

**DYNAMIQUE
ET
MOTEURS ÉLECTRIQUES**

ENS Physique 2009-2010

Ce polycopié est constitué de deux parties assez indépendantes : Dynamique Newtonienne et Moteurs (conversion de puissance électro-mécanique).

Première partie : DYNAMIQUE NEWTONIENNE

Références générales :

- Bertin-Faroux-Renault, *Mécanique* 1 et 2;
- Landau et Lifchitz, *Mécanique* ;

Références gyroscope :

- classes prépa. : GIE-SARMANT p. 225 ; BERTIN-FAROUX-RENAULT (éd 76) p. 211–228 (formalisme général et application à des cas particuliers) ;
- J.-C. RADIX : Gyroscopes et gyromètres ;
- BRUHAT, *Mécanique* (démonstrations géométriques très complètes, mais lourdes...) ;
- FLEURY-MATHIEU, *Mécanique physique* (descriptif sans démonstrations, applications) ;
- FEYNMAN, vol. I, *Mécanique*, § 20.3 ; cours de BERKELEY, vol. I *Mécanique* p. 251–257 (cas particuliers traités simplement, avec interprétations physiques).

Introduction

Les expériences proposées ici peuvent servir principalement dans le montage «Quantité de mouvement, moment cinétique et énergie en mécanique classique» . Dans tous les cas, il conviendra de choisir certaines expériences pour pouvoir les exploiter convenablement .

I) Expériences sur coussin d'air (Important)

Depuis 1978 elles sont systématiquement employées en classe de seconde pour une introduction expérimentale de la mécanique (principe d'inertie, quantité de mouvement...). Leur dépouillement est relativement long, et il est donc conseillé, en montage, de se limiter à une ou deux des expériences proposées dans cette section.

Références : BUP n° 603 (avril 1978), manuels de seconde.

1) Montage expérimental

Les mobiles autoporteurs sont pourvus d'une électrode centrale, et parfois d'une seconde électrode au bord. Ils peuvent être lestés à l'aide de masses annulaires, et entourés soit d'un ressort circulaire, soit d'une bande velcro, permettant de réaliser respectivement des chocs élastiques ou totalement inélastiques.

Les feuilles de papier spécial sont conductrices pour que la décharge électrique passe d'un mobile à l'autre. Elles sont *chères*. Ne pas oublier de relier la feuille à la masse. La marque noire due à la décharge apparaît essentiellement sur l'envers de la feuille.

Des frottements subsistent souvent. Pour les réduire il faut une surface bien plane (également bien horizontale si l'on veut annuler la pesanteur). Il est parfois difficile de manipuler seul, il faut s'entraîner à lancer le mobile et déclencher les impulsions aussitôt. Il existe une pédale pour cela.

Pour que l'auditoire *voie*, on peut placer un miroir incliné à 45° au-dessus de la table, et ensuite fixer l'enregistrement au tableau pour le dépouiller.

Une méthode un peu plus moderne consiste à utiliser une Webcam, en faisant la mise au point sur la feuille.

2) Mouvement d'un mobile isolé

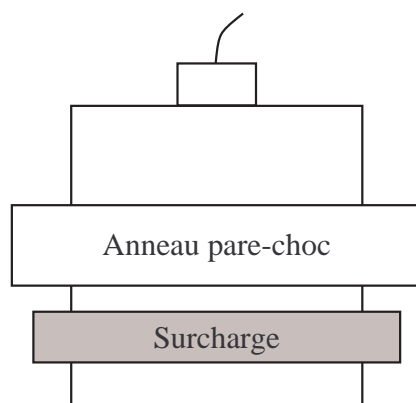
Si on utilise un seul mobile, on peut illustrer la conservation de la quantité de mouvement \mathbf{p} et du moment cinétique σ , via l'utilisation d'une électrode centrale et d'une électrode périphérique. L'utilisation de deux mobiles permet cependant d'étudier des expériences plus riches.

3) Choc de deux mobiles

On illustre la conservation de l'impulsion *totale* pour un système isolé.

Principe : On lance deux mobiles de masse l'un contre l'autre et on enregistre le mouvement de leurs centres d'inertie A et B. On construit les vecteurs $\mathbf{p} = m_A \mathbf{v}_A + m_B \mathbf{v}_B$ et $\mathbf{p}' = m_A \mathbf{v}'_A + m_B \mathbf{v}'_B$ pour vérifier leur égalité.

Réalisation : On a intérêt à surcharger l'un des mobiles pour avoir m_A et m_B nettement différentes. Dans ce cas, pour la stabilité verticale, il faut placer l'anneau qui subira le choc *au milieu* du cylindre et l'anneau de surcharge *au-dessous*. Il faut lancer les mobiles assez fort pour que les frottements soient bien négligeables.



Exploitation :

- À l'aide d'une construction géométrique, réaliser un bilan en impulsions et vérifier la conservation de l'impulsion totale.
- Vérifier la conservation de l'énergie. Quelle erreur systématique peut apparaître lors de la mesure ? (*Indication* : bien observer les mobiles après le choc)

Variantes :

- Le cas général où les mobiles ont tous deux des vitesses initiales est fastidieux à dépouiller. C'est plus simple si on lance un mobile sur l'autre *immobile* $\mathbf{v}_B = \mathbf{0}$.
- Il est possible de refaire l'expérience avec des bagues aimantées : on change le détail de l'interaction, mais le bilan doit toujours être vérifié.
- Dans le cas du choc *mou* ($\mathbf{v}_A = \mathbf{v}_B$) on a intérêt à repérer le mouvement du centre d'inertie après le choc (milieu du segment AB, si les deux mobiles ont la même masse).

II) Chute libre

*Note : L'expérience proposée ci-dessous est simple de mise en œuvre. Néanmoins, elle ne permet pas d'illustrer des propriétés de mécanique des solides (description en mécanique du point). L'expérience suivante est plus riche car elle introduit le mouvement d'un solide (le cylindre). Afin de gérer au mieux le temps, **choisir entre la chute libre et le mouvement du cylindre**.*

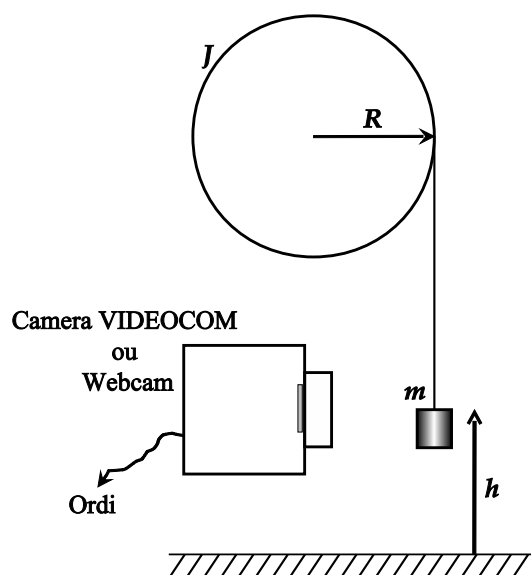
Une expérience simple de mécanique du point consiste à faire tomber une masse en chute libre. On peut étudier le mouvement avec une Webcam et SYNCHRONIE (Cf. Annexe). On en tire sa vitesse et son accélération par dérivation numérique¹.

On pourra calculer la vitesse, l'énergie cinétique et potentielle, pour ainsi vérifier la conservation de l'énergie mécanique.

