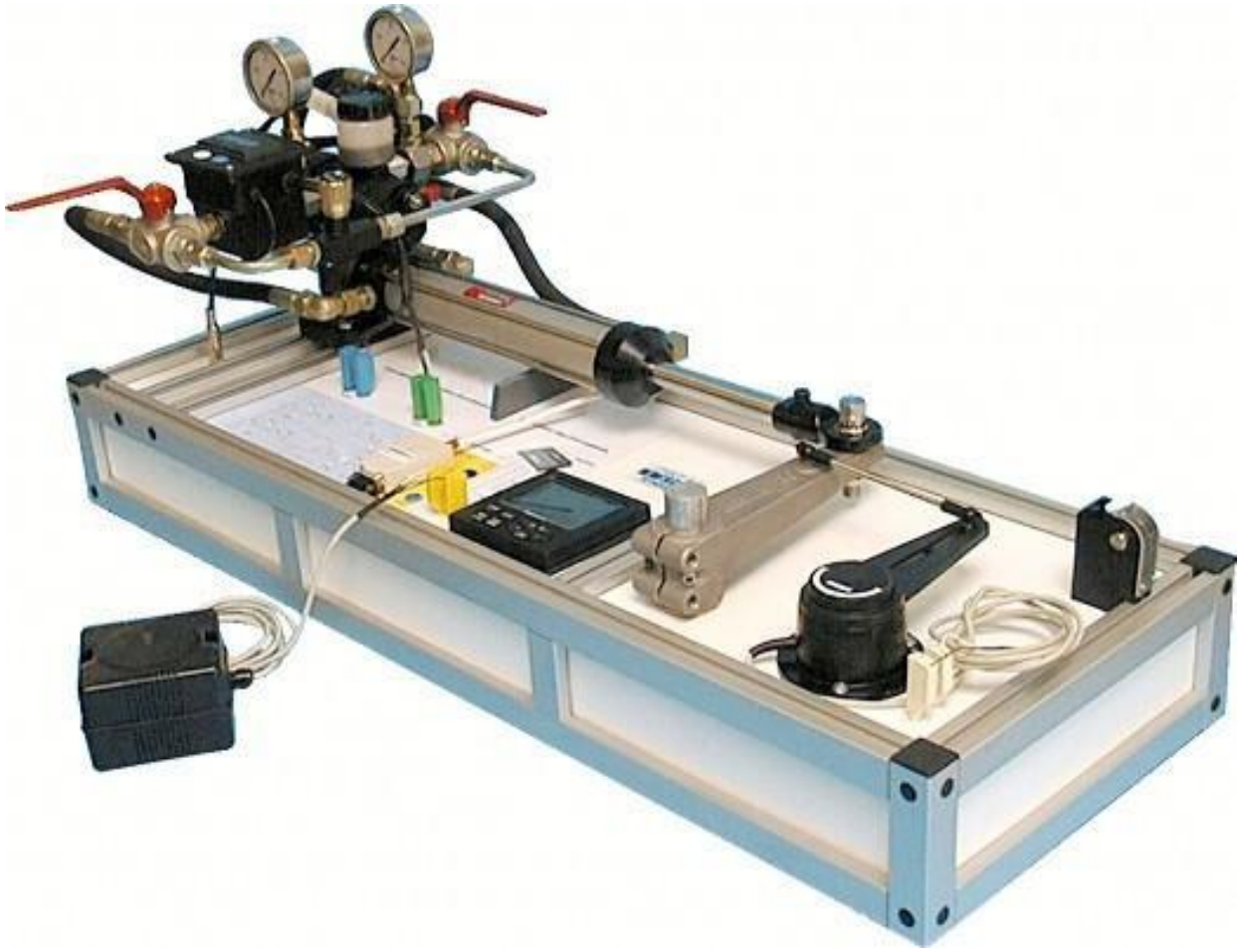
Travaux Pratiques – ENERGETIQUE
PILOTE AUTOMATIQUE HYDRAULIQUE

