

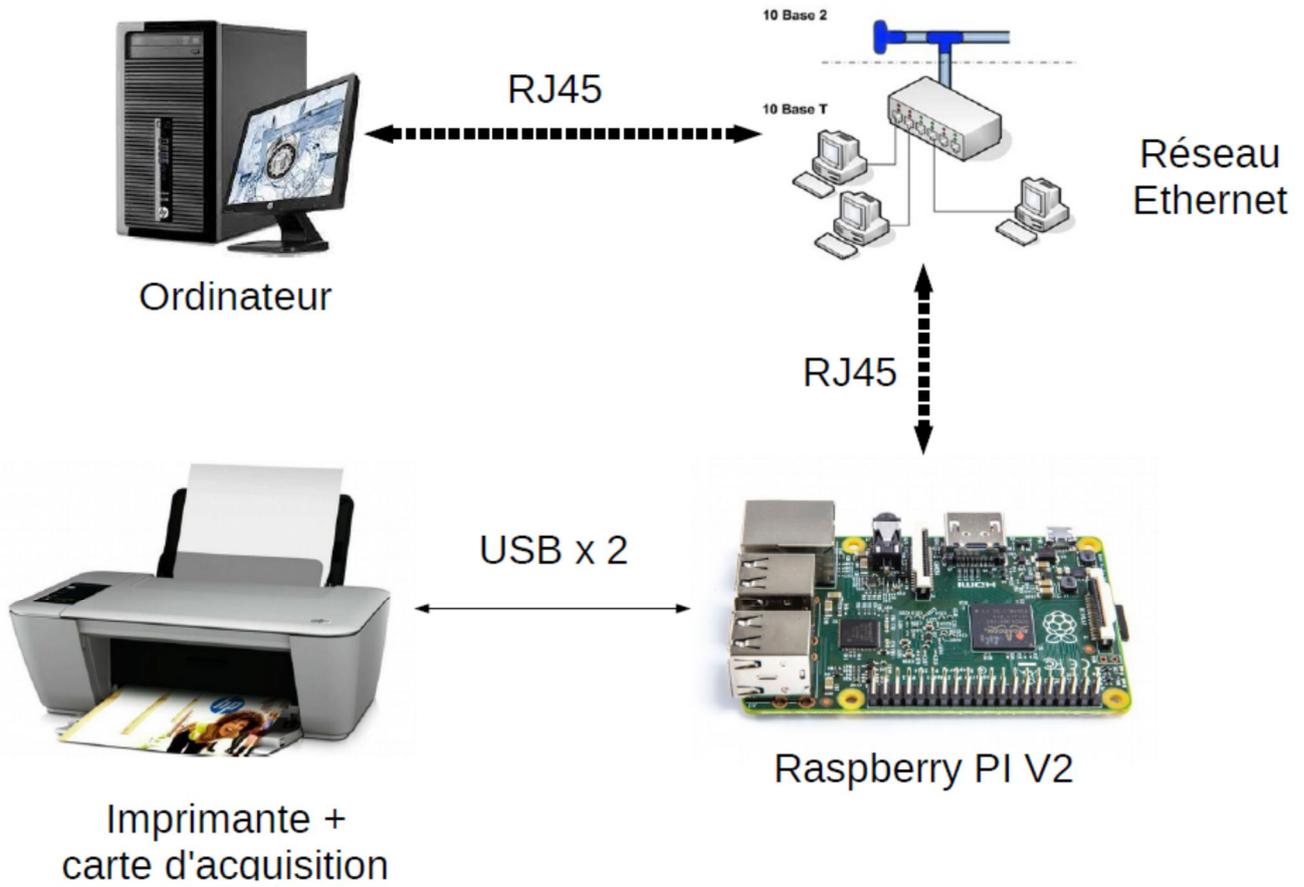


Travaux Pratiques de SII

Série 1 : Rappels sur la modélisation des systèmes



TP 1 (2 semaines) Modélisation d'un axe d'une imprimante jet d'encre couleur

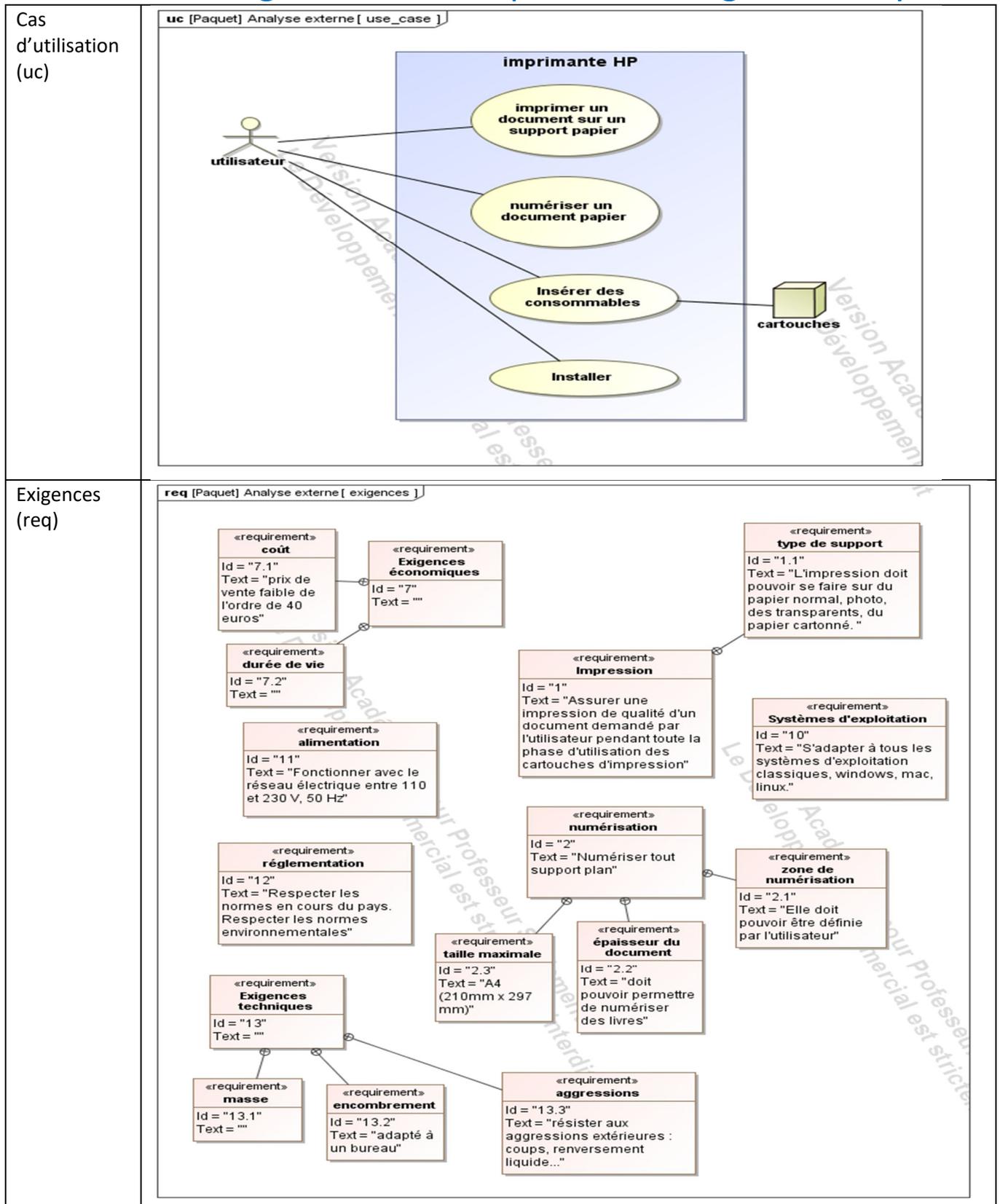


TP 2 (1 semaine) Modélisation de mécanismes

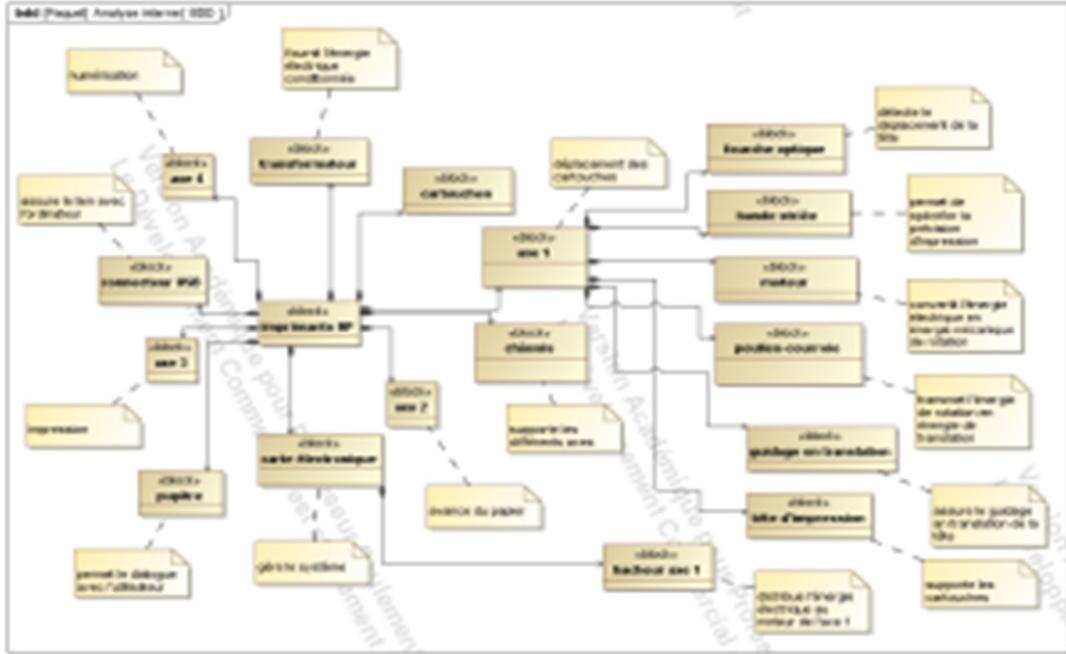


Série 1 : 1- Modélisation du besoin, de la structure et du comportement d'un système automatisé (imprimante jet d'encre)

