Culture Scientifique de Base en Sciences pour l'ingénieur

Commander des procédés

L'Automatique

Un principe

Nous voulons commander

1. Généralités

2. Les automatismes

3. Modélisation des automatismes

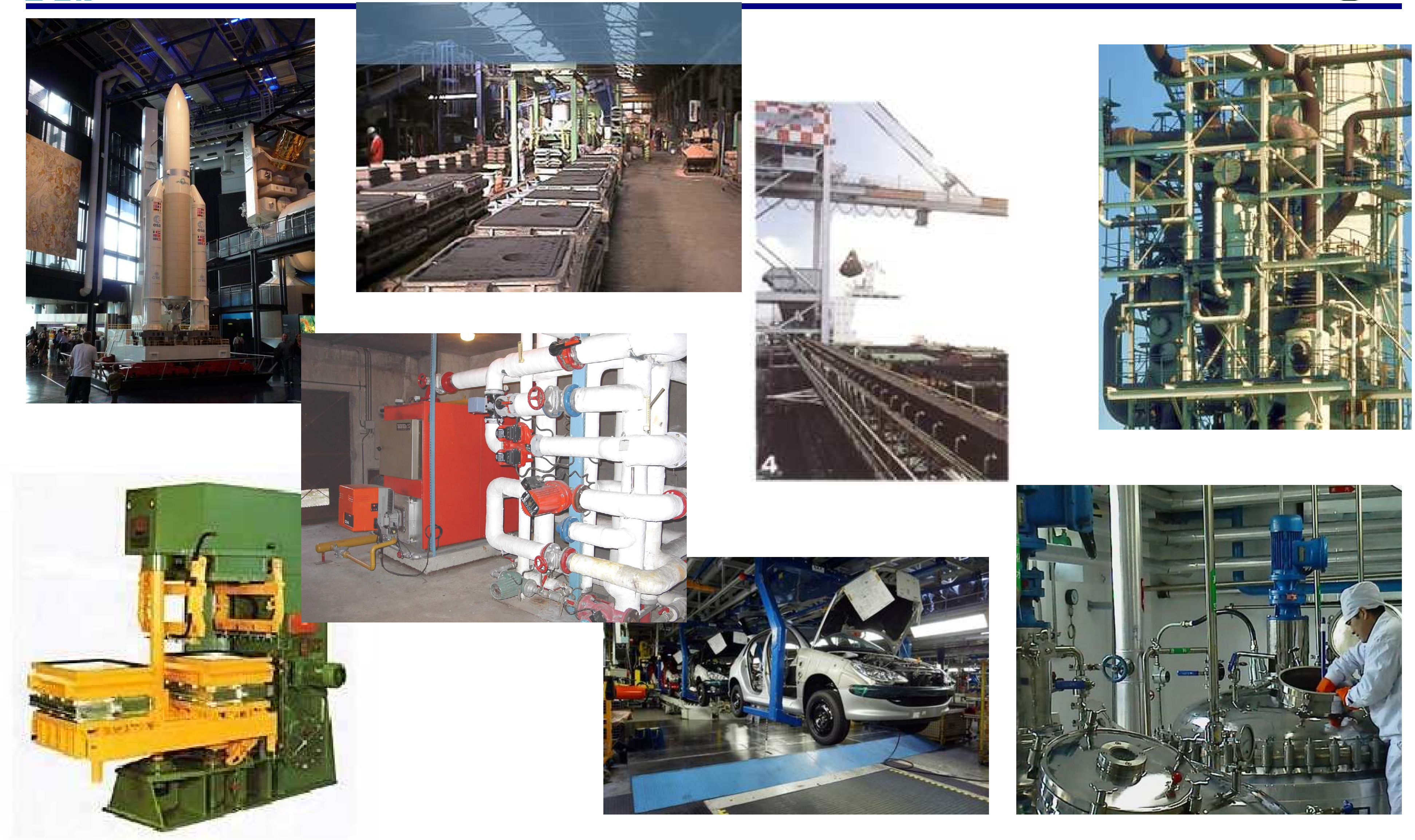
4. Un peu de technologie

5. Les asservissements

6. Les correcteurs

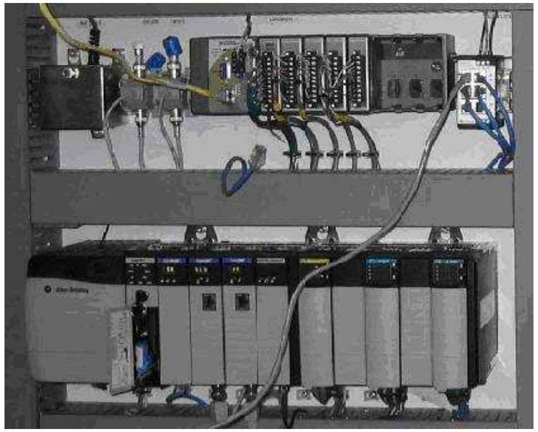
7. La notion de dynamique

Commander quoi ?



Un peu de tout......voire plus

Commander comment ? Avec quoi ?



- Des automates programmables

- Des ordinateurs industriels

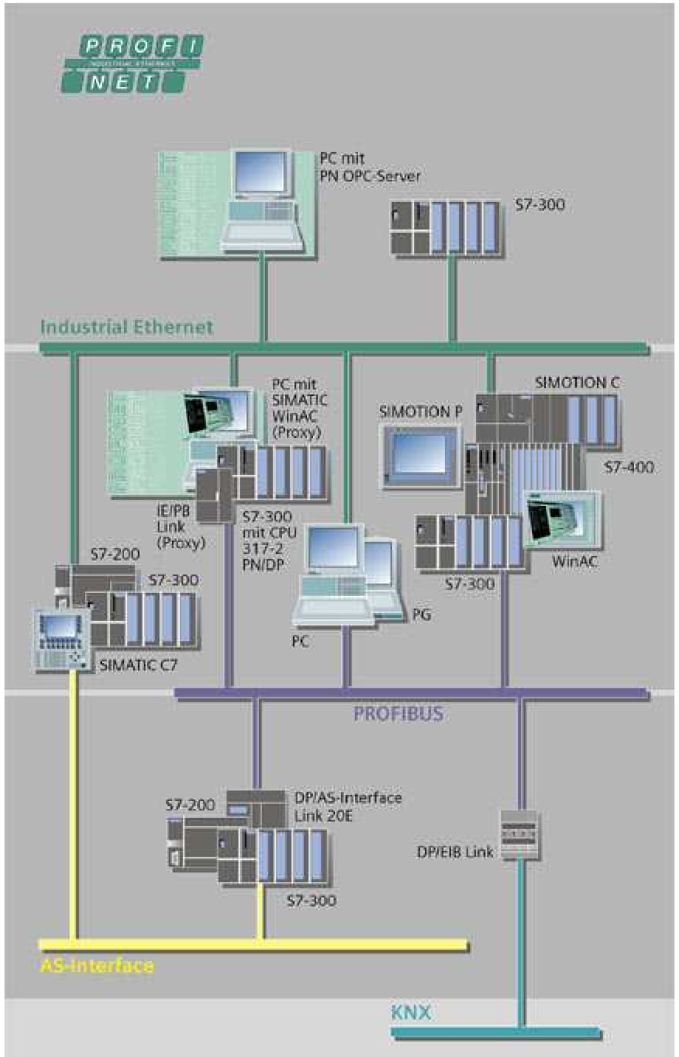
Des outils de l'informatique industrielle

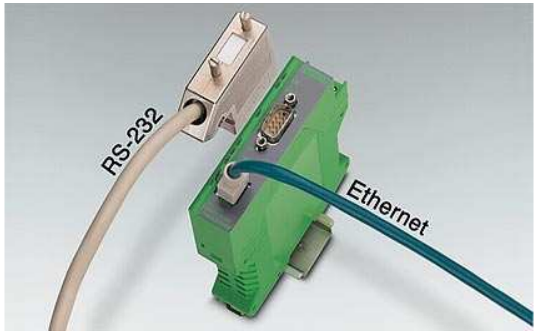
Comment intervient l'homme ?