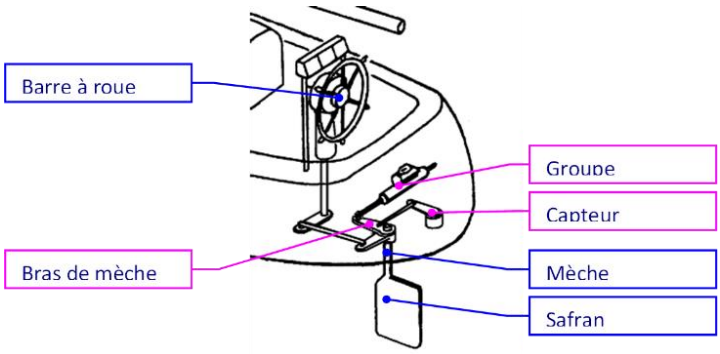


Objectifs du TP

L'activité principale de ce TP consiste à mesurer, identifier et vérifier les caractéristiques dynamiques du galet freineur afin de caractériser l'architecture optimale au regard d'un critère d'efficacité énergétique.

1 – Présentation et problématique

Le pilote automatique de bateau détermine l'orientation du safran (gouvernail) en fonction d'un cap de consigne, lorsque le barreur est occupé à d'autres tâches (réglage des voiles, repos, …). Le système agit pour cela sur le bras de mèche, solidaire du safran.



Les produits proposés sur le marché des pilotes automatiques pour bateaux permettent de répondre à un grand éventail de besoins. Les solutions proposées peuvent notamment être classées en fonction des puissances qu'elles sont capables de transmettre au safran, donc de leurs capacités à satisfaire aux exigences des manœuvres réalisées sur les différents types de bateaux.

Sur un voilier, la source d'énergie (batterie 12V) possède une capacité limitée et ne se trouve pas renouvelée sans dispositif annexe (moteur, éolienne, …), il semble donc fondamental que la consommation énergétique du dispositif soit la plus faible possible.

Au-delà de l'énergie utile permettant la manœuvre du safran, on souhaite localiser et quantifier les différentes pertes énergétiques afin d'identifier les conditions d'exploitation du système les plus sobres en énergie.

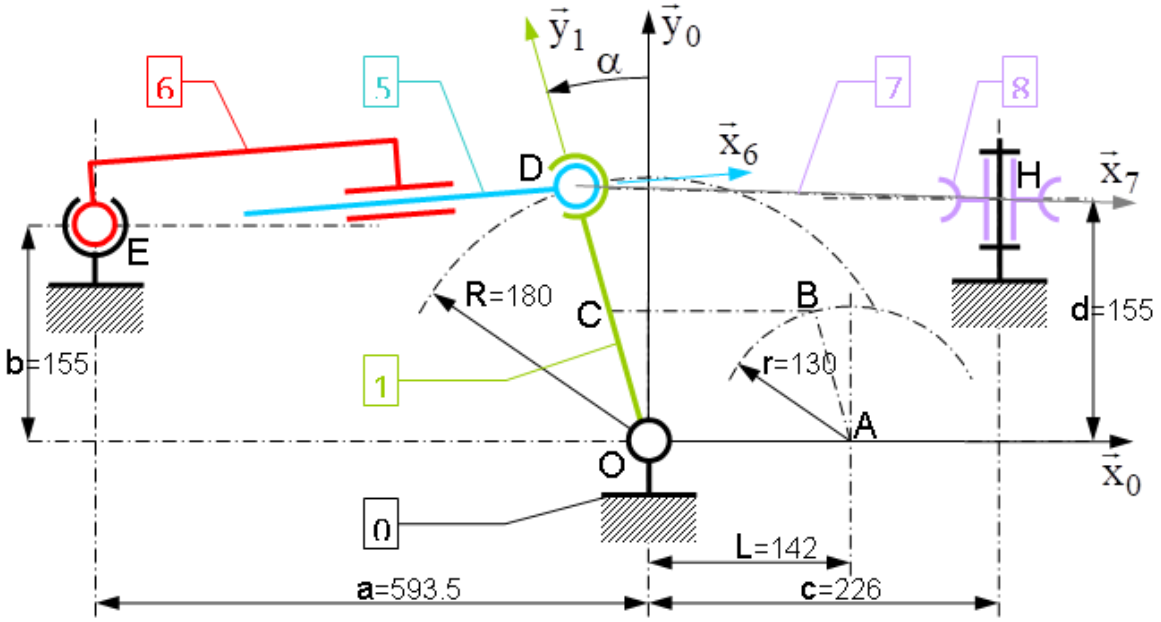
On peut se demander si une chaîne de puissance qui présente trois étages successifs de conversion (Moteur à courant continu, pompe hydraulique à pistons axiaux, vérin hydraulique) peut-elle satisfaire à une exigence d'efficacité énergétique ?

