

**Titre :** MP32 : Couplage des oscillateurs

**Présentée par :** Martin Caelen

**Rapport écrit par :** Charlie Kersuzan

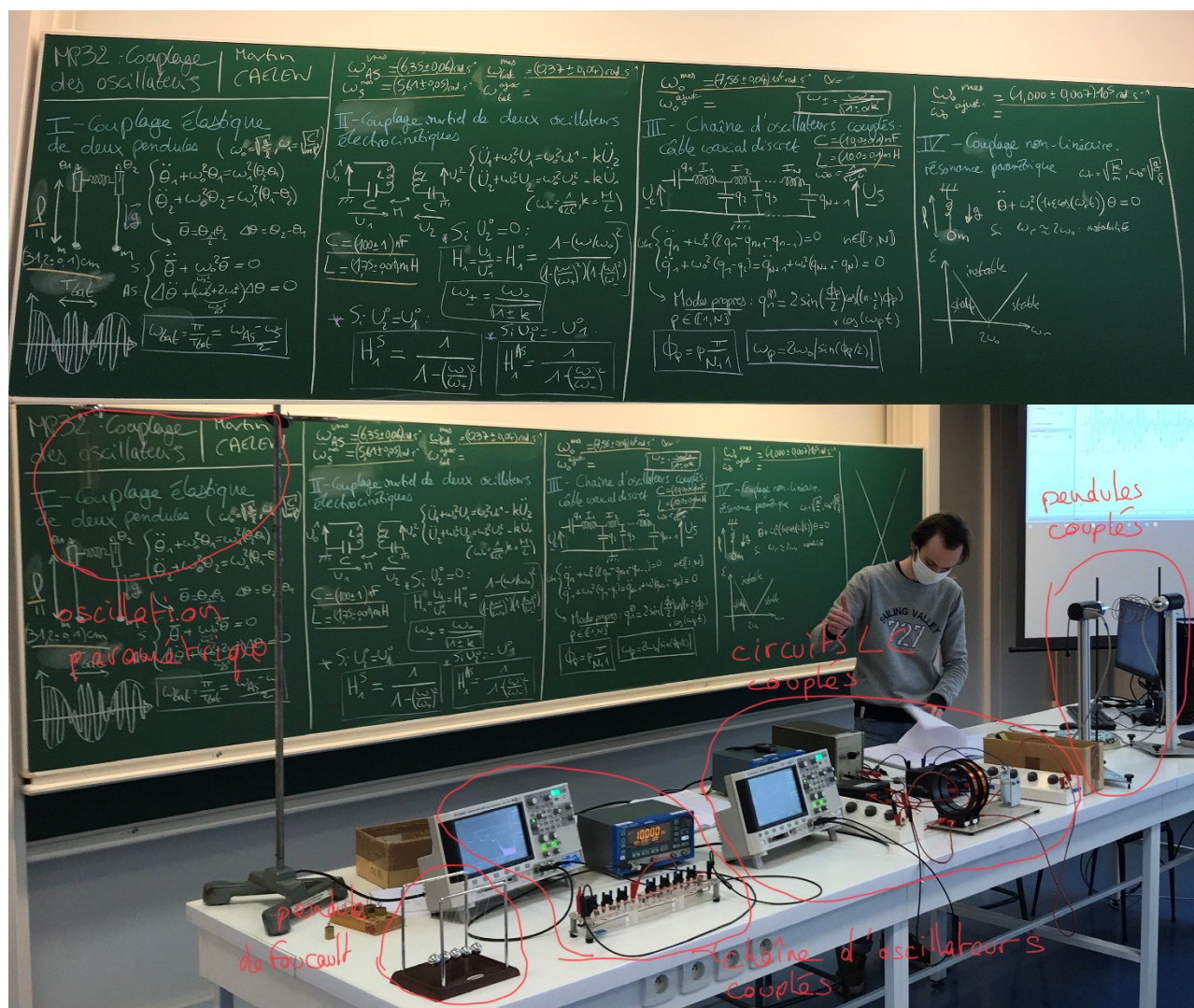
**Correcteur :** Erwan Allys et Julien Froustey

**Date :** 12/02/2021

## Bibliographie

Titre	Auteurs
Sujet de TP oscillateurs couplés	
Vidéo Youtube : youtube.be/dGE_LQXy6c0	

## Photo du tableau



## INTRO

On utilise la manip du pendule de Newton pour illustrer le transfert d'énergie d'un oscillateur à l'autre quand il y a couplage.

