

– BISO : BALANCED-ISOspring –
 OSCILLATEUR À DEUX DEGRÉS DE LIBERTÉ
 ISOTROPE ET INSENSIBLE AUX ACCÉLÉRATIONS LINÉAIRES ET ANGULAIRES
 POUR BASE DE TEMPS DE PENDULETTE MÉCANIQUE

Enoncé du projet effectué en groupes de cinq étudiant·e·s durant le semestre de printemps 2022

CONTEXTE

Depuis son introduction en 1675, le balancier-spiral est la base de temps exclusive de la montre mécanique. Pourtant, cet oscillateur présente deux facteurs limitants qui n'ont jusqu'à présent pas été contournés : un facteur de qualité qui ne dépasse pas 200 environ (essentiellement en raison de phénomènes tribologiques), ainsi que la nécessité d'un échappement, mécanisme complexe dont le rendement est limité à 35% environ. En vue de dépasser ces limites, le *Laboratoire de conception micromécanique et horlogère* (Instant-Lab) a inventé, en 2014, un nouvel oscillateur appelé IsoSpring, qui augmente le facteur de qualité de près d'un ordre de grandeur grâce aux guidages flexibles et élimine complètement l'échappement. Le mécanisme IsoSpring, basé sur un principe à deux degrés de liberté remontant à Issac Newton, est constitué d'un *ressort central isotrope* et d'une *masse ponctuelle*, qui reproduisent le comportement d'un *ressort fronde* (Fig. 2). Le mouvement bidimensionnel de cet oscillateur n'est plus alterné, mais unidirectionnel (orbites elliptiques ou circulaires). Ainsi, un mécanisme de maintien continu constitué d'une simple manivelle transmet le couple à l'oscillateur et l'échappement disparaît.

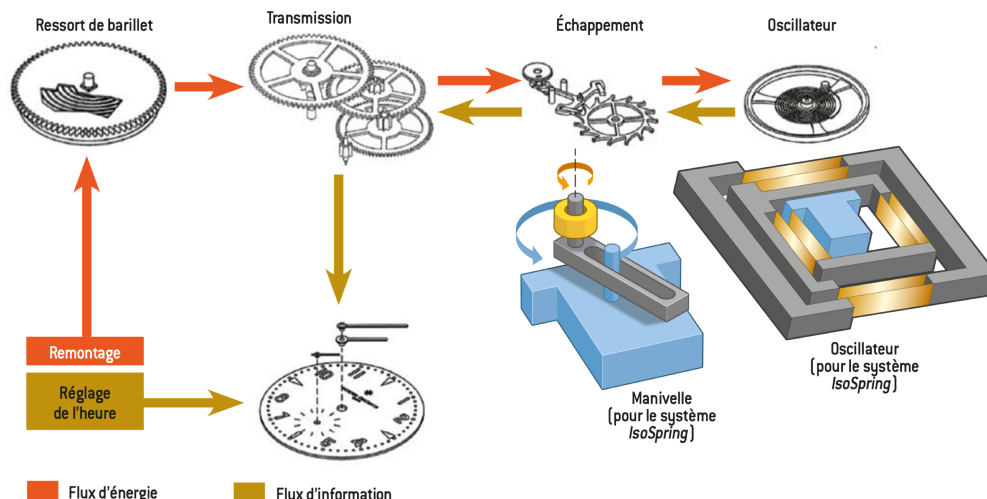


Fig. 1 : Principe de garde temps utilisant un oscillateur IsoSpring comme base de temps (à la place du balancier spiral classique) et une manivelle pour l'entretien et le comptage (à la place de l'échappement classique).

OBJET DU PROJET

A ce jour, seule des horloges ont été réalisées sur la base d'oscillateurs IsoSpring. Le but de ce projet est de concevoir un oscillateur dédié à des pendulettes de voyage qui puissent être mises dans une valise et transportées, sans perte importante de précision chronométrique. Ceci implique que l'oscillateur soit conçu de manière à être essentiellement insensible à la direction de la gravité, ainsi qu'aux accélérations en translation et en rotation. Ceci requiert de concevoir un mécanisme satisfaisant non seulement les conditions des oscillateurs IsoSpring classiques, mais qui soit en plus *équilibrés en force et en moment*. Note : le but ultime de ce développement est de concevoir un oscillateur compatible avec les montres bracelet. La pendulette de voyage constitue une étape intermédiaire pragmatique évitant les contraintes drastiques en termes d'encombrement et de puissance dissipées propres aux montres.

