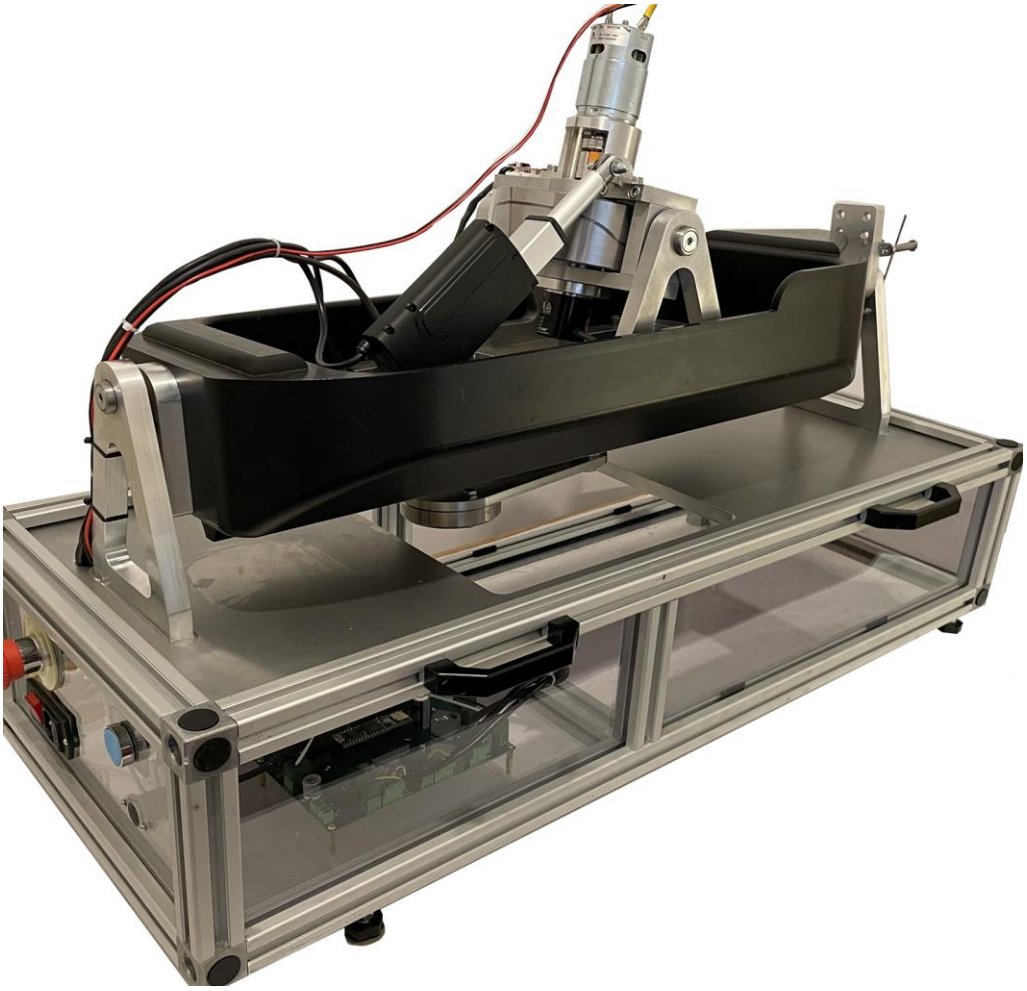
Travaux Pratiques - ASSERVISSEMENT
Stabilisateur Gyroscopique de Bateau



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 – Présentation générale du support

Le stabilisateur gyroscopique de bateau est un système didactisé qui s'inspire de systèmes réels embarqués sur des bateaux de pêche ou de plaisance permettant de stabiliser le bateau lors des phases de mouillage (manœuvre qui consiste à immobiliser le bateau en mer, grâce à une ancre, chaîne ou cordage) permettant ainsi à l'équipage de bénéficier d'un mouvement réduit du bateau causé par la houle.

Le support pédagogique propose une solution basée sur la génération d'un couple gyroscopique à partir de la mise en mouvement d'un volant d'inertie afin de contrer le mouvement de roulis (mouvement de rotation autour de l'axe principal du bateau). L'inclinaison du bateau due au roulis est appelée gîte.

