

TRAVAUX PRATIQUES de MECANIQUE des SYSTEMES

Licence SPI 3^{ème} année

QUELQUES CONSEILS.....	page 02
L'INCERTITUDE DE MESURE.....	page 03
TP 1 : EVALUATION DE MOMENTS D'INERTIE	page 04
TP 2 : INITIATION A L'EQUILIBRAGE DYNAMIQUE D'UN ROTOR.....	page 06
TP 3 : ETUDE TECHNOLOGIQUE D'UN PALAN.....	page 11
TP 4 : ENERGETIQUE.....	page 16

I - Une bonne préparation

Chaque séance de travaux pratiques se déroule sur 2,5 heures au cours desquelles il vous est demandé de répondre aux questions posées **et de rédiger un compte-rendu sur place**.

Les questions posées sont d'ordre théorique ou pratique, ces dernières ne pouvant qu'être étudiées lors de la séance.

Mais en ce qui concerne les questions théoriques, elles font souvent appel à des notions vues en cours et malheureusement oubliées depuis, il est donc tout à fait possible et recommandé d'y répondre à la maison avant la séance. Est-il bien nécessaire d'insister sur les bénéfices d'une telle préparation, sur le gain de temps et les sueurs froides évitées ?

II – Un bon comportement

Bien se comporter c'est déjà être présent à l'heure dite, les retards non justifiés agacent et ne poussent pas votre professeur à être conciliant.

Bien se comporter c'est aussi réfléchir avant d'agir, une mauvaise manipulation peut se solder par des résultats erronés ou pire du matériel cassé. De tels incidents sont difficilement excusables quand le texte du T.P. comporte une mise en garde, il faut donc le lire attentivement et non le parcourir.

Bien se comporter c'est être actif face au problème posé, ne pas subir ou en tous cas réagir. Réagir quant aux phénomènes observés, réagir face aux valeurs mesurées et toujours conserver le pouvoir de s'étonner, c'est un bon remède contre l'ennui.

Enfin bien se comporter c'est quitter votre poste en le laissant propre et ordonné, et en informant le professeur de votre départ. N'oubliez pas de rendre votre rapport !

III – Un bon rapport

Il est indispensable d'introduire votre étude en ciblant le but final (sans déjà conclure !) et en apportant quelques éléments sur l'utilité du phénomène étudié ou sur les moyens mis à disposition (d'où la nécessité d'une préparation...).

Souvent les questions posées au début sont d'ordre théorique, les démonstrations demandées doivent être claires et argumentées. On notera qu'il n'est pas demandé de recopier le texte du T.P. !

Il est ensuite possible de présenter les appareils et surtout la chaîne de mesure si elle existe.

Puis on doit présenter les résultats obtenus en les accompagnant de commentaires sur la précision, la facilité d'emploi des appareils... Si des courbes sont requises, il faut établir au préalable un tableau de valeurs, et choisir ensuite une échelle appropriée pour le tracé qui doit être net. On peut comparer les résultats obtenus et ceux attendus issus de l'étude théorique.

La conclusion est fondamentale, elle doit refléter votre curiosité, ou éventuellement votre étonnement. C'est le moment de vous exprimer librement sur l'apport de l'étude à vos connaissances, et de glisser pourquoi pas des remarques visant à améliorer l'efficacité du T.P. sur le plan des mesures comme sur le plan pédagogique !

***Une bonne préparation, un bon comportement, un bon rapport...
...trois bonnes raisons d'obtenir une bonne note !***

L'incertitude de mesure

Evaluer l'incertitude relative sur un résultat consiste à affubler la valeur obtenue d'un pourcentage d'erreur. On donne ainsi une idée de la précision de la manipulation ou de la méthode employée.

Soit un résultat R obtenu à partir de la relation : $R = \frac{a \cdot b^n}{c}$

a, b et c sont des valeurs qui sont issues directement d'une mesure ou bien alors elles font intervenir des constantes dont on connaît la précision.

L'incertitude relative sur R est égale au rapport $\frac{\Delta R}{R}$ [%].

On a $\ln R = \ln a + n \cdot \ln b - \ln c$, soit en prenant la dérivée de l'expression :

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta a}{a} + n \cdot \frac{\Delta b}{b} - \frac{\Delta c}{c}$$

On voit observer logiquement que la précision sur R est le fruit des précisions sur a, b et c.

Mais s'il est vrai que des erreurs peuvent se compenser, il est d'usage de "maximaliser" l'erreur relative. Cela revient à considérer le pire des cas où toutes les erreurs s'ajoutent.

Alors finalement :

$$\boxed{\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta a}{a} + n \cdot \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta c}{c}}$$

Exemple

Un solide parcourt en chute libre une distance h durant un temps T. L'équation du mouvement étant

$$z = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 \text{ on a } h = \frac{1}{2} \cdot g \cdot T^2 \text{ ce qui permet d'évaluer } g : \quad g = \frac{2h}{T^2}$$

$$\text{Alors la précision sur } g \text{ est } \frac{\Delta g}{g} = \frac{\Delta h}{h} + 2 \cdot \frac{\Delta T}{T}$$

Or h est mesuré à l'aide d'un décimètre gradué au cm et vaut 10 m.

T est mesuré par un chronomètre à déclenchement manuel et vaut en moyenne 1,6 sec.

La précision au 1/100^{ème} du chronomètre est balayée par la précision de la commande manuelle évaluée par le manipulateur après différents essais à 0,3 sec.

→ la valeur de g est : $g_{\text{moyen}} = 7,81 \text{ m/s}^2$!!!

Cette valeur souffre d'une trop grande imprécision puisque :

$$\frac{\Delta g}{g} = \frac{0,01}{10} + 2 \cdot \frac{0,3}{1,6} = 0,001 + 0,375 = 37,6\% \text{ dans le pire des cas !!!}$$

De ces considérations on peut en déduire que la méthode du lâché n'est pas satisfaisante pour mesurer l'accélération de la pesanteur, même si sa simplicité est séduisante.