III) Rotation d'un cylindre soumis à un couple constant

1) Dispositif expérimental

On utilise le dispositif suivant :



1. Cette dérivation introduit du bruit, aussi la précision sur la pente de $v(t)$ est-elle meilleure que celle de la vérification directe de $a = \text{cste}$.

Noter qu'à cause de l'accélération de la masse, la tension sur le fil n'est pas mg , et donc que le couple n'est pas mgR .

- Évaluer la force de frottement f en cherchant la masse m_f telle que le système, une fois lancé, évolue à vitesse quasi-constante ;
- Travailler ensuite avec une masse $m \gg m_f$.

On peut utiliser la caméra LEYBOLD (pas toujours facile à régler) et le logiciel VIDEOCOM. La caméra est constitué d'une barrette de DELs et d'une barrette CCD. Les DELs émettent un signal à une fréquence dite fréquence d'échantillonnage. Un réflecteur appliqué sur la masse mobile m renvoie ce signal sur les CCD. Le logiciel VIDEOCOM traite alors le signal issu de la CCD, et donne ainsi accès à la position et à la vitesse de la masse au cours du temps.

Remarque : Il n'est pas évident de calculer l'énergie dans VIDEOCOM. On pourra transférer les données dans un autre logiciel² (IGOR, SYNCHRONIE, ...).

On peut aussi utiliser une Webcam et SYNCHRONIE. Elle présente l'avantage d'un réglage plus aisé, mais nécessite un post-traitement de l'enregistrement (en faisant attention aux éventuelles images perdues durant l'acquisition, Cf. Annexe) pour en tirer position puis vitesse de la masse.

2) Étude de la vitesse angulaire

- On note J le moment d'inertie du cylindre par rapport à son axe de rotation. Montrer qu'en l'absence de frottements la vitesse angulaire est de la forme :

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{g/R}{1 + J/mR^2} t + \text{cste}$$

- Mesurer la vitesse v de la masse, tracer la courbe $v = f(t)$, et vérifier la loi ci-dessus. En déduire la valeur de J .

3) Conservation de l'énergie

L'énergie cinétique (proportionnelle à v^2) varie linéairement avec la hauteur de chute h . Le vérifier. Représenter l'énergie cinétique, l'énergie potentielle et l'énergie mécanique en fonction du temps. Vérifier la conservation de l'énergie mécanique.

4) Mesure du frottement solide (facultatif)

On se propose ici d'obtenir une estimation des frottements dans l'expérience ci-dessus.

On se place dans le cadre du modèle de frottements solides : le couple de frottements Γ ne dépend pas de la vitesse de rotation du cylindre. Son signe dépend cependant du sens de rotation du cylindre.

Si l'on réalise l'expérience ci-dessus à la montée et à la descente, on aura un frottement toujours opposé au mouvement, et donc on aura des accélérations différentes pour les deux phases.

2. Quand on exporte un tableau de données de VIDEOCOM vers un fichier texte, les décimales sont marquées par des virgules. Avant d'importer les données sous IGOR, il faut convertir toutes ces virgules en point. Le bloc-notes de Windows devrait faire l'affaire.

Protocole : Placer initialement la masselotte en position basse. Faire alors tourner le cylindre dans la sens de la montée de la masse, et lancer l'acquisition. À l'aide d'ajustements, en déduire l'accélération pour les deux phases (montée et descente), et en déduire leur différence γ_{diff} . On peut montrer que

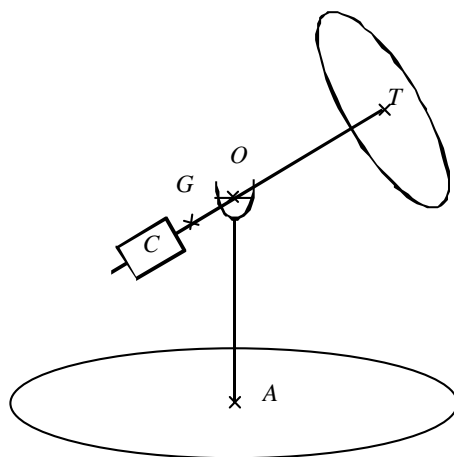
$$\gamma_{\text{diff}} = R \frac{mgR + \Gamma}{mR^2 + J} - R \frac{mgR - \Gamma}{mR^2 + J} = \frac{2\Gamma/R}{m + J/R^2}.$$

Pour que l'effet soit notable, on prendra une masse assez faible.

IV) Le gyroscope (Très important)

1) Dispositif expérimental

Le gyroscope permet d'observer le mouvement d'un solide rigide S mobile autour d'un point fixe O. On étudie en particulier les mouvements obtenus lorsque le solide est initialement lancé dans une rotation très rapide (ω) autour de son axe principal d'inertie OT.



Dans notre cas, le solide S est constitué par l'ensemble rigide : disque de laiton de centre T + contrepoids C + axe de liaison. On notera J le moment d'inertie du disque. Le mouvement autour d'un point fixe est réalisé à l'aide du *cardan* centré en O.

Attention à ce que le gyroscope ne heurte aucun obstacle (y compris votre tête...).

- Avant de commencer, vérifier que le **système de blocage** de la rotation horizontale du gyroscope n'est pas verrouillé.
- L'**équilibre statique** du gyroscope est obtenu en déplaçant le contrepoids de masse $m = 2,952 \text{ kg}$ le long de la tige, et le réglage est affiné au moyen de la masselotte située à l'extrémité du gyroscope. Placer la bague en plastique contre le contre-poids pour repérer la position d'équilibre.
- **Mesure de la vitesse de rotation propre** : on utilise pour cela le compteur de vitesse monté sur le gyroscope. Voir sa notice.
- **Mise en rotation** : mettre le compteur en marche et lancer le gyroscope à l'aide de la perceuse munie de son embout adapté. Ôter la perceuse lorsque le compteur affiche 0. À cause des frottements, l'affichage de la vitesse réelle réapparaîtra peu après³.

3. Une certaine confusion apparaît dans la littérature entre les termes de précession et de nutation. Les *deux*

2) Gyroscope déséquilibré : mouvement de précession

Le gyroscope étant en rotation, déplacer le contrepoids hors de la position d'équilibre statique, et lâcher l'ensemble. Le mouvement est complexe, constitué d'une rotation autour de l'axe vertical (précession) à laquelle se superpose un mouvement de nutation. Pour éliminer la nutation, il faut accompagner à la main le gyroscope à la bonne vitesse et le lâcher dans ces conditions. Mesurer sur un tour, avec un chronomètre, la vitesse de précession pure Ω ainsi obtenue. La vitesse de rotation propre ω_s qui diminue assez rapidement, sera lue juste avant et juste après cette mesure.

Ce mouvement s'interprète aisément dans le cadre de l'approximation gyroscopique, où le gyroscope tourne uniformément autour d'un axe à la vitesse Ω selon la loi :

$$\frac{d\sigma}{dt} = \Omega \wedge \sigma_0$$

où σ est le moment cinétique et σ_0 le moment cinétique propre.

On montre alors que :

$$\Omega = \frac{m g a}{J \omega}$$

où m est la masse du contrepoids, a est la distance dont on l'a déplacé par rapport à la position d'équilibre, et J le moment d'inertie du disque par rapport à son axe de rotation propre (indiqué sur le gyroscope). La vitesse Ω est indépendante de l'angle entre l'axe du gyroscope et la verticale. Le vérifier expérimentalement : tracer par exemple Ω en fonction de a/ω et en déduire J .