Présentation générale de l'imprimante: diagrammes SysML

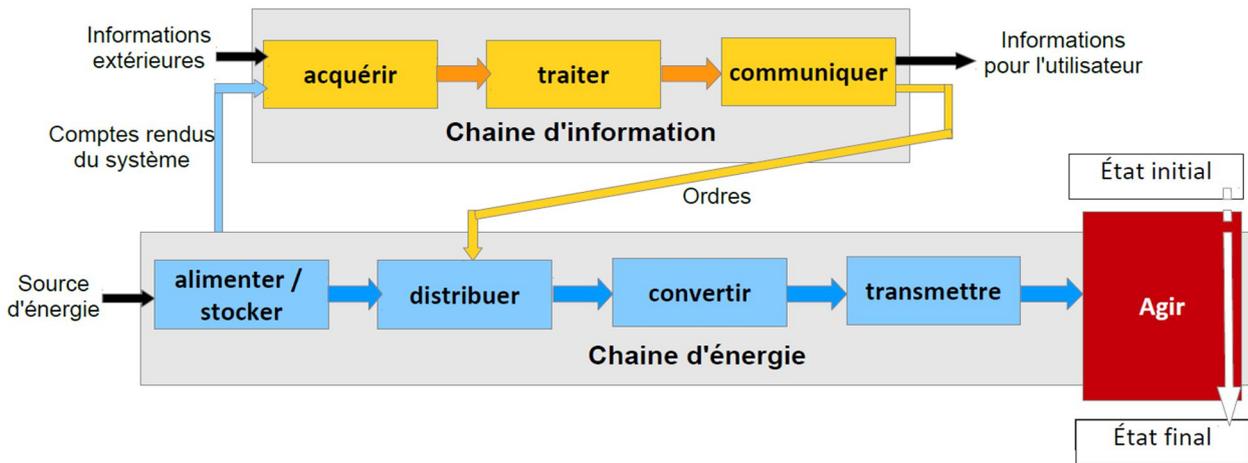


Définition de blocs (bdd)

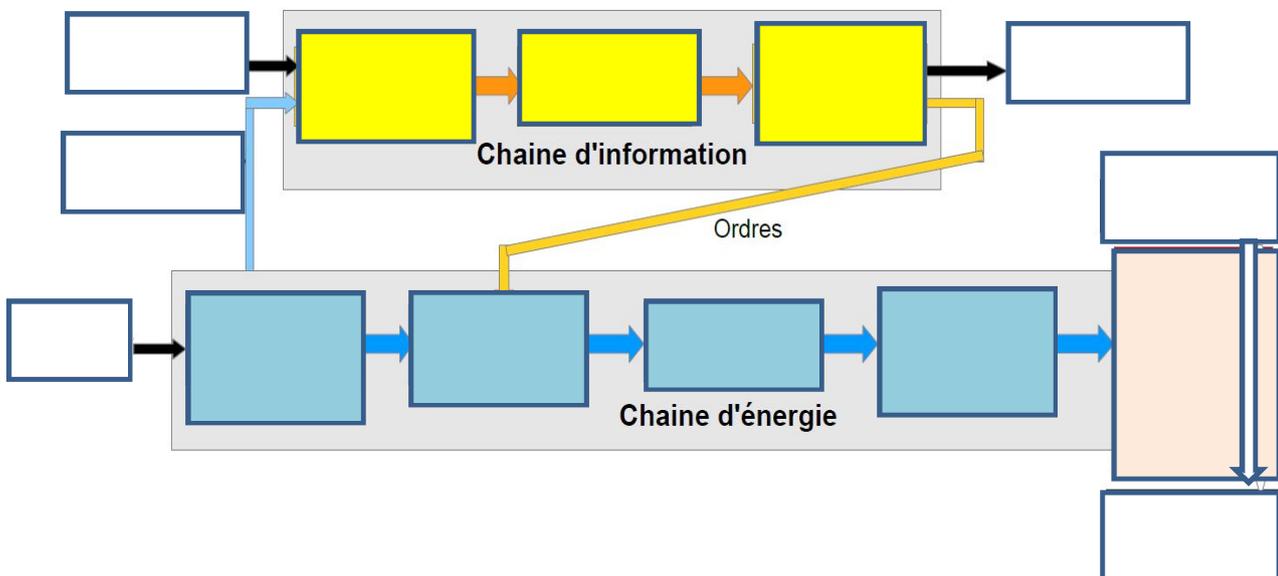


Chaîne fonctionnelle : aspect académique général

Structure l'information pour un couple actionneur-effecteur. Schéma à adapter au système traité.



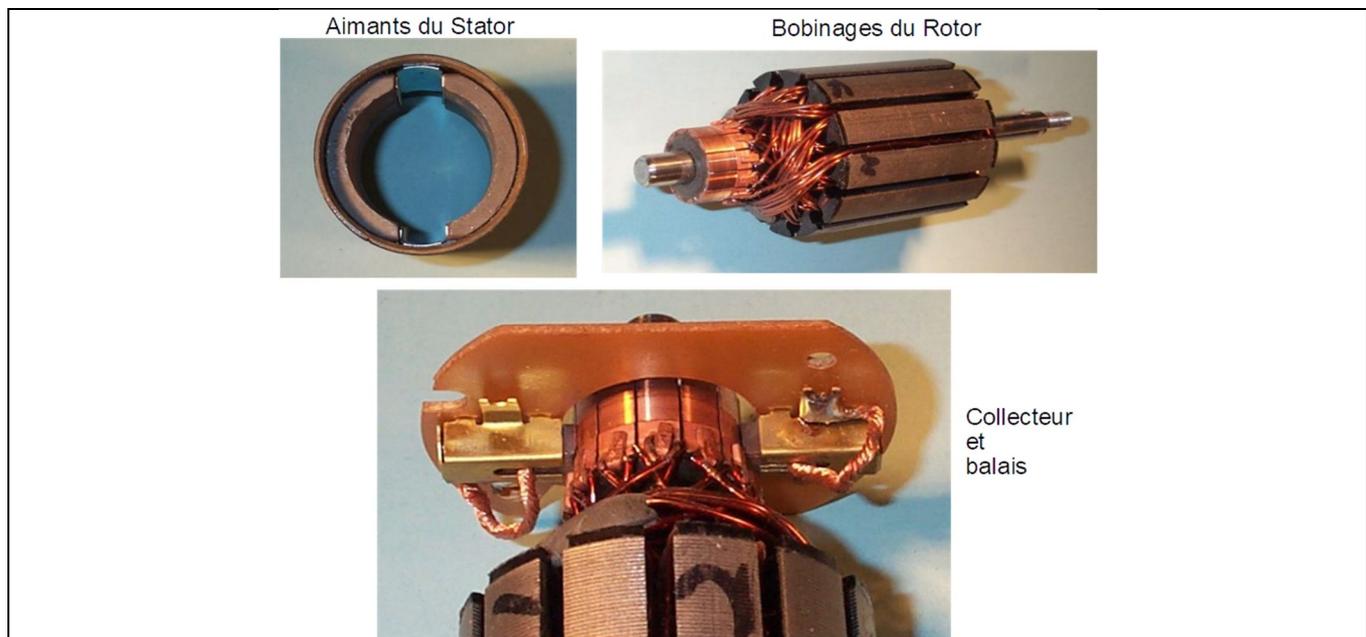
Chaîne fonctionnelle de l'axe 1 de l'imprimante



