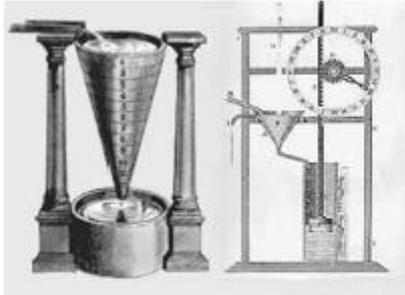


Cycle 4: Analyser, modéliser et étudier le comportement des Systèmes Linéaires Continus et Invariants

Chapitre 1 – Structure et performances des systèmes asservis



Horloge à eau (III^e s. av. J.C.)



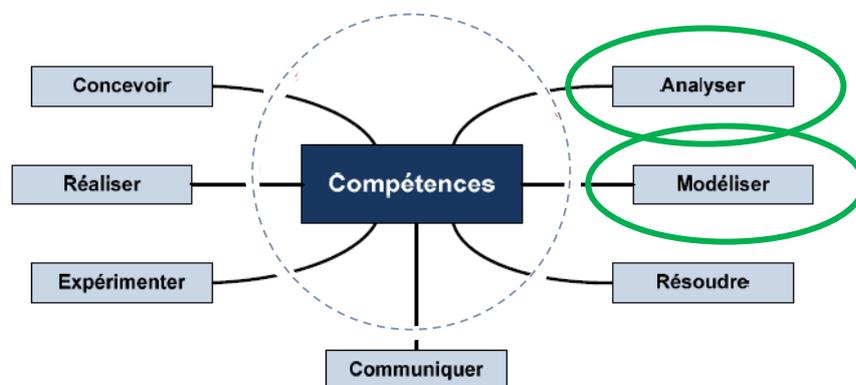
Robot Nao (XXI^e s.)

Depuis l'antiquité les Hommes cherchent à automatiser différentes tâches du quotidien.

- Quelle a été l'évolution des systèmes automatisés au cours du temps ?
- Quelles sont les caractéristiques des systèmes automatisés ?

Savoir

- A-C11.1 : Définition et structure d'un système asservi : chaîne directe (ou chaîne d'action), chaîne de retour (ou chaîne d'acquisition), comparateur et écart.
- A-C11.2 : Consigne, perturbation.
- A-C11.3 : Régulation, poursuite.
- A-C11.4 : Définition des performances : rapidité, précision et stabilité.



Sommaire

1. <u>Définitions</u>	3
2. <u>Pourquoi utiliser des systèmes automatisés ?</u>	3
3. <u>Classification des systèmes automatisés</u>	4
3.1. Les systèmes à logique combinatoire	4
3.2. Les systèmes à logique séquentielle	5
3.3. Les systèmes asservis	5
4. <u>Comportement des systèmes asservis</u>	7
4.1. Comportement des systèmes en BO	7
4.2. Comportement des systèmes en BF	7
5. <u>Représentation schématique des systèmes asservis</u>	9
6. <u>Démarche de modélisation et d'étude des systèmes asservis en CPGE</u>	11
7. <u>Performances des systèmes asservis</u>	12
7.1. Signaux tests pour évaluer les performances	13
7.2. Caractériser l'erreur pour évaluer la précision	13
7.3. Caractériser la rapidité par le temps de réponse à 5%	14
7.4. Caractériser la stabilité des dépassements	15



Structure et performances des systèmes asservis

1. Définitions

Les systèmes techniques qui nous entourent peuvent être classés en trois catégories :

- les **systèmes manuels** (ou élémentaires) pour lesquels l'intervention humaine prédomine. L'utilisateur commande le système et fournit l'énergie (musculaire) nécessaire à la réalisation de la fonction de service (FS) pour laquelle le système a été conçu ;
- les **systèmes mécanisés** conçus pour alléger la tâche de l'utilisateur. Dans ces systèmes, l'énergie provient le plus souvent d'une source extérieure et le rôle de l'utilisateur consiste à commander le système ;
- les **systèmes automatisés** pour lesquels l'intervention humaine se limite à la programmation du système et à son réglage préalable.

Exemple

Fonction de service : voler dans l'air



Système manuel
Machine volante de De Vinci



Système mécanisé
ULM

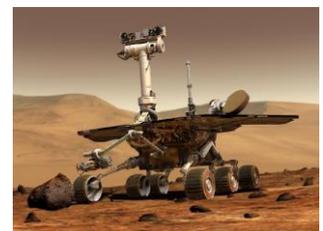


Système automatisé
Avion – Airbus A350

2. Pourquoi utiliser des systèmes automatisés

Un système automatisé est un système dont les éléments le constituant **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 automatisés permettent généralement :

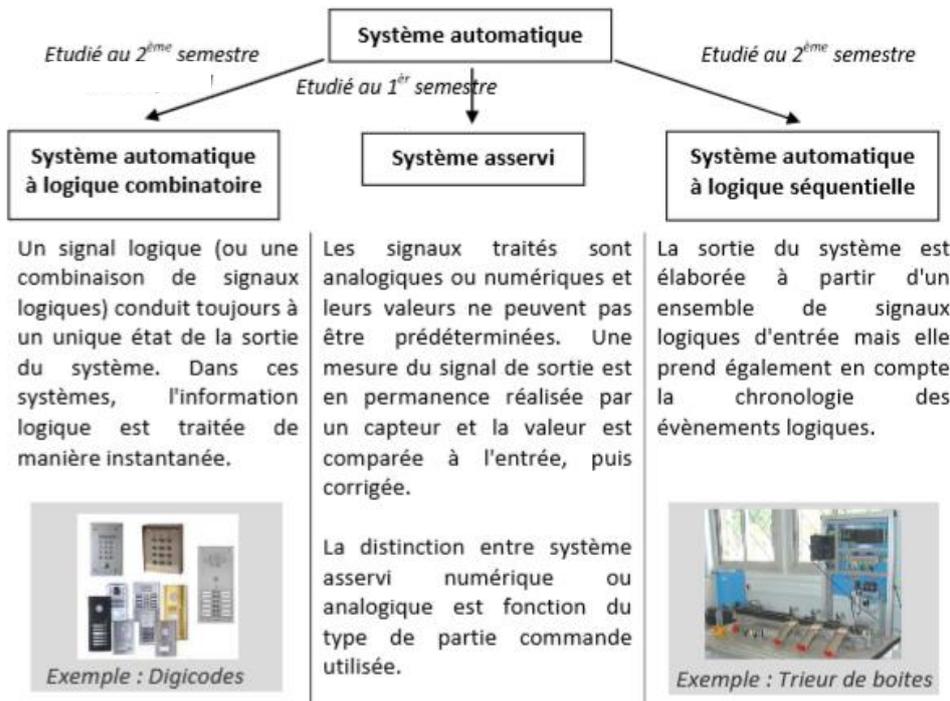
- De réaliser des **tâches trop complexes** ou dangereuses pour l'homme
(Exemple : *Module d'exploitation Martien Spirit*).
- De substituer la machine à l'homme pour des **tâches répétitives et pénibles**,
(Exemple : *Bras de soudage de chaîne d'assemblage automobile*)
- D'accroître la **précision** (Exemple : *Robot chirurgical*)



