



Introduction à l'asservissement

1 Illustration du besoin d'asservir les systèmes : le régulateur de vitesse

Aujourd'hui, les véhicules peuvent être équipés d'un régulateur de vitesse. Grâce à cette option, le conducteur peut régler une vitesse de consigne et ainsi retirer son pied de l'accélérateur : l'ordinateur de bord commande directement le moteur pour respecter la vitesse de consigne. Le système se déconnecte en cas d'action sur la pédale de frein ou d'accélérateur.

Il est nécessaire d'adapter la vitesse car la pente de la route, le vent ou la qualité de la route évoluent au cours du trajet. Sans régulateur, c'est l'information visuelle donnée par le compteur au conducteur qui lui permet d'adapter sa conduite. Le régulateur de vitesse va directement utiliser l'information de vitesse pour la comparer à la vitesse demandée. Suivant l'écart calculé, il modifiera la puissance du moteur. Cet écart est bien sûr calculé en temps réel.

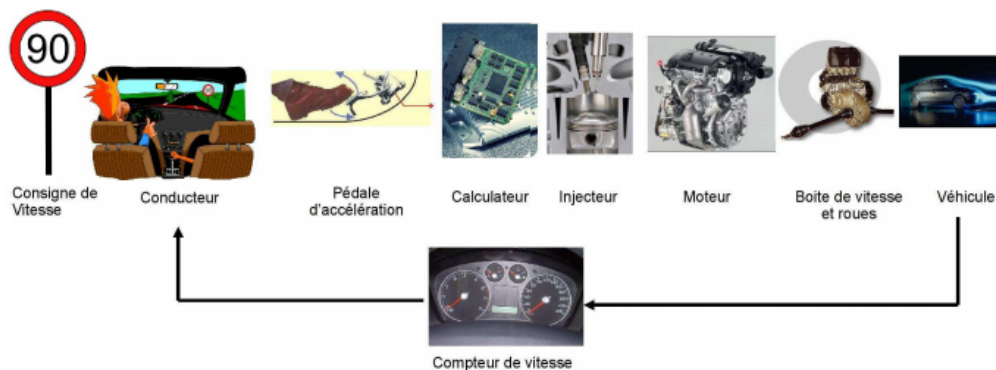


FIGURE 1 – Schéma de principe sans régulateur automatique

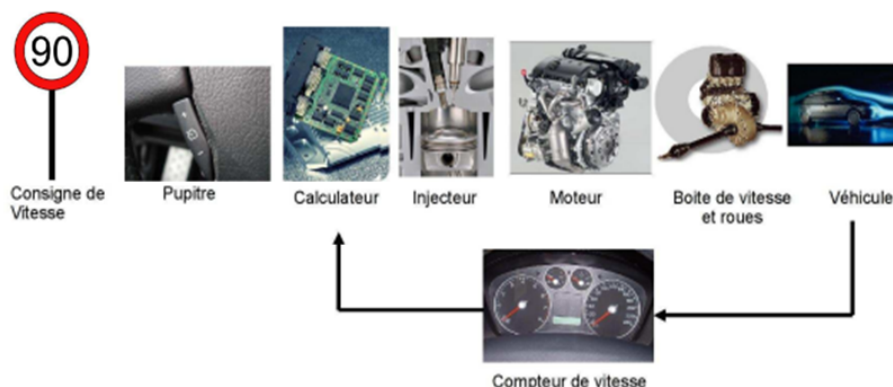


FIGURE 2 – Schéma de principe avec régulateur automatique

Il faut non seulement que le régulateur de vitesse permette de remplir sa fonction, c'est-à-dire maintenir une vitesse constante mais aussi être capable de garantir que le système n'entraînera jamais une accélération non contrôlée du système. On dit que le système doit être **stable**¹.

1. C'est une performance des systèmes asservis, on y reviendra plus tard.

2 | Principe

2.1 Définitions

Définition

Système automatique

Un système automatique est un système dont les éléments le constituant se coordonnent entre eux pour réaliser des opérations et pour lequel l'**intervention humaine est limitée** à la programmation du système et à son réglage préalable.

Les systèmes automatiques permettent généralement :

- de réaliser des tâches trop complexes ou dangereuses pour l'homme (exemple : module d'exploration martien);
- de substituer la machine à l'homme pour faire des tâches répétitives et pénibles (exemple : bras de soudage de chaîne d'assemblage automobile);
- d'accroître la précision (exemple : robot chirurgical).



Définition

Automatique

L'automatique est la discipline scientifique traitant, d'une part, de la caractérisation des systèmes automatiques et d'autre part, du choix de la conception et de la réalisation du système de commande afin d'obtenir, en sortie du système, un comportement déterminé. Les systèmes de commande automatiques s'inspirent le plus souvent du comportement de l'homme.