Cependant on observe qu'il est possible d'améliorer considérablement le résultat si on améliore la précision sur T en utilisant une cellule pour le déclenchement du chronomètre.

En revanche la précision sur h (0,1%) est déjà grande et ne nécessite pas d'amélioration immédiate...

TP 1 : Evaluation de moments d'inertie

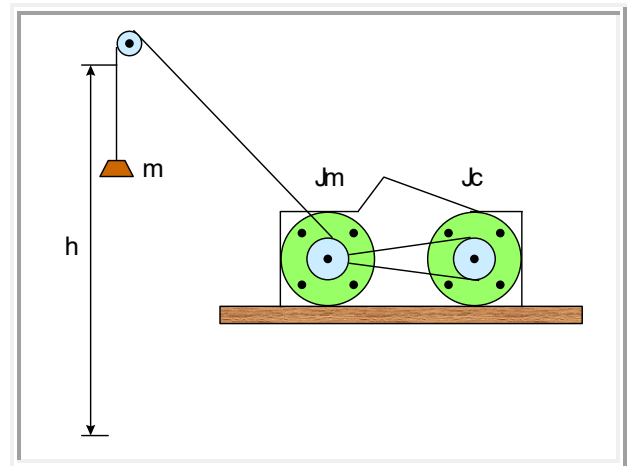
But du TP

Déterminer par expérimentation le moment d'inertie d'un arbre de moteur et celui d'une charge, ramené sur l'arbre moteur (méthode très couramment employée).
Puis calcul du moment d'inertie de la charge par rapport à son axe. Vérification.

I – Présentation du montage

Le montage comporte deux arbres. L'un représente le moteur de moment d'inertie J_m et l'autre la charge de moment d'inertie par rapport à son axe propre égal à J_c . Ils sont accouplés par une courroie crantée assurant un rapport de réduction des vitesses égal à K .

Sur le moteur on trouve une poulie plate sur laquelle on peut enrouler un fil auquel est suspendu une masse m . La chute de celle-ci sur une hauteur h fournit l'énergie motrice qui permet d'entraîner en rotation les arbres.



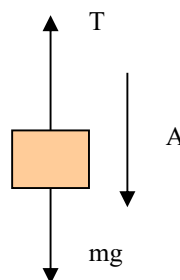
II – Etude du mouvement de la masse

La masse chute sur une hauteur h , sa vitesse instantanée est V . Soit A son accélération et soit θ'' l'accélération angulaire de l'arbre moteur. On appelle C_f le couple engendré par les frottements ramené sur l'arbre du moteur. La poulie plate admet pour rayon R .
On appelle J le moment d'inertie des deux arbres **ramené** sur l'arbre du moteur.

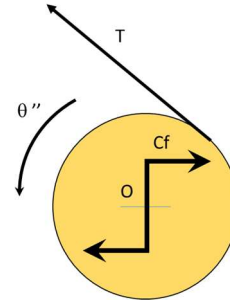
Travail demandé :

❶ Sachant que $V = \theta' \cdot R$, écrire la relation simple entre A et θ'' .

❷ Si on appelle T la tension du fil, appliquer le P.F.D. à la masse (équation de résultantes) pour écrire une relation entre T , A et m .



③ Appliquer le P.F.D. à l'ensemble des parties tournantes (équation de moments) pour écrire une relation entre θ'' , T , C_f et J .



④ Exprimer alors Γ en fonction de m , C_f et J et R .
Comment en déduire que la masse est en mouvement rectiligne uniformément accéléré (M.R.U.V.) ?

⑤ En raison de la nature du mouvement et sachant que $A = \frac{d^2z}{dt^2}$, exprimer $z(t)$ par intégration, puis exprimer alors A en fonction du temps de chute T_c et de $h = z(T_c)$.

⑥ En déduire une relation permettant de calculer J en fonction de m , h , T_c , R et C_f .

III - Expérimentation

On considérera le moteur seul. On va déterminer la valeur de C_{f1} . Puis on déterminera J_m lors d'un premier essai.

Ensuite on accouplera la charge au moteur pour déterminer C_{f2} puis J_c lors d'un second essai.

Travail demandé :

① Moteur et charge sont désaccouplés.

Accrocher une masse de façon à ce qu'elle provoque difficilement la mise en rotation de l'arbre (ceci sur tout la distance parcourue). En déduire C_{f1} sachant que $R = 0,06$ m et que la somme des masses des butées photoélectriques vaut $0,05$ kg.

② Ajouter une masse de $0,5$ kg et réaliser le chronométrage de la chute. En déduire J_m sachant que $h \approx 1,00$ mètre.

③ Moteur et charge sont accouplés.

Accrocher une masse de façon à ce qu'elle provoque difficilement la mise en rotation de l'ensemble (ceci sur tout la distance parcourue). En déduire C_{f2} .

④ Ajouter une masse de $0,5$ kg et réaliser le chronométrage de la chute. En déduire alors le moment d'inertie moteur + charge, ramené sur le moteur, soit J_{mc} .

⑤ Sachant que $K = 0.5$, déterminer jusqu'à l'application numérique J_c en fonction de J_{mc} et J_m , en posant que l'énergie cinétique de l'ensemble vaut l'ensemble des énergies cinétiques : $J_{mc} \cdot (\Omega_m)^2 = J_m \cdot (\Omega_m)^2 + J_c \cdot (\Omega_c)^2$.

⑥ Commentaires et conclusion, sachant que moteur et charge sont à priori identiques. On discutera aussi de l'influence de la valeur de K sur la précision du résultat obtenu ici.

TP 2 : Equilibrage d'un rotor

But du TP

Comprendre les principes de l'équilibrage dynamique des corps en rotation.