3. Classification des systèmes automatisés

L'automatique est une science qui traite de la **modélisation, de l'analyse, de l'identification et de la commande des systèmes dynamiques**. Un système automatisé est un **objet technique** qui effectue un travail de façon **autonome**

On peut découper les systèmes automatisés suivant **3 catégories** :

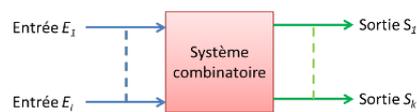


3.1. Les systèmes à logique combinatoire

Définition

Systèmes à logique combinatoire

Les fonctions de sorties S_j ne dépendent que des entrées E_i à l'instant considéré. E_i et S_j sont respectivement des variables et des fonctions binaires ne pouvant prendre que les valeurs 0 et 1 par convention.



L'outil mathématique rigoureux permettant de représenter et traiter de tels systèmes est l'**algèbre de Boole**. Ces systèmes ont un comportement de type **logique combinatoire**.

Exemple

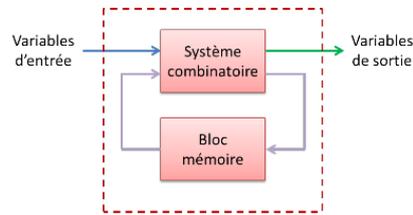
Afficheurs 7 segments

3.2. Les systèmes à logique séquentielle

Définition

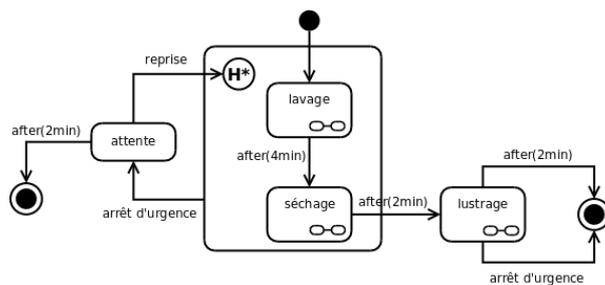
Systèmes à logique séquentielle

Si une même combinaison des variables d'entrée peut donner deux sorties différentes, il faut tenir compte de l'état du système à l'instant t . On s'intéresse à ce système en le faisant évoluer séquence par séquence d'un état fini à un autre. L'état précédent conditionnant l'état présent et ainsi de suite. Un tel système est dit à comportement séquentiel.



Avec de tels systèmes, toutes les situations sont envisagées. Les événements prévus perturbateurs du cycle entraînent, dans la plupart des cas l'arrêt de l'automatisme (les états successifs répétitifs et prévus sont momentanément arrêtés). Les outils généralement utilisés pour décrire et analyser ces systèmes sont le **GRAFSET** ou les diagrammes SysML (diagramme d'état ou diagramme d'activités).

Exemple diagramme état fonctionnement lave linge:



3.3. Les systèmes asservis

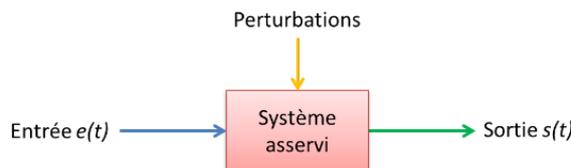
Définition

Systèmes automatiques ou asservis

Un système asservi est commandé par **une (ou des) entrée(s)** qu'il transforme en **grandeur(s) de sortie**. Les entrées sont de deux types :

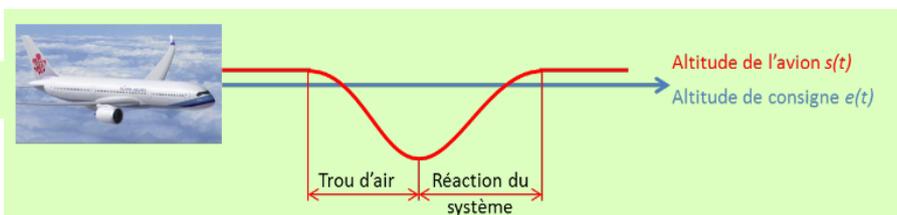
- la loi de consigne $e(t)$ est une grandeur de commande qui est modifiable ;
- la perturbation : c'est une entrée parasite qui nuit au bon fonctionnement du système. On ne peut pas modifier les perturbations.

La sortie $s(t)$ est une grandeur **observable** (par des capteurs) qui permet de juger de la qualité de la tâche accomplie.



Exemple

Pilote automatique d'avion



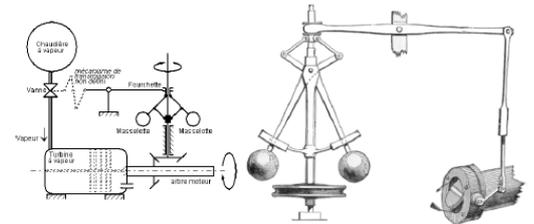


Structure et performances des systèmes asservis

Bref historique...

L'automatique a pour étymologie le mot automate, mais pour origine scientifique **la régulation et les techniques utilisées pour mettre en œuvre la régulation**. De l'antiquité jusqu'au 19^{ème} siècle, on rencontre des mécanismes construits de manière intuitive. On peut citer l'exemple :

- de la Clepsydre (horloge à eau inventée par Ctesybios 250 av. J.C.)
- du régulateur de Watt qui a pour but de maintenir constante la vitesse de rotation d'une turbine à vapeur (1788).



Régulateur à boules de Watt (XVIII^e s.)