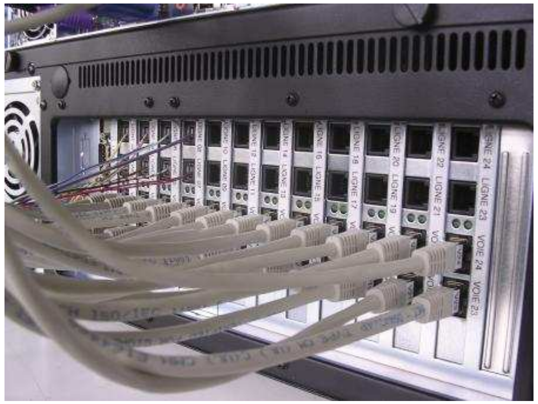
Il imagine les programmes des automates ou des ordinateurs.

- Il communique avec ceux-ci soit pour charger de nouveaux programmes, soit pour indiquer au programme en cours d'exécution les paramètres qu'il souhaite voir respectés (température...).
- il y a une interface entre l'homme et les machines (ordinateur, pupitre de commande, matériel spécifique à base d'informatique industrielle).

Comment tout cela communique-t-il ?







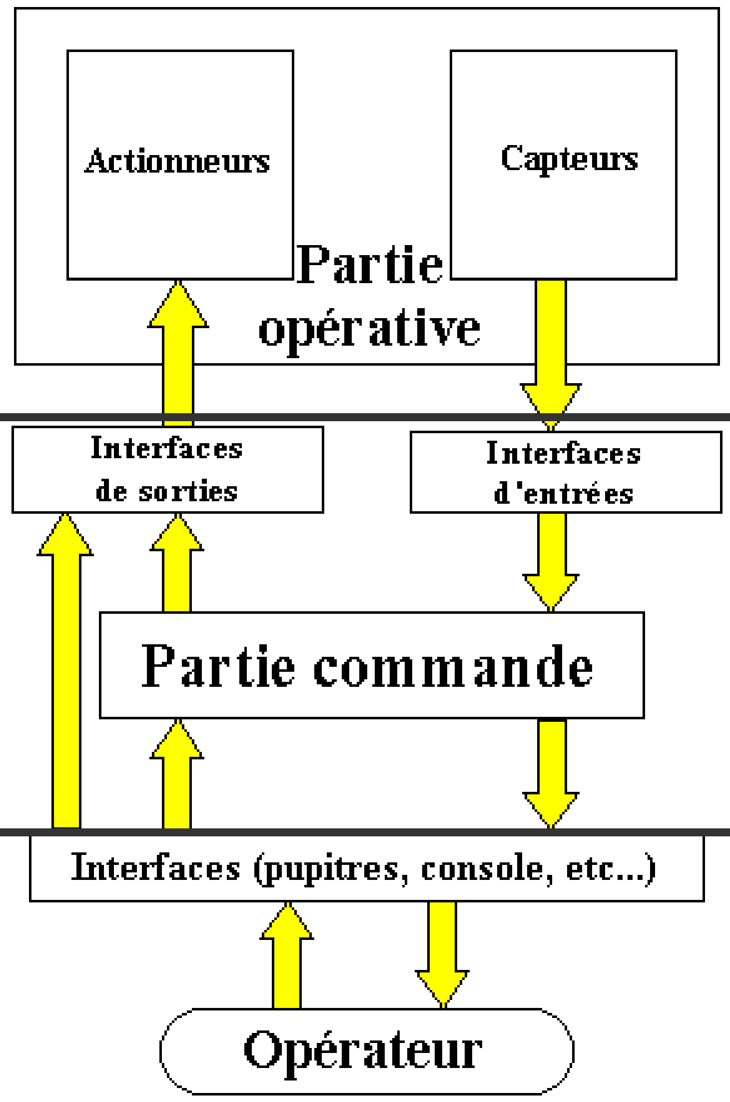
Par des réseaux de terrain ou réseaux industriels

Schéma de principe général

La partie Opérative ou système à commander. C'est aussi ce que l'on appelle le procédé ou le processus. Cela peut être une machine à laver ou une chaîne de production...

La partie Commande qui doit fournir les ordres au système à commander.

L'Interface Homme Machine : IHM.



Les deux

Le numérique pour :

- La programmation
- L'acquisition et le traitement des données
- La communication
- ....

L'analogique pour :

- Les actionneurs
- Les capteurs
- Fournir l'énergie nécessaire
- ....

Le découpage de l'Automatique

Il y deux grandes classes de problèmes :

- Les systèmes à évènements discrets

  ⇨ AUTOMATISMES

- Les systèmes à évènements continus

  ⇨ ASSERVISSEMENTS

Ma machine à laver

Elle possède des boutons : marche/arrêt, programmateur qui sépare l'action en plusieurs étapes, etc. Au début d'une étape (événement binaire) une action est déclenchée. A la fin d'une étape (autre événement binaire) une action est arrêtée. C'est un système à événements discrets : **un automatisme.**

La température demandée est de 40℃, un dispositif se met en fonctionnement pour assurer cette température pendant tout le temps désiré. C'est un système à évènements continus : **un asservissement (ou régulation)**. Cette partie est souvent traitée en échantillonné par un petit microprocesseur correctement programmé.

Un système automatisé

- Dans ma machine à laver, il y a des échanges d'informations :
  - Le programmateur (automatisme) donne l'ordre au régulateur de se mettre en action.
  - Lorsque la température de 40℃ est atteinte, le rég ulateur le fait savoir au programmateur (indication binaire) pour qu'il puisse continuer son action.

- Un système automatisé comprend les deux types de systèmes : automatismes et régulateurs. Le fonctionnement d'un appareil simple ou complexe (avion,...) implique beaucoup de systèmes des deux types qui fonctionnent en coordination.
- Dans le domaine industriel, à l'échelle d'une fabrication (usine) il y a un grand nombre d'automatismes et de régulateurs : nous avons un S.A.P. (Système Automatisé de Production).

Le paradigme de l'Automatique

- Il faut découper le problème en sous-problèmes, certains sont du domaine de l'automatisme, d'autres de celui de la régulation.
- Les sous-problèmes sont résolus par des personnes différentes, certains ingénieurs ont une formation poussée en automatismes, d'autres en régulation.
- Il est impératif de synchroniser l'ensemble, c'est le problème de la supervision dédié aux chefs de projet.

1. Généralités
2. **Les automatismes**
3. Modélisation des automatismes
4. Un peu de technologie
5. Les asservissements
6. Les correcteurs
7. La notion de dynamique

Les automatismes (1)

Ils concernent les systèmes à évènements discrets :

- Ils réagissent sur un événement qui peu intervenir n'importe quand (exemple une alarme).
- L'évènement est de type binaire et sa présence déclenche une action.
- Les signaux entre partie opérative et partie commande sont de type binaire.
- Ces systèmes sont en majorité gérés par des automates programmables ou A.P.I. (Automates Programmables Industriels).

Les automatismes (2)

Deux niveaux d'intervention :

- La partie technique, dévoluée au technicien, consiste à connaître le fonctionnement des API et ce qui tourne autour.
- La partie synthèse, dévoluée à l'ingénieur, consiste à savoir comment poser correctement le problème pour éviter les disfonctionnements. Il faut savoir modéliser son problème. Pour cela nous disposons de deux outils théoriques essentiels :
  - Le grafcet
  - Les réseaux de Petri

1. Généralités
2. Les automatismes
3. **Modélisation des automatismes**
4. Un peu de technologie
5. Les asservissements
6. Les correcteurs
7. La notion de dynamique

Le principe des réseaux de Pétri

Le fonctionnement d'un système à évènements discrets peut se décrire par un graphique composé de :

- Places qui symbolisent l'état dans lequel se trouve le système
- Transitions qui symbolisent les évènements discrets susceptibles d'intervenir
- Arcs : lignes orientées qui relient les places et les transitions