3) Gyroscope équilibré dans un repère tournant : couple gyroscopique (Facile à exploiter quantitativement)

Arrêter la rotation propre du gyroscope, réaliser très soigneusement son équilibrage puis le placer au centre du plateau tournant. Bloquer la rotation horizontale à l'aide du dispositif situé en haut du pied et agir sur le levier qui autorise la rotation horizontale du support de la base du gyroscope. On obtient ainsi un gyroscope un axe.

Mettre le gyroscope en rotation propre et installer le dynamomètre de telle sorte qu'il indique une valeur un peu inférieure à sa valeur maximum lorsque le gyroscope est à peu près horizontal⁴ (voir figure).

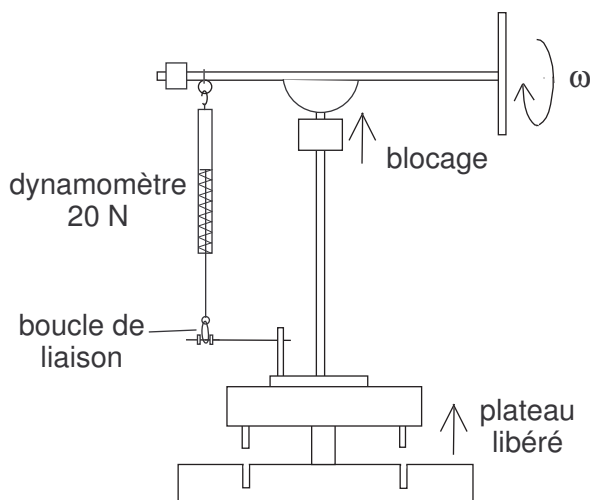
Faire tourner **lentement** le plateau de sorte que le gyroscope soit horizontal, mesurer la période de rotation avec un chronomètre et lire la force indiquée par le dynamomètre⁵. En

désignent un mouvement de rotation lent de l'axe OT (quand ils apparaissent simultanément, le point T peut alors décrire des festons).

- La *précession* est due à l'effet d'un couple constant agissant sur le centre d'inertie G du solide (par exemple le poids si G n'est pas confondu avec O).
- La *nutation* s'observe même sans couple appliqué (dans ce cas on l'appelle souvent «précession libre»). Elle dépend des conditions initiales du mouvement. Elle apparaît ici dans le cas où le moment cinétique total σ n'est pas initialement colinéaire avec l'axe OT. La fréquence de nutation dépend de la différence entre les deux moments d'inertie principaux du solide de révolution (elle n'existe pas pour une sphère).

4. Dans cette géométrie, le couple est plus facile à calculer.

5. La masse du dynamomètre est de 50g, soit un poids de 0,5 N. L'effet est négligeable sur le couple mesuré, il n'est pas nécessaire de refaire l'équilibrage.



déduire le couple \mathbf{M}_{ext} auquel est soumis le gyroscope lorsqu'il est immobile par rapport au plateau.

On en déduit que le gyroscope applique au dynamomètre le couple : $-\mathbf{M}_{\text{ext}} = -\boldsymbol{\Omega} \wedge \boldsymbol{\sigma}_0$ (à l'approximation gyroscopique) appelé couple gyroscopique. Vérifier quantitativement cette relation.

Note : Cette expérience est en fait semblable à celle montrant la précession du gyroscope déséquilibré, le couple extérieur du poids étant remplacé par celui du dynamomètre.

Enlever le dynamomètre et faire tourner doucement le plateau dans un sens ou dans l'autre. Vérifier que le gyroscope tend à s'aligner avec l'axe de rotation. Ceci illustre une application classique du gyroscope : le compas gyroscopique qui permet de repérer le nord géographique.

4) Gyroscope isolé (Qualitatif et délicat)

Arrêter la rotation propre du gyroscope, l'équilibrer avec soin et libérer la rotation horizontale (gyroscope deux axes). Faire tourner le plateau dans les deux cas suivants :

- le gyroscope n'a pas de rotation propre,
- le gyroscope a une rotation propre la plus grande possible.

On constate dans le premier cas une nette mise en rotation accélérée autour de l'axe vertical.

Dans le deuxième cas, le gyroscope semble au premier abord immobile. Si on l'observe un peu plus longtemps, on constate une rotation à vitesse quasiment constante qui l'aligne avec la verticale.

Interpréter ces phénomènes en considérant qu'il y a un couple de frottement quasi constant dirigé suivant l'axe vertical. Si la vitesse de rotation propre était 100 fois plus grande, que constaterait on en pratique ? Application ?

V) Forces d'inertie : équilibre relatif avec la force centrifuge

On utilise un moteur électrique d'axe vertical et de vitesse variable. On en mesure la vitesse de rotation au chronomètre (sur une dizaine de tours).

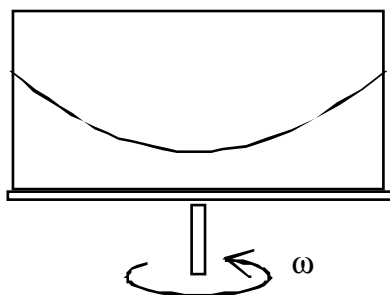
On observe le niveau de l'eau dans un récipient en rotation (voir figure ci-dessous).

Bien régler l'horizontalité et le centrage de la cuve.

L'équation de la surface libre est celle d'un parabololoïde d'équation :

$$z = \frac{\omega^2}{2g} r^2$$

Les courbes tracées sur la cuve correspondent à $r/z^2 = 1, 2, 3$.



Seconde partie : MOTEURS ÉLECTRIQUES

Les expériences proposées peuvent être intégrées à l'un des montages suivants : Conversion de puissance électro-mécanique, Capteurs et transducteurs. Une annexe à la fin de cette partie donne quelques détails théoriques sur les machines électriques.

Bibliographie :

L'introduction du Niard (p. 5-8)⁶ permet de se faire une idée globale sur les machines électriques.

		J.NIARD Machines électriques (term F3)	J. CHATELAIN Machines électriques
Machines synchrones		p. 188 à 222	p. 327 à 335 p. 420 à 422
Machines asynchrones		p. 154 à 186	p. 225 ; 247 à 251 p. 259 ; 260
Machines à courant continu	- génératrices - moteurs	p. 17 p. 21 à 24 p. 24 à 27	p. 479 ; 492 à 494 p. 514 à 518 p. 519 à 525 ; p. 529
Moteurs pas à pas		p. 240	
		Lecture facile, développe surtout les aspects techniques.	Étude théorique des machines électriques, assez ardu.

Vous pouvez aussi consulter :

- J.M. Brébec et al, électronique II, PSI-PSI*, H-Prépa, Hachette (édition de 1997) ;
- R. Mérat et al, Génie électrotechnique, Collection étapes Références, Nathan.

Les plus curieux trouveront des informations complémentaires (aspects techniques notamment) dans T. Wildi, Électrotechnique, De Boeck.

1) Étude du moteur asynchrone triphasé

a) Principe

Le système dont nous disposons est constitué d'un **moteur asynchrone triphasé** couplé à **une dynamo-balance**, qui permet la mesure **mécanique** du **couple** exercé par le moteur. La puissance **mécanique** délivrée à la dynamo est convertie en puissance **électrique**, puis dissipée sous forme d'effet Joule dans **un rhéostat de charge**.

