

Manufacturing technologies

Étude d'un métronome mécanique

Ambrine Douhane
282708

Oscar Keren
302584

William Provenaz
288097

12 octobre 2021



Encadrants :

Dr. Yves BELLOUARD

Dr. Vivek SUBRAMANIAN

EPFL

Table des matières

1	Spécification du projet	3
2	Analyse du produit	4
2.1	Descriptif du produit	4
2.2	Cahier des charges	4
2.3	Liste des pièces	5
2.3.1	Catégorie A - Boîtier	7
2.3.2	Catégorie B - Pendule	8
2.3.3	Catégorie C - Support	11
2.3.4	Catégorie D - Mécanisme	12
2.4	Étude des pièces clés	14
2.4.1	Pendule	14
2.4.2	Boîtier	17
2.4.3	Mécanisme de remontage	17
2.4.4	Mécanisme de transmission du mouvement	19
3	Façonnage	21
3.1	Plastiques	21
3.2	Métaux	22
4	Analyse économique	23
4.1	Marché du métronome	23
4.2	Estimation des coûts	23
4.2.1	Estimation du nombre de métronomes vendus par an par Wittner	23
4.2.2	Estimation du coût de revient à Wittner	24
5	Amélioration	27
5.1	Faiblesses	27
5.1.1	Coût	27
5.1.2	Précision du battement	27
5.1.3	Durée de vie du ressort	27
5.1.4	Volume sonore	27
5.2	Solutions apportées pour régler ces faiblesses	27
5.2.1	Coût	27
5.2.2	Précision du battement	27
5.2.3	Durée de vie du ressort	28
5.2.4	Volume sonore	28

6	Variantes	29
6.1	Métronome mécanique amélioré	29
6.2	Métronome électronique	29
A	Annexes	31

1 Spécification du projet

Le présent projet propose d'étudier un objet sur le principe du "reverse engineering". L'objectif est de comprendre comment cet objet est fait, en précisant sa fonction, en le démontant et en identifiant les processus de manufacturing de chacune de ses pièces.

On dénombre les enjeux de cette étude en six points :

- définition du cahier des charges
- traduction d'une spécification fonctionnelle en contraintes industrielles
- compréhension des choix des matériaux
- analyse critique des choix de production
- description des techniques d'assemblage
- estimation du coût de production de l'objet.

Nous, Ambrine, Oscar et William sommes tous les trois musiciens donc les métronomes sont des objets qui nous sont familiers. Ce sont des objets simples dans la mesure où il contiennent peu de pièces et qu'ils sont exclusivement mécaniques, mais ils n'en sont pas moins fascinants : leur fonctionnement s'explique par des phénomènes physiques abordables et leurs pièces sont faites de matériaux divers. Ces raisons ont motivé notre choix pour l'étude du métronome.

2 Analyse du produit

2.1 Descriptif du produit

Notre étude se concentre sur un métronome mécanique dont la fonction majeure est de donner une pulsation régulière à l'utilisateur.

L'objet est essentiellement destiné à des musiciens afin de leur permettre de jouer en rythme. Le métronome s'utilise de préférence en intérieur sur une surface plane pour ne pas desservir le mouvement de pendule.

Il est composé d'un pendule gradué et d'un curseur réglable verticalement. Il y a de plus une clé servant à remonter le ressort et conférer l'énergie au système. Il suffit de donner une légère impulsion pour lancer le mouvement de balancier. Cela émettra un tic à une pulsation régulière souhaitée (entre 40 et 208 BPM). Le poids total du produit est 354 g.

2.2 Cahier des charges

L'objectif principal de cet objet est évidemment de donner une pulsation régulière au tempo que désire l'utilisateur.

On observe de plus quelques contraintes, comme le prix, qui doit être abordable (moins de 100.-), la facilité d'utilisation afin que même les plus jeunes puissent l'utiliser et une durée de vie suffisante (d'environ 20 ans par exemple). On attend également du tic sonore qu'il soit bien net et suffisamment fort.