Modélisation du comportement : par bloc

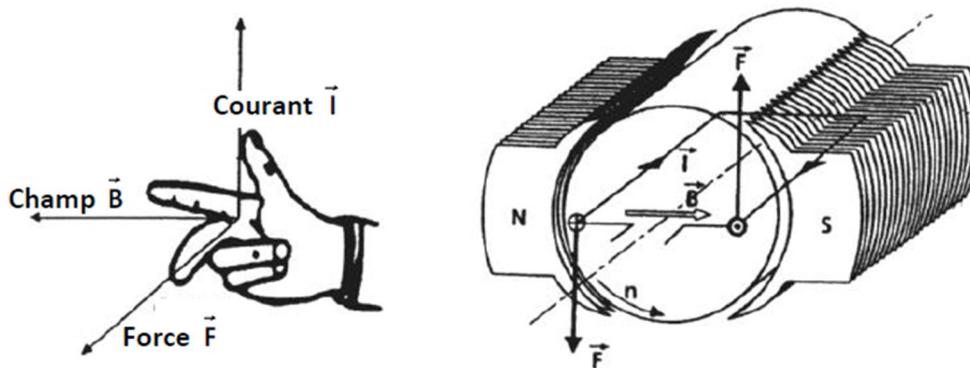
Moteur à courant continu

Structure

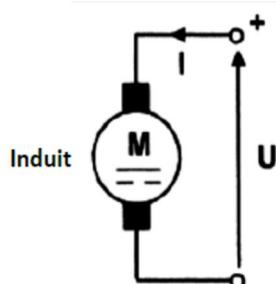


Principe physique

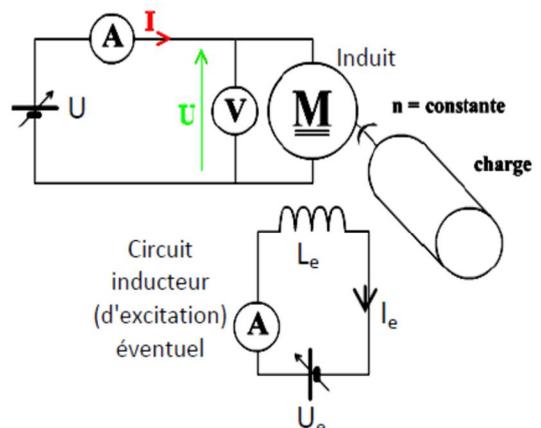
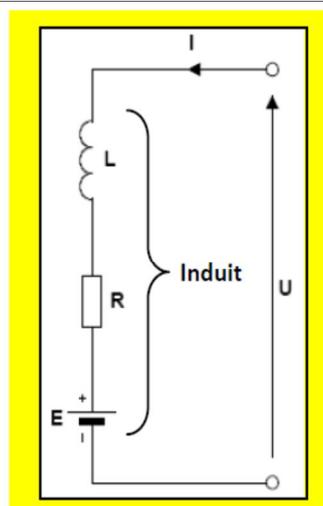
Loi de Laplace, règle des trois doigts de la main droite (produit vectoriel) $\vec{F} = I \cdot \vec{L} \wedge \vec{B}$



Modélisation schématique



$$u(t) = Ri(t) + L \frac{di}{dt} + e(t)$$



Modèle de connaissance

Équation électrique :	
Équation de couplage électromécanique :	
Équation mécanique :	
Équation de modération (loi de Lenz) :	

Unités des grandeurs

u(t) et e(t)	C _m (t) et C _r (t)
i(t)	ω _m (t)

Remarque : Prendre garde aux conversions d'unité

Unités des paramètres

R	J _{éq}	k _e
L	f	k _t

Remarque : prendre garde aux conversions + usages techniques (unité de k_e)

Modèle du MCC dans le domaine de Laplace avec CI nulles

Schéma-blocs

--

Remarque : une caractéristique particulière de ce système est d'être physiquement bouclé, loi de modération de Lenz (un phénomène lutte contre la cause qui lui a donné naissance). Ce n'est pas un asservissement.

Principe de superposition

--

Influence de la tension d'alimentation : $H_m(p) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\Omega_m(p)}{U_m(p)} \Big|_{C_r(p)=0}$

Formule de Black :
Forme canonique :
Pourquoi n'est-ce pas une transmittance 'en poursuite' ? :

Hypothèses simplificatrices fréquentes :

- effets inductifs rapides devant effets mécaniques : coupés donc négligeables devant autres tensions
- résistance fluide à haute vitesse : pas atteinte donc négligeables devant couples moteurs et résistants

Influence de la tension d'alimentation : transfert simplifié

gain :

constante de temps :

Influence de la perturbation : transfert $H_{Cr}(p) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\Omega_m(p)}{C_r(p)} \Big|_{U(p)=0}$

Pourquoi n'est-ce pas une transmittance 'en régulation' ? :

Modèle de comportement du MCC

Technique à suivre pour identification indicelle : *a priori* en boucle ouverte

- Possibilité de solliciter directement le système à identifier (ici tension moteur) ? sinon adaptation
- Possibilité d'observer directement la grandeur de sortie du modèle (ici vitesse angulaire du moteur) ? sinon adaptation
- Système sollicité par échelon raisonnable (éviter les saturations de la grandeur mesurée)
- Proposition argumentée d'une structure de modèle : oscillations, point d'inflexion, tangente à l'origine ?

Identification des paramètres : graphique + analytique et/ou avec abaques

Si pas d'essai en boucle ouverte possible ?

Présence d'un retard pur ?

Transfert :

Risques :

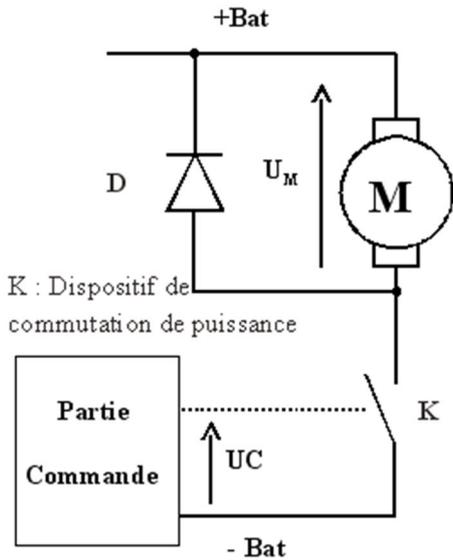
Hacheur

Fonction

Intérêt pour la variation de vitesse d'une machine à courant continu : il est plus simple de commander une commutation logique d'interrupteurs que de faire varier une tension continue à la source.

Structure et fonctionnement

1 quadrant



Rapport cyclique

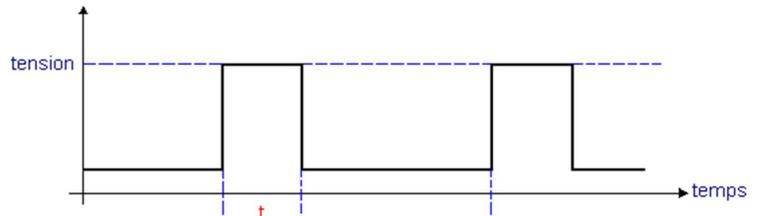
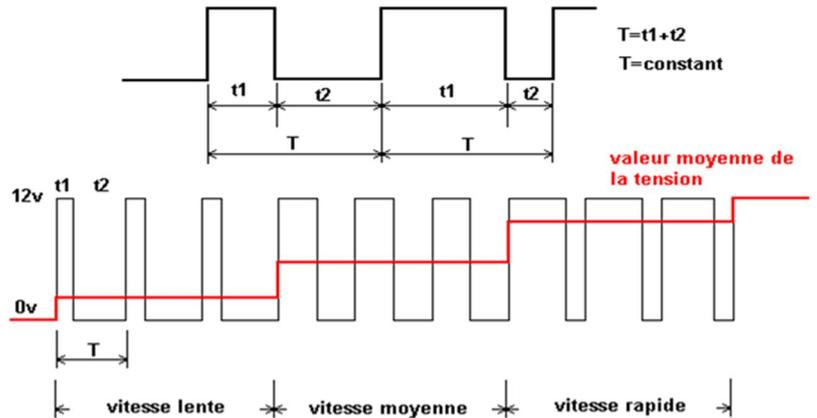


Fig. 51. - Rapport cyclique $\alpha = \frac{t}{T}$ ($0 < \alpha < 1$).

Hypothèse fondamentale : $T \ll T_{min}$, la commande est rapide devant la partie opérative

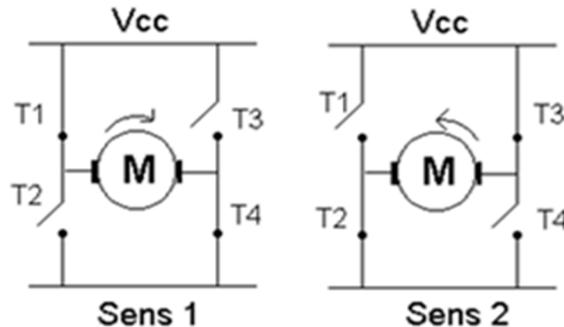
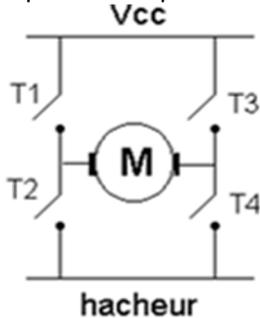
Conséquence : la partie mécanique filtre les composantes harmoniques et ne laisse passer que la composante continue qui est la moyenne de la tension

Variation de vitesse : **MLI** (Modulation de Largeur d'Impulsions) ou **PWM** (Pulse Width Modulation)



En modifiant le rapport cyclique, la tension moyenne est modifiée, comme si la source continue était de tension variable.

