

Université du Maine
Faculté des Sciences **Rapport de projet**

Semestre 3 L2 SPI
Encadrant : Mr. Guillaume Penelet, Enseignant-chercheur

SPAM : Synchronisation de Pendules Appliquée aux Métronomes

Tony Merrien & Rémi Plantade



Le Mans, Année Universitaire 2014-2015

Table des matières

Introduction	1
1 Généralités	3
1.1 Objectifs	3
1.2 Définitions	3
1.3 Matériel	4
1.4 Banc de mesure	4
2 Expériences	5
2.1 Fonctionnement d'un métronome	5
2.2 Caractérisation de l'équipement	5
2.3 Synchronisation Expérimentale	6
2.3.1 Synchronisation pour différents battements	6
2.3.2 Impact de la phase	6
2.3.3 Synchronisation par harmonique	6
2.4 Limite de synchronisation	7
2.5 Pot Vibrant	8
2.5.1 Dispositif	8
2.5.2 Limite basse de synchronisation	9
2.5.3 Action du pot vibrant	9
3 Analyse Numérique	11
3.1 Comparaison théorie	11
3.1.1 Analyse de la caractérisation	11
3.1.2 Analyse de la synchronisation	12
3.2 Pot vibrant	13
3.3 "Trap phase"	15
Conclusion	17
A Analyse numérique : Calcul du battement d'un métronome	19
B Analyse numérique : Traitement des données	21

Table des figures

1.1	Banc de mesure	4
2.1	Evolution de la limite de synchronisation en fonction du temps	7
2.2	Banc de mesure avec un pot vibrant	8
2.3	Evolution de l'apparence du phénomène de synchronisation selon les fréquences d'excitation du système	9
2.4	Zones théorique de synchronisation en fonction de fréquences harmoniques (Arnold Tongues)	10
3.1	Evolution temporelle de deux métronomes désolidarisés aux fréquences différentes	11
3.2	Evolution fréquentielle de deux métronomes désolidarisés au cours du temps	12
3.3	Evolution temporelle de deux métronomes solidaire d'un sup- port au cours du temps	13
3.4	Evolution fréquentielle des deux métronomes solidaire d'un support au cours du temps	13
3.5	Évolution de la fréquence de deux métronomes au cours du temps avec un pot vibrant	14
3.6	Évolution de la différence de période de deux métronomes au cours du temps avec présence d'un pot vibrant	14

Introduction

La synchronisation est un phénomène universellement observable et étudié depuis des siècles. Une foule qui applaudit, le chant des criquets, les piles cardiaques et les métronomes étudiés dans l'ensemble de ce projet sont les conséquences, enjeux et applications directement observables de ce phénomène physique.

Elle est utilisée dans un sens large pour caractériser une coordination d'opérations au cours du temps. Le phénomène est découvert en 1665 par Christiaan Huygens alors qu'il cherchait à aider les hommes partant en mer pour de longues périodes en leur permettant de déterminer la longitude, chose difficile lorsque la mesure du temps est peu précise. Il constata que deux pendules solidaires d'un support finissaient toujours par se synchroniser avec une certaine phase.

Dans le prolongement d'une étude précédemment effectuée par deux étudiants en L3 SPI, ce projet dans son aspect de recherche mettra en corrélation, dans un premier temps, les observations déjà effectuées et, par la suite, approfondira les aspects expérimentaux. Le phénomène est étudié en détails à l'aide de différentes manipulations mettant en œuvre toujours deux métronomes mécaniques. Ces expériences sont effectuées sur un banc de mesure explicité plus loin. Les résultats obtenus sont interprétés et traités numériquement pour mettre en relation théorie et expériences.

Chapitre 1

Généralités

1.1 Objectifs

Dans cette partie, le projet, les hypothèses, le matériel, les phénomènes, les définitions et le procédé expérimental sont développés. L'objectif est d'étudier, dans son ensemble, la synchronisation de pendules appliquée à deux métronomes solidaires d'un support placé sur deux canettes. L'approche expérimentale choisie pour aborder ce sujet sera concentrée sur le banc de mesure, sa mise en place et son évolution. Ce qui est appelé *théorie* dans l'ensemble de ce rapport, n'est pas mathématique, mais est celle énoncée de manière écrite dans les différents ouvrages bibliographiques contribuant à l'élaboration de ce rapport.

1.2 Définitions

Voici les aspects clés du sujet :

Synchronisation (universelle) : "Coordination de plusieurs opérations entre elles en fonction du temps" [4]

Synchronisation (scientifique) : "Procédé pour rendre synchrones deux systèmes oscillant mécaniquement de manière indépendante" [5]

Pendule : "Corps ou système matériel capable d'osciller en un point fixe" [6]

Métronome : "Appareil pendulaire mû par un ressort dont on peut régler la pulsation." [7]

Un métronome est en fait un oscillateur auto-entretenu, c'est à dire qu'il peut fournir une pulsation régulière grâce à une source d'énergie (dans son cas, un ressort tendu).

1.3 Matériel

La liste du matériel utilisé lors des expériences est la suivante :

- Carte d'acquisition National Instruments ;
- Deux microphones Roga Instruments MI-17 ;
- Deux canettes ;
- Un pot vibrant ;
- Pré-amplificateur BSWA MC102 ;
- Deux métronomes mécaniques ;
- Un support rectangulaire plat ;
- Logiciel CTM ;
- Logiciel Matlab.