En s'aidant du **DOSSIER TECHNIQUE** et **DOSSIER RESSOURCES**, identifier les différents composants du pilote automatique hydraulique.

Repérer les canalisations et enceintes à haute et basse pression lors d'un déplacement de la tige du vérin vers la gauche.

2 – Détermination analytique du rendement de la chaîne de conversion d'énergie

Afin de simuler l'action résistante de l'eau sur le safran et le couple qu'elle induit par rapport à son axe de pivotement, le banc d'étude est pourvu d'un dispositif de mise en charge utilisant des masses pesantes soutenues par un câble et une poulie de renvoi. On rappelle ici le paramétrage géométrique du dispositif et les résultats associés.



On note $\alpha = (\overrightarrow{x_0}, \overrightarrow{x_1}) = (\overrightarrow{y_0}, \overrightarrow{y_1})$, $\beta = (\overrightarrow{x_0}, \overrightarrow{x_6}) = (\overrightarrow{y_0}, \overrightarrow{y_6})$, $\gamma = (\overrightarrow{x_0}, \overrightarrow{x_7}) = (\overrightarrow{y_0}, \overrightarrow{y_7})$ et $\overrightarrow{ED} = x.\overrightarrow{x_6}$

Remarque : γ aurait une valeur négative pour la configuration représentée ci-dessus.

Les résultats de l'étude géométrique donnent :

$$\beta = Arctan\frac{-b + R.cos\alpha}{a - R.sin\alpha}$$

$$\gamma = Arctan\frac{d - R.cos\alpha}{c + R.sin\alpha}$$

$$x_{vérin} = \sqrt{a - R.sin^2\alpha + b - R.cos^2\alpha} - \sqrt{a^2 + b - R^2}$$

Remarque : $x_{vérin} = 0$ pour la position médiane définie par un angle de barre $\alpha = 0$.

Relations cinématiques

On note V la vitesse linéaire de rentrée de tige du vérin par rapport au cylindre.

Les résultats de l'étude cinématique donnent $V = R.\dot{\alpha}.\cos(\beta - \alpha)$

La vitesse de rotation du bras de mèche par rapport au bâti est notée $\omega_b = \dot{\alpha}$.

Relations statiques

En considérant que la charge pesante $m.g$ transmet intégralement son effet sur le bras de mèche (liaison pivot poulie/bâti parfaite, pas d'effets dynamiques, câble parfait) par le câble arrimé au point D, le couple correspondant exprimé par rapport à l'axe $(O, \overrightarrow{z_0})$ vaut $\overrightarrow{M_{O,7\to1}}.\overrightarrow{z_0} = -C_b$

Si la liaison pivot mèche/bâti est parfaite, C_b correspond alors au couple généré par le vérin pour équilibrer le bras de mèche autour de son axe $(O, \overrightarrow{z_0})$.

L'effort F de tirage développé par le vérin vaut alors : $F = \frac{C_b}{R.\cos(\beta-\alpha)}$

Remarque : Les valeurs faibles des angles β et γ permettent l'approximation $F = m.g$ lorsque la configuration du système est proche de la situation médiane définie pour $\alpha = 0$.

Hypothèses et notations

- On isole l'ensemble des éléments mobiles (solides et fluides) de la transmission depuis le rotor du moteur à courant continu jusqu'au bras de mèche.
- Les mouvements sont repérés par rapport au bâti (coque du voilier) supposé constituer un bon repère galiléen (on néglige donc les effets d'inertie dus aux mouvements de la coque par rapport au repère terrestre sur les éléments mobiles de la transmission)
- On suppose en première approximation qu'aucune variation d'énergie cinétique n'a lieu sur ces éléments mobiles (étude en régime établi).
- On utilise les notations définies dans la chaîne d'information et de puissance (voir **DOSSIER RESSOUCES**).
- L'étude se fera avec une charge en bout de vérin sur le bras de mèche, notée m, de 43 kg (support de masse + 40 kg).

