OLYMPIADES DE LA PHYSIQUE 1999-2000

LYCEE JULES HAAG BESANCON

De la clepsydre à l'horloge atomique :

Le temps et sa mesure

Les élèves :

Julien FORESTIER
Céline HENRIOT
Sébastien RENAUD
Frédéric RIBERA

Et leurs professeurs :

Pierre BARDET
Dominique SACEPE

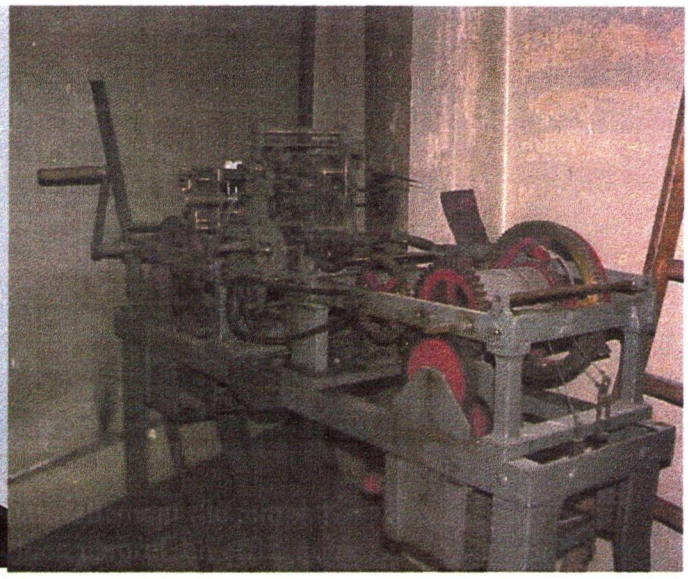
Sommaire :

Quel sujet choisir ?	1
1 Les clepsydres	2
2 Horloge mécanique à foliot	9
3 Horloge mécanique à balancier	14
4 Autres horloges	20
5 Horloge atomique	23
6 Le signal DCF 77	27
7 Conclusion	29
8 Evolution de la mesure du temps	30
Bibliographie et remerciements	31

Quel sujet choisir pour ces olympiades ?

A la rentrée scolaire de l'an 2000, un sujet s'imposait naturellement : le temps !
Pour nous, élèves du Lycée Jules Haag, ce choix était bien naturel, en effet, notre Lycée s'appelait autrefois : ECOLE NATIONALE D'HORLOGERIE.
Et n'oublions pas que notre région a un passé riche dans les domaines de l'horlogerie et de la micromécanique.

Le lycée Jules Haag



L'ancienne horloge du lycée

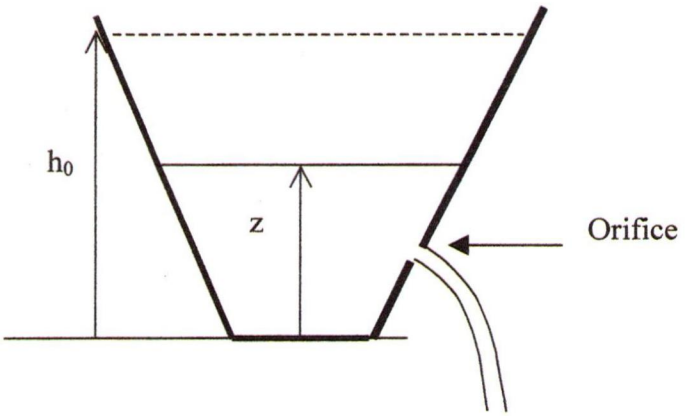
Une des premières visites fut pour l'horloge du Lycée. Cette horloge par ses sonneries désagréables rythme le temps des élèves, et par son écran géant donne l'heure à presque toute la ville de Besançon. Sa mécanique moderne semble simple : un moteur fait tourner les aiguilles et quelques appareillages électriques ou électroniques se chargent des sonneries. Mais c'est dans un coin, sous la poussière que le mécanisme d'origine a été sauvé de la poubelle et attend une restauration. On y reconnaît bien la mécanique traditionnelle : poids, balancier, engrenages et beaucoup de pièces dont le rôle n'est pas évident. L'horloge est placé juste sous la coupole de l'observatoire du Lycée. Est-ce une coïncidence, une nécessité architecturale ou n'y aurait-il pas un lien entre l'heure et le ciel ?

C'est dans un musée que nous avons cherché à comprendre l'histoire du temps. A Besançon le musée du temps ouvrira bientôt ses portes ! C'est donc chez nos voisins Helvétiques que nous avons trouvé une exposition sur le temps et sa mesure : Cadran solaires, Clepsydres, Horloges à Foliot, Horloges à balancier, Montres, Quartz, Horloge atomique…Il fallait bien faire un choix dans ce vaste domaine.

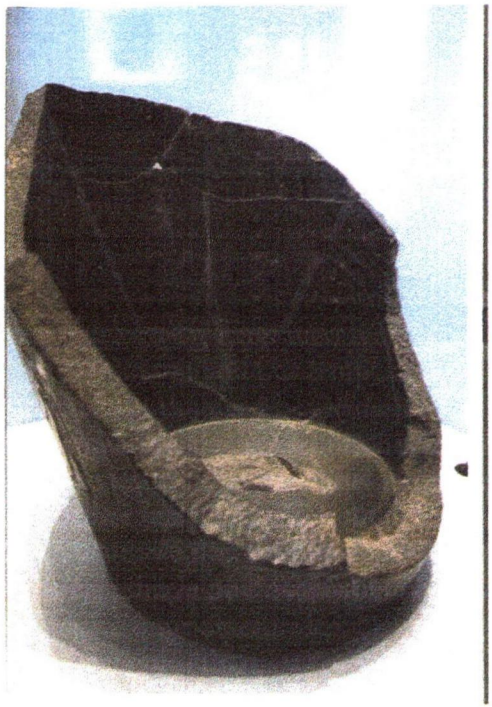
Nous avons décidé d'étudier le principe et quelques applications de l'horloge atomique qui nous a séduit par sa précision. C'est à l'observatoire de Besançon que nous avons choisi notre partenaire et vu une des meilleures horloges atomique du monde. Simultanément nous avons "remonté le temps" et tenté de réaliser et d'étudier quelques maquettes d'horloges qui ont marqué l'histoire de la mesure du temps. Ainsi nous avons du aborder des domaines de la Physique assez variés comme : La dynamique des fluides, la Mécanique, l'Electricité et un peu l'Electronique.

1 Les Clepsydres.

Le cadran solaire présente un inconvénient : il ne permet pas de mesurer des durées en l'absence de soleil soit la nuit soit par temps couvert. Les anciens ont eu l'idée d'utiliser l'écoulement de l'eau pour donner l'heure de jour comme de nuit, été comme hiver. Les instruments de mesure du temps basés sur ce principe sont appelés clepsydres. Les premières clepsydres ou horloges à eau fonctionnaient selon le principe suivant : un récipient conique percé d'un trou à sa base est rempli d'eau : lors de l'écoulement de l'eau le niveau de la surface libre s'abaisse, il est alors possible d'établir une relation entre la position h de la surface libre de l'eau et la durée Δt de l'écoulement de l'eau. les anciens ont fait preuve de beaucoup d'imagination et d'une grande ingéniosité pour obtenir des clepsydres qui donnent des mesures du temps relativement précises et reproductibles.

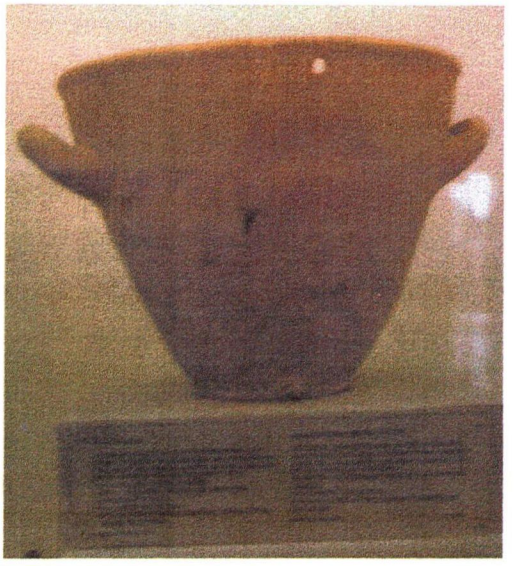


Actuellement on sait que les plus anciennes horloges à eau du bassin méditerranéen (Egypte) datent de 1400 av. JC et que certaines ont été utilisées en Europe jusqu'au début du 19° siècle (Musée du temps à Besançon). Les différentes clepsydres retrouvées à ce jour se présentent sous les formes les plus diverses cela va de la clepsydre la plus simple : récipient conique percé d'un trou à sa base à la clepsydre la plus sophistiquée où l'eau qui s'écoule entraîne un mécanisme complexe.



Clepsydre EGYPTE
Époque PtoléméeII
Musée Barracco
ROME
Basalte noir hauteur 30cm
(On distingue des graduations à l'intérieur)

Vases étalons utilisés pour remplir les clepsydres
Musée de l'agora. Athènes



Clepsydre
Musée de l'agora Athènes

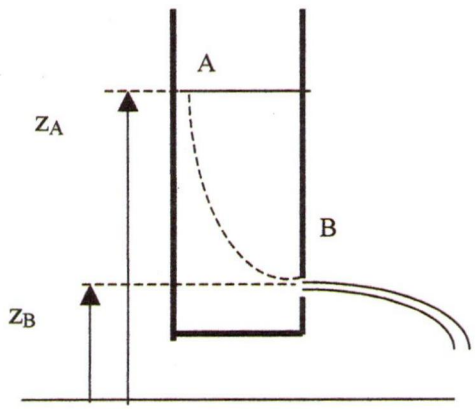
Dans l'antiquité l'horloge à eau pose un problème majeur : il est quasiment impossible d'obtenir une indication des heures d'égale durée et par conséquent il est impossible d'effectuer une mesure du temps avec précision. A cette époque on ne dispose pas des lois de l'hydraulique et malgré l'ingéniosité de certains dispositifs il est difficile de réaliser des égalités de durées à partir du repérage d'un niveau de fluide qui s'écoule. Le but ultime recherché est de pouvoir faire correspondre des variations de niveau de fluide proportionnelles à des durées et ceci quelles que soit l'heure et le jour.

Dans ce qui suit nous avons joué à reproduire les essais des fabricants de clepsydre de l'antiquité (avec beaucoup moins d'ingéniosité) afin de comprendre les difficultés qu'ils ont rencontré puis nous avons cherché à réaliser une clepsydre à notre manière en tenant compte des lois établies en hydraulique au 18° siècle.

1 Tout d'abord nous avons utilisé le premier récipient que nous avions à notre disposition soit un **réservoir cylindrique** percé latéralement d'un petit orifice à sa partie inférieure et rempli d'eau.

Nous avons observé l'écoulement de l'eau au cours du temps. L'orifice est disposé latéralement de manière à permettre l'observation du jet de sortie.

On observe simultanément que le niveau de la surface libre de l'eau baisse de manière variable au cours du temps et que la forme du jet évolue au cours du temps.



L'abaissement du niveau très rapide au départ se poursuit en ralentissant régulièrement tandis que le jet qui a la forme d'une parabole de grande portée au départ voit sa portée diminuer régulièrement au cours du temps.

On observe simultanément que le niveau de la surface libre de l'eau baisse de manière variable au cours du temps et que la forme du jet évolue au cours du temps.

Interprétation .

Considérons une ligne de courant du fluide qui s'écoule, et sur cette ligne choisissons deux points A et B auxquels nous appliquerons le théorème de Bernouilli .