2.3 Liste des pièces

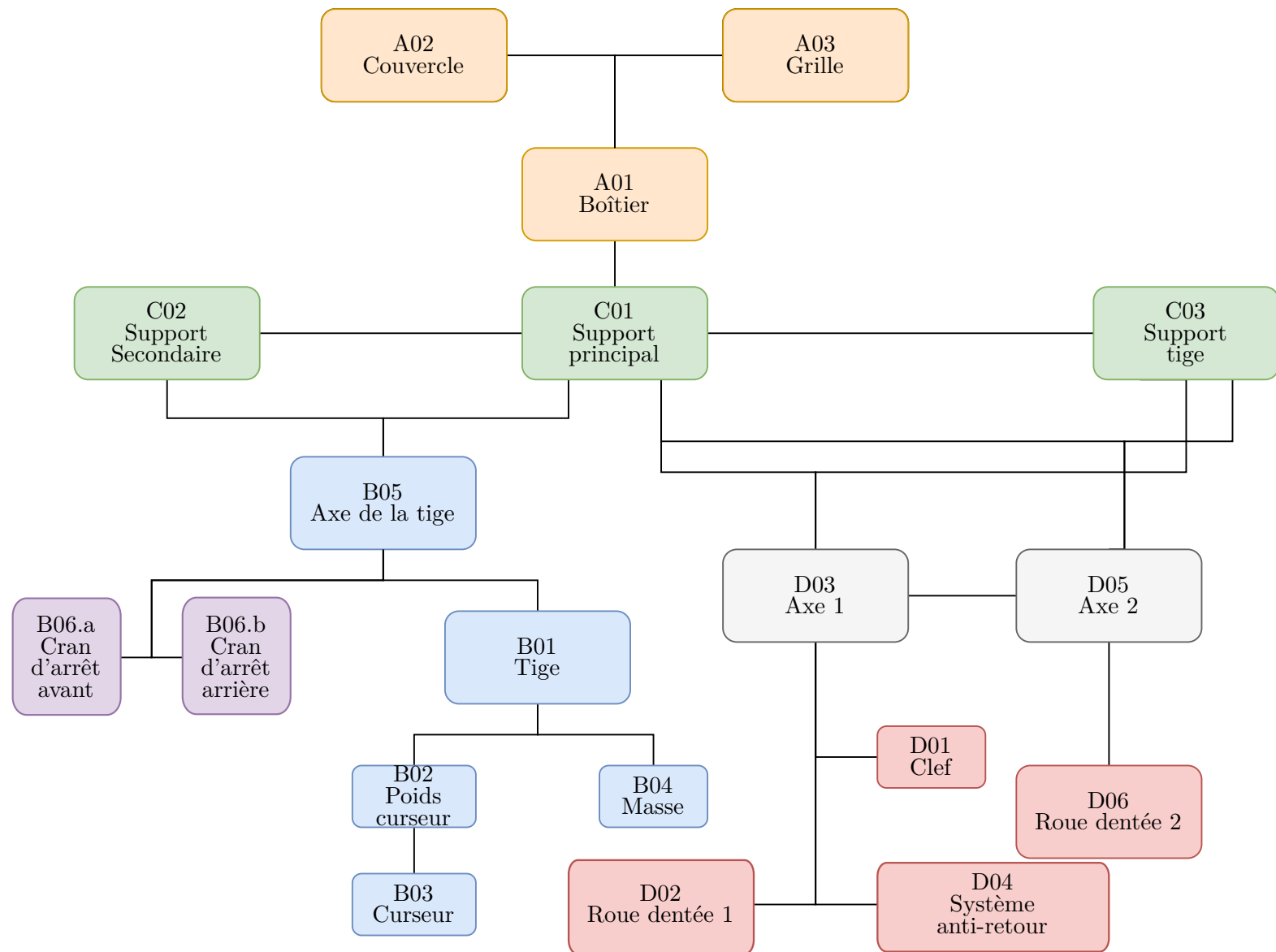


FIGURE 1 – Organisation des pièces qui composent le métronome



FIGURE 2 – Vue éclatée du métronome

2.3.1 Catégorie A - Boîtier

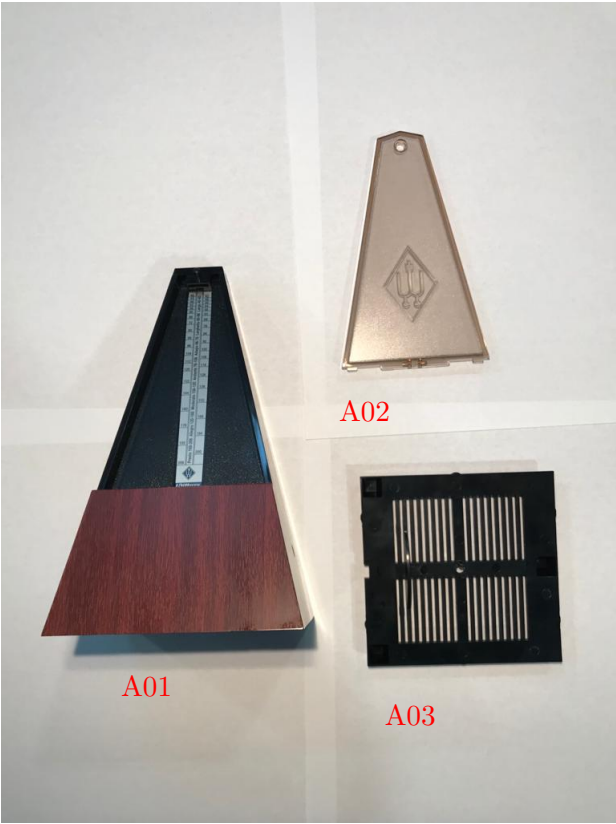


FIGURE 3 – Pièces du boîtier

Les pièces du boîtier sont faits de plastiques, qui ont été identifiés grâce a l'organigramme en Annexe (figure 14).

ID	A01
Nom de la pièce	Boîtier
Description	Boîtier pyramidal
Fonction(s) spécifique(s)	Soutient et protège le mécanisme. Sert de caisse de résonance.
Matériau(x)	ABS imitation bois
Masse	172 g

ID	A02
Nom de la pièce	Couvercle
Description	Couvercle qui épouse la forme trapézoïdale du support.
Fonction(s) spécifique(s)	Protège la tige quand le métronome n'est pas utilisé. Participe à l'esthétique globale.
Matériau(x)	PMMA
Assemblage	Clipsé au boîtier.
Masse	20 g

ID	A03
Nom de la pièce	Grille
Description	Plaqué carrée ajourée avec 3 pieds.
Fonction(s) spécifique(s)	Stabilise le métronome. Ferme le boîtier tout en laissant passer le son.
Matériau(x)	ABS
Assemblage	Clipsé
Masse	27 g

2.3.2 Catégorie B - Pendule

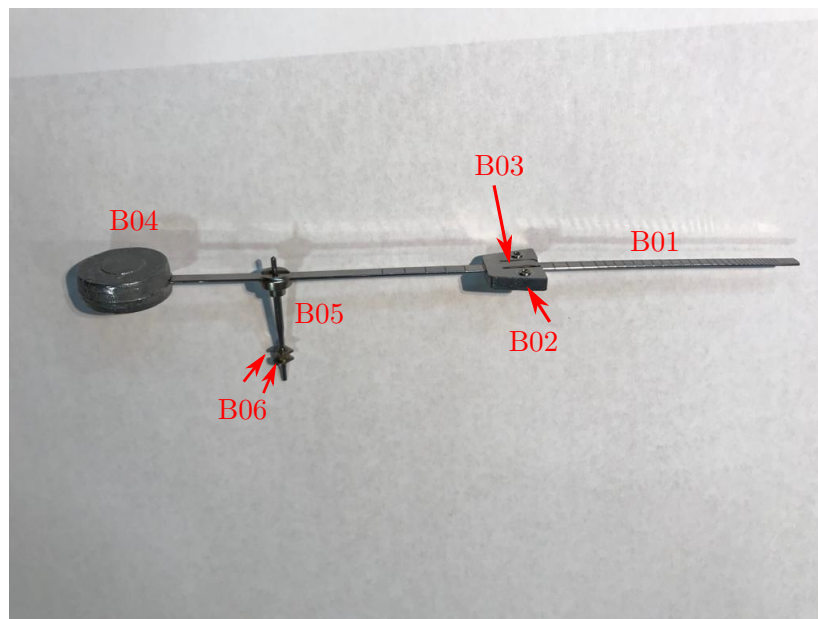


FIGURE 4 – Pièces du pendule

Calcul de la densité du cylindre B04 :

$$m = 25 \text{ g} \quad (1)$$

$$V = 2.19 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \quad (2)$$

$$d = 11.4 \quad (3)$$

Le matériau des pièces B02 et B04 est déterminable par les caractéristiques suivantes : les pièces sont lourdes mais assez facilement déformables. En effet on peut aisément les rayer avec l'ongle. Tout porte à penser qu'il s'agit du plomb mais cela pose des risques de sécurité. Il s'agirait alors de fer mou. La tige B01 et le curseur B03 semblent être en acier inox car ils sont brillants, et elles ne présentent pas de trace d'oxydation.