Approche énergétique globale

Exprimer la puissance électrique fournie au moteur $P_{élec}$ en fonction de U et I.

Exprimer la puissance mécanique disponible sur l'arbre moteur $P_{méca}$ en fonction de C_m et ω_m.

Exprimer la puissance développée par l'action du câble sur le bras de mèche dans son mouvement par rapport au bâti (au point O) P_{barre} en fonction de C_b et ω_b.

Remarque : Bien identifier le signe de cette puissance qui correspond à la puissance développée par une action résistante simulant l'action de l'eau sur le safran.

Montrer que $C_b = m.g.R.\cos(\beta - \alpha)$ avec m la masse ajoutée en bout de vérin.

Appliquer le théorème de l'énergie cinétique appliqué à la chaine de transmission d'énergie par rapport au bâti.

En déduire les relations entre les différentes puissances évoquées précédemment, s'il n'y avait aucune perte énergétique.

En déduire les expressions théoriques des rendements des différents constituants de la chaîne de puissance ainsi que le rendement global du pilote automatique hydraulique.

Calculer (en utilisant si besoin les valeurs des essais de l'équipe **EXPERIMENTATEUR**) les valeurs des différentes puissances et rendements des différents constituants de la chaîne de puissance. En déduire la valeur du rendement global du pilote automatique hydraulique.

Commenter et analyser les résultats obtenus.

3 – Détermination expérimentale du rendement de la chaîne de conversion d'énergie

Bilan énergétique global

Suivre le protocole de mise en tension et mouvement du pilote dans le **DOSSIER RESSOURCES.**

Avec le câble décroché du bout du vérin, vérifier que les commandes manuelles ⇦ et ⇨ sont opérationnelles, c'est-à-dire qu'elles provoquent les mouvements du vérin.

Arrimer le câble au bras de mèche et placer 40kg de masse sur le plateau de charge.

Lancer une acquisition

Commander en mode manuel le soulèvement des masses.

Lorsque la commande manuelle est relâchée, les masses retombent !!

Que penser de la réversibilité du vérin ? Est-ce nécessairement un défaut ?

Hormis les petites variations locales, l'évolution temporelle de V traduit-elle un mouvement uniforme ? Qu'en est-il des autres éléments mobiles du dispositif ? Que peut-on en conclure sur la variation d'énergie cinétique au cours du mouvement ?

Rappeler l'expression littérale de C_{barre} en fonction de la charge placée en bout de vérin m. Calculer la valeur numérique approchée dans le cas de l'essai et conclure sur la validité des résultats obtenus.

Visualiser les courbes et commenter les valeurs de puissance et de rendement obtenus.

A partir de la « CHAINE D'INFORMATION ET DE PUISSANCE » du **DOSSIER RESSOURCES**, identifier ce que représentent les puissances relevées à l'aide du logiciel $P_{élec}, P_{méca}, P_{hydrau}, P_{vérin}$ et P_{barre}.

Donner leurs valeurs moyennes pour l'essai effectué (voir **DOSSIER RESSOURCES** pour *Editer un rapport*).

Exprimer ce que représentent les rendements indiqués et donner leurs valeurs moyennes pour l'essai effectué.

En déduire le rendement de l'ensemble moteur-pompe (expression et valeur moyenne). Ce rendement parait-il suffisant ?

Comportement de l'ensemble moteur-pompe

Afin de mieux cerner le comportement énergétique de l'ensemble moteur-pompe, on cherche à identifier les principaux paramètres influents.

Pour obtenir de plus fortes sollicitations sur l'ensemble moteur pompe, plus proches des sollicitations réelles d'exploitation, on génère l'effet résistant directement en sortie de pompe à l'aide d'une restriction réglage.

De manière à produire des effets résistants significatifs, configurer le dispositif de manière à ce que la pompe débite à débit maxi dans la restriction réglable (voir **DOSSIER RESSOURCES**).