$\frac{1}{2}\rho\ U_A^2 + P_A + \rho\ g\ z_A = \frac{1}{2}\rho U_B^2 + P_B + \rho\ g\ z_B$ (ici on ne tient pas compte des pertes d'énergie)

ρ = masse volumique du fluide.
P = pression du fluide au point considéré.
Z = ordonnée du point considéré.
U = vitesse du fluide au point considéré.

On sait que le débit volumique peut s'écrire en posant S_A =surface de la section du réservoir en A et S_B = surface de l'orifice.

$S_A U_A = S_B U_B$ ce qui donne $U_A = \frac{S_B U_B}{S_A}$

*Compte tenu des valeurs numériques de S_A et de S_B on remarque que $\frac{S_B}{S_A} < 1$. Par conséquent $U_A < U_B$ et $U_A^2 << U_B^2$ ce qui nous amène à négliger le terme $\frac{1}{2}\rho U_A^2$ devant $\frac{1}{2}\rho U_B^2$.

* A et B sont à la pression atmosphérique par conséquent $P_A = P_B$

L'équation devient $\rho g z_A = \frac{1}{2}\rho U_B^2 + \rho g z_B$

Et la vitesse de sortie U_B s'écrit

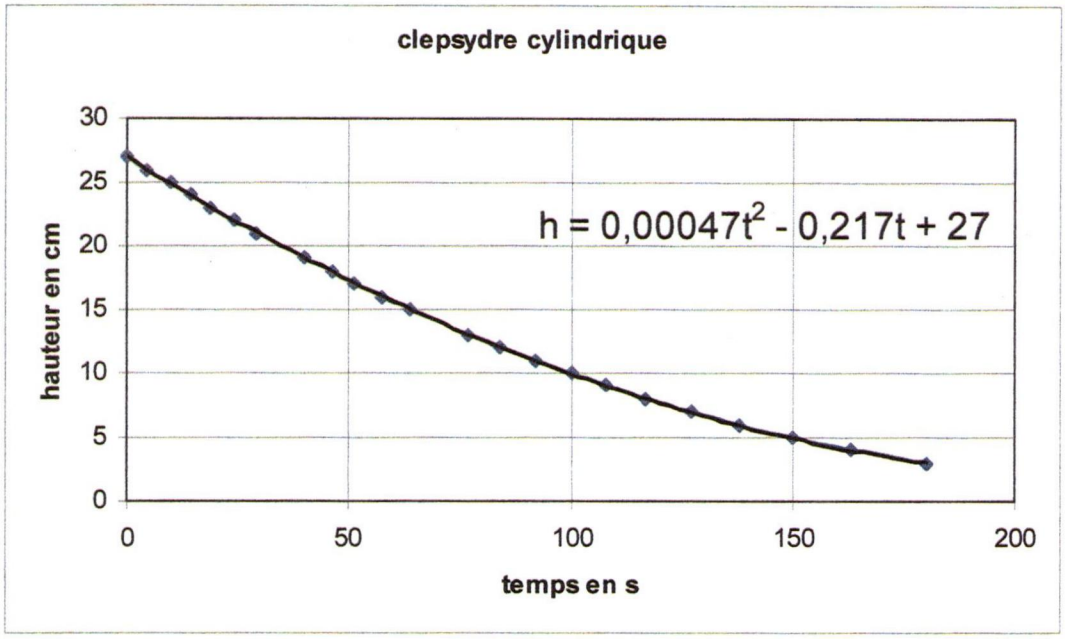
$U_B = \sqrt{2g(z_A - z_B)}$. Si on choisit z_A =0 et z_A=z (variable)

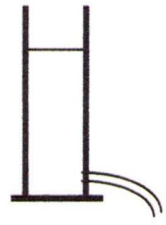
$U_B = \sqrt{2gz}$.

On remarque que la vitesse de sortie du jet varie comme $\sqrt{z}$ cela explique la grande vitesse observée au début de la vidange (z est grand) ainsi que la faible vitesse à la fin où z devient très faible.

L'abaissement du niveau très rapide au départ se poursuit en ralentissant régulièrement tandis que le jet qui a la forme d'une parabole de grande portée au départ voit sa portée diminuer régulièrement au cours du temps.

Nous avons voulu retrouver expérimentalement la loi de variation du niveau du fluide en fonction du temps.

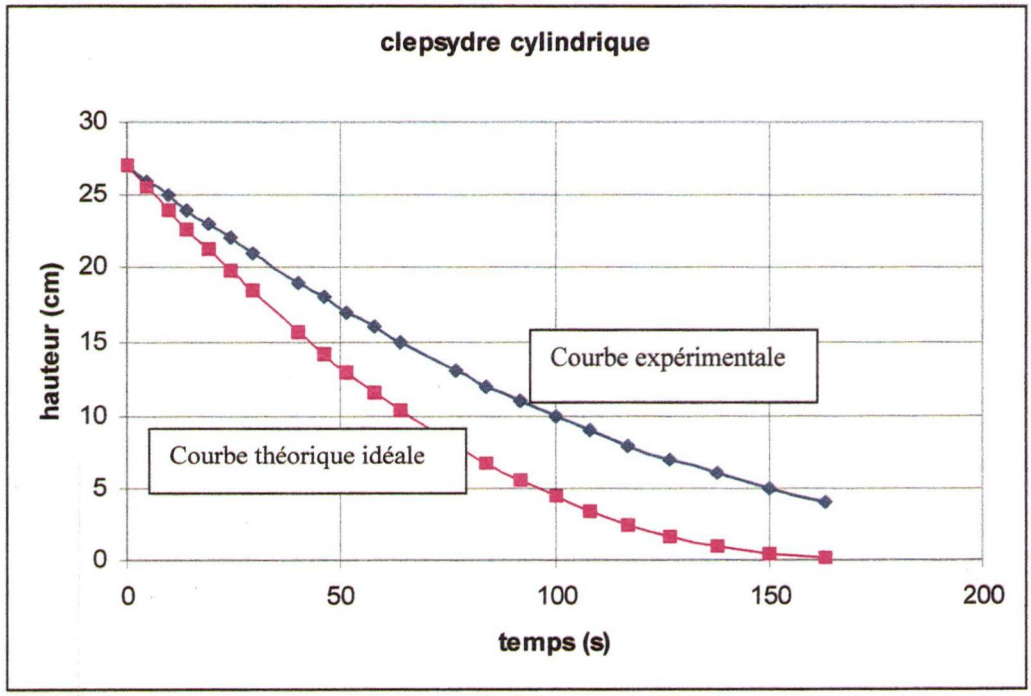




La théorie donne la loi de variation du niveau z de la surface libre de l'eau en fonction du temps t :

$$z = \frac{g}{2}\frac{s^2}{S^2}t^2 - \frac{s}{S}(2gz_M)^{\frac{1}{2}} + z_M$$

g représente l'accélération de la pesanteur
s..... la surface de l'orifice
S..... la surface de la section du réservoir (surface libre du liquide)
z_M ..... la cote de la surface libre du liquide à l'instant t = 0



Le réservoir cylindrique que nous utilisons a un diamètre D = 0,08m , l'orifice a un diamètre de 5 mm. Initialement ce réservoir est rempli jusqu'à un niveau z_M = 0,27 m.

Si on trace la courbe théorique $z = \frac{g}{2}\frac{s^2}{S^2}t^2 - \frac{s}{S}(2gz_M)^{\frac{1}{2}} + z_M = 0.00097t^2\text{-}0{,}323t+27$

on remarque qu'elle s'écarte notablement de la courbe expérimentale. La précision de la mesure du diamètre du trou est peut-être la cause de cet écart. C'est peut-être aussi parce que l'eau perd de l'énergie en passant par l'orifice ; cette énergie dépend de la vitesse donc varie au cours du temps.

Ce type de clepsydre présente plusieurs inconvénients

1. initialement le phénomène est très rapide puis il ralentit,
2. au cours de l'écoulement le fluide perd de l'énergie or cette énergie perdue dépend de la vitesse du fluide ce qui intervient aussi dans la variation de la précision.
3. L'écoulement n'a pas la même durée selon que l'eau est froide ou chaude c'est à dire selon que l'on est en hiver ou en été.

Conclusion :

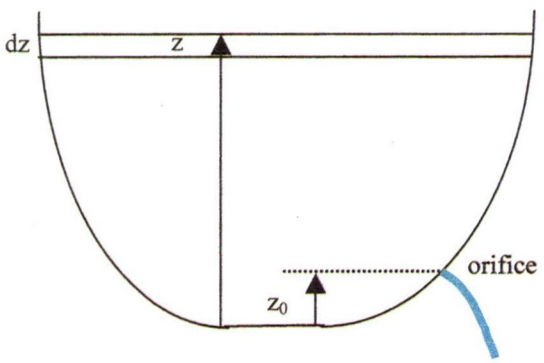
Si l'on veut utiliser ce réservoir comme horloge la correspondance niveau – temps donne une échelle non linéaire.

La précision varie au cours du temps.

2 **Nous avons recommencé l'expérience avec un saladier de forme '' arrondie''** ceci pour deux raisons : la plupart des clepsydres antiques ont une forme évasée et de plus nous avions un document qui nous indiquait que lorsque le profil du réservoir est une courbe du type $z = ar^4 + b$ il est possible d'observer des variations de niveau égales pendant des durées égales. (r est le rayon de la clepsydre en un point de cote z, a et b sont des constantes)

Nous avons pu retrouver pourquoi le niveau de l'eau s'abaisse à vitesse constante lorsque le profil de la clepsydre est de la forme

$z = ar^4 + b$



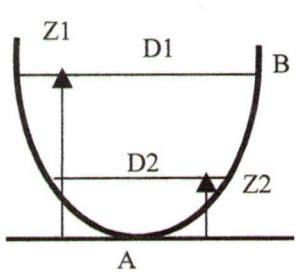
Si pendant un petit intervalle de temps dt le niveau de la surface libre S s'abaisse de dz le volume de fluide déplacé dv a pour expression Sdz et c'est le même volume qui s'écoule par l'orifice O de surface s on peut de même écrire

$dv = s\sqrt{2g(z-z_o)}\,dt$

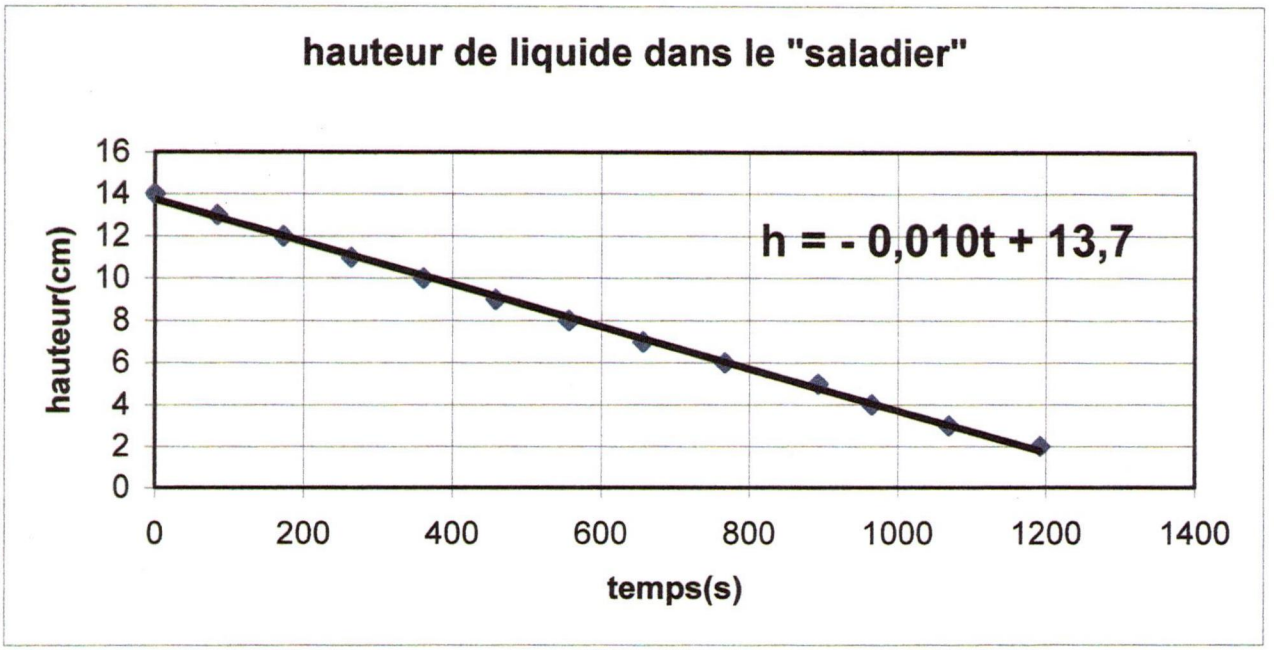
Il suffit ensuite d'écrire que le débit du fluide a même valeur dans une section large qu'à travers l'orifice soit $S\frac{dz}{dt} = s\sqrt{2g(z-z_o)}$.