2.2 Classification des systèmes automatiques

Les systèmes automatiques sont classés en fonction de la nature de leurs informations de commande et de mesure. On distingue deux types d'informations : analogiques et discrètes (numériques ou analogiques).

On peut alors découper les systèmes automatiques suivant 3 catégories :

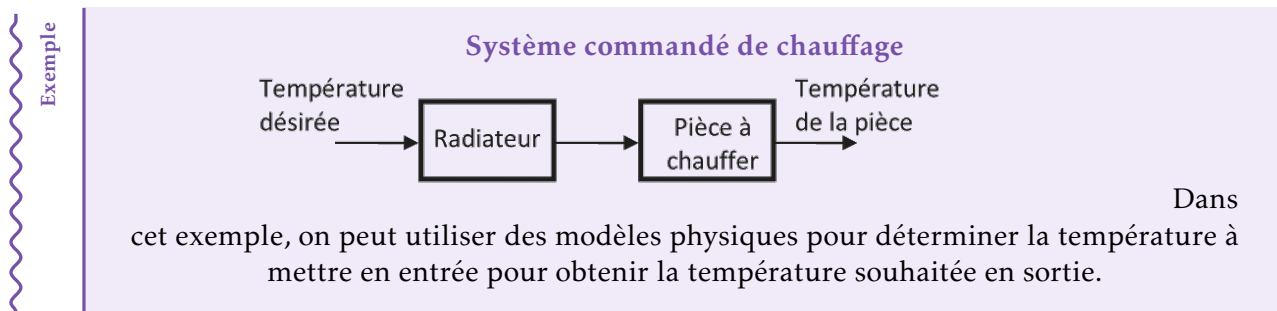
- **Système asservi** : les signaux traités sont analogiques ou numériques et leurs valeurs ne peuvent pas être prédéterminées. **Une mesure du signal de sortie est en permanence réalisée par un capteur et la valeur est comparée à l'entrée**, puis corrigée. La distinction entre système asservi numérique ou analogique est fonction du type de la partie commande utilisée. On représente son fonctionnement par un **schéma-bloc fonctionnel** (voir section 4).
- **Système automatique à logique combinatoire** : un signal logique (ou une combinaison de signaux logiques) conduit toujours à un unique état de la sortie du système. Dans ces systèmes, l'information logique est traitée de manière instantanée (exemple : digicode). On représente son fonctionnement par un **logigramme**.

- **Système automatique à logique séquentielle** : la sortie du système est élaborée à partir d'un ensemble de signaux logiques d'entrée mais elle prend également en compte la chronologie des événements logiques. On représente son fonctionnement par un **diagramme de séquence et/ou un diagramme d'état**. Ce type de système automatique sera traité dans la séquence 10.

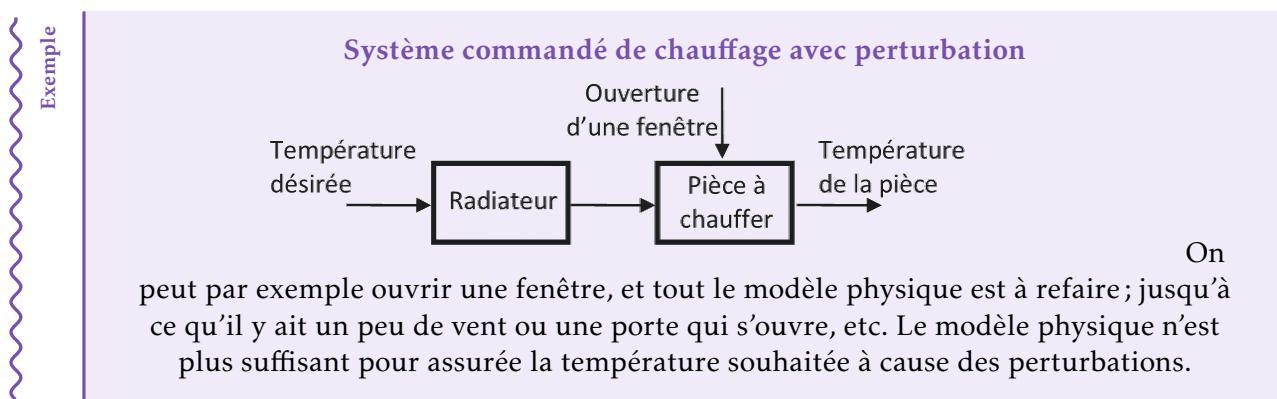
Dans ce cours, on ne traite que des systèmes asservis.

