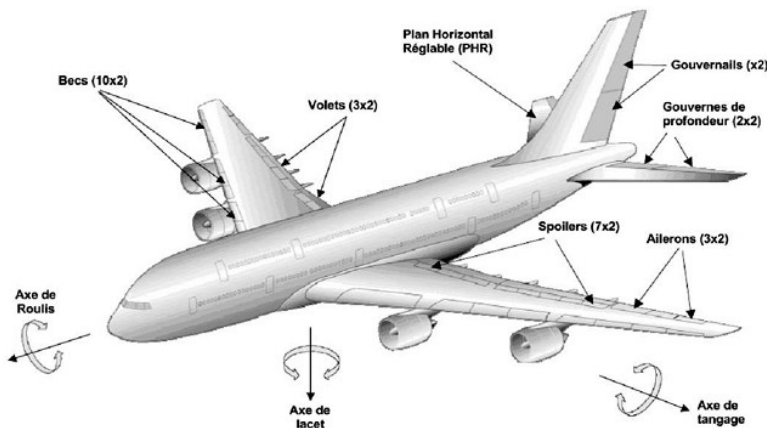
*Tâche dangereuse  
 nécessitant précision et  
 fiabilité*

CAPSULEUSE AUTOMATIQUE LINEAIRE : couvercle à vis (Twist-off)



*Tâche répétitive, Cadence  
 élevée*

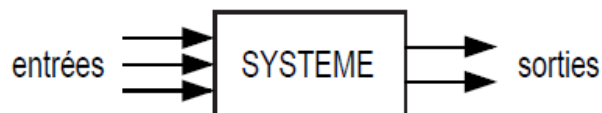
## Commandes de vol primaires de l'Airbus A380



*Précision, Fiabilité*

## 2. Notion de Système

Un **système** est un ensemble d'éléments interconnectés pour accomplir une tâche prédéfinie. Il est affecté par une (ou plusieurs) variable(s) : les entrées du système. Le résultat de l'action des entrées est la réponse du système caractérisée par l'évolution d'une ou plusieurs variables : les sorties.



Les entrées affectant un système peuvent être de différentes natures :

- la commande  $e(t)$  : elle a pour but d'exercer une action entraînant le fonctionnement souhaité du système ;
- la perturbation  $d(t)$  : il s'agit d'une entrée particulière (car elle est indépendante de notre décision) qui trouble le fonctionnement désiré du système.

Un **système automatisé** est un objet technique qui effectue un travail de façon autonome.

Il est composé de :

- la partie commande (chaîne d'information) qui donne les ordres et reçoit les informations de l'extérieur ou de la partie opérative. Elle peut se présenter sous 3 manières différentes : un boîtier de commande, un microprocesseur (cerveau électronique), ou un ordinateur
- la partie opérative (chaîne d'énergie) qui effectue le travail. Autrement dit, c'est la machine. C'est la partie qui reçoit les ordres de la partie commande et qui les exécute. Elle comporte les capteurs et les actionneurs.
- L'interface : elle permet de traduire le langage de la commande en langage "machine" et inversement.

**L'automatique** est une science qui traite de la modélisation, de l'analyse, de l'identification et de la commande des systèmes dynamiques. L'automatique permet de contrôler un système en respectant un cahier des charges (rapidité, dépassement, stabilité...).

Les objets que l'automatique permet de concevoir pour procéder à l'automatisation d'un système (automates, régulateurs, etc.) s'appellent les **automatismes** ou les organes de contrôle-commande d'un système piloté.

## 3. Systèmes asservis

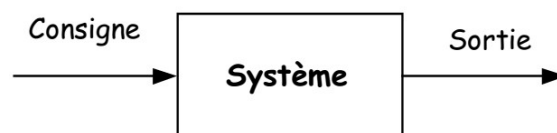
### 3.1. Commande d'un système en chaîne ouverte

Un système en boucle ouverte est un système qui ne comporte pas de contre-réaction entre la sortie et l'entrée. Classiquement, il est composé du processus physique, d'un capteur pour en mesurer la sortie et d'un actionneur pour agir sur la grandeur d'entrée du processus.

Cette solution est envisageable dans le cas où le système est parfaitement connu (ce qui est théoriquement impossible) et dans le cas où l'obtention d'une mesure de la sortie n'est pas économiquement possible. L'exemple typique est celui de la machine à laver (le linge ou bien la vaisselle) fonctionnant sur la base de cycles pré-programmés ne possédant pas d'informations quant à la mesure du degré de saleté (du linge ou bien de la vaisselle). Si une quelconque perturbation l'affecte ou si le système n'est pas parfaitement connu (poids ou type du linge, quantité de vaisselle ou qualité de l'eau variable), le résultat escompté peut varier sensiblement...

On peut représenter un système en boucle ouverte par le schéma de principe suivant :

Un système non perturbé, bien conçu peut donner entière satisfaction, la sortie obtenue étant conforme à la sortie souhaitée, à partir d'une consigne donnée.