Si le niveau s'abaisse à vitesse constante c'est que $\frac{dz}{dt} = k$ et finalement en posant $S = \pi r^2$ on trouve l'équation

$z = \frac{\pi^2 r^4 k^2}{2gs^2} + z_0$ d'où $a = \frac{\pi^2 k^2}{2gs^2}$

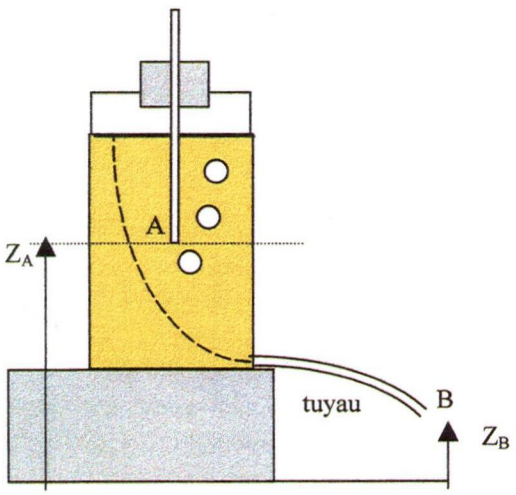


Si les points AB appartiennent à une courbe du type $z = ar^4 + b$ on obtient $a = \frac{z_1 - z_2}{r_1^4 - r_2^4}$ à partir des mesures telles que D_1 ,D_2 ,Z_1 ,Z_2 sur le réservoir.



Ce dernier récipient présente l'avantage de donner des variations de niveau égales pendant des durées égales. Cependant avec ce dispositif le fluide perd une énergie qui dépend de la vitesse de sortie du jet et de la section du récipient donc la précision de la mesure varie la aussi au cours du temps

3 Finalement nous avons décidé de faire une maquette de clepsydre où les débits de fluides seraient constants et facile à régler.



Pour cela nous nous sommes inspirés du vase de Mariotte.

Nous observons que le débit est constant au cours de l'écoulement car la portée du jet qui sort du réservoir est constante.

Explication

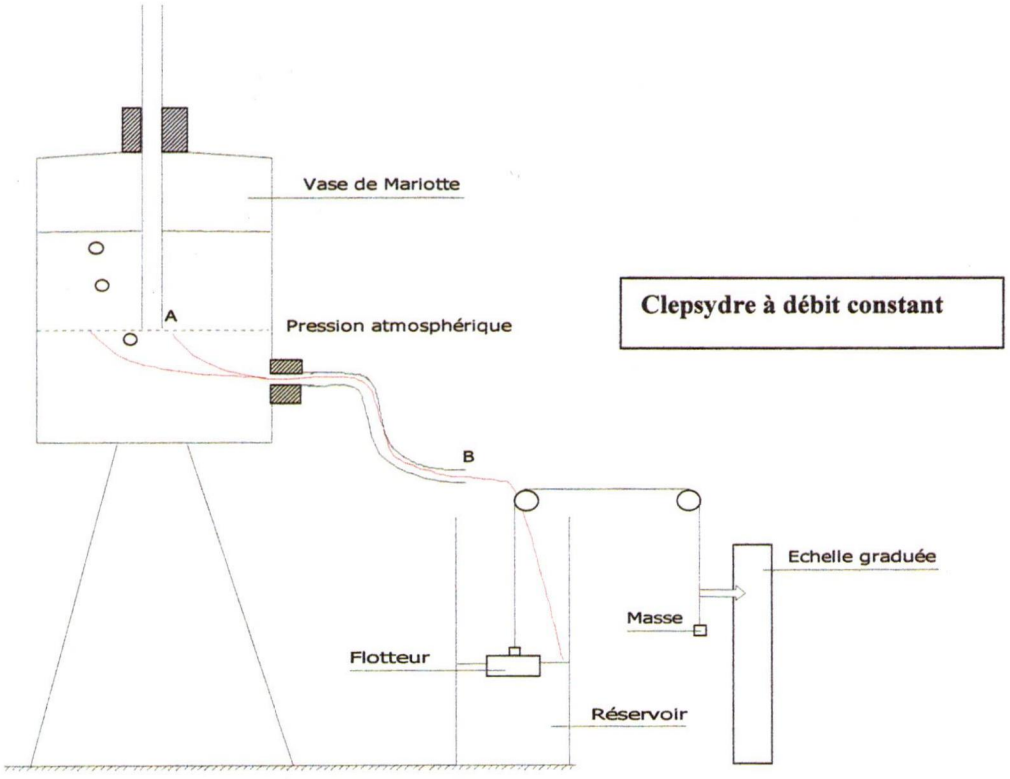
Le bouchon du réservoir à section constante est traversé par un long tube qui permet de faire communiquer le point A du liquide avec l'atmosphère. L'eau sort en B par un tuyau souple situé à la base du réservoir. Sur le plan horizontal qui passe par A règne la pression atmosphérique.

Appliquons le théorème de Bernoulli aux points A et B

$$\frac{1}{2}\rho U_A^2 + P_A + \rho g z_A = \frac{1}{2}\rho U_B^2 + P_B + \rho g z_B .$$

Comme $\frac{1}{2}\rho U_A^2 < \frac{1}{2}\rho U_B^2$. et $P_A = P_B$, la vitesse $U_B = \sqrt{2g(z_A - z_B)}$.

Dans ce montage (z_A - z_B) est contant, par conséquent U_B est constante cela permet donc d'observer des déplacements égaux du niveau de la surface libre du liquide pendant des durées égales.



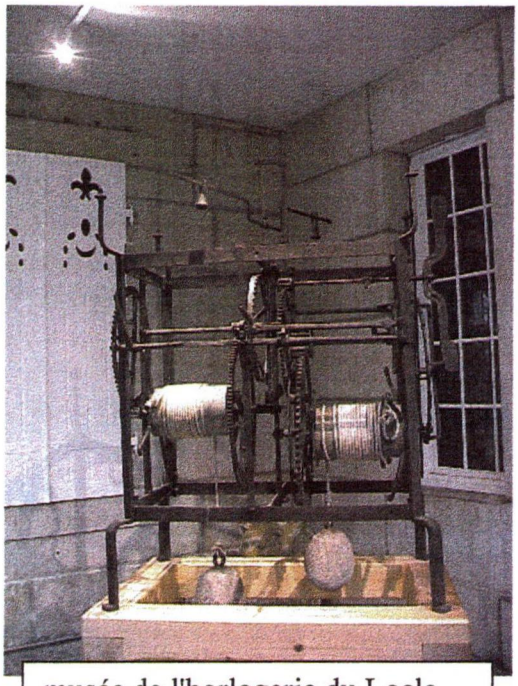
Clepsydre à débit constant

Dans notre maquette, le réglage qui permet d'avoir le même débit en été et en hiver (l'eau à 25°C s'écoule plus vite que l'eau à 5°C) est relativement simple : il suffit de régler la vitesse de sortie en observant la portée du jet.

Tandis que l'utilisation des clepsydres les plus sophistiquées se poursuivait en Chine, apparaissaient en Euroope au XIII^{ème} siècle les premières horloges mécaniques.

2 Horloge mécanique à foliot.

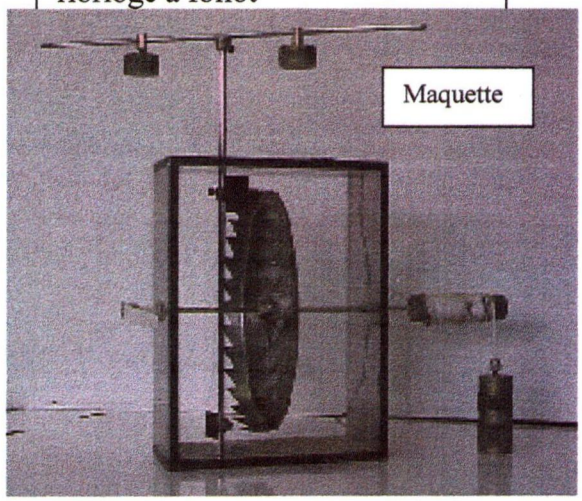
Nous avons vu un superbe exemplaire de ce type d'horloge au musée du LOCLE (CH). Elle comporte une mécanique en fer et un poids en pierre : au XIII ème siècle les premiers horlogers étaient des forgerons. Elle était placée dans un clocher pour donner l'heure à toute une cité et son cadrant n'avait qu'une aiguille : celle des heures ! Sa précision était très mauvaise à cause d'un réglage difficile et d'un principe rustique. Elle pouvait varier d'une heure par jour. A quoi bon indiquer les minutes !
Nous avons cherché à réaliser une maquette, avec les matériaux de notre époque, pour mieux comprendre le fonctionnement. Dans un ouvrage d'horlogerie (Bouasse) nous avons trouvé un descriptif complet et le plan des pièces essentielles : roue de rencontre, palettes, verge, foliot.
Le foliot : ce mot n'est plus dans le dictionnaire mais il signifie "fou, agité, toujours en mouvement"



musée de l'horlogerie du Locle
Horloge à foliot

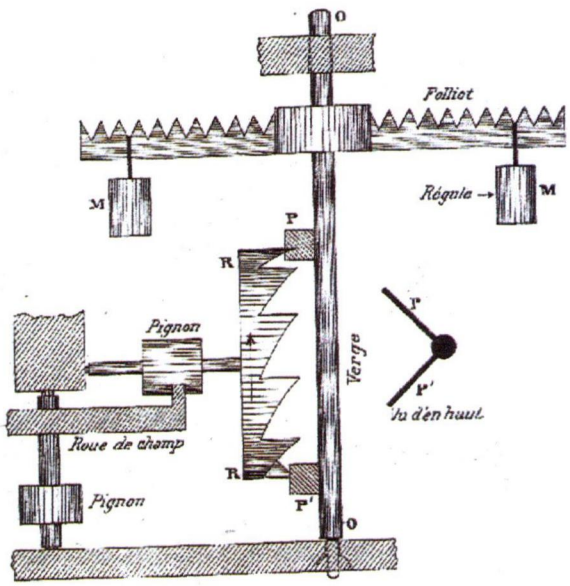
.2.1 Principe simplifié :

L'idée des premiers horlogers était d'actionner l'aiguille des minutes par la chute d'un poids. Mais ils avaient remarqué que cette chute se fait de manière accélérée. Il faut donc ralentir cette chute, pour ne pas avoir à remonter le poids trop souvent. Un mécanisme avec rouages ou pignons s'en charge. Il faut surtout que cette chute soit très régulière au cours du temps pour qu'il y ait une relation linéaire entre le temps et la position de l'aiguille. Or la chute d'un poids est complexe et comporte toujours une phase d'accélération. Le mouvement devient uniforme seulement quand les frottements équilibrent la force motrice qui est le "poids du poids". Les frottements sont très peu reproductibles, donc la vitesse de chute est très aléatoire !