3 | Notion de système asservi

Un système simple peut être tout à fait satisfaisant du point de vue de son comportement **s'il n'est pas perturbé**. S'il n'y a pas de mesure capteur et de comparaison, on parle d'un **système en boucle ouverte** ou d'un système commandé. **Ce n'est pas un système asservi**.



Cependant, lorsqu'un système commandé est perturbé par un événement extérieur, la valeur de la sortie ne correspond pas à la valeur attendue et peut même être très éloignée de la valeur attendue. On parle alors de **perturbation**.

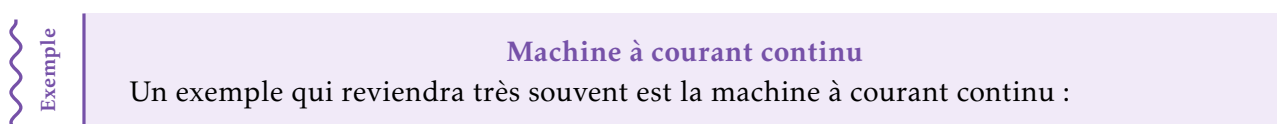


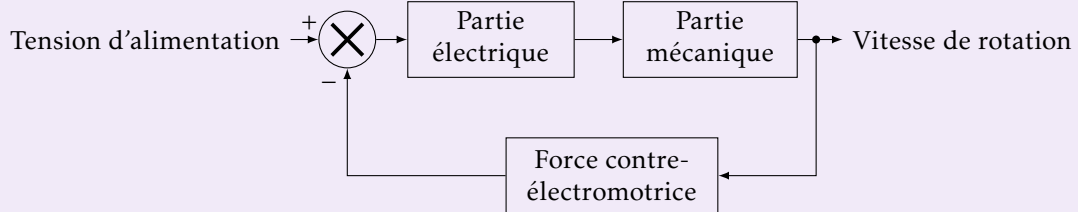
Pour automatiser le système, on introduit alors une **boucle de retour (ou boucle de rétroaction) constituée d'un capteur**. Elle permet d'**évaluer** la situation à l'instant t sur la partie opérative et fournit un état de la sortie à la partie commande. Cette information est analysée par la partie commande et **comparée** à la consigne d'entrée. Elle élabore ensuite un signal qui permet de commander la partie opérative.

Le système est alors appelé **système en boucle fermée ou système asservi**.

3.1 Système bouclé et système asservi

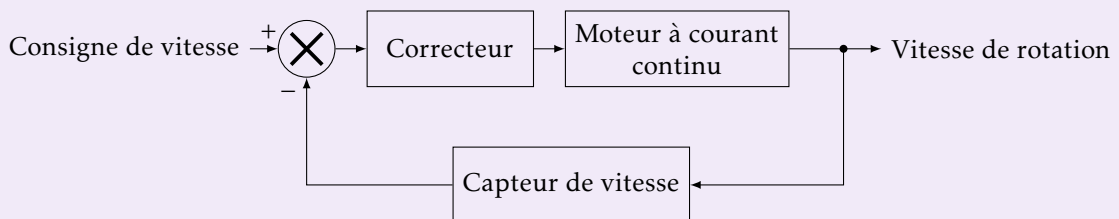
Tous les systèmes asservis sont des systèmes à boucle de retour mais l'inverse n'est pas vrai (inclusion).





Le fonctionnement de la machine à courant continu est régi par des équations physiques. Ces équations font un lien entre la vitesse de rotation et le potentiel (tension d'alimentation – force contre-électromotrice). Ce n'est pas un capteur qui réalise une mesure et la compare à une consigne. Il s'agit d'un système avec une boucle de retour mais ce n'est pas un système asservi.

En revanche, voici l'asservissement d'un moteur en vitesse de rotation :



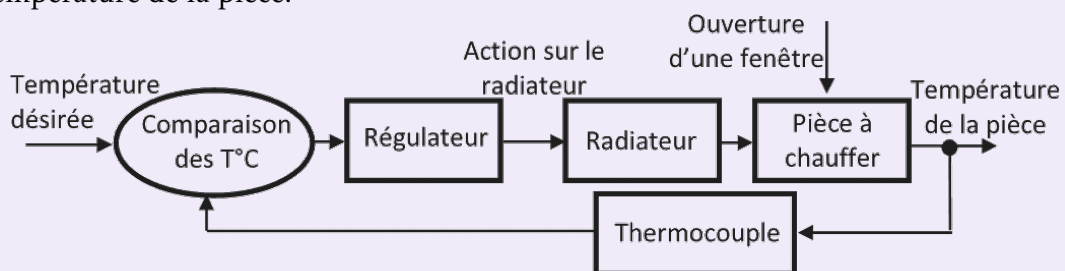
La boucle de retour est réalisée par un capteur mesurant la vitesse de rotation, il s'agit bien d'un système asservi.