ID	B01
Nom de la pièce	Tige
Description	Tige crantée
Fonction(s) spécifique(s)	Soutient le poids et le curseur. Permet de positionner le curseur.
Matériau(x)	Acier inox
Assemblage	Fixé au centre de rotation
Masse	5 g

ID	B02
Nom de la pièce	Poids curseur
Description	Poids trapézoïdal en métal
Fonction(s) spécifique(s)	Contre poids du balancier.
Matériau(x)	Fer
Masse	6 g

ID	B03
Nom de la pièce	Curseur
Description	Pointe
Fonction(s) spécifique(s)	Serre le curseur sur les crans de la tige.
Matériau(x)	Acier inox
Assemblage	Chassé
Masse	< 1 g

ID	B04
Nom de la pièce	Masse
Description	Masse pleine cylindrique
Fonction(s) spécifique(s)	Sert de poids au pendule pour garder le mouvement du balancier.
Matériau(x)	Fer
Assemblage	Chassé à la tige.
Masse	25 g

ID	B05
Nom de la pièce	Axe de la tige
Description	Axe cylindrique avec quatre petits diamètres différents.
Fonction(s) spécifique(s)	Supporte la tige et les deux crans d'arrêt.
Matériau(x)	Acier
Assemblage	Ajusté avec jeu.
Masse	5 g

ID	B06.a
Nom de la pièce	Cran d'arrêt avant
Description	Pièce arrondie trouée
Fonction(s) spécifique(s)	Transmet l'énergie de la roue dentée 2 au pendule. Bloque la roue dentée lorsque le pendule est à gauche.
Matériaux	Acier
Assemblage	Serrage chassé sur l'axe
Masse	<1 g

ID	B06.b
Nom de la pièce	Cran d'arrêt arrière
Description	Pièce arrondie trouée
Fonction(s) spécifique(s)	Transmet l'énergie de la roue dentée 2 au pendule. Bloque la roue dentée lorsque le pendule est à droite.
Matériaux	Acier
Assemblage	Serrage chassé sur l'axe
Masse	<1 g

2.3.3 Catégorie C - Support

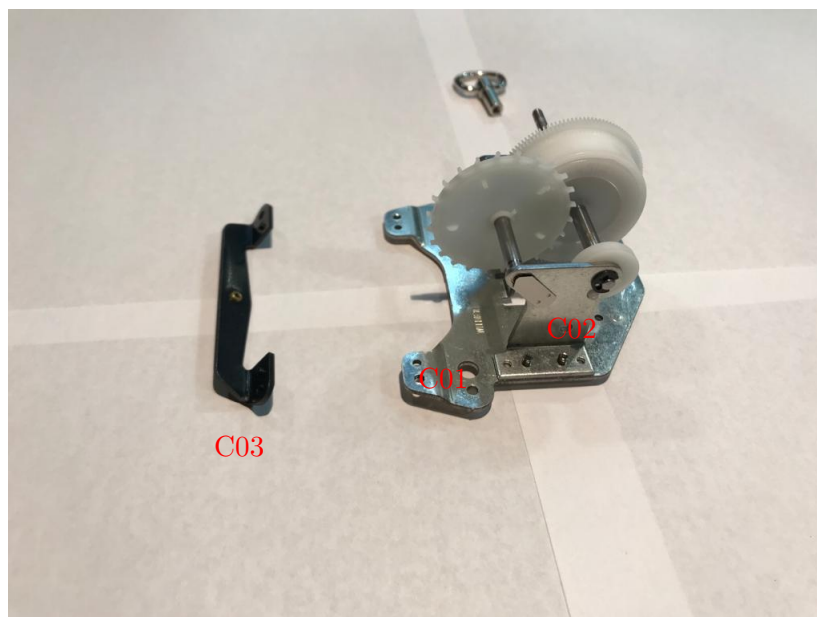


FIGURE 5 – Pièces du support

Pour trouver les matériaux des pièces de cette catégorie, nous avons estimé la densité en comparant poids et volume dans un premier temps. Puis nous avons testé le magnétisme des pièces à l'aide d'écouteurs aimantés et avons constaté que les pièces étaient attirées par l'écouteur. Nous en avons déduit qu'il s'agissait d'acier.

ID	C01
Nom de la pièce	Support principal
Description	Plaque en métal plié, troué
Fonction(s) spécifique(s)	Tient le mécanisme en place.
Matériaux	Acier
Assemblage	Vissé au boîtier

ID	C02
Nom de la pièce	Support secondaire
Description	Plaque en métal plié, troué
Fonction(s) spécifique(s)	Tient les axes en place.
Matériaux	Acier
Assemblage	Vissé au support principal

ID	C03
Nom de la pièce	Support tige
Description	Plaque en métal plié, troué
Fonction(s) spécifique(s)	Tient l'axe de la tige en place.
Matériaux	Acier peint
Assemblage	Vissé au support principal

2.3.4 Catégorie D - Mécanisme

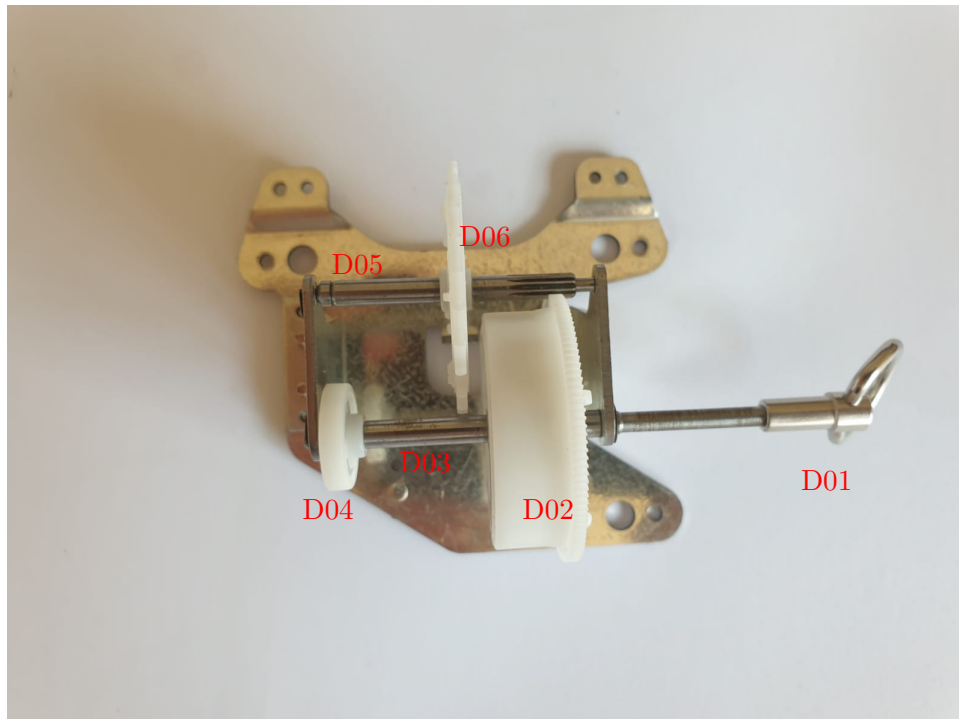


FIGURE 6 – Pièces du mécanisme

Afin de déterminer plus précisément le matériau des pièces blanches, nous avons observé que ces pièces glissaient car elles étaient en plastique auto-lubrifiant. Cela est logique car ces pièces doivent assurer une rotation sans accroc. Un matériau hautement probable est donc le Polyéthylène haute densité (PEHD).