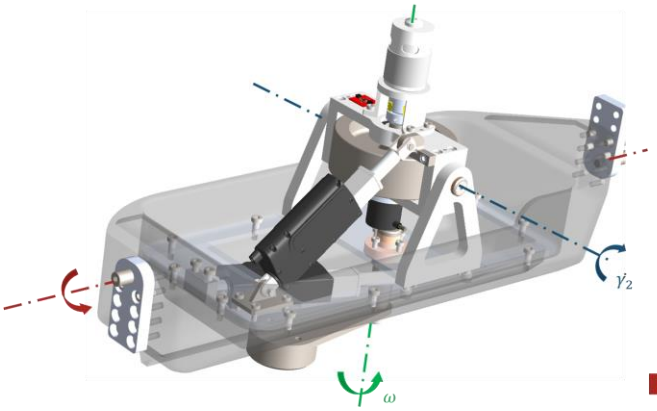


Figure 1 : Illustration du couple gyroscopique

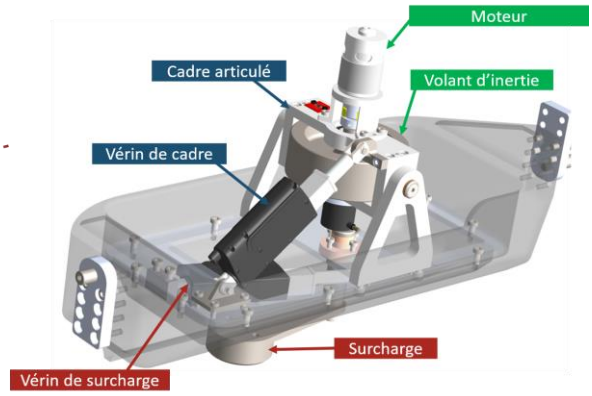


Figure 2 : Conception mécanique du support pédagogique

La Figure 1 illustre le phénomène : le volant d'inertie tourne à la vitesse ω autour de son axe de symétrie, un mouvement du cadre du volant d'inertie est imposé à la vitesse $\dot{\gamma}_2$ qui permet de générer un couple gyroscopique autour de l'axe du roulis tel que $C_g = C_3\omega\dot{\gamma}_2$ avec C_3 le moment d'inertie du volant d'inertie autour de son axe de symétrie (pour un angle γ_2 très petit).

La rotation du volant d'inertie est réalisée par un moteur électrique asservi en vitesse dont le rotor est monté directement sur l'arbre du volant. La mise en mouvement du cadre est réalisée grâce à un système articulé actionné par un vérin électrique, appelé vérin de cadre, asservi en vitesse et en position. Enfin, la génération du mouvement de roulis est réalisée par une surcharge qui se déplace de part et d'autre de l'axe du bateau grâce à un système articulé actionné par le vérin électrique de surcharge asservi en position.

Identifier sur les système réel les différents constituants présentés ci-dessus.

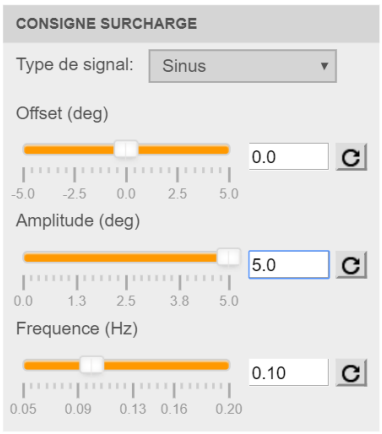
2 – Prise de main du système – Mode automatique

Le stabilisateur de bateau se manipule grâce au logiciel ***MyViz*** qui permet d'imposer des commandes aux 3 chaînes d'énergie et de récupérer les informations des capteurs.

Pour la découverte du système, utiliser les tableaux de bord **Stabilisateur_PriseEnMain.json** et ***Stabilisateur_Automatique.json*** (voir **DOSSIER RESSOURCES** pour la première mise en route du système).