Le but des manipulations proposées ici est d'étudier quelques unes des caractéristiques du moteur asynchrone. Pour cela on fera varier son point de fonctionnement en agissant sur la valeur du rhéostat de charge de la dynamo.

⁶. Les pages indiquées correspondent à l'édition 1985.

b) Dispositif expérimental

ATTENTION : les tensions manipulées sont de l'ordre de 220 V.

Ne toucher aux branchements qu'une fois le moteur arrêté.

En cas de problème, couper le courant au moyen de l'interrupteur coup de poing d'arrêt d'urgence.

Moteur

Stator : Il s'agit de la partie fixe du moteur. Il est constitué de bobinages entourant des pièces polaires en matériau ferromagnétique. Ils doivent être alimentés en courant triphasé et la tension aux bornes de chaque bobinage doit être égale à 220 V. Sa structure (disposition des bobinages et des pièces polaires) est telle que tout se passe comme si le stator créait un champ magnétique tournant à 1500 tours/min (25 Hz) (cf. Niard p. 145-149).

Le branchement utilisé est de type étoile (cf. figure), le neutre n'étant parcouru par aucun courant tant que le circuit est équilibré (même intensité efficace dans les trois phases).

Pour mesurer la puissance électrique fournie sur l'une des phases, on utilisera de préférence un wattmètre numérique donnant aussi accès à la tension et à l'intensité. À défaut, en plus du wattmètre, on ajoutera un ampèremètre alternatif et un voltmètre alternatif.

On veillera à ne jamais dépasser le courant maximum de 3,2 A.

Rotor : Il s'agit de la partie tournante du moteur. Il est bobiné et prévu pour être court-circuité en fonctionnement normal. On peut remplacer le court-circuit par un ampèremètre continu 5 A à zéro central.

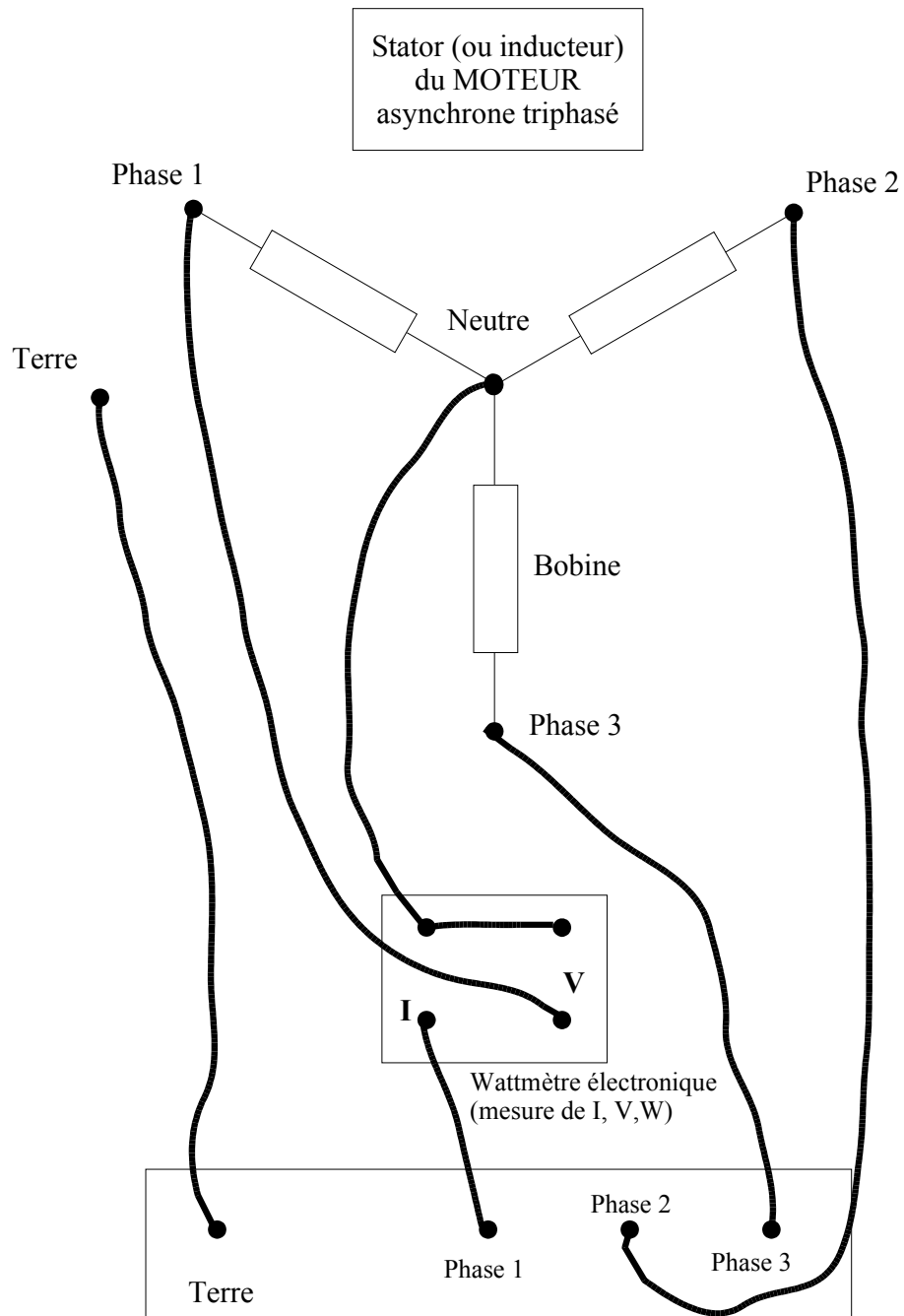
Dynamo

Celle-ci fonctionne en auto-excitation, c'est à dire que l'inducteur et l'induit sont montés en parallèle. La **charge** est constituée par un ensemble de résistances commutables placées dans un grand boîtier. Placer un voltmètre continu 240 V minimum en parallèle sur la charge.

Pour expliquer la mesure du couple par la dynamo-balance, se reporter au paragraphe c) de l'annexe.

c) Grandeurs physiques à mesurer

- Le montage du wattmètre monophasé proposé permet de mesurer la puissance P_1 qui entre dans une seule bobine du stator. Le réseau étant équilibré, la puissance consommée par le moteur vaut $P_0 = 3P_1 = 3UI \cos \Phi$, où U est la tension aux bornes d'une bobine et I le courant qui la traverse.
- La fréquence du moteur est mesurée à l'aide d'une petite dynamo tachymétrique montée sur l'axe du moteur et reliée à un voltmètre digital directement gradué en tours par minute.
- Le couple est mesuré en équilibrant la dynamo balance avec la masselotte mobile de 1 kg. On accroît la puissance mécanique fournie par le moteur en diminuant la résistance de charge de la dynamo-balance (cf. NIARD pp. 38-39 et 71-72).



d) Mise en œuvre

- Réaliser l'équilibrage du bras de la dynamo balance. Pour cela, placer la masselotte mobile sur la graduation 0 et agir sur le contrepoids situé sur le bras opposé.
- Ne pas brancher la charge de la dynamo.
- Alimenter le stator du moteur. Si le système disjoncte à l'enclenchement, vérifier que l'interrupteur coup-de-poing est bien tiré vers le haut.
- S'assurer que le moteur tourne dans le bon sens (flèche orange dessinée sur le moteur). Sinon arrêter le moteur (en coupant l'alimentation du stator) puis inverser deux phases du secteur (cf. NIARD p. 138).
- Brancher la charge de la dynamo.
- Noter dans un tableau les valeurs des grandeurs suivantes : résistance de charge, I_{stator} , V_{stator} , vitesse de rotation, couple (et facultativement tension de la dynamo).