On peut retenir que pour qu'un système soit asservi, il faut que la grandeur de sortie soit de la même dimension que la grandeur d'entrée.

Exemple

Système asservi de régulation de chauffage

La température désirée (fixée par un thermostat) est comparée à la température de la pièce mesurée par un thermocouple. Si une perturbation intervient (ouverture de la fenêtre), le régulateur déclenche alors une action corrective dont le sens et l'intensité dépendent de la valeur et du signe de l'écart entre la température souhaitée et la température de la pièce.



Les systèmes asservis peuvent être classés en deux grandes familles :

- **Système suiveur** : les systèmes asservis suiveurs ou en poursuite d'une loi de référence dans lesquels la consigne d'entrée varie en permanence, comme par exemple pour une machine-outil à commande numérique, un missile, un radar de poursuite...
- **Système régulateur** : les systèmes régulateurs pour lesquels la consigne d'entrée est fixe au cours du temps, comme par exemple une régulation de température dans une centrale nucléaire...

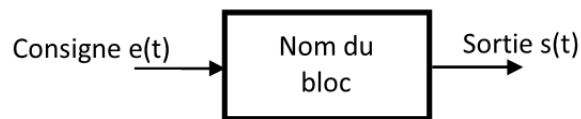
4 | Représentation schématique des systèmes asservis

Pour représenter un système asservi, on utilise toujours un **schéma-bloc fonctionnel** qui met en relation les entrées et sorties du système et qui permet de comprendre la structure du système selon un point de vue commande. On distingue quatre types d'éléments graphiques :

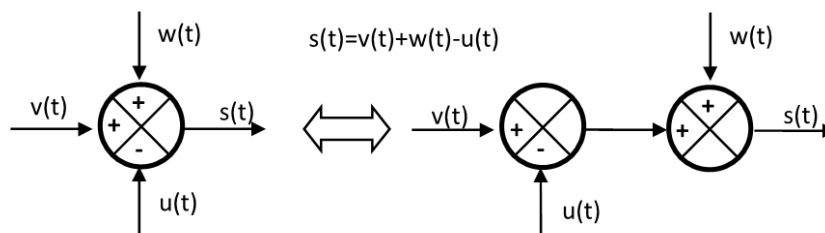
- Les **liens** avec une **flèche** qui représentent une **grandeur** d'entrée ou de sortie ainsi que son orientation.

Consigne $e(t)$ 

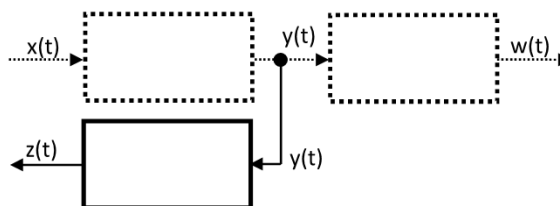
- Les **blocs** : le nom du bloc est en général le nom du composant (moteur, réducteur, roue...) ou bien encore l'opérateur mathématique associé à une fonction particulière (exemple : l'opérateur $\int$ pour décrire une intégration du type passage d'une vitesse à une position mais qui n'a pas de matérialisation physique).



- Les **sommateurs** (ou points de sommation ou comparateurs) qui réalisent la somme de leurs entrées avec le signe associé. Typiquement les sommateurs se retrouvent pour comparer la mesure et la consigne ainsi que l'ajout d'une perturbation.



- Les **points de prélèvement** ou de jonctions : une variable est réutilisée comme entrée d'un bloc. Un peu comme en électricité, un « câble » c'est-à-dire un lien, pour une grandeur ; donc deux câbles avec des valeurs différentes ne peuvent se toucher sans un bloc ou sommateur entre eux.



Les systèmes industriels sont par nature complexes et la représentation en schéma-bloc fonctionnel permet de décomposer ce système en plusieurs sous-systèmes élémentaires. Chaque sous-système, plus facilement modélisable, correspondra à un bloc. Par « assemblage » des différents blocs, il est ensuite possible d'étudier le comportement global du système complexe. Un diagramme chaîne énergie/chaîne d'information est très utile pour aider à construire un schéma-bloc fonctionnel.

Un système asservi pluri-technologique présente généralement une structure en schéma-bloc fonctionnel comme celle présentée par la Figure 3.