Génération du mouvement de roulis

Comme indiqué dans l'introduction, le mouvement de roulis du bateau est imposé par une **surcharge**, située en dessous du bateau, dont on impose la position via un système articulé actionné par le **vérin de surcharge**.



Dans **MyViz**, une fois le système prêt, dans le cadre **CONSIGNE SURCHARGE**, choisir un mouvement sinusoïdal avec une amplitude angulaire de 5° par exemple et laisser la fréquence par défaut.

Activer les consignes afin d'observer le comportement du bateau sous l'effet de la modification de la position de la surcharge.

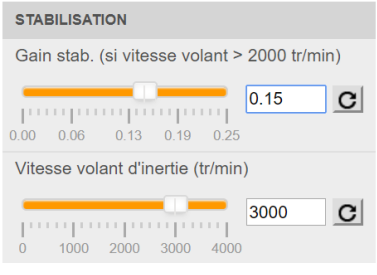
Génération du couple gyroscopique

Comme indiqué plus haut, le couple gyroscopique est proportionnel à la vitesse du volant d'inertie et à la vitesse d'inclinaison du cadre articulé. Dans ce mode de fonctionnement automatique, c'est le logiciel de commande qui gère la vitesse d'inclinaison du cadre articulé grâce à une boucle d'asservissement dont la consigne est double : gîte et vitesse de gîte nulles et dont le gain peut être réglé via la variable **Gain stab** dans le cadre **STABILISATION**.

Imposer une vitesse de rotation au volant d'inertie dans le cadre **STABILISATION**.

La vitesse de sortie de tige du vérin électrique du cadre étant limitée à 10 mm/s, la génération d'un couple gyroscopique suffisamment élevé pour contrer le mouvement de roulis nécessite une vitesse de rotation du volant d'inertie supérieure à 2 000 tr/min.

Une fois cette vitesse dépassée, imposer une valeur au **Gain stab** et observer l'effet sur la gîte du bateau. Analyser les résultats obtenus.



3 – Comportement du cadre

La stabilisation du bateau repose sur de bonnes performances en vitesse d'inclinaison du cadre du gyroscope, cette vitesse est donc asservie. On se propose ici de modéliser les éléments de la chaîne fonctionnelle qui interviennent dans cet asservissement.

Analyse structurelle

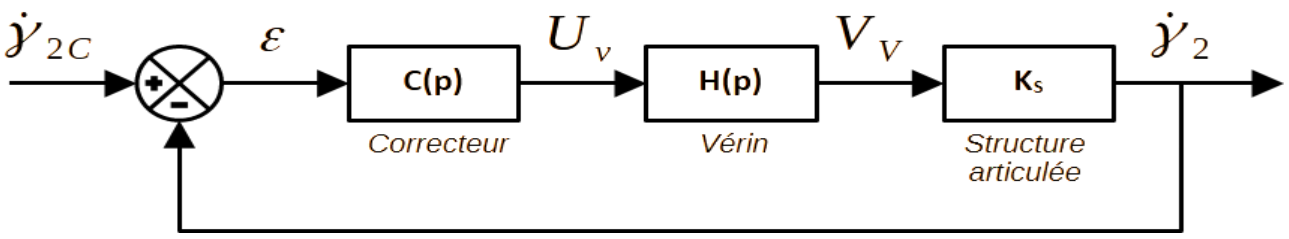
Le cadre du gyroscope est mis en mouvement par un vérin électrique. Le corps du vérin électrique (partie noire) est relié au bateau par une liaison pivot. La tige du vérin (partie grise) est en liaison pivot avec le cadre. Le mouvement de translation de la tige du vérin par rapport au corps du vérin permet d'orienter le cadre du gyroscope, celui-ci étant en liaison pivot avec le bateau. Cette succession de liaisons pivot est couramment appelé structure articulée.

Pour mettre en mouvement le cadre, la carte de commande reçoit de l'IHM (ici le logiciel MyViz) une consigne qui est traitée puis envoyée sous forme d'ordre à la carte de puissance qui fournit alors une tension au vérin.