1.4 Banc de mesure

Le matériel est utilisé de la manière suivante : la plaque (ici en bois) est placée sur deux canettes parallèles entre elles. Sur cette plaque sont placés les deux métronomes mécaniques. Deux microphones, reliés à la carte d'acquisition par le biais d'un pré-amplificateur, sont placés proches de chaque métronome afin de relever les clics sonores de ceux-ci. Un bloc de mousse est placé entre les métronomes et sans contact avec la plaque.



FIGURE 1.1 – Banc de mesure

Ce dispositif permet d'isoler de manière sonore chaque clic des métronomes et ainsi faciliter un traitement numérique ultérieur, sans interférer sur le système d'une quelconque manière. On laisse alors le système évoluer librement. Les acquisitions sont effectuées avec le logiciel CTM et traitées ultérieurement sous Matlab.

Chapitre 2

Expériences

2.1 Fonctionnement d'un métronome

Par suite de ce rapport, un soin particulier doit être apporté concernant la différence entre battement d'un métronome (BPM) et fréquence d'oscillation (Hz). Dans une approche de meilleure compréhension d'un auto-oscillateur mécanique, un métronome est démantelé. Il est bénéfique de mieux comprendre leurs principes de fonctionnement. Ainsi, remonter un métronome est en fait l'action qui tend le ressort interne servant de mécanisme d'action sur le balancement de la masse. Il est donc nécessaire de remonter régulièrement, pour des précisions optimales, les métronomes. Avant toute manipulation, afin de simplifier les explications, on utilisera le terme "*Mr. White*" pour désigner le métronome blanc et "*Mr. Brown*" pour désigner le métronome marron.

2.2 Caractérisation de l'équipement

La réalisation des expériences étant maintenant permise, il est nécessaire de caractériser l'ensemble de l'équipement. Suite à divers observations, les valeurs de battements inscrites sur les appareils semblent peu fiables. Celles indiquées ne sont pas les véritables battements des métronomes. De ce fait, ceux-ci sont caractérisés de manière précise pour chaque mesure de synchronisation. Le programme présenté en Annexe A, est créé pour calculer le véritable battement des métronomes en fonction du temps. Ainsi, pour chacune des mesures suivantes, ce n'est pas la valeur présentée sur le métronome qui sera prise en compte, mais celle obtenue par l'analyse numérique effectuée de manière systématique.

2.3 Synchronisation Expérimentale

2.3.1 Synchronisation pour différents battements

Après avoir étudié et caractérisé le matériel mis à disposition, l'étude du phénomène est entamée avec différentes expériences. La synchronisation des métronomes ayant déjà été traitée, les premières expériences ont pour but de vérifier les informations déjà acquises et considérées comme universelles. Pour cela les deux métronomes sont réglés, par le biais de la position de la masselotte sur la tige, de manière à obtenir un battement (BPM) faible, ce qui signifie que la fréquence d'oscillation est basse lors de cette première manipulation. Le phénomène ne se produisant pas, les métronomes sont réglés sur une autre fréquence plus élevée et la manipulation est renouvelée. Les résultats acquis sont en accord avec ceux ayant été relevés antérieurement [1]. En effet, la synchronisation entre deux métronomes ne s'effectue qu'à partir d'un seuil, subjectivement observé, qui se situe à 176 BPM. La limite haute de réglage de la masselotte sur le métronome empêche la détermination d'un éventuel seuil d'oscillation élevé où le phénomène ne se produit, hypothétiquement, plus.

2.3.2 Impact de la phase

Au cours des expériences, lorsque les deux métronomes se synchronisent, ceux-ci finissent toujours en opposition de phase. En effet, lorsque les métronomes se synchronisent en phase, la plaque impose un déplacement important qui induit des frottements. Naturellement, le système privilégie alors toujours une synchronisation en opposition de phase, là où le système possède très peu de mouvement et donc de frottements, celui-ci est dans un état d'équilibre. Le transfert d'énergie le plus faible possible entre les deux métronomes et le système (plaque en bois et les deux canettes) est naturellement privilégié.

2.3.3 Synchronisation par harmonique

Une étude est ensuite menée afin de savoir si il y a une synchronisation possible pour des fréquences harmoniques. Par harmonique, c'est à dire que la fréquence d'oscillation d'un métronome est un multiple de l'autre, la synchronisation s'est avérée peu concluante. En effet, un métronome mécanique ne dépasse pas 240 BPM, ainsi, même à ce battement l'harmonique la plus proche est à 120 BPM. Or la synchronisation étant observable uniquement à partir de 176 BPM, l'énergie mécanique et l'inertie apportées au système ne suffisent pas à obtenir le phénomène désiré, l'expérience est donc compromise. Aucune synchronisation par harmonique n'a donc pu être observée dans le cas où les oscillations sont libres.

2.4 Limite de synchronisation

La synchronisation opère dans une bande fréquence bien définie. L'étude dans cette partie porte sur la limite de synchronisation pour une différence de battement la plus importante possible entre les deux métronomes. Sachant que le phénomène commence à se produire autour de 176 BPM, *Mr. Brown* est réglé sur ce battement tandis que *Mr. White* sur un battement, qui de manière progressive, tend vers une valeur maximale, de manière inférieure ou supérieure, où le phénomène est toujours observable. Cette procédure est répétée pour trouver, suivant le battement fixe, les différentes limites de synchronisation et parvenir à généraliser ce comportement. Suite à ce procédé, un programme est créé permettant d'entrer les valeurs obtenues et d'obtenir la figure 2.1.