C'est par le développement de l'électronique, avec en particulier l'intégration des **calculateurs numériques** (calcul opérationnel), que cette discipline a acquis par la suite ses lettres de noblesse tant sur le plan des réalisations que sur le plan théorique. Pendant de nombreuses années, les régulateurs se sont limités à la classique structure « PID » car toutes les solutions plus élaborées étaient difficiles à réaliser industriellement. Aujourd'hui, l'évolution de l'électronique vers des **solutions numériques** qui se traduisent par l'intégration de calculateurs numériques puissants, la création de langages de haut niveau maîtrisant les problèmes liés au temps « réel », voire une **approche entièrement graphique de la programmation**, offrent un développement quasiment sans limite des méthodes modernes de l'automatique.

Les systèmes automatisés sont classés en fonction de la nature de leurs **informations de commande et de mesure**. On distingue deux types d'informations : **analogiques et discrètes**.

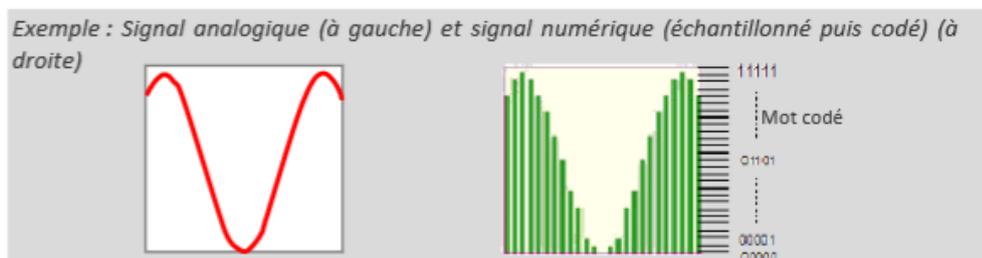
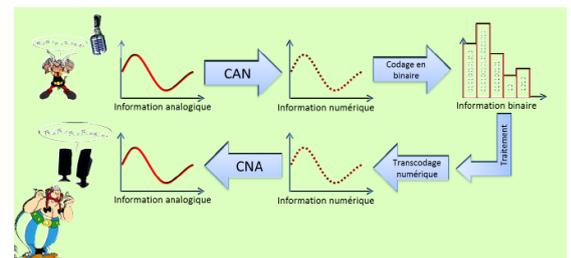
Information (signal) analogique

Une information analogique peut prendre, de manière continue, toutes les valeurs possibles dans un intervalle donné. Un signal analogique peut être représenté par une courbe continue.

Information (signal) discrète

Une information discrète est constituée d'un nombre fini de valeurs. On distingue :

- une information logique du type « vrai/faux » ou « 0/1 ». Elle est associée à l'état d'une variable qui ne peut prendre que deux valeurs possibles. Ces informations peuvent aussi être appelées des informations binaires (bit) ou « Tout Ou Rien » (TOR).
- une information numérique sous la forme d'un mot binaire, constitué de plusieurs bits (variables binaires 0/1). Cette information numérique est en général issue d'un traitement (échantillonnage et codage = CNA) d'une information analogique.



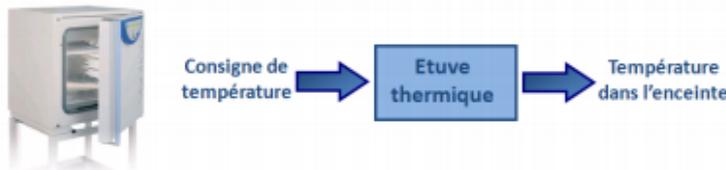
4. Comportement des systèmes asservis

4.1. Comportement des systèmes en boucle ouverte (BO)

Un système est en **boucle ouverte** (non bouclé) si le système ne contrôle pas la manière dont la consigne est respectée.

La sortie d'un système en boucle ouverte dépend des perturbations si celles-ci modifient le comportement du système (relation entre l'entrée et la sortie).

Exemple : étuve thermique



Pour une étuve thermique, les perturbations proviennent de l'ouverture de la porte, de la température extérieure et des températures et quantités des aliments ou objets mis dans l'étuve.

Un système continu en boucle ouverte peut, dans une première approche, être représenté de la façon ci-contre.

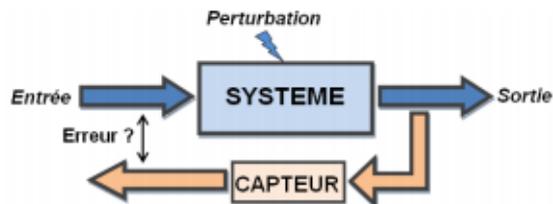


4.2. Comportement des systèmes en boucle fermée (BF)

Pour limiter l'influence des perturbations, il faut observer en permanence l'état de la sortie du système pour la modifier et la faire tendre vers la consigne donnée en entrée.

Un système bouclé (ou en **boucle fermée**) est un système dont la **sortie est mesurée puis comparée à l'entrée**. Cette différence est appelée **erreur** ou **écart**.

Le but d'un tel système est d'**annuler en permanence l'erreur entre l'entrée et la sortie**. Pour cette raison, il comporte une **boucle de retour** comprenant un **capteur**.