I - Présentation

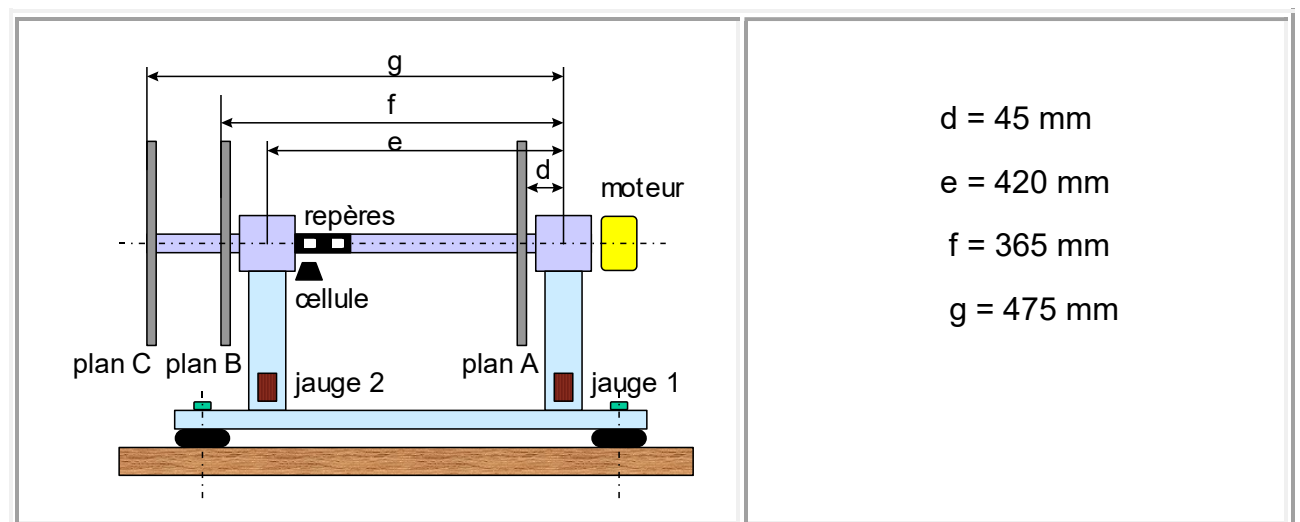
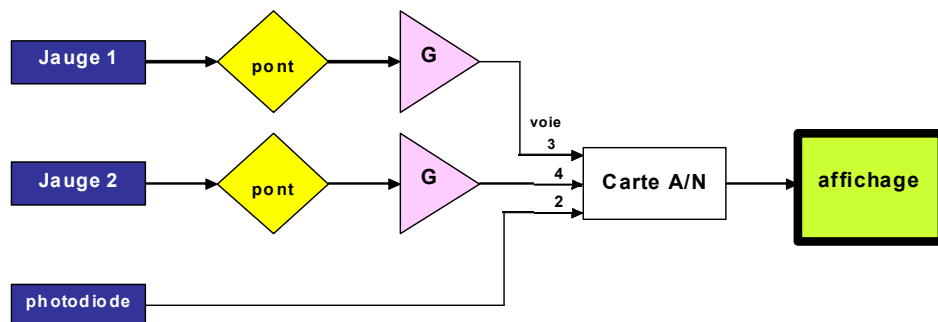
Le montage comporte une arbre guidé par deux paliers. Ceux-ci sont montés sur des lames élastiques munies de jauges de déformation.

Le rotor est équipé de deux disques qui constituent les plans de déséquilibre et d'équilibrage tandis que les jauges permettent de mesurer les efforts engendrés dans chaque palier par les balourds.

La variation de résistance des jauges est convertie en tension via un pont de Wheatstone. La tension est amplifiée avant d'attaquer une carte analogique numérique qui permet de visualiser la variation des efforts dans le temps sur un PC.

Une cellule photoélectrique délivre une impulsion à chaque tour qui est enregistrée par la carte A/N.

Enfin un moteur électrique commande la rotation de l'arbre.



II – Equilibrage d'un rotor court

L'équilibrage statique, ou dans un plan, n'est possible que dans les cas bien particuliers des rotors courts tels que les ventilateurs et autres hélices...

On va provoquer un balourd dans un plan (A) et le corriger ensuite à l'aide d'une masse d'équilibrage dans le même plan (A).

Les différentes masses sont constituées de rondelles (1.5gr, 4gr, 7gr).

Travail demandé :

❶ Régler l'oscilloscope numérique comme suit :

Tension	Coef. Abs.	Coefficient jauge	Gain	Mode	Voies sélectionnées
100 mV/div	10	1000	10	Bipolaire	3

Réglage du zéro : ajuster le potentiomètres de la voie 3 pour obtenir un signal nul à l'écran lors d'une acquisition moteur à l'arrêt.

❷ Les plans A, B et C ne contiennent aucune masse.

Mettre le moteur sous tension $U = 30$ Volts, effectuer une acquisition des efforts dans le plan de la jauge 1 = voie 3.

Mesurer en carreaux la période du signal.

Relever et commenter le niveau des courbes voies 3.

❸ Régler l'oscilloscope numérique comme suit :

Tension	Coef. Abs.	Coefficient jauge	Gain	Mode	Voies sélectionnées
1 V/div	10	1000	10	Bipolaire	2

Mettre le moteur sous tension $U = 30$ Volts, effectuer une acquisition du capteur tour photodiode = voie 2.

Mesurer en carreaux la période du signal.

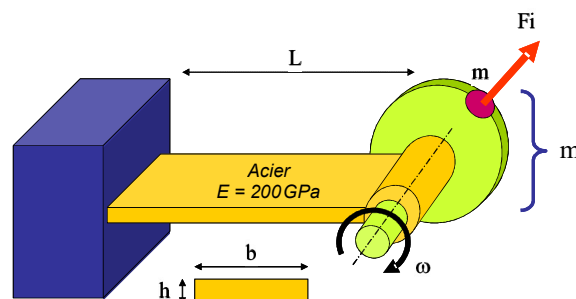
Comparer les deux périodes obtenues, le rotor est-il parfaitement équilibré ?