Remarque : La seule pression enregistrée est celle de refoulement. On vérifiera donc sur le manomètre à cadran que la pression relative d'admission est proche de zéro.

Remarque : Le couple moteur n'est pas mesuré mais le fabricant fournit une courbe expérimentale permettant de modéliser le couple délivré par le moteur à courant continu comme proportionnel à l'intensité du courant traversant l'induit (voir **DOSSIER TECHNIQUE**).

Comportement du moteur et de la pompe à pression de charge variable pour le débit à vide maximal (1,8 L/min)

Régler le débit à vide maximal à 1,8 L/min en modifiant si besoin le serrage de la vis de réglage du débit (voir **DOSSIER TECHNIQUE** dans la partie « STRUCTURE DE LA PARTIE OPERATIVE »).

Ouvrir complétement la restriction réglable et identifier la commande manuelle qui fait débiter la pompe comme souhaité.

Visser progressivement la restriction réglable et vérifier sur le manomètre à cadran l'augmentation de pression de refoulement provoquée.

On ne dépassera pas 12 bars de pression au manomètre afin de ne pas déclencher la sécurité !

Réaliser un essai en faisant évoluer progressivement la pression de refoulement de 0 à 12 bars.

Visualiser les courbes de rendement du moteur et de la pompe hydraulique.

Construire un signal combiné permettant de visualiser le rendement du moteur, celui de la pompe et le rendement global de l'ensemble {moteur + pompe} en fonction de la pression de refoulement.

Comportement du moteur et de la pompe à débit à vide variable pour une pression constante de 10 bars

Régler la pompe au débit maxi et ajuster la restriction réglable de manière à produire une pression de refoulement de 10 bars.

Ne pas forcer en serrant ou desserrant la vis de réglage du débit !

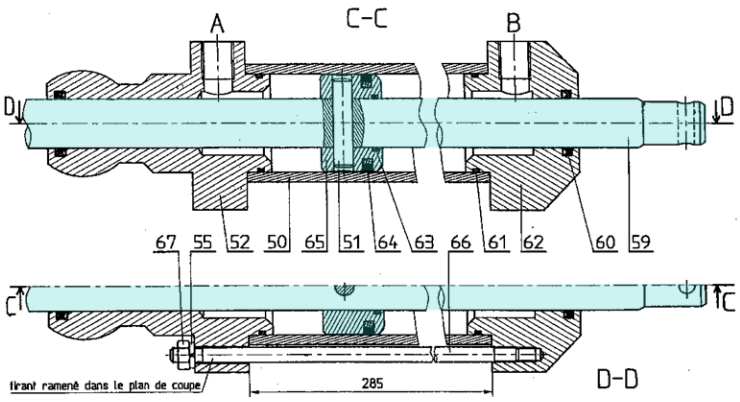
Réaliser un essai en réduisant progressivement le débit fourni par la pompe et en fermant la restriction de manière à maintenir une pression sensiblement constante de 10 bars.

Construire un signal combiné permettant de visualiser le rendement du moteur, celui de la pompe, le rendement global {moteur, pompe} en fonction du débit de la pompe. Analyser les résultats obtenus.

Conclure sur les conditions d'utilisations de l'ensemble moteur pompe.

4 – Détermination de la puissance et du rendement du vérin lors d'une manœuvre sur la barre

Bilan énergétique du vérin



Il s'agit d'un vérin double-tige (même effort développé en poussant et en tirant, à pression d'alimentation identique).

On donne $D_e = 40\ mm$ (diamètre extérieur du piston) et $D_i = 20mm$ (diamètre de tige).

Aspect statique

On note p la pression hydraulique délivrée par la pompe.

Exprimer l'effort "moteur" fourni au piston noté F_m résultant de l'application de la pression p répartie uniformément sur la section active du piston.

Construire le signal combiné temporel $\frac{F}{F_m}$ correspondant au rendement hydro-mécanique du vérin, à partir de "*p_pompe_MPa*" et de "*F_vérin_N*". Analyser la courbe obtenue.