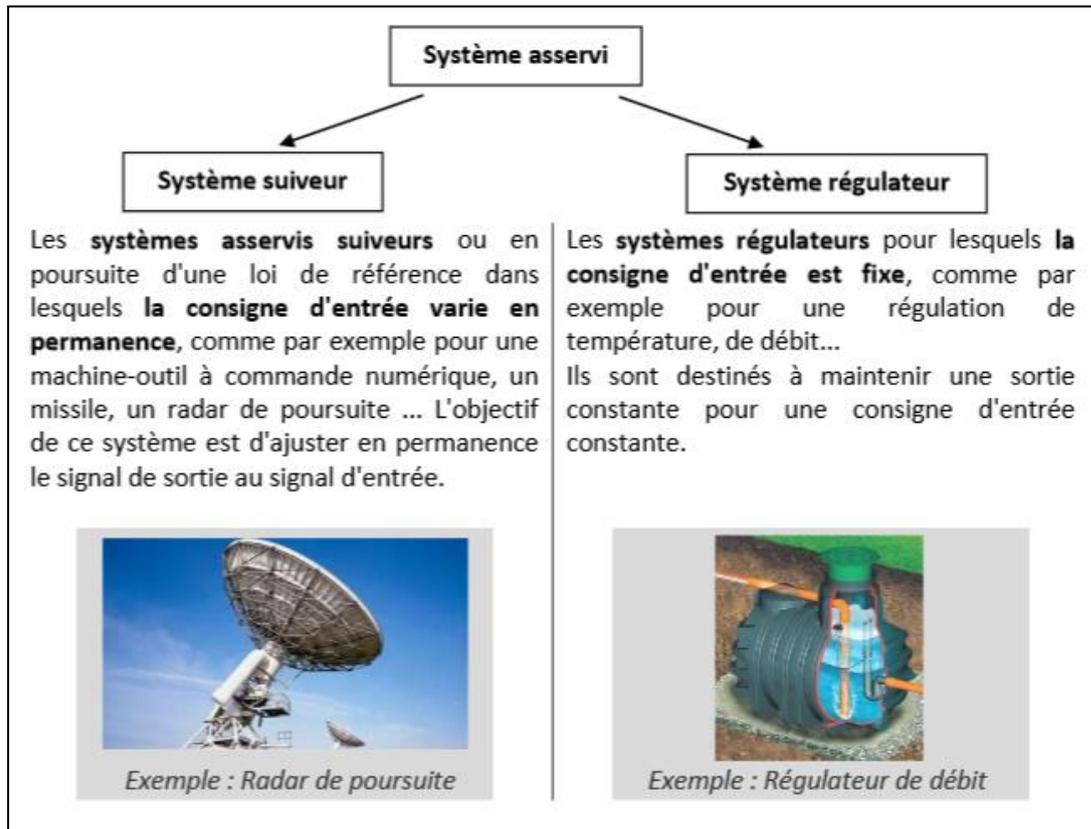


On parle alors d'un « **système asservi** » mais c'est un abus de langage, **c'est la grandeur de sortie qui est asservie à la grandeur d'entrée**. Les qualités d'un tel système seront mesurées à partir de sa capacité à produire une sortie qui suit le mieux possible la consigne d'entrée.

LES SYSTEMES ASSERVIS DU LABORATOIRE DE SII	
Cordeuse de raquettes	Asservissement de la tension du cordage
Chariot filoguidé	Asservissement de la position et de la vitesse du chariot
Bras de robot Maxpid	Asservissement de la position angulaire du bras
Pilote automatique de bateau	Asservissement du cap suivi par le bateau

Structure et performances des systèmes asservis

Les systèmes asservis peuvent être classés en **deux grandes familles** :



Exemples de systèmes suiveurs :



Missile à tête chercheuse



Segway

Exemples de systèmes régulateurs :



Étuve thermique



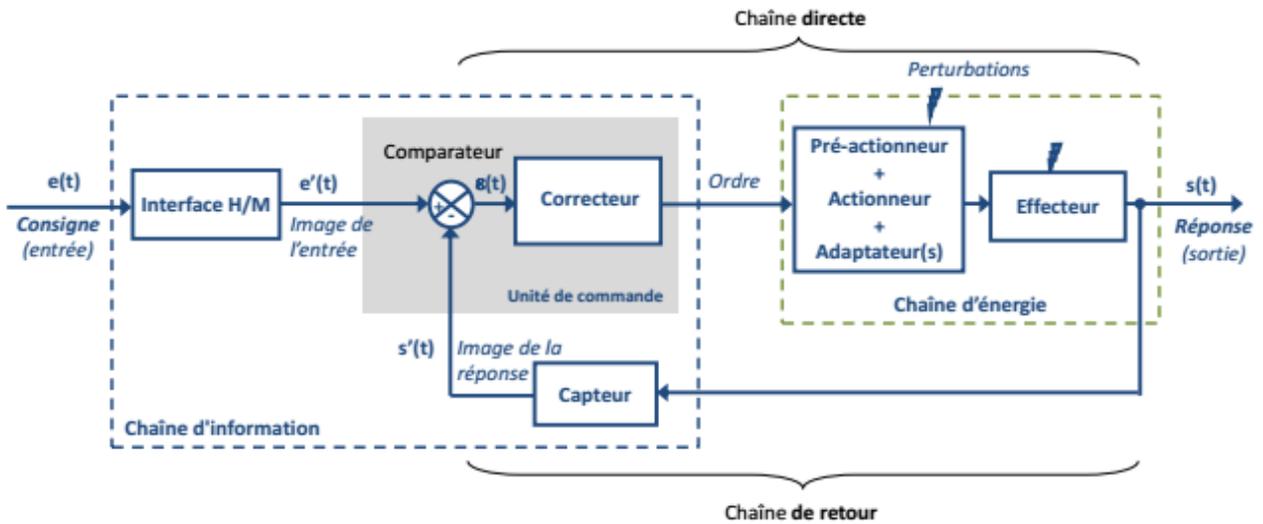
Régulateur de niveau d'eau



Structure et performances des systèmes asservis

5. Représentation schématique des systèmes asservis

Un système asservi pluri-technologique présente généralement une **structure en schéma-bloc fonctionnel** comme celle présentée ci-dessous. *Notions de chaîne directe, chaîne de retour, comparateur, erreur et image de l'erreur.*



Ainsi, un système asservi tient compte de l'effet de sa commande (si la consigne a été respectée ou non).

IMPORTANT :

Pour pouvoir être comparé, les signaux qui arrivent au comparateur doivent être de même nature !

CONSTITUANT	FONCTION
Interface H/M	Traduire la consigne en un signal utilisable par la commande
Correcteur	Corriger le signal de commande pour améliorer les performances du système (précision – rapidité – stabilité)
Capteur	Produire une image de la sortie
Comparateur	Comparer l'image de la sortie et l'image de l'entrée (consigne). Il délivre un signal $\varepsilon(t)$, en général électrique, qui est une image de l'erreur $e_r(t)$. Avec : $\varepsilon(t) = e'(t) - s'(t)$ et $e_r(t) = e(t) - s(t)$.

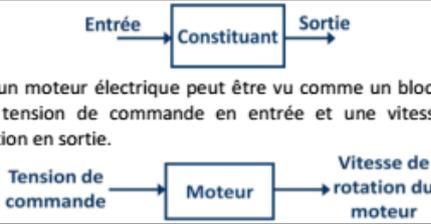
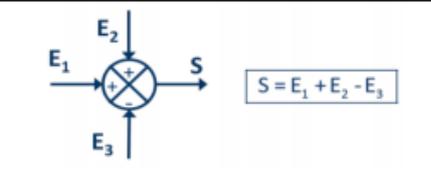
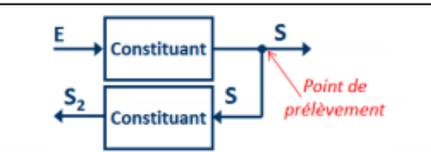
Un système asservi est constitué de deux chaînes :

- la **chaîne directe**, entre le comparateur et le point de prélèvement du capteur, qui assure les fonctions de commande et de puissance
- la **chaîne de retour**, entre le point de prélèvement du capteur et le comparateur, qui assure la fonction de mesure du signal de sortie.