Maquette

L'astuce consiste à mettre en mouvement, par l'action de la roue de rencontre et de la palette, un bras horizontal lesté appelé foliot. La rotation s'achève lorsque la palette quitte la roue de rencontre (c'est l'échappement). alors, l'autre palette vient en contact avec une dent diamétralement opposée qui oblige le foliot à changer le sens de sa rotation. Une période s'est écoulée et ensuite le mouvement alternatif continue. Par ses "clic,clac" l'horloge découpe le temps. L'aiguille tourne régulièrement.



Gravure extraite du livre de M. BOUASSE
"Pendules, diapason..." Delagrave

Comment régler cette horloge pour qu'elle indique les heures ou les minutes ?
Comment le mouvement de l'aiguille (ou du poids) peut-il être linéaire ? La rotation alternée du foliot est une successions de phases pendant lesquelles le mouvement n'est jamais uniforme !
Pourquoi son utilisation a-t-elle été abandonnée et d'ou vient son manque de précision ?
Pour aller plus loin on a pensé faire des expériences et des enregistrements pour voir les différentes phases du mouvement.

2.2 Comment régler l'horloge ?

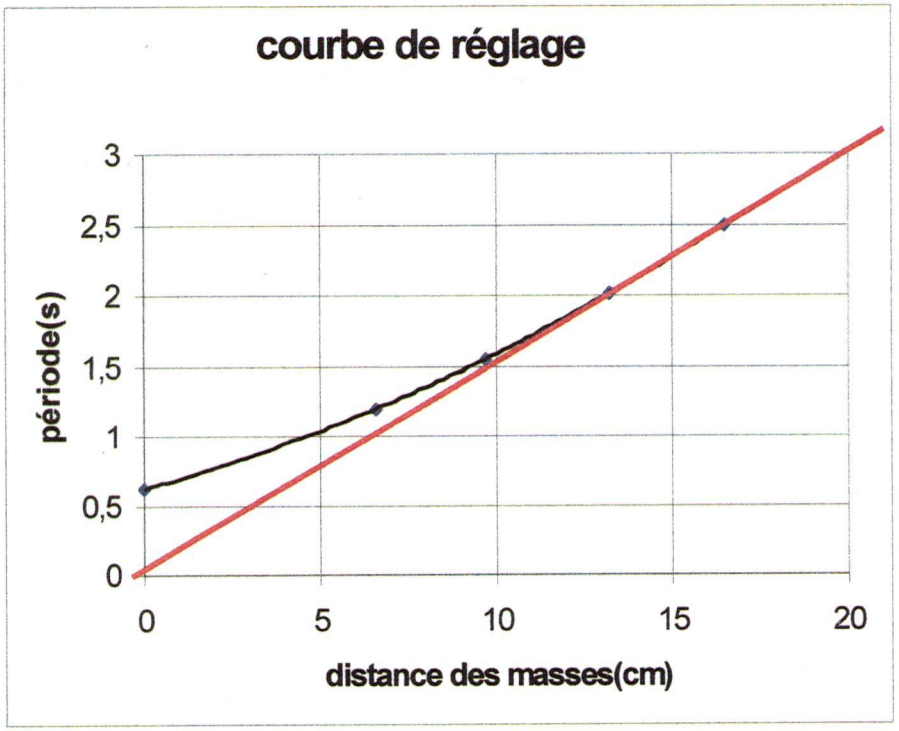
-Par le poids : c'est facile, il suffit d'augmenter la masse du poids pour voir l'horloge aller plus vite.

Mais la relation n'est pas linéaire. Si on double le poids, la période ne double pas et si on diminue le poids, l'horloge cesse de fonctionner. De plus une goutte d'huile bien placée modifie les résultats. Nous n'avons pas fait d'étude complète de cette option.

- En modifiant la position et l'écartement des palettes par rapport à la roue de rencontre la rotation du foliot est fortement modifiée. A la construction, nous avons eu un peu de mal à ajuster la position de ces éléments et il ne nous a pas été possible de faire une étude de ces paramètres trop nombreux et difficilement mesurables. L'usure ou les démontages et remontages changent donc la période.

- Par la position des masses du foliot. Les gravures anciennes montrent bien des encoches sur le foliot et des masses mobiles. Si on écarte les masses, le foliot n'est pas plus lourd, mais il met plus de temps à se mettre en mouvement. (son inertie augmente)

Essais :
Pour enregistrer la marche de la maquette on a utilisé un capteur de chocs piézoélectrique.
Avec un système d'aquisition on mesure la durée de 30 périodes (un tour complet pour gommer les irrégularités des dents)



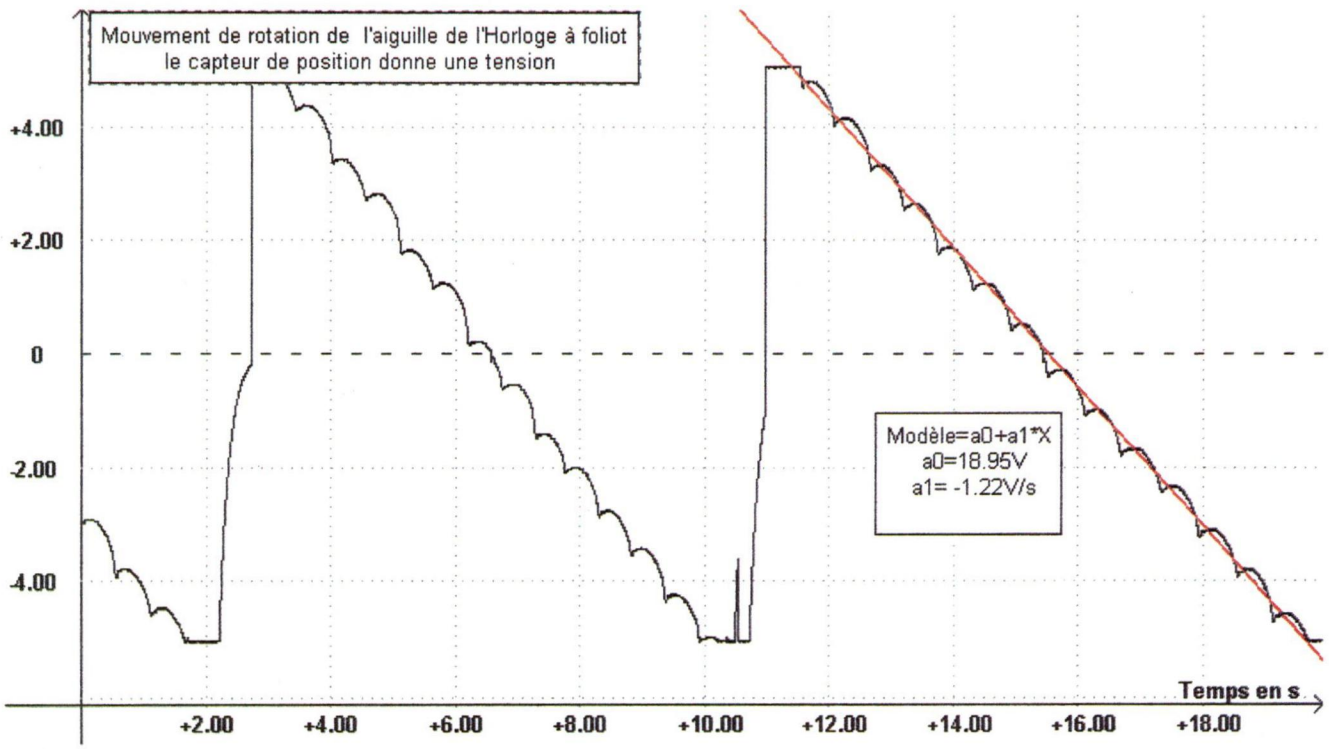
Résultats

La relation n'est pas évidente.
La période semble proportionnelle à la distance des masses seulement pour des distances suffisantes.

Avec d=0 (masses mises l'une sur l'autre sur l'axe de rotation) la période n'est pas nulle. Le support des masses et la roue de rencontre ont aussi une inertie.
On dispose donc d'une courbe qui permet le réglage à coup sur de l'horloge.

On pense alors que l'horloger du village qui ne possédait pas cette courbe devait se faire bien du souci et faire de nombreux essais successifs. De plus cette courbe cesse d'être utilisable dès que l'horloge a été démontée car les positions, lubrifications des pièces ne sont plus les mêmes.
Par la théorie, c'est avec les moments d'inertie qu'il faut résoudre le problème : le moment d''inertie d'un corps mobile autour d'un axe se calcule en faisant la somme des mr^2.

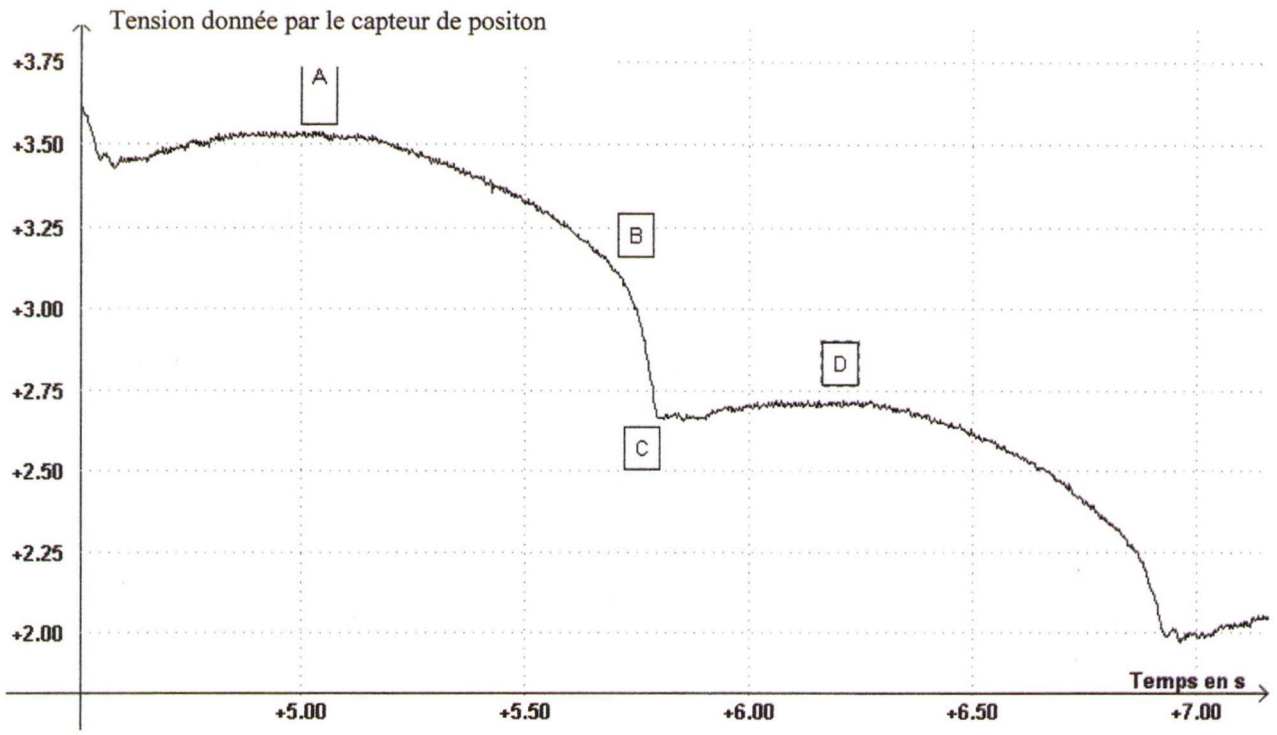
Le mouvement de l'aiguille est-il régulier ? Il semble que l'aiguille tourne par saccades et même recule un peu ! Les documents parlent en effet d'un échappement à recul .
Pour enregistrer le mouvement, nous utilisé un capteur de position constitué par un potentiomètre rotatif sans butée. Nous avons fait passer le fil du poids sur l'axe du potentiomètre. Nous avons du compenser les frottements en augmentant le poids.



