

Automatisation d'une ancienne horloge.

Contexte

La tour de Dému (*photo 1*), petit village du Gers, abrite une ancienne horloge (*photo 2*) qui rythme la vie des habitants.

Aujourd'hui, le fonctionnement de cette horloge, nécessite l'intervention du curé deux fois par jour pour remonter les masses, seule source d'énergie (potentielle) pour faire fonctionner le mécanisme de l'horloge.

Pour éviter ces manipulations régulières du curé, devenues contraignantes, la mairie souhaite voir automatiser cette horloge. C'est tout l'objectif de cette étude.

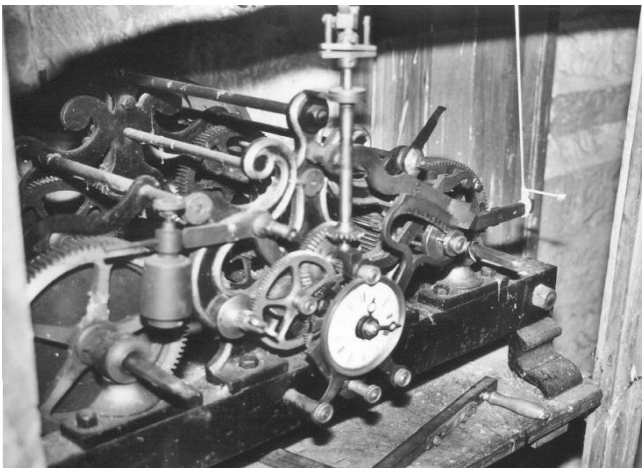


Photo 2 : Horloge en situation dans la tour

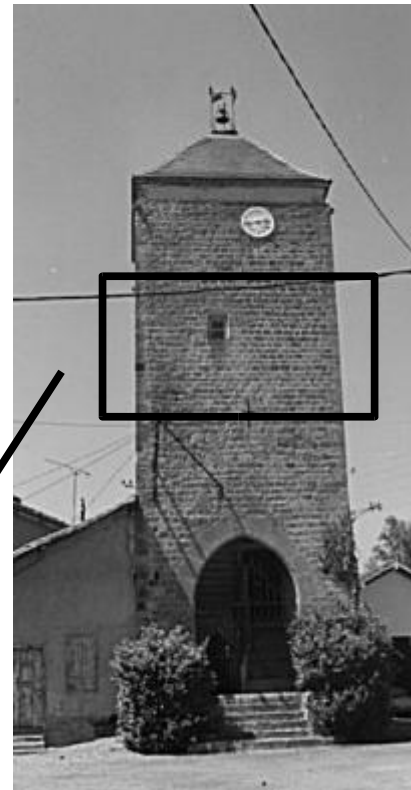


Photo 1 : Tour de Dému (Gers,32)

Présentation de l'horloge

Sa composition.

Cette horloge, dans son environnement d'étude en laboratoire (*photo 3*), est constituée principalement de:

- deux tambours semblables *Ta1* et *Ta2*, permettant, par l'intermédiaire d'une corde, d'assurer la descente et la remontée de 2 masses *Ma1* et *Ma2* (*figure 1*).
- un système d'engrenages, *En*, permettant de réaliser les rapports de réduction adéquates pour l'affichage correct de l'heure.
- un frein *Fr*.
- un balancier *Ba* (*figure 1*), placé sur la face arrière de l'horloge, pour cadencer le déroulement du temps.
- un ensemble de pièces *C* permettant de coupler le mécanisme d'horloge avec le mécanisme d'activation des cloches.

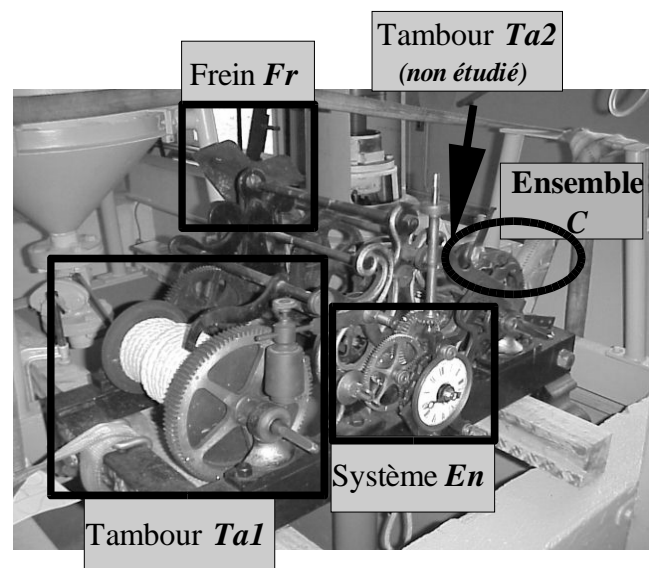


Photo 3 : Horloge en laboratoire

Description de son fonctionnement. (voir également le schéma "par blocs fonctionnels", **figure 1**)