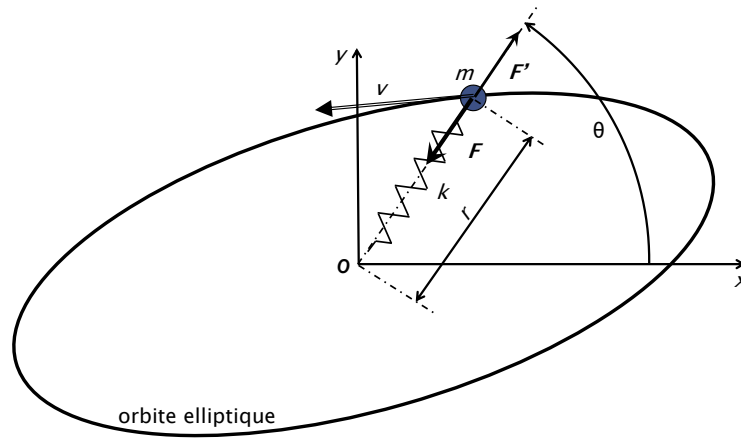


Fig. 2 : Paramètres définissant le ressort fronde. m : masse ponctuelle se déplaçant à la vitesse v sur une orbite elliptique; O : centre de force situé au centre de l'ellipse; k rigidité du ressort reliant m à O ; r distance entre m et O ; $F = -kr$ force de rappel élastique exercée par le ressort sur la masse (remarque : le ressort a une longueur à vide nulle, i.e., pour $r = 0$ on a $F = 0$); (r, θ) position de m en coordonnées polaires dans le référentiel choisi.

DEFINITIONS

Rigidité radiale Si une force radiale \vec{F}' est appliquée à l'extrémité libre du ressort dans la direction θ l'allonge d'une distance r , alors la rigidité radiale dans cette direction est $k = F'/r$. Dans le cadre de ce projet nous considérerons que k est indépendant de r (i.e., le ressort est doté d'une caractéristique linéaire) et de θ (i.e., le ressort est isotrope). Remarque : lorsque la masse m orbite autour du centre de force O , F' résulte de l'effet centrifuge. La force exercée par le ressort sur la masse est alors $\vec{F} = -\vec{F}'$.

Masse réduite Si le mécanisme est déplacé radialement dans la direction θ , on nomme m_r sa masse réduite dans cette direction. Dans le cadre de ce projet nous considérerons que m_r est indépendante de r et de θ .

Masse ponctuelle La masse qui orbite se comporte comme une *masse ponctuelle* (moment d'inertie nul). En pratique ceci revient à avoir une masse qui se translate sur son orbite (i.e., ne change pas d'orientation au cours de mouvement).

Période et fréquence Newton a démontré dans son fameux ouvrage *Philosophiae naturalis principia mathematica* (1687) que le système Fig. 2 qui pourrait représenter une planète de masse m orbitant autour d'une étoile O avec une force d'attraction hypothétique linéaire ($F = -kr$) décrirait des orbites elliptiques fermées dont la période T est indépendante de l'amplitude et de l'ellipsité des orbites : $T = 1/f$ avec la fréquence $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k/m}$. C'est cette propriété appelée *isochronisme* qui permet d'utiliser ce mécanisme comme base de temps.

Puissance dissipée Lorsque le mouvement d'un oscillateur IsoSpring de masse m et de facteur de qualité Q suit une orbite circulaire de rayon r et de fréquence f , alors on considère que la puissance dissipée par l'oscillateur est $P = 8\pi^3 f^3 m r^2 / Q$. (Remarque : il s'agit du double de la puissance qui serait dissipée par un oscillateur à un degré de liberté doté des mêmes paramètres).