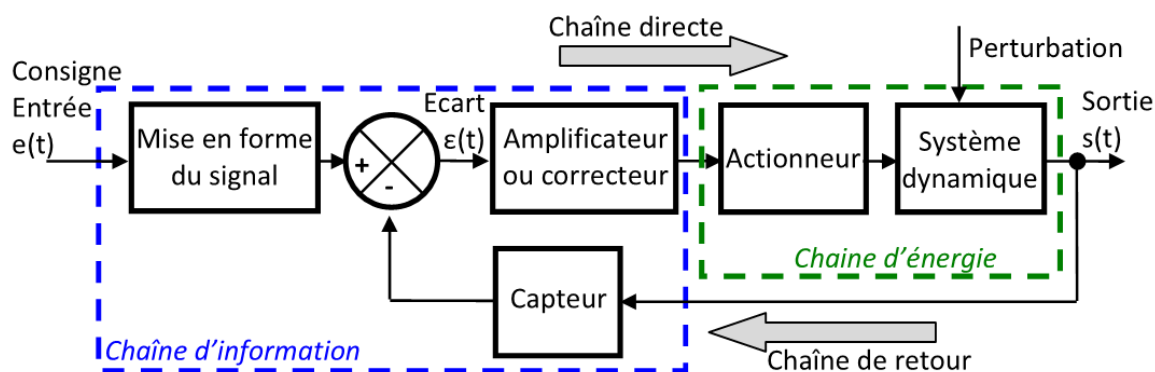


FIGURE 3 – Structure usuelle d'un schéma bloc fonctionnel pour un système asservi

5 | Modélisation des entrées d'un système asservi : signaux tests

Pour étudier un système d'un point de vue expérimental ou pour réaliser une validation d'un modèle, il est nécessaire d'utiliser des consignes simples ou signaux d'entrée test. On utilise majoritairement les modèles de signaux suivants :

Impulsion de Dirac : $\delta(t)$ avec $\delta(t) = 0 \forall t \neq 0$. Cette fonction modélise une action s'exerçant pendant un temps très court (supposé infiniment petit). La réponse à une impulsion de Dirac s'appelle une réponse impulsionnelle.	
Échelon unité : $u(t)$ avec $u(t) = 0$ si $t < 0$ et $u(t) = 1$ si $t \geq 0$. Cette fonction modélise un signal qui passe très rapidement de 0 à 1 et qui reste ensuite à 1. La réponse à un échelon s'appelle une réponse indicielle.	
Rampe de pente unitaire : $f(t)$ avec $f(t) = 0$ si $t < 0$ et $f(t) = t u(t)$ si $t \geq 0$.	
Signal sinusoïdal : $f(t)$ avec $f(t) = 0$ si $t < 0$ et $f(t) = \sin(\omega t) u(t)$ si $t \geq 0$. $T = \frac{2\pi}{\omega}$, période du signal.	

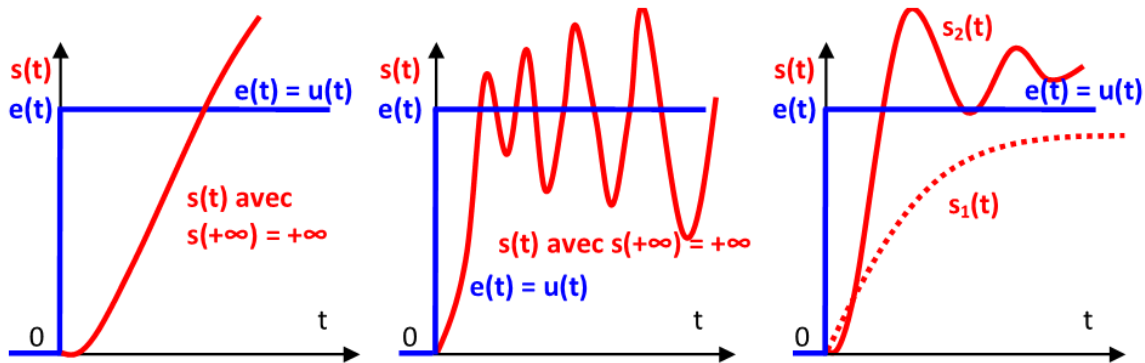
6 | Performances d'un système de commande

L'asservissement d'un système est évalué suivant différents **critères de performances**. Les cinq principaux critères sont la **stabilité**, la **précision**, la **rapidité**, le **dépassement** et la **sensibilité aux perturbations**. C'est le cahier des charges fonctionnel qui définit les performances que doit réaliser le système. On imagine bien qu'un régulateur de voiture n'a pas besoin de la même précision qu'un robot chirurgical par exemple.

On évalue ces performances en plaçant en consigne du système un des signaux tests décrits ci-dessus.

