

1- Introduction à l'automatique

L'automatique est généralement définie comme la science qui traite des ensembles qui se suffisent à eux-mêmes et où l'intervention humaine est limitée à l'alimentation en énergie et en matière première. L'objectif de l'automatique est de remplacer l'homme dans la plupart des tâches (tâches répétitives, pénibles, dangereuses, trop précises, trop rapides) qu'il réalise dans tous les domaines sans intervention humaine.

Les systèmes automatiques permettent donc :

- ✓ De réaliser des opérations trop complexes ou délicates ne pouvant être confiés à l'homme,
- ✓ De se substituer à l'opérateur pour des tâches répétitives,
- ✓ D'accroître la précision,
- ✓ D'améliorer la stabilité d'un système et sa rapidité.

De tels dispositifs se rencontrent fréquemment dans la vie courante, depuis les mécanismes biologiques du corps humain jusqu'aux usines entièrement automatisées. Une telle science englobe un grand nombre de disciplines et, par conséquent, un automaticien devrait être à la fois :

- ✓ Mathématicien
- ✓ Electricien
- ✓ Mécanicien
- ✓ Economiste

1.1 - Exemple

Nous sommes entourés d'un grand nombre de systèmes automatiques, machine à laver, ascenseur, distributeur de boisson, robot, suivi de trajectoire d'un missile.

1.2 - Classification

Le domaine des applications de l'automatique est très vaste et varié, mais l'observation de l'industrie contemporaine conduit à une certaine classification qui se résume en deux grandes familles selon les données que traitent ces systèmes :

- **Les automatismes séquentiels**
- **Les asservissements**

Ces deux parties de l'automatique sont nettement différentes, elles s'appuient sur des notions théoriques qui n'ont que de lointains rapports entre elles et les techniques qui permettent de les réaliser sont, aussi, très différentes.

1.2.a - Les automatismes séquentiels

C'est la branche de l'automatique qui organise le déroulement des différentes opérations relatives au fonctionnement d'un ensemble complexe.

Un automate à séquence impose l'ordre dans lequel les opérations se déroulent, s'assure que chaque opération est bien terminée avant d'aborder la suivante, décide de la marche à suivre en cas d'incidents. Bien entendu, un automate séquentiel peut avoir à contrôler des asservissements et des régulateurs parmi les ensembles qu'il gère. Ce type d'automatisme est utilisé par exemple dans la mise en route et l'arrêt d'installations complexes (centrales automatiques), sur les machines outils et, en général, dans presque toutes unités de production automatisées.

Il faut noter également que toutes les séquences d'alarme et de sécurité industrielle font partie des applications de ce type d'automatisme.

Les automatismes sont des systèmes logiques qui ne traitent que des données logiques (0/1, vrai/faux, marche/arrêt,...). Ils utilisent les moyens de commutation offerts par l'électronique (circuit logique) et la mécanique (logique pneumatique). Le calcul de ces automatismes impose de connaître l'algèbre de Boole et la théorie des circuits séquentiels. Ils sont classés en 2 branches :

- ❖ Systèmes combinatoires : les sorties du système ne dépendent que des variables d'entrées.
- ❖ Systèmes séquentiels : les sorties dépendent bien sûr de l'évolution des entrées mais aussi de l'état précédent des sorties.

Exemple : Machine à laver, manipulateur pneumatique, ascenseur, distributeur de boissons.

1.2.b - Les asservissements

Un système asservi est un système qui prend en compte, durant son fonctionnement, l'évolution de ses sorties pour les modifier et les maintenir conforme à une consigne.

Cette branche de l'automatique se décompose en deux autres sous branches (séparées artificiellement par l'usage) :

- ✓ **Régulation** : maintenir une variable déterminée, constante et égale à une valeur, dite de consigne, sans intervention humaine. Exemple : Régulation de température d'une pièce.
- ✓ **Systèmes asservis** : faire varier une grandeur déterminée suivant une loi imposée par un élément de comparaison. Exemple : Régulation de la vitesse d'un moteur, Suivi de trajectoire d'un missile.