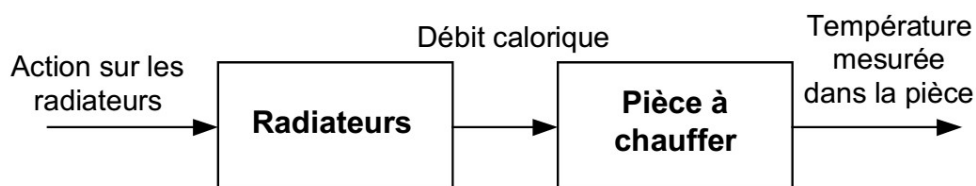


Exemples :

1. **Direction assistée de véhicule automobile** : elle comprend, le volant, la transmission de mouvement (mécanique), l'assistance (hydraulique ou électrique), les roues. Il s'agit bien d'un système à amplification de puissance, la puissance de commande, est amplifiée par l'assistance hydraulique pour obtenir la puissance de sortie.



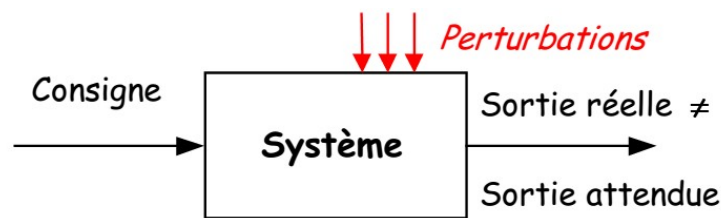
2. **Commande de la température d'une salle** :



Les deux exemples précédents sont dits des systèmes en **boucle ouverte**, où chaîne ouverte. Il n'y a pas de retour d'information de la grandeur de sortie.

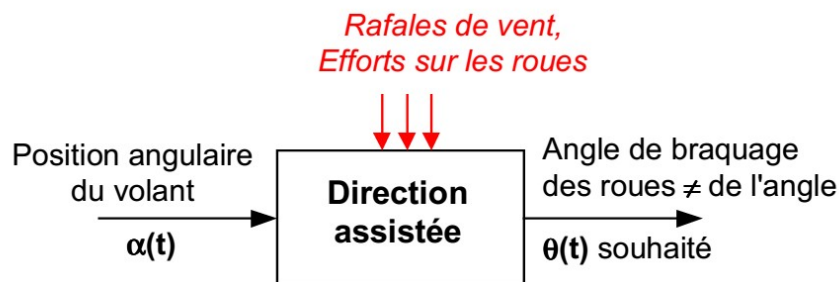
### 3.2. Notion de perturbations

Cependant lorsqu'une perturbation extérieure intervient sur le système, la valeur obtenue en sortie peut être très différente de la valeur souhaitée.

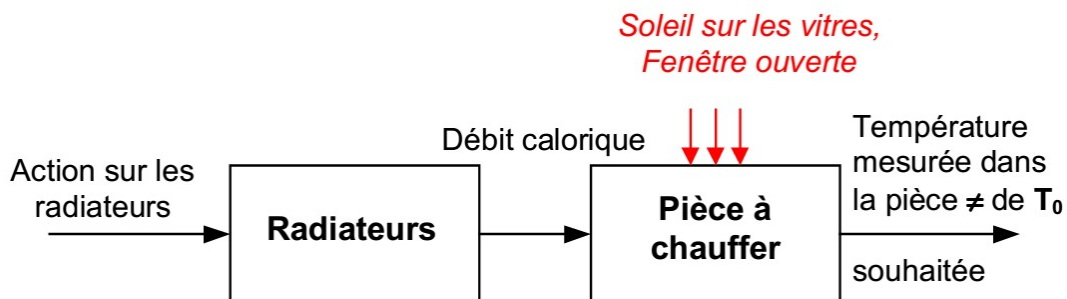


**Exemples :**

1. **Direction assistée de véhicule automobile** : lors de rafales de vent ou d'efforts intempestifs sur les roues, l'angle de braquage souhaité ne sera pas obtenu.



2. **Commande de la température d'une salle** : s'il y a apparition du soleil sur les vitres ou si une fenêtre s'ouvre, la température atteinte ne sera pas celle désirée ( $e = T_0 - T$ ).



Dans ces deux exemples, on comprend facilement la nécessité d'une commande qui puisse corriger cet écart, pour automatiser le système.

**Remarque** : dans l'exemple de la direction assistée, l'élément correcteur est l'homme, c'est lui qui réalise l'asservissement du système en corrigeant l'angle de braquage des roues.

En résumé, la BO (boucle ouverte) possède les inconvénients suivants :

- On ne peut commander/asservir/réguler des systèmes instables,
- Les perturbations ont des effets indésirables non compensés,
- Il est difficile d'obtenir une sortie possédant la valeur souhaitée avec précision et rapidité.

Ces problèmes vont être résolus (ou sensiblement améliorés) par l'introduction de la notion de boucle fermée (BF).