La masse suspendue **Ma1** impose un couple moteur au tambour **Ta1** qui est transmis au système **En** par l'intermédiaire de roues et pignons dentés. La vitesse de dévidement du tambour **Ta1** est régulée par le mouvement du balancier **Ba** grâce à une liaison appropriée **L1** (**document 1**).

La descente de la masse **Ma2** suspendue au tambour **Ta2** permet d'entraîner le mécanisme d'activation de la cloche. Cette descente est régulée par la présence d'un frein aérodynamique **Fr**, visible sur la **photo 3** et sur la **figure 1** (il ne sera pas étudié). A chaque heure, la cloche sonne le nombre de coups indiquant l'heure, et sonne à nouveau ce même nombre de coups trois minutes après l'heure pile. Elle sonne également un coup à chaque demi-heure. Cette activation de la cloche est bien sûr réalisée sans aucune conséquence sur le fonctionnement horaire de l'horloge.

Le schéma suivant donne une représentation par "blocs fonctionnels" qui permet de distinguer les différents ensembles constituant l'horloge et les liaisons entre ces différents ensembles.

- B1:** Bloc associé au tambour **Ta1**.
- B2:** Bloc associé au tambour **Ta2**.
- B3:** Bloc associé au système d'engrenages **En**, comprenant le balancier **Ba**.
- B4:** Bloc associé à l'ensemble **C**.
- B5:** Bloc associé au frein **Fr**.

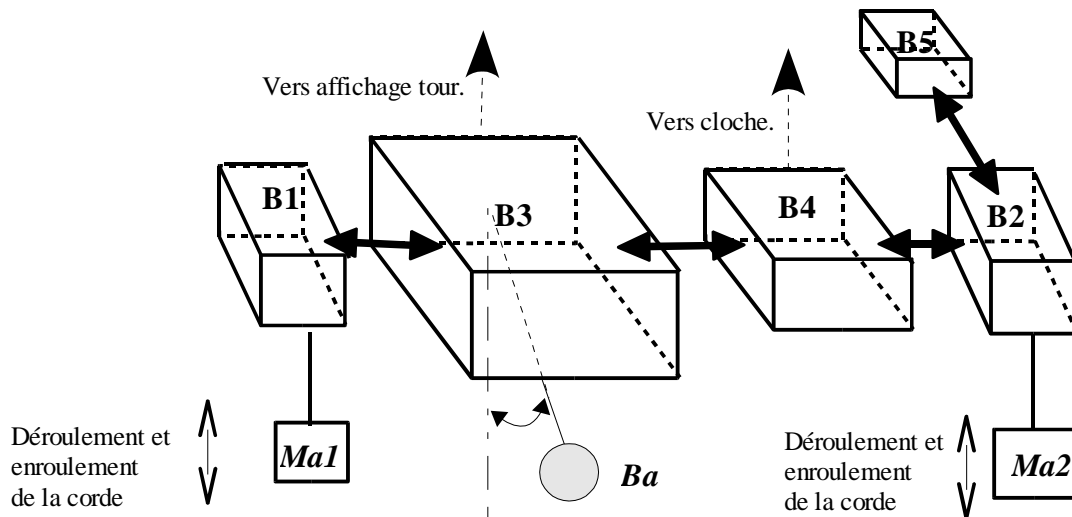


Figure 1: Schéma "par blocs fonctionnels"

Cahier des charges

La réhabilitation de cette ancienne horloge consiste essentiellement à automatiser la remontée des masses **Ma1** et **Ma2**. Celle-ci doit bien entendu se faire en respectant un certain nombre de contraintes et en particulier :

