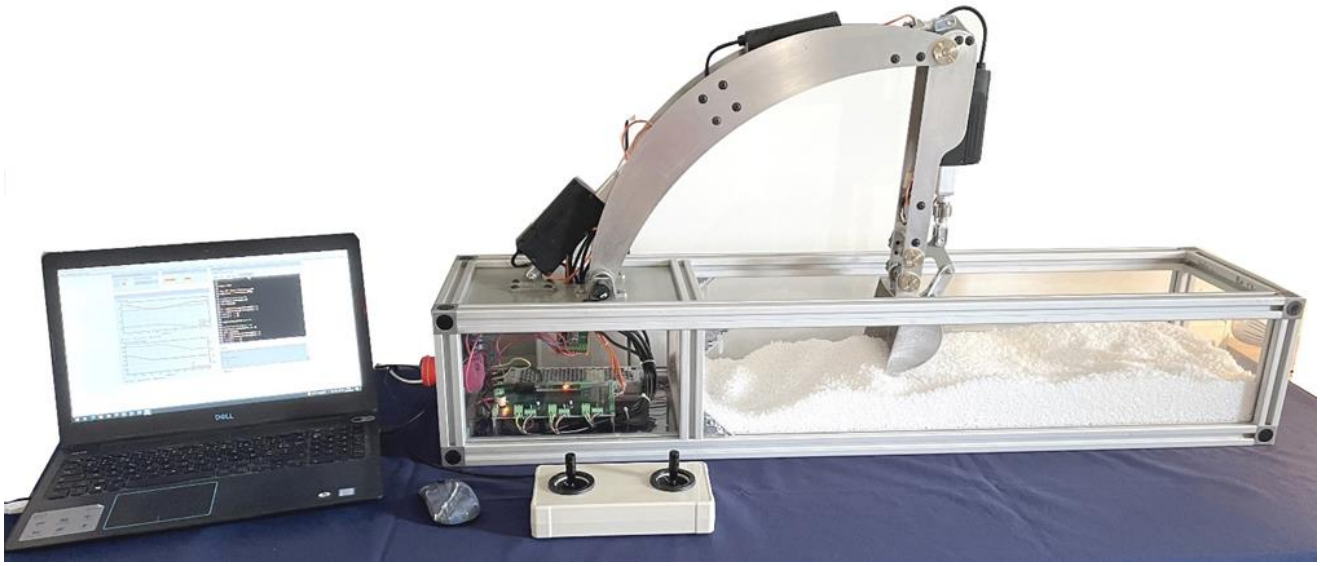
Travaux Pratiques - ASSERVISSEMENT
Pelleteuse



Objectifs du TP

Modéliser le comportement du bras d'une pelleteuse et valider ce modèle par comparaison des performances simulées et des performances définies par le cahier des charges. Etudier l'influence de différents correcteurs sur les performances du système.

1 – Mise en situation et description

La pelleteuse électrique autonome est un système didactisé qui s'inspire des évolutions actuelles des engins de chantier, d'une part dans leur changement de pratique en terme d'empreinte environnementale (abandon des moteurs thermiques) et d'autres part dans l'automatisation des tâches (véhicules autonomes).

Le système didactisé reprend uniquement l'ensemble **bras articulé** d'une pelleteuse constitué des 3 sous-ensembles (la **flèche**, le **balancier** et le **godet**) disposant chacun d'un actionneur (vérin électrique) et d'un système de transmission/transformation de mouvement. Le but de la pelleteuse étant de pouvoir remplir le godet d'une charge (terre, graviers, gravats, etc.), la déplacer et enfin la décharger tout en respectant le milieu environnant. De manière traditionnelle, ces actions se font manuellement par un opérateur qui agit sur deux joysticks permettant chacun de commander 2 actionneurs. Dans le cas du système didactisé, l'actionneur lié au mouvement de rotation vertical de la tourelle n'est pas utilisé.