### 3.3. Solution face aux perturbations : le bouclage

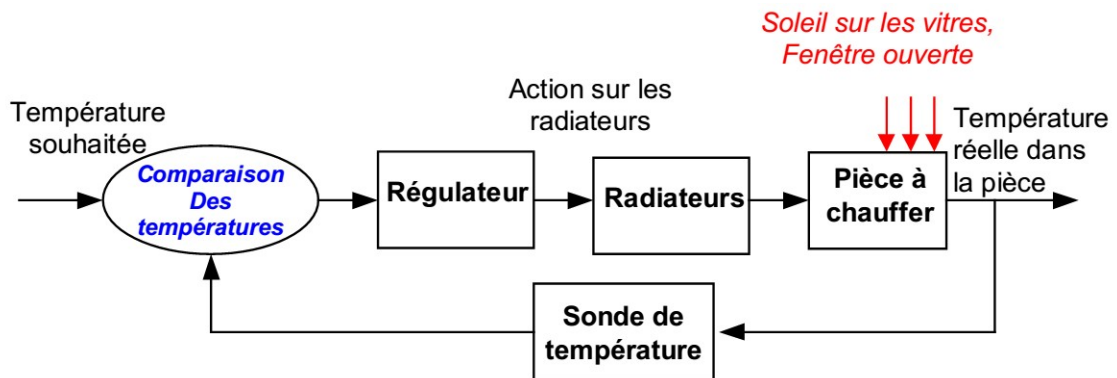
Afin d'automatiser le système (supprimer l'action humaine) on introduit une boucle de retour (ou **rétroaction**). Le système est alors appelé système à retour ou système bouclé.

- La boucle de retour, constituée de capteurs, permet d'évaluer la situation à l'instant  $t$  et fournit un état de la sortie à la partie commande.

- Cet état de la sortie est analysé et comparé à celui de la sortie attendue (liée à la consigne).
- La partie commande dispose alors des éléments pour élaborer un signal qui permet de commander la partie opérative afin de corriger l'écart observé.

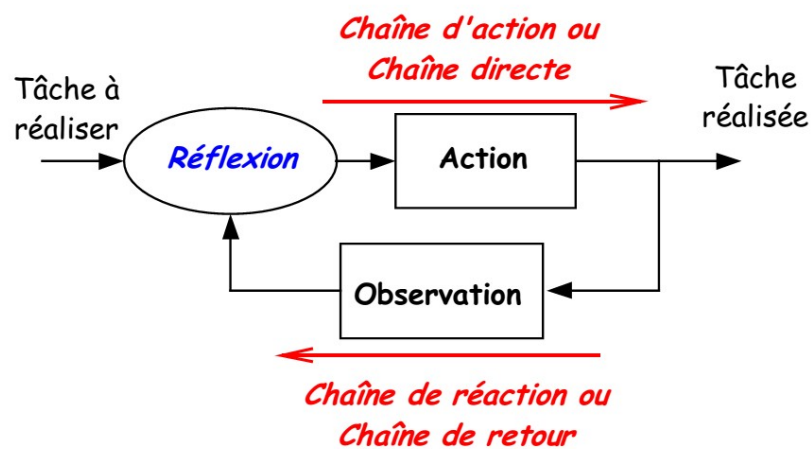
**Exemple : régulation de température d'une salle**

La température souhaitée est la consigne (fixée par un thermostat) est comparée à la valeur mesurée par la sonde de température (thermocouple).



Le régulateur déclenche alors une action correctrice, dont le sens et l'intensité dépendent de la valeur et du signe de l'écart entre la valeur souhaitée et la température de la pièce.

**Conclusion** : le schéma ci-dessous synthétise la structure d'un système automatisé bouclé.



On notera sur ce schéma la présence d'un organe chargé d'effectuer la comparaison des signaux d'entrée (réflexion encore appelée référence ou consigne) avec la mesure. En réalité (dans la pratique), on ne compare pas directement la consigne à la mesure mais plutôt des tensions représentant ces deux grandeurs.

Avec la boucle fermée on introduit la notion **d'asservissement**.

### 3.4. Systèmes automatisés asservis

Pour de tels systèmes une mesure de la sortie est réalisée en permanence et sa valeur comparée à l'entrée (sortie souhaitée) puis corrigée. Ces systèmes permettent d'obtenir toutes les caractéristiques nécessaires aujourd'hui dans beaucoup de systèmes pluri-techniques [**Rapidité, Précision, Stabilité**].

Les asservissements sont classés en deux familles : les systèmes **régulateurs** et les systèmes

asservis **suiveurs**.

- **Systèmes régulateurs** : la consigne d'entrée est fixe, ils sont destinés à assurer une sortie constante.

Exemple : **Régulation de température**

- **Systèmes asservis suiveurs** ou en poursuite d'une loi de référence : la consigne d'entrée varie constamment et l'objectif est d'ajuster en permanence la sortie au signal d'entrée.

Exemple : **Caméra mobile montée sur un chariot appelé X-track**

La retransmission d'événements sportifs est un enjeu majeur pour les différentes chaînes de télévision. Pour apporter plus de dynamisme à la retransmission et pour mieux s'adapter à des épreuves se déroulant sur de grands espaces, de nouvelles solutions de caméras mobiles sont utilisées.