PLACE TRANSITION ARC

Un exemple simple

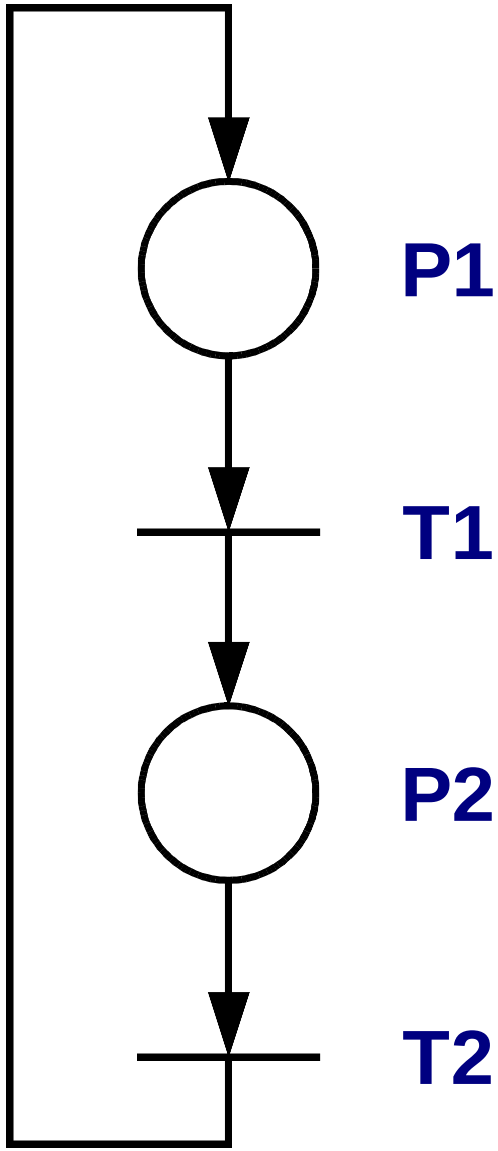
Interrupteur marche/arrêt

Places (états) :

- P1 : le système est à l'arrêt
- P2 : le système est en fonctionnement

Transitions (évènements) :

- T1 : le bouton marche est enclenché
- T2 : le bouton arrêt est enclenché

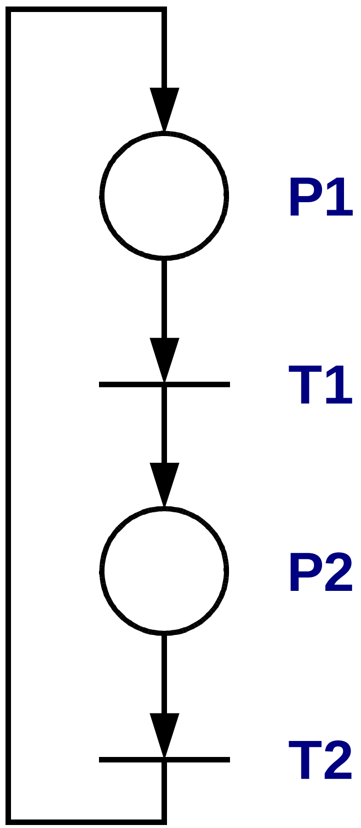


Définitions et remarques

Place aval, place amont : une place est en amont d'une transition quand l'arc qui les lie va de la place vers la transition. Si l'arc va de la transition vers la place, nous avons une place aval (ex : P1 est en amont de T1 et en aval de T2),

Une définition identique se fait pour les transitions par rapport aux places (ex : T2 est en aval de P2 et en amont de P1).

Dans une description correcte nous avons toujours une succession place-transition-place-... Deux places ne peuvent être liées directement et il en est de même des transitions.



Les jetons

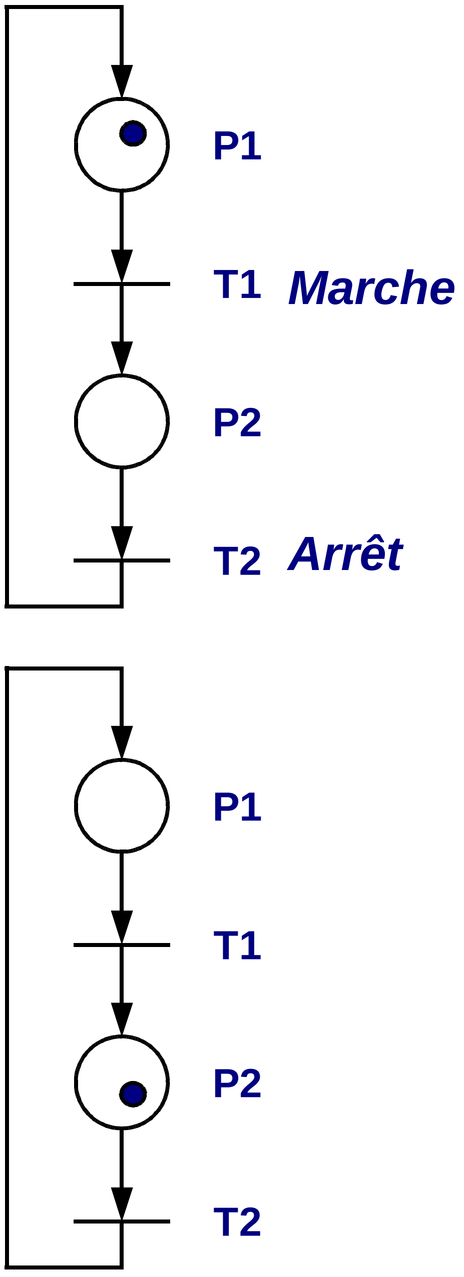
Le jeton : un jeton (ou marque) indique si une machine est disponible ou pas mais peut aussi indiquer le nombre de ressources disponibles :

- Machine à l'arrêt : la place contient un jeton.
- Machine en fonctionnement : la place n'a pas de jeton.
- Un système de stockage (ressource) contient 7 pièces en attente : la place contient 7 jetons.

Selon l'évolution des tâches effectuées, les places peuvent ainsi contenir un ou plusieurs jetons.

L'évolution des tâches

- Pour passer d'un état à un autre (d'une place à une autre) il faut franchir une transition,
- Conditions de franchissement : pour qu'une transition soit franchie il faut que toutes ses places amont contiennent au moins 1 jeton et que l'évènement associé à la transition se produise.
- Effet du franchissement : lorsqu'une transition est franchie, chaque place amont perd un jeton et chaque place aval en récupère un.



Un exemple (1)

Un atelier est constitué d'une machine de coupe et d'un stockage. Quand une commande arrive, la pièce est stockée et la coupe est effectuée lorsque la machine est disponible.

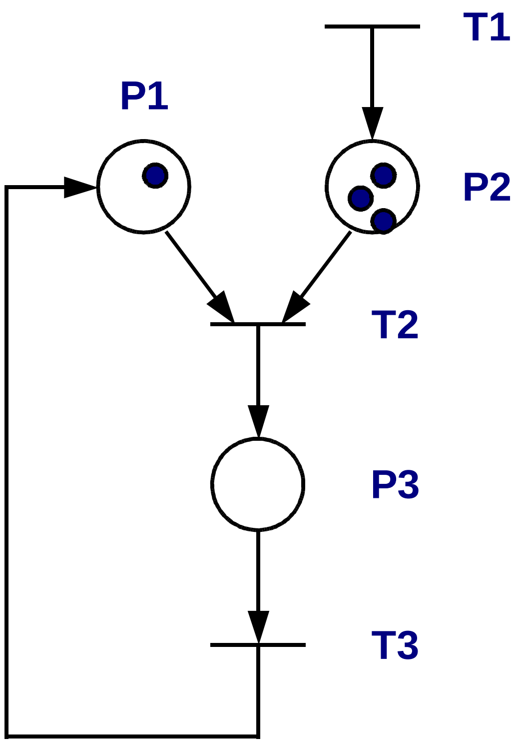
Les places :

- P1 : la machine est en attente.
- P2 : des commandes sont en attente.
- P3 : la machine traite une commande.

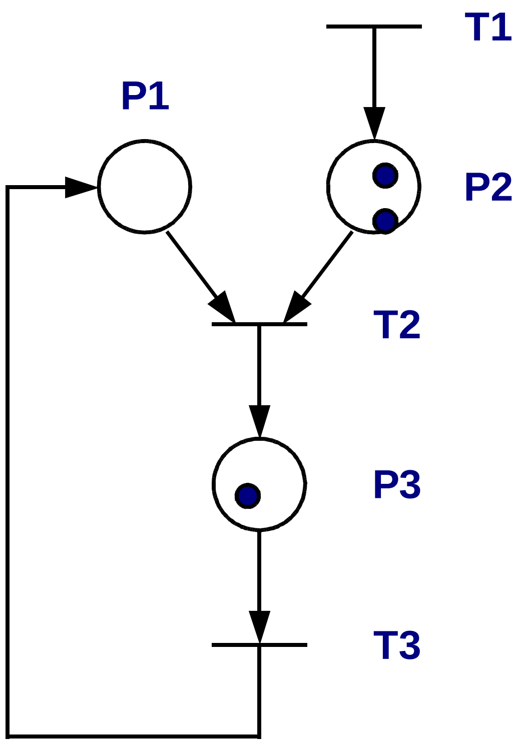
Les transitions :

- T1 : arrivée d'une commande.
- T2 : prise d'une commande et début de la découpe.
- T3 : fin de la découpe.