# Expérience 1 : Couplage élastique de deux pendules

Référence :

Temps consacré : 11min30 (censé être plus rapide : l'ajustement sur QtiPlot a planté...)

But de la manip : On veut montrer que les oscillations des deux pendules ne sont pas indépendantes. On commence par montrer l'existence de deux modes normaux : le mode symétrique et le mode antisymétrique. Ensuite, étudier le transfert d'énergie d'un pendule à l'autre sous forme de battement. On lance un pendule avec une vitesse initiale en laissant le second au repos et on observe le transfert d'énergie à l'autre pendule jusqu'à arrêt du premier, puis inversement et ainsi de suite : apparitions de battements entre les deux pendules. Le but final de la manip est de mesurer la pulsation de ce battement.

Mesure présentée devant le jury : Mesure de la pulsation de battement. Ici deux possibilités : soit une mesure directe de la période de battement au chronomètre : on mesure le temps entre le début et la fin d'un battement (mesurer plusieurs périodes pour plus de précision), soit on utilise le logiciel *Latis pro* pour enregistrer la trajectoire d'un des deux pendules au cours du temps, puis on fait un ajustement avec une fonction de battement et une exponentielle décroissante sur *QtiPlot* pour prendre en compte la perte d'énergie due aux frottements.

La méthode au chronomètre reste assez précise et est plus intéressante si on a déjà une expérience dans laquelle on fait un ajustement de courbe.

# Expérience 2 : Couplage inertiel de deux oscillateurs électroniques

Référence :

Temps consacré : 15 min (QtiPlot a planté... c'est censé prendre 10 minutes)

But de la manip : Etude de deux circuits LC couplés par leurs inductances (bobines). Couplage par inductance mutuelle. On a mesuré leurs inductances et choisi la capacité de manière à avoir une pulsation propre de l'ordre de  $7 \cdot 10^4$  rad/s. Avec le couplage on observe un éclatement de ces fréquences de résonance.

Ici, contrairement à l'expérience un, les oscillateurs sont forcés. Deux cas possibles : soit on force un seul des deux circuits, soit on force les deux. Si on force un seul des deux circuits, on observe deux fréquences de résonance  $\omega_+$  et  $\omega_-$  (cf tableau). On utilise la wobulation et on observe à l'oscilloscope en mode xy les deux résonances des circuits couplés. La fonction de transfert est donnée au tableau. On peut modifier le couplage entre les deux circuits en écartant plus ou moins les deux bobines.

Si on force les deux circuits, on observe une seule des deux résonances : on observe soit le mode symétrique soit le mode antisymétrique selon le sens d'alimentation des deux circuits (même sens ou sens opposé).

Mesure présentée devant le jury : On montre déjà les deux résonances lorsqu'on force un seul des deux circuits. Puis pour la mesure quantitative, on force les deux circuits pour avoir le mode symétrique, et on observe le décalage du mode symétrique en fonction du couplage proportionnel à la distance.

En préparation, avoir réalisé ces mêmes mesures pour le mode antisymétrique et avoir mesuré le couplage en fonction de la distance. (montage pour cette mesure dans le fascicule de TP).

## Expérience 3 : Chaîne d'oscillateurs couplés : câble coaxial discret

Référence :

Temps consacré : 3 minutes (pas bcp de temps à cause des problèmes aux manips précédentes)

But de la manip : La chaîne d'oscillateur couplés est équivalent à un modèle discret de câble coaxial. Dans ce cas on a autant de fréquences de résonances qu'on a d'oscillateurs couplés. Pour ne pas utiliser encore la wobulation pour mesurer les fréquences de résonances, on se sert de la réponse indicielle : réponse du circuit à un échelon de tension. En faisant une FFT à l'oscilloscope de la réponse du système, on observe les différentes fréquences de résonances.

Mesure présentée devant le jury : On relève les valeurs des fréquences en fonction du nombre  $N$  d'oscillateurs et du numéro  $p$  de la fréquence de résonance ( $p$  variant de 1 à  $N$ ). On a la relation indiquée au tableau reliant la pulsation au paramètre. On a relevé en préparation les autres valeurs et on fait un ajustement de la pulsation en fonction de . Si on est à court de temps, vérifier que la formule fonctionne pour une pulsation particulière sans faire l'ajustement.