Le rôle de l'automaticien (chargé d'obtenir un système régulé) sera multiple :

1. Instrumenter le système : choisir les capteurs et actionneurs en fonction des besoins physiques, de coût et de performances demandées au système.
2. Déterminer les relations entrées-sorties du système, des capteurs et des actionneurs. On parlera dès lors de :
  - modéliser quand on s'attachera à déterminer la structure mathématique de ces relations.
  - identifier quand on s'intéressera à calculer les coefficients du modèle.
  - Synthétiser une loi de commande (un correcteur) afin d'obtenir un système performant : précis, rapide et stable, tout en s'affranchissant des influences néfastes des perturbations.

Le système ainsi corrigé (asservi, régulé) devra assurer deux objectifs :

- la poursuite : suivre une entrée de consigne (référence). On désire asservir la sortie à l'entrée (la sortie doit « ressembler » le plus possible à l'entrée) et ainsi assurer des performances (stabilité, rapidité, précision).
- La régulation : annuler (ou diminuer) les effets de la (ou des) perturbation(s).

Un **capteur** est un organe qui transforme une grandeur physique quelconque en une autre grandeur physique (généralement électrique) pouvant être transportée et traitée plus facilement. Par exemple, on peut trouver des capteurs de position, de vitesse, de débit, de température, de pression, de niveau, de pH, de densité, de masse, de conductivité, d'oxygène ou de gaz carbonique, de concentration, etc...

Un **actionneur** est un organe qui est capable d'apporter de l'énergie ou de la matière dans une boucle de régulation, en fonction de l'information fournie par le régulateur (ou bien le correcteur). Par exemple, un moteur électrique associé à son amplificateur de puissance représente un actionneur. Les vannes et les pompes sont d'autres actionneurs...

On se placera dans le cas idéal en faisant les approximations suivantes :

- Les actionneurs n'introduisent ni retard, ni distorsion, mais on ne doit pas oublier qu'ils ont

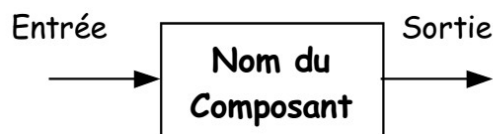
une action limitée par des saturations.

- Le capteur est lui aussi supposé excellent. Sa précision et sa rapidité sont deux critères importants. On tiendra compte en régulation, des bruits (perturbations de sortie) qu'il est susceptible d'introduire dans la chaîne de régulation.

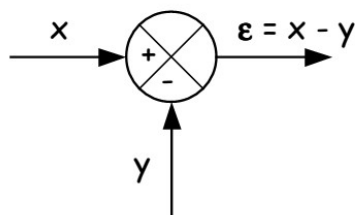
### 3.5. Représentation d'un système asservi

Un système est généralement représenté par un schéma fonctionnel sous forme de rectangle. Les signaux d'entrée appliqués à ce rectangle sont caractérisés par des flèches entrantes et annotées. L'action de ces entrées produit de cette manière (causale) des effets, mesurés par des signaux de sortie, représentés par des flèches sortantes et annotées.

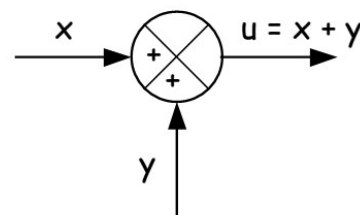
**# Le bloc fonctionnel** : il représente un composant ou une fonction mathématique, il met en relation une information d'entrée et une information de sortie. Le nom du bloc est généralement le nom du composant (ou de l'opérateur mathématique)



**# Le point de comparaison / sommation** : il réalise les opérations d'addition ou de soustraction.

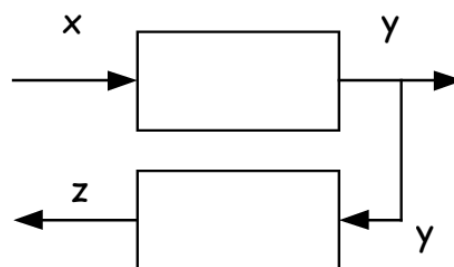


Compateur



Sommateur

**# Liaisons et point jonction** : les liaisons sont orientées, les flèches sont obligatoires. A une jonction, la variable de sortie d'un bloc est réutilisée à l'entrée d'un autre bloc.



A partir des éléments graphiques définis précédemment on peut établir le diagramme fonctionnel global d'un système bouclé. Pour un système donné, il s'agit d'une modélisation qui permettra l'étude du comportement de ce système, et la conception de la commande afin de remplir la fonction imposée par le cahier des charges.

**Chaîne d'action** : constituée d'un préamplificateur, d'un amplificateur, d'un ou plusieurs actionneurs, et du système dynamique. L'actionneur est la partie "musclée" du système asservi.