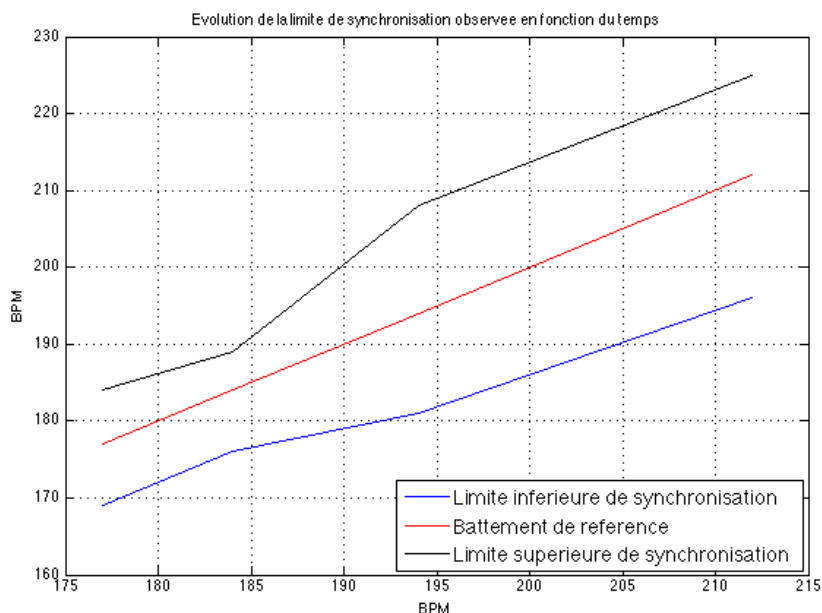


FIGURE 2.1 – Evolution de la limite de synchronisation en fonction du temps

La zone comprise entre les deux limites de la figure 2.1 est la zone où se synchronisent les deux métronomes. Il est possible d'observer qu'une synchronisation avec des battements plus élevés s'opère de manière plus large. Ainsi, avec des battements plus faible la synchronisation est plus restreinte. En effet, un métronome oscillant lentement ($\simeq 176$ BPM) apporte moins d'énergie mécanique au système, celui-ci ne peut donc pas osciller aussi aisément que s'il battait rapidement ($\simeq 220$ BPM). Il faut noter que le battement résultant d'une synchronisation, pour des fréquences d'oscillations différentes, est théoriquement une moyenne du battement de *Mr. Brown* et de *Mr. White* [2].

2.5 Pot Vibrant

2.5.1 Dispositif

Dans cette partie l'étude porte sur la synchronisation des deux métronomes avec un pot vibrant couplé à une plaque en bois. Le pot vibrant est un objet permettant d'exciter le système par le biais, ici, d'un pas de vis relié à la plaque en bois. La fréquence d'excitation est réglée à l'aide d'un GBF et son amplitude est contrôlée avec l'amplificateur associé à celui-ci. Le dispositif expérimental est présenté figure 2.2.



FIGURE 2.2 – Banc de mesure avec un pot vibrant

La fréquence paramétrée sur le GBF doit être en accord avec le battement des métronomes pour faire osciller le système de manière à obtenir une synchronisation. Ainsi pour un battement précis, une fréquence d'excitation est associée au GBF à l'aide de la formule 2.1.

$$f_{GBF} = \frac{\alpha \times \omega}{2 \times 60} \quad (2.1)$$

Avec :

- α qui correspond à la valeur de battement des métronomes (BPM) déterminée par la position de la masselotte ;
- ω est la valeur de l'harmonique étudiée (ex : 1 si on cherche à exciter le système à l'aide de la fondamentale, 1.25 pour la tierce, 2 pour l'octave, etc) ;
- 2×60 car il y a deux clics pour une période temporelle et soixante sont les secondes en une minute.

2.5.2 Limite basse de synchronisation

En premier lieu l'expérience consiste à observer si, avec le pot vibrant la limite de synchronisation entre les deux métronomes, change. Une nouvelle limite basse de synchronisation est observée, elle est de 100 BPM, ce qui correspond à une fréquence de 0.83 Hz sur le GBF. Cette limite est plus basse que lorsque le système oscille librement, sans pot vibrant (176 BPM). Avec un pot vibrant, il semble que beaucoup d'énergie soit apportée au système.

2.5.3 Action du pot vibrant

L'étude porte maintenant sur l'influence de l'amplitude fournie au pot vibrant. La synchronisation ne se produit uniquement qu'aux rapports harmoniques (multiples de la fondamentale), or il est possible de changer la fréquence jusqu'à un certain seuil autour de ces fréquences pour que le phénomène se produise toujours. Le but est donc de déterminer visuellement, puis de représenter, ces zones. Dans un premier temps, la manipulation consiste à fixer aux métronomes un certain battement et avec le générateur, envoyer la fréquence correspondante au pot vibrant. L'amplitude est fixée au maximum de ce que peut délivrer l'amplificateur, celle-ci est donc purement qualitative dans l'expérience. Ensuite la fréquence est augmentée progressivement afin de déterminer les limites de synchronisation pour chaque harmoniques. Sur la figure 2.3 sont présentés les résultats observés lors de cette expérience.