Glissement (cf. NIARD p. 168, 171, 186)

Le glissement est l'écart relatif entre la vitesse de rotation du champ tournant (ici 25 Hz) et la vitesse de rotation du moteur. On observe directement l'effet du glissement sur l'ampèremètre continu à zéro central branché sur le rotor (cf. b) de l'annexe).

Expliquer qualitativement pourquoi la vitesse diminue quand on diminue la résistance de charge de la dynamo (raisonner sur le transfert de puissance entre le moteur et la dynamo).

Tracer la caractéristique couple mécanique en fonction de la fréquence du moteur.

Rendement et $\cos \Phi$ du moteur (cf. NIARD p. 168) (important)

Tracer les courbes donnant le rendement (rapport de la puissance mécanique fournie à la puissance électrique reçue) et le $\cos \Phi$ du moteur en fonction de la puissance mécanique fournie (puissance utile).

Ces courbes sont-elles en accord avec les caractéristiques indiquées par le fabricant sur la plaque signalétique du moteur ?

Rendement de la dynamo (facultatif)

Tracer la courbe donnant le rendement (rapport de la puissance électrique fournie à la puissance mécanique reçue) en fonction de la puissance électrique fournie.

e) Étude du champ tournant

On dispose dans la collection, notice N8, d'un jeu de trois bobines Leybold⁷, munies de leur noyaux en fer, placées à 120° les unes des autres et que l'on alimente grâce à une alimentation triphasée (52 V entre phases et neutre, 26 V entre phases) par un montage en étoile ou en triangle. On génère alors au centre un champ magnétique tournant à la fréquence du secteur.

On utilise une bobine supplémentaire que l'on place au centre du dispositif et dont on mesure à l'oscilloscope la f.e.m. induite par le champ tournant. Quelle composante du champ observe-t-on ainsi ?

7. 1200 tours, résistance 10 Ω pouvant supporter 1 A environ.

Mettre en évidence la phase relative des trois champs produits par les trois bobines en alimentant successivement une seule des trois bobines. Comment faut-il synchroniser l'oscilloscope ?

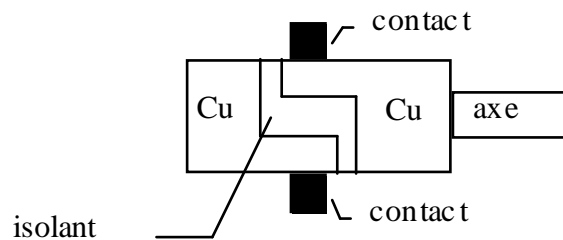
Ajuster alors la position des noyaux en fer de sorte à ce que ces trois champs aient même amplitude au centre. Alimenter à nouveau les trois bobines. Vérifier alors que le champ magnétique total est bien un champ tournant : l'amplitude du signal est indépendante de la direction d'observation θ et la phase dépend linéairement de θ .

Mesurer le rapport des amplitudes du champ créé par une seule bobine et du champ tournant. Faire un bilan de puissance.

Remplacer la bobine de mesure par une «cage d'écureuil» : la cage est mise en rotation. On réalise ainsi un moteur asynchrone de principe (la mesure de la vitesse de rotation de la cage via une fourche optique est possible quoique délicate. Le «vrai» moteur asynchrone est plus adapté à cette mesure⁸). Montrer qu'on peut changer le sens de rotation du moteur en échangeant les branchements de deux des bobines.

2) Principe du moteur à courant continu

Nous proposons ici une expérience qualitative sur un moteur didactique. On utilise comme stator une **seule** bobine qui doit être horizontale. Le rotor est alimenté par l'intermédiaire du **collecteur** qui est la pièce maîtresse du moteur à courant continu. La figure ci-dessous explique comment les contacts doivent être disposés sur le collecteur.



Le stator et le rotor doivent être alimentés en série avec une tension d'environ 10 V pouvant débiter 1 A. Pour le démarrage, placer le rotor perpendiculairement au stator de façon à avoir un couple important. Faire fonctionner le système le moins longtemps possible car les étincelles qui se produisent lors de la commutation abîment rapidement le collecteur.

Interpréter le rôle du collecteur. Vérifier que l'inversion de la polarité ne change pas le sens de rotation du moteur. Comment pourrait-on inverser le sens de rotation ?

Peut-on utiliser ce moteur avec un courant alternatif ?

Variation du rendement avec la charge.

On se propose de montrer la variation du rendement de la conversion électrique-mécanique avec la charge dans le cas d'un moteur à courant continu.

8. Voir aussi la notice N463 et le moteur asynchrone-synchrone Leybold monté.

On utilise le moteur à courant continu à alimentation 12 V découplé et on monte sur une distance de h ($h=1$ m) différentes masses ($m = 1$ kg, 2 kg, 3 kg, etc)⁹. On alimente le moteur en 12 V et on place un ampèremètre et un interrupteur en série. Lorsque l'interrupteur est fermé et que le régime permanent est atteint, le produit UI donne la puissance électrique fournie au système. La puissance mécanique utile est donnée¹⁰, en notant Δt la durée de la montée sur la distance h , par :

$$P_m = \frac{mgh}{\Delta t}$$

3) Moteur pas à pas (facultatif)

Utiliser l'ensemble moteur et commande de chez PIERRON. Le boîtier de commande est alimenté par une alimentation de 12 V pouvant débiter 1 A. Relier les sorties Q1, Q2, Q3, Q4 respectivement aux fils noir, vert, rouge et bleu du moteur. Relier aussi les deux fils blancs du moteur au +12 V.

Utiliser comme horloge un générateur BF dont on réglera l'amplitude et le décalage continu pour obtenir un signal carré variant entre 0 et 12 V (la sortie TTL ne convient pas). Envoyer ce signal sur l'entrée horloge du boîtier de commande. Pour agir sur le sens de rotation du moteur, relier la borne rotation au 0 ou au 12 V.

- En utilisant une horloge à très basse fréquence, déterminer le nombre de pas du moteur ;
- En utilisant la plaquette de 5 DELs, visualiser les tensions de commande du moteur et la tension d'horloge ;
- Déterminer la fréquence maximum d'horloge utilisable.