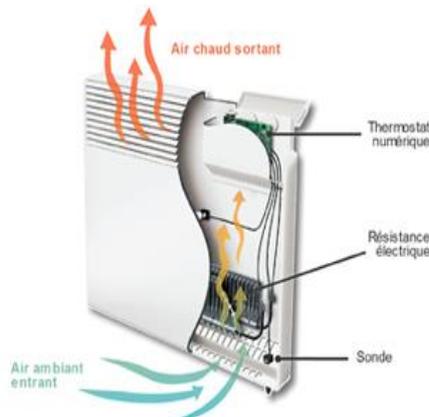
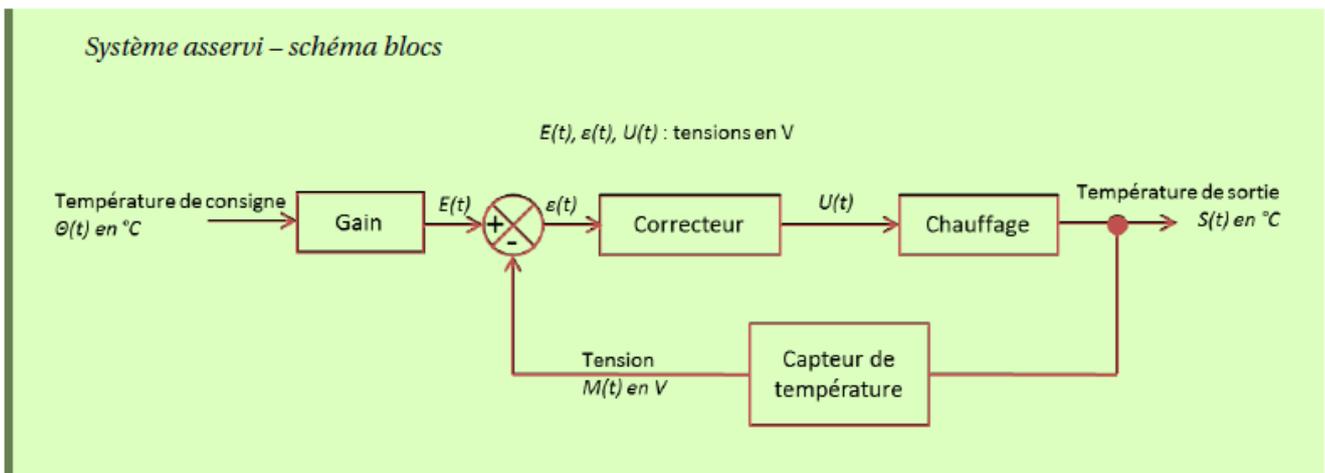
Structure et performances des systèmes asservis

Blocs, comparateur et point de prélèvement

Les trois éléments de base du schéma-bloc sont :

<p>le bloc qui représente un constituant du système asservi (interface H/M, capteur, actionneur,...).</p> <p>Ce bloc comporte une seule entrée et une seule sortie. Il est orienté par une relation de causalité.</p>	 <p>Ex : un moteur électrique peut être vu comme un bloc avec une tension de commande en entrée et une vitesse de rotation en sortie.</p>
<p>Le comparateur (soustracteur ou sommateur) qui comporte plusieurs entrées mais une seule sortie.</p> <p>Ces entrées peuvent être additionnées ou soustraites.</p>	 <p>$S = E_1 + E_2 - E_3$</p>
<p>Le point de prélèvement qui prélève, sans le modifier, le signal en un point.</p>	 <p>Point de prélèvement</p>

Exemple

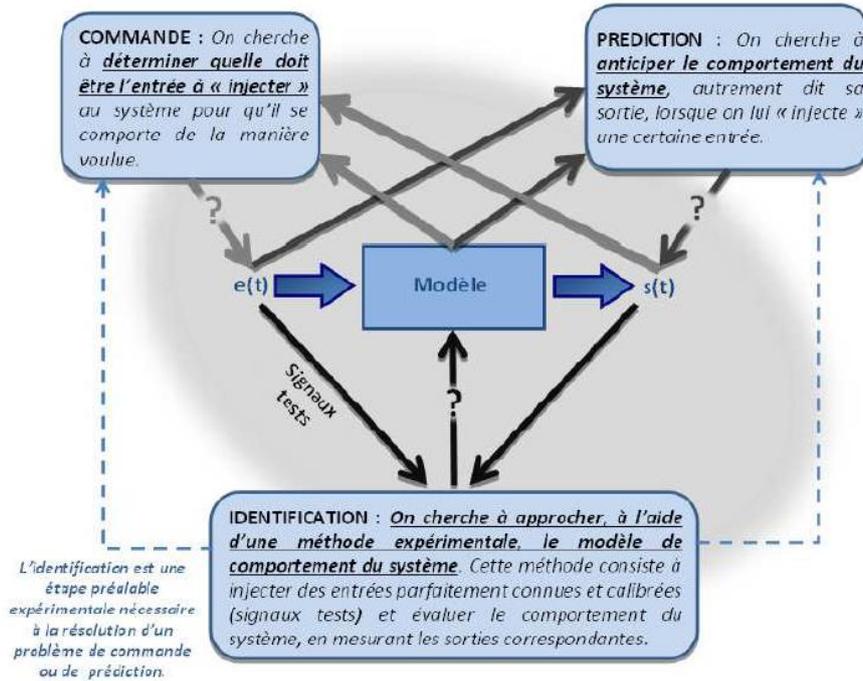


6. Démarche de modélisation et d'étude des systèmes asservis en CPGE

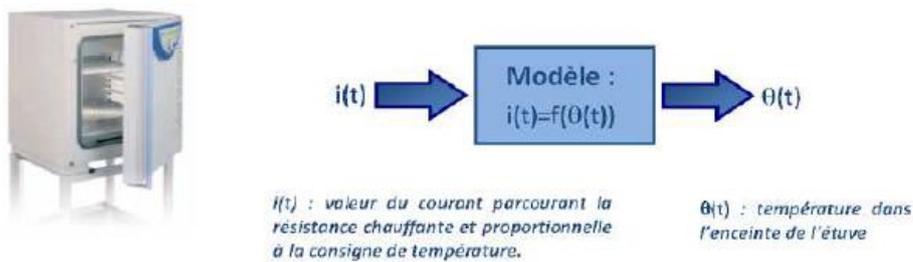
Bien qu'ils soient peu traités en CPGE, les problèmes de commande sont les plus proches de la réalité industrielle :