Le banc didactisé dispose de deux modes de fonctionnement :

- **mode réel** : permet d'agir directement sur le bras de la pelleteuse
- **mode simulé** : permet d'agir sur le jumeau numérique dont le comportement est simulé sur ordinateur

Les deux modes peuvent se piloter par le biais des joysticks ou via l'interface de commande.

Dans l'optique d'un fonctionnement optimal en mode manuel ou autonome d'une pelleteuse, il est nécessaire de pouvoir maîtriser les performances de chaque axe du bras de la pelleteuse en fonctionnement dans son environnement et à termes, être capable de proposer une correction efficace du comportement de chaque sous-système. La mise en place d'un modèle de comportement permet de répondre à cette problématique.

2 – Prise en main du système et mouvements de base

Prise en main

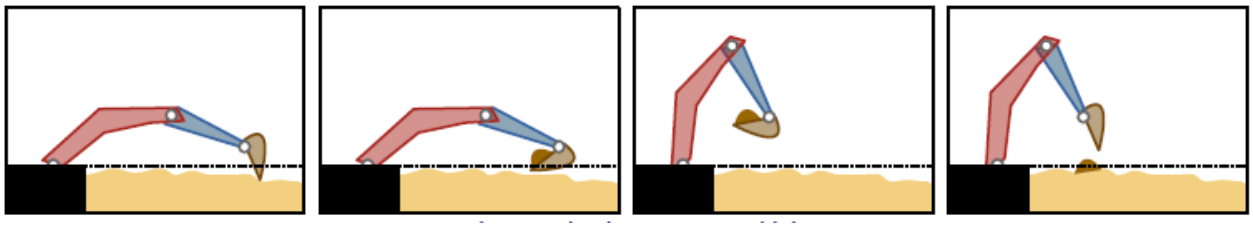
Mettre en marche le système et placer le système sous mode de commande par joystick depuis le logiciel de commande MyViz (voir **DOSSIER RESSOURCES**).

Actionner les joysticks suivant différentes inclinaisons et observer les effets sur le mouvement des pièces. Quelle est l'influence du degré d'inclinaison du joystick sur la vitesse de déplacement des vérins électriques ?

Lors de l'utilisation de la pelleteuse, l'opérateur est amené à réaliser différentes opérations telles que le creusement ou le nivellement.

Chargement-déplacement-déchargement

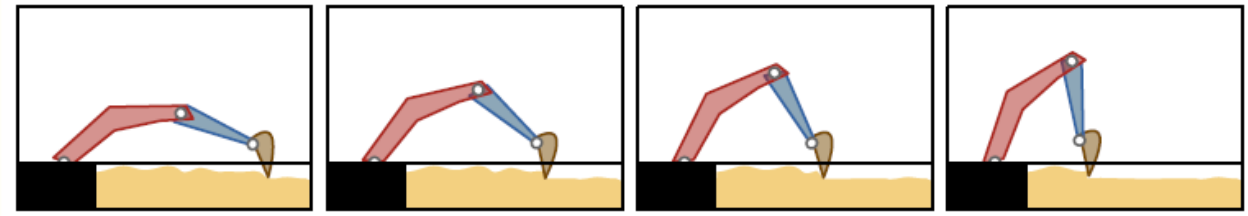
Lors des opérations de creusement (excavation, réalisation d'une tranchée, etc.), l'opérateur procède de manière cyclique : mise en position du godet, chargement, déplacement puis déchargement.



S'entrainer à réaliser une procédure de chargement, déplacement puis déchargement du godet en évitant de perdre le chargement en route. Quelles sont les difficultés rencontrées ?

Nivellement

L'opération de nivellement consiste en un déplacement vertical ou horizontal du godet permettant de définir des contours plans de la zone en travaux. Seul le fond ou la lame du godet est alors en contact avec le sol.