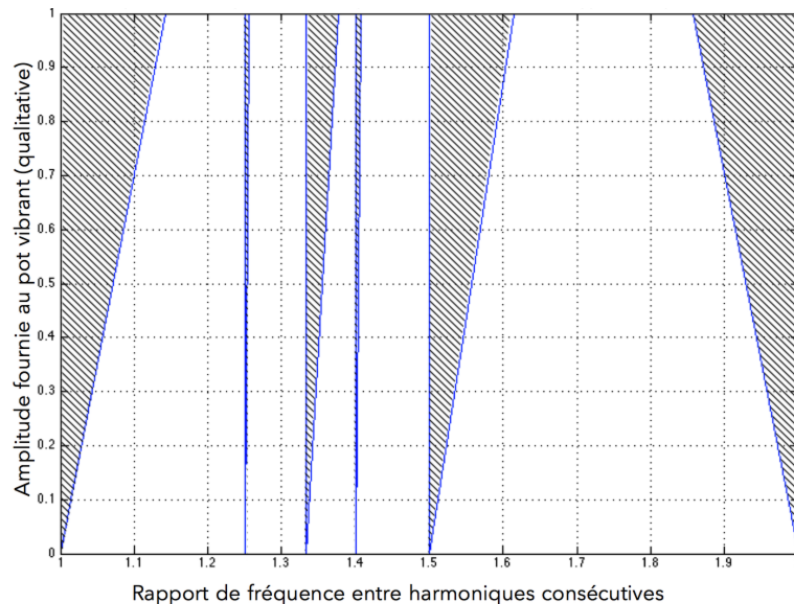


FIGURE 2.3 – Evolution de l'apparence du phénomène de synchronisation selon les fréquences d'excitation du système

Les parties hachurées représentent une zone de synchronisation, la plus importante se situe à la fondamentale. Certaines zones très précises (quarte et tierce par exemple), sont difficilement observables en pratique. Ce graphique se répète d'octave en octave [3]. Plus l'amplitude est importante, plus la synchronisation s'opère de manière large. Comme vu dans la partie 2.4, la synchronisation nécessite de l'énergie pour se produire, plus il y a d'énergie fournie au système, plus la synchronisation est aisée à obtenir. De plus, par rapport à la théorie [4], certaines zones de synchronisation n'ont pas pu être observées. La figure 2.4 représente l'évolution théorique des différentes zones de synchronisation selon les harmoniques où l'on peut observer les zones manquantes.

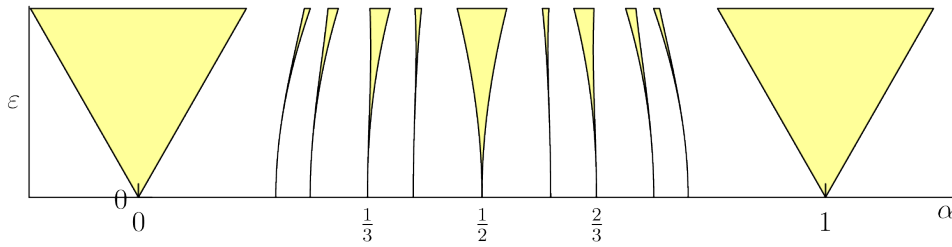


FIGURE 2.4 – Zones théorique de synchronisation en fonction de fréquences harmoniques (Arnold Tongues)

Chapitre 3

Analyse Numérique

3.1 Comparaison théorie

Le traitement des données enregistrées est effectué dans cette partie par le biais d'un programme de traitement présenté en [Annexe B](#), basé sur l'un de ceux présent dans le rapport des L3 [1]. Les courbes obtenues sont analysées et comparées avec le modèle théorique.

3.1.1 Analyse de la caractérisation

Dans un premier temps, lors de la caractérisation de chaque métronome dans un cas général, les courbes suivantes sont obtenues. En premier lieu, l'évolution temporelle des clics des métronomes est obtenue sur la figure 3.1.

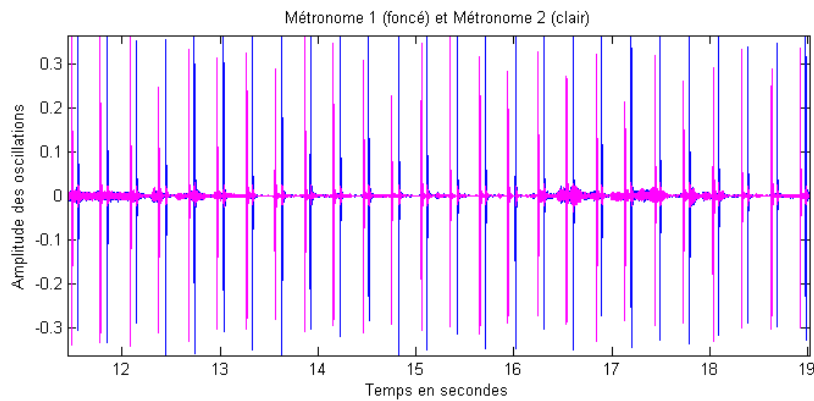


FIGURE 3.1 – Evolution temporelle de deux métronomes désolidarisés aux fréquences différentes

Deux clics sont distinctement observables, à périodes fixes dans le temps, synonyme d'une absence de variation de vitesse des battements. Ensuite il est possible de voir leurs évolutions fréquentielles sur la figure 3.2.