On voit très bien sur l'enregistrement que le mouvement moyen est bien uniforme et on retrouve bien la vitesse de rotation moyenne constante. La périodicité est due au potentiomètre qui revient à zéro après un tour. Si on regarde en détail, on observe une succession de chutes presque identiques. Les portions de courbe ressemblent à des paraboles comme on en voit dans les mouvements uniformément accélérés.

Les irrégularités sont dues à la taille des dents de la roue de rencontre faite à la main.
Cette courbe permet d'étalonner le capteur qui indique finalement la hauteur du "poids"
On trouve $3{,}8.10^{-3}$m/V
La vitesse moyenne de chute est $-1{,}22*3{,}8.10^{-3}=4.6V.10^{-3}$m/s

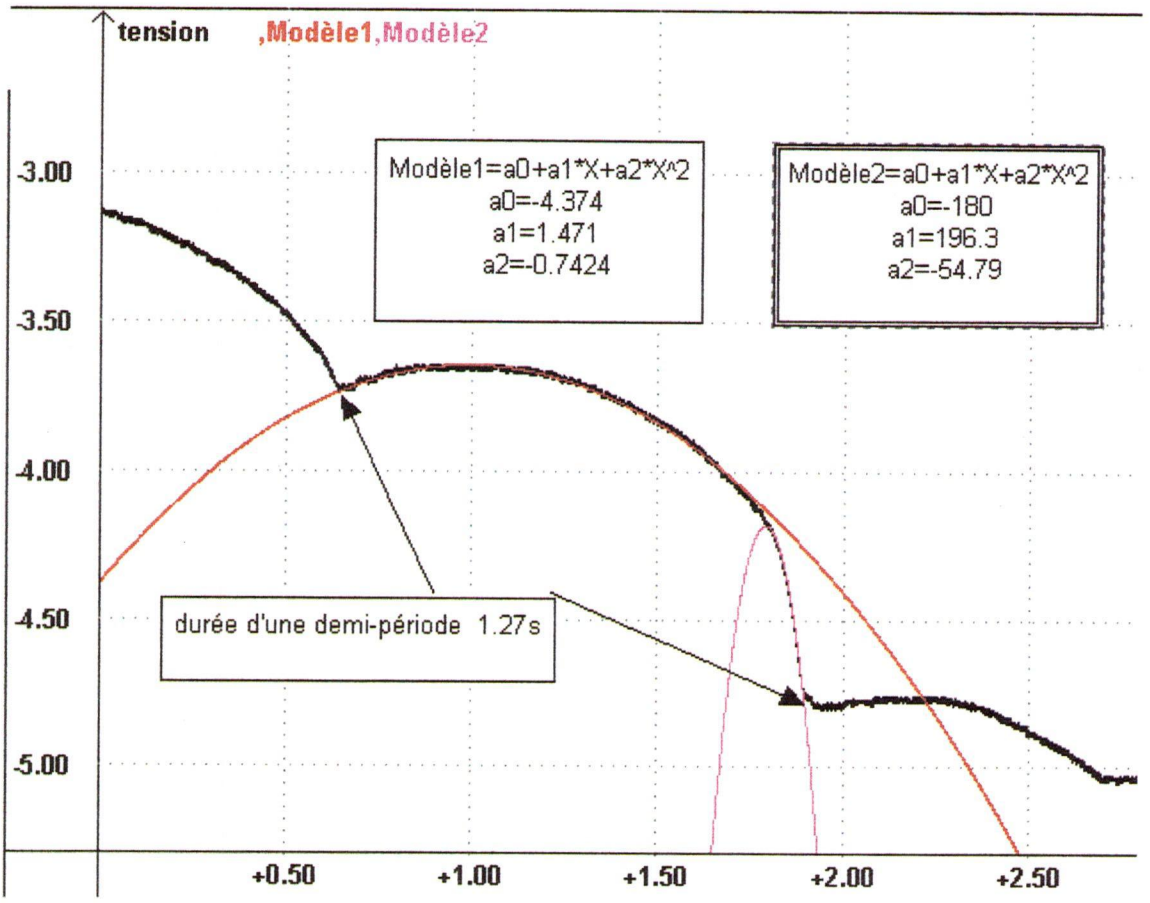
Si on agrandit la courbe on voit alors que le mouvement du n'est pas simple.



En A, la vitesse est nulle (maximum de la courbe)
De A à B le poids descend en mouvement accéléré. **Il donne de l'énergie au foliot** qui accélère.
En B la dent qui poussait la palette n°1 échappe
De B à C on observe un mouvement de chute accéléré (le foliot est libre).
En C la palette n°2 heurte la roue de rencontre on voit un léger rebond
De C à D le poids freine le foliot et le poids remonte. L'aiguille recule). On peut dire aussi que l'énergie de rotation du foliot est redonnée au poids qui remonte.
Etc…

On peut remarquer que la chute entre B et C.est plus rapide qu'entre A et B En effet de B à C le poids doit vaincre l'inertie de toute l'horloge (rouages, axes, engrenages, foliot) alors qu'entre A et B, le foliot n'est plus entraîné et son inertie n'intervient plus.

On voit aussi que la phase la plus longue, celle qui ralenti le plus la chute du poids, se situe entre A et D. De B à C la chute est rapide, importante et sans intérêt, cela est du à un mauvais réglage de la position des palettes et de la roue de rencontre.
Dans la phase de recul, le poids ne récupère qu'une partie de l'énergie car la plus grande partie a été perdue en frottements.



Par une modélisation on peut trouver des expressions semblables à celles de mouvements niformément accélérés.
Pour évaluer l'accélération il faut connaître le coefficient du capteur qui mesure en fait la hauteur du poids h =3,8mm/V

Phase AB,

L équation modèle 1 devient $h = -0,7*3,8.10^{-3}t^2 + \ldots\ldots$

Or l'expression générale est $h = 0,5*a\ t^2 + \ldots.$

Donc l'accélération est $-5,3.10^{-3}\ ms^{-2}$

Pour la phase BC on aurait une accélération de $0,4\ ms^{-2}$
(On peut comparer avec $g = 10\ ms^{-2}$ et remarquer l'importance de l'inertie de la roue de rencontre.)

En conclusion, dans cette première horloge mécanique, on ne trouve pas un organe qui serait un oscillateur et qui aurait un fréquence propre facile à régler. C'est tout l'ensemble qui constitue un oscillateur et donc le réglage est difficile car il dépend de trop nombreux facteurs.

3 horloge mécanique avec oscillateur à balancier

Dans l'histoire de l'horlogerie, une étape historique a été franchie avec ***l'horloge à balancier et à poids.*** Ce fut la première horloge mécanique utilisant un oscillateur entretenu. La vieille horloge de notre lycée fonctionnait encore suivant ce principe de même que nos comtoises.

En 1657 HYUGENS construisit la première horloge à balancier. Mais c'est en 1588 à 18 ans que GALILEE avait observé les oscillations d'un lustre dans la cathédrale de Pise.

Compter ces oscillations et bien régler leur période ne suffit pas, il faut aussi entretenir les oscillations pour que l'horloge ne s'arrête pas ! C'est le rôle de l'échappement. De nombreux systèmes d'échappement ont été mis au point par les horlogers. Nous avons choisi celui de GRAHAM .

1. Nous avons réalisé une maquette pour montrer son principe en suivant le plan trouvé dans un ouvrage d'horlogerie (Bouasse)

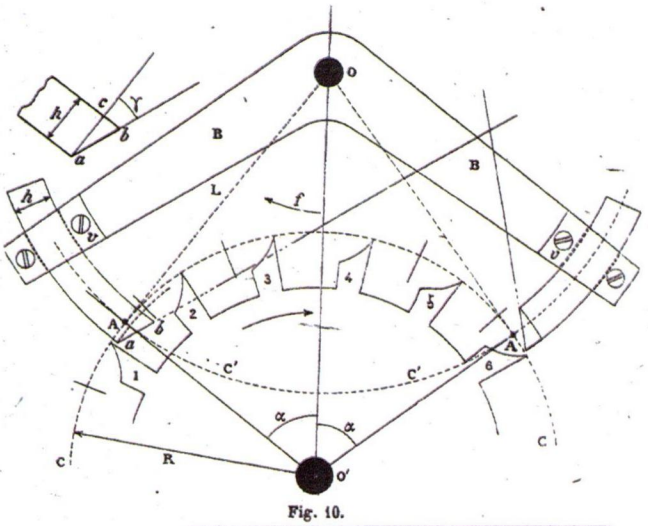
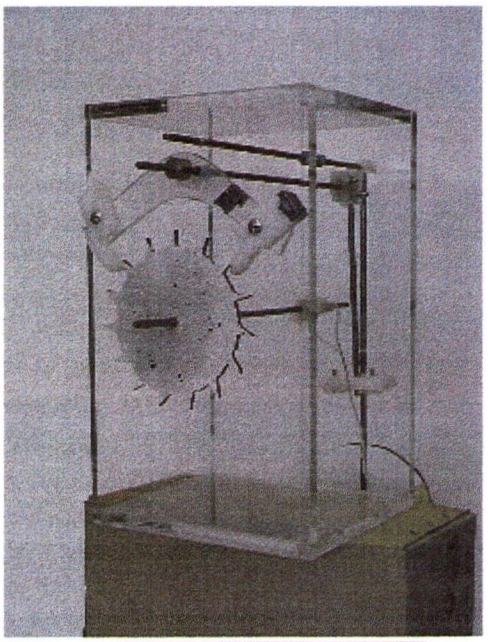
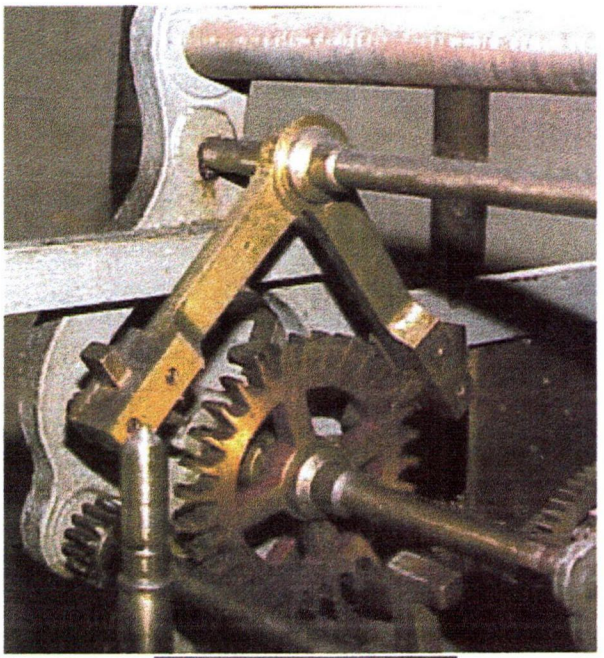


Fig. 10.