ID	D01
Nom de la pièce	Clef
Description	Cylindre orné d'un anneau ovale
Fonction(s) spécifique(s)	Remonte le ressort pour conférer de l'énergie mécanique au système.
Matériau(x)	Acier inox
Assemblage	Vissé à l'axe 1

ID	D02
Nom de la pièce	Roue dentée 1
Description	Roue dentée de 120 dents
Fonction(s) spécifique(s)	Transmet l'énergie du ressort spiral qu'elle soutient à l'axe denté 2.
Matériau(x)	PEHD
Assemblage	Chassé sur l'axe 1.

ID	D03
Nom de la pièce	Axe 1
Description	Pièce cylindrique de petit diamètre.
Fonction(s) spécifique(s)	Supporte la clef, la roue dentée 1 et le système d'anti-retour, et transmet l'énergie de l'utilisateur au ressort.
Matériau(x)	Acier
Assemblage	Chassé sur l'axe 1.

ID	D04
Nom de la pièce	Système anti-retour
Description	Pièce de petit diamètre avec un trois jambes intérieures agencées en spirales entrecroisées.
Fonction(s) spécifique(s)	Empêche l'axe 1 de tourner dans le sens inverse que celui imposé par l'utilisateur pour remonter le ressort.
Matériau(x)	PEHD
Assemblage	Chassé sur l'axe 1.

ID	D05
Nom de la pièce	Axe 2
Description	Pièce cylindrique de petit diamètre et cranté sur un bord.
Fonction(s) spécifique(s)	Transmet le mouvement de la roue dentée 1 vers la roue dentée 2.
Matériau(x)	Acier
Assemblage	Ajusté et bloqué à l'aide d'une feuille de métal soudée.

ID	D06
Nom de la pièce	Roue dentée 2
Description	Roue dentée de 24 dents et de faible épaisseur.
Fonction(s) spécifique(s)	Ses dents butent périodiquement sur le cran d'arrêt et émettent un son (la pulsation) qui sera amplifié par la caisse de résonance.
Matériau(x)	PEHD
Assemblage	Chassé sur l'axe 2

2.4 Étude des pièces clés

2.4.1 Pendule

Le pendule est au coeur du mécanisme du métronome. Une première observation que l'on peut faire est que chaque tic du métronome intervient quand le pendule passe par sa position centrale d'équilibre. Ainsi, le battement du métronome correspond à une demi-période du pendule, et nous devons prendre en compte ce facteur 2 dans nos calculs.

Dans cette étude, nous verrons en deux temps comment la position du curseur sur la tige du pendule influence la fréquence de ce dernier. Dans un premier temps, nous allons déterminer la position du centre de gravité du pendule. Puis nous adopterons une approche "ingénieur" de mesure et de régression linéaire assistée par ordinateur pour comparer analytiquement une fonction qui lie la période du pendule à la position du curseur à celle que l'on aura déduite de nos équations de physique.

Position du centre de masse du système

Il est pertinent de trouver le centre de masse du système pendule-curseur car sa distance au centre de rotation influence son moment d'inertie et donc la période du pendule. En effet, selon le théorème de Steiner [2], le moment d'inertie d'un objet par rapport à un axe Δ' est tel que $J_{\Delta'} = J_{\Delta} + M \cdot a^2$, où Δ est un axe parallèle et à une distance a de Δ' et qui passe par le centre de masse de l'objet, et M la masse de l'objet.

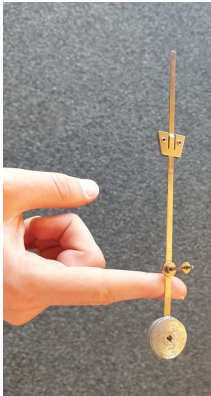


FIGURE 7 – Déterminer le centre de masse "à la main"

On commence, en première approximation, par essayer de sentir manuellement où se situe le centre de masse du système en prenant la pièce dans la main et en essayant de la faire tenir sur un doigt sans qu'elle ne tombe.

Mathématiquement et avec des outils simples, on arrive aussi à trouver le centre de gravité du système pendule-curseur à l'aide de sa définition formelle, à savoir le point de l'objet où le moment du poids est nul.

Formellement :

$$\iiint_{pendule} \overrightarrow{G_g M} \wedge \overrightarrow{\pi(M)} dV = \overrightarrow{0} \quad (4)$$

Avec $\pi(M)$ le poids volumique, G_g la position du centre de gravité et M un point du système d'étude, $\pi(M) = \pi = \rho_{fer} g$. Où ρ_{fer} est la masse volumique du fer et g l'accélération de pesanteur.

On simplifie l'équation en négligeant la masse de la tige devant la masse du curseur et du pendule (contre-poids). On considère également que le système est à une dimension car son épaisseur et sa

largeur sont faibles devant sa longueur : un facteur 10 les sépare. Ainsi, le système tige-curseur-masse satisfait l'équation suivante :

$$m \cdot D = M \cdot d \Rightarrow \frac{D}{d} = \frac{M}{m} \quad (5)$$

Application numérique avec $m = 5 \text{ g}$ et $M = 25 \text{ g}$

$$\frac{D}{d} = \frac{25}{5} = 5 \quad (6)$$

Par conséquent le centre de rotation et le centre de masse peuvent être confondus pour toutes les hauteurs du curseur comprises dans $[3.5 \cdot d; 6.5 \cdot d]$ c'est à dire dans $[7 \text{ mm}; 13 \text{ mm}]$. Il en découle que l'on peut appliquer le théorème du moment cinétique en négligeant a dans la formule de Steiner.

Lien entre la position du curseur et la période du pendule

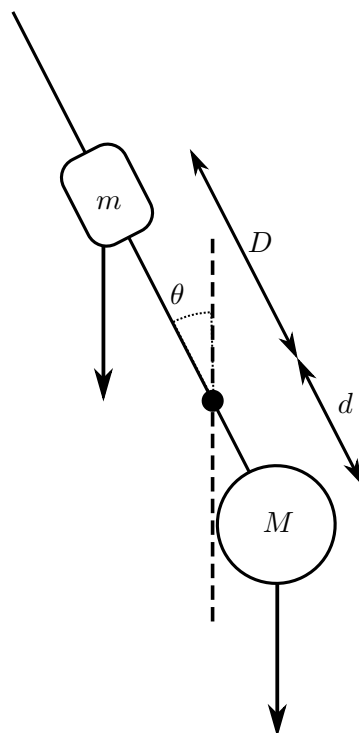


FIGURE 8 – Schéma équivalent métronome

Nous avons pris sept mesures de la période du pendule en fonction de la position du curseur. Nous avons ensuite tracé sur Matlab le graphe résultant de ces mesures en rouge, c'est celui de la figure 9.