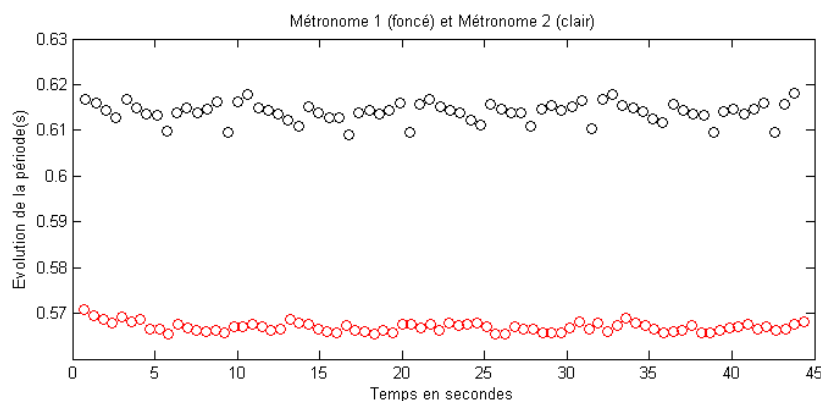


FIGURE 3.2 – Evolution fréquentielle de deux métronomes désolidarisés au cours du temps

Les deux métronomes sont bien à des périodes, donc fréquences, différentes. Il est possible d'observer qu'un métronome mécanique bat difficilement de manière très précisément constante au cours du temps. Cette expérience sert de support et de référence pour la suite, il y a par conséquent dans le cas présent, une absence totale de synchronisation.

3.1.2 Analyse de la synchronisation

Dans cette partie, les analyses précédentes sont répétées dans le cas où les métronomes sont associés au banc de mesure 1.1. Les expériences et analyses précédentes sont elles aussi renouvelées. Ainsi l'évolution temporelle des clics suivent le graphique présenté sur la figure 3.3. Ici, une synchronisation apparaît dans les dix premières secondes de la mesure effectuée. En effet, les battements de chaque métronome étant différents au début de la mesure, on observe très largement une variation de ceux-ci jusqu'à atteindre un battement constant, différent de chaque battement de départ. Lorsque le système se stabilise, les métronomes sont synchrones, ils ont adapté leurs pulsations. Ensuite, l'évolution fréquentielle est obtenue sur la figure 3.4. Lorsqu'on fait osciller les métronomes en début de mesure, les variations de périodes peuvent être importantes, c'est le cas dans les dix premières secondes. Ici, il est très aisé d'observer le phénomène de synchronisation. Les deux métronomes ont une période, donc fréquence d'oscillation, différente au début, et au cours du temps finissent par changer celle-ci pour former un battement correspondant théoriquement à la moyenne des deux [2].

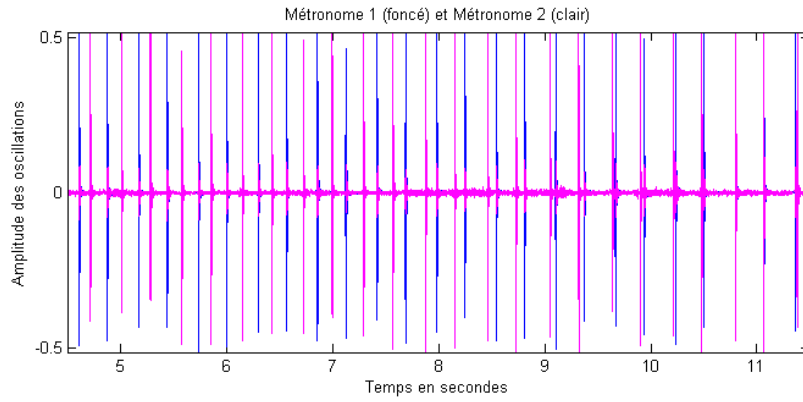


FIGURE 3.3 – Evolution temporelle de deux métronomes solidaire d'un support au cours du temps

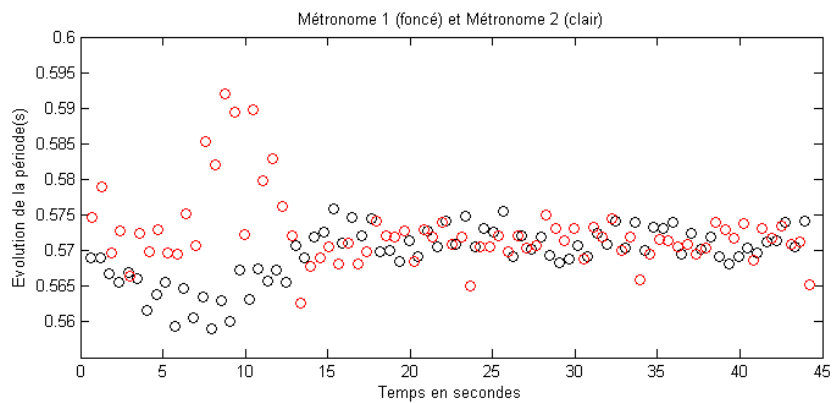


FIGURE 3.4 – Evolution fréquentielle des deux métronomes solidaire d'un support au cours du temps

Les métronomes battent alors de manière synchrone, avec comme énoncé précédemment dans la partie 2.3.2, une tendance générale à être en opposition phase.