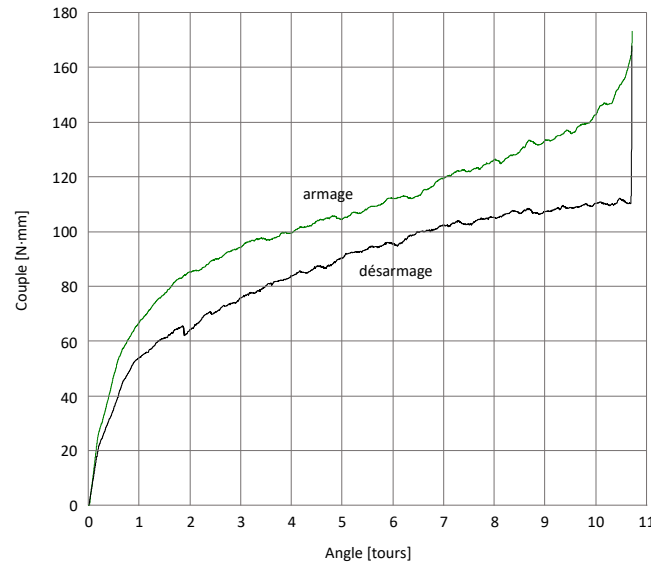


Fig. 3 : Couple d'armage et de désarmage du barillet en $[N \cdot mm]$ en fonction du nombre de [tours].

CAHIER DES CHARGES

Les points avec ★ sont déterminants pour la conception. Les autres sont indicatifs, c'est-à-dire qu'ils ne doivent pas nécessairement être pris en compte dans les calculs de dimensionnement, en raison du temps limité pour ce projet. Il s'agit de critères idéaux que votre mécanisme ne pourra certainement pas tous remplir de manière exacte. Les points de non-conformité seront à discuter et justifier dans le rapport.

A. Conditions générales de fonctionnement de l'oscillateur IsoSpring :

1. ★ Produire une force de rappel élastique *linéaire* et *isotrope* : $F = -kr$, k étant indépendant de r et θ ;
2. ★ Posséder un *centre de force* indépendant de θ : Pour $r = 0$ on a $F = 0$, quel que soit θ ;
3. ★ Avoir une masse en orbite se comportant comme une *masse ponctuelle* ;
4. ★ Avoir une *masse réduite constante* : m_r indépendante de r et θ ;
5. ★ Etre *insensible à l'amplitude de la gravité*, dans une orientation donnée du mécanisme.

B. Conditions additionnelles pour l'oscillateur équilibré Balanced-IsoSpring :

1. ★ Etre insensible à la *direction de la gravité*.
2. ★ Etre insensible aux *accélérations en translation* de la base de l'oscillateur (jusqu'à 50 m/s^2 environs, les chocs plus sévères étant exclus).
3. Etre insensible aux *accélérations en rotation* de la base de l'oscillateur (jusqu'à 1000 rad/s^2 environs, les chocs angulaires plus sévères étant exclus).

C. Données :

1. ★ Barillet imposé : diamètre extérieur 30.9 mm ; hauteur 9 mm ; nombre dents $z_b = 80$; module 0.41 mm/dent ; couple de désarmage selon Fig.3 ;
2. ★ Facteur de qualité de l'oscillateur : $Q = 900$;
3. ★ Rendement de la transmission manivelle-oscillateur : $\eta_m = 60\%$;
4. ★ Rendement de chaque étage de transmission par engrenages : $\eta_e = 98\%$;

D. Specifications :

1. ★ Fréquence nominale f de l'oscillateur : valeur fixe à choisir telle que $1 \text{ Hz} \leq f \leq 15 \text{ Hz}$;
2. ★ Rayon des orbites de l'oscillateur : $0,3 \text{ mm} \leq r \leq 4 \text{ mm}$;
3. ★ Réserve de marche du garde temps : $H \geq 8 \text{ jours}$;

4. ★ Encombrement maximum de la pendulette (largeur×profondeur×hauteur) : $70 \times 70 \times 140 \text{ mm}^3$;
5. ★ Durée de vie du mécanisme supérieure à 50 ans ;
6. Température de fonctionnement : $T_{\text{fonc}} = 20 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$;
7. Prix de fabrication du mécanisme inférieure à 7'000.- CHF (petites séries $\simeq 100$ par année).