4) Annexe : quelques informations supplémentaires sur le fonctionnement des machines électriques

a) Machine synchrone

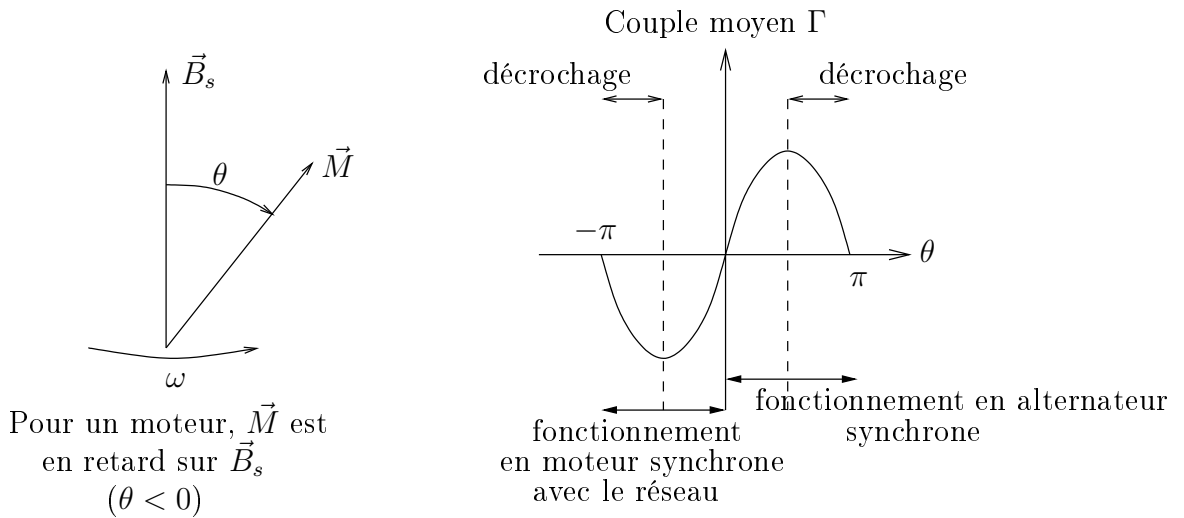
Vous pouvez consulter Niard p. 218-219 et H-prépa p. 106-112.

- Le stator, alimenté en triphasé, fournit un champ magnétique B_s tournant à la pulsation ω_s ;
- Le rotor, un aimant permanent ou un bobinage alimenté par un courant continu, est assimilable à un moment dipolaire \vec{M} et tourne à la vitesse ω_r .

Le couple moyen n'est non nul que si $\omega_r = \omega_s$ et vaut $\Gamma = MB_s \sin \theta$. Pour le démarrage, voir Niard p. 219.

9. Il est bien entendu possible d'effectuer une étude plus longue en utilisant un plus grand nombre de masses. Compte tenu des incertitudes importantes sur la valeur de la puissance mécanique (la mesure de la durée de la montée de la masse est effectuée au chronomètre), il est préférable de se cantonner à une mise en évidence.

10. Pour que les relations données soient correctes, il faut avoir atteint le régime permanent du moteur. Pour cela, on a intérêt à laisser le moteur monter la masse pendant quelques cm avant de déclencher le chronomètre. La difficulté est qu'il faut mesurer simultanément I et Δt (facile en binôme... difficile seul : pour chaque masse faire deux montées, mesurer d'abord I , puis mesurer Δt .)



b) Moteur asynchrone (cf. Niard p. 180-186)

Vous pouvez consulter Niard p. 180-186 et H-prépa p. 114-121.

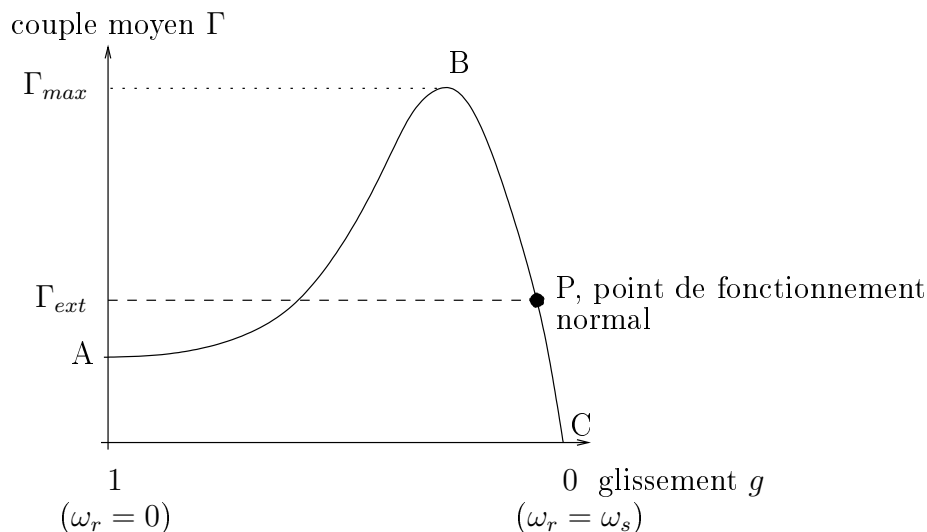
- Stator identique à celui des moteurs synchrones ;
- Le rotor est constitué d'un bobinage fermé sur une résistance R'_r (résistance totale R_r , inductance totale L_r) de surface totale S .

Pour $\omega_r \neq \omega_s$, il apparaît dans le rotor un courant induit i_r de pulsation $\omega = \omega_s - \omega_r$ (pulsation de glissement). Le moment magnétique du rotor $\vec{M} = i_r S \vec{n}(t)$ (vecteur unitaire $\vec{n}(t)$ selon son axe, tournant à ω) tourne donc à la fréquence $\omega_r \pm \omega$. Le seul couple moyen non nul correspond à la vitesse rotor $\omega_r + \omega = \omega_s$, comme pour le moteur synchrone.

Le couple moyen résultant vaut (H-prépa p. 115) :

$$\Gamma = \frac{1}{2} \left(\frac{R_r g \omega_s}{R_r^2 + L_r^2 g^2 \omega_s^2} \right) S^2 B_s^2$$

où $g = \omega/\omega_s = (\omega_s - \omega_r)/\omega_s$ est le glissement du moteur (cf. Niard p. 156).



En fonctionnement normal, le glissement est très faible (inférieur à 10%). La partie AB de la courbe correspond à un fonctionnement instable du moteur (un accroissement de la vitesse provoque un accroissement du couple moteur Γ qui accroît la vitesse...). La partie BC, correspondant à un fonctionnement stable, est la seule accessible dans le cadre du TP.

Si on suppose que l'énergie électrique fournie au moteur est intégralement convertie en énergie mécanique et en effet Joule dans le rotor, le rendement r du moteur asynchrone est $r = 1 - g$, d'où l'intérêt d'un glissement faible en fonctionnement normal (cf. H-prépa p. 118).

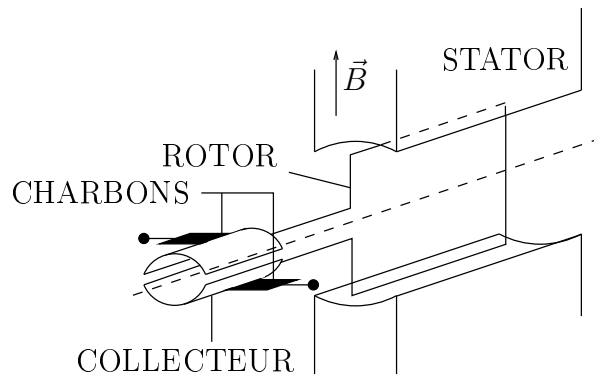
Pour des exemples numériques, voir Niard p. 184-186 (le moteur est sensiblement plus puissant que le nôtre).

c) Dynamo

Il s'agit d'une machine électrique qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique continue. Une machine électrique convertissant l'énergie mécanique en énergie électrique sinusoïdale est un alternateur. La «dynamo» de vélo est un exemple d'alternateur.