Gravure montrant l'échappement de GRAHAM (BOUASSE)



Notre maquette



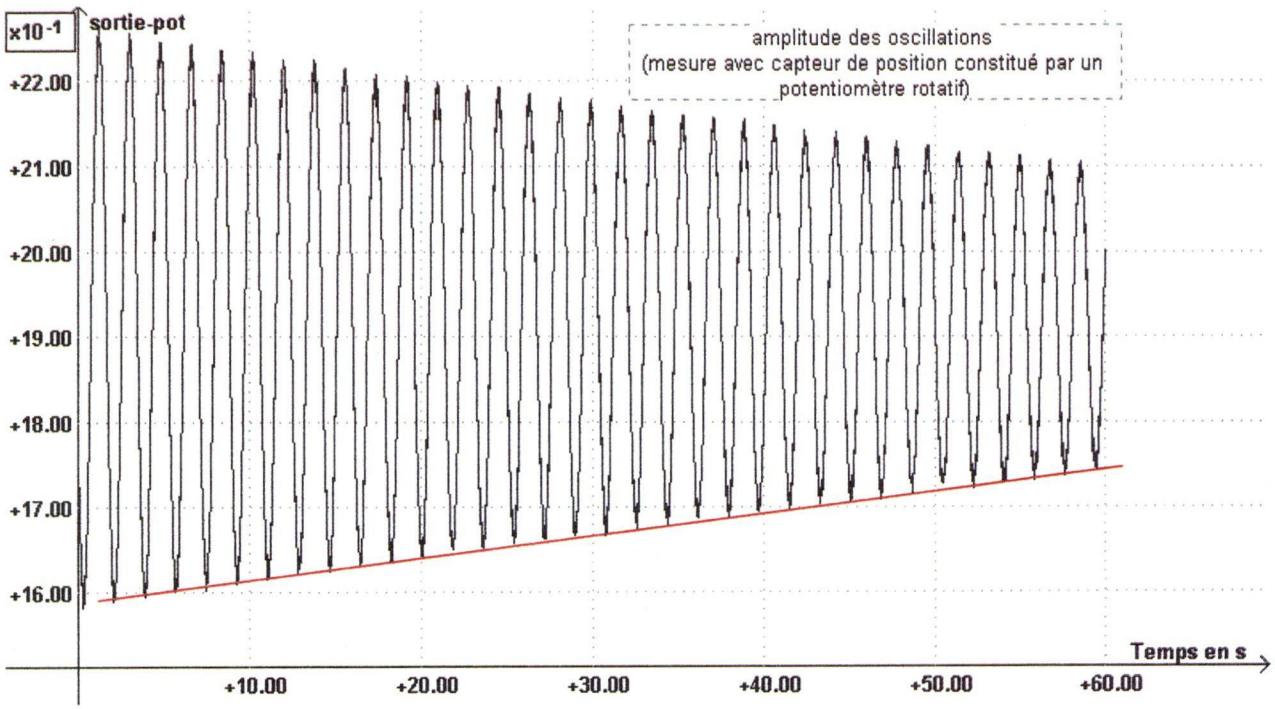
L'échappement de l'horloge du lycée JULES HAAG

Description :

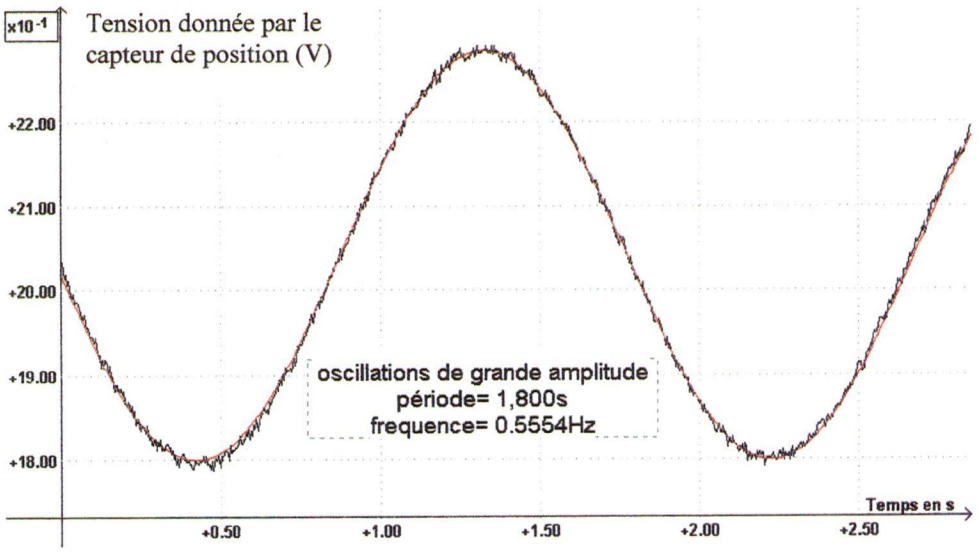
Le balancier est constitué par une tige de longueur réglable et une masse éventuellement réglable. Solidaire du balancier, une pièce mécanique en forme d'ancre entre en contact à chaque oscillation avec une roue dentée appelée roue de rencontre. Cette roue dentée compte les oscillations et permet l'affichage de l'heure grâce à un système d'engrenages et d'aiguilles. Elle est entraînée, non pas par le balancier, mais par le "poids de l'horloge". Le "poids de l'horloge" et en fait un objet lourd de masse

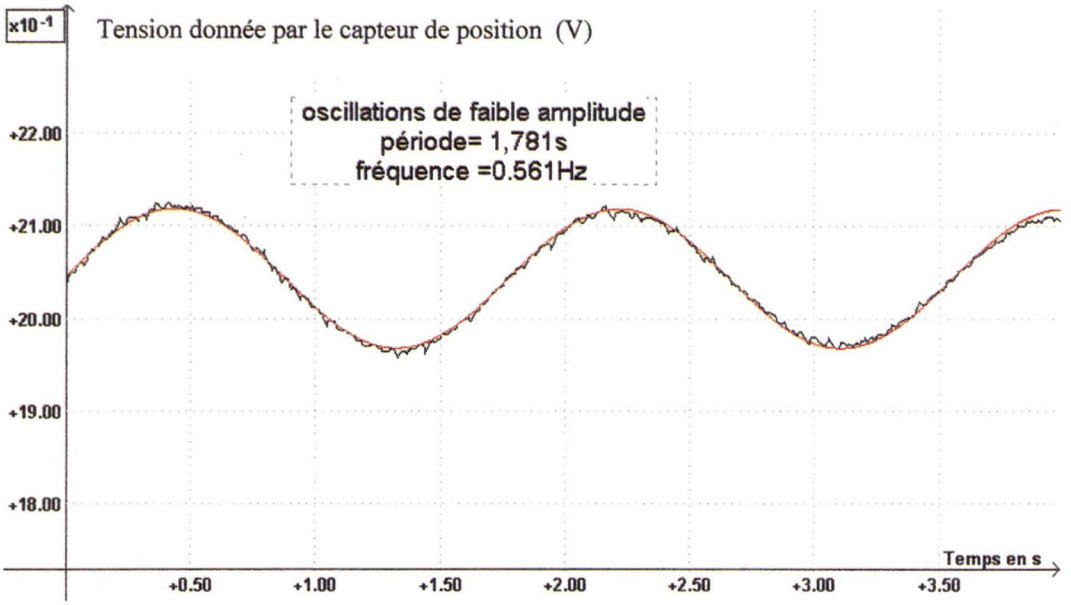
m. C'est bien sûr le poids de cette masse m qui est la force motrice du système. Un échappement (quand la dent quitte l'ancre) se produit deux fois par période et donne le tic-tac bien connu. Mais le rôle de l'échappement est surtout d'entretenir les oscillations. C'est pour comprendre ce rôle que nous avons fait quelques expériences.

Le pendule simple :
On suspend une masse m, presque ponctuelle, suspendue à un fil, et on observe avec un capteur de position les oscillations libres après avoir écarté le pendule de sa position d'équilibre. Il oscille un moment et s'arrête. Les oscillations sont amorties.



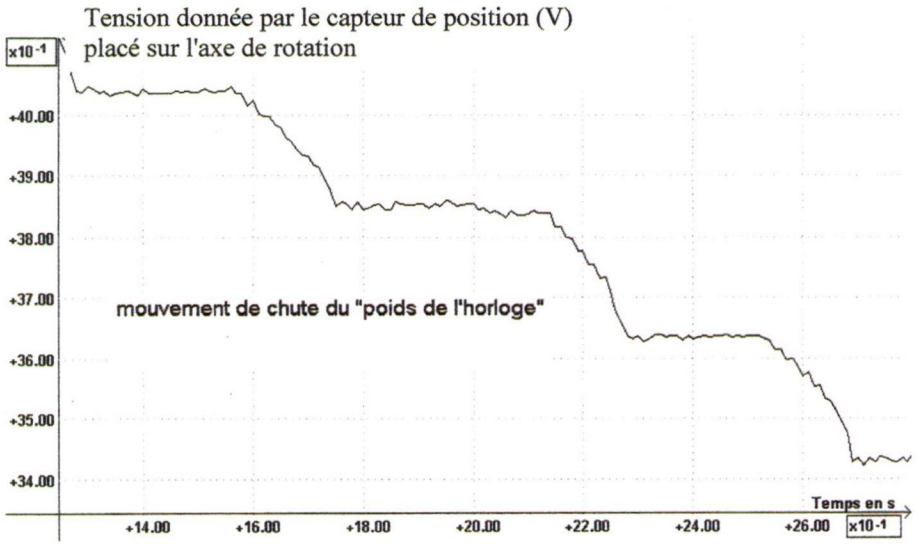
Évidemment, l'amortissement est du aux frottements et en particulier dans le capteur. Il semble que les oscillations ont la même durée. Pour en être sur on enregistré avec plus de précision des oscillations de grande amplitude et d'autres de petite amplitude :