L'asservissement est essentiellement analogique et utilise la partie analogique des trois moyens de base dont on dispose : mécanique, électrotechnique et électronique. La théorie des asservissements nécessite une bonne base mathématique classique.

1.3 - Systèmes continus et invariants

- ✓ **Système continu** : un système est dit continu lorsque les variations des grandeurs physiques le caractérisant sont des fonctions du type $f(t)$, avec t une variable continue, le temps en général. On oppose les systèmes continus aux systèmes discrets (ou échantillonnés), par exemple les systèmes informatiques.
- ✓ **Système invariant** : On dit qu'un système est invariant lorsque les caractéristiques de comportement ne se modifient pas avec le temps.

1.4 - Evolution de l'automatique

Ces dernières années, l'automatique s'est considérablement modernisée, surtout depuis l'avènement des calculateurs numériques. Les systèmes automatiques conduits par calculateurs assurent la quasi-totalité des tâches :

- ✓ ils collectent et traitent les informations issues des capteurs qui fournissent l'ensemble des variables d'entrée.
- ✓ ces variables d'entrée constituent les données sur lesquelles des calculs numériques seront effectués. Ils correspondent à la résolution numérique de systèmes d'équations qui constituent le "modèle mathématique".
- ✓ le résultat de ce traitement fourni en binaire est converti en variables continues et est injecté dans le processus, afin de modifier son évolution dans un sens désiré.

En plus de ces tâches qui sont classiques en automatique, le calculateur joue un rôle optimalisateur.

C'est-à-dire qu'il exécute le travail à faire aux meilleures conditions économiques en minimisant les déchets, en tenant compte du carnet de commande, etc. Cet aspect, lui, est nouveau. Ce genre de problème était traité séparément. Ce procédé permet de tenir compte d'un nombre considérable de variables, donc de traiter des problèmes jusqu'alors impossibles. En plus, il fait intervenir directement les variables économiques au niveau de chaque organe (moteur, pompe, etc ...). Or, jusqu'à présent, les variables économiques n'intervenaient que globalement. Il permet donc de traiter ce problème de façon beaucoup plus rationnelle.

Les systèmes automatiques conduits par calculateurs nécessitent une bonne connaissance de la programmation en langage machine, de fortes connaissances mathématiques (pour élaborer le modèle) et surtout une connaissance parfaite du

processus à réguler, ce qui est le plus délicat. Ceci nécessite encore de bonnes connaissances en théorie de l'information, en statistique et en recherche opérationnelle.

2 - Boucle de régulation

2.1 - Notion d'asservissement

L'objectif d'un système automatisé est de remplacer l'homme dans une tâche donnée. Nous allons, pour établir la structure d'un système automatisé, commencer par étudier le fonctionnement d'un système dans lequel l'homme est la " partie commande".

Exemple : conducteur au volant d'un véhicule

Le conducteur doit suivre la route. Pour cela, Il observe la route et son environnement et évalue la distance qui sépare son véhicule du bord de la route. Il détermine, en fonction du contexte, l'angle qu'il doit donner au volant pour suivre la route. Il agit sur le volant (donc sur le système) ; puis de nouveau, il recommence son observation pendant toute la durée du déplacement. Si un coup de vent dévie le véhicule, après avoir observé et mesuré l'écart, il agit pour s'opposer à cette perturbation.

Si l'on veut qu'un asservissement remplace l'homme dans diverses tâches, il devra avoir un comportement et des organes analogues à ceux d'un être humain. C'est-à-dire qu'il devra être capable d'**apprécier**, de **comparer** et d'**agir**.

Exemple : ouverture de porte pour accès à une maison.