- l'âge de l'horloge. Il est préférable de ne démonter aucun élément qui pourrait nuire par la suite au bon fonctionnement de l'horloge.
- l'encombrement disponible. L'horloge est placée dans une sorte d'armoire disposée dans le corps de la tour. Tout élément rajouté, nécessaire à l'automatisation devra tenir compte de cet espace disponible.
- la remontée des masses doit se faire à un instant où les cloches ne sont pas en train de sonner et dans tous les cas avant que les masses n'atteignent le plancher quelques mètres plus bas !
- l'automatisation envisagée doit être la plus fiable possible et ne doit en aucun cas interférer sur la fonction principale de l'horloge, à savoir, donner l'heure la plus exacte possible à tout instant de la journée.
- un coût de réhabilitation minimal.

1ère partie : découverte et fonctionnement de l'horloge

L'objectif de cette partie est de découvrir certaines des solutions technologiques mises en oeuvre pour assurer le bon fonctionnement de cette horloge.

- 1 A partir du cahier des charges, du schéma "par blocs fonctionnels" proposé **figure 1** et du schéma cinématique fourni sur le **document 1** (liaisons avec le tambour **Ta2** non représentées),
 - 1.1 Précisez à l'aide d'un schéma explicite et en vous aidant de la numérotation des pièces,
 - * la ou les entrée(s) et sortie(s) pour l'ensemble du mécanisme.
 - * le cheminement de la puissance en fonctionnement normal puis lors de l'activation des cloches.
 - 1.2 Dégagez, sous forme de schéma, les différentes fonctions à assurer pour permettre le fonctionnement correct de cette horloge, en distinguant en particulier, la fonction principale des fonctions secondaires.
 - 1.3 Quelle est la fonction du balancier **Ba**? Quel type de liaison mécanique **L1** (voir **document 1**) envisagez-vous pour assurer cette fonction ? Faites un schéma.
 - 1.4 Sur un mouvement d'aller et retour du balancier **Ba**, la roue à encoches, repérée **I3** sur le **document 1**, a effectué 1/30^{ème} de tour. A partir des données fournies sur ce même document, déterminez la période de balancement du balancier **Ba** précédent pour assurer un affichage correct de l'heure? Faites l'application numérique.

- 2 On s'intéresse dans cette question au tambour **Ta1** (**photo 4**). Un dessin d'ensemble est fourni **document 2**.

Photo 4 : Tambour **Ta1**



- 2.1 Dans quel sens A ou B (**document 2**) faut-il manoeuvrer l'axe du tambour **Ta1** pour remonter la masse **Ma1** ?
- 2.2 Quelle est la fonction des 5 pions, repérés **31** sur le **document 2** ?
- 2.3 Quelle est la fonction des deux pions repérés **17** et **18** sur le **document 2** ?
- 2.4 Lors de la remontée de la masse **Ma1** reliée au tambour **Ta1** par une corde, il ne faut pas retarder l'heure indiquée par l'horloge. Pour cela, il est nécessaire de maintenir un couple moteur en entrée de l'horloge, c'est-à-dire faire en sorte que le couple exercé par la roue dentée **2** (**documents 1 et 2**) sur la roue **3** (**document 1**) soit toujours moteur. Pour assurer ce couple moteur, il faut bloquer en rotation, dans un sens, l'une des pièces du tambour **Ta1** (**document 2**) afin que le ressort **16** (détaillé **document 2**) emmagasine de l'énergie et la restitue à la roue **2**.

Quelle pièce faut-il bloquer en rotation ? Précisez par rapport à quelle autre pièce.
Proposez un schéma expliquant comment vous bloquer en rotation cette pièce en précisant le sens de rotation bloqué (sens A ou sens B).
- 2.5 Le ressort **16** subit un débattement angulaire maximum de $3,6^\circ$ (voir détail sur **document 2**).

Quelle doit être sa rigidité autour de l'axe longitudinal du tambour pour qu'il puisse transmettre un couple de 8 Nm pour ce débattement angulaire ?
Faites l'application numérique.
- 2.6 Quelle solution technologique retenez-vous pour guider en rotation le tambour **Ta1** par rapport au bâti **0** de l'horloge (**documents 1 et 2**) ?

Dessinez cette solution en complétant le **document 5 à rendre avec votre copie**. Vous indiquerez les ajustements éventuellement nécessaires.

2ème partie : analyse mécanique de l'horloge

Cette partie porte sur l'analyse mécanique de certains des sous-ensembles constituant l'horloge.