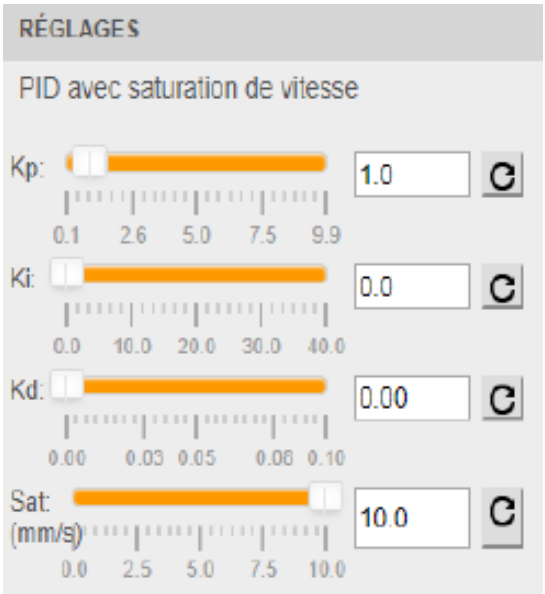
Déplacer le godet suivant une trajectoire rectiligne horizontale ou verticale, quelles sont les difficultés rencontrées ?

Remarque : Pour juger de la qualité de la trajectoire réalisée à chaque essai, cliquer sur le bouton *« Effacer les points »* après chaque essai.

Premiers essais

Le logiciel MyViz, avec son tableau de bord **Pelleteuse_Asservissement** (voir **DOSSIER RESSOURCES**) permet de donner des consignes de positionnement aux différents sous-ensembles du bras de pelleteuse.

Le réglage du correcteur sera pris tel que l'illustre la figure ci-dessous :



Imposer un mouvement à la flèche d'une amplitude de 40° avec un offset de 40° (correspondant à une inclinaison de la flèche de 80°).

Observer l'évolution de la position angulaire de la flèche lors de son mouvement de descente.

Faire de même pour une inclinaison de la flèche de 60° (offset = 40° et amplitude = 20°).

Le pilotage du jumeau numérique permet de charger virtuellement le godet.

Vidage du godet

Lors d'opération d'excavation de terre « collante », la gravité ne suffit pas à extraire la totalité du chargement du godet. L'opérateur doit alors faire « vibrer » le godet pour décoller la terre du godet.

Imposer un mouvement d'aller-retour du godet sur une certaine amplitude (quelques degrés) à différentes fréquences. Commenter alors la réponse du godet (amplitude conservée, retard dans la réponse).

Passer MyViz en mode Pelleteuse simulé, et modifier le modèle en donnant une charge de 20 kg dans le godet.

Réaliser le même déplacement que précédent et analyser les résultats de position du bras.

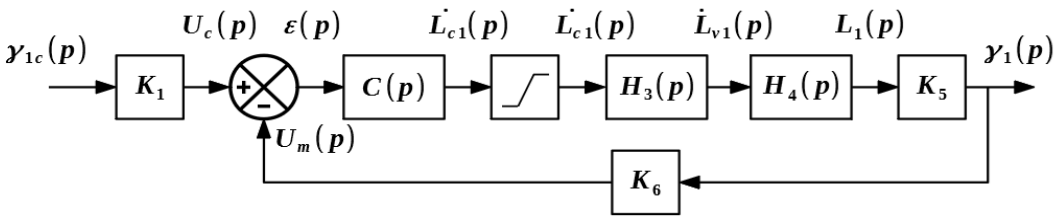
Quelle perturbation est mise en évidence à travers cette expérience ?

3 – Modélisation du système

L'objectif de cette partie est de proposer un modèle de comportement du sous-ensemble flèche du bras de pelleteuse sous forme de schéma-bloc permettant de simuler son comportement afin de prédire ses performances.

Chaîne fonctionnelle

Le détail de l'asservissement en position angulaire de la flèche est donné sous forme de schéma-bloc fonctionnel ci-dessous :



$\gamma_{1c}(p)$	Angle de consigne	$u_m(p)$	Tension mesurée	$\dot{L}_{c1}(p)$	Consigne vitesse vérin
$\gamma_1(p)$	Angle de flèche	$\varepsilon(p)$	Écart de tension	$\dot{L}_1(p)$	Vitesse de la tige du vérin
$u_c(p)$	Tension de consigne			$L_1(p)$	Longueur de la tige du vérin

Placer les composants sur le schéma-bloc fonctionnel en s'aidant des grandeurs physiques entrantes et sortantes des blocs.