D'après le théorème du moment cinétique :

$$\frac{d\vec{L}_O}{dt} = \sum \vec{M}_O \quad (7)$$

$$\frac{d(mD^2 + Md^2)\dot{\theta}\vec{e}_z}{dt} = (mD - Md)g \sin(\theta)\vec{e}_z \quad (8)$$

$$(mD^2 + Md^2)\ddot{\theta} = (mD - Md)g \sin(\theta) \quad (9)$$

En admettant que l'on soit dans le domaine des petites oscillations ($\sin(\theta) = \theta$) et en cherchant une solution de la forme $\theta = A \cos(\omega t)$, on obtient :

$$-A\omega^2 \cos(\omega t)(mD^2 + Md^2) = (mD - Md)gA \cos(\omega t) \quad (10)$$

Finalement on obtient la pulsation ω et la période T :

$$\omega = \sqrt{\frac{(Md - mD)g}{(mD^2 + Md^2)}} \quad (11)$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (12)$$

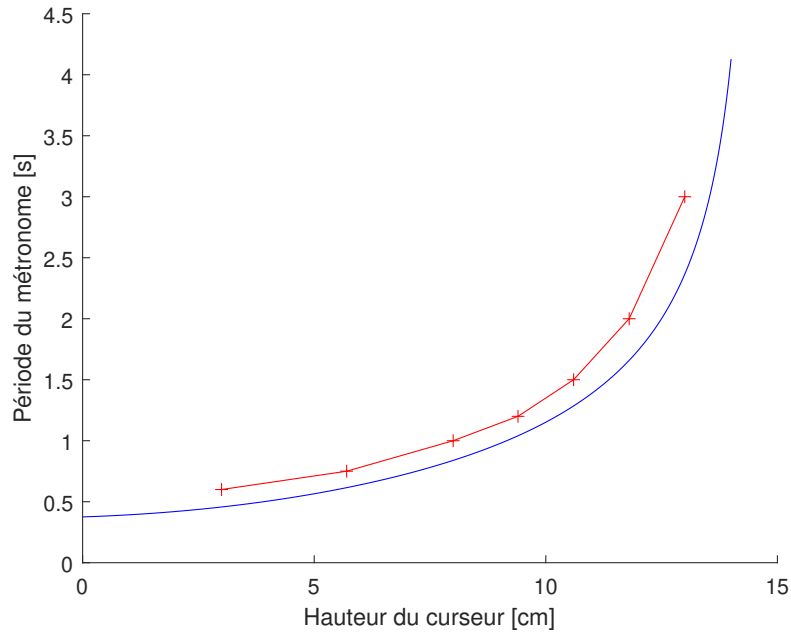


FIGURE 9 – Comparaison entre les valeurs théoriques (en bleu) et expérimentales (en rouge) de la période du métronome en fonction de la hauteur du curseur.

On constate que nos approximations n'étaient pas trop grossières et que la période effective du pendule de notre métronome est assez fidèle à la modélisation que l'on en a faite.

2.4.2 Boîtier

Le boîtier possède plusieurs intérêts majeurs. Le plus évident est celui de protection. En effet, le boîtier englobe la totalité du mécanisme au sein de sa forme pyramidale, laissant place à un couvercle en PMMA au-devant de la structure pour que l'utilisateur puisse l'enlever et manipuler le métronome à sa guise sans avoir à enlever tout le boîtier. La partie accessible est donc seulement la tige crantée ornée de son curseur, le reste du mécanisme étant caché de l'utilisateur et de fait protégé.

On sait que pour se propager, le son a besoin d'un milieu de propagation. Cependant, cette transmission n'est pas très efficace dans l'air seulement. On utilise donc une caisse de résonance comme intermédiaire. Les deux critères d'efficacité d'une bonne caisse de résonance sont :

- la largeur de la surface de contact avec l'air
- la souplesse du matériau.

Ainsi, l'autre avantage de ce boîtier est de constituer une caisse de résonance facilitant l'amplification du tic sonore du métronome. Il est constitué d'un plastique imitation bois s'inspirant des bois de résonance que l'on peut retrouver dans des instruments tels que la guitare ou le piano. Notons également sa forme pyramidale, offrant une grande résonance là où le mécanisme fonctionne et émet le tic. Cette forme rappelle celle des instruments à vent qui se termine en s'agrandissant.

La forme pyramidale s'apparente à une forme conique (très étroit en haut, très large en bas) et permet de diriger le son vers le bas de la structure, mais aussi d'économiser de l'encombrement par rapport à une structure régulièrement parallélépipédique.

2.4.3 Mécanisme de remontage

Le mécanisme de remontage a pour pièce centrale un ressort en spirale de section rectangulaire entouré sur lui même, auquel l'utilisateur au moyen d'une clé, vient donner de l'énergie mécanique. Ce ressort est fixé à l'axe 1 D03 et est caché par la roue dentée 1 D02 dans laquelle il se trouve. Il perd son énergie en la fournissant à son tour au mécanisme qui met en mouvement le pendule. Plus précisément, lorsque l'axe 1 tourne, le ressort, en se comprimant acquiert et stocke de l'énergie mécanique qu'il retourne à l'axe 1 en le faisant tourner en sens inverse. Ce type de ressorts est souvent utilisé pour transmettre un mouvement circulaire, notamment dans le domaine de l'horlogerie et de la mécatronique.

Estimons l'ordre de grandeur de l'énergie E_{mec} emmagasinée dans le métronome quand l'utilisateur tourne la clé d'un angle α maximal.

$$E_{mec} = \frac{1}{2} \cdot k \cdot \alpha^2 \quad (13)$$

où k la constante de raideur est telle que :

$$k = \frac{E \cdot b \cdot h^3}{12 \cdot L} \quad (14)$$

Par conséquent :

$$E_{mec} = \frac{1}{2} \cdot \frac{E \cdot b \cdot h^3 \cdot \alpha^2}{12 \cdot L} \quad (15)$$

En effet la constante de raideur est reliée au module de Young E du matériau du ressort, b la largeur du ressort, h son épaisseur et L sa longueur. Il convient d'effectuer une application numérique afin de quantifier cette grandeur.

Avec $E_{acier} = 196 \text{ GPa}$, $b = 4 \text{ mm}$, $L = 60 \text{ cm}$, $h = 480 \mu\text{m}$. On effectue un maximum de 10 tours avec la clé, celle-ci ayant un rapport de transmission 1 avec l'axe 1. On a donc $\alpha = 10 \cdot 2\pi \text{ rad}$. Suite à une application numérique, on trouve :

$$E_{mec} = \frac{1}{2} \cdot \frac{196 \cdot 10^9 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot (480 \cdot 10^{-6})^3 \cdot (10 \cdot 2\pi)^2}{12 \cdot 60 \cdot 10^{-2}} \quad (16)$$

$$E_{mec} = 23.8 \text{ J} \quad (17)$$

Par conséquent, l'énergie emmagasinée dans notre ressort est environ 24 J. Ceci est équivalent à l'énergie requise pour élever un objet de 100 g sur 24 mètres (longueur d'un bassin de piscine) dans le champ de pesanteur terrestre. Cela semble être le bon ordre de grandeur.