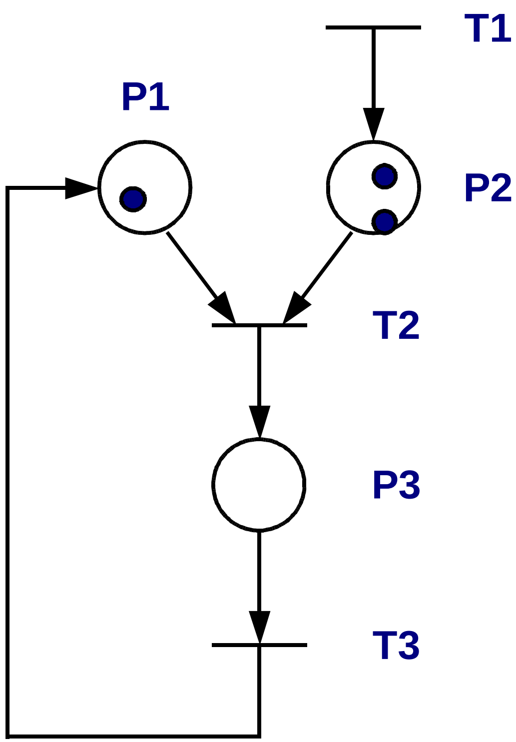
Un exemple (2)



3 commandes en attente, machine disponible



Traitement d'une commande



Commande traitée

Un peu d'exercice

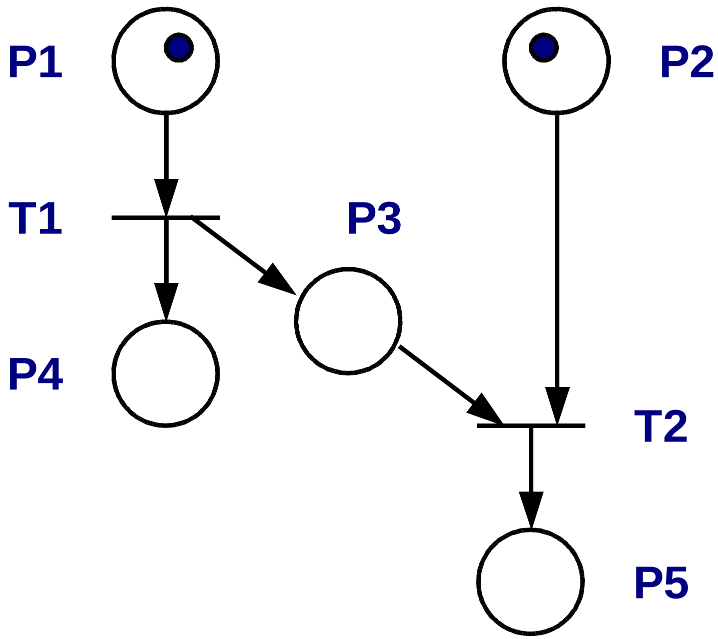
- *Deux processeurs travaillent en parallèle et nous devons effectuer deux opérations :*

  a x b + e   et   a x b + c x d

- *Pour gagner du temps le premier processeur réalise l'opération a x b puis ajoute e tout en rendant le résultat a x b disponible.*
- *Le second processeur réalise l'opération c x d puis la seconde opération a x b + c x d.*
- *En partant deux places initiales :*
  - *P1 le processeur 1 réalise a x b*
  - *P2 le processeur 2 réalise c x d*

Proposer un réseau de Pétri décrivant l'opération de calcul parallèle.

Solution



Places:

- *P1 : le processeur 1 réalise a x b*
- *P2 : le processeur 2 réalise c x d*
- *P3 : a xb est disponible*
- *P4 : le processeur 1 effectue ax b + e*
- *P5 : le processeur 2 réalise a x b + c x d*

Transitions :

- *T1 : Le calcul de a x b est terminé*
- *T2 : le calcul de c x d est terminé*

Un autre problème classique

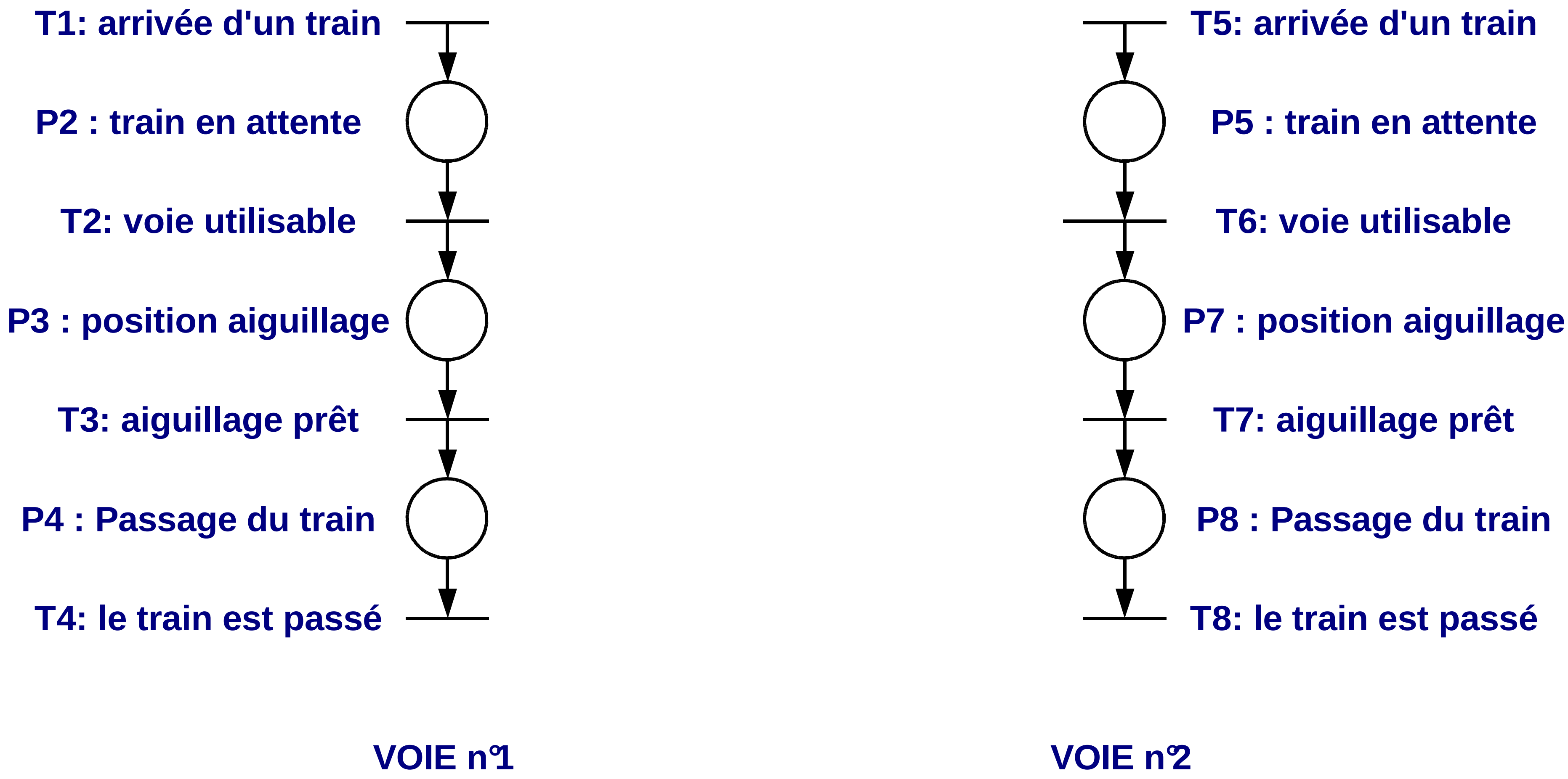
Deux lignes de chemin de fer utilisent un même tunnel qui ne comporte qu'une seule voie. Aux extrémités des voies sont situés des détecteurs de présence de trains et des aiguillages permettent de sélectionner la voie utilisatrice.