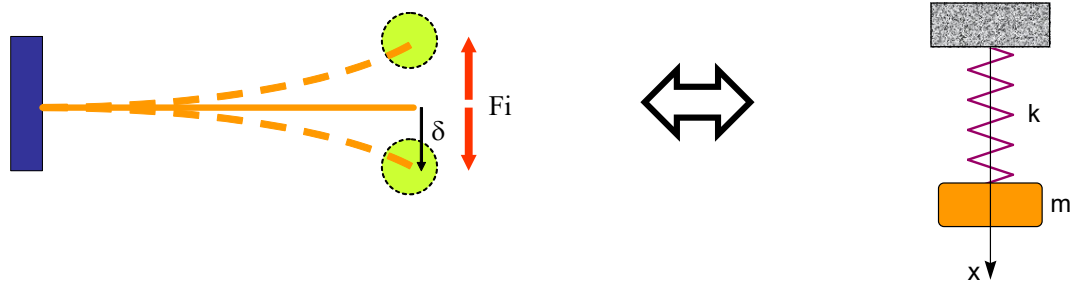
❹ Mettre le moteur sous tension $U = 30$ Volts, attendre la stabilisation de la vitesse et couper l'alimentation.

Qu'observe-t-on lors du ralentissement de la rotation ?

Le ralentissement du rotor traverse combien de résonnances ?

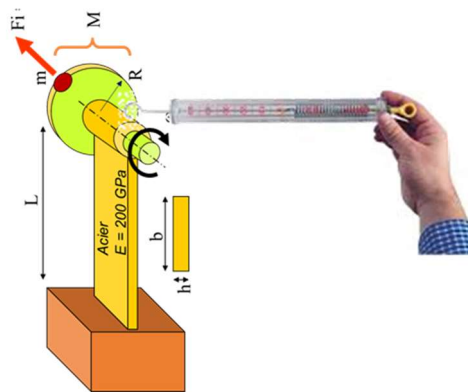
La patte qui supporte le moteur est modélisée comme sur la figure suivante :





La pulsation de résonance pour un système masse-ressort est égale à $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$.

En imposant un effort sur le crochet du palier 1 avec le dynamomètre et en mesurant la flèche (déplacement horizontal du palier), en déduire la raideur pratique de flexion de la lame support du palier 1.



Par analogie avec un système masse ressort, évaluer la première fréquence de résonance f_0 de la patte du palier 1 si $m \neq 1$ kg.

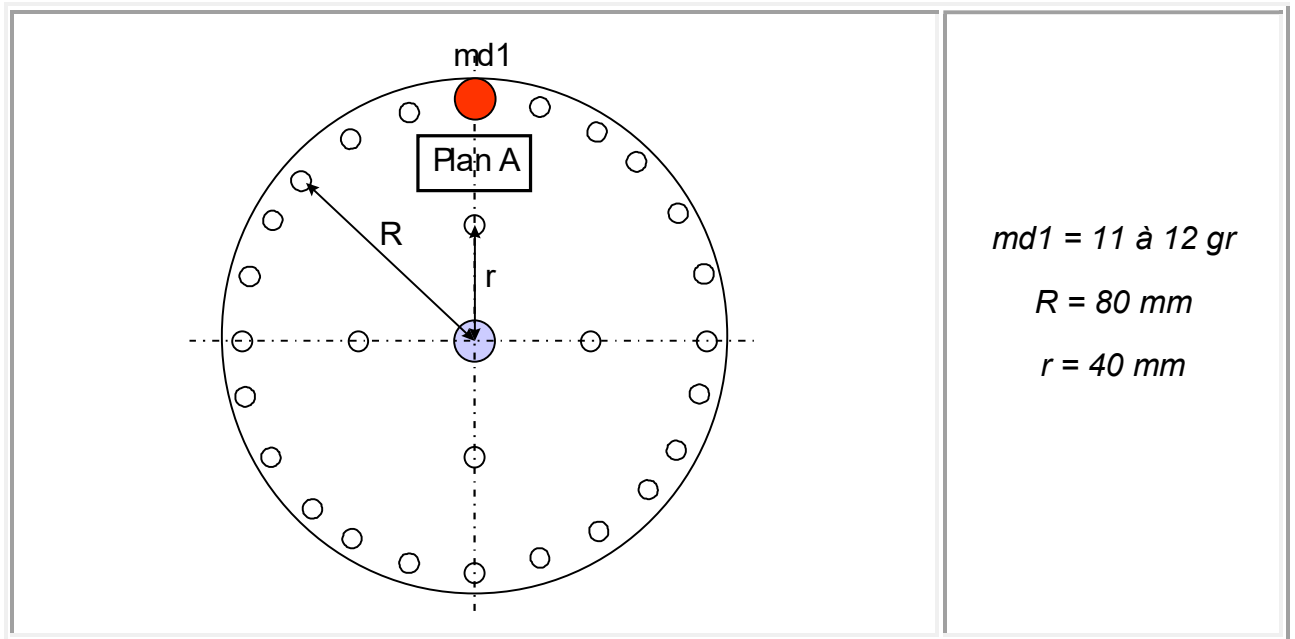
Sachant qu'à 30V, le rotor à vide tourne à 3000 tr/mn, confirmer l'origine de la vibration observée lors du ralentissement de la rotation.

Le résultat est-il cohérent vis à vis du phénomène observé précédemment sachant que le système constitué des deux lames de flexion et du rotor peut être assimilé à un système à 2 ressorts ?

Représenter les deux modes de résonance en dessinant le rotor et les 2 lames.

⑥ On provoque un balourd sur le rotor **dans le plan A**. Le rotor peut -être vu comme **un rotor court**. Réaliser la configuration suivante :

Tension	Coef. Abs.	Coefficient jauge	Gain	Mode	Voies sélectionnées
100 mV/div	10	1000	10	Bipolaire	3



Ajuster les potentiomètres de la voie 3 pour obtenir un signal nul lors d'une acquisition.