Un autre exemple d'asservissement très simple est celui d'un homme qui veut entrer dans une maison : à chaque instant, ses yeux "mesurent" l'écart qui existe entre sa position et la porte. Son cerveau commande alors aux jambes d'agir, en sorte que cet écart diminue, puis s'annule.

Les yeux jouent alors le rôle d'organes de **mesure** (ou de capteurs), le cerveau celui de **comparateur** et les jambes celui d'**organe de puissance**.

Tout asservissement comportera ces trois catégories d'éléments qui remplissent les 3 grandes fonctions nécessaires à sa bonne marche (fig. 1-1) :

- ✓ **Mesure** (ou observation)
- ✓ Comparaison entre le but à atteindre et la position actuelle (**Réflexion**)
- ✓ **Action** de puissance

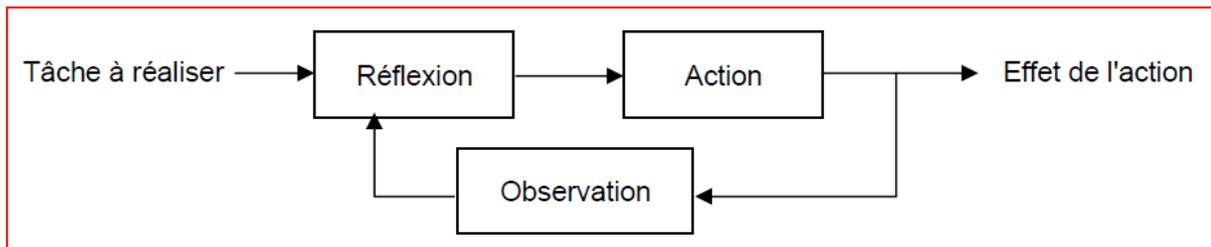


Fig. 1-1 : Concept général d'un asservissement

2.2 - Systèmes bouclés et non bouclés

2.2.a - Exemple 1 : Tir au canon

Pour mieux saisir la notion de système bouclé, prenons un exemple avec 2 cas. Dans le premier, nous considérons un système non bouclé et nous mettrons en évidence ses faiblesses. Dans le second, nous montrerons les avantages qu'apporte le **bouclage**.

Premier cas : tir au canon sur une cible.

On considère une cible à détruire et un canon. Pour atteindre le but que l'on s'est proposé, on règle l'angle de tir du canon et la charge de poudre de l'obus en fonction des coordonnées de la cible et d'autres paramètres connus à l'instant du tir. Une fois l'obus parti, si ces paramètres extérieurs viennent à changer, par exemple si la cible se déplace, on ne peut plus agir sur sa direction : l'obus est abandonné à lui-même.

Deuxième cas : tir au canon sur une cible avec une fusée téléguidée et un radar.

Considérons la même cible et une fusée téléguidée. Dans ce cas, même si la cible se déplace ou un vent latéral fait dévier la fusée de sa trajectoire initiale, elle atteindra quand même son but. En effet, à chaque instant, un radar donnera les positions respectives de la fusée et de la cible. Il suffira de les comparer pour en déduire l'erreur de trajectoire et agir sur les gouvernes de la fusée pour rectifier cette erreur. Dans ce cas, le système n'est plus abandonné à lui-même car il comporte une boucle de retour qui est constituée par le radar, qui "mesure" la position de la fusée et qui en informe l'opérateur, et par une télétransmission qui permet de modifier la trajectoire par action sur les gouvernes.

La boucle de retour apporte donc, au prix d'une complication certaine, un gain de précision énorme.

2.2.b - Exemple 2 : Asservissement de vitesse d'une voiture

Supposons que l'on veuille maintenir constante la vitesse (V) d'une voiture. A la valeur (V) de la vitesse correspond une valeur (e) de la course de l'accélérateur. Il

suffirait donc, en principe, de maintenir (e) constant pour que (V) le soit. Chacun sait que la réalité est différente.