Fonctionnement :

- *La circulation des trains peut avoir lieu dans les deux sens*
- *En amont les lignes sont régulées pour qu'il n'y ait sur chacune d'elles qu'un seul train*
- *Quand un train est détecté on positionne correctement les aiguillages et les éventuels trains de l'autre ligne sont mis en attente (feux de signalisation)*
- *En cas de conflit, la voie 1 est prioritaire sur la voie 2*

Proposer un réseau de Petri

Passage sous tunnel : ébauche de solution



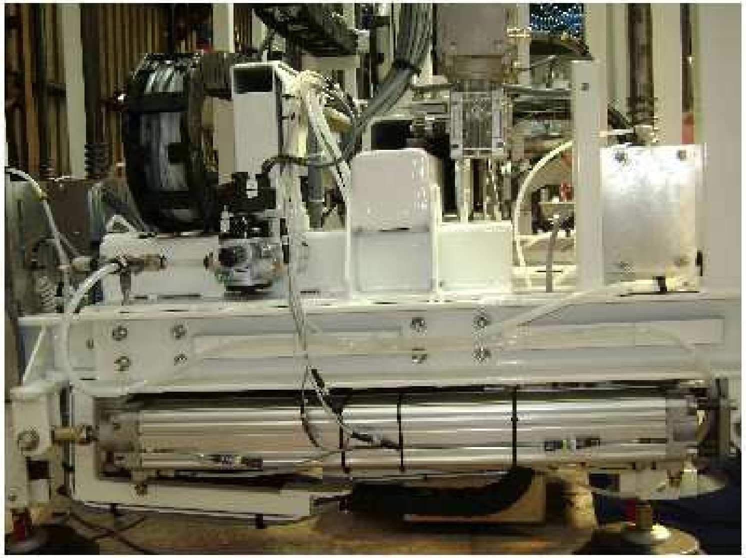
Comprendre le schéma et compléter la solution

1. Généralités
2. Les automatismes
3. Modélisation des automatismes
4. **Un peu de technologie**
5. Les asservissements
6. Les correcteurs
7. La notion de dynamique

Electronique - Electromécanique

Actionneurs à base de moteurs (continus, pas à pas) avec actions en rotation ou actions linéaires. Robotique, petites machines outils,....

Machines outils, aviation,....



1. Généralités
2. Les automatismes
3. Modélisation des automatismes
4. Un peu de technologie
5. **Les asservissements**
6. Les correcteurs
7. La notion de dynamique

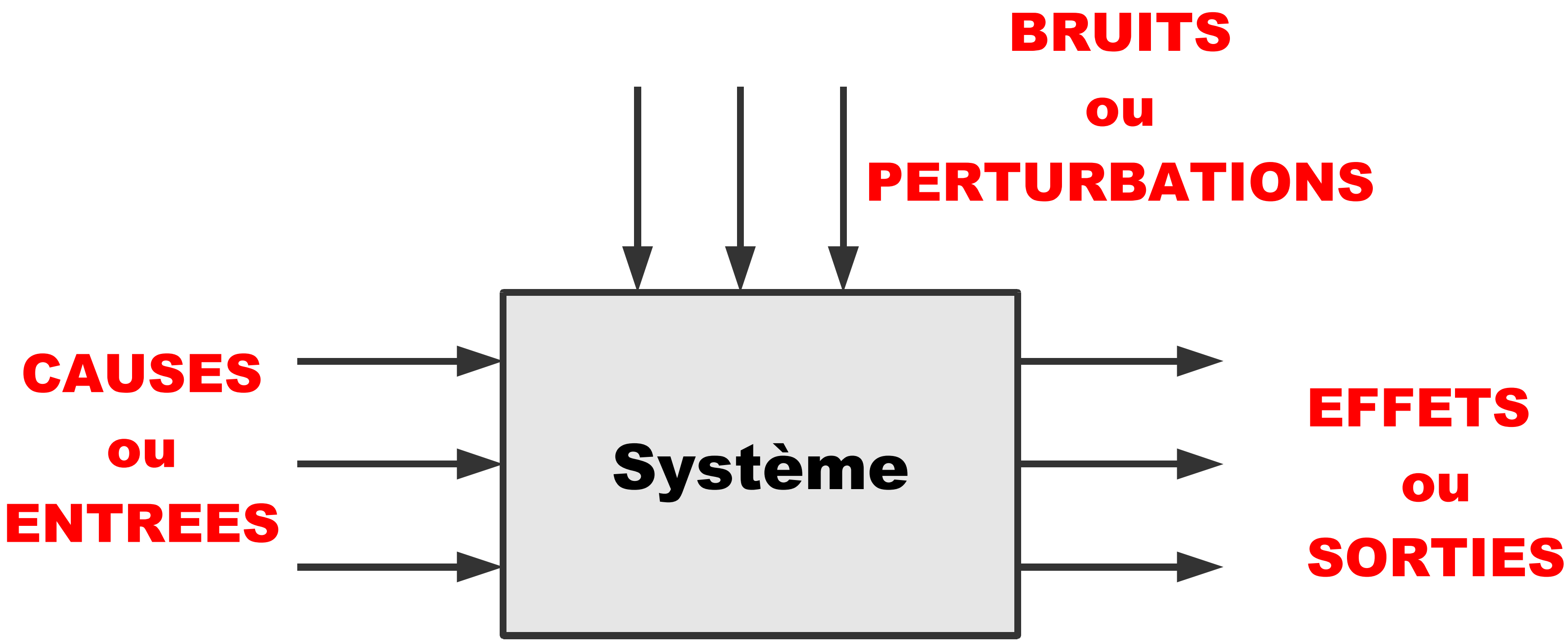
L'asservissement

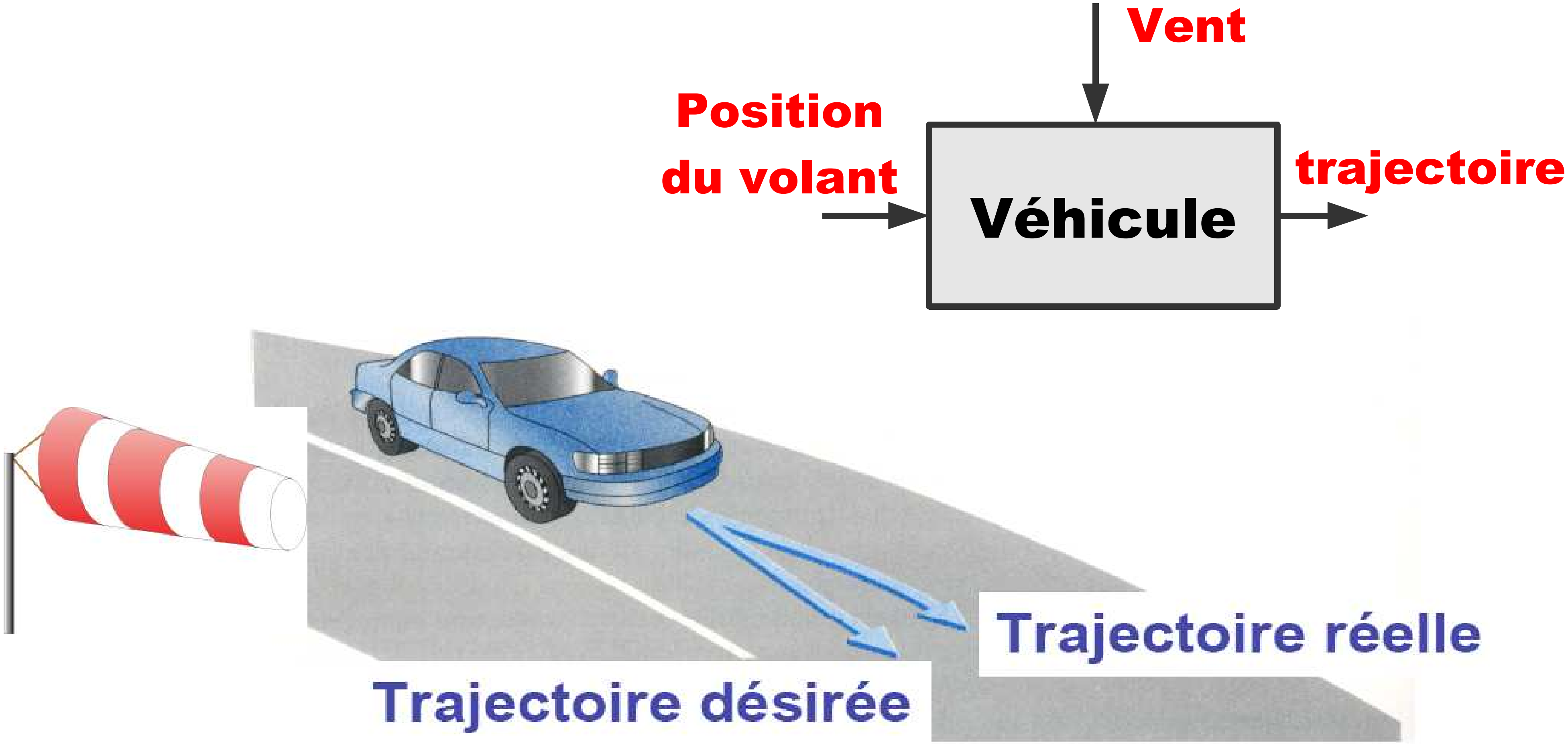
Concerne les systèmes à évènements continus :