« Comment commander le système pour qu'il se comporte comme prévu ? »

L'étude des systèmes continus peut donc conduire à rencontrer 3 types de problèmes :



La première étape correspond à une **phase de modélisation des entrées du système** ainsi que **du système lui-même**, elle permet d'élaborer un **MODELE DE CONNAISSANCE grâce aux lois fondamentales (issues de la physique)**. Ce modèle de connaissance se traduit souvent par une **relation mathématique non linéaire** qui peut être assez complexe et comporter de nombreux paramètres à identifier.



La deuxième étape consiste à obtenir un **MODELE DE COMPORTEMENT**. On peut l'obtenir de 3 façons différentes:

- En simplifiant le modèle de connaissance en le **linéarisant autour d'un point de fonctionnement**. On obtient à l'issue de cette étape, un modèle de comportement dont la validité reste limitée à de petites variations autour du point de fonctionnement choisi. Le modèle de comportement est caractérisé par une fonction mathématique que l'on appelle **fonction de transfert (FT)**.
- En **expérimentant** le système (**entrées tests** pour identifier le modèle de comportement)
- En utilisant des **outils de simulation (SCILAB)** sur un **MODELE SIMULE** proche du modèle de comportement (**hypothèses simplificatrices lors de la modélisation**)





Structure et performances des systèmes asservis

7. Performances des systèmes asservis

Une simulation ayant été réalisée, il est alors nécessaire d'analyser et de valider la réponse du système obtenue. Le cahier des charges fonctionnel définit les critères et les valeurs associées pour qualifier et quantifier les performances attendues du système.

exemple CDC - tableau des exigences (robot Planeco maxpid)

#	Id	Nom	Text
1	1.2.3	<input checked="" type="checkbox"/> Capacité du flux d'entrée	Jusqu'à 2000 kg /h pour 8 modules bras en série
2	1.2.1	<input checked="" type="checkbox"/> Capacité de tri	2000 objets triés par heure et par module
3	1.2.2	<input checked="" type="checkbox"/> Cadences de mesure	jusqu'à 40 objets/sec
4	1.1.3	<input checked="" type="checkbox"/> Dimensions des corps creux	de 0,25 à 5 litres. < à 500 g
5	1.3.1	<input checked="" type="checkbox"/> Energie électrique	< 7 kW de consommation électrique
6	1.3.2	<input checked="" type="checkbox"/> Energie pneumatique	Pression maximale : 7 Bar
7	1.4	<input type="checkbox"/> Normes	Le robot doit être conforme aux normes européennes

Quatre critères principaux permettent d'analyser la réponse d'un système asservis :

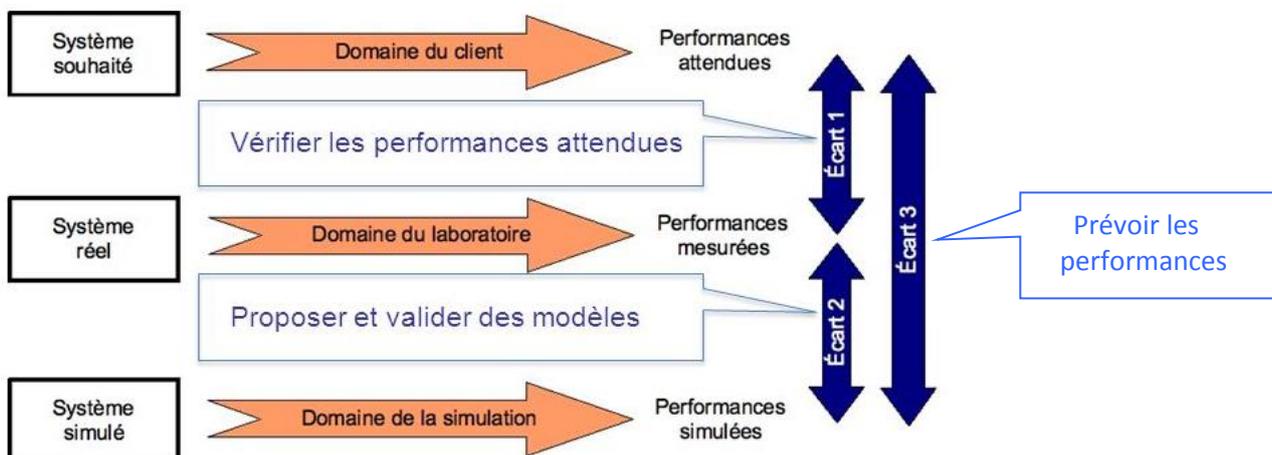
- la stabilité
- la précision
- la rapidité

L'asservissement « idéal » est un système ayant une bonne stabilité, une bonne précision ainsi qu'un régime transitoire rapide et bien amorti. Cependant ces critères de performances ne sont pas toujours compatibles.

Par exemple, un processus rapide est généralement léger, il a ainsi une faible inertie et risque d'être peu amorti voire instable. D'autre part si on veut améliorer la précision, on raidit l'asservissement et on risque de tomber alors sur un phénomène d'instabilité.

Tout l'art de l'automaticien est de réaliser une partie commande permettant de respecter au mieux ces critères.

En CPGE PTSI, lors des travaux pratiques notamment, vous serez amené à travailler sur les 3 modèles présentés ci-avant. L'objectif est de comparer les écarts entre les différentes performances obtenues du système.





Structure et performances des systèmes asservis

7.1. Signaux tests pour évaluer les performances

Pour définir et évaluer précisément ces critères, il faut **procéder à des tests** soit sur le **système réel**, soit **en simulation**⁽¹⁾. En pratique, on utilise quatre types d'entrée qui permettent de mieux connaître les réactions du système, et donc ses **performances**.