4 quadrants : pont en H



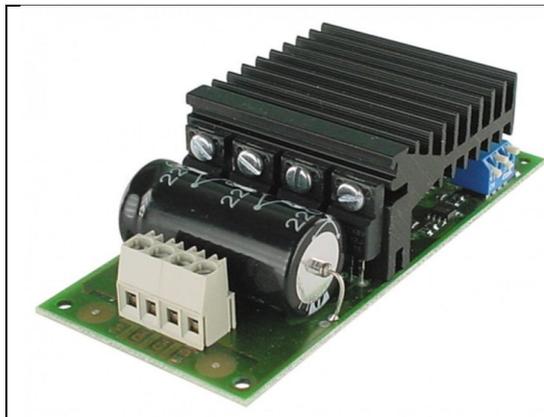
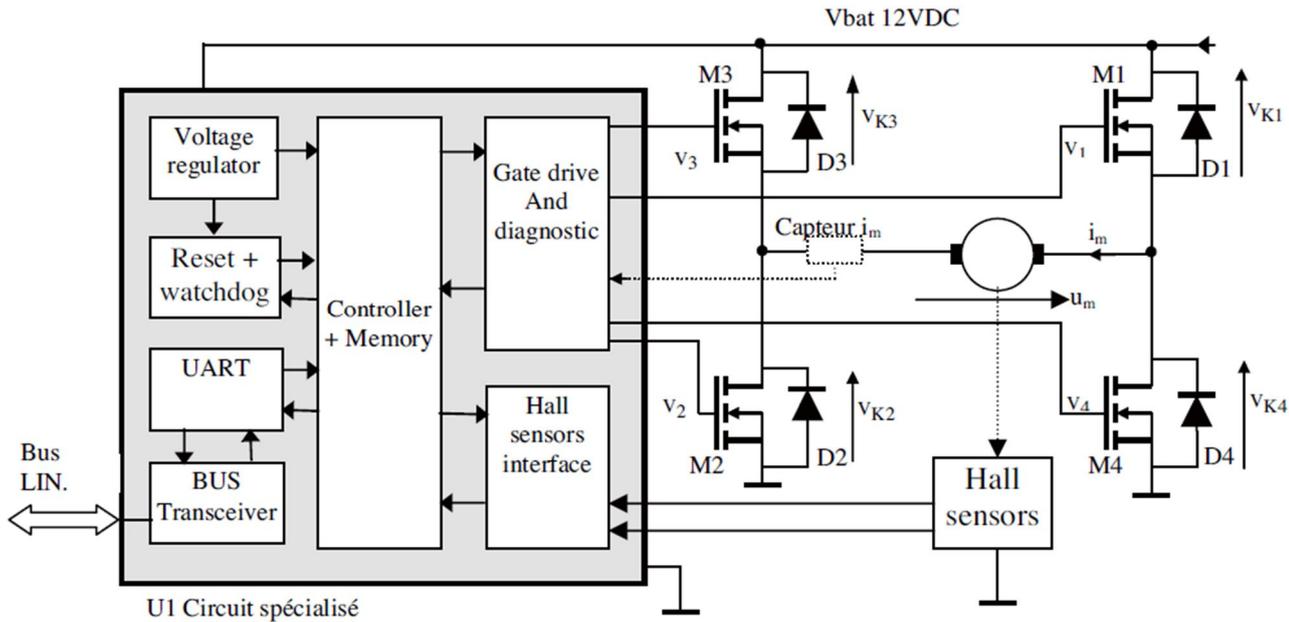
Les interrupteurs sont commandés par paire T1-T4 et T2-T3 ce qui modifie le sens du courant à l'intérieur de l'induit, donc du couple. Fonctionnement en frein ou en moteur dans les deux sens.

Gain du hacheur

- commandé sur n bits, sens compris,
- alimenté entre $[0, V_c]$ Volts

Schéma fonctionnel du hacheur réel

Pratiquement : les interrupteurs sont des transistors à commutation rapide



Observations :

- Lors de l'ouverture des transistors, pics de tension dus à la variation rapide du courant i : effets inductifs
- En parallèle des transistors : diodes de roue libre limitent ces effets inductifs
- Pour la sécurité : contrôle des intensités par capteur de courant absorbé
- Pour la commande en courant : capteurs à effet Hall

Remarque : le fonctionnement du MCC et celui du hacheur seront vus en détail en Sciences Physiques. Des questions transversales peuvent être posées à l'oral de S11.

Réducteur simple ou épicycloïdal

Fonctions du réducteur :

- diminuer la vitesse du moteur : l'adapter à l'effecteur
- augmenter le couple du moteur de petite taille et de faible coût : l'adapter à la charge

Réducteurs

- **simple** : tous les axes de rotation sont fixes dans le référentiel de l'observateur, souvent le bâti
- **épicycloïdal** : il existe au moins un axe de rotation mobile dans le référentiel de l'observateur. Les trajectoires des points matériels des satellites sont épicycloïdales pour l'observateur

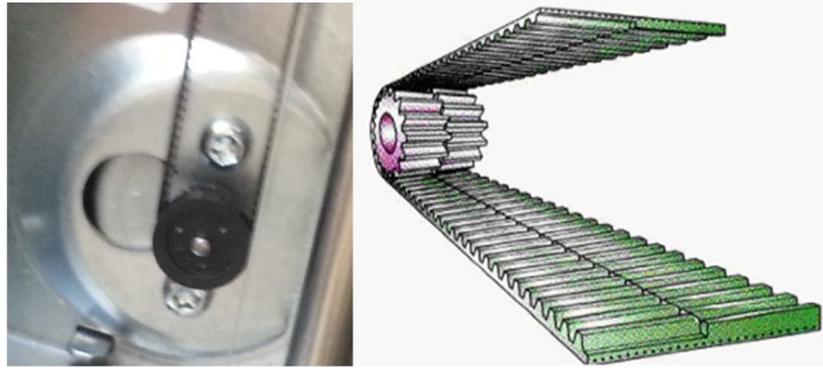


Fonction de transfert : $H_r(p) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\Omega_m(p)}{\Omega_r(p)}$

Remarque : La schématisation et la détermination des rapports de transmission des trains d'engrenage sera revue en cours-TD et en TP.

Poulie - courroie

Transmetteur poulie-courroie crantée



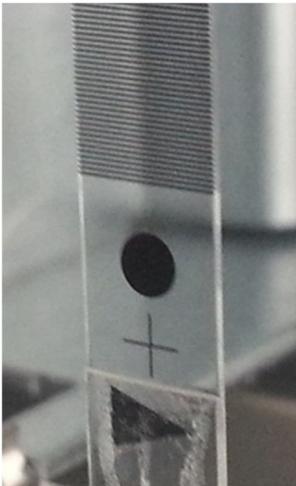
Fonction de transfert

$$H_{pc}(p) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{V_c(p)}{\Omega_r(p)}$$