Calculer la valeur moyenne de la "$perte_force$" $= F_m - F$.

Quelle est la cause principale de cette "$perte_force$" ?

Aspect cinématique

On note q le débit hydraulique en sortie de pompe.

Exprimer la vitesse attendue V_q de déplacement piston/cylindre à partir du débit q.

Incorporer en seconde ordonnée du signal combiné précédent le rendement volumétrique $\frac{V}{V_q}$ du vérin construit à partir de "*q_pompe_l/min*" et "*V_vérin_mm/s*". Analyser la courbe obtenue.

Calculer la valeur moyenne de la "$perte_vitesse$" $= V_q - V$.

Quelle est la cause principale de cette "$perte_vitesse$" ?

Aspect énergétique

On note S la section active du piston.

Exprimer la puissance développée par le fluide sur le piston dans son mouvement par rapport au cylindre.

Montrer qu'elle peut également s'exprimer comme le produit du débit volumique et de la pression.

Compléter en troisième ordonnée avec le rendement énergétique du vérin "*r_vérin*".

Comparer les courbes et conclure sur le comportement énergétique d'un vérin.

Influence des conditions d'exploitation

On souhaiterait identifier l'influence des conditions d'exploitation (et non celle des critères de conception) du vérin sur ces pertes. On retient que la vitesse de translation tige-cylindre est liée au débit et la pression d'alimentation.

Réaliser un nouvel essai sous charge maximale (40 kg) en manœuvrant la vis de débit (le plus régulièrement possible) de manière à atteindre un débit presque nul en fin d'essai.

Tracer le signal combiné du rendement du vérin (*r_vérin*) en fonction du débit de la pompe (*q_pompe_l/min*).

Analyser la courbe obtenue et qualifier l'influence du débit sur le rendement du vérin.

Réaliser un nouvel essai sous charge moyenne (20 kg) à débit maxi au voisinage de la position médiane.

Tracer le signal combiné du rendement du vérin (*r_vérin*) en fonction du temps *(temps_s*).

Relever les rendements moyens du vérin et calculer la "$perte_force$" moyenne $F_m - F$.

Réaliser un nouvel essai à charge nulle.

Tracer le signal combiné du rendement du vérin (*r_vérin*) en fonction du temps (*temps_s*).

Relever les rendements moyens du vérin et calculer la "$perte_force$" moyenne $F_m - F$.

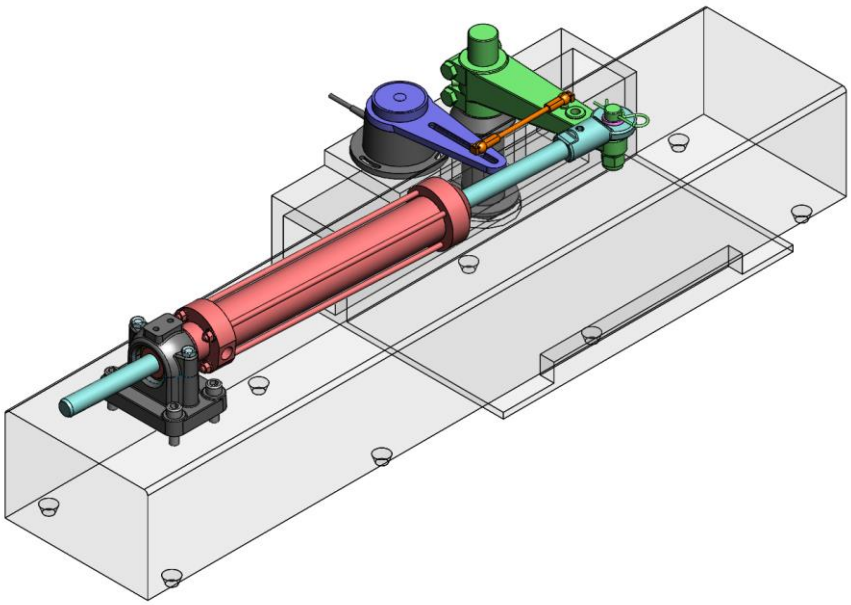
En déduire l'allure des courbes d'évolution des rendements du vérin en fonction de la pression et également l'évolution de la perte $F_m - F$ en fonction de la pression.