Alimenter le moteur avec une **tension de 25 Volts** puis à vitesse stabilisée effectuer une acquisition du balourd dans le plan. Mesurer à l'écran l'amplitude de la vibration.

⑥ On désire équilibrer l'arbre à l'aide d'une masse M_e placée judicieusement à la distance r dans le plan A.

Calculer M_e et placer la masse dans le plan A afin de vérifier l'équilibrage. Effectuer à vitesse stabilisée une acquisition, mesurer à l'écran l'amplitude de la vibration et calculer son affaiblissement en [%].

Remettre le plan A dans la configuration initiale.

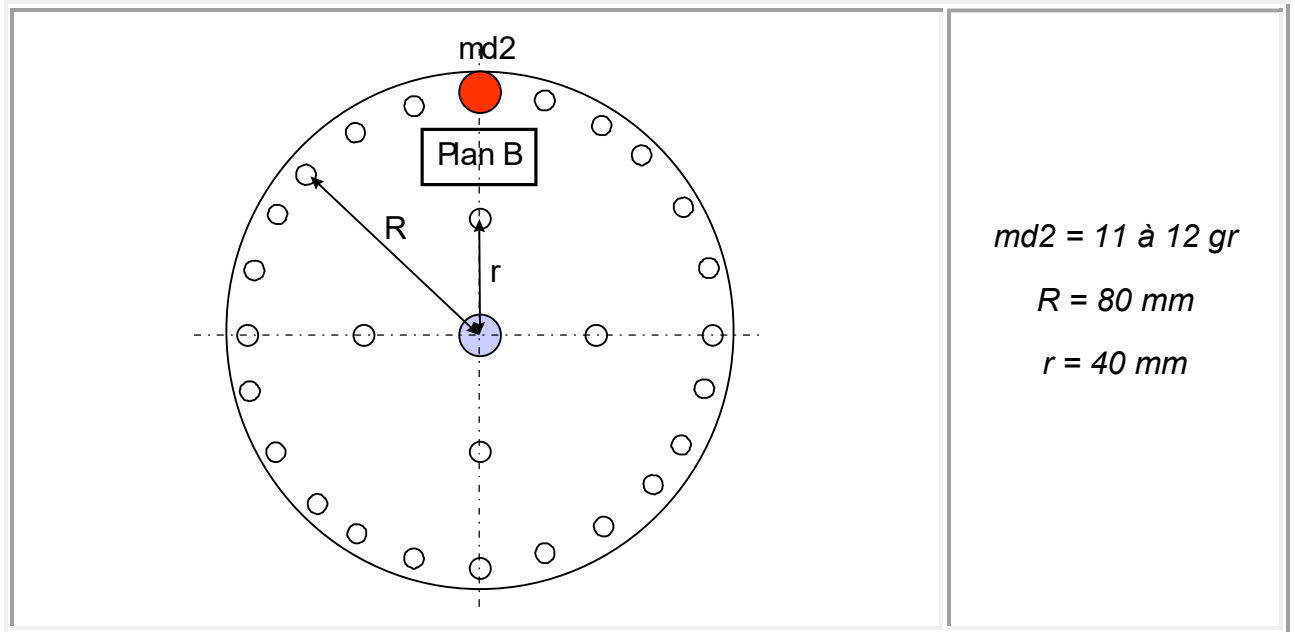
III – Equilibrage d'un rotor long

Le cas le plus courant concerne des **rotors longs** où le balourd est réparti. Le plus souvent il est impossible de placer une seule masse juste à l'opposé du balourd. On fait alors appel à **2 masses** d'équilibrage placées dans **2 plans (A et C)** accessibles.

Travail demandé :

① On provoque un nouveau balourd, **mais dans le plan B**. Réaliser la configuration suivante :

Tension	Coef. Abs.	Coefficient jauge	Gain	Mode	Voies sélectionnées
100 mV/div	10	1000	10	Bipolaire	3 et 4



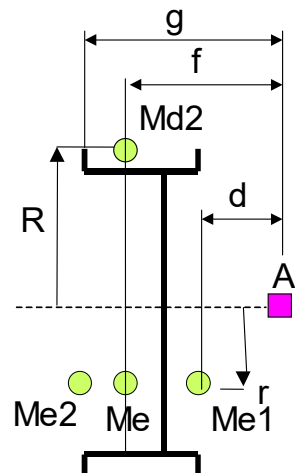
Réglage du zéro : ajuster les potentiomètres des voies 3 et 4 pour obtenir un signal nul lors d'une acquisition.

Mettre sous tension le moteur, environ **25 Volts** et à vitesse stabilisée réaliser une acquisition des efforts dans les paliers. Mesurer à l'écran l'amplitude de la vibration.

② On envisage de placer les masses d'équilibrage dans les plans A et C sur **les petits rayons**.

Déterminer les masses Me_1 dans A et Me_2 dans C qui permettent d'équilibrer l'arbre en écrivant 2 équations.

Placer les masses Me_1 et Me_2 et mettre sous tension le moteur afin de réaliser une acquisition des efforts dans les paliers à vitesse stabilisée.



$$d = 45 \text{ mm} \quad f = 365 \text{ mm} \quad g = 475 \text{ mm} \quad R = 80 \text{ mm} \quad r = 40 \text{ mm}$$

Mesurer à l'écran l'amplitude de la vibration et calculer son affaiblissement en [%] et conclure.

Remettre les plan A, B et C dans la configuration initiale.

TP 2 : Etude technologique d'un palan

But du TP

Découvrir la technologie et le fonctionnement d'un palan Demag.

Pour la petite histoire les systèmes de levage Demag existent depuis plus de 180 ans. Plus de 2 millions de palans ont été fabriqués et vendus aux quatre coins du monde...



I – Démontage du palan

Dévisser la vis.
Déposer la plaquette.