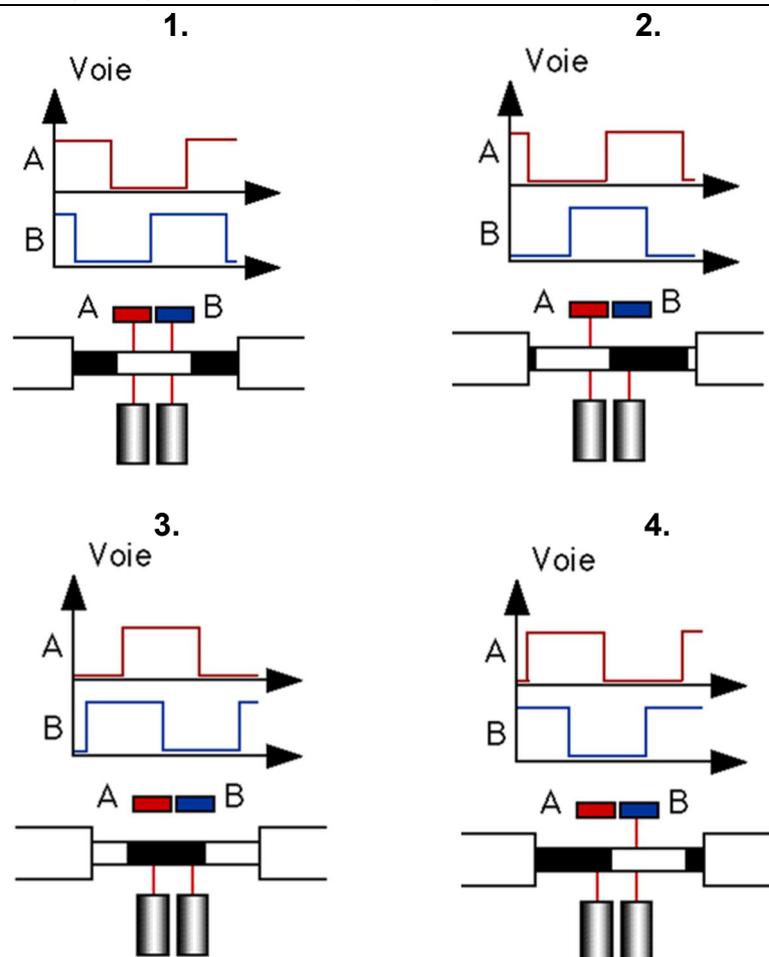
Codeur optique + comptage

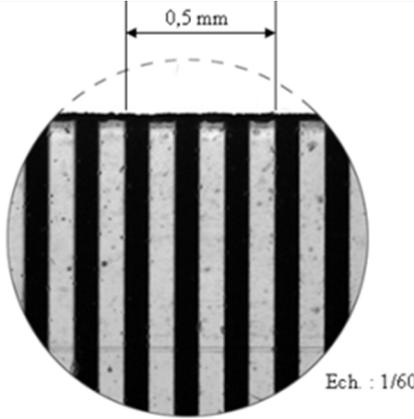
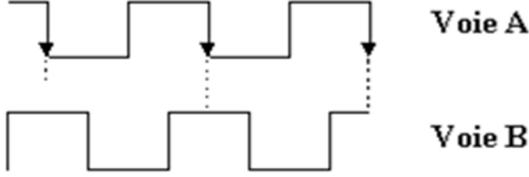
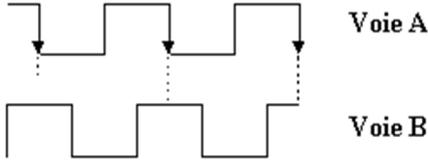
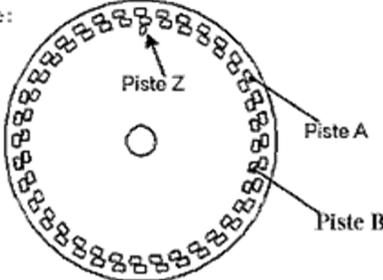
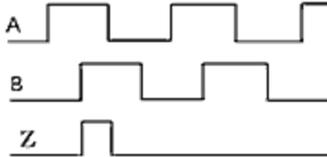
Principe de fonctionnement

Piste linéaire fixe



Fourches optiques mobiles



<p>Résolution de base :</p>	
<p>Facteurs multiplicatifs</p>	
<p>Détermination du sens de déplacement</p>	<p style="text-align: center;">Sens1</p>  <p>Par exploitation des fronts :</p> <p>Sens1=</p> <p>Sens2=</p>
<p>Initialisation</p>	<p>Prise d'origine mesure (POM) : déplacement préprogrammé pour trouver une référence = signal Z</p> <p>Disque :</p>  <p>Signaux délivrés :</p> 

IHM : Adaptation de la consigne au capteur

<p>Critère de détermination du gain :</p>
<p>Unité :</p>
<p>Et si le capteur n'est pas instantané ?</p>

Remarque : c'est le dernier gain à déterminer avant ceux des correcteurs

Prise en compte de la réalité physique de la commande : saturations

en alimentation :	entrée du hacheur (nombre) ou sortie du hacheur (en volts)
en courant :	sur l'intensité (nécessité du modèle de connaissance)
en vitesse :	
en position :	butées franches
en mesure :	course électrique
en nombre :	codage sur N bits

Prise en compte de la réalité numérique de la commande : échantillonnage

Période d'échantillonnage T_e telle que $f_e > 2 * f_{max}$ (préfiltrage pour éviter le repliement de spectre) : soit commande numérique (transformée en z hors programme) soit prise en compte comme un retard pur de $T_e/2$

Si le gain du capteur n'est pas connu ?

Gain du retour réglé unitaire par défaut : le gain réel inconnu sera contenu dans le réglage des gains du correcteur PI

Estimer un paramètre physique, phase d'autonomie

Objectifs :

Suivre ou élaborer un protocole aboutissant à la quantification d'un paramètre physique

Moyens

Aux instruments élémentaires : rapporteur, mètre à ruban, balance, dynamomètre, etc.

Aux instruments élaborés : Ohmmètre, ampèremètre, sonde de courant, sonde différentielle de tension, oscilloscope

Aux instruments et logiciel de mesure spécialisés : jauge de contrainte, débitmètre, codeur incrémental, etc.

Exemple

Facteur de frottement sec : en inclinant l'imprimante avec système arrêté : calcul de la tangente de l'angle de glissement

Remarques : d'autres méthodes seront abordées en projet et en TP. Cet aspect pratique est une partie très importante de l'évaluation en TP.

Autres questions : mesures, performances
mesurées, remarques...

Amélioration des performances

Bouclages de mesure

Objectifs :

- élaborer la commande du pré-actionneur de manière à contrôler simultanément l'évolution des grandeurs intermédiaires
- limiter la sensibilité aux perturbations externes (efforts parasites) et internes (Lenz)

Moyens

Retour en tension ou en nombre de grandeurs pertinentes et élaboration de consignes successives

1-Boucle de vitesse

Objectifs

Boucle indispensable pour un contrôle de vitesse, ou pour un contrôle de position structurellement instable

Boucle utile pour améliorer la rapidité d'un asservissement de position (cf le correcteur dérivée en l'absence de mesure séparée de la vitesse)

Moyens

Estimation de la vitesse :

- de manière directe : mesure analogique par une génératrice tachymétrique (=machine à CC utilisée en génératrice pour mesurer la vitesse)
- de manière indirecte :
 - par dérivation numérique d'une mesure de position
 - analogique : potentiomètre angulaire ou linéaire
 - numérique :
 - absolue par codeur simple ou multi-tours
 - relative par codeur incrémental + POM
 - LIMITE : amplification du bruit liée à la dérivation, nécessité d'un pré-filtrage BF
 - par intégration numérique d'une mesure d'accélération
 - par accéléromètre pour une accélération linéaire
 - par gyromètre pour accélération angulaire
 - LIMITE : conditions initiales à connaître et à recalibrer périodiquement

2-Boucle de courant

Objectifs

Idée : $i(t) \leftrightarrow C_m(t) \leftrightarrow$ accélération Piloter en courant=piloter en couple = piloter en accélération
La boucle de courant accélère car transforme le retour de Lenz en perturbation lente donc négligeable
Saturation en courant réel : évitée autant que possible par le 'retour en courant'

Moyens

Modèle nécessaire pour utiliser la boucle de courant : de connaissance pour accéder à $i(t)$
Réalisation de la boucle de courant : capteur à effet Hall (intégré au hacheur)
Positionnement du 'retour en courant', unité : après le traitement de l'écart de la boucle externe de vitesse,.
Traitement de l'écart en courant : PI pour garantir la précision et la stabilité de la boucle

3-Correction cascade

Objectifs

Les mesures successives sont prises en compte en cascade pour élaborer les consignes dynamiques successives pour aboutir à la commande du pré-actionneur
--

Moyens

Ecart en position traité devient la consigne de vitesse
Ecart en vitesse traité devient la consigne d'accélération, ou de couple, ou de courant
Ecart en accélération traité devient alors l'ordre du pré-actionneur

Remarques : le principe de la correction cascade sera vu dans le cadre du premier projet.

Toutes les boucles ne sont pas systématiquement présentes ou exploitées.

Correcteurs

Objectifs

Chaque écart élaboré par comparaison de grandeurs doit être traité par un correcteur.

Remarque : les correcteurs proportionnels, proportionnels intégral, proportionnel intégral dérivée, à avance de phase seront présentés en cours. Les P et PI ont été présentés en première année : leurs transmittances, utilité et caractéristiques sont censées être connues. N'hésitez pas à les tester sur les manipulations qui le permettent !