Sachant que le vérin peut développer jusqu'à 2360 N, le domaine couvert par les essais précédents permet-il d'extrapoler les résultats ?

D'un point de vue du seul rendement énergétique du vérin, quelles seraient les conditions d'exploitation les plus performantes ?

5 – Détermination numérique de la puissance du vérin lors d'une manœuvre sur la barre

Ouvrir la maquette SolidWorks « PILOTE_*ENERGETIQUE* » dans le dossier « PILOTE CAO E*NERGETIQUE* » (penser à dé-zipper le dossier CAO avant de l'utiliser : « clic droit » sur le dossier zippé puis « Extraire le dossier »).



Réaliser une simulation en prenant en entrée une vitesse de translation (*Glissière 1*) identique à celle des essais expérimentaux.

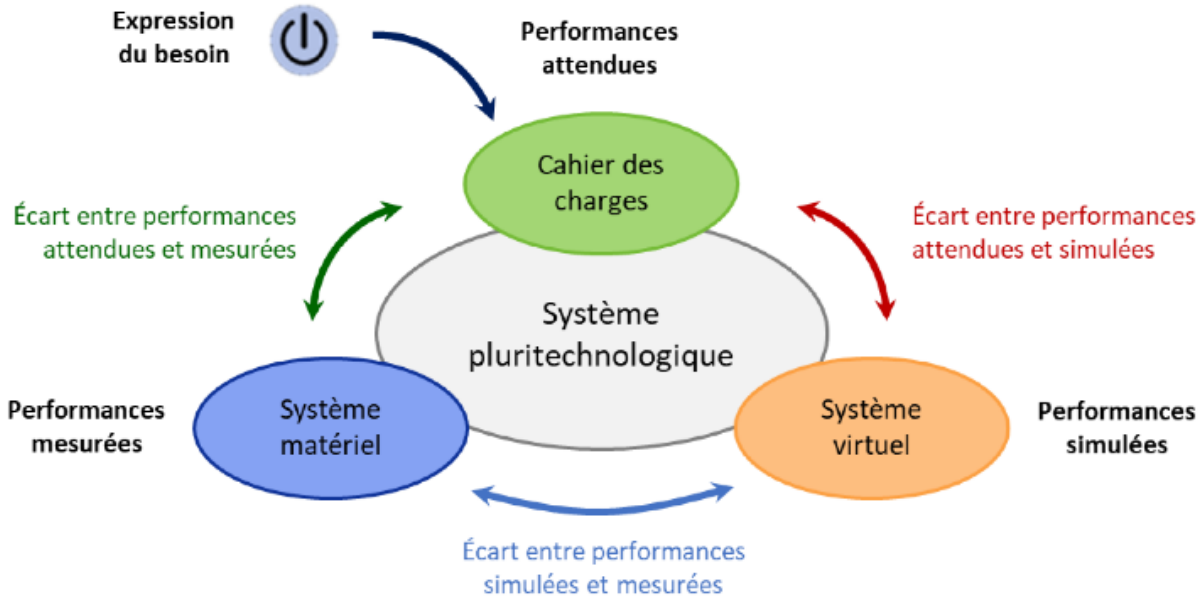
Remarque : Le modèle a une mobilité de 2. Il faudra alors fixer la liaison « Rotule2 » à 0 pour sa composante R_x.

Déterminer l'évolution temporelle de l'effort dans le vérin en fonction du temps pour un effort extérieur de 43 kg.

En déduire la puissance moyenne développée par le vérin.

Conclure sur les résultats obtenus numériquement.

6 – Validation

L'objectif pour le groupe est de comparer pour le rendement de la chaîne de conversion d'énergie, les résultats obtenus à partir des mesures expérimentales et ceux obtenus par les calculs analytiques. Calculer les écarts et estimer d'où ils peuvent provenir.

L'objectif pour le groupe est de comparer pour la puissance du vérin lors d'une manœuvre, les résultats obtenus à partir des mesures expérimentales et ceux obtenus par les calculs analytiques et par la simulation numérique. Calculer les écarts et estimer d'où ils peuvent provenir.