3.2 Pot vibrant

Les expériences menées avec le pot vibrant apportent des résultats très concluants. Contrairement aux oscillations libres, lorsqu'on force le système à osciller, la synchronisation opère toujours en phase. En effet, les masselottes

vont naturellement osciller dans le sens qui demande le moins d'effort, donc de frottements, au système. L'évolution temporelle des clics étant très similaire à celle du système sans pot vibrant, la figure 3.5 présente directement l'évolution fréquentielle du système.

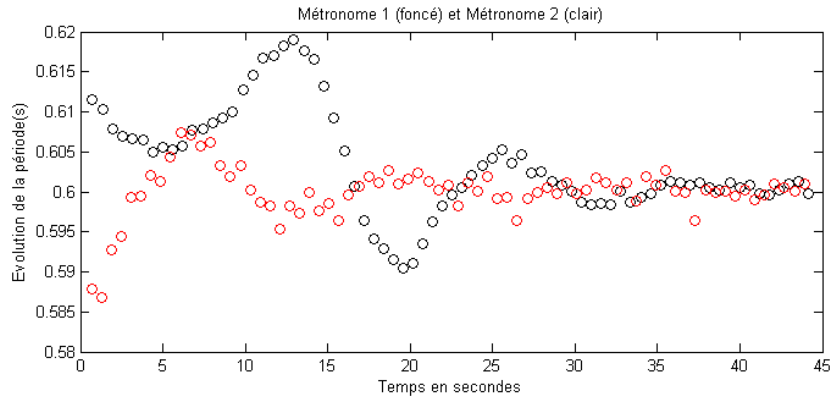


FIGURE 3.5 – Évolution de la fréquence de deux métronomes au cours du temps avec un pot vibrant

Ici, les variations sont importantes, l'état d'équilibre est plus long à obtenir ($\simeq 30$ secondes) mais plus stable sur le long terme, celui-ci oscille à une fréquence très précise. Les métronomes ont très peu d'écart entre leurs périodes respectives et celle-ci est aussi dans ce cas la moyenne des deux. Sur la figure 3.6 est présentée l'évolution temporelle de la différence de période. Pour ce graphique, une synchronisation équivaut à une valeur nulle.

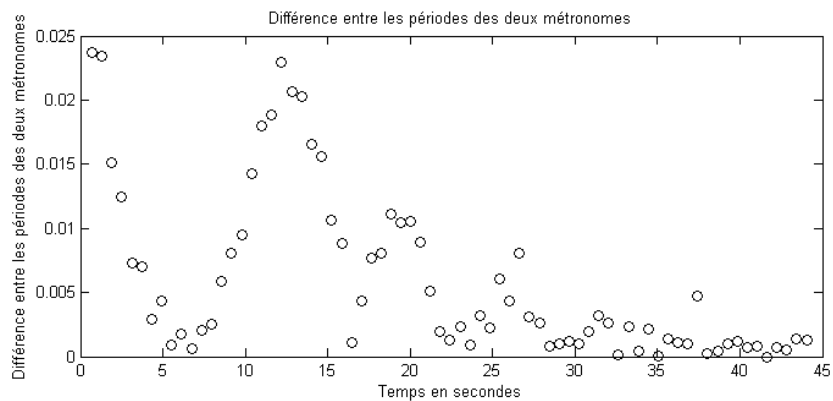


FIGURE 3.6 – Évolution de la différence de période de deux métronomes au cours du temps avec présence d'un pot vibrant

L'allure générale est celle d'un cosinus amorti qui tend vers zéro. Cela correspond à une synchronisation du système. Il est possible d'observer que quelques valeurs sortent de l'allure générale de la courbe à intervalle de temps presque régulier. Ce phénomène est explicité dans la section suivante.

3.3 "Trap phase"

La figure 3.6, permet d'observer un phénomène physique connu sous le nom de "*Trap Phase*" ou encore "*Attrapage de Phase*". Pour des temps de 27 et 38 secondes de ce graphique, une valeur de différence de période sort totalement de l'allure générale de la courbe, celle-ci n'est absolument pas représentative de l'évolution du phénomène recherché. Cela est dû à une imperfection soudaine dans les oscillations du système qui se traduit par ces données, mais qui n'influent pas sur les oscillations directement suivantes et qui se répètent après un certain temps.

Conclusion

La synchronisation est un phénomène assez simple à observer et analyser mais qui peut s'avérer complexe dans son interprétation et le champs de possibilité d'exploration qu'il offre. Il est très enrichissant de s'impliquer dans une démarche d'analyse et de compréhension scientifique.

C'est donc dans la suite de l'étude précédente des L3 SPI, et à l'aide des ressources bibliographiques du sujet à disposition qu'il a été possible d'expérimenter, améliorer, comprendre, interpréter, compléter et modifier au maximum les paramètres du banc de mesure. Une synchronisation, est donc l'action d'un objet mécanique qui va venir modifier de lui même sa pulsation propre pour s'accorder au sein d'un système dans lequel il se trouve, si celui-ci répond à certaines conditions propices énoncées précédemment. La synchronisation a cependant ses limites, l'aspect mécanique empêche de les pousser, ses caractéristiques, elle opère dans un grâce à un dispositif bien précis, et peut également être modifiée à l'aide d'une source d'énergie extérieure, où les oscillations du système deviennent forcées.

L'étape suivante est de poser les équations régissant le mouvement, afin de chercher à prédire comment peut évoluer spatialement le support ainsi que la phase et le temps au bout duquel vont se synchroniser les métronomes. Il peut être également pertinent de coupler toujours plus de métronomes afin d'observer jusqu'où le phénomène peu se généraliser.