- Des grandeurs sont mesurées en permanence (température,...).
- Pour traiter les signaux, on utilise souvent l'échantillonnage et le numérique.
- Les signaux entre partie opérative et partie commande sont en majorité de type continu échantillonné.
- Ces systèmes sont généralement gérés par des ordinateurs, des cartes spécifiques à base de microprocesseur ou de DSP (processeur de traitement du signal). Certains API ont souvent une partie qui permet d'effectuer de petites actions de cette catégorie.

Un système est un dispositif physique mettant en jeu un ensemble de phénomènes.

Du point de vue extérieur, un système est soumis à des signaux d'entrées : les causes. Il y aura des effets : les sorties. Son fonctionnement peut être perturbé par des bruits ou perturbations.





C'est ce qui se produit si le volant est maintenu en position fixe : pas d'intervention du conducteur, le système est dit en **boucle ouverte**.

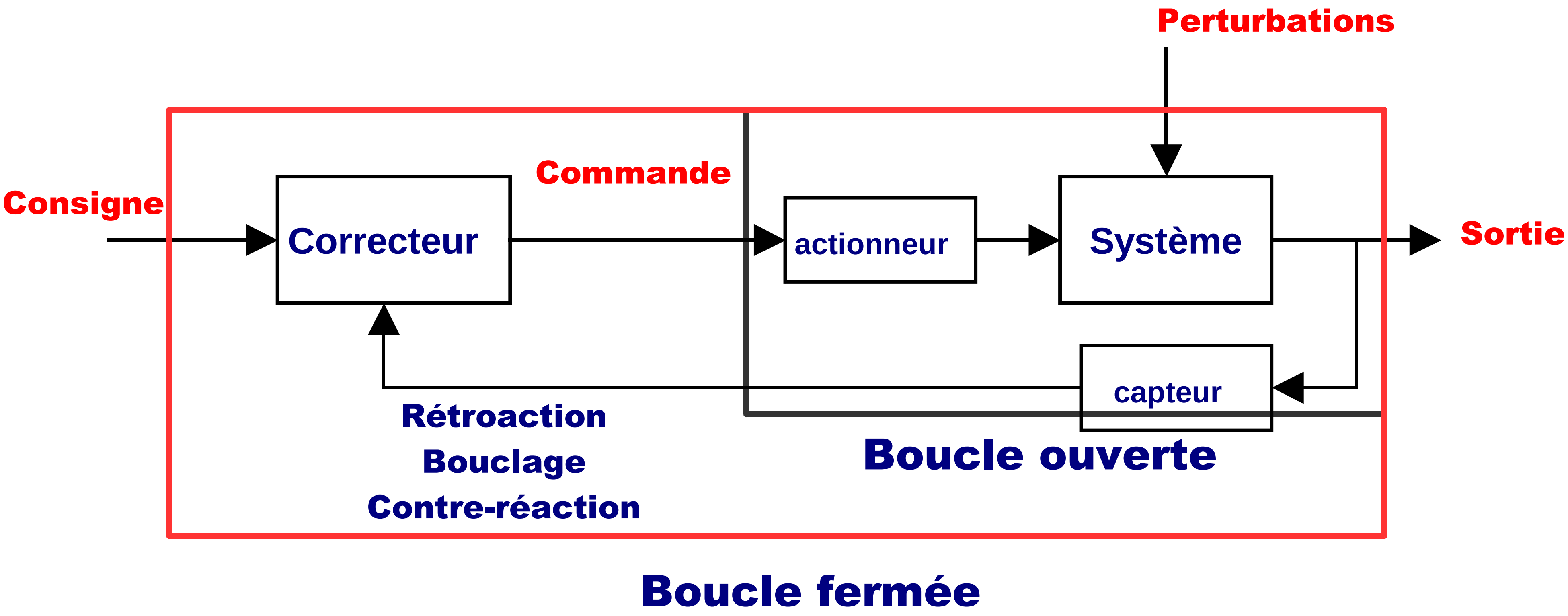
L'exemple précédent illustre la boucle ouverte, la commande (volant) est fixée et la trajectoire espérée peut être perturbée par le bruit (vent).

Si le conducteur intervient il se produit plusieurs choses :

- Il se rend compte que la trajectoire n'est pas correcte : mesure de la trajectoire par un **capteur**, ici l'oeil du conducteur.
- Il corrige la position du volant en fonction de ses observations : il joue un rôle de **correcteur**. Il y a commande de la trajectoire par un fonctionnement en boucle fermée.

Nous avons un exemple élémentaire d'un **asservissement**, d'une **boucle fermée**.

Le système bouclé : les définitions



Remarque : Les actionneurs et capteurs sont considérés dans la partie opérative c'est à dire le système en boucle ouverte. Leur choix est important, ils doivent être tels que leur action puisse être considérée comme idéale et de ce fait n'apparaissent pas dans les schémas de principe.

Les systèmes en présence

SYSTEMES	ENTREES	SORTIE
Boucle Ouverte	➢ *Commande* ➢ *Perturbations (non désirées)*	*Grandeur à commander*
Correcteur	➢ *Consigne* ➢ *Grandeur à commander*	*Commande*
Boucle fermée	➢ *Consigne* ➢ *Perturbations (non désirées)*	*Grandeur à commander*

Les buts d'un asservissement

Un asservissement a deux objectifs de base :

- La grandeur à commander ou sortie doit suivre le signal de référence ou consigne : c'est l'objectif de **poursuite**.
- La sortie doit être le moins possible influencée par les perturbations : c'est l'objectif de **régulation**.

Pour cela l'ingénieur doit concevoir le correcteur qui est le véritable cerveau du système.

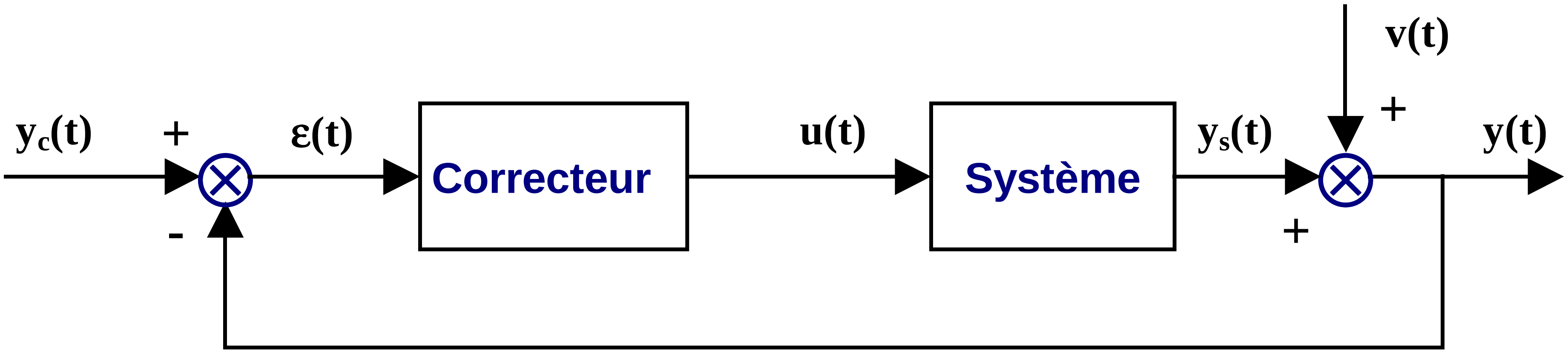
Cela nécessite une formulation correcte du problème qui oblige une modélisation mathématique permettant de rendre compte des comportements.