Préciser les blocs qui ont été ajoutés pour asservir l'angle de la flèche sur le bras de la pelleteuse.

On s'intéresse à la modélisation de l'asservissement angulaire de la flèche donné dans le **DOSSIER RESSOURCES.**

Chaîne d'information

Le capteur angulaire permettant de mesurer l'orientation relative de la flèche/bâti est un codeur. Sa mesure est codée sur 12 bits pour 1 tour.

Déterminer le gain K_6.

Lorsqu'un asservissement est mis en place sur un système, on s'arrange pour que l'écart en sortie du soustracteur soit nul lorsque la sortie est égale à la consigne.

En déduire le gain de l'adaptateur K_1.

Structure articulée

Le mouvement de translation de la tige du vérin est transformé en rotation du bras par le biais d'une structure articulée (le corps du vérin est articulé avec le bâti comme la flèche et la tige du vérin avec la flèche).

Mettre la flèche en position angulaire maximale (aux environs de 80°) puis renseigner une durée d'acquisition de 10 s.

Imposer alors une position angulaire de 25° et activer alors le pilotage des axes.

Cliquer sur tracer et visualiser l'évolution de la position angulaire de la flèche en fonction de la longueur de la tige du vérin.

Justifier qu'il est possible de modéliser la transmittance K_5 par un gain pur et déterminer ce gain.

Quelle pourra être la conséquence de cette modélisation sur les résultats simulés par rapport aux résultats expérimentaux ?

Passage de la vitesse à la position

Sachant que la vitesse de rotation de la flèche est la dérivée de sa position angulaire, déterminer la fonction de transfert $H_4(p)$.

Identification du comportement de la commande du vérin

Réaliser un essai pour une entrée en échelon de 10° (= amplitude) autour de la position 50° (= offset), avec PID réglé avec une seule correction proportionnelle de 5 : régler l'offset sur 50°, activer les consignes, une fois la position atteinte, appliquer une amplitude de 10°. Stopper les consignes une fois la position atteinte.

Tracer l'évolution temporelle de la consigne de vitesse du vérin 1 et de la vitesse du vérin 1.

Identifier alors la fonction de transfert $H_3(p)$ en justifiant son ordre et en déterminant ses paramètres caractéristiques.

Saturation

Afin de maîtriser le comportement du vérin, une saturation de la vitesse de celui-ci est imposée.

Elle peut être modifiée dans MyViz (valeur par défaut 5 mm/s et maximale 10 mm/s).

4 – Validation du modèle

Compléter le fichier Scilab (renseigner les blocs avec les fonctions de transfert et gains trouvés précédemment).

Relever les valeurs du correcteur retenu (double-clic sur le bloc correcteur), ce sont ces valeurs qui seront à utiliser dans les essais expérimentaux de la suite.

Réaliser une simulation pour une variation d'angle de 1° puis de 10°. Caractériser chacune des réponses en précisant les performances obtenues.

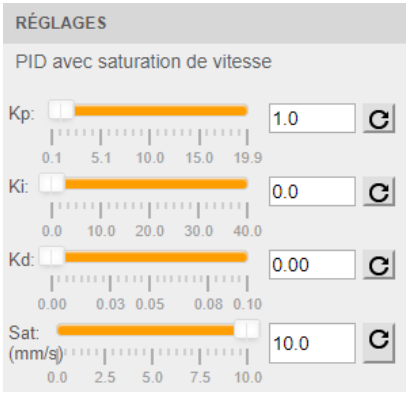
Réaliser les mêmes essais sur le système réel et caractériser les réponses expérimentales.

Comparer les résultats et conclure sur la validité de la modélisation.