2.4.4 Mécanisme de transmission du mouvement

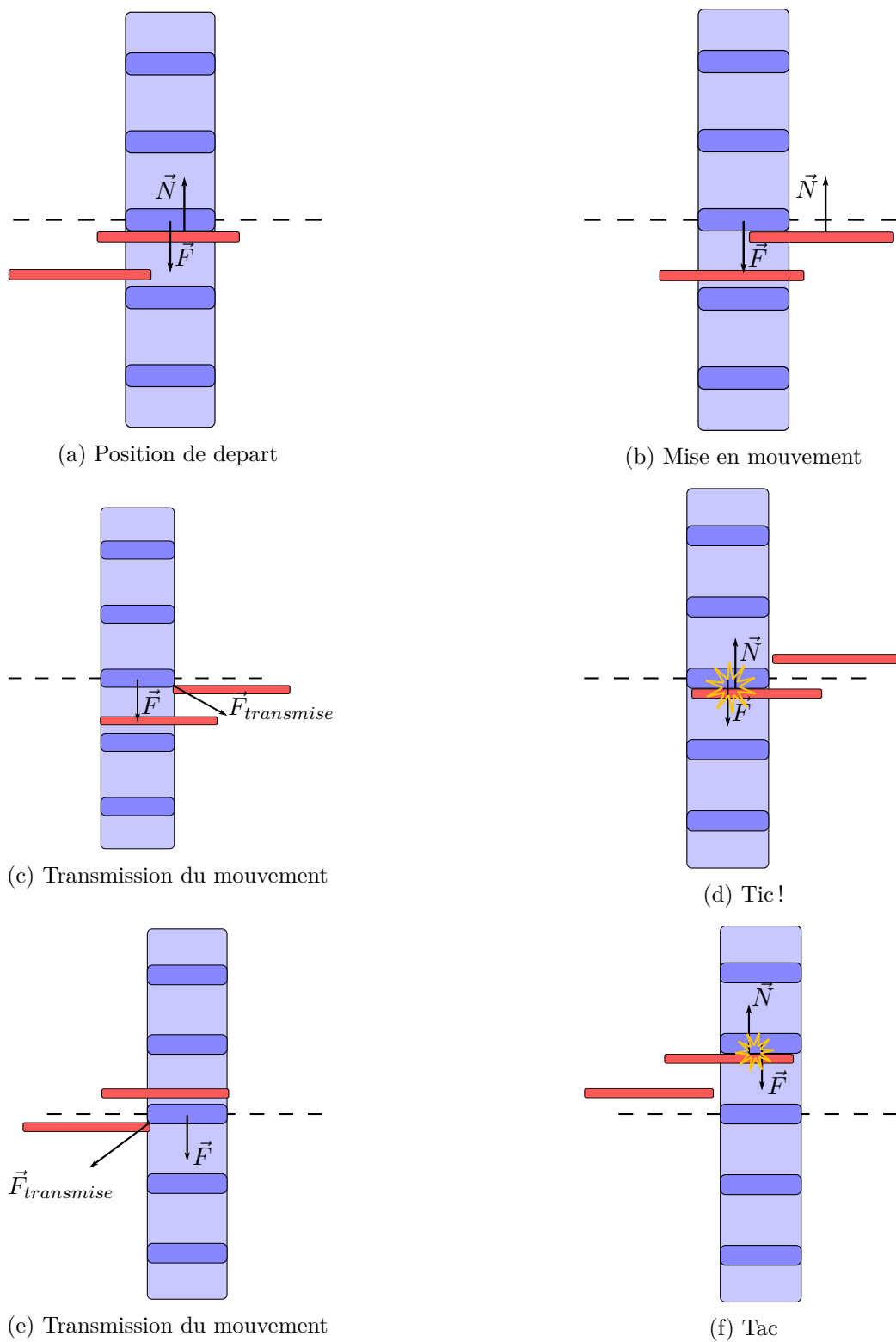


FIGURE 10 – Décomposition du mouvement du pendule (rouge)

L'engrenage transmet son énergie bien que son mouvement soit perpendiculaire à celui du pendule. En effet lorsque le coin du cran d'arrêt touche le coin d'une dent de l'engrenage (figures 10c et 10e), la force de réaction est momentanément horizontale, ce qui relance et entretient ainsi le mouvement du pendule.

Sur la figure 10, on se place dans le référentiel d'une dent de l'engrenage qui tournerait autour de son axe, et on observe ainsi les "crans d'arrêt" du pendule que l'on vient pousser et cogner un à un. Le pendule suit ainsi le mouvement des crans d'arrêts et se balance de gauche à droite.

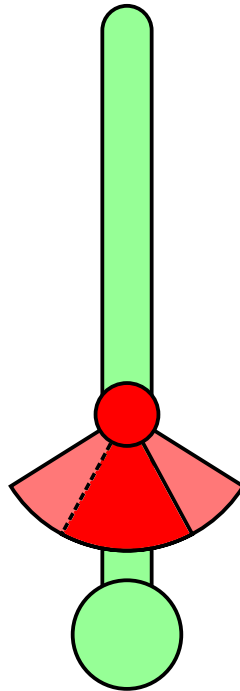


FIGURE 11 – Visualisation des crans d'arrêt

Nous pouvons ainsi voir sur la figure 11 les deux crans d'arrêt rouges qui se superposent au mais avec un léger décalage. Ici nous les voyons de face, et sur la figure 10 : de dessus. Comme ils sont fixés sur le même axe de rotation que le pendule leurs mouvements sont analogues au pendule.

3 Façonnage

3.1 Plastiques

Les plastiques qui composent notre objet ont tous été formés par moulage par injection. Cette technique est utilisée pour de très grandes séries ce qui est le cas de notre objet. Elle consiste à ramollir le plastique en le chauffant, à l'injecter dans un moule puis à le refroidir. La figure 12 en propose un schéma, où le bleu correspond au plastique fondu. Nous expliciterons par la suite les spécificités du moulage de chaque élément.

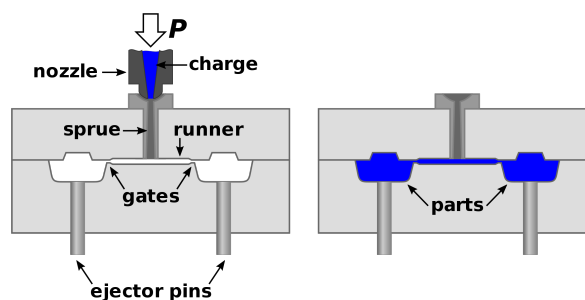


FIGURE 12 – Schéma simplifié du procédé de moulage par injection

Boîtier

Le boîtier a été moulé en un seul bloc. Il ne présente pas de marque de bavure sur le plan de joint. Le moule utilisé est de très bonne qualité. L'imitation bois du métronome est réalisée grâce à des motifs en relief puis colorés pour la finition.

Couvercle

Le couvercle transparent est lui aussi de très bonne qualité. Il a un aspect granuleux, ce qui est réalisable avec le moule. On observe cependant quelques traces d'éjecteurs.