Des méthodes de synthèse du correcteur doivent être élaborées.

La structure la plus simple consiste en un correcteur qui prend en compte l'erreur = écart entre la consigne et la sortie pour élaborer sa commande.

Consigne → $y_c(t)$ Commande → $u(t)$

Perturbation de sortie → $v(t)$



Un nouveau symbole : le sommateur dont les signes indiquent l'action :

Sortie → $y(t) = y_S(t) + v(t)$ Erreur → $\varepsilon(t) = y_c(t) - y(t)$

Une seule perturbation est ici prise en compte, la perturbation de sortie.

Un premier modèle mathématique : le système linéaire

Tous les signaux pris en compte sont les plus simples qui soient : ce sont des signaux constants.

Le système en boucle ouverte est supposé linéaire c'est à dire que la sortie est proportionnelle à l'entrée (la commande) ce qui se traduit mathématiquement par :

$$y_S = G_0 \, u$$

G_0 est le gain statique du système.

1. Généralités
2. Les automatismes
3. Modélisation des automatismes
4. Un peu de technologie
5. Les asservissements
6. **Les correcteurs**
7. La notion de dynamique

Le correcteur proportionnel P

Le plus simple correcteur qui puisse être envisagé est un correcteur proportionnel c'est à dire :

$$u(t) = K\,(y_c - y) = K\,\varepsilon \text{ (avec } K=\text{cste)}$$

La sortie du système bouclé est *(la calculer à titre d'exercice):*

$$y=\left(\frac{G_0 K}{1+G_0 K}\right) y_c+\left(\frac{1}{1+G_0 K}\right) v$$

Une analyse simple montre que si $K \to +\infty$ alors $y \to y_c$ avec :

$$\left(\frac{1}{1+G_0 K}\right)\to 0$$

L'objectif de régulation est atteint

$$\left(\frac{G_0 K}{1+G_0 K}\right)\to 1$$

L'objectif de poursuite est atteint

Insuffisance du gain proportionnel

- Au départ, le système n'est pas à l'équilibre c'est à dire : $y \neq y_c$.
- Il va évoluer vers l'équilibre trouvé soit $y = y_c$ ce qui prend un laps de temps qui est appelé le **régime transitoire**.
- Pendant ce régime transitoire si $K \rightarrow +\infty$ avec $\varepsilon \neq 0$ nous aurons une commande $u = \infty$ ce qui dans la pratique est inacceptable.

Pratiquement

- le gain proportionnel K est limité par les possibilités des actionneurs.
- Il y a une erreur de poursuite $y \neq y_c$.
- Les perturbations conservent une influence.

Le correcteur intégral I

Nous savons qu'il y aura un régime transitoire pendant lequel le système ira vers l'équilibre recherché. Le correcteur intégral calcule une commande à l'instant t_0 :

$$u_I(t) = \int_0^t [y_c(\alpha) - y(\alpha)]\, d\alpha$$

Cette commande ne diverge pas si :

$$\lim u_I(t) \rightarrow cste$$
$$lorsque\ t \rightarrow +\infty$$

Cette condition ne peut être remplie que si :

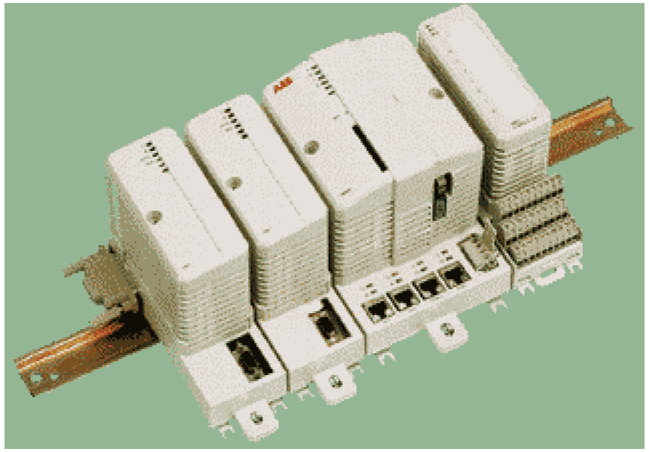
$$\lim [y_c(t) - y(t)] = 0$$
$$lorsque\ t \rightarrow +\infty$$
$$soit\ y(+\infty) = y_c(+\infty)$$

L'objectif est donc atteint, avec une commande finie mais au bout d'un temps infini, en pratique un temps assez grand. On parle alors de régime asymptotique.

La réalité

Dans le domaine industriel, on associe les deux actions P et I pour obtenir un correcteur. Il est parfois possible de lui ajouter une troisième action D (dérivée) d'où le correcteur **PID.**

Il existe de nombreuses techniques de réglage avec des modélisations plus ou moins sophistiquées permettant d'obtenir les résultats souhaités.



La commande type PI :

$$u(t) = K[y_c(t) - y(t)] + K_I \int_0^t [y_c(\alpha) - y(\alpha)] d\alpha$$

1. Généralités
2. Les automatismes
3. Modélisation des automatismes
4. Un peu de technologie
5. Les asservissements
6. Les correcteurs
7. **La notion de dynamique**

La dynamique des sytèmes

- Problème déjà entrevu dans la réponse d'un système bouclé, celle-ci **ne peut être instantanée** mais prend un certain temps.
  - Un four ne passe pas instantanément d'une température à une autre.
  - Le niveau d'un liquide dans une cuve ne passe pas instantanément d'une valeur à une autre.
  - .....
- Le modèle très simple envisagé jusqu'ici : $y_S(t) = G_0\, u(t)$ où G_0 est un simple coefficient ou gain statique qui ne rend pas compte de ces effets.
- La dynamique d'un système est le comportement qu'il aura pour passer d'un état à un autre état.
- **La dynamique d'un système peut se représenter par un modèle mathématique**.

Modèle dynamique d'un système linéaire invariant (SLI)

- **S** : Système = ensemble de dispositifs établissant une relation de cause à effet entre les entrées et les sorties. Pour un système à une entrée u(t) et une sortie $y_S(t)$, cette relation se modélise mathématiquement par une fonction : $y_S(t) = f(u(t))$.
- **L** : Système linéaire : la relation f(.) est une relation linéaire c'est à dire qu'elle est soumise au théorème de superposition.
- **I** : Système invariant : la relation est la même quelque soit l'instant t où on se situe.

On démontre que la relation qui représente un tel système est une équation différentielle linéaire d'ordre n à coefficients constants :

$$a_n \frac{d^n}{dt^n} y_s(t) + a_{n-1} \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} y_s(t) + \ldots.. + a_1 \frac{d}{dt} y_s(t) + a_0 y_s(t) = G_0 u(t)$$

Ce que demande un modèle dynamique

Le comportement dynamique d'un SLI se modélise par une équation différentielle linéaire à coefficients constants.

Il faut apprendre les mathématiques correspondantes :

- Référence à des modèles simples : équations du 1er ordre, du 2^{nd} ordre.
- Méthodes puissantes de résolution : transformée de Fourier (approche fréquentielle), transformée de Laplace, notion de fonction de transfert.

L'annexe fournit une manipulation simple des équations différentielles et son application a la démonstration des propriétés d'un correcteur PI.

Ce que l'on démontre

- Les systèmes physiques peuvent se caractériser par une équation différentielle linéaire d'ordre n à coefficients constants. Cela correspond à plusieurs constantes de temps qui caractérisent la vitesse de réaction du système.
- Un correcteur type PI permet d'assurer la poursuite : gain statique égal à 1 en boucle fermée grâce à l'intégrateur.
- Le réglage de la proportion de P et de I permet d'ajuster la dynamique en boucle fermée.
- L'automaticien possède des méthodes élaborées pour mettre au point des correcteurs très performants.
- Le correcteur PID reste très utilisé dans le domaine industriel pour des asservissements usuels.