5 – Choix d'un correcteur

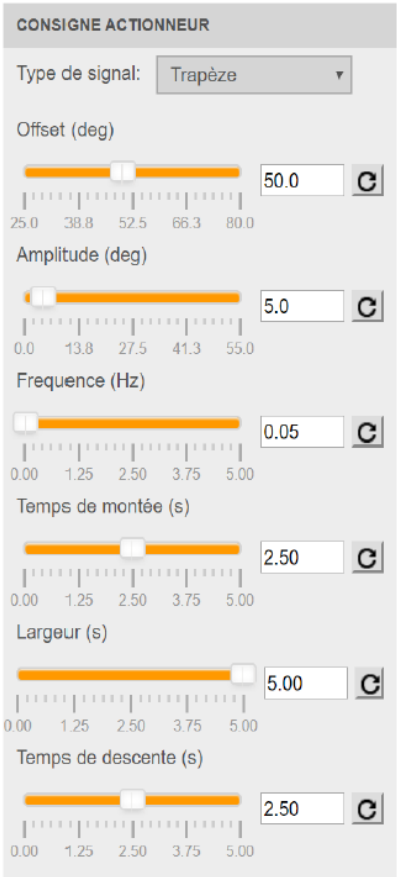
L'objectif de cette partie est de proposer un type de correcteur pour des commandes en position et en déplacement d'un sous-ensemble (mouvement rencontré lors d'un nivellement par exemple) et d'étudier son influence sur les performances du système.

Le tableau de bord **Pelleteuse_Asservissement** (voir **DOSSIER RESSOURCES**) permet d'envoyer des consignes de positionnement aux différents sous-ensembles du bras de pelleteuse et de tracer, lors du mouvement, l'évolution de la consigne et de l'orientation mesurée des sous-ensemble flèche (γ_1), de pénétration (γ_2) et de cavage (γ_3 pour le godet).



Premiers essais

Le correcteur sera réglé tel que $K_p = 1$, $K_i = 0$, $K_d = 0$ et $V_{max} = 10\ mm/s$.



Choisir la Flèche comme sous-ensemble à piloter et définir une consigne de type Trapèze avec une amplitude de 5° autour de la position 50° (offset) avec des temps de montée et de descente de 2,5 s, une largeur de 5 s et enfin, une fréquence de 0,05 Hz.

Activer alors la consigne. Une fois le mouvement terminé, passer le bouton « activer les consignes » sur OFF.

Remarque : Pour visualiser le résultat de mesures, utiliser le bouton « Tracer » à gauche de la fenêtre, choisir alors le signal *consigne flèche (deg)* et *gamma1 (deg)*.

Caractériser les performances du comportement de la flèche asservie en position angulaire mais non corrigée ($K_p = 1$).

Dans le cas d'un fonctionnement en mode autonome de la pelleteuse, quels sont les conséquences de ces performances sur les travaux réalisés (excavation et nivellement) ?

Correction proportionnelle

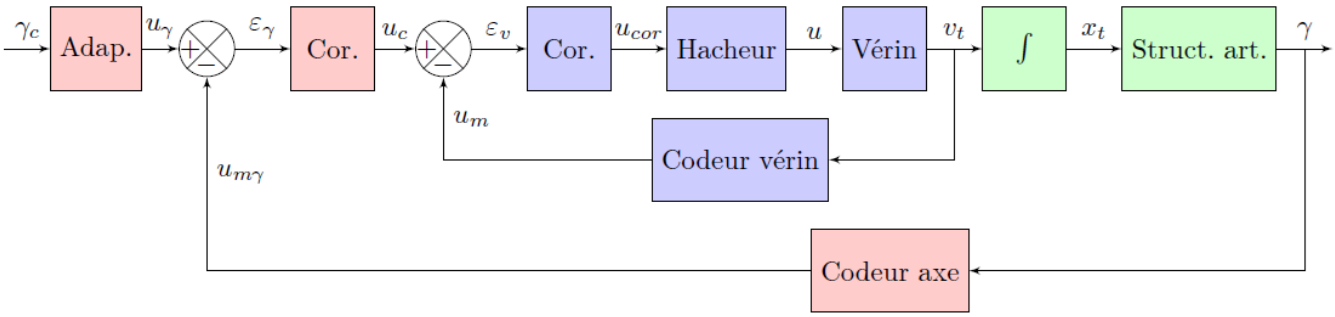
Les résultats précédents montrent qu'il est nécessaire de corriger l'asservissement du sous-ensemble flèche afin d'améliorer ses performances dans le but de réaliser des travaux d'excavation ou de nivellement les plus précis possible.