Constitution de la dynamo

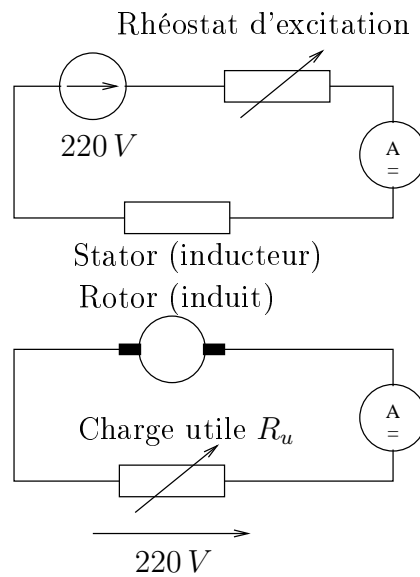
Vous pouvez consulter Niard p. 17-24 et H-prépa p. 74-94.



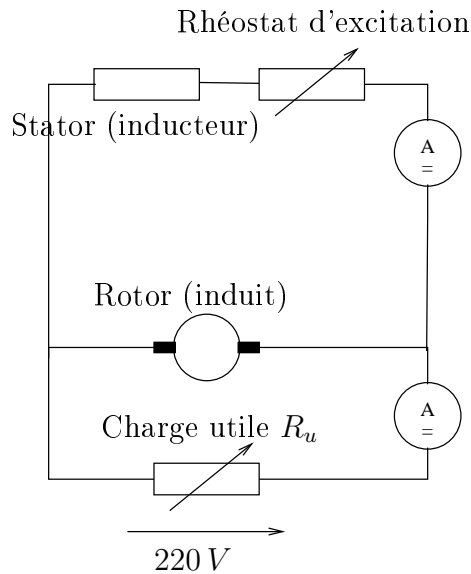
Le collecteur est une pièce tournante. Les charbons sont fixes. Le stator est en général constitué d'un bobinage placé autour de pièces polaires, alimenté par un courant continu.

Lorsque le rotor effectue un demi-tour à partir de la position du schéma, le flux de \vec{B} passe de sa valeur maximale Φ_m (supposée positive) à 0 puis à $-\Phi_m$. On a donc $d\Phi/dt < 0$ et la tension utile a un signe constant. Lorsque le rotor débute le demi-tour suivant, le flux se met à croître, mais on inverse le signe de la tension utile grâce au collecteur. Ainsi, grâce à son collecteur, la dynamo est un générateur de tension continue (Le schéma n'en donne qu'une idée partielle. En fait, le rotor comporte plusieurs bobines décalées et le collecteur a de nombreuses lames de contact, cf. Niard p. 76, H-prépa p. 83).

Utilisation de la dynamo avec un générateur externe d'excitation



Utilisation de la dynamo en auto-excitation



En mode d'auto-excitation, il se pose le problème de l'amorçage : il se réalise grâce au faible champ rémanent du fer du stator. Ce champ induit dans le rotor une petite tension qui, si le branchement est dans le bon sens, accroît le champ du stator.

Dans le TP, la dynamo fonctionne en auto-excitation et on peut uniquement modifier la valeur du rhéostat de charge R_u .

Rôle de la dynamo dans le freinage du moteur asynchrone

Le moteur cède toute sa puissance à la dynamo. Celle-ci la dissipe en partie par frottement, par effet Joule dans ses bobinages, par hystérésis dans le fer, mais surtout par débit dans le rhéostat de charge. En considérant en première approximation qu'elle se comporte comme un

générateur idéal de tension fixée, ce dernier terme est inversement proportionnel à la résistance du rhéostat R_u . Donc, dans certaines limites, plus R_u est faible, plus la dynamo freine le moteur.

Ceci dit, pour nous, la dynamo n'est qu'un instrument qui impose au moteur un point de fonctionnement ajustable et qui sert à mesurer le couple, peu importe la façon dont elle dissipe.

Le moteur applique au rotor de la dynamo le couple Γ_u . En régime permanent, ce rotor est soumis à un couple résultant nul, il reçoit donc aussi de la part du stator de la dynamo un couple de forces de Laplace $-\Gamma_u$. Par action et réaction, ce stator subit le couple magnétique Γ_u . Enfin, ce stator peut, dans une certaine mesure, tourner autour de son axe. Il est maintenu en équilibre car un moment statique équilibre le couple de Laplace. La mesure de ce dernier est donc une mesure de Γ_u . La puissance mécanique fournie par le moteur est égale au produit de ce couple par la pulsation de rotation (cf. Niard p. 38-39 et 71-72).

Annexe : Expériences de mécanique avec une Webcam et SYNCHRONIE

SYNCHRONIE permet l'analyse de fichiers vidéos, orienté vers l'exploitation d'expériences de mécanique (chute libre par exemple).

Dans tout ce qui suit, la Webcam utilisée est la Webcam Philips ToUcam PRO II (notice N.128) et le logiciel AMCap.

Rappels sur les réglages de base

Pour toutes les caractéristiques techniques détaillées, on se reportera à la notice.

Les principaux réglages sont les suivants :

Le temps d'exposition Il correspond au temps pendant lequel la CCD est illuminée et accumule des charges. Il influence la luminosité mais pas le nombre d'images par seconde.

Cependant, si le temps d'exposition est trop long, cela peut donner une image floue de l'objet en mouvement.

Le gain Il amplifie le signal de la CCD. Plus le gain est élevé, plus le signal est bruité, mais il est préférable de maintenir un gain relativement élevé, et une exposition un peu plus courte.

Le nombre d'images par seconde (ou "Frames per second"). C'est la fréquence avec laquelle la webcam prend des images, et il définit donc le pas temporel quand on fait l'étude de la chute d'un objet par exemple.

Étude d'un objet statique avec la webcam

Exemple : Mesure du waist d'un faisceau laser.

Pour l'étude d'un objet statique, on se reportera au poly « *Instruments d'optiques – Lasers* » pour les différents réglages.

Étude de la dynamique d'un objet : acquisition

Pour étudier la dynamique d'un objet, il faut d'abord créer un fichier vidéo, que l'on sauvegardera pour l'analyser ensuite avec SYNCHRONIE. Le réglage supplémentaire concernant l'étude de la dynamique d'un objet est le nombre d'images par seconde.

Dans le logiciel AMCAP : Démarrer le logiciel. Pour que l'image apparaisse en direct, il faut que la ligne *Preview* (menu Options) soit cochée. Si la luminosité ou le contraste de l'image sont mauvais, les régler. Mettre au point sur l'objet qu'on désire filmer à l'aide de la lentille.

Il faut définir un fichier de mémoire tampon¹¹ dans File → Set Capture File → Save Capture File. Le fichier doit être de la forme `buffer.avi` où `buffer` est un nom quelconque. Régler ensuite la taille du fichier File → Set Capture File → Allocate File Space. Utiliser une taille suffisante (100 Mo par exemple, permettant d'acquérir 4 secondes à 25 images par seconde).

11. Ce fichier tampon permet de stocker temporairement les fichiers vidéo avant de les sauvegarder.

Dans le menu **Options** → **Video capture filter**, on peut régler la luminosité, le contraste, ainsi que le temps de pose et le gain **en décochant la case Réglage entièrement automatique**.

Dans ce même menu, le Taux Image est *affiché*.

Attention : toute modification faite dans ce menu seulement ne sera pas prise en compte ! Il faut le modifier dans le menu **Capture** également.

Réglage du Taux Image : dans le menu **Options** → **Capture**, veiller à ce que *Capture Audio* ne soit pas coché. Sélectionner *Set Frame rate*, régler sa valeur, et cocher la case *Use frame rate*. **C'est ce réglage qui détermine la cadence réelle.**

Dans le menu **Options** → **Video Capture Pin**, on peut régler la résolution.