Pendule inversé - Poursuite

Fin du CSB Sciences de l'Ingénieur

- Pensez à récupérer les annales.

- Prenez 5 minutes pour remplir la feuille d'évaluation de la formation et rendez la immédiatement.

- Si vous souhaitez une visite de laboratoire(s), inscrivez-vous auprès de l'enseignant. Vous serez ensuite invités par voie d'affichage.

Annexe :
dynamique d'un asservissement dans le cas d'un correcteur PI

Le modèle dynamique le plus simple : modèle du premier ordre

$$\tau \frac{d}{dt} y_s(t) + y_s(t) = G_0 u(t)$$

- τ est la constante de temps du système
- G_0 est son gain statique

Pour u(t) = cste = u_0, la solution de ce système (voir mathématiques) est la superposition de deux termes :

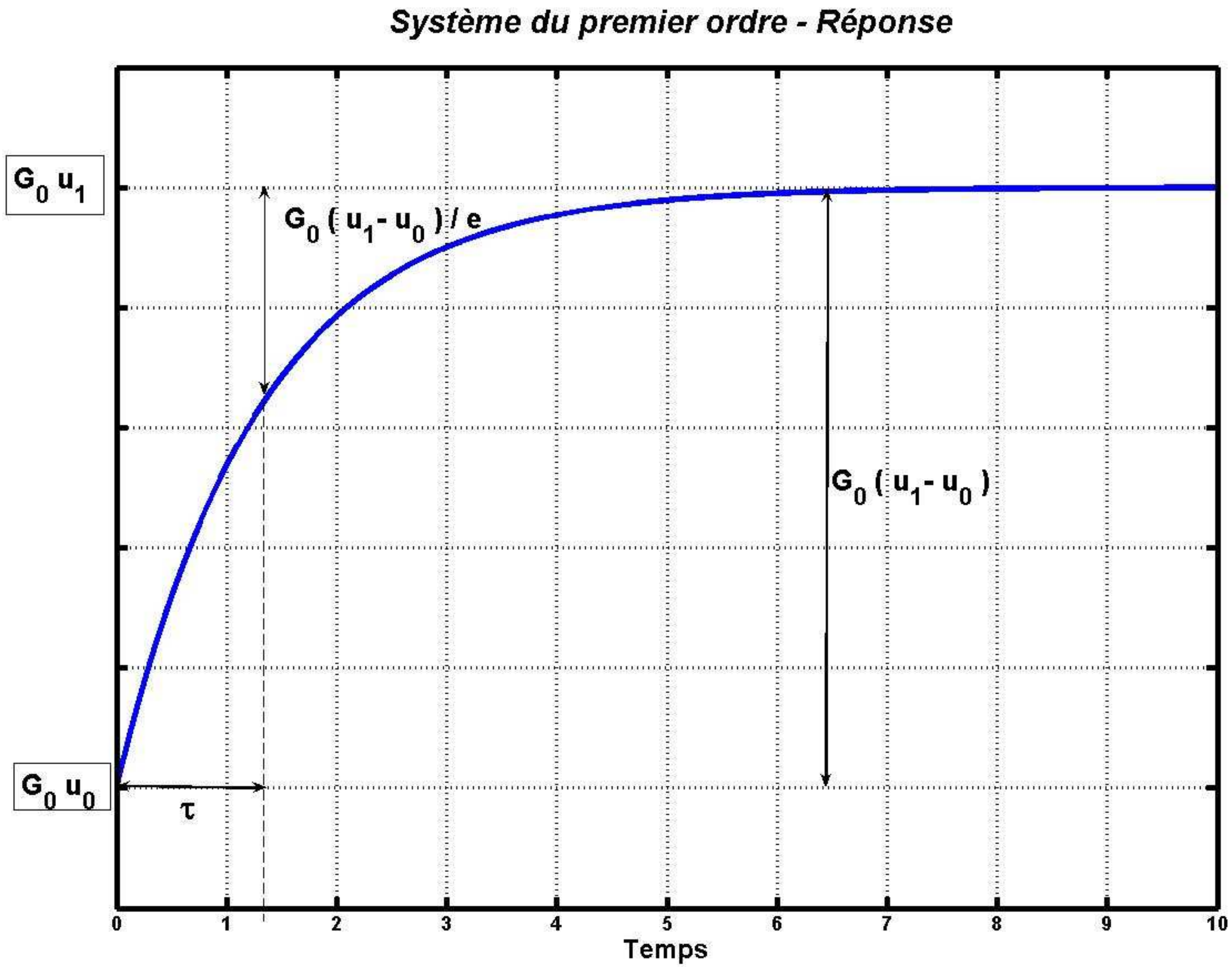
- $y_{S0} = G_0\, u_0$: solution particulière de l'équation avec $y_S(t)$ = cste
- $y_S(t) = A\,\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}}$ solution générale de l'équation sans second membre

La solution générale est donc : $$y_S(t) = G_0 u_0 + A\,\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}}$$

A est une constante qui se détermine avec les conditions initiales du problème.

u(t) passe de la valeur u_0 à la valeur u_1, comment évolue $y_s(t)$?

La constante de temps τ détermine la vitesse de réaction du système



Dynamique en boucle fermée

Etablir l'équation différentielle du système en boucle fermée dans le cas d'un correcteur proportionnel.

$$\tau \frac{d}{dt} y_s(t) + y_s(t) = G_0 u(t)$$

$$u(t) = K(y_c(t) - y_s(t))$$

$$\Rightarrow$$

$$\tau \frac{d}{dt} y_s(t) + y_s(t) = G_0 K(y_c(t) - y_s(t))$$

$$\tau \frac{d}{dt} y_s(t) + (1 + G_0 K) y_s(t) = G_0 K\, y_c(t)$$

$$\Downarrow$$

$$\frac{\tau}{(1+G_0 K)} \frac{d}{dt} y_s(t) + y_s(t) = \frac{G_0 K}{(1+G_0 K)} y_c(t)$$

- *Le système en boucle fermée a un nouveau gain statique voisin de 1 si $G_0K >> 1$*
- *La constante de temps du système en boucle fermée est plus faible que celle du système en boucle ouverte : accélération des performances*

Cas du correcteur PI

Montrer que, dans le cas d'un correcteur PI, l'équation différentielle devient :

$$\frac{\tau}{G_0 K_I}\frac{d^2}{dt^2}y_s(t)+\frac{1+G_0 K}{G_0 K_I}\frac{d}{dt}y_s(t)+y_s(t)=y_c(t)$$

Nous pouvons en tirer deux conclusions :

- Avec un système du premier ordre en boucle ouverte et un correcteur PI, nous obtenons en boucle fermée un système du second ordre. La conséquence principale est que la dynamique de la boucle fermée est changée.

- En régime permanent $y_S= y_C$. La poursuite est donc assurée sans qu'il soit nécessaire d'avoir un gain proportionnel infini, Nous venons de vérifier de nouveau l'action primordiale dûe à la présence d'un intégrateur

Etablir l'équation différentielle du système en boucle fermée dans le cas d'un correcteur proportionnel.

$$\tau \frac{d}{dt} y_s(t) + y_s(t) = G_0 u(t)$$

$$u(t) = K\left(y_c(t) - y_s(t)\right) + K_I \int_0^t \left(y_c(\alpha) - y_s(\alpha)\right) d\alpha$$

$$\tau \frac{d}{dt} y_s(t) + y_s(t) = G_0 \left[K\left(y_c(t) - y_s(t)\right) + K_I \int_0^t \left(y_c(\alpha) - y_s(\alpha)\right) d\alpha \right]$$

$$\tau \frac{d}{dt} y_s(t) + (1 + G_0 K) y_s(t) = G_0 \left[K y_c(t) + K_I \int_0^t \left(y_c(\alpha) - y_s(\alpha)\right) d\alpha \right]$$

$$\Downarrow$$

$$\tau \frac{d^2}{dt^2} y_s(t) + (1 + G_0 K) \frac{d}{dt} y_s(t) + G_0 K_I y_s(t) = G_0 K_I y_c(t)$$

$$\frac{\tau}{G_0 K_I} \frac{d^2}{dt^2} y_s(t) + \frac{1 + G_0 K}{G_0 K_I} \frac{d}{dt} y_s(t) + y_s(t) = y_c(t)$$

Passage sous tunnel : solution