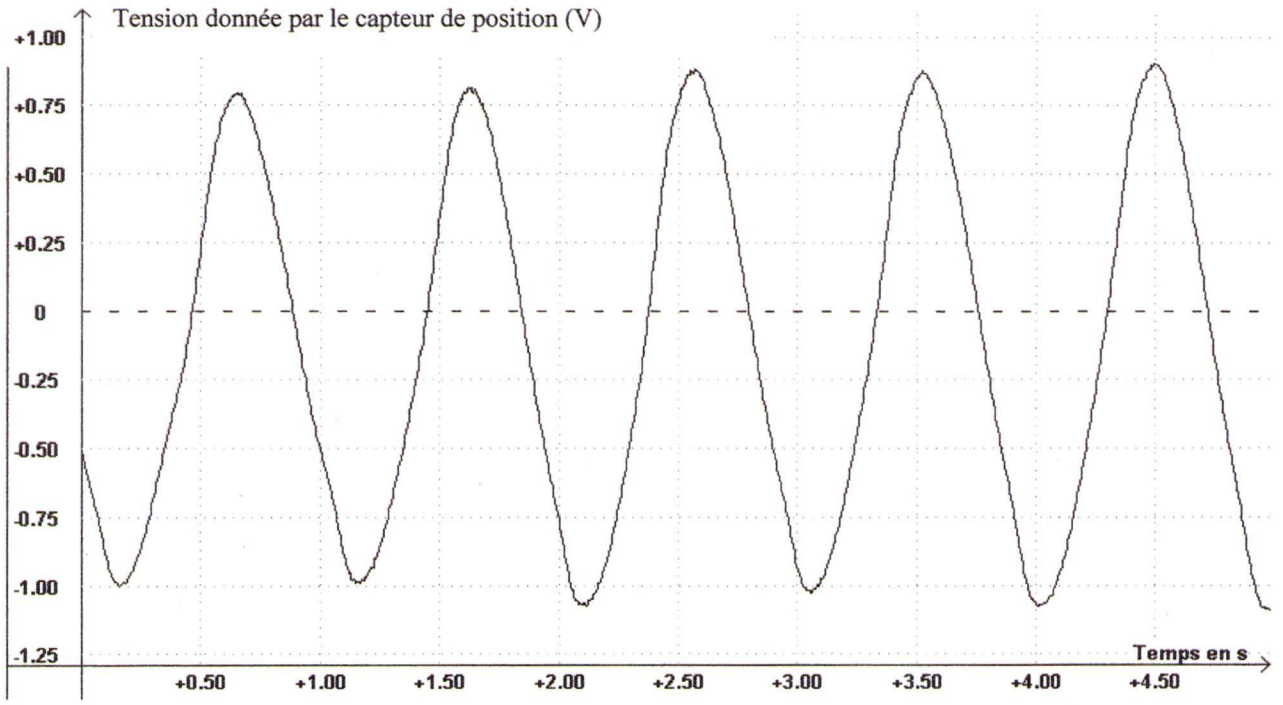
La période est plus courte si l'amplitude diminue.
Il faut donc que l'amplitude reste constante pour que l'horloge soit précise.

Le rôle de l'échappement : observons le schéma ou le fonctionnement de la maquette
Lorsque les oscillations sont amorties, l'énergie qu'on avait donné au départ au balancier est consommée par les frottements au cours des oscillations. Il faudrait apporter régulièrement un peu d'énergie pour compenser ces pertes. Il faut aussi apporter cette énergie au bon moment comme pour la balançoire du jardin d'enfant. On prends cette énergie dans la chute du 'poids de l'horloge" qui fait tourner la roue dentée. Elle pousse un petit peu le plat de l'ancre ce qui augmente un peu l'amplitude. Cette poussée étant faite, la dent "échappe" et c'est l'autre partie de l'ancre qui vient toucher sur une dent : TIC. La même chose pour l'autre dent et : TAC. A chaque demi période le "poids de l'horloge" donne l'énergie suffisante pour maintenir l'amplitude constante.
On a enregistré le mouvement de la roue de rencontre (donc du "poids", et donc des aiguilles !)
Un capteur de position angulaire mesure la chute du poids. Voici la courbe :

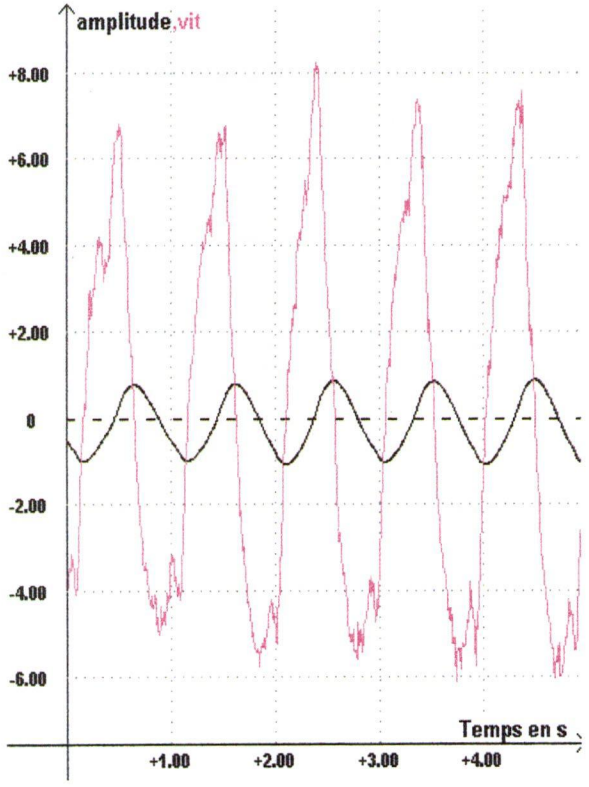


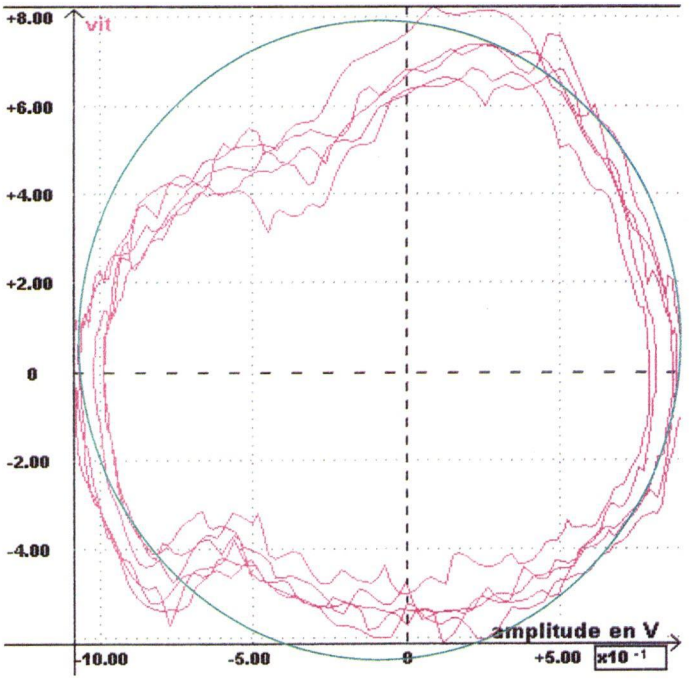
On voit bien la chute du poids et les moments ou le poids est immobile (c'est un échappement à repos)
On peut retrouver la période (tic-tac-tic) (deux échappements)

On a aussi cherché à voir si la courbe des oscillations du balancier était bien sinusoïdale.

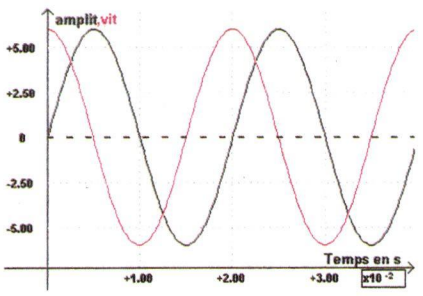


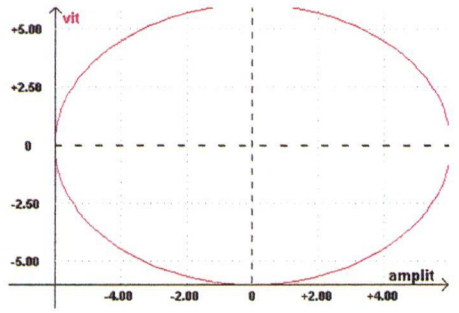
Un capteur d'amplitude réalisé avec une cuve rhéographique a donné le résultat suivant : On devine une anomalie sur chaque alternance. On remarque aussi l'irrégularité de l'amplitude qui est due à l'irrégularité des dents taillées à la main. En moyenne l'amplitude reste constante.
Pour mieux voir on cherche à afficher un diagramme de phase. C'est un diagramme dans lequel on montre l'amplitude et la vitesse. Le temps n'apparaît pas. La vitesse est calculée par dérivation de l'amplitude. (on n'a pas trouvé de capteur de vitesse facile à utiliser)



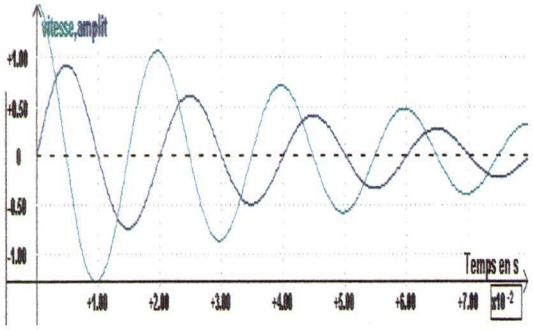


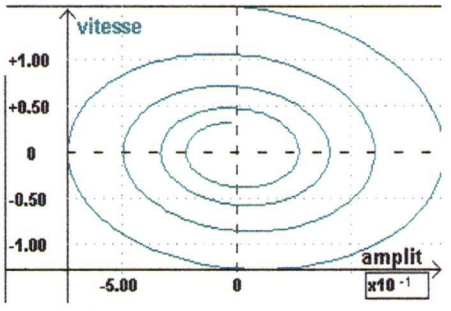
Les irrégularités de la courbe sont dûes aux aspérités des dents et de l'ancre taillées à la main et à la dérivée numérique.





Si l'oscillateur était parfaitement sinusoïdal, l'amplitude et la vitesse seraient sinusoïdales et la courbe de phase serait une ellipse.

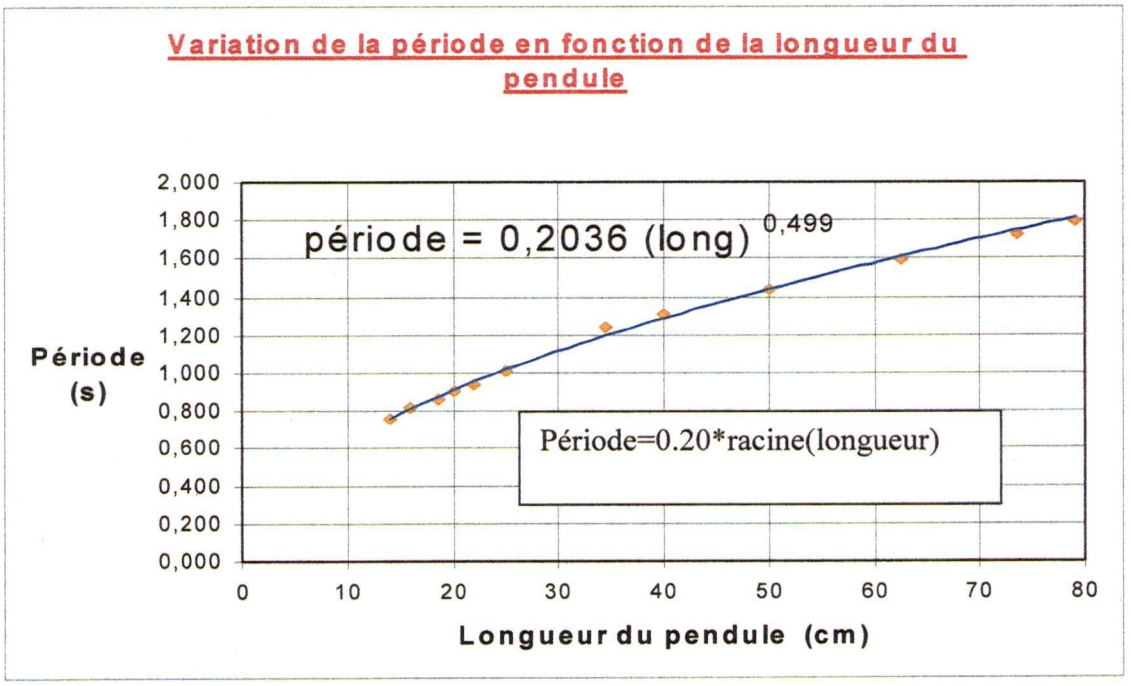




Sans entretien (oscillations amorties) la courbe de phase est une spirale.