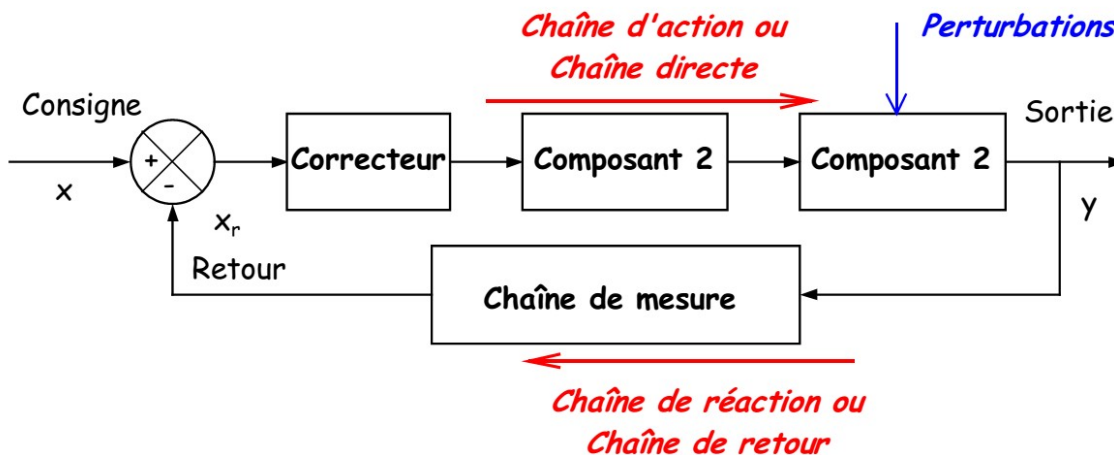
- Grande sensibilité (du fait de l'amplification).
- Manque de fiabilité (les perturbations entraînent des modifications de la sortie).



**Chaîne de réaction :** constituée d'un capteur, qui convertit la grandeur de sortie en une grandeur homogène à la consigne d'entrée.

- Cette chaîne doit être fidèle, en général  $x_r$  est directement proportionnel à  $y$ .

**Comparateur :** effectue la différence  $\varepsilon$  entre  $x$  et  $x_r$ . On associe souvent un correcteur au comparateur. Il génère l'ordre de commande, c'est l'organe "intelligent". En pratique c'est un dispositif électronique (analogique) ou un calculateur numérique.

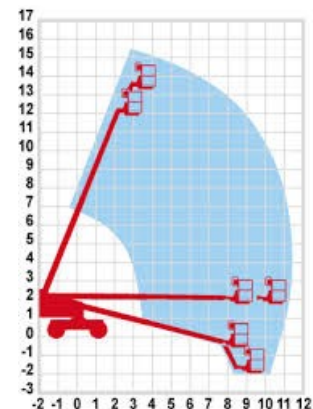


**Remarques :**

- Lorsque la sortie est homogène à la grandeur d'entrée. On peut donc boucler le système simplement ; le système est dit à retour unitaire.
- Les perturbations (qui agissent principalement sur la chaîne d'action), seront introduites à l'aide d'un sommateur.

### 3.6. Exemple de schéma-blocs fonctionnel d'un système

**Nacelle à flèche télescopique :** les nacelles sont utilisées pour effectuer des travaux en hauteur et éviter l'utilisation d'échafaudages. Ces systèmes sont autopropulsés et permettent donc à l'opérateur placé dans le panier de commander non seulement la hauteur, le pivotement, mais également de piloter la translation de la nacelle pour atteindre les zones de travail.



L'étude proposée porte sur une nacelle de type flèche télescopique, et plus précisément sur le dispositif de compensation par asservissement de niveau : il s'agit donc d'un **asservissement de position**.

Pour maintenir le panier horizontal lors du relevage, on utilise comme actionneur un vérin hydraulique. Sa commande est asservie. Ceci permet le maintien horizontal du panier lors du relevage mais également si la nacelle se déplace sur un sol un peu accidenté. Lors du transport de la nacelle sur une plate-forme, on peut incliner le panier pour réduire l'encombrement. Pour effectuer certains travaux, l'opérateur peut souhaiter incliner le panier.

**Composants de l'asservissement :**

**Chaîne d'action :**

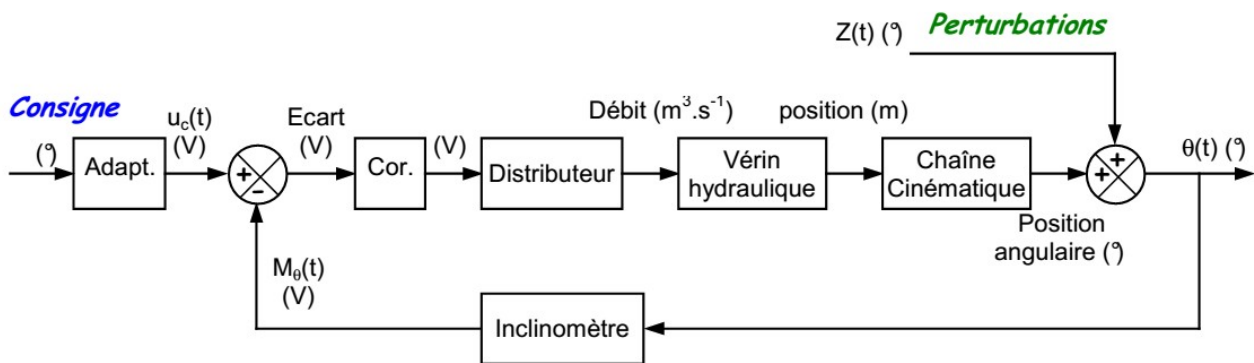
- Un **distributeur hydraulique** délivre un débit pour alimenter le vérin hydraulique.
- Un **vérin hydraulique** agit sur la position angulaire du panier (y compris l'opérateur et le matériel embarqué), par l'intermédiaire d'une chaîne cinématique.