Pour asservir la vitesse d'inclinaison du cadre, une centrale inertielle est fixée sur le cadre, elle permet de mesurer la vitesse d'inclinaison du cadre (mais aussi, l'orientation du bateau, nécessaire pour stabiliser le bateau). La carte de commande réalise alors une comparaison entre la vitesse d'inclinaison de consigne et la vitesse mesurée. L'écart résultant est alors corrigé par un correcteur pour établir la tension de consigne du vérin.

Modélisation du comportement

Le schéma-bloc ci-dessous est retenu pour modéliser le comportement du cadre asservi en vitesse de rotation $\dot{\gamma}_2$. La vitesse de consigne $\dot{\gamma}_{2C}$ est comparée à la vitesse $\dot{\gamma}_2$ réelle mesurée du cadre, $\dot{\gamma}_2$ par le biais d'un comparateur qui renvoie un écart au correcteur, de fonction de transfert $C(p)$. Le vérin, alimenté par la tension U_V fournie par le correcteur, se déplace en translation à la vitesse V_V. La structure articulée permet d'adapter le mouvement de translation de la tige du vérin en mouvement de rotation du cadre à la vitesse $\dot{\gamma}_2$.

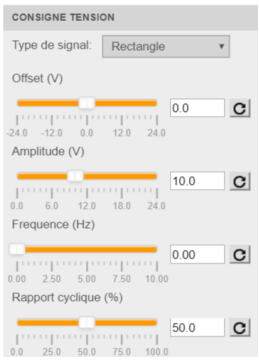


Modélisation du vérin

On se propose ici de procéder à une identification temporelle pour modéliser le comportement du vérin.

En étudiant la structure du schéma bloc, montrer que seule une étude en boucle ouverte du vérin permet d'identifier la fonction de transfert $H(p)$.

Dans MyViz avec le tableau de bord **Stabilisateur_BoucleOuverteOrientation.json**, procéder à un essai avec un signal de type rectangle, une amplitude de tension de 15 V et tous les autres paramètres par défaut. Une fois ces paramètres réglés, choisir une durée d'acquisition d'1 seconde et activer les consignes (si besoin, cliquer sur « Redresser le cadre » avant d'activer les consignes).



Tracer et caractériser l'évolution temporelle de la vitesse du vérin (on pourra travailler sur la tendance moyenne de l'évolution).

Justifier que le choix d'un système d'ordre 1 pour modéliser le vérin peut être retenu. Déterminer ses paramètres caractéristiques.

Compléter les 2 fichiers Scilab avec la fonction de transfert du vérin trouvée précédemment.

Modélisation de la structure articulée

La structure articulée permet de passer de l'énergie mécanique de translation de la tige du vérin par rapport au corps du vérin à une énergie mécanique de rotation du cadre par rapport au bateau.

Les composants mécaniques tels que les transmetteurs/adapteurs ne sont généralement pas modéliser par des équations différentielles mais par des équations non linéaires que l'on cherche à linéariser afin d'obtenir une relation de proportionnalité entre la sortie et l'entrée. On cherche donc ici une relation du type : $\dot{\gamma}_2 = K_S.V_V$ avec K_S le gain de la structure articulée.

Dans MyViz, avec le tableau de bord **Stabilisateur_Geometrique_Orientation.json**, réaliser une excursion (un aller-retour) sur toute la course du vérin.

Remarque : Le temps d'initialisation est plus long que sur les autres tableaux de bord.

Tracer alors l'évolution la vitesse du cadre (deg/s) en fonction de la vitesse du vérin 2 (mm/s).

Remarque : On pourra utiliser l'onglet **tracé XY** du menu « Tracer » de MyViz ou exploiter le fichier *csv*.

Réaliser le même essai mais avec le stabilisateur en mode Simulé. Tracer l'évolution la vitesse du cadre (deg/s) en fonction de la vitesse du vérin 2 (mm/s).

Analyser les différences entre l'expérience réalisée sur le système réel et celle réalisée avec le jumeau numérique en simulé. D'où peuvent venir les différences d'allure des courbes ?

Proposer alors une valeur moyenne du gain K_S.