6.1 Stabilité

Un système est stable si à une entrée bornée correspond une sortie bornée. Le bouclage peut déstabiliser un système. C'est le critère à considérer en premier car les autres performances ne peuvent être évaluées sur un système instable. **On souhaite toujours que le système asservi soit stable.**



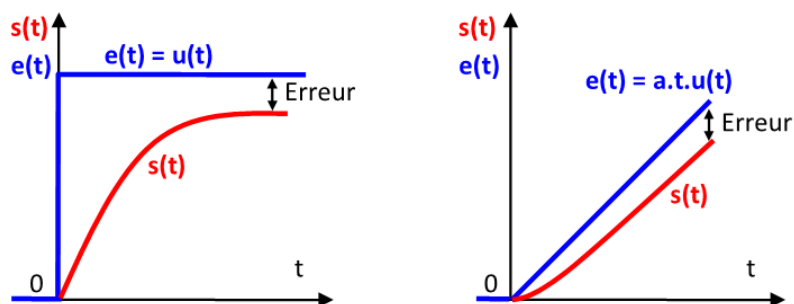
Le premier est instable, le deuxième aussi et les présents sur le dernier graphique sont tout deux stables.

6.2 Précision

La précision qualifie l'aptitude du système à atteindre la valeur visée. Elle est caractérisée par **l'erreur entre la consigne en entrée et la valeur asymptotique** effectivement atteinte par la grandeur de sortie. Si l'erreur est nulle, on dit que le système est précis.

En CPGE, on ne s'intéresse qu'à l'erreur en régime permanent c'est-à-dire quand les grandeurs cessent de varier. En notant $e_{rs}(t)$ l'erreur en régime permanent, $s(t)$ la sortie et $e_c(t)$ l'entrée consigne, il vient :

$$e_{rs}(t) = \lim_{t \rightarrow +\infty} (e_c(t) - s(t))$$



Remarque : Il est souvent plus pertinent de considérer l'**erreur relative** plutôt que l'**erreur absolue**. En effet une erreur de 0,3 mm est probablement acceptable pour une consigne de 1500 mm mais certainement pas pour une consigne de 0,2 mm. L'erreur relative s'exprime le plus souvent en pourcentage. Afin d'obtenir l'erreur relative, il convient de **diviser l'erreur absolue par la consigne**. Ainsi :

$$e_{rs\%}(t) = \lim_{t \rightarrow +\infty} \frac{e_c(t) - s(t)}{e_c(t)}.$$

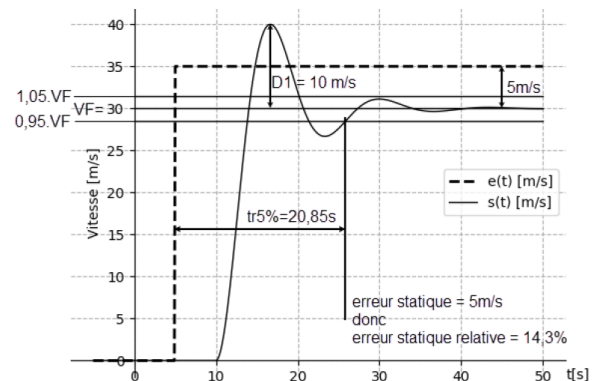
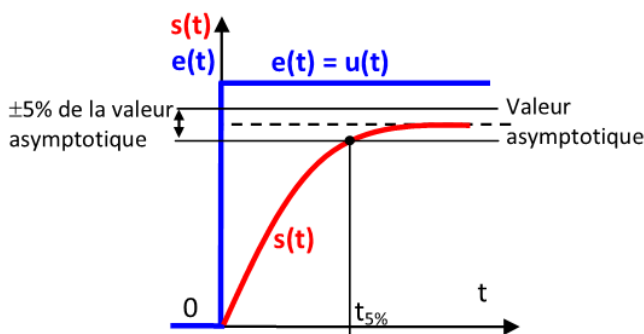
Le cahier des charges qui annonce s'il faut évaluer l'erreur absolue ou relative.

6.3 Rapidité

La rapidité est caractérisée par le temps que met le système à réagir à une variation de la grandeur d'entrée. Cependant, la valeur finale étant le plus souvent atteinte de manière asymptotique, on retient alors comme principal critère d'évaluation de la rapidité d'un système, le **temps de réponse à n%**.