1 Le schéma cinématique du **document 1** permet de visualiser les engrènements réalisés entre les différentes roues dentées.

1.1 *Quelle(s) précaution(s) doit(vent) être prise(s) pour réaliser un engrènement correct entre 6 et 7?*

1.2 *Quelle solution technologique retenez-vous pour réaliser les liaisons pivot entre les axes des pièces 6, 7 et le bâti 0 de l'horloge? Justifiez votre réponse.*

2 L'enroulement des cordes (auxquelles sont suspendues les masses **Ma1** et **Ma2**) sur les tambours **Ta1** et **Ta2** doit être régulier et peut se faire sur plusieurs couches. On s'intéresse en particulier dans cette question à l'enroulement sur le tambour **Ta1**, **document 3**,

2.1 *Calculez, à partir des données fournies, le nombre de tours effectués par le tambour **Ta1** en 1 heure.*

2.2 En supposant que la corde enroulée sur le tambour ne forme qu'une couche (pas de superposition),

*Calculez, au point P situé sur l'axe du tambour **Ta1**, la projection sur \vec{z}_0 du moment $\vec{M}_p(Ma1 > Ta1)$ exercé par la masse **Ma1** sur le tambour **Ta1**.*

2.3 Sachant maintenant que la longueur de la corde reliant **Ma1** et **Ta1** permet au maximum l'enroulement de trois couches de corde sur le tambour et d'une couche au minimum,

Calculez alors la variation de la composante $\vec{M}_p(Ma1 > Ta1) \cdot \vec{z}_0$ du moment exercé par la masse sur le tambour.

3 On souhaite désormais étudier le mouvement oscillant du balancier **Ba** placé à l'arrière de l'horloge. On retient pour cela le modèle simplifié proposé à la **figure 1** du **document 4**.

3.1 Le corps de ce balancier est constitué d'une lame flexible (déformable), d'un bras et d'un disque supposés indéformables.

Expliquez le rôle de cette lame.

3.2 On modélise la rigidité de la lame précédente par une raideur équivalente de flexion k_{lame} autour de l'axe \vec{z}_0 , que l'on se propose de caractériser à partir d'un modèle d'identification de poutre (**figure 2** du **document 4**). La lame est en acier, matériau supposé homogène, isotrope à comportement élastique linéaire de module d'Young $E=200$ GPa et de coefficient de Poisson $\nu=0,3$. Le modèle de poutre retenu est celui de Navier –Bernoulli (les sections droites restent droites et perpendiculaires à la ligne moyenne).

A partir des données des **figures 1** et **2** du **document 4**,

Déterminez en G (centre de surface de la section droite de la poutre) le torseur des efforts de

cohésion $\{\tau_{coh}\}_G = \left\{ \begin{matrix} \vec{R} \\ \vec{M}_G \end{matrix} \right\}$ dans la poutre, dans la base $(\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$.

Exprimez la relation analytique liant l'effort F et la flèche V_l à l'extrémité A de la poutre.

En déduire, en fonction de ses caractéristiques mécaniques et géométriques, l'expression

analytique de la rigidité équivalente k_{lame} de cette lame.
Faites l'application numérique.

Nota: vous prendrez soin de justifier correctement les conditions aux limites utilisées.

- 3.3 Pour un débattement angulaire ϑ du balancier par rapport à sa position d'équilibre stable, le couple de rappel, supposé linéaire, vaut $\vec{C}r_o = -k_{lame} \vartheta \vec{z}_0$. Le moment d'inertie, en O, par rapport à l'axe \vec{z}_0 , du balancier $Ba = \{\text{bras} + \text{disque} + \text{lame}\}$, supposé connu, est noté $I_{zz} = I_{zz}(0, E)$. La masse du bras et de la lame sont négligées devant celle du disque m_d . Les actions sur le balancier dues à la liaison **L1 (document 1)** sont représentables, en O, par le torseur couple $\{\tau_{LI>Ba}\}_0 = \left\{ \begin{array}{c} \vec{0} \\ \vec{C}_o(LI>Ba) = C_{LI>Ba} \vec{z}_0 \end{array} \right\}$. Les liaisons sont supposées parfaites.