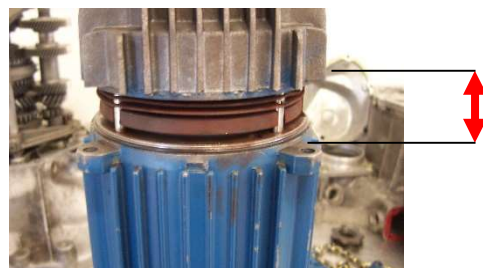
Déposer la chaîne.
Déposer le pignon.



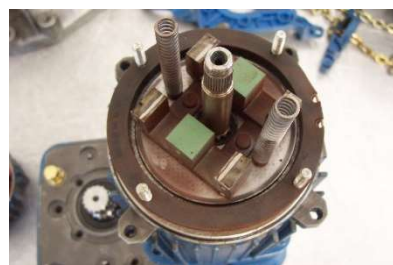
Retirer la plaque en plastique bleu.



Le carter est poussé de l'intérieur par deux ressorts. Mesurer l'écartement obtenu entre les deux carters sous l'action de la détente des deux ressorts.



Déposer le carter du frein.



Retirer successivement chaque élément jusqu'au disque de friction inclu.



A l'aide d'un tournevis plat inséré dans les encoches latérales, séparer les deux carters.



Déposer les deux carters.

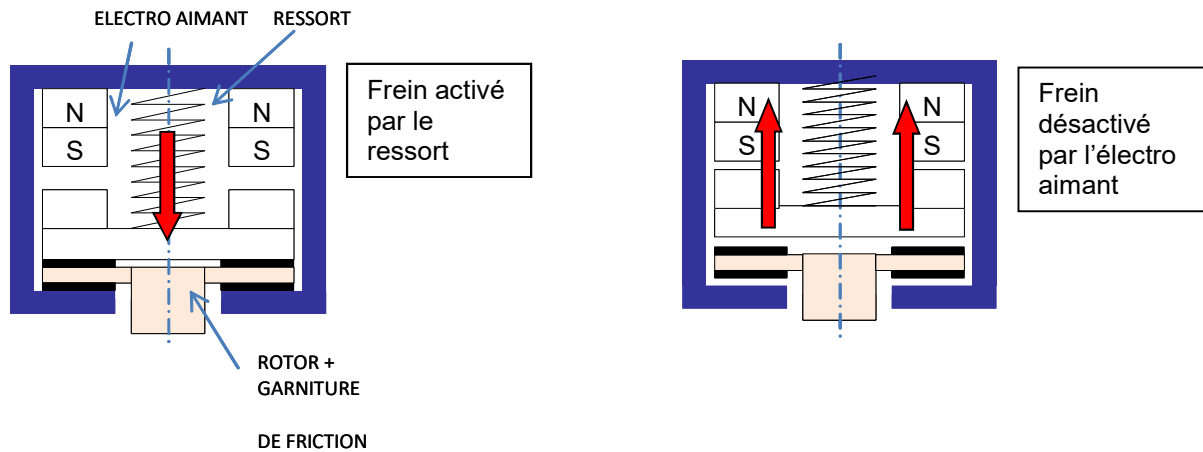


II - Etude

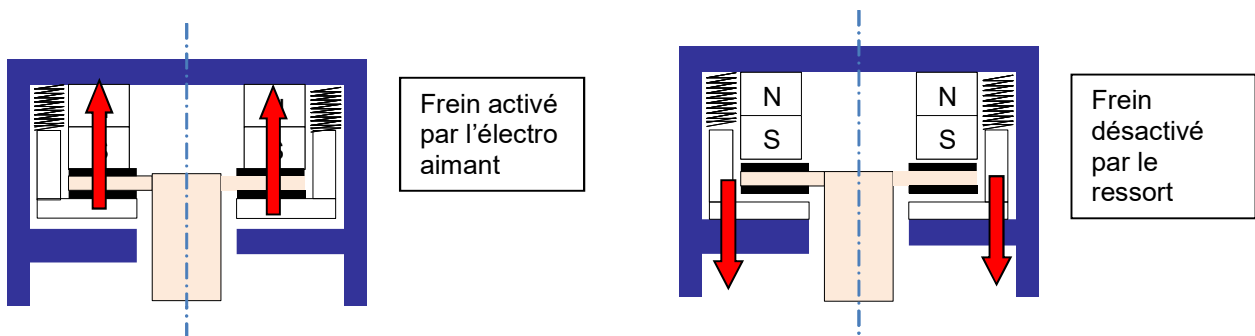
Travail demandé :

❶ Retrouver parmi les 2 cas proposés, celui qui décrit correctement le principe de fonctionnement du frein.

Cas 1 :

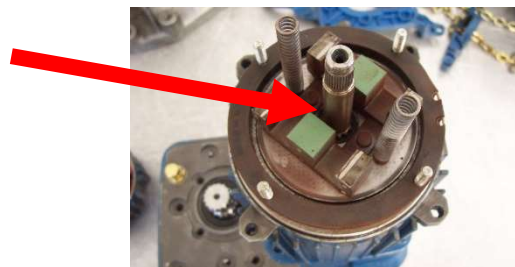


Cas 2 :



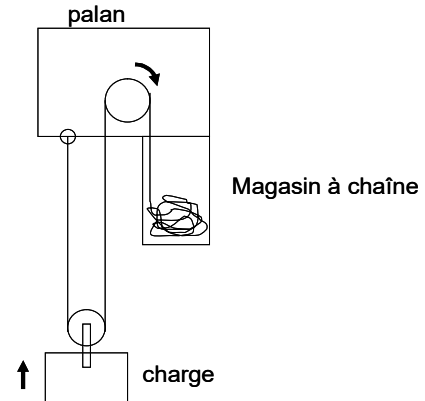
❷ S'agit-il d'un frein par manque de courant électrique, ou faut-il alimenter l'électro-aimant pour freiner ? Justifier ce choix de conception.

❸ Justifier la présence de la liaison glissière entre la couronne de friction et le rotor.



④ Déterminer k , le rapport de réduction **exact** du réducteur intégré dans le palan, en comptant les dents des roues dentées.