Dans la pratique, on utilise le **temps de réponse à 5%, noté $t_{5\%}$** , c'est le temps mis par le système pour **atteindre sa valeur de régime permanent à $\pm 5\%$ près et y rester**. Ainsi, le temps de réponse à 5% est défini mathématiquement tel que :

$$\forall t > t_{5\%}, \quad 0,95 s(t_{\infty}) \leq s(t) \leq 1,05 s(t_{\infty})$$



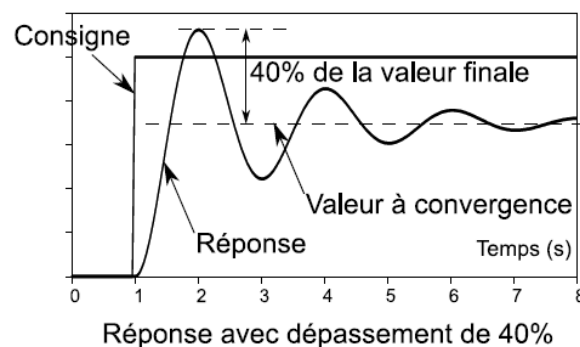
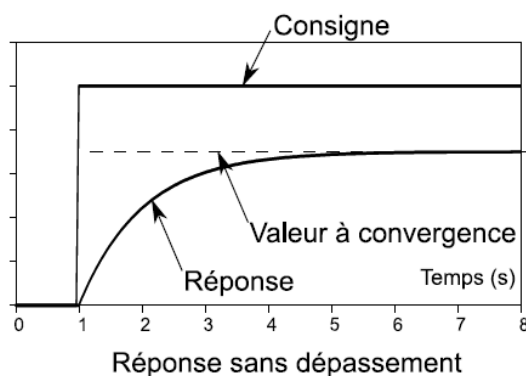
6.4 Dépassement

On dit que la réponse d'un système présente des dépassements si elle dépasse sa valeur asymptotique avant de converger (la convergence est assurée par la stabilité du système). Les dépassements ne considèrent pas du tout la consigne !

Dans certaines applications, les dépassements sont à proscrire : l'usinage, le remplissage d'un contenant jusqu'à un certain niveau, les incisions chirurgicales, la prévention d'un risque de collision, ...

Pour une entrée en échelon, les dépassements sont synonymes d'oscillations. Les oscillations sont alors amorties et les dépassements de plus en plus faibles (avec un système stable). Usuellement, le premier dépassement – qui est donc le plus important – est noté D_1 , le second D_2 ... Comme pour la précision, il est souvent plus pertinent de définir le dépassement relatif (souvent en pourcentage) :

- **Dépassement absolu** : $D_1 = \max(s(t)) - s(t_{\infty})$
- **Dépassement relatif** : $D_{1\%} = \frac{\max(s(t)) - s(t_{\infty})}{s(t_{\infty})}$



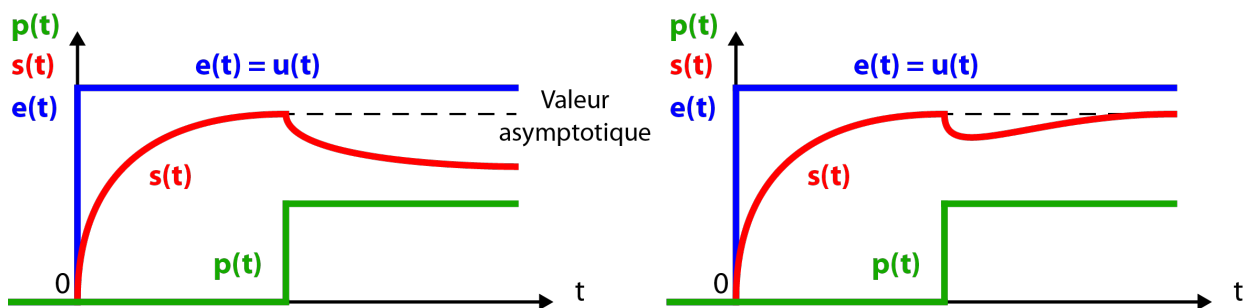
Remarque : En SI, on s'intéresse majoritairement au dépassement relatif.

6.5 Sensibilité aux perturbations

Un système est dit **sensible aux perturbations** si l'apparition d'une perturbation modifie la valeur asymptotique de la réponse du système pour une même consigne.

Un système insensible aux perturbations peut voir sa grandeur de sortie évoluer **transitoirement** lors de l'apparition de la perturbation. Cependant, lorsque la perturbation est constante, la valeur à convergence est la même que sans perturbation.

Remarque : L'évaluation des autres performances ne prend pas en compte l'effet des perturbations. Par exemple, sur la réponse ci-dessous à gauche, la rapidité est évaluée sur $s(t)$ avant que la perturbation ne survienne. Il en est de même pour la précision par exemple.