A partir des données géométriques et du paramétrage proposé,

Traduisez l'équilibre dynamique du balancier par la méthode de votre choix et établissez alors l'équation du mouvement oscillant du balancier pour de petites amplitudes d'oscillations (ϑ sera supposé petit, on supposera donc $\sin \vartheta \sim \vartheta$).

Nota: Vous mettrez cette équation sous la forme $\ddot{\vartheta} + \omega_0^2 \vartheta = C_{ext>Ba} / I_{zz}$ où $\ddot{\vartheta}$ désigne la dérivée seconde par rapport au temps de ϑ , et ω_0 , la pulsation propre de l'ensemble. On rappelle que ω_0 est reliée à la période T_0 par la relation $T_0 = 2\pi / \omega_0$.

- 3.4 On suppose connus la masse m_d , le moment d'inertie I_{zz} et l'accélération de la pesanteur \vec{g} ,

Expliquez comment obtenir I_{zz} par les calculs, sans les effectuer.

Quelle quantité peut-on mesurer expérimentalement pour identifier la rigidité équivalente k_{lame} ?

3ème partie : étude de solutions possibles

L'automatisation de la remontée des masses **Ma1** et **Ma2** suppose la détection de la position de ces masses à des moments opportuns pour ne pas nuire au bon fonctionnement de l'horloge. Par exemple, la remontée des masses au moment où les cloches sonnent n'est pas du tout souhaitable.

Une énergie extérieure, fournie par un ou plusieurs moteurs électriques, est par ailleurs retenue pour réaliser la remontée de ces masses.

En considérant ces deux aspects, nous nous proposons d'étudier dans cette partie, la viabilité de différentes solutions envisageables.

1 Plaçons nous dans le cas où on utilise un seul moteur.

Il est indispensable de prévoir un accouplement tambours/moteur afin de relier chaque tambour **Ta1** et **Ta2** au moteur qui remontera les masses **Ma1** et **Ma2**.

1.1 *Quel est, selon vous, l'inconvénient majeur d'un accouplement permanent entre tambour et moteur?*

1.2 *Pour réaliser la fonction souhaitée, un système de roue libre est-il envisageable? Justifiez votre réponse.*

1.3 *Proposez, en vous aidant de schémas, deux solutions technologiques permettant de réaliser un accouplement temporaire.*

2 On s'oriente maintenant vers une solution technologique avec deux moteurs : un pour remonter chaque masse.

2.1 *Quel(s) avantage(s) présente(nt) l'utilisation d'un moteur par masse à remonter au lieu d'un seul moteur pour remonter les deux masses?*

2.2 On considère que 30 s est une durée raisonnable pour remonter la masse **Ma1=12 kg** d'une hauteur $h=6$ m.

Calculez la puissance moyenne nécessaire à cette remontée et faites l'application numérique avec $|\vec{g}|=9,81 \text{ ms}^{-2}$.

2.3 Sachant que le rendement du système mécanique (engrenages, paliers lisses, accouplement, etc...) est de 0,45

*En déduire la puissance moyenne que le moteur devra effectivement développer pour la remontée de cette masse **Ma1**? Faites l'application numérique.*

3 On se préoccupe dans cette question de la nature, du nombre et du positionnement des capteurs à mettre en place autour de cette horloge pour assurer son automatisation.

3.1 *Quel type de capteurs envisagez-vous pour cette application?*

3.2 *Précisez, à l'aide d'un schéma, le nombre ainsi que l'emplacement des capteurs que vous envisagez d'utiliser.*

Liste des documents joints

Photographies dans le corps du sujet :

- Photo 1 : Tour de Dému (Gers, 32).
- Photo 2 : Horloge en situation dans la tour.
- Photo 3 : Horloge en laboratoire.
- Photo 4 : Tambour *Ta1*.

Figure dans le corps du sujet :

- Figure1 : Schéma ''par blocs fonctionnels''.

Documents séparés :

- Document 1 : Schéma cinématique (partiel).
- Document 2: Dessin d'ensemble du tambour *Ta1* à l'échelle 1/2
+ Détail du ressort à l'échelle 1/4.
- Document 3 : Enroulement de la corde sur le tambour *Ta1*.
- Document 4 : Figure 1 : Modèle simplifié du balancier.
Figure 2 : Modèle de poutre pour la lame flexible.
- Document 5: Dessin partiel de la liaison tambour *Ta1*/bâti (0),
A RENDRE AVEC VOTRE COPIE