En effet, le vent, les variations de pente et le mauvais état de la route modifient (V). Ces paramètres extérieurs qui influent sur la vitesse sont appelés **grandeurs perturbatrices** ou **perturbations**. Si elles n'existaient pas, la boucle de régulation serait inutile.

Pour que la vitesse reste constante, il faut utiliser un tachymètre qui mesure la vitesse réelle. Le chauffeur compare à tout instant cette vitesse réelle et la vitesse prescrite; Il en déduit un écart plus ou moins grand et enfonce plus ou moins l'accélérateur en fonction de cet écart.

Si on appelle grandeur de sortie (ou sortie) la vitesse réelle et grandeur d'entrée (ou entrée) la vitesse imposée, le chauffeur et le tachymètre assurent une liaison entre l'entrée et la sortie, ils constituent donc une chaîne de retour.

On peut donner un schéma très simple pour illustrer cet exemple (fig. 1-2) :

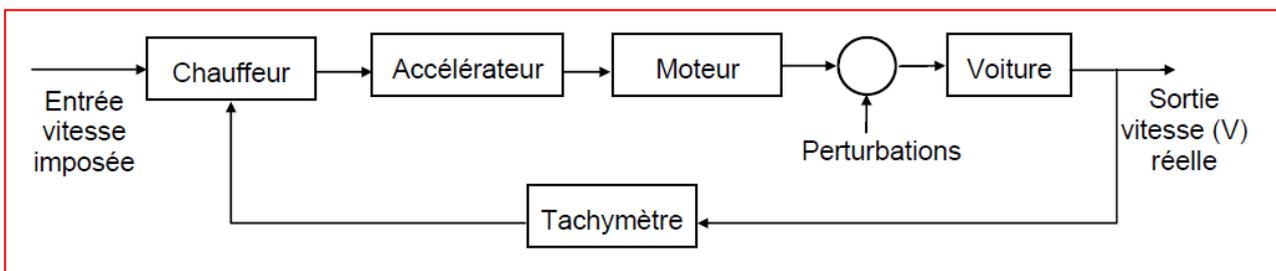


Fig. 1-2 : Exemple d'asservissement de vitesse d'un véhicule

2.3 - Définitions – Constitutions élémentaires

On peut donc définir un asservissement comme un **système bouclé ou à boucle fermée** comportant une **amplification de puissance**, une **mesure** et une **comparaison**.

A partir de ces 3 notions, on peut définir un schéma fonctionnel valable pour tous les systèmes présentant ces caractéristiques (fig. 1-3) :

- ✓ Le triangle : représente la fonction amplification de puissance.
- ✓ Le cercle : représente la fonction comparaison (qui s'effectue en faisant une différence).
- ✓ Le rectangle : représente la fonction mesure et transformation.