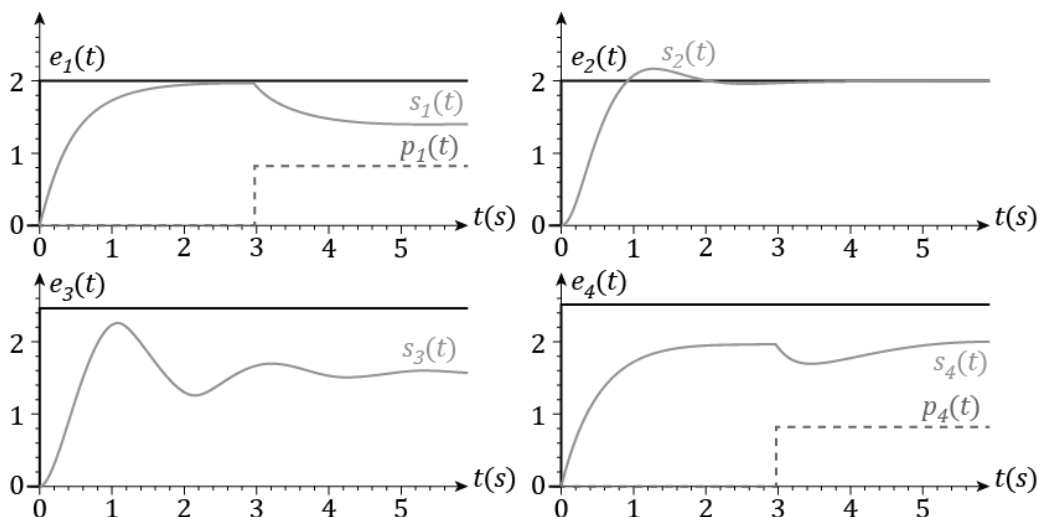
A gauche, la perturbation affecte durablement la sortie, le système est sensible à la perturbation. Ce qui n'est pas le cas pour le système de droite.

7 Application : Évaluation des performances

Les quatre graphes ci-dessous montrent la réponse $s(t)$ de différents systèmes à une consigne $e(t)$ et éventuellement à une perturbation $p(t)$.

Question 1 : Déterminer pour chacun des graphes les performances atteintes en termes de :

- stabilité (stable ou non);
- précision (précis ou non, valeur de l'erreur en %);
- rapidité (temps de réponse à 5%);
- dépassement (valeur du dépassement en %);
- sensibilité aux perturbations (sensible ou non).



	1	2	3	4
Stabilité	Stable	Stable	Stable	Stable
Précision	Oui	Oui	0,9 soit 36%	0,5 soit 20%
Rapidité	$t_{5\%} = 1,6\text{ s}$	$t_{5\%} = 1,7\text{ s}$	$t_{5\%} = 3,7\text{ s}$	$t_{5\%} = 1,4\text{ s}$
Dépassement	Non	10%	50%	Non
Sensibilité aux perturbations	Oui	Pas de perturbation	Pas de perturbation	Non

Attention à bien prendre la valeur finale et non la consigne pour déterminer les performances !

Stabilité : Pour une entrée bornée il y a bien une sortie bornée.

Précision : Si la valeur finale est la même que la consigne le système est précis. Si ce n'est pas le cas, c'est le cahier des charges qui tranche si le système est précis ou non (marge d'acceptabilité). Les systèmes 3 et 4 ont une erreur, respectivement $2,5 - 1,6 = 0,9$ et $2,5 - 2 = 0,5$ en absolu et respectivement $\frac{2,5 - 1,6}{2,5} = 36\%$ et $\frac{2,5 - 2}{2,5} = 20\%$.

Rapidité : Dans un premier temps il s'agit de calculer 5% de la valeur finale. Ensuite on trace deux droites horizontales de valeur 95% valeur finale et 105% valeur finale. Enfin on regarde le temps pour lequel le signal entre dans cette marge et n'en sort plus.

Dépassement : On calcule souvent le premier dépassement (car il sera le plus grand). Il est souvent préférable d'exprimer le dépassement en %, cela dépend du cahier des charges. Pour le 3 : la valeur max de la sortie est $\sim 2,4$, la valeur finale est 1,6 le calcul est : $D_1 = \frac{|2,4 - 1,6|}{1,6} = 0,5$ soit 50%. Pour le 2 : $D_1 = \frac{|2,2 - 2|}{2} = 0,1$ soit 10%.

Sensibilité à la perturbation : Il suffit de regarder si la valeur finale de la sortie est impactée durablement par la perturbation. **Important** la perturbation est donc prise en compte dans ce critère et pas dans les autres. Par exemple pour la précision ou la rapidité, on ne prend pas en compte la perturbation.