Références

Bibliographie

- [1] M. RAMSEIER, M. ROBIN, *Projet L3 SPI : Phénomène de Synchronisation de Pendules Appliqué aux Métronomes*, 2012
- [2] A. PIKOVSKY, *Synchronisation, A universal concept in nonlinear sciences*, Cambridge Nonlinear Science Series 12, 2001
- [3] J. PANTALEONE, *Synchronization of metronomes*, *Am. J. Phys.*, Vol. 70, No 10, October 2002

Webographie

- [4] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Synchronisation>
- [5] <http://www.cntrl.fr/lexicographie/synchronisation>
- [6] <http://ikonet.com/fr/ledictionnairevisuel/arts-et-architecture/musique/accessoire/metronome-mecanique.php>
- [7] <http://www.cntrl.fr/lexicographie/pendule>

Annexe A

Analyse numérique : Calcul du battement d'un métronome

```
%Programme pour déterminer le nombre de transitoire(s) (donc la
%fréquence d'oscillation) d'un métronome :
clear all
close all
%On charge le fichier à analyser
D = load('Temporal Data.txt');
%On définit une constante de temps que doit choisir l'utilisateur
%en fonction de la durée du fichier a analyser (en seconde)
temps = 45;
%On définit la taille du tableau contenu dans le fichier
taille = length(D(:,1));
%On déclare deux variables qui contiendront le nombre de transitoire de
%chaque métronome
n1=0;
n2=0;
%On crée une valeur temporaire pour incrémenter
i = 1;
while(i<taille)
    abs(D(i,1));
    if(abs(D(i,2)) > 0.25)
        n1 = n1+1;
        i = i+500;
    end
    i = i+1;
end
%On affiche maintenant n1
n1 = (n1*60/temps)
i = 1;
```

```

while(i<taille)
    abs(D(i,1));
    if(abs(D(i,3)) > 0.25)
        n2 = n2+1;
        i = i+500;
    end
    i = i+1;
end
%On affiche maintenant n2
n2 = (n2*60/temps)

```


Annexe B

Analyse numérique : Traitement des données

```
%Programme traçant l'évolution de la période de chacun des
%métرونomes au cours du temps:
clear all;
close all;
%On charge dans un premier temps le fichier texte contenant
%les mesures prises expérimentalement dans la matrice 'D' :
D = load('Temporal Data.txt');
%On place la première colonne de la matrice 'D'
%(correspondant aux données temporelles) dans le vecteur 't' :
t=D(:,1);
%La variable 'Te' est créée. Elle a pour valeur
%celle de la deuxième case du vecteur 't'.
%Elle correspond à la période d'échantillonnage :
Te = t(2);
%La deuxième colonne de la matrice 'D' est placée dans le vecteur 'm1'.
%Celle-ci correspond aux données enregistrées pour le premier métronome :
m1 = abs(D(:,2));
%La troisième colonne de la matrice 'D' est placée dans le vecteur 'm2'.
%Celle-ci correspond aux données enregistrées pour le deuxième métronome :
m2 = abs(D(:,3));
%On cherche l'amplitude maximale dans chaque vecteur 'm1' et 'm2' et
%on les appelle respectivement 'M1' et 'M2' :
M1 = max(m1);
M2 = max(m2);
%'C' est le rapport de 'M1' et de 'M2' :
C = M1/M2;
%On divise chaque maximum par une valeur choisie arbitrairement afin de
%définir un seuil. Ce seuil servira à identifier les 'tac' du métronome :
```

```

M1 = M1/3;
M2 = M2/2;
%'L' correspond au nombre de point contenu dans 'm1'
%(qui est le même que celui dans 't' et dans 'm2') :
L = length(m1);
%On initialise les compteurs 'n1' et 'n2' :
n1=0;
n2=0;
%On initialise la variable 'duree' (choisie arbitrairement)
%qui détermine un pas minimum entre deux 'tac' :
duree = 20e-2;
%On initialise les variables 'T1' et 'T2' qui contrôlent que le pas
%appelé 'duree' est bien respecté :
T1 = 0;
T2 = 0;
%On crée une boucle qui sert à compter le nombre de 'tac'
%effectué par chaque métronome au court de l'expérience :
for i = 1 : 1 : L
    %Pour ce faire, on regarde si l'amplitude du point numéro 'i'
    %du vecteur 'm1' et 'm2' est supérieur au seuil 'M1 et 'M2' :
    if m1(i) > M1
        %On regarde si la coordonnée temporelle du 'tac' en i est bien espacée
        %au minimum du pas 'duree' par rapport à l'ancien 'tac' :
        if t(i) - T1 > duree
            %Si c'est le cas, on incrémente le compteur correspondant
            %au vecteur de 1 ('n1' pour 'm1' et 'n2' pour 'm2') :
            n1 = n1+1;
            %On change la valeur de 'T1' par la coordonnée temporelle du premier pic :
            T1 = t(i);
        end
    end
    if m2(i) > M2
        if t(i) - T2 > duree
            n2 = n2+1;
            T2 = t(i);
        end
    end
end
%On divise ensuite chaque compteur par deux. En effet,
%les battements du métronome sont espacés d'une demi-période :
%Le nombre de période d'oscillation effectuées par chaque métronome
%est donc Égal  $\frac{1}{2}$  la moitié de 'n1' et 'n2' :
n1 = n1 / 2;
n2 = n2 / 2;