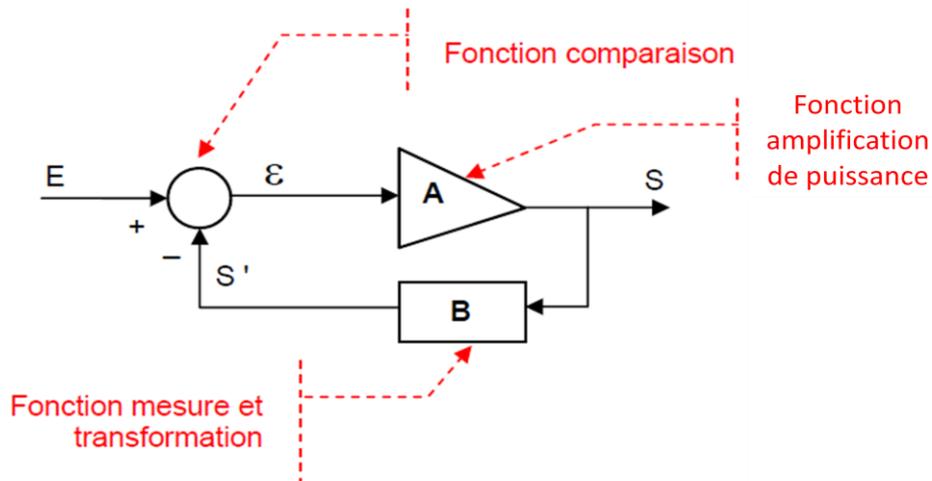


Fig. 1-3 : Schéma fonctionnel d'un asservissement

S (Grandeur de sortie) : La sortie réglée représente le phénomène physique que doit régler le système, c'est la raison d'être du système. Il peut s'agir d'une tension, d'un déplacement, d'un angle de rotation, d'un niveau, d'une vitesse, etc...

E (Grandeur d'entrée ou référence ou consigne) : La consigne, est l'entrée d'action, c'est la grandeur réglante du système. Sa nature peut être différente de celle de (S). Seule importe sa valeur numérique. Si (E) et (S) sont de natures différentes, il suffit de définir une correspondance numérique entre ces deux grandeurs. Par exemple, on dira qu'un volt à l'entrée représente 100 tours/mn.

ε (erreur ou écart entrée - sortie) : On appelle écart ou erreur, la différence entre la consigne et la sortie. Cette mesure ne peut être réalisée que sur des grandeurs comparables, on la réalisera donc en général entre la consigne et la mesure de la sortie. Elle est fournie par le comparateur et est proportionnelle à la différence $(E-S')$. Elle peut être de nature différente. Elle peut être de nature différente. Par exemple, E et S' étant des tensions, on pourra avoir ε sous forme de courant tel que $\varepsilon=(E-S')/R$ (R est une résistance).

S' (Mesure de la sortie) : Elle est fournie par la chaîne de retour, généralement après transformation. S' doit obligatoirement avoir même nature physique que E. Ce qui est évident si on veut donner un sens à la différence $(E-S')$. Un des rôles de la chaîne de retour est donc d'assurer la conversion de la mesure de S dans la grandeur physique de E.

D'une manière générale, le système comprend (fig. 1-4) :