DIMENSIONNEMENT

1. Calculer la valeur maximale des contraintes dans toutes les articulations flexibles lorsque l'oscillateur touche ses butées mécaniques sur tout l'espace de travail : $0^\circ \leq \theta < 360^\circ$;
2. Calculer la fréquence f de l'oscillateur ;
3. Calculer le nombre de dents de la roue et du pignon de chacun des mobiles séparant le barillet de la manivelle, ainsi que les rapports de transmissions respectifs. Choisir ces rapports de telle sorte que l'un des mobiles ait une vitesse angulaire moyenne de 1 tour/minute (mobile qui porte l'aiguille des secondes) ;
4. Déterminer graphiquement (Fig. 3) le couple C_{max} que délivre le barillet après avoir été armé à son maximum ;
5. Calculer la puissance P_{Bmax} que délivre le barillet lorsqu'il produit C_{max} ;
6. Calculer le rayon de l'orbite r_{max} de l'oscillateur (orbite supposée circulaire) pour C_{max} ;
7. Calculer la puissance P_{Omax} dissipée par l'oscillateur sur l'orbite circulaire de rayon r_{max} ;
8. Calculer la puissance P_{Omin} dissipée par l'oscillateur lorsque r atteint sa valeur minimum (orbite supposée circulaire) ;
9. Calculer le couple C_{min} et la puissance P_{Bmin} délivrés par le barillet lorsque l'oscillateur dissipe la puissance P_{Omin} ;
10. Déterminer graphiquement (Fig. 3) le nombre de tours N qu'effectue le barillet entre son niveau d'armage maximum et son niveau d'armage correspondant à C_{min} ;
11. Connaissant N , calculer la réserve de marche H de la pendulette ;

CONCEPTION PRELIMINAIRE (oscillateur uniquement)

Planches Chaque groupe élabore un catalogue de 4 solutions d'oscillateurs bien distinctes. Chaque solution est présentée sur une feuille A3 (recto) séparée en deux parties : une partie A qui décrit l'architecture cinématique représentée avec des guidages idéaux en montrant le principe de fonctionnement de la solution, ainsi que les sources d'inspiration qui y ont mené ; une partie B qui montre une vue d'artiste de la solution avec son implémentation avec guidages flexibles. Tous les dessins sont effectués à main levée et en couleur. La 5^e planche met en exergue la solution retenue en explicitant les raisons du choix.

Vidéos Les 5 étudiant·e·s se répartissent les 5 planches, et chacun·e réalise une vidéo de 3 minutes (plan séquence, sans montage) présentant oralement la planche.

CONCEPTION DETAILLEE (oscillateur uniquement)

Dessin d'ensemble de la pendulette Réaliser un dessin assisté par ordinateur avec :

1. Construction détaillée de l'oscillateur
2. Construction détaillée de la manivelle et de son palier à roulements à billes

Le dessin d'ensemble comporte les cotes fonctionnelles, les cotes d'encombrement, les ajustements, le cartouche complet avec la liste de toutes les pièces et leurs matériaux indiqués selon ISO. Faire toutes les coupes et vues nécessaires à la compréhension et au contrôle du fonctionnement du mécanisme. L'échelle des dessins (normalisée) sera choisie pour rendre leur lecture aisée ; les ajustements et tolérances seront explicités. Exemple : $\varnothing 4 \text{ H7}_{-0}^{+0.012} \text{ g6}_{-0.012}^{-0.004}$. Pour des raisons pratiques et de coût, on se limitera autant que possible aux formats A4 à A2.