## Expérience 4 : Couplage non-linéaire : résonance paramétrique

Référence :

Temps consacré : 3 minutes

But de la manip : C'est une manip qualitative, à ne faire que si tout s'est bien passé avant. Il s'agit d'un ressort simple suspendu à un barreau de métal auquel on peut fixer différentes masses. Il y a donc deux oscillateurs en un : un ressort et un pendule. Le but est d'observer que si on excite un des modes, ici le mode ressort, avec une certaine masse, il va y avoir un transfert d'énergie d'un mode à l'autre par des effets non linéaires et le pendule va se mettre à osciller en plus de vibrer. On montre que ce transfert d'énergie par effets non linéaires n'intervient que pour une masse précise, masse pour laquelle la fréquence de résonance élastique est égale à deux fois la fréquence du pendule.

Données expérimentales pour le réaliser à nouveau :

- ressort de raideur de 3N.m
- longueur à vide de 20 cm
- masse de 50g : pas d'instabilité
- masse de 10g : instabilité

Mesure présentée devant le jury : Pas de mesure, observation qualitative

## Questions posées par l'enseignant (avec réponses)

*(l'étudiant liste les questions posées, ainsi que les réponses données par l'enseignant. Si certaines réponses manquent, l'enseignant pourra compléter le document)*

Sur l'Intro

Q1 : En intro tu as présenté le pendule de Newton, quels sont les oscillateurs dans ce pendule ? Ce sont 5 pendules simples ici.

Q2 : Et les chocs entre pendules sont-ils élastiques ? Oui, ce sont des sphères dures sans amortissement. On peut le vérifier en voyant qu'il n'y a pas de pertes d'énergie cinétique lors du transfert d'une bille à l'autre.

Partie I : pendules couplés

Q3 : Comment le  $w_0$  dans la formule affichée au tableau est-il obtenu ? Quelles hypothèses derrière cette valeur ? Ca dépend de ce qu'on appelle  $L$  la longueur du pendule et si on fait l'hypothèse de linéarité aux petits angles.  $L$  ici est la position du centre de masse du système. Ici comme la masse est très lourde devant la tige, c'est proche de la position de la masse.

Q4 : L'erreur de ne pas prendre en compte la masse de la tige est-elle importante ? La masse de la tige est d'environ 10% celle de la masse donc l'erreur peut être considérable. Mais ici ça ne nous dérange pas puisque la longueur  $L$  n'intervient pas dans nos calculs. Si nécessaire on pourrait mesurer avec précision la position du centre de masse du pendule, ou bien pour se débarrasser du problème de la tige, positionner la tige de manière à ce que son centre de masse se situe au point 0 du pendule pour qu'il ne nous gêne plus !

Q5 : N'existe-t-il pas un outil permettant de prendre en compte le fait que le pendule ait une longueur effective différente de la distance de la masse à l'origine à cause de la masse de la tige ? Ici, il faut parler du modèle du pendule pesant, et du fait qu'on peut mesurer leur moment d'inertie.

Récap : dès qu'on s'éloigne du pendule simple, il faut parler de pendule pesant. On a une pulsation propre carré en  $mgI/J$  avec  $I$  la distance entre l'axe de rotation et le centre de masse, et  $J$  le moment d'inertie autour de l'axe de rotation. Cette formule est différente de celle du pendule simple, faisant apparaître les caractères en  $r^2$  du moment d'inertie et en  $r$  du moment de la gravité. Même en centrant la tige, on annule le moment de la gravité sur celle-ci, mais on a toujours son moment d'inertie. Traiter le pendule en pendule pesant plutôt que simple n'introduit pas de notions compliquées, mais permet de traiter correctement le pendule, d'autant plus si on dit spontanément qu'on n'a pas exactement un pendule simple. C'est un point qui est par ailleurs régulièrement relevé par le jury.

Q6 : Comment sont mesurés les angles sur les pendules ? Ici c'est un potentiomètre qui mesure les angles.

Q7 : Comment avez-vous choisi la longueur des tiges et la masse ? On a pris des masses assez grosses pour avoir un moment d'inertie important et avoir des frottements assez faibles de manière à avoir des oscillations sur des temps longs. La longueur des tiges est un compromis de manière à avoir une période de battement ni trop longue ni trop courte de manière à avoir plusieurs battements sur 30 secondes, et pas mal d'oscillations par battements, mais de pouvoir les observer aisément à l'œil nu.