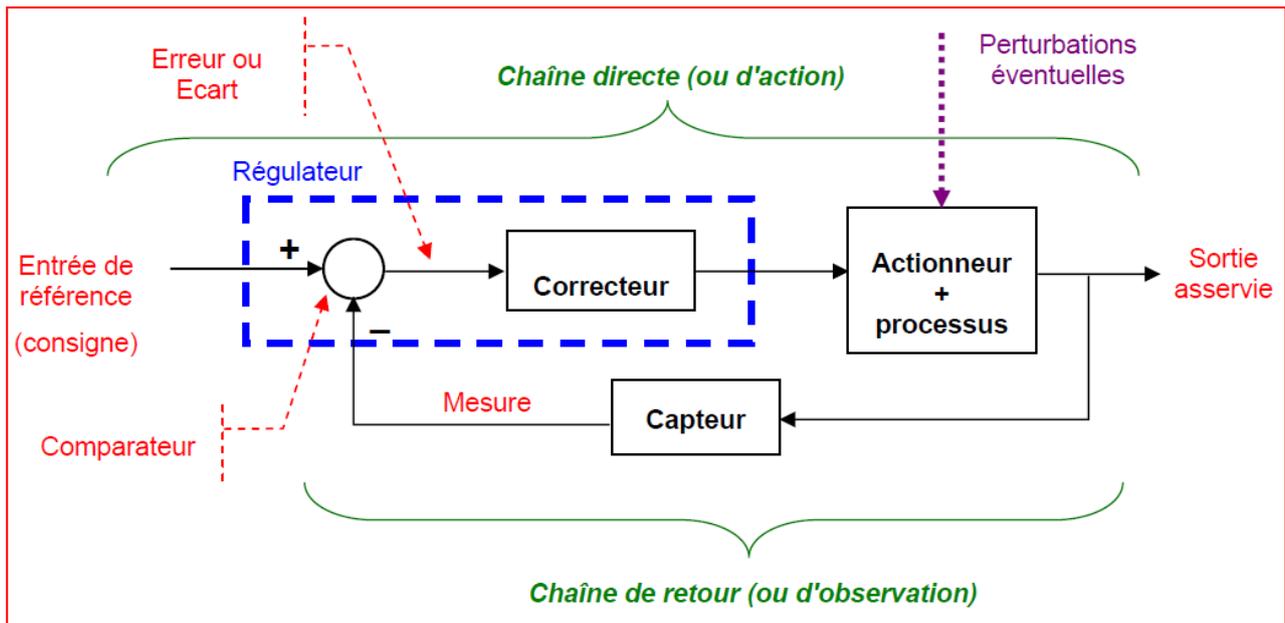


Fig. 1-4 : Organisation fonctionnelle d'un système asservi (schéma fonctionnel)

Chaîne directe ou d'action

Englobe tous les organes de puissance (nécessitant un apport extérieur d'énergie) et qui exécute le travail.

- ✓ Comporte généralement nombreux éléments, notamment des amplificateurs.
- ✓ La nature de ces éléments n'est pas spécifiée sur le schéma, il peut s'agir aussi bien d'engins électriques, mécaniques, pneumatiques, etc...

Chaîne de retour ou de réaction

- ✓ Analyse et mesure le travail effectué et transmet au comparateur une grandeur physique proportionnelle à ce travail.
- ✓ Elle comprend généralement un capteur qui donne une mesure de la grandeur S , qui est ensuite amplifiée et transformée avant d'être utilisée.

Comparateur ou détecteur d'écart

- ✓ Compare le travail effectué à celui qui était à faire et délivre un signal d'erreur proportionnel à la différence entre une grandeur de référence (E) et la grandeur physique issue de la chaîne de retour.
- ✓ Ce signal d'erreur, après amplification, agira sur les organes de puissance dans un sens tel que l'erreur tendra à s'annuler.

Régulateur

Le régulateur se compose d'un comparateur qui détermine l'écart entre la consigne et la mesure et d'un correcteur qui élabore à partir du signal d'erreur l'ordre de commande.

Actionneur

C'est l'organe d'action qui apporte l'énergie au système pour produire l'effet souhaité.

Capteur

Le capteur prélève sur le système la grandeur réglée (information physique) et la transforme en un signal compréhensible par le régulateur. La précision et la rapidité sont deux caractéristiques importantes du capteur.

Perturbation

On appelle perturbation tout phénomène physique intervenant sur le système qui modifie l'état de la sortie. Un système asservi doit pouvoir maintenir la sortie à son niveau indépendamment des perturbations.

2.4 - Régulation et systèmes asservis

Nous avons fait la distinction dans l'introduction entre régulation et asservissement. Nous pouvons maintenant préciser de façon nette cette différence :

- **Un régulateur** : maintient l'erreur ε entre l'entrée E et la sortie S nulle, *quelles que soient les perturbations*, la grandeur d'entrée E restant constante ou variant par palier. E est alors appelée consigne ou référence.
- **Un système asservi** : maintient l'erreur ε nulle ou minimale *quelles que soient les variations de E* . Généralement, E est une fonction du temps qui peut être périodique, mais qui doit toujours rester continue et finie.

Il faut remarquer que les contraintes sont plus grandes pour un système asservi que pour un régulateur, puisque aucune contrainte de vitesse de variation n'est imposée pour E .

3 - Linéarité des asservissements

3.1 - Généralités

La théorie des asservissements que nous allons étudier n'est valable que pour les systèmes linéaires. Ce qui veut dire qu'en principe les équations qui les régissent doivent être des équations différentielles à coefficients constants.