Grille

La grille, elle, est de moins bonne qualité. En effet, on peut observer de nombreuses traces dues aux éjecteurs.

Roues dentées

Les roues dentées sont du Polyéthylène haute densité, un matériau communément utilisé pour ce type de roues dentées. Des moules complexes ont dû être utilisés car les nombreuses dents des roues doivent avoir une tolérance suffisante.

3.2 Métaux

Différentes techniques d'usinage sont utilisées pour façonner les métaux qui composent notre objet.

Support

Les différents supports sont faits de plaques d'acier découpé par plasma puis pliés avec une plieuse à tôle.

Pendule

Le métal de la masse du pendule a été moulé dans un moule de faible qualité. Il y a une grosse trace de jointure et d'entrée d'air. Le poids du curseur a lui été usiné : on voit des traces de perçage circulaire, sans doute pour ajuster les poids de celui-ci. La tige métallique en acier inox ainsi que le curseur ont été découpés puis polis, ce qui leur donne cet aspect brillant.

4 Analyse économique

4.1 Marché du métronome

On estime à 65M \$ en 2017 la taille du marché mondial du métronome [4]. Les principaux acteurs de ce marché sont les pays d'Asie de l'Est, et la majorité des usines de production se trouvent en Chine et en Asie du Sud-Est.

Les principaux consommateurs de ces biens sont, sans surprise, aux États-Unis, en Europe et en Asie du Sud et de l'Est.

Les entreprises qui se placent aujourd'hui au rang de leader dans la fabrication de ces objets sont NIKKO (Japon), KLIQ Music Gear (États-Unis), Wittner (Allemagne) et Cherub (Chine).

4.2 Estimation des coûts

4.2.1 Estimation du nombre de métronomes vendus par an par Wittner

Notre estimation du nombre de métronomes vendus par an par l'entreprise Wittner se fonde sur des nombres vérifiés et factuels, ainsi que sur des hypothèses que nous formulons et qui nous semblent être proches de la réalité. Cette estimation sera ensuite utile au moment de l'estimation des coûts de production.

Faits :

- En France 37% de la population a appris à jouer d'un instrument. [6]
- 750 millions de personnes vivent en Europe. [5]
- 1.1% des Européens a 20 ans en 2021. [5]

Hypothèses :

- 20% des Européens ont un métronome personnel.
- 50% des métronomes vendus en 2021 sont mécaniques.
- Un musicien n'achète qu'un métronome au cours de sa vie, et il le fait à l'âge de 20 ans.
- Wittner possède 35% de parts de marché européen.

Ainsi le nombre de métronomes vendus par Wittner en 2021 est tel que :

- nombre d'européens de 20 ans : $750 \text{ millions} \times 0.011 = 7.5 \text{ millions}$
- nombre de métronomes total vendus en 2021 : $7.5 \text{ millions} \times 0.2 = 1.5 \text{ millions}$
- nombre de métronomes mécaniques total vendus en 2021 : $1.5 \text{ millions} \times 0.5 = 750 \text{ 000}$
- nombre de métronomes mécaniques total vendus en 2021 par Wittner : $750 \text{ 000} \times 0.35 = 262 \text{ 500}$

4.2.2 Estimation du coût de revient à Wittner

Wittner est une entreprise qui existe depuis 1895, ses machines sont considérées comme amorties et leur prix d'achat n'intervient donc pas ici, à l'exception de ses deux plus grosses machines : la presse à injection et la presse plieuse.

De nouveau, on se base sur des faits pour estimer ce coût de revient à Wittner mais aussi sur des hypothèses plausibles. Ceci car c'est un exercice intéressant, également car certaines informations ne sont pas accessibles facilement.

Faits :

- SMIC Allemand : 9.60€/heure [7]
- prix moyen d'un métronome Wittner : 50 CHF
- coût d'une heure de travail à Wittner : 49 \$ (ou 44 CHF) [8]

Hypothèses :

- Wittner ne sous-traite pas la production de ses pièces, sauf celle des vis.
- prix auquel Wittner achète les quelques vis du métronome : moins de 0.1 CHF (négligeable)
- nombre de salariés chez Wittner : 50
- moyenne du temps de travail des salariés Wittner : 30 heures par semaine
- prix d'un moule : 20 000 CHF
- durée de vie d'un moule : infinie
- prix d'une presse à injection : 100 000 CHF
- prix d'une presse plieuse : 10 000 CHF
- durée de vie des machines : 15 ans
- Les coûts de recherche et développement de Wittner sont faibles et négligeables devant celui de sa production.

Le coût total C_{total} de revient d'un métronome à Wittner se décompose en quatre coûts : le coût de la matière première C_{mm} , coût de l'outillage $C_{tooling}$, coût des ressources humaines C_{labor} , coût de l'équipement C_e .

Coûts de la matière première

Pour les coûts de la matière première, on a que :

$$C_{mm} = \sum_i C_{rm,i} \cdot V_i \quad (18)$$

où $C_{rm,i}$ est le coût des matières premières des pièces par cm^3 en CHF, V_i le volume de matière des pièces en cm^3 .

Pièce	Masse en g	Matériau	Masse volumique en g/cm ³	Volume en cm ³	Coût en CHF par cm ³ des matières premières
Boîtier	172	ABS	1.14	6.62	0.0018
Couvercle	20	PMMA	1.18	16.94	0.0027
Grille	27	ABS	1.14	23.68	0.0018
Tige	5	Acier inox	8	0.63	0.045
Poids curseur	6	Plomb	11.3	0.53	0.018
Masse	25	Plomb	11.3	2.21	0.018
Axe tige	5	Acier	7.8	0.64	0.0063
Support principal	45	Acier	7.8	5.77	0.0063
Support secondaire	15	Acier	7.8	1.92	0.0063
Support tige	8	Acier	7.8	1.03	0.0063
Clé	4	Acier inox	8	0.5	0.045
Roue dentée 1	2	PEHD	0.95	2.11	0.00135
Système anti-retour	2	PEHD	0.95	2.11	0.00135
Axe 2	8	Acier	7.8	1.03	0.0063
Roue dentée 2	5	PEHD	0.95	5.26	0.00135

TABLE 1 – Coût des matières premières

Ainsi, en effectuant l'application numérique, on a :

$$C_{mm} = 18.4 \cdot 10^{-4} \cdot (6.62 + 23.68) + 27 \cdot 10^{-4} \cdot 16.94 + 45 \cdot 10^{-3} \cdot (0.63 + 0.5) + 18 \cdot 10^{-3} \cdot (2.21 + 0.53) + 63 \cdot 10^{-4} \cdot (0.64 + 5.77 + 1.92 + 1.03 + 1.03) + 13.5 \cdot 10^{-4} \cdot (2.11 + 2.11 + 5.26) \quad (19)$$

$$C_{mm} = 0.25 \text{ CHF} \quad (20)$$

Coûts de l'outillage

Pour les coûts de l'outillage, on a que :

$$C_{tooling} = \frac{C_t}{n} \cdot \left(1 + \frac{n}{n_t}\right) \quad (21)$$

où C_t est le coût des moules en CHF, n la quantité de produit à usiner (on a 6 pièces moulées pour un métronome) et n_t la durée de vie des moules en années.