Compléter les 2 fichiers Scilab avec la fonction de transfert de la structure articulée trouvée précédemment.

4 – Comportement du vérin

Tension seuil du vérin

Dans MyViz avec le tableau de bord **Stabilisateur_BoucleOuverteOrientation.json**, réaliser un essai pour un consigne en rampe d'amplitude 10 V et de temps de montée 5 s pour une durée d'acquisition de 8 s.

Vérifier la bonne évolution de la tension de commande et analyser l'évolution de la vitesse du vérin 2. Que constate-t-on ?

En analysant l'évolution du courant dans le vérin 2 proposer une explication à ce phénomène.

Proposer alors une valeur de vitesse seuil du vérin notée V_{seuil}.

Modifier le schéma bloc « STABILISATEUR_BO_VERIN_RAMPE_modele_scilab_ELEVES.zcos », dans Scilab, qui permet de « seuiller » la vitesse de translation de la tige du vérin.

Simuler alors le comportement à une rampe d'amplitude 10 V à la fin d'une durée de 5 s. Comparer le résultat à la courbe expérimentale.

Modifier le schéma bloc « STABILISATEUR_BO_VERIN_ECHELON_modele_scilab_ELEVES.zcos » afin de décrire le comportement du vérin décrit précédemment.

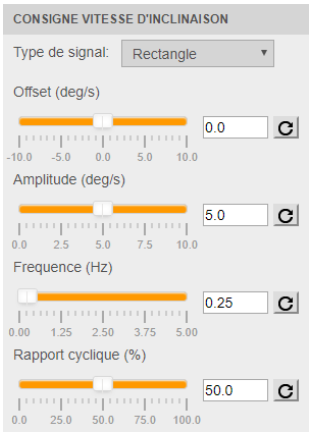
Réaliser de nouvelles simulations afin d'observer le comportement du vérin en boucle ouverte pour les différentes tensions précédentes. Conclure sur cette modélisation.

5 – Analyse et amélioration des performances

Cette partie va permettre de solliciter le cadre du gyroscope afin de caractériser ses performances.

On utilisera MyViz avec le tableau de bord ***Stabilisateur_AsservissementVitesseInclinaison.json***.

Comportement sans correction



Appliquer une consigne en vitesse de type rectangle d'amplitude 5 deg/s avec un offset de 0 deg/s, une fréquence de 0,25 Hz et un rapport cyclique de 50 %, sans vitesse du volant d'inertie et sans correction ($K_p = 1, K_i = 0$ et $K_d = 0$). On pourra choisir une durée d'acquisition de quelques secondes.

Caractériser les performances du comportement de l'asservissement du cadre.

Remarque : Pour des mesures les plus précises possibles, vous utiliserez la fonction EXPLORER (bouton disponible en dessous de chaque évolution temporelle) qui dispose de curseurs de mesure.

Conclure sur la possibilité de maîtriser la vitesse d'inclinaison du cadre et donc la valeur du couple gyroscopique créé.

Comportement avec un correction proportionnelle

La correction proportionnelle consiste à donner plus ou moins d'importance à l'écart entre la vitesse désirée et la vitesse mesurée en sortie du comparateur.

Reprendre les essais précédents avec différentes valeurs du gain K_p : $K_p = 2$ puis 3, puis 4. On utilisera le bouton « redresser cadre » afin de remettre le cadre en position verticale entre chaque essai.

Tracer les évolutions temporelles des vitesses du cadre pour les valeurs de $K_p = 1, 2, 3$ et 4.

Préciser l'influence du gain sur les performances de l'asservissement.

Compléter le fichier Scilab « STABILISATEUR_BO_VERIN_ECHELON_modele_scilab_ELEVES.zcos » en rajoutant un correcteur dans la chaîne directe puis en créant une boucle de retour et un comparateur.

Simuler le modèle avec les mêmes valeurs de gain proportionnel K_p que dans la partie expérimentale.

Comparer les résultats expérimentaux et simulé. Conclure sur la validité de la modélisation et l'influence du gain K_p sur la réponse du système et ses performances.