Un tel critère est pratiquement inapplicable pour définir si un système physique est linéaire ou non, car dans la majorité des cas on ne connaît pas avec suffisamment de précision les équations de ce système. Il faudra donc en plus de la nature des équations approchées, définir d'autres critères.

En fait, il est bien difficile d'établir une limite entre les systèmes linéaires et les systèmes non-linéaires.

Il serait plus correct de parler de non-linéarités négligeables (sans influence apparentes) et de non-linéarités non négligeables. À la limite, on peut même penser qu'il n'existe pas de systèmes rigoureusement linéaires.

Beaucoup de systèmes peuvent être qualifiés de linéaires dans un certain domaine. Beaucoup d'autres peuvent être linéarisés facilement, moyennant certaines approximations. Cependant, il reste une catégorie très importante de systèmes asservis qu'il est impossible de traiter par les méthodes linéaires. Ces asservissements non-linéaires seront étudiés séparément.

3.2 - Non-linéarités accidentelles

Les systèmes qui présentent ce type de non-linéarité sont des systèmes linéaires dans un domaine bien défini. Les limites peuvent être dues à l'usure ou réalisées volontairement. On peut citer parmi ces non-linéarités :

- ✓ les seuils,
- ✓ les saturations,
- ✓ les espaces morts,
- ✓ le jeu en mécanique, etc. ...

On admet généralement que les asservissements présentant des non-linéarités accidentelles sont linéaires dans un domaine limité par un seuil et une saturation en ce qui concerne l'amplitude (domaine de linéarité statique). D'autre part, ils ont aussi un domaine de linéarité limité par la fréquence (domaine de linéarité dynamique).

Définissons quelques non-linéarités :

3.2.a - Notion de saturation et de seuil

Saturation

La notion de saturation est très familière à tous les électriciens, mais elle concerne beaucoup d'autres phénomènes physiques. Son existence résulte de cette évidence : aucune grandeur physique ne peut tendre vers l'infini (pour des raisons énergétiques). Il existe donc, pour chaque élément d'une chaîne, des signaux d'entrées incompatibles avec le fonctionnement linéaire. Ces signaux d'entrées donneraient à la sortie une valeur trop grande, impossible à atteindre : le signal réel que l'on recueille alors est plus faible, il y a saturation (fig. 1-5 a).

Seuil

La notion de seuil est aussi très familière. Beaucoup de systèmes électromécaniques présentent un seuil de fonctionnement. La présence de ce seuil est due au frottement et à l'inertie. Il faut que le signal d'entrée ait une valeur supérieure à un certain

niveau pour que la valeur de la sortie soit différente de zéro. En effet, il faut injecter au système une énergie suffisante pour vaincre les frottements et l'inertie au démarrage (fig. 1-5 b).

Il faut noter que le seuil n'est qu'un cas particulier de "l'espace mort" qui correspond à l'annulation de la grandeur de sortie quand la grandeur d'entrée s'inverse. Ce phénomène correspond à la présence de deux seuils qui doivent être franchis, ces deux seuils peuvent, bien entendu, avoir des valeurs différentes (fig. 1-5 c).