On peut démarrer et arrêter l'acquisition à la main, ou fixer la durée d'acquisition (**Options** → **Set time limit**), et cocher *Use time limit*).

Pour démarrer l'acquisition, **Capture** → **Start capture**. L'acquisition commencera en appuyant sur *OK* dans la boîte de dialogue qui apparaît alors.

Choix du Taux Image

On ne peut pas choisir un Taux Image arbitrairement élevé. Ce dernier est limité par le temps de lecture d'une image par l'électronique¹². En particulier, le Taux Image maximal que l'on peut utiliser dépend de la résolution de l'image, mais aussi du type de port USB utilisé¹³.

Malheureusement, même si on choisit un taux image acceptable pour les spécificités de la webcam, il peut arriver qu'une image soit manquée par le logiciel. Alors, par conception, l'image manquante est remplacée par la répétition de l'image précédente... Si on pointe un objet au cours du temps par exemple, il faut tenir compte de ce problème, notamment si l'on calcule la vitesse par différences finies. On peut par exemple, sous SYNCHRONIE, vérifier image par image que le fichier n'a pas d'images répétées¹⁴.

Pour la webcam Philips ToUcam PRO II, avec une résolution de 640×480 , le Taux Image maximal donné par le constructeur est de 25 images par seconde. **En pratique, on se placera à un taux image de 20 images par seconde**, soit une image toutes les 50 ms, ce qui devrait être suffisant pour la plupart des expériences de mécanique (chute libre d'un objet).

Une fois que la vidéo semble convenir, il suffit de la sauvegarder sous un nom approprié dans **File** → **Save Captured File**, pour l'utiliser ensuite avec un autre logiciel.

12. En effet, pendant le temps d'exposition, les électrons s'accumulent sur chaque pixel. Ensuite, les charges de chaque pixel sont lues successivement, comme dans une barrette CCD (*Cf.* Sextant p.87). Cela prend un certain temps (appelé temps de "read out"). Entre deux images, il y a donc **au moins** le temps d'exposition et le temps de lecture. Plus la résolution est importante, plus il faudra lire de pixels, et plus le temps de lecture sera long.

13. Pour un port USB 1.1, le débit théorique est de 12 Mb/s, alors qu'un port USB 2.0 a un débit théorique de 400 Mb/s.

14. On peut vérifier cela soit en regardant directement la dynamique de l'objet (adapté aux vitesses relativement élevées), soit en filmant un chronomètre en même temps.

Utilisation de SYNCHRONIE pour l'analyse d'une séquence vidéo

Extraction de l'information

Il faut avant tout faire un fichier vidéo au format `.avi` (AMCap ou logiciel équivalent). Ensuite, dans SYNCHRONIE, ouvrir le fichier via `[Edition]` → `[Lire image ou séquence vidéo]`.



FIGURE 1 – a) Image suivante/précédente. b) Aller à la fin/au début.

La flèche verte permet de lire le fichier vidéo. On peut aussi aller d'une image à l'autre avec les flèches bleues. Le menu de la fenêtre contenant le fichier vidéo est assez explicite.

Définir l'origine d'un repère orthonormé à l'aide de `[Origine]`.

Ensuite, à l'aide d'un objet de taille connue, calibrer le grandissement à l'aide de `[étalonnage]` (en maintenant le clic droit).

Une fois l'image calibrée, la position de l'objet peut être repérée à chaque instant, image par image : cliquer sur `[Pointeur]`, puis `[Saisir]` pour faire apparaître le pointeur à l'écran, et pointer le mobile sur chaque image en changeant d'image avec les flèches bleues. Le traitement se fait ensuite sous SYNCHRONIE ou sous un autre logiciel après y avoir importé les données.

*Remarque : il n'est pas obligatoire de saisir un pointeur sur l'ensemble de la vidéo. On peut commencer au milieu du fichier et s'arrêter avant la fin. SYNCHRONIE associera à chaque point un instant t . Mais si on saute une image, la variable temporelle que SYNCHRONIE génère n'en tiendra pas compte : à chaque image pointée, la variable temporelle est incrémentée de Δt , intervalle temporel entre deux images, et il faut donc absolument pointer **toutes les images intermédiaires, sans en sauter une**. Si on doit enlever une image, ou un point, il sera toujours possible de le faire dans la suite de l'analyse, dans le tableur.*

On peut aussi étudier un mouvement relatif en définissant une origine nouvelle sur chaque image. Pour cela, utiliser le menu `[Mvt Relatif]`.

Analyse

Une fois les points repérés, cliquer sur `[Terminer]`. Cliquer sur l'onglet *Tableur*. À l'écran, une variable T est affichée, mais elle n'a aucune signification, en particulier ce n'est pas l'abscisse temporelle ! Cliquer sur `[Variables]` → `[Ajouter]`. Ajouter les variables X , Y , et T_{image} , qui est la « bonne » variable temporelle.

On peut ensuite tracer Y en fonction de T_{image} par exemple (chute d'un objet). Aller dans la fenêtre 1 (ou bien créer une nouvelle fenêtre `[Fenêtre]` → `[Nouvelle fenêtre]`), `[Paramètres]` → `[Courbes]` et rajouter la courbe voulue. On fera une mise à l'échelle globale à l'aide du bouton avec les quatre flèches rouge « Calibrage global », ou bien dans `[Outils]` → `[Calibrage global]`.

Élimination de points Aller dans le tableur et sélectionner la ligne correspondant au point à enlever¹⁵, puis clique-droit \rightarrow **Supprimer**.

- Si on a une image doublée par la Webcam, enlever uniquement la ligne des variables d'espace X et Y ;
- Si on a un point aberrant, enlever X, Y et Timage.

Ajustement Il se fait *via* **Traitement** \rightarrow **Modélisation**.

Calculs de dérivées et autres Dans l'expérience de chute libre, on peut illustrer la conservation de l'énergie mécanique : il faut pour cela déduire des mesures de position la vitesse de la masse. Le calcul de la dérivée, par différences finies, est implémenté (ainsi que d'autres fonctions) dans SYNCHRONIE. On y accède de deux façons différentes :

- Aller dans **Traitement** \rightarrow **Dérivation**. Choisir la variable source à dériver, donner le nom de la variable de destination (le résultat, donc la vitesse par exemple), **et penser à indiquer que l'on dérive par rapport à Timage et non T**. Une fois la dérivée calculée, on peut la représenter, l'ajuster... comme expliqué précédemment.
- **OU** Aller dans l'onglet *Calcul* et taper dans la fenêtre la définition de la nouvelle variable sous la forme :

Nouvelle variable = expression

Dans **Assistant**, on trouve toutes les fonctions gérées par SYNCHRONIE (y compris FFT...). Pour calculer la dérivée, sélectionner DERIV(,) dans l'onglet *Tableau*, puis *Ajouter*. DERIV(,) apparaît alors dans *Résultat*. Cliquer alors dans *Variables* sur la variable à dériver puis *Ajouter*, ensuite sur la variable par rapport à laquelle on dérive puis *Ajouter*. Cliquer enfin sur **Envoyer** puis **Quitter** pour revenir dans la feuille de calcul.

Une fois toutes les grandeurs à calculer définies, cliquer sur **Calculer** \rightarrow **Exécuter**.

15. Attention, T est non modifiable mais Timage l'est.