⑤ Le palan est utilisé à l'aide d'un mouflage (poulies) tel que sur la figure ci-contre. Si la charge vaut 250 kg, combien le palan doit-il soulever avec cette astuce de montage (isoler statiquement la charge) ?



⑥ Mesurer D sur le pignon recevant la chaîne (de creux à tête) et déterminer alors le couple C_{cr} exercé par la charge ramené sur l'arbre moteur avec le mouflage (rendement global supposé idéal...).



⑦ Elaborer et mettre en œuvre une méthode afin de déterminer la raideur K des ressorts du frein. En déduire l'effort axial « A » développé par ces 2 ressorts.

⑧ Elaborer une méthode (en dressant un schéma de principe) puis la mettre en œuvre afin de montrer la relation de proportionnalité entre effort tangentiel de frottement et effort normal de contact. **On utilisera 3 points de mesure.** En déduire le coefficient de frottement de glissement moyen « f » pour le couple de matériau "garniture de friction - acier".

⑨ Le couple de freinage « C_f » est obtenu par adhérence sur deux surfaces. Les surfaces de frottement sont des couronnes de rayon intérieur « R_i » et de rayon extérieur « R_e ». L'effort axial « A » et le coefficient de frottement « f » ont pour valeurs celles calculées en ⑥ et ⑦.

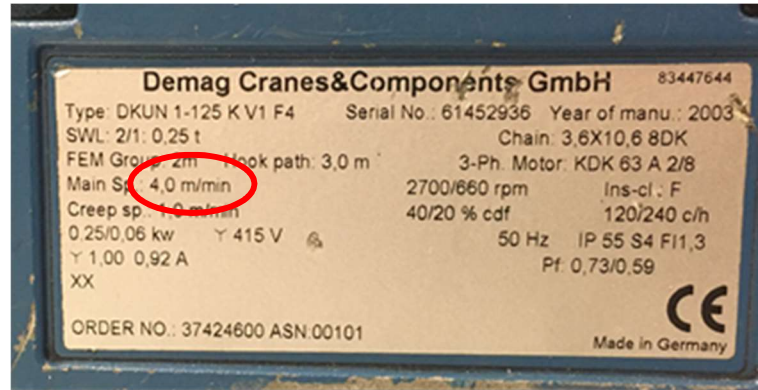
Après avoir mesuré « R_e » et « R_i » évaluer « C_f » sachant que pour la géométrie

concernée on a la relation : $C_f = \frac{2}{3} \cdot f \cdot A \cdot \frac{R_e^3 - R_i^3}{R_e^2 - R_i^2}$ → ⚠ pour **une** surface de friction.

On admet en général $C_{cr} < C_f < 2 C_{cr}$ (question traitée en TD).

La valeur de C_f obtenue est-elle compatible avec les performances du moteur ?

⑩ Caculer la vitesse de translation de la charge de 250 kg dans le cas d'un mouflage sachant que le moteur tourne à 2700 tr/mn (« main speed »). Cette valeur est-elle compatible avec les performances annoncées par le constructeur sur la plaque signalétique du palan ?



*En déduire la puissance utile au soulèvement de la charge à la vitesse calculée.
Discuter alors de la valeur obtenue en la comparant à la puissance affichée sur la plaque
signalétique du palan. D'où provient la différence ?*

III - Remontage

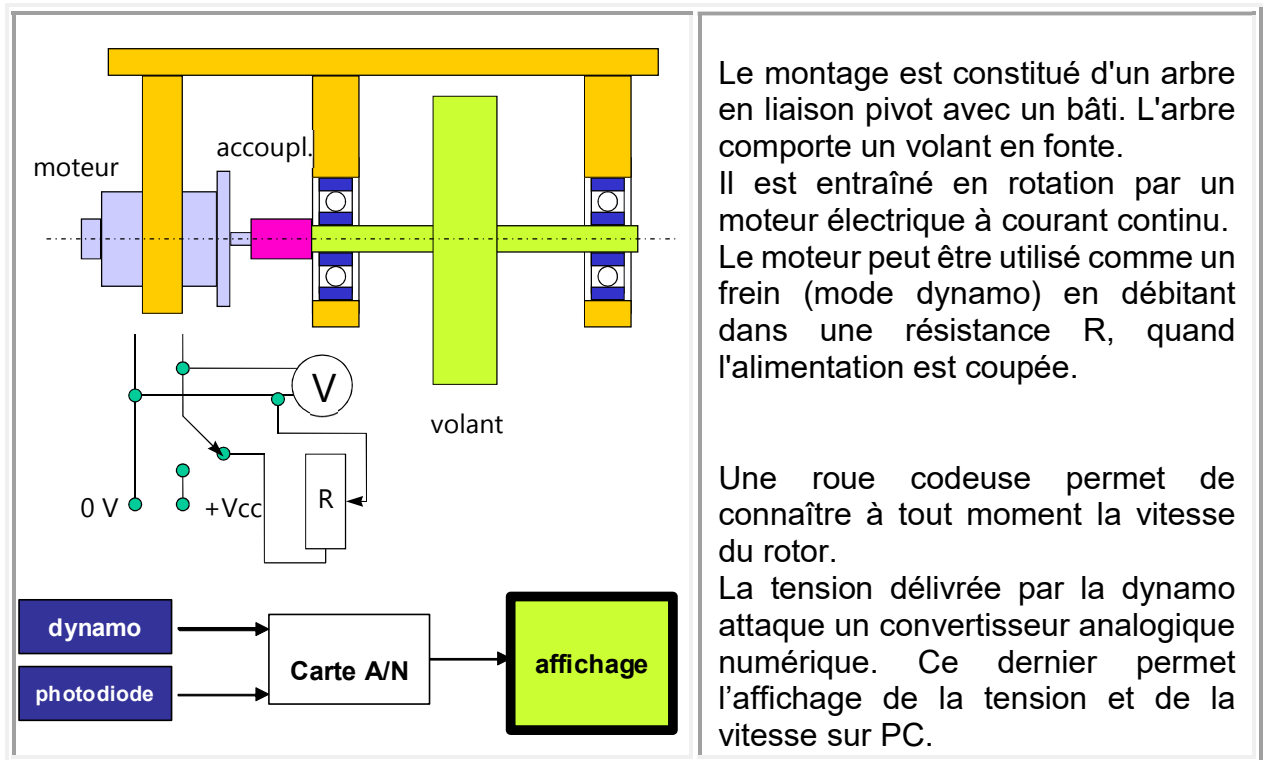
Pour remonter le moteur-frein, reprendre la procédure de démontage à l'envers.