**Partie commande :**

- Un **inclinomètre** (Chaîne de réaction) fournit une tension  $M\theta(t)$  proportionnelle à la position angulaire  $\theta(t)$  du panier.
- Un **comparateur** qui élabore l'écart :  $\varepsilon = \theta_c(t) - \theta(t)$
- Un **correcteur** qui adapte le signal d'écart afin de fournir la tension de commande du distributeur hydraulique.

Enfin la **consigne** angulaire  $\theta_c(t)$  est donnée en degrés, elle est convertie en tension  $u_c(t)$  pour pouvoir être comparée à l'information fournie par l'inclinomètre. Les perturbations (rafale de vent, accident de terrain) sont modélisées par une modification de la position angulaire du panier, à l'aide d'un sommateur.

Le **schéma-blocs** associé au dispositif de compensation est le suivant :



## 4. Classifications des systèmes

On sait qu'à chaque chaîne fonctionnelle d'un système correspond une chaîne d'information et une chaîne d'énergie. L'automatique s'intéresse à la chaîne d'information.

Les systèmes automatisés vont alors être classés en fonction de la nature des informations de commande ou de mesure, et également en fonction de la nature du traitement de ces informations.

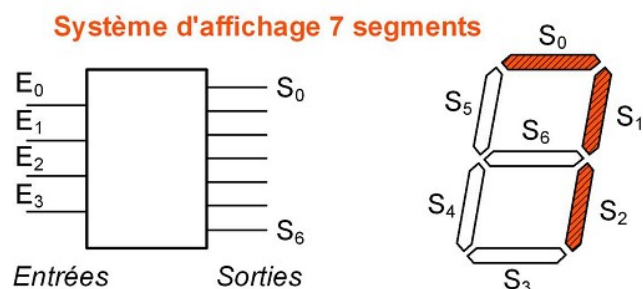
### 4.1. Systèmes automatisés à logique combinatoire

Pour un tel système les sorties dépendent exclusivement d'une combinaison des entrées, sans prendre en compte "l'histoire" du système. A un état d'entrées, correspond un et un seul état en sortie. Aucune mémoire des états précédents des entrées et des sorties n'est conservée.

L'information logique est traitée de manière instantanée. Les grandeurs y sont manipulées sous formes d'états binaires, ce qui justifie l'utilisation de l'algèbre de BOOLE, et des notions liées au codage de l'information.

**Exemple : Afficheur sept segments**

L'information, chiffre compris entre 0 et 9, est fournie par un nombre binaire sur 4 bits, soit



pour notre afficheur quatre entrées (E0, E1, E2 et E3) et en sortie les segments seront allumés ou éteints. Pour chaque combinaison des quatre entrées, doit correspondre un et un seul état des sorties, correspondant à l'affichage correct de l'information.

**Exemple : Multiplexage**

Les **multiplexeurs** permettent de **regrouper** en série sur une voie les signaux venant de  $n$  voies en parallèles. Les **démultiplexeurs** permettent d'**aiguiller** vers  $n$  voies en parallèle les signaux venant en série d'une voie.

**Les multiplexeurs** Les multiplexeurs possèdent :

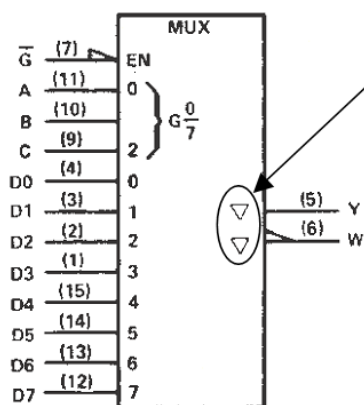
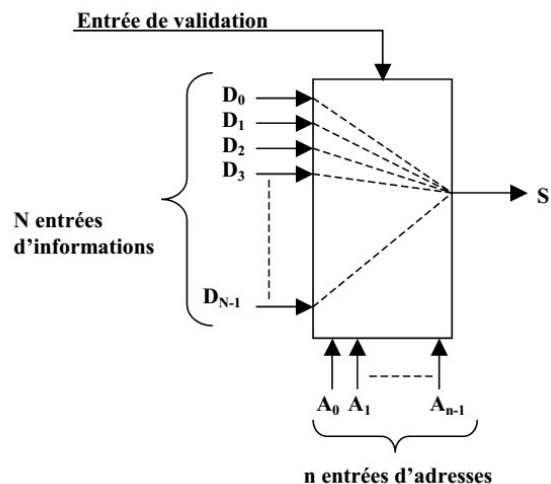
- $N=2^n$  entrées d'information,
- $n$  entrées d'adresses,
- une sortie S,
- une entrée de validation.