Amélioration des performances

On se proposer maintenant d'améliorer les performances de l'asservissement.

Toujours avec le même type de signal d'entrée, réaliser un essai avec les paramètres de correction par défaut (cliquer sur la flèche ronde à droite des valeurs).

Tracer l'évolution temporelle de la vitesse de consigne du cadre et de la vitesse mesurée.

Simuler le modèle avec les mêmes valeurs de gain de PID que dans la partie expérimentale.

Caractériser les performances de l'asservissement ainsi asservi.

Correcteur Proportionnel Intégral

Reprendre des essais expérimentaux pour $K_i = 10, 20, 30, 40, 50$ et 60.

Reprendre des essais simulés pour $K_i = 10, 20, 30, 40, 50$ et 60.

Quelle est l'influence du gain K_i du correcteur sur les performances de l'asservissement en vitesse ?

Correcteur Proportionnel Dérivé

Pour une valeur de K_p par défaut et $K_i = 60$, faire des essais (toujours la même consigne) pour des valeurs de $K_d = 0{,}01, 0{,}05$ et $0{,}1$.

Réaliser avec le modèle Scilab, les mêmes essais que ceux réalisés expérimentalement.

Que constatez-vous sur les performances du cadre asservi en vitesse d'inclinaison ?

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	5	0	0
2	5	20	0
3	2.5	20	0
4	5	20	0.05
5	2.5	0	0.05
6	2.5	0	0.1
7	2.5	40	0.1
8	2.5	40	0.05

Essais expérimentaux

Pour chaque essai expérimental :

- Appliquer un échelon de consigne en vitesse de type rectangle d'amplitude 5 deg/s avec un offset de 0 deg/s, une fréquence de 0,25 Hz et un rapport cyclique de 50 %, sans vitesse du volant d'inertie
- 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° en cliquant sur « Redresser le cadre ».

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.

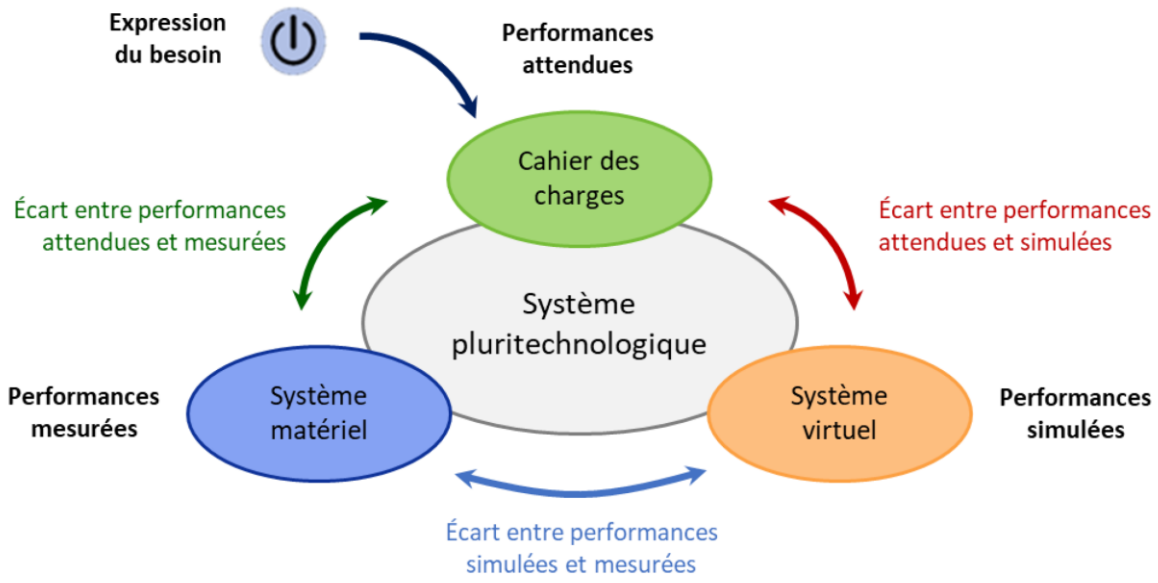
Essais numériques

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 ?