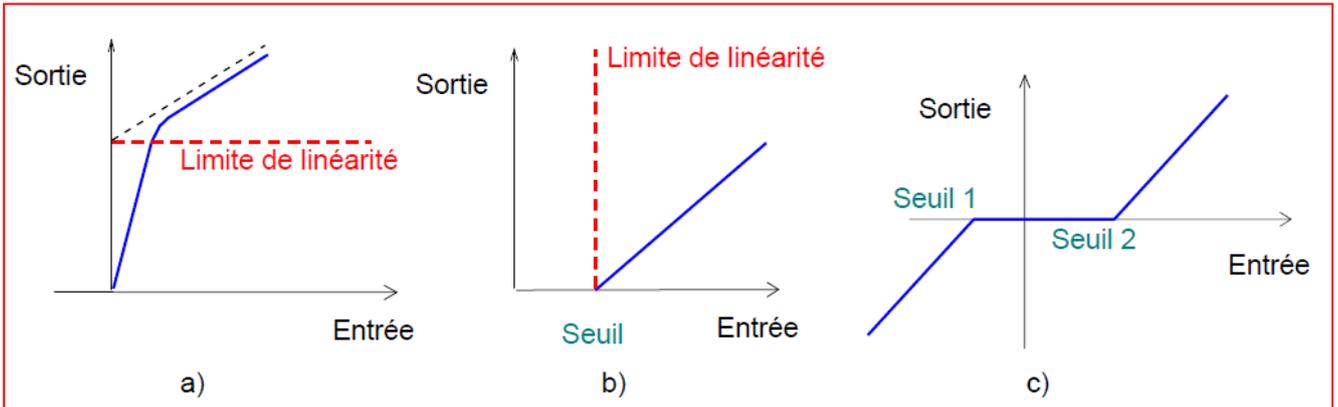


Fig. 1-5 : Exemples de non-linéarités accidentelles

3.3 - Non-linéarités essentielles

Ce sont des non-linéarités intrinsèques du système à étudier ; il est impossible alors de trouver pour celui-ci un domaine de linéarité, même très petit. Ces systèmes obéissent à des équations différentielles non-linéaires où il est impossible de les mettre en équation.

3.4 - Propriétés des systèmes linéaires

Quand un système est linéaire, il jouit de propriétés importantes qui permettent une étude plus commode, en particulier le principe de superposition linéaire qui se traduit par les relations :

	Entrée		Sortie
Additivité	{	$e_1(t)$	$\Rightarrow s_1(t)$
		$e_2(t)$	$\Rightarrow s_2(t)$
		$e_1(t) + e_2(t)$	$\Rightarrow s_1(t) + s_2(t)$

Où $e(t)$ et $s(t)$ sont les grandeurs d'entrée et de sortie :

	Entrée		Sortie
Homogénéité	{	$e(t)$	$\Rightarrow s(t)$
		$\lambda \cdot e(t)$	$\Rightarrow \lambda \cdot s(t)$

Ce principe traduit le fait que les effets sont proportionnels aux causes et que les causes ajoutent leurs effets.

4 - Régimes transitoires des asservissements

4.1 - Définitions

Entrée Permanente

Entrée d'un système dont l'expression, en fonction du temps, est du type constant, linéaire, parabolique ou périodique.

Régime Permanent

Il est atteint par un système quand, soumis à une entrée permanente, sa sortie est du même type que l'entrée c'est-à-dire constante, linéaire, parabolique ou périodique. Ce régime est aussi appelé régime forcé.

Régime Transitoire

Il correspond au fonctionnement du système quand il passe d'un type de régime permanent à un autre.

4.2 - Performances d'un système asservi

- ✓ **En régime permanent** : La grandeur de sortie doit être aussi voisine que possible de la valeur désirée. En réalité, il subsiste toujours une légère erreur. Cette erreur est appelée :
 - *erreur statique* ou *écart permanent* quand la grandeur d'entrée est une constante ; pour un système idéal, elle doit être nulle.
 - *erreur de traînage* quand la grandeur d'entrée est une fonction linéaire du temps.
- ✓ **En régime transitoire** : Le système évoluant entre deux régimes permanents, le temps mis par le système pour aller de l'un à l'autre et la façon dont il parvient à l'état final, sont très importants.
 - *Le temps de réponse* est le temps au bout duquel la sortie du système a atteint, à $\pm 5\%$ (ou $\pm 2\%$ selon la précision voulue), sa valeur de régime permanent.
 - *L'amortissement* : la sortie du système dépasse généralement la valeur qu'elle doit avoir dans le régime permanent final et elle oscille quelques instants autour de cette valeur. Les oscillations doivent être amorties, le plus rapidement possible.