Correcteur Proportionnel

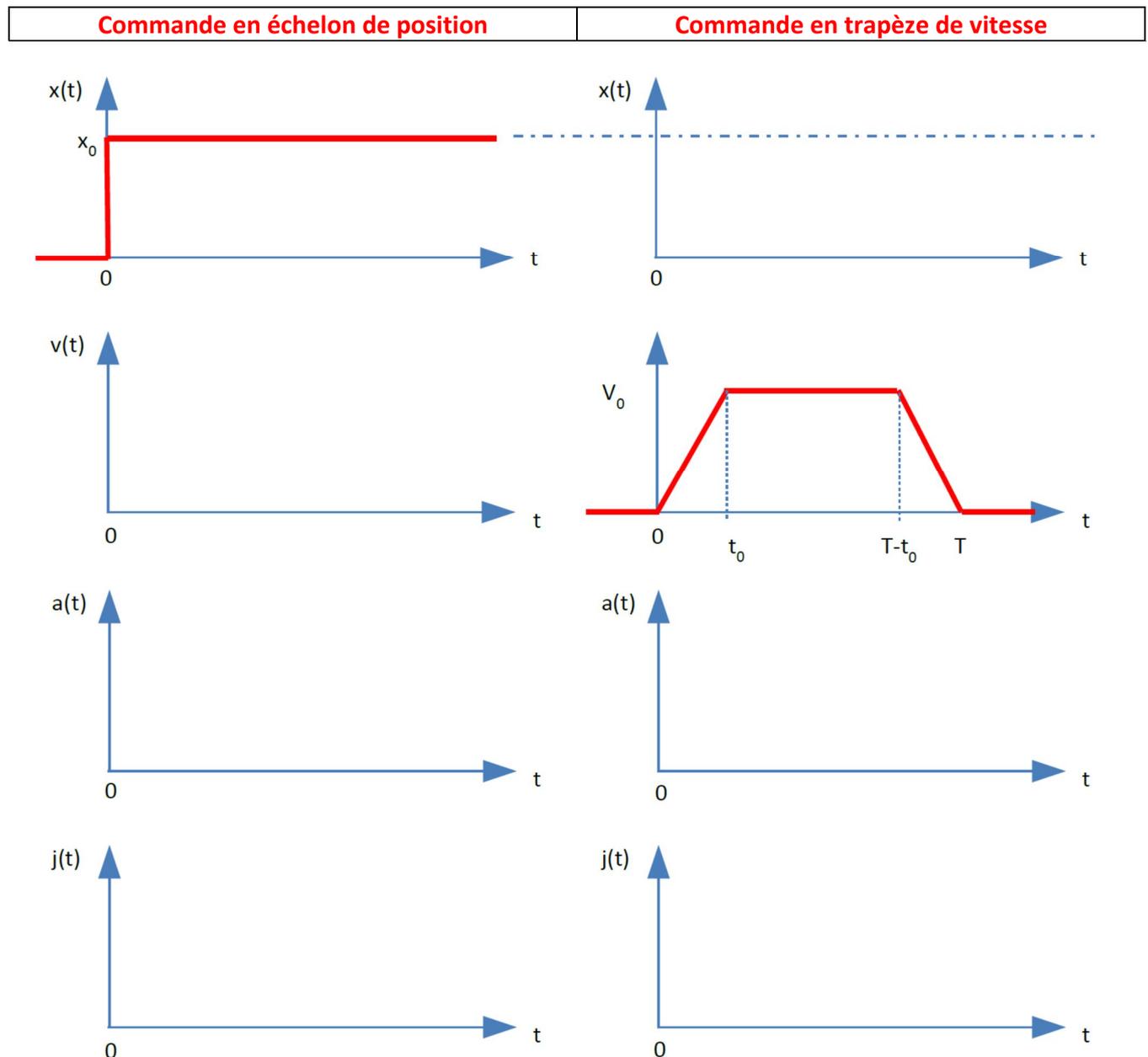
Correcteur Proportionnel Intégral

Remarque : on peut considérer que le correcteur PID complet simule analytiquement la correction cascade, en l'absence de mesure effective de la vitesse et du courant. Par extension, de la pente et de la courbure de la grandeur contrôlée.

Techniques de commande : échelon de position vs trapèze de vitesse

Approche graphique

Compléter si possible les graphes suivants (à connaître pour l'écrire également) en respectant les correspondances entre position, vitesse, accélération et jerk (dérivée de l'accélération).



Comparatif des modes de commande

Echelon de position	Trapèze de vitesse
<p>Intérêts</p> <ul style="list-style-type: none"> - Simplicité de réalisation - <i>A priori</i>, commande la plus rapide (critère temps de montée) car saturation 	<p>Intérêts</p> <ul style="list-style-type: none"> - saturations évitées : position contrôlée en continu - pics de tension et de courant limités : moins de puissance nécessaire, sécurités moins fortes (surtout pour les perturbations) - pertinence de correcteurs en cascade : leur consigne évolue à chaque instant - plus rapide (critère $t_{5\%}$) : commande 'pile'
<p>Limites</p> <ul style="list-style-type: none"> - pic de tension à $t=0s$ car Dirac de vitesse - pic de courant à $t=0s$ car Dirac d'accélération (donc de couple) - non contrôlable : fonctionnement en boucle ouverte au max de la commande de l'actionneur - présence d'oscillation de la réponse : pas le plus rapide (critère $t_{5\%}$) car dépassements - présence de discontinuités de vitesse et d'accélération : chocs pour le mécanisme - correcteurs peu efficaces ou utiles 	<p>Limites</p> <ul style="list-style-type: none"> - paramétrage de V_0, t_0 et de T en fonction du système et de la consigne - module de calcul calculant hors ligne la consigne de position - discontinuité d'accélération : chocs ou risque de déséquilibre (robots marcheurs)

Commande par le jerk

La commande par la dérivée de l'accélération, le jerk, permet d'éviter toute discontinuité des grandeurs physiques mais le calcul et le paramétrage sont plus complexes à faire à la main.

Une fois programmé en fonction du système : OK

Simulation : Xcos/Scilab, Simulink/Matlab

Autonomie

- Elaborer, compléter, faire évoluer, paramétrer, critiquer le modèle graphique d'un système
- Exploiter le modèle pour quantifier les écarts modèle/laboratoire
- Recaler le modèle : adapter le modèle en fonction de l'analyse des écarts constatés
- Valider le modèle pour les performances annoncées

A noter : l'élaboration du modèle de commande en position d'un axe avec MCC doit être parfaitement connue.

Exemple : prise en compte d'une perturbation de frottement sec dans xcos

Ramener la perturbation sur l'axe moteur : seul endroit où l'effort est accessible dans le modèle

Prévoir une non linéarité 'zone morte' sur C_m (faire intervenir C_f extérieurement est délicat car il ne se manifeste que lorsque $|C_m| > 0$; C_f deviendrait un couple 'moteur' perturbateur en permanence...

Tenir compte du réducteur et transmetteur ?

Synthèse

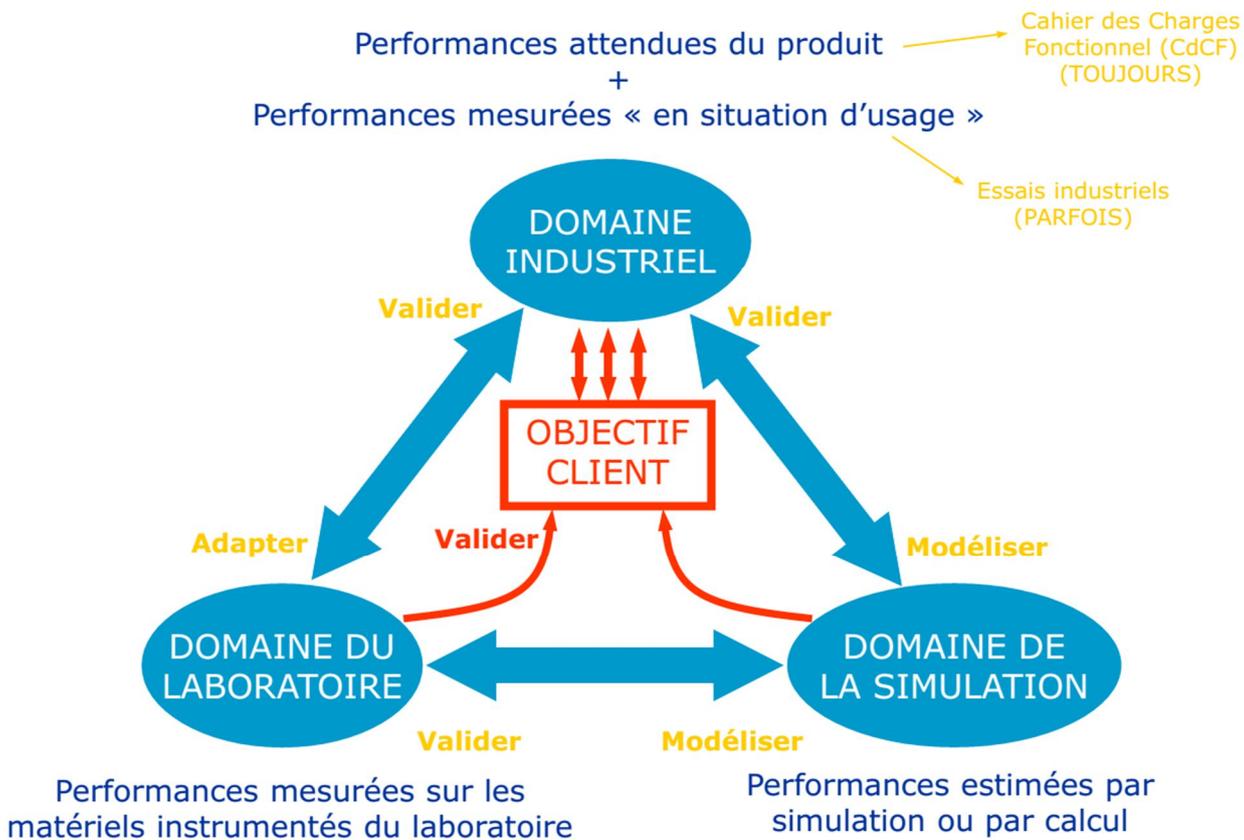
La conclusion d'une étude consiste à synthétiser le travail effectué en 2 à 4 heures de travail.