Squelette de la pendulette (optionnel) :

1. Représentation simplifiée (squelette) du châssis de la pendulette
2. Représentation simplifiée (squelette) des mobiles du rouages sous la forme de simples cercles (respecter les rayons primitifs des roues dentées)
3. Représentation simplifiée (squelette) des paliers des mobiles du rouages
4. Représentation simplifiée (squelette) des ponts de support de l'oscillateur et des mobiles
5. Représentation simplifiée (squelette) de l'aiguille des secondes et de son cadran

(Note : Les éléments suivants ne sont ni à concevoir ni à représenter sur les dessins : rouages de minuterie, mécanisme de remontage, mécanisme de mise à l'heure, cadran des heures et minutes, aiguilles des heures et minutes.)

Dessin de détail de la manivelle Réaliser un plan de détail de la manivelle prêt pour l'envoi à l'atelier. (Les dessins de détail des autres pièces du mécanisme ne sont pas requis).

Rapport Un rapport de 15 à 25 pages basé sur la table de matière proposée en annexe. Le rapport présente la conception détaillée du mécanisme avec des explications claires et concises de son fonctionnement, en faisant appel au maximum aux schémas. Donner les indications et explications nécessaires au suivi et à la compréhension de la démarche (hypothèses, simplifications choisies, dimensions considérées, valeurs utilisées pour le calcul, sources, etc.). Lister, justifier et discuter l'impact des éventuelles non-conformités avec le cahier des charges.

LIVRABLES

Vendredi 1er avril 2022 à 19h00, rendu conception préliminaire :

Chaque étudiant-e uploade sa **planche** sur MOODLE et uploade une seconde fois sa **planche** sur GOOGLEDRIVE cette fois accompagnée de la **vidéo de 3 minutes**.

Vendredi 20 mai 2022 à 19h00, rendu conception détaillée :

Une personne du groupe uploade le **rapport**, y compris le **plan d'ensemble**, le **dessin de détail**, et optionnellement le **dessin du squelette de la pendulette** une fois sur MOODLE et une fois sur GOOGLEDRIVE.

Mercredi 25 mai 2022 à 19h00, défense finale publique Défense finale de tout le groupe devant les assistants et une partie de la classe. L'horaire de passage, ainsi que la durée et autres modalités de la défense seront communiquées via MOODLE une semaine avant la soutenance. La défense sera évaluée selon les critères suivants :

- Clarté, pertinence et concision de la présentation
- Connaissance générale du problème
- Réponse aux questions
- Bonne coordination du groupe
- Un bonus est attribué aux solutions particulièrement originales
- Un bonus est attribué aux éventuelles maquettes didactiques ou aux animations vidéo présentées lors de la soutenance

Barème

Calcul de la note N du cours *Conception de mécanismes II* : $N = 0,4 \cdot T + 0,2 \cdot I + 0,4 \cdot F$ où T est la note obtenue au travail écrit, I est la note obtenue au rendu intermédiaire et F est la note obtenue au rendu final du projet.

Contact logistique : Assistant responsable de la coordination : M. Brahim Ben Hamouda, mohamed.benhamouda@epfl.ch.

Table des matières pour le rapport

1. Introduction
2. Principe de fonctionnement
 - 2.1. Explication du principe de fonctionnement
 - 2.1.1 Architecture générale de la pendulette
 - 2.1.2 Principe de l'oscillateur
 - 2.1.3 Principe de l'équilibrage en force et en moment
 - 2.2. Schéma cinématique de l'oscillateur représenté avec des articulations idéales
 - 2.3. Calcul de la mobilité selon la méthode de Grübler et discussion des éventuels hyperstatismes
 - 2.4. Implémentation de la cinématique de l'oscillateur en guidages flexibles
 - 2.5. Discussion qualitative de l'isotropie de rigidité, et de l'isotropie masse.
 - 2.6. Mise en évidence des concepts originaux et explications spécifiques à la solution retenue
3. Dimensionnement du mécanisme : Suivre point par point la section *Dimensionnement* ci-dessus.
Lister les non-conformités avec le cahier des charges, les justifier et discuter leur impact.
4. Construction
 - 4.1. Argumenter les choix faits pour la construction
 - 4.2. Argumenter les choix des matériaux
5. Conclusion
6. Annexes
 - 6.1. Dessin de construction de la pendulette avec liste de toutes les pièces
 - 6.2. Dessin de détail de la manivelle