Pour tous ces signaux et par convention : $e(t)=0$ pour $t<0$

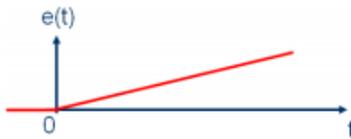
L'échelon : entrée constante d'amplitude E_0



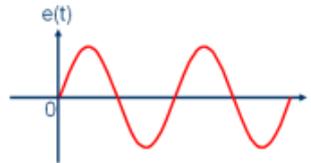
L'impulsion : entrée très brève



La rampe : entrée linéairement variable



La sinusoïde



Une fois ces signaux test appliqués, l'objectif est d'obtenir, à l'aide de **réglage**, le **meilleur compromis** entre les différents critères de performances.

7.2. Caractériser l'erreur par la précision

L'erreur n'est définie que pour un **système stable** ayant des **grandeurs d'entrée et de sortie de même nature et comparables**.

L'**erreur**, ou l'**écart**, notée $e_r(t)$ est la différence entre **valeur souhaitée** (=entrée) et la **valeur réellement atteinte** (=sortie) :

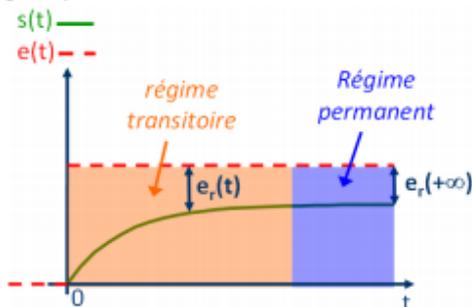
$$e_r(t) = e(t) - s(t) \text{ avec } e(t): \text{entrée et } s(t): \text{sortie}$$

Le **régime permanent** est établi lorsque l'**erreur n'évolue plus** au cours du temps, soit **pour un temps suffisamment grand**, "tendant vers l'infini".

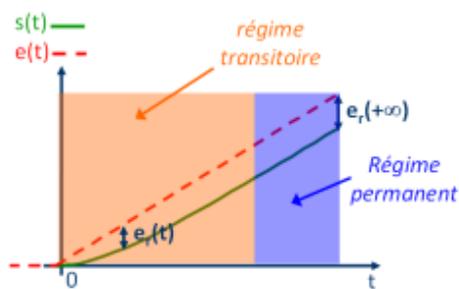
La **précision** est évaluée par l'**erreur en régime permanent**, appelée aussi **erreur statique** :

$$e_r(+\infty) = e(+\infty) - s(+\infty)$$

On parlera d'**erreur de position** (ou erreur indicielle) lorsque l'**entrée est constante** en régime permanent.



On parlera d'**erreur de poursuite** (ou erreur de suivi) lorsque l'**entrée varie linéairement** en régime permanent.





Structure et performances des systèmes asservis

Application : Le graphique ci-contre représente la réponse d'un système à une consigne dite "en échelon".

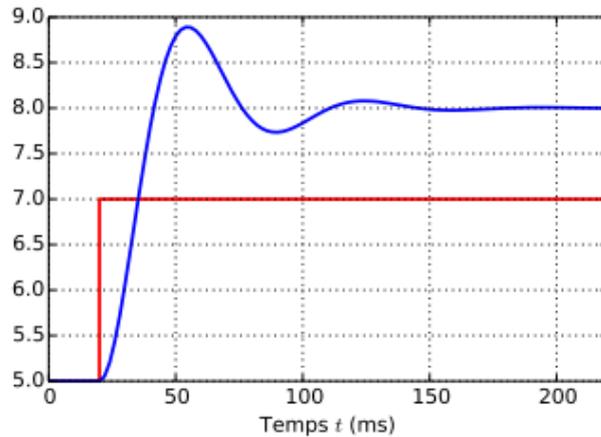
A3 - Déterminer approximativement l'instant de début du régime permanent.

Après 190 ms, la réponse est sensiblement constante.

A4 - Déterminer l'erreur (statique ou de poursuite).

La consigne est constante : erreur statique. On suppose que les grandeurs d'entrée et de sortie sont comparables.

$$e_r = e(+\infty) - s(+\infty) = 7 - 8 = -1$$



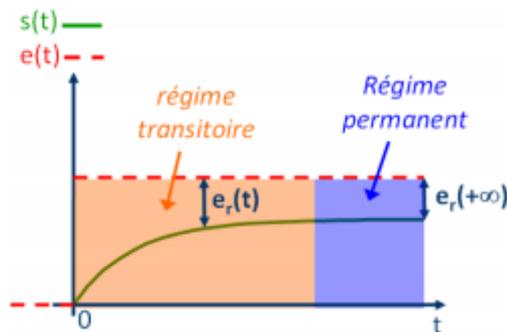
7.3. Caractériser la rapidité par le temps de réponse à 5%

La rapidité est caractérisée par le **temps que met le système à réagir à une variation brusque de la grandeur d'entrée** (temps de réponse). La rapidité est évaluée, pour une **entrée en échelon** et un système stable, par le temps que met le système pour que la sortie soit proche de sa valeur finale.

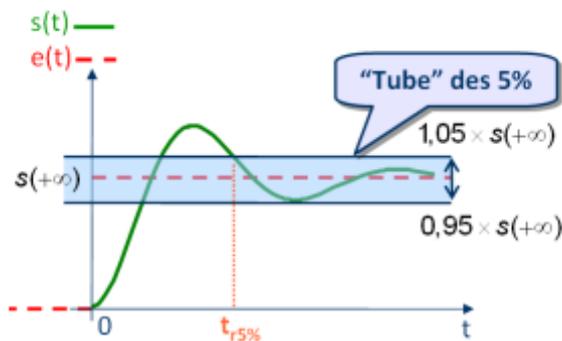
Par convention, la **rapidité** est caractérisée par le **temps de réponse à 5%** noté $tr_{5\%}$.
Le temps de réponse à 5% est la **durée** mise par la sortie pour **atteindre la valeur finale**, à $\pm 5\%$ de la **variation totale de la sortie**, et ne plus s'en écarter d'avantage.

Le "tube à 5%" est défini par l'intervalle : $[s_{+\infty} - 0,05 \Delta s_{+\infty}, s_{+\infty} + 0,05 \Delta s_{+\infty}]$

Système sans dépassement :



Système avec dépassement :



Application : Le graphique ci-contre représente la réponse d'un système à une consigne dite "en échelon".

A2 - Déterminer le temps de réponse à 5%.