Triptyque (CCP, CCCS, peu utilisé au CMP)

Notion de besoin et d'exigences, de cahier des charges fonctionnel et de performances, de critère et de niveau, de recalage et de validation de modèle.

Outil de communication à utiliser en introduction pour poser le problème, le système réel, le système du laboratoire (dissemblance par des capteurs ajoutés, un logiciel spécifique, des limitations matérielles ou logicielles, etc.)

La synthèse doit mettre au centre la vérification de performances et faire écho à l'introduction.



Conclusion (uniquement) scientifique aux Mines

Exposé en toute autonomie des objectifs, des hypothèses, procédures, protocoles, mesures, modélisation, exploitation.

A la demande des examinateurs : élaboration d'un mini-poster pour valider l'aisance orale et comportementale (également demandé aux CCP).

Pendant, la notion d'écart reste au centre des études.

Série 1 : 2- Modélisation d'un mécanisme, du besoin à la schématisation adéquate

Observations préliminaires et manipulation

- Fonction ? Coût ? Série ? Combien de pièces ? Démontage ou montage possible ? Pièces déformables ?
- Structure : chaînes ou boucles ?
- Immobilité relative ? Pièces libres ? Mouvements fonctionnels ? Jeux ? Usure ? Rigidité du mécanisme ?
- Nombre et type d'actionneurs, d'effecteurs ? Transmetteurs classiques, linéaires ou non linéaires ?
- Dispositifs de réglage ? Éléments roulants ? Dispositifs de lubrification ?
- Combien de modes de fonctionnement : irréversibilité, rupture de contact contrôlé ou non contrôlé ?
- Pièces massives en rotation ? Pièces élancées en mouvement oscillant ?

Structuration

Construction du graphe de structure (=graphe des contacts). Représenter les liaisons temporaires ou les liens souples de manière non ambiguë : pointillés, doubles flèches, etc.

Modélisation graphique : schématisation

Choix des éléments pris en compte/négligés + choix des liaisons + choix de la représentation dépendent de l'objectif poursuivi et seront spécifiques à un des modes de fonctionnement observés et à l'objectif visé :

Etude 'matérielle théorique'

Démontage et manipulation indispensables. Doit être menée contact par contact, dans l'espace, pour négliger le minimum de mouvements et aboutir à des choix de liaison 'réalistes'. Graphe des liaisons (=modélisation des contacts). Ne pas tenir compte des liaisons souples. Les liaisons temporaires peuvent être indiquées avec un symbole supplémentaire sur l'arc (croix). Dessins en 3D isométrique ou en projections planes.

Résultats attendus :

- nombre de PFS à écrire = N solides (=classes d'équivalence) – 1 (condition d'équilibre du bâti inconnue)
- nombre de fermetures cinématiques à écrire = γ boucles linéairement indépendantes
- nombre de lois de mouvement à rechercher = m mobilités (degré de mobilité = nombre de variables cinématiques indépendantes)
- nombre de contraintes de fabrication et/ou de montage à prévoir = h inconnues d'efforts surabondantes (degré d'hyperstaticité du modèle = nombre de variables d'effort indépendantes, non déterminées par les actions mécaniques imposées) → Rigidité, coût

Etude 'en mouvement'

Manipulation indispensable, démontage non indispensable. Graphe des liaisons directement ou bien utilisation des résultats de l'étude matérielle théorique + adaptation des liaisons aux mouvements effectifs du mécanisme = dégradation des liaisons afin de simplifier les équations géométriques ou cinématiques. Dessins en 3D isométrique ou en projections planes. Paramétrage à réaliser si étude analytique, non indispensable si étude globale.

Résultats attendus :

- Mécanisme plan : justification par la structure des liaisons (pivots d'axes parallèles, glissières coplanaires et de direction orthogonale aux axes des pivots).

- Inertie équivalente, détermination des dépendances cinématiques : par l'énergie cinétique totale dans le cas du degré de mobilité unitaire
- Lois entrée/sortie géométrique, course ou débattement, linéarisation de mouvements autour d'un point de fonctionnement : paramétrage + Chasles + projection + élimination de variables
- Loi entrée/sortie cinématique, validation de transmetteurs : torseurs des liaisons, fermeture cinématique projetée ou bien par géométrie + dérivation

Etude 'en effort'

En statique ou en dynamique. Choix des solides à masse négligée en accord avec leur position dans la chaîne cinématique + choix des AM retenues → Graphe d'analyse (=liaisons + efforts) Recherche des ensembles de solides soumis à deux ou trois glisseurs. Paramétrage à réaliser pour une étude analytique, non indispensable pour une étude globale. Résultats attendus :

- Loi E/S en effort, transmission d'effort globale : si degré de mobilité =1 alors TEC à l'équilibre
- Efforts au contact : choix des liaisons favorisant la modélisation par glisseur (sphérique, ponctuel, pivot plane) ou par couple (pivot), choix de représentation permettant le paramétrage aisé des bras de levier
- Transmission de puissance, évaluation relative des puissances, rendement mécanique : justification de liaisons parfaites ou adaptation des actions mécaniques transmissibles ; guidage par éléments roulants (roulement sans glissement), dispositifs de lubrification (limite le dissipation par frottement), frottements moteurs (adhérence, dissipation) . Conséquences analytiques : adaptation des torseurs cinématique (moins de ddl) et d'AM (plus d'inconnues, voire dépendance si limite du glissement)

A penser...

1. Deux concepts indépendants : mécanisme (=modèle) plan et schématisation plane.
2. Représentation normalisée des liaisons à connaître en 3D et en 2D : prendre garde aux 'pièces qui flottent'
3. Choix 3D vs 2D : dépend de la structure du mécanisme et de l'objectif.
 - Si possible, ensemble de schémas 2D à privilégier pour le paramétrage géométrique
 - Schématisation 2D imposée pour les modèles plans.
 - Schématisation 3D en isométrique dans les autres cas.
4. Esquisse au crayon à papier, dessin final en couleur (une couleur par classe d'équivalence) avec numérotation
5. Respect de la forme globale du mécanisme en usage
6. Repérer les centres, les directions et les axes : observer les caractéristiques structurelles (parallélisme, coaxialité, intersection d'axes, quasi appartenance de centres à un axe, etc.). Veiller à ne pas positionner le mécanisme dans un cas particulier (à plat, en bout de course, etc.).
7. Tracer ces différents éléments sur la photo (c'est pour cela qu'elles sont estompées !) ou le dessin technique éventuellement à compléter.
8. Positionner sur feuille les centres, tracer en pointillés les directions et les axes repérés : respecter les orientations et positionnements relatifs, l'appartenance de centres à un axe, en rendant la géométrie idéale (c'est un modèle !). Ne pas représenter un cas particulier (angle plat ou angle droit fortuits)
9. Tracer un des éléments de chaque liaison (sphère, cylindre, trait, plan), compléter le dessin en les reliant : chaque élément graphique d'une liaison doit être relié à un élément graphique d'une autre liaison ou bien au bâti (cas des boucles) ou bien à l'effecteur (cas des chaînes de solides). Sinon : 'une pièce flotte'...
10. Valider l'ensemble avant de repasser en couleur

Paramétrage

Pas exigible au concours sauf pour les transmetteurs classiques supposés connus ou les modèles plans.

Systemes étudiés

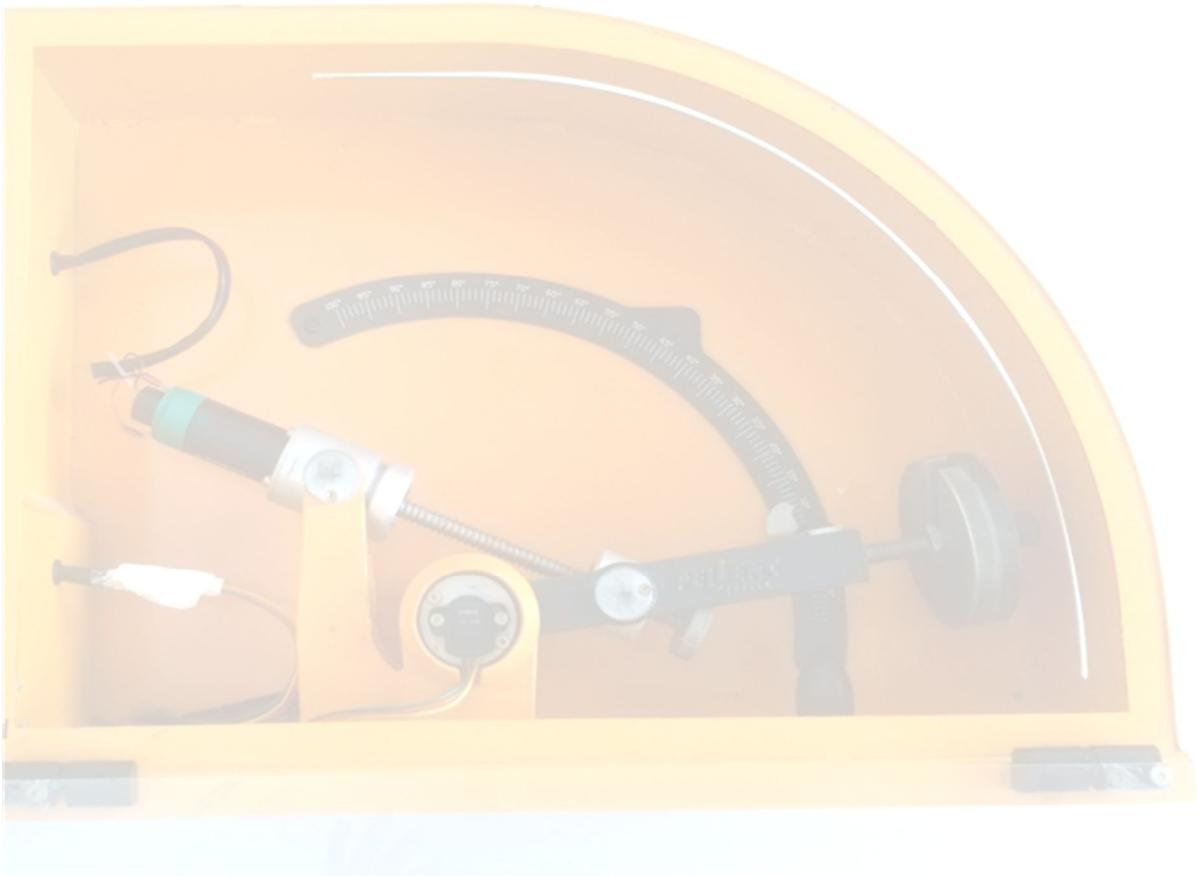
Travail à faire : fonction du mécanisme, schématisation spatiale et/ou plane, paramétrage à élaborer (sauf pour Stepper 3D), étude géométrique à initier, à finir par vous-même et à reprendre en révision.