```

```

%On ne prend que la partie entière de chacun des compteurs
%afin d'éviter le cas où le nombre de demi-période est impaire :
n1 = floor(n1);
n2 = floor(n2);
%On initialise les variables 'z1' et 'z2' à 0 :
z1 = 0;
z2 = 0;
%On crée les vecteurs 'V1' et 'V2' contenant
%respectivement 'n1' et 'n2' lignes de 0 :
V1 = zeros(n1,1);
V2 = zeros(n2,1);
%On initialise les compteurs k1 et k2 :
k1 = 1;
k2 = 1;
%On réinitialise les variables T1 et T2 à 0 :
T1 = 0;
T2 = 0;
%On crée une boucle qui permet de compter le nombre de période
%effectuée par chaque métronome au cours de l'expérience :
for i = 1:L
%Pour ce faire, on regarde si chaque valeur des vecteurs
%'m1' et 'm2' est supérieure aux seuils 'M1' et 'M2' :
if m1(i) > M1
%On regarde si la coordonnée temporelle de l'ancien pic et celle
%du nouveau pic sont bien espacées de 'duree' secondes :
if t(i) - T1 > duree
%Si c'est le cas, on remplace la variable T1 par la valeur de t(i) :
T1 = t(i);
%Les variables 'z1' et 'z2' servent à prendre un battement sur deux
%afin d'obtenir des période et non des demi-périodes :
if z1 == 0
%En effet, si 'm1(i)>M1', on regarde si 'z1==0'. Si c'est le cas on prend
%la coordonnée temporelle 't(i)' correspondant à 'm(i)' et on la place dans
%'V(k1)'. Puis on incrémente 'k1' et on remplace 'z1' par la valeur 1 :
V1(k1) = t(i);
k1 = k1+1;
z1 = 1;
%On vérifie que 'k1' n'est pas supérieur à 'n1' afin de ne pas dépasser
%la taille du vecteur. Si c'est le cas, on stop la boucle :
if k1 > n1
break;
end
%Si 'z1==1', on change la valeur de 'z1' et on
%recommence la boucle pour 'i=i+1' :

```

```

elseif z1 == 1
z1=0;
end
end
end
end
%On effectue la même chose pour le deuxième métronome :
for i = 1 : 1 : L
if m2(i) > M2
if t(i) - T2 > duree
T2 = t(i);
if z2 == 0
V2(k2) = t(i);
k2 = k2+1;
z2 = 1;
if k2 > n2
break;
end
elseif z2 == 1
z2=0;
end
end
end
end
t1 = zeros(n1-1,1);
t2 = zeros(n1-1,1);
P1 = zeros(n1-1,1);
P2 = zeros(n2-1,1);
%On crée une boucle remplaçant chaque valeur de 'P1' et 'P2' par
%la différence entre la coordonnée temporelle de chaque période.
%Par exemple, si l'on débute la première période à 5s et la deuxième
%à 5,1s, V(i)=5 et V(i+1) = 5,1, et donc P1(k1) = 0,1s qui est la valeur
%de la première période. On remplace la valeur i du vecteur t1 par la moyenne
%des valeurs i et i+1 du vecteur V. On obtient ainsi la localisation temporelle
%de la période :
for i = 1 : 1 : n1-1
P1(i) = V1(i+1)-V1(i);
t1(i) = (V1(i+1)+V1(i))/2;
end
%On fait de même avec le métronome 2 :
for i = 1 : 1 : n2-1
P2(i) = V2(i+1)-V2(i);
t2(i) = (V2(i+1)+V2(i))/2;
end

```

```

%On multiplie les valeurs des amplitudes du métronomes 2 par
%'C' afin d'avoir des amplitudes comparables pour les deux signaux :
D(:,3) = D(:,3)*C;
%La figure 1 trace en haut l'évolution de la période de chacun des
%métronomes et en bas les signaux temporels de chacun des métronomes :
figure (1)
subplot(2,1,1)
plot(t1,P1,'go')
hold on
plot(t2,P2,'ro')
xlabel('Temps en secondes')
ylabel('Evolution de la période(s)')
title('Métronome 1 (vert) et Métronome 2 (rouge)')
subplot(2,1,2)
plot(t,D(:,2),'m')
hold on
plot(t,D(:,3),'c')
xlabel('Temps en secondes')
ylabel('Amplitude des oscillations')
title('Métronome 1 (rose) et Métronome 2 (bleu)')
%On regarde s'il y a le même nombre de point dans les vecteur P2 et P1.
%Si c'est le cas, on trace la courbe du vecteur P qui fait la différence
%entre les vecteurs P2 et P1 :
if size(P1) == size(P2)
P = abs(P2-P1);
for i = 1 : 1 :n1-1
ttot(i) = (t1(i) + t2(i))/2;
end
figure(2)
subplot(2,1,1)
plot(ttot,P,'o');
xlabel('Temps en secondes')
ylabel('Différence entre les périodes des deux métronomes(s)')
title('Différence entre les périodes des deux métronomes')
subplot(2,1,2)
plot(t,D(:,2),'m')
hold on
plot(t,D(:,3),'c')
xlabel('Temps en secondes')
ylabel('Amplitude des oscillations')
title('Métronome 1 (rose) et Métronome 2 (bleu)')
end

```