Pour la même consigne en **Trapèze**, réaliser d'autres essais avec un gain $K_p$différent (on pourra prendre 5, 10 et 20 par exemple).

Quelles sont les influences de la valeur du gain du correcteur proportionnel sur le comportement du système.

Comment peut-on expliquer la présence d'une erreur statique pour de faibles valeurs du gain K_p ?

Est-elle compatible avec la modélisation de l'asservissement retenue ci-dessous ? Justifier.



Modélisation de l'asservissement en position angulaire d'un sous-ensemble

Correction proportionnelle intégrale

Le choix du correcteur proportionnel ne permet pas d'annuler l'erreur de traînage. Cette partie va permettre d'analyser l'influence d'une correction intégrale sur les performances du comportement de la flèche.

Conséquences d'une erreur de traînage

Reprendre un correcteur proportionnel de gain $K_p = 5$ (on supprime ainsi la présence de non-linéarité (seuil) pour de petites valeurs de consigne et on s'assure un gain suffisamment élevé pour que le bras puisse se déplacer même pour de petites amplitudes de consignes).

Définir une consigne de type Triangle autour de 50° (offset), avec une amplitude de 5°, des temps de montée et descente de 2,5 s et une fréquence de 0,2 Hz.

Pour quel type de travaux cette consigne (évolution constante de l'angle) pourrait-elle correspondre ?

Analyser les résultats expérimentaux et déterminer les conséquences sur la qualité des travaux introduites par l'erreur de traînage.

Annulation de l'erreur de trainage

Avec la même consigne en **Triangle** et avec le même gain proportionnel $K_p = 5$, réaliser un essai pour une valeur de $K_i = 5$.

L'erreur de traînage est-elle annulée ?

Quelle performance semble être dégradée ? Quelle est sa conséquence sur les travaux réalisés ?

En conservant le même réglage du correcteur, imposer maintenant une consigne Rectangle (offset = 50°, amplitude = 5°, fréquence = 0,1 Hz et rapport cyclique = 50%).

Pour cette consigne en échelon, déterminer les performances du comportement de la flèche.

Quelles sont les conséquences du dépassement sur la qualité des travaux ?

Correcteur proportionnel-intégral-dérivé

Les résultats précédents ont introduit la dégradation d'une performance qui n'apparaissait pas avec le correcteur proportionnel. Comme souvent, il faut choisir le bon compromis et assumer le fait que toutes les performances ne peuvent pas forcément être atteintes de manière optimale.

Avec le même signal de consigne en **Trapèze**, pour une correction proportionnelle $K_p = 5$, intégrale $K_i = 10$, réaliser des essais pour différentes valeurs de correction dérivée en modifiant le paramètre K_d.

Déterminer l'influence de la valeur de K_d sur les performances.

Conclure sur un choix possible de correcteur en fonction de contraintes liées à la qualité des travaux.

6 – Influence d'un correcteur P, PI ou PD

On se propose de régler les paramètres K_p , K_i et K_d , gains proportionnel, intégral et dérivé en s'appuyant sur l'observation de réponses à un échelon de consigne pour obtenir le meilleur compromis entre tous les critères de réglages qui sont :

- la précision statique
- la possibilité de dépassement (lié à la stabilité)
- la rapidité

Pour réaliser un plan de réglage sérieux, il faudrait affecter 4 valeurs différentes à chaque paramètre P, I et D : soit un plan de 4^3 mesures (64 mesures).

Pour des raisons de temps disponible, nous allons simplement effectuer 8 mesures. (voir tableau).