Q8 : Comment avoir choisi la durée de mesure sur LatisPro ? On veut plusieurs battements mais pas trop non plus pour pouvoir réaliser un bel ajustement.

Q9 : Et on aurait pu avoir 100 battements sur LatisPro et l'ajustement aurait quand même marché ? Oui car l'ajustement utilisé prenait en compte les pertes énergétiques dues aux frottements.

Q10 : Est-ce que l'amortissement peut changer la pulsation ? **Dans le cadre d'une dynamique ne négligeant pas l'amortissement, celui-ci apparaît explicitement dans l'expression de la pulsation propre de chaque pendule. Attention, on ne parle pas ici de changement au cours du temps de la pulsation, mais en fonction des paramètres du système.**

Q11 : La pulsation de battement que tu as marquée au tableau comme pulsation de référence, comment l'as-tu mesurée expérimentalement ? La pulsation de battement est reliée aux pulsations des modes symétriques et antisymétriques par la formule au tableau. J'ai donc mesuré ces deux pulsations en préparation pour remonter à une valeur de pulsation de battement de référence.

Q12 : Sur la mesure de pulsation de battement effectuée au chronomètre devant nous, pouvez-vous revenir sur l'incertitude donnée ? Ici, l'incertitude donnée était beaucoup trop faible, elle était de 0.1s pour la mesure de 4 battements alors qu'il est difficile de déterminer avec précision le début et la fin d'une période de battement. Une incertitude de 0.5s voire 1s serait plus pertinente.

## PARTIE 2 : Les circuits LC couplés

Q13 : Comment passe-t-on du mode symétrique au mode antisymétrique ? On inverse l'ordre de branchement aux bornes du transformateur pour un des deux circuits.

Q14 : Comment avoir choisi L et C dans le circuit ? L imposé par le choix des bobines, on choisit ensuite C pour avoir les mêmes fréquences dans les deux circuits, autour de 10kHz. Ici comme on a les mêmes valeurs de L à 0.01mH près, on prend les mêmes valeurs de C.

Q15 : Y a-t-il des résistances dans le circuit ? Oui au niveau des bobines, elles ont été mesurées en préparation à 10kHz et valent de l'ordre de 3kOhm.

Q16 : Ça a quel effet sur le circuit ? Ça affecte le facteur de qualité. Ces valeurs élevées de résistance vont avoir pour effet d'écraser l'intensité des résonances propres.

Q17 : Comment as-tu mesuré M la constance de couplage entre les deux circuits ? Voir manuel de TP dans lequel il y a le montage pour la mesure de M.

Q18 : Tu as obtenu une valeur de mutuelle à partir d'une distance, comment ? J'ai mesuré M en fonction de la distance en utilisant le montage vu Q17, pour plusieurs valeurs de distances, puis j'ai fait une interpolation sur Python pour avoir M en fonction de la distance. J'ai aussi fait un petit modèle théorique python me permettant d'ajuster les points, mais ça ne collait pas super bien.

Q19 : Dans l'ajustement de la pulsation de battement en fonction du couplage, tu as mis un facteur alpha, pourquoi ? Ce paramètre est là pour prendre en compte l'imperfection du modèle. ATTENTION : NE PAS FAIRE CA, il vaut mieux avoir un point qui ne vérifie pas une loi plutôt que d'ajouter un paramètre qui vient compenser l'erreur mais qui n'est pas justifié théoriquement.

## PARTIE 3 : chaîne d'oscillateurs

Q20 : Tu as choisi d'exciter par un créneau, qu'est-ce que ça implique sur la réponse ? Au lieu d'avoir une réponse indicielle, c'est-à-dire une réponse à un pic de Dirac, qui serait la fonction de transfert, on a la réponse à un créneau. Comme le créneau est l'intégrale d'un pic de Dirac, la réponse est l'équivalent de la fonction de transfert avec un facteur  $1/j\omega$ .

Q21 : Quelle mesure aurais-tu pu effectuer pour vérifier que ta loi était bonne ? Ici je n'ai pas eu le temps de faire un ajustement comme prévu, mais j'aurais pu prendre un point à une fréquence et vérifier que la relation était bonne pour ce point (voir relation au tableau).

## Manipulation supplémentaire durant l'entretien

But de la manip : Faire un œil myope, et après coup le corriger.

Matériel : lentilles convergentes, divergentes, lampe QI, diaphragme, objet (un F), écran.