Joignez à ce document vos recherches, erreurs, observations, etc. et recopiez sous les photos le résultat final.

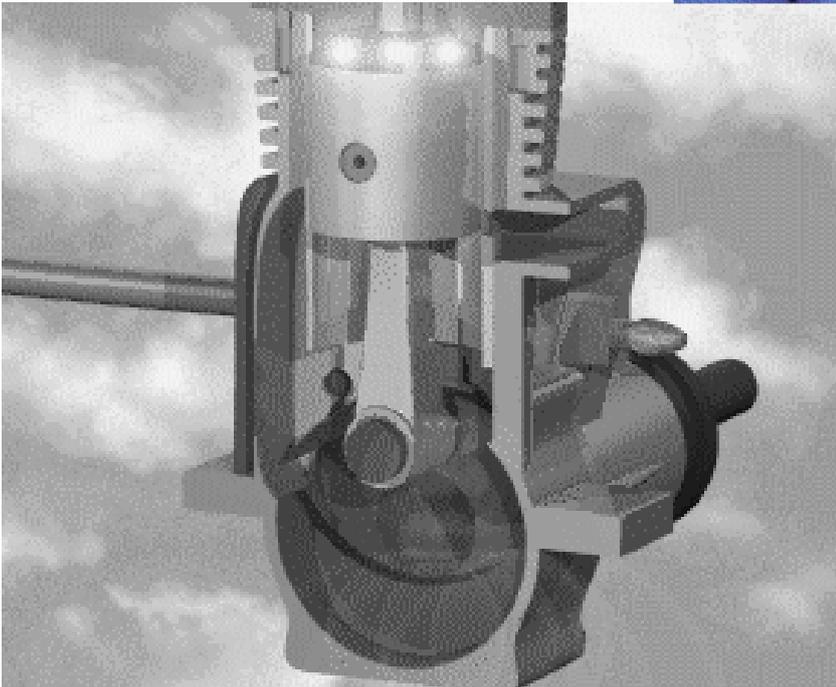
Joint de Cardan



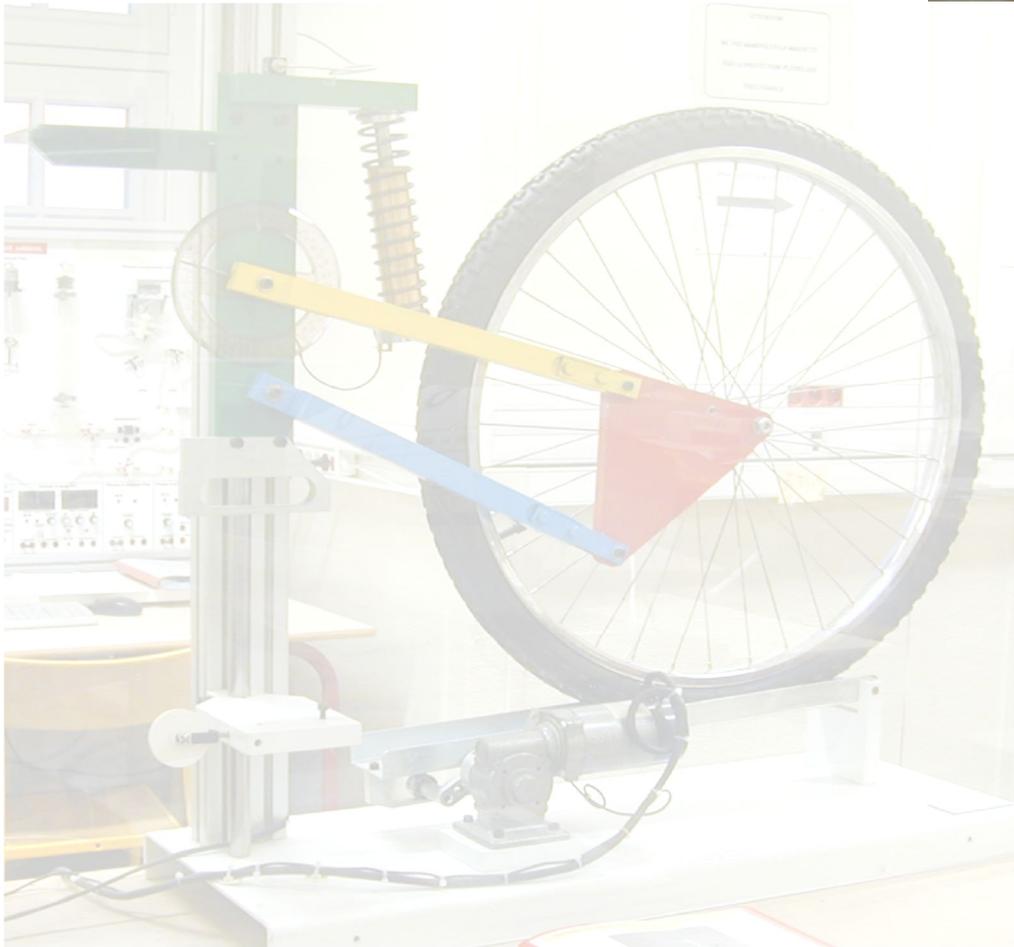
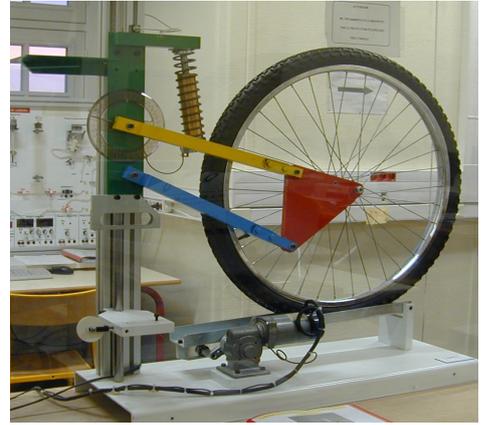
Maxpid



Micro-moteur 2 temps



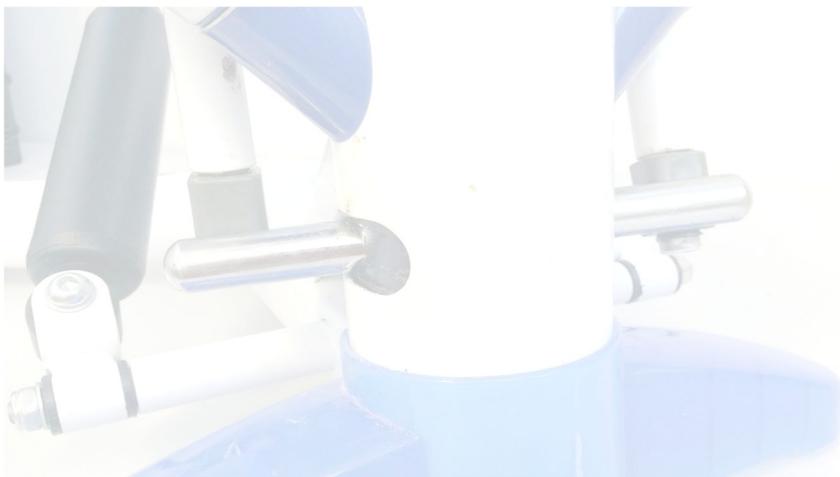
Suspension de moto



Stepper 2D (sans paramétrage)



Stepper 3D (sans paramétrage)



Notes personnelles