**L'entrée de validation** : elle permet d'autoriser ou non le fonctionnement du multiplexeur. Lorsque le fonctionnement du multiplexeur n'est pas autorisé alors la sortie S est fixé à un niveau logique fixe ou à un état haute impédance (dans le cas de circuits à sorties à trois états).

**Les entrées d'adresses** : elles permettent de sélectionner l'entrée d'information qui doit être transmise à la sortie. Pour sélectionner l'entrée d'information **D4** il faudra imposer le nombre décimal 4 codé en binaire sur les entrées d'adresses soit **0100**.

L'étude de ces composants se fait par une exploitation de la documentation constructeur, du symbole et de la table de vérité.

**Exemple du circuit 74LS251 : multiplexeur 8 vers 1**



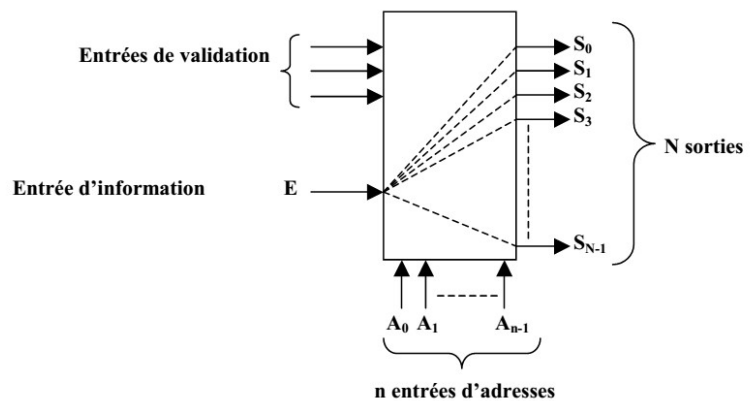
Symboles représentant une sortie à trois états (NL0, NL1 et Z état haute impédance)

INPUTS		ENABLE G	OUTPUTS	
SELECT	C B A		Y	W
X	X X	H	Z	Z
L	L L	L	D0	D0
L	L H	L	D1	D1
L	H L	L	D2	D2
L	H H	L	D3	D3
H	L L	L	D4	D4
H	L H	L	D5	D5
H	H L	L	D6	D6
H	H H	L	D7	D7

H = high logic level, L = low logic level  
 X = irrelevant, Z = high impedance (off)  
 D0, D1 . . . D7 = the level of the respective D input

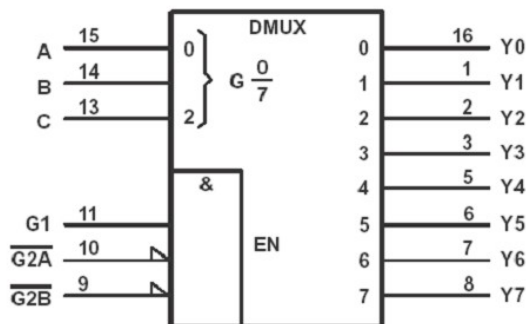
**Exemple : Les démultiplexeurs**

On sélectionne une sortie par les entrées d'adresses. Pour sélectionner la sortie **S4** il faudra imposer le nombre décimal 4 codé en binaire sur les entrées d'adresses soit **0100**.



L'étude de ces composants se fait par une exploitation de la documentation constructeur, du symbole et de la table de vérité.

**Exemple du 74LS238 : démultiplexeur 3 vers 8**



ENABLE INPUTS			SELECT INPUTS			OUTPUTS							
G1	G2A	G2B	C	B	A	Y0	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7
X	H	X	X	X	X	L	L	L	L	L	L	L	L
X	X	H	X	X	X	L	L	L	L	L	L	L	L
L	X	X	X	X	X	L	L	L	L	L	L	L	L
H	L	L	L	L	L	H	L	L	L	L	L	L	L
H	L	L	L	L	H	L	H	L	L	L	L	L	L
H	L	L	L	H	L	L	L	H	L	L	L	L	L
H	L	L	L	H	H	L	L	L	H	L	L	L	L
H	L	L	H	L	H	L	L	L	L	L	H	L	L
H	L	L	H	H	L	L	L	L	L	L	L	H	L
H	L	L	H	H	H	L	L	L	L	L	L	L	H

Les entrées **A, B, C** sont les entrées d'adresses **A** étant le bit de poids faible et **C** étant le bit de poids fort.

Les sorties sont actives sur niveau haut (si la sortie est sélectionnée on a un niveau haut, sinon elle est au niveau bas).