On commence par modéliser un œil simple, c'est-à-dire un écran qui sert de rétine avec une lentille qui sert de cristallin. On crée une source qui vient de l'infini. Pour cela on se sert d'une lampe qui éclaire un objet et on cherche à faire l'image de l'objet sur l'écran : écran dans le plan focal image. Ici bien penser qu'il faut une distance d'au moins  $4f$  entre l'écran et l'objet.

Ensuite, un œil myope focalise trop près, il est trop convergent. Pour le modéliser on peut reculer l'écran de la lentille (l'éloigner). Pour le corriger, on ajoute une lentille divergente avant la lentille convergente pour simuler les lunettes.

Cf. Sextant p25 (section I.6).

## Commentaires lors de la correction

*(l'étudiant note les commentaires relatifs au contenu du montage : sujets abordés, enchaînement, réponses aux questions, etc. Les enseignants relisent, et rectifient si besoin)*

Dans l'ensemble, malgré les problèmes techniques, Martin a su faire preuve d'une bonne capacité d'adaptation face aux difficultés. L'ajustement de la fonction de battement ayant échoué il a su tout de suite partir sur une mesure au chrono qui a marché et il a pu obtenir une valeur expérimentale, ce qui est essentiel. La quantité de choses à réaliser était un peu trop ambitieuse, 3 manipulations par montage est déjà beaucoup. On peut tout à fait s'en sortir avec seulement deux des grosses manip présentées ici. Sur le montage surprise, bonne démarche. Essayer de mettre en place en même temps qu'on parle.

Les remarques plus détaillées dans l'ordre :

1 : Étant donné les difficultés expérimentales rencontrées, il vaut mieux sacrifier la dernière manipulation qualitative pour pouvoir revenir sur une manipulation quantitative, comme la 3 et prendre une mesure afin de vérifier une loi plutôt que de passer 3 minutes sur du qualitatif.

2 : Attention à ne pas simplifier le pendule pesant par un pendule simple. On connaît le modèle de pendule pesant alors autant l'utiliser, même si ça ne change pas nos résultats si on se ramène seulement à une pulsation propre. Il faut connaître la différence entre les deux modèles et pouvoir l'expliquer. Si on se sert d'un modèle de pendule simple, quand le jury en parle, il faut reconnaître que c'est pas idéal, et que même si ça n'influe pas sur la mesure il faut s'en excuser.

3 : Les angles sont mesurés par un potentiomètre, ne pas dire de bêtises à ce sujet. Ne pas tenter si on ne sait pas.

4 : Attention à ne pas sous-estimer l'incertitude de mesure de la période de battements faite à la main. Une erreur de l'ordre de la seconde est correcte.

5 : Ne pas lutter contre le jury s'il insiste sur un point. S'il insiste sur une incertitude qu'il juge douteuse, ne pas lutter trop longtemps.

6 : L'ajustement du battement est assez délicat, il vaut mieux commencer l'ajustement sur une petite partie des points, trouver des paramètres corrects puis effectuer l'ajustement sur l'ensemble des points en fixant les paramètres dont on est certain. Il est aussi tout à fait intéressant de faire la mesure au chrono, ça montre d'autres compétences expérimentales qui sont intéressantes.

De manière générale, il faut essayer de varier les compétences montrées au cours d'un montage : un ajustement, une mesure « manuelle », ...

7 : Faire un ajustement du couplage  $M$  par une fonction théorique n'est pas une bonne idée, parce qu'elle amène des questions délicates sur le modèle utilisé pour arriver à cette fonction théorique et nous amène à justifier les simplifications effectuées. Elle nous pousse dans des difficultés qui ne sont pas utiles et ne peuvent que faire perdre des points.

8 : Dans le même genre, l'introduction ad-hoc du paramètre  $\alpha$  pour « corriger » une loi n'est pas justifié et ne peut que pénaliser. Il vaut mieux une mesure avec un gros écart au modèle plutôt qu'une correction ad-hoc qui donne un bon résultat mais qui sort de nulle part.

9 : Lors du passage antisymétrique/symétrique des circuits LC, prendre le temps de bien expliquer comment on passe de l'un à l'autre.

10 : Quand on arrive à court de temps, prendre un seul point au lieu de 3 ou 4 et vérifier une loi avec un seul point plutôt que d'un ajustement est bien plus valorisant que de ne pas avoir le temps de faire l'ajustement et de se retrouver sans aucune valeur expérimentale en main à la fin... Il faut des résultats quantitatifs à comparer à des valeurs connues.