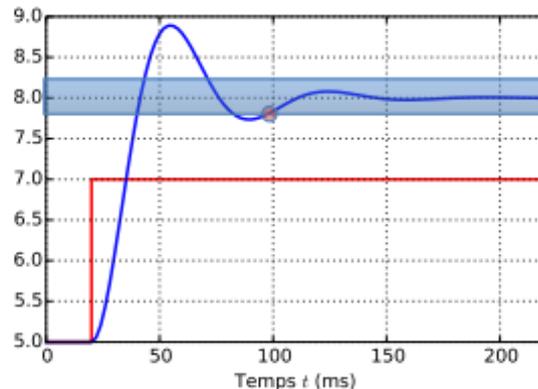
La valeur finale est : $s(+\infty) = 8$

La variation totale de la sortie vaut 3.

Le "tube des 5%" correspond à l'intervalle $[8 - 3 \times 0,05 ; 8 + 3 \times 0,05]$, soit $[7,85 ; 8,15]$.

Le signal de sorti reste dans le tube à partir de $t = 100$ ms. La sollicitation débutant à $t = 20$ ms, on obtient :

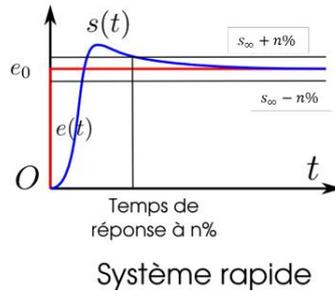
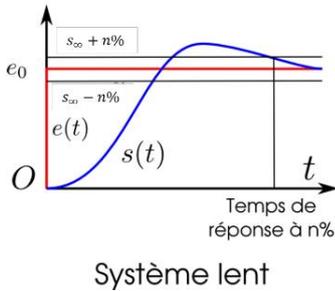
$$tr_{5\%} = 100 - 20 = 80 \text{ ms}$$





Structure et performances des systèmes asservis

Exemple:



7.4. Caractériser la stabilité des dépassements

La stabilité traduit la propriété de **convergence temporelle** asymptotique vers un **état d'équilibre**.

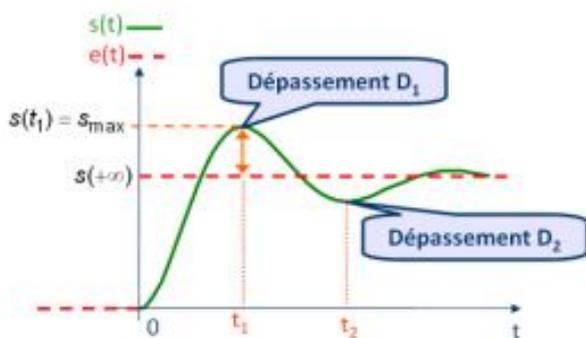
Un système est **stable** si, pour une entrée en échelon, la grandeur de sortie **converge** vers une valeur constante, dite **valeur finale**.
 La **valeur finale**, lorsqu'elle existe, correspond à la **valeur de sortie** du système pour un **temps suffisamment grand** ("tendant vers l'infini"). Notée : $s(+\infty)$ ou $s_{+\infty}$

Soit s_0 la valeur initiale de la grandeur de sortie.

La **variation totale** de la grandeur de sortie est $\Delta s_{+\infty} = s_{+\infty} - s_0$, notée aussi $\Delta s(+\infty)$.

Une réponse présente un **dépassement** lorsque la grandeur de sortie "coupe" la **valeur finale**. La courbe de sortie présente un extrémum.
 la stabilité est généralement caractérisée par le **nombre de dépassements** et/ou **l'amplitude du premier dépassement** (le plus critique), noté D_1 pour une entrée en échelon.
 Le **dépassement absolu** d'ordre k vaut $D_k = |s(t_k) - s(+\infty)|$
 Le **dépassement relatif** d'ordre k vaut $D_{k\%} = \frac{D_k}{|\Delta s(+\infty)|}$

Système avec dépassement :



Pour certains systèmes, il est impératif qu'il n'y ait aucun dépassement.

Exemple : l'amarrage du module ATV à la station ISS (risque de collision).





Structure et performances des systèmes asservis

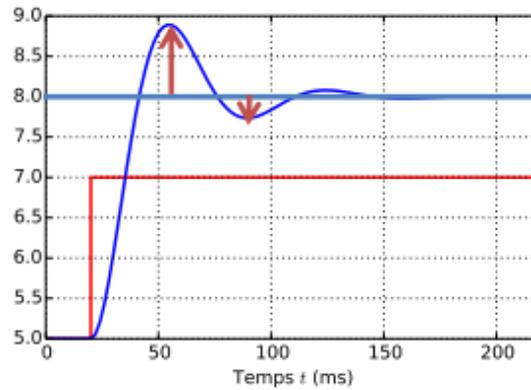
Application :

A1 - Estimer D_1 , $D_{1\%}$, D_2 , $D_{2\%}$ et le nombre de dépassements

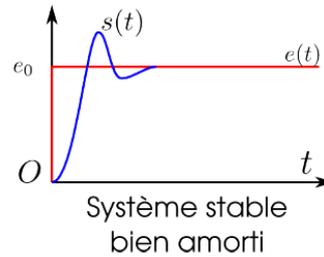
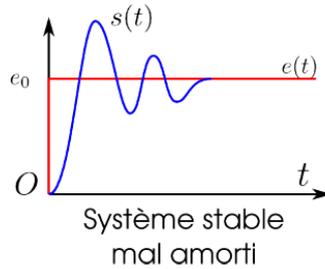
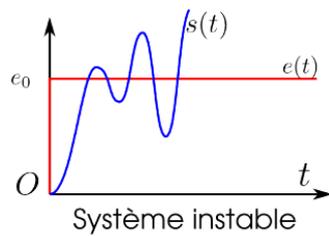
$D_1 = |8,9 - 8| = 0,9$
 et $D_{1\%} = 0,9 / 3 = 0,3 = 30\%$

$D_2 = |7,7 - 8| = 0,3$
 et $D_{2\%} = 0,3 / 3 = 0,1 = 10\%$

4 dépassements visibles « à l'œil ».



Exemples:



Un système peut présenter une sortie divergente soit en raison du comportement dynamique intrinsèque du système commandé soit en raison du bouclage. Ce comportement est intolérable pour un système asservi. Dans la pratique la seule stabilité asymptotique n'est pas suffisante. On exigera, dans la plupart des cas, un comportement transitoire correctement amorti.