Essai	K_p	K_i	K_d
1	15	0	0
2	15	20	0
3	5	20	0
4	15	20	0.05
5	5	0	0.05
6	5	0	0.1
7	5	40	0.1
8	5	40	0.05

Essais expérimentaux

Pour chaque essai expérimental :

- Appliquer un échelon de consigne de 10° (Rectangle avec Offset de 50°, amplitude de 10°, fréquence de 0 Hz).
- Relever l'allure de la courbe de réponse.
- Observer l'influence du paramètre qui a été modifié par rapport à l'essai précédent.
- Analyser la réponse et la caractériser par rapport aux différents critères de réglage (rapidité, stabilité, précision).

Remarque : Pour faire les mesures, à chaque changement de valeur des correcteurs, remettre une amplitude de 0° puis une amplitude de 10°.

Remarque : Il est possible d'utiliser d'autres valeurs que celles proposées à condition qu'elles soient **inférieures** à celles proposées.

Proposer un réglage qui semble être un bon compromis entre précision, stabilité et rapidité.

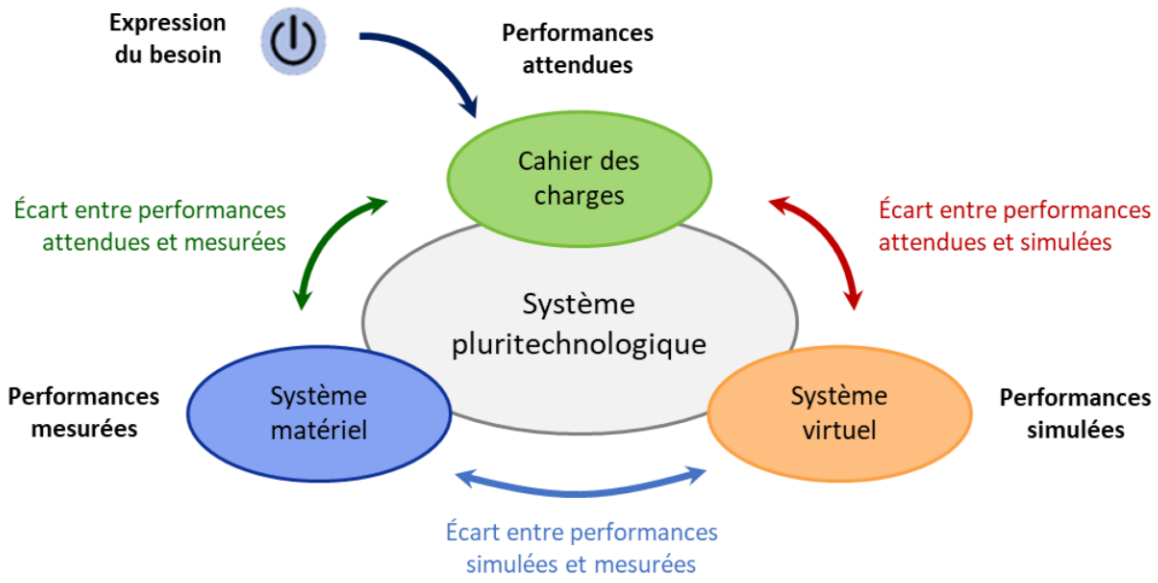
Essais numériques

Pour chaque essai numérique sous Scilab :

- Appliquer un échelon de consigne de 10°.
- Relever l'allure de la courbe de réponse.
- Observer l'influence du paramètre qui a été modifié par rapport à l'essai précédent.
- Analyser la réponse et la caractériser par rapport aux différents critères de réglage (rapidité, stabilité, précision).

Proposer un réglage qui semble être un bon compromis entre précision, stabilité et rapidité.

7 – Validation

L'objectif pour le groupe est de comparer pour les performances de rapidité, de précision et de stabilité **avec le correcteur Proportionnel Intégral Dérivé**, les résultats obtenus à partir des mesures expérimentales et ceux obtenus par la simulation numérique. Calculer les écarts et estimer d'où ils peuvent provenir.

Conclure quant à l'intérêt d'un PID. Sur quels critères de performance chaque partie va-t-elle agir ?