But du TP

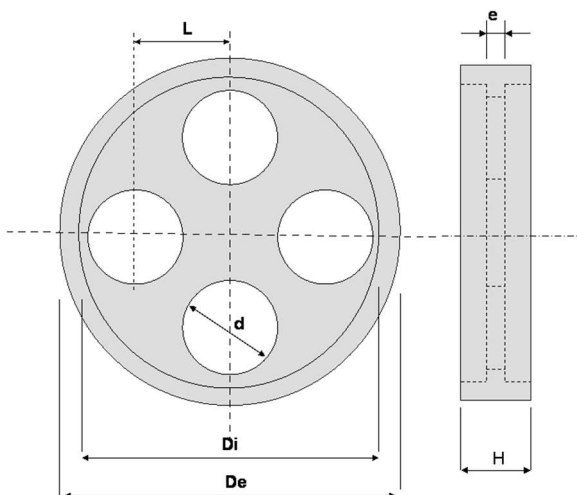
A partir de considérations énergétiques, vérifier le théorème de l'énergie cinétique.

I – Présentation du montage



II – Etude

Travail demandé :



❶ La figure suivante donne les caractéristiques du volant d'inertie. Que penser du moment d'inertie de l'arbre comparativement à celui du volant ?

Calculer J , le moment d'inertie du volant relativement à l'axe du moteur si :

$D_e = 190 \text{ mm}$ $D_i = 162 \text{ mm}$
 $d = 40 \text{ mm}$ $L = 55 \text{ mm}$
 $H = 40 \text{ mm}$ $e = 8 \text{ mm}$
 $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$

Le moteur lance les volants en rotation rapide ω_1 puis son alimentation est coupée, on pose $t = 0$. A cet instant la tension aux bornes de la génératrice est U_1 .

Les frottements et le frein dissipent alors progressivement l'énergie cinétique stockée, à l'instant t la vitesse de rotation vaut $\omega(t)$ et la tension vaut $U(t)$.

On suppose qu'en transitoire la vitesse d'une part et que la tension d'autre part obéissent à une réponse temporelle de type premier ordre :

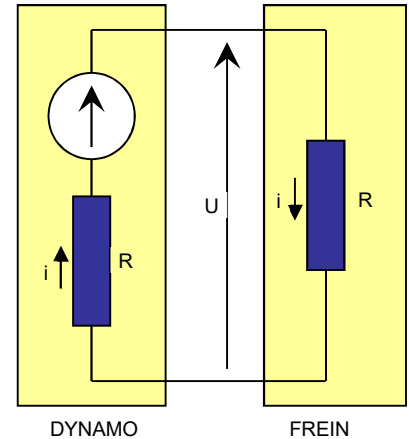
$$\omega(t) = \omega_1 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{et} \quad U(t) = U_1 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

La résistance électrique du frein est $R \approx 4 \, \Omega$. Elle est réglée de façon à être proche de celle du bobinage de la dynamo.

On suppose que la dynamo se comporte approximativement en générateur de courant.

Les deux résistances sont parcourues par un courant identique et donc les pertes par effet Joule sont identiques dans les deux.

Le couple axial C_f lié au frottement est supposé constant.



Les puissances P en jeu sont :

- les puissances développées par effet Joule,
- la puissance développée par les frottements

Dans ces conditions, le théorème de l'énergie cinétique s'écrit :

$$\frac{dE_c}{dt} = \sum \text{Puissances}$$

$$dE_c = [-C_f \cdot \omega(t) - 2 \cdot R \cdot i(t)^2] \cdot dt$$

$$dE_c = \left[-C_f \cdot \omega(t) - 2 \cdot \frac{U(t)^2}{R} \right] \cdot dt$$

Travail demandé :

② Exprimer, par intégration, la variation d'énergie cinétique des volants entre $\omega_1(t=0)$ et $\omega_2(t=T)=0$ en fonction de R , C_f , ω_1 , U_1 , τ et T .

Identifier dans la relation l'expression de l'énergie stockée et celle de l'énergie dissipée.

III – Expérimentation

Travail demandé :

❶ Essai 1 : mode roue libre.

Alimenter le moteur sous 20 Volts. Quand la vitesse est stabilisée, stopper l'alimentation (levier en position médiane → roue libre) et relever $U(t)$ en réalisant l'acquisition de la courbe à l'aide du traceur.

❷ Essai 2 : mode génératrice et frein.

Alimenter le moteur sous 20 Volts.

Quand la vitesse est stabilisée :

1. Relever la valeur de ω au moment du basculement, on peut s'aider du tachymètre mis à disposition.
2. Basculer ensuite de mode moteur à mode génératrice et relever la courbe $U(t)$ à l'aide du traceur

IV – Dépouillement

Travail demandé :

❶ Essai 1 : mode roue libre.

Analyser la courbe $U(t)$ et en déduire la valeur pratique de C_f .

❷ Essai 2 : mode génératrice et frein.

Analyser la courbes $U(t)$ et en déduire la valeur de τ et T .

❸ Calculer, d'une part, l'énergie stockée dans le volant.

Calculer, d'autre part, l'énergie totale dissipée par les frottements et la résistance électrique.

La relation trouvée en (II-❷) est-elle vérifiée ?

Pourquoi ?

❹ Commentaires et impressions.