$$C_{tooling} = \frac{20000}{6 \cdot 262500} \cdot \left(1 + \frac{6 \cdot 262500}{\infty}\right) \quad (22)$$

$$C_{tooling} = 0.13 \text{ CHF} \quad (23)$$

Coûts des ressources humaines

Pour les coûts des ressources humaines, on a que :

$$C_{labor} = \frac{L}{\dot{n}} \cdot nb_{empl} \quad (24)$$

où L est le coût horaire de la main d'oeuvre en CHF, $\dot{n}$ la vitesse de production en /h égale à la production totale sur le nombre de travail des employés en heures/an et nb_{empl} le nombre d'employés de Wittner.

$$C_{labor} = \frac{44}{\frac{262500}{35 \cdot 45}} \cdot 50 \quad (25)$$

$$C_{labor} = 13.2 \text{ CHF} \quad (26)$$

Coûts de l'équipement

Pour les coûts de l'équipement, on a estimé qu'ils étaient tous amortis du fait de l'ancienneté de l'entreprise à l'exception des presse à injection et plieuse de coûts respectifs C_{pli} et C_{inj} et de durée de vie $\Delta t_{machine}$. Ainsi on pose C_e le prix de l'équipement pour la production d'un métronome (conçu dans une série de n_{prod} par an) tel que :

$$C_e = \frac{C_{pli} + C_{inj}}{\Delta t_{machine} \cdot n_{prod}} \quad (27)$$

$$C_e = \frac{50000 + 200000}{15 \cdot 262500} = 0.63 \text{ CHF} \quad (28)$$

Coût total

Par conséquent le coût de revient d'un métronome à Wittner est de :

$$C_{total} = C_{mm} + C_{tooling} + C_{labor} + C_e \quad (29)$$

$$C_{total} = 0.25 + 0.13 + 13.2 + 0.63 = 14.21 \text{ CHF} \quad (30)$$

5 Amélioration

5.1 Faiblesses

5.1.1 Coût

Nous avons acheté notre métronome 69 CHF dans un magasin de musique à Renens. Sur le marché, la fourchette de prix pour un métronome neuf est plutôt entre 20 CHF et 100 CHF. Cela peut paraître élevé pour un objet purement mécanique et dont l'action n'est pas spécialement complexe. Ce coût élevé peut cependant s'expliquer par l'ancienneté de l'objet, son côté artistique et épuré.

5.1.2 Précision du battement

Les forces de frottements présentes dans le système du fait de la nature des transmissions par contact font qu'à la fin d'un cycle du métronome, quand le ressort n'a presque plus d'énergie, les battements sont de moins en moins précis.

5.1.3 Durée de vie du ressort

Comme indiqué dans la notice d'utilisation [9], le ressort ne doit pas être laissé tendu pendant une longue durée. Sinon, cela réduit considérablement la durée de vie du ressort. Ceci semble être un défaut car l'utilisateur connaît rarement son temps de pratique musicale ainsi que la durée de remontage du ressort.

5.1.4 Volume sonore

Le réglage du volume n'est pas une option proposée par ce métronome mécanique comme c'est le cas pour les métronomes électroniques. Le volume peut pourtant être très gênant car le métronome a été conçu pour émettre un son qui couvre le son de l'instrument que l'on pratique. Il est donc, par défaut, assez fort (autour de 60 dB).

5.2 Solutions apportées pour régler ces faiblesses

5.2.1 Coût

Le prix peut être diminué en changeant les procédés relatifs à l'esthétisme. Par exemple, on a vu que l'état de surface du boîtier est idéal du fait du moulage.

5.2.2 Précision du battement

On peine à entrevoir une véritable solution pour améliorer la précision du battement sur un métronome mécanique. Évidemment, opter pour un métronome électronique résout directement ce problème.

5.2.3 Durée de vie du ressort

Pour remédier au problème mis en lumière dans la notice, on pourrait préciser le nombre de tours de clé adéquat pour une utilisation d'un temps donné sans endommager le ressort. Cela resterait tout de même encombrant pour l'utilisateur de compter les tours à chaque fois. L'utilisation de piles permet de résoudre ce problème puisqu'il est facile et naturel pour l'utilisateur de changer la pile une fois qu'elle est consommée.

5.2.4 Volume sonore

Une solution pour pallier ce problème serait de modifier la forme, et notamment le volume de la caisse de résonance. Celle-ci serait réglable en fonction du volume voulu. Encore ici, ce problème est bien réglé dans les métronomes électroniques puisqu'ils disposent d'une molette pour adapter le volume sonore

6 Variantes

6.1 Métronome mécanique amélioré

Certains métronomes mécaniques peuvent avoir des améliorations. On peut trouver des métronomes avec :

- différents sons et/ou notes
- une pile permettant de perdurer le mouvement plus durablement
- une cloche marquant les premiers temps de mesures.

6.2 Métronome électronique

Ce métronome présente l'avantage d'être bien plus transportable et économique. Le volume du bip est réglable. Certains métronomes modernes font même office d'accordeurs, ce qui est pratique pour les musiciens. On peut notamment citer le métronome de la marque Korg, réputé dans le milieu.



FIGURE 13 – Métronome électronique Korg

Références

- [1] Frédéric Élie (2005), *Métronome* - <http://fred.elie.free.fr>
- [2] Wikipédia (2021), *Moment d'inertie* - https://fr.wikipedia.org/wiki/Moment_d%27inertie
- [3] BFMtv (2021), *Comparateur meilleurs métronomes* - <https://www.bfmtv.com/comparateur/meilleurs-metronomes-test-comparatif/>
- [4] Xiaomiactu (2021), *Étude de marché du métronome* - <http://xiaomiactu.com/etude-recente-de-lindustrie-mondiale-du-metronome-marche-2021/>
- [5] Institut National de la Statistique et des Etudes Économiques (2017), *Comparer les pyramides des âges de 29 pays d'Europe* - <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2418102>
- [6] France Musique (2021), *Sondage : les Français, la musique et le piano* - <https://www.francemusique.fr/actualite-musicale/les-francais-la-musique-et-le-piano-35258>
- [7] Connexion Emploi (2021), *Le salaire minimum légal (SMIC) en Allemagne : montant, revalorisation et exceptions* - <https://www.connexion-emploi.com/fr/a/le-salaire-minimum-legal-en-allemande-est-desormais-fixe-a-8-50>
- [8] The Conference Board, International Labor Comparisons program (2015), *Labor cost in manufacturing* - <https://conference-board.org/ilcprogram>
- [9] Extrait des instructions d'emploi du métronome Wittner, *Important : Ne remontez le métronome immédiatement avant de l'utiliser - ne laissez donc pas le ressort tendu pendant longtemps. Vous augmenterez par là la durée de vie du ressort de votre métronome.*