Pour valider le circuit il faut que l'entrée  $G1=1$  ET  $\overline{G2A}=0$  ET  $\overline{G2B}=0$

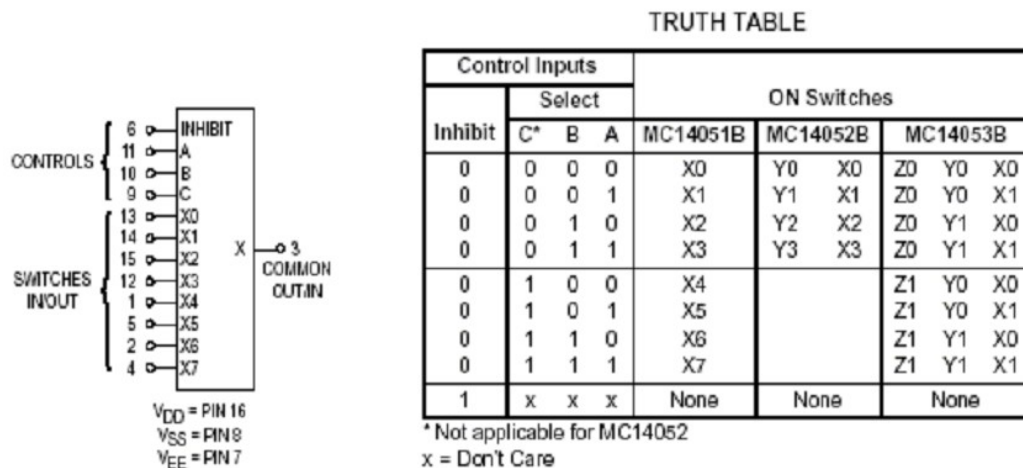
soit  $EN = G1 \cdot \overline{G2A} \cdot \overline{G2B}$

**Exemple : Les multiplexeurs – démultiplexeurs analogiques**

Ce type de composant permet de transmettre plusieurs signaux analogiques sur un même fil (multiplexeur analogique).

Le fonctionnement est réversible, c'est à dire que la sortie peut jouer le rôle de l'entrée et les entrées jouer le rôle de la sortie (fonctionnement en démultiplexeurs).

**Exemple de circuit MC14501B : multiplexeur démultiplexeur analogique 8 voies**



Lorsque la liaison est réalisée entre une entrée et la sortie, le modèle équivalent est une résistance d'une centaine d'ohms (souvent appelée  $R_{DSON}$ , ron, ...). Sa valeur exacte se trouve dans la documentation constructeur du composant.

## 4.2. Systèmes automatisés à logique séquentielle

Qualifié de système à mémoire généralisée, les sorties du système sont élaborées à partir d'un ensemble de signaux logiques, mais dépendent aussi de la chronologie des événements logiques. "L'histoire" du système est prise en compte.

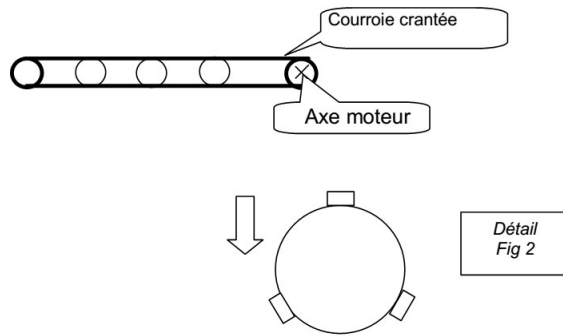
En effet les états précédents des entrées et des sorties sont mémorisés, et influent sur l'évolution du système. A une combinaison d'entrées, peuvent correspondre plusieurs combinaisons des sorties.

### Exemple : Panneau d'affichage publicitaire Trivision



L'affichage fait l'objet d'une commande séquentielle.

Il s'agit de présenter alternativement 3 messages publicitaires sur un même panneau par un système mécanique.

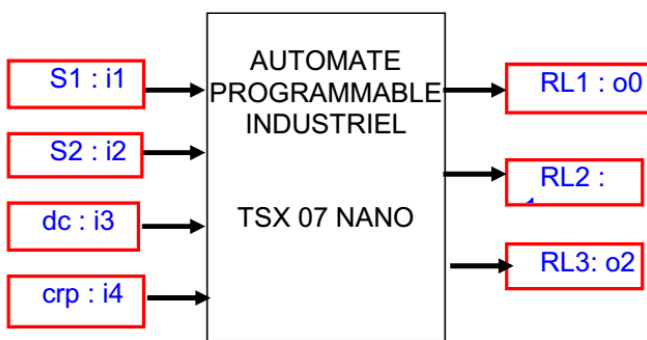


**Commande :**

Elle est assurée par l'intermédiaire d'un automate programmable. Ce dernier assure :

- La gestion du temps d'affichage.
- La prise en compte de l'éclairage.
- La commande des moteurs par l'intermédiaire de relais statiques.

Affectation des entrées et des sorties de l'automate programmable



Entrées :  
 S1 : Sélecteur pour choix trivision (Scy1)  
 S2 : Sélecteur pour choix duovision (Scy2)  
 dc : détecteur crépusculaire (dc)  
 crp : capteur rotation prisme (crp)  
 crp = 1 : prisme en position  
 Fig.1 ci-dessus  
 crp = 0 : prisme non positionné

Sorties :  
 RL1 : Rotation prisme sens + ( horaire ) (KRL1)  
 RL2 : Rotation prisme sens - ( trigo ) (KRL2)  
 RL3 : Eclairage lampe (KRL3)

**Grafcet de fonctionnement :**