L'examen de la courbe de phase de notre horloge montre des portions de spirale mais en moyenne, grâce à l'énergie apportée par l'échappement, l'amplitude reste constante. On voit aussi que l'échappement apporte l'énergie quand la vitesse est maximum.

Enfin comment régler cette Horloge ?
Si on augmente le "poids" ou si on modifie les positions de l'ancre et des dents cela ne change pas beaucoup ! En effet la période semble être imposée par le balancier. En modifiant sa longueur, la période change. Avec une étude expérimentale, sur un pendule simple on a trouvé un modèle mathématique en racine carrée de la longueur.



On trouve sur ce graphe la longueur à donner pour avoir un battement par seconde soit environ 24cm.

Si on réalise ce réglage sur la maquette, on remarque un désaccord avec la théorie et notre maquette retarde. On pense que l'inertie de toutes les pièces en mouvement dans notre maquette est responsable de la différence trouvée avec une expérience faite avec un "pendule simple" .

Pour un pendule simple et des petites oscillations : $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ avec l= longueur du pendule

Mais si le pendule n'est pas simple : $T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{mga}}$

avec I moment d'inertie, a =distance du centre d'inertie à l'axe de rot.

L'horloge à balancier rythmée par la période propre du balancier était beaucoup plus précise que l'horloge à foliot mais sa précision sur plusieurs jours était encore médiocre.

La période dépend de la gravité terrestre (g) et de la température qui dilate le balancier… De plus l'échappement délicat et doit être calé avec soin (même encore aujourd'hui pour nos horloges comtoises). Il n'était donc pas question de transporter sur un bateau un tel mécanisme. C'est pourtant la marine qui fit faire des progrès à l'horlogerie.

Le problème de la mesure des longitudes :
En 1714 a lieu le désastre des îles Scilly : 2000 morts dans un naufrage sur des récifs Anglais au retour d'Amérique pour une erreur de longitude ! Et à 200km du port d'arrivée ! Le roi d'Angleterre offre un prix colossal à qui résoudra le problème de la mesure précise de la longitude : faire moins de 100km d'erreur. (on en était à 800km d'erreur sur l'Atlantique avec les mesures à l'estime) L'horloge devrait dériver de moins de 2min en 40jours de traversée.

Mais quel rapport avec le temps ?
Le soleil tourne en 24 h autour de la terre. La longitude est découpée en 360 degrés. Donc 24h correspondent à 360° soit 40000km à l'équateur. (1h correspond à 15°) On choisit une origine : par exemple longitude 0 à GREENWICH et l'horloge est mise à l'heure à cette origine quand le soleil passe au zénit. En regardant l'heure de passage au zénit du soleil en un lieu quelconque on connaît le temps mis par le soleil pour tourner, donc la longitude. Mais attention, les mesures doivent être précises : un erreur de 1minute de temps correspond à 27km et c'est le naufrage !
Deux pistes de recherche entrent en compétition

-astronomie : observation du ciel et de certains phénomènes périodiques bien connus (satellites de Jupiter, position de la lune dans le ciel) . Mais comment faire une observation précise sur un bateau qui bouge ?

-Horlogerie : emporter à bord une montre très précise insensible à la gravité et au roulis !
C'est Harisson (Charpentier de formation, installateur d'horloges de clochers) qui remporta le prix en 1764 après de nombreuses années consacrées à l'amélioration de ses prototypes. Son horloge de marine mettait en œuvre un **oscillateur à balancier et spiral** et un moteur à ressort tendu. Le prototype H4 dérivait seulement de 5 secondes en 81 jours… Et permettait une précision de quelques km sur la mesure de la longitude. Et pourtant Harisson ne connaissait pas la "formule" de l'oscillateur équilibré à ressort spiral $T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{C}}$ (avec I= moment d'inertie et C=constante de torsion du ressort)
Dans cette relation on voit que T ne dépend plus de g

C'est le même balancier spiral, insensible à la gravité, qui a été utilisé dans nos montres jusqu'à l'arrivée des montres électriques.

(Le problème de la longitude est maintenant résolu par le GPS qui donne une précision de quelques mètres. Mais on a remarqué que ce système de positionnement doit sa précision aux horloges atomiques embarquées dans les 24 satellites GPS)

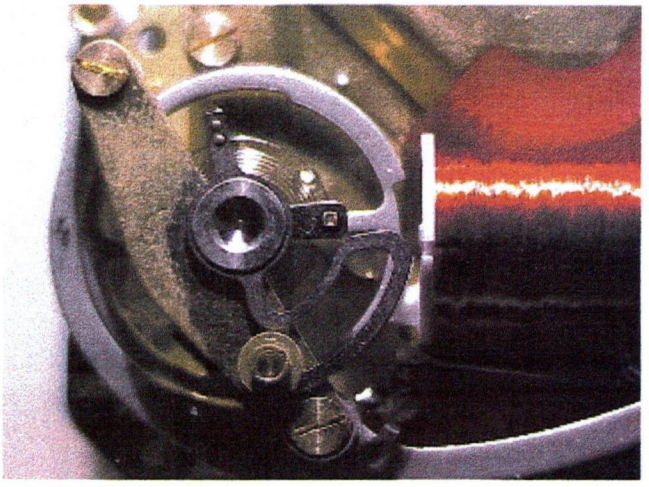
4 Autres horloges :

De passage dans une salle d'électricité, nous avons aussi observé deux horloges électriques.

4.1Oscillateur à balancier circulaire et spiral

nous avons testé un mouvement de pendule électrique. On le trouvait dans toutes les pendulettes bon marché. des années 1970.

L'oscillateur est un balancier rappelé par un ressort spiral :



Le **balancier** est constitué par une masse ferromagnétique circulaire. Il est normalement bien équilibré et insensible à la gravité. Il présente une encoche qui, au repos est en face du noyau d'un électroaimant.

Si **on écarte le balancier** de sa position de repos, le ressort spiral rappelle le balancier qui se met à osciller entraîne les rouages.

Inévitablement il s'**amortit** et le mouvement s'arrête.

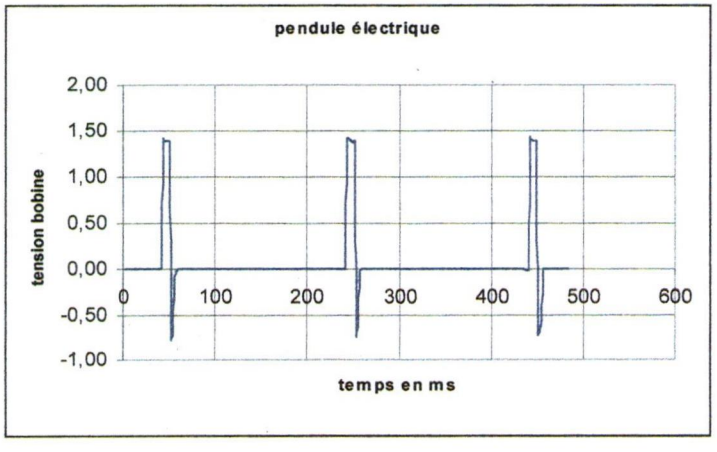
La fréquence propre de cet oscillateur dépend de l'inertie du balancier (masse, dimensions) et de la force de rappel du ressort. (C'est par le ressort que se fait le réglage)

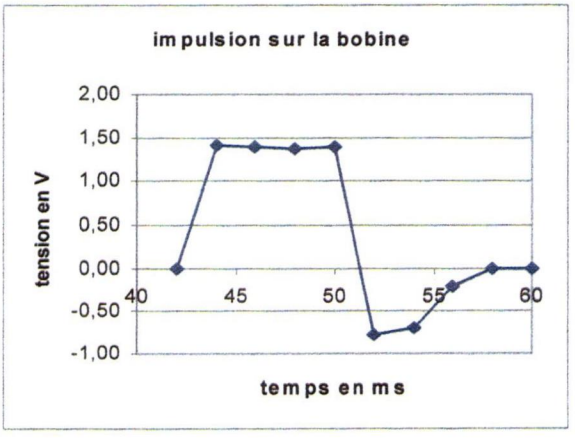
Il faut **donner un peu d'énergie** à chaque oscillation grâce à un système électrique;

Un pile (1,5V) alimente la bobine (R=160ohms) et le circuit se ferme très brièvement seulement lorsque le balancier passe par sa position d'équilibre. A ce moment la partie en fer voisine de l'encoche est attirée et le balancier tourne légèrement et le contact est supprimé.

On a enregistré ses battements d'abord avec un microphone de la carte son d'un PC pour "voir" le "tic-tac".

Puis nous avons observé le signal électrique aux bornes de la bobine. On en a déduit la fréquence de l'oscillateur et on a essayé de mesurer l'énergie consommée à chaque oscillation.





Fréquence : 2.58 Hz Période 387ms

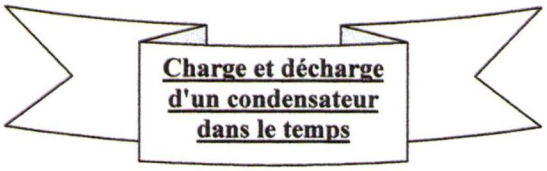
L'impulsion de 1.5V dans une bobine de 160ohms dure 8 ms environ

Energie par impulsion : $W=U*U*t/R = 93\mu J$

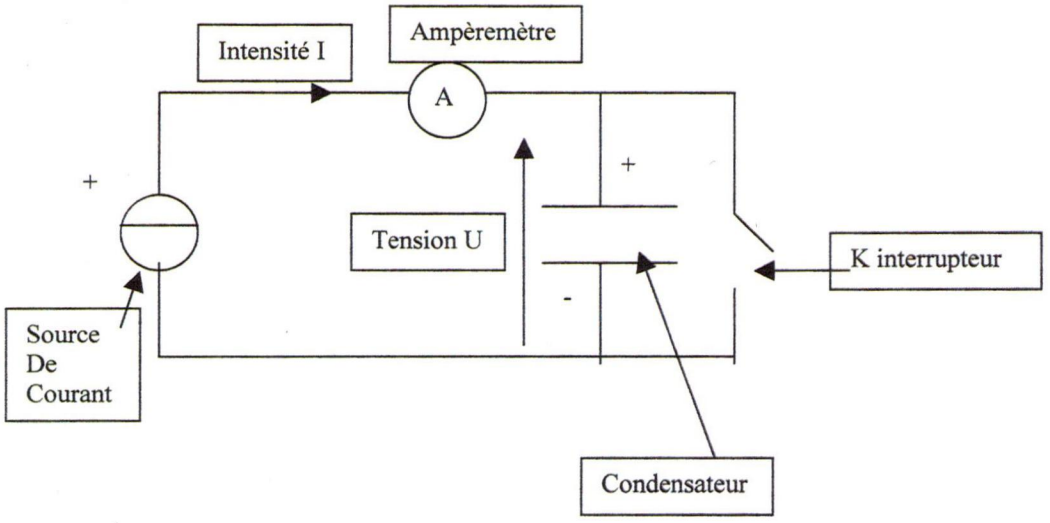
On a calculé qu'une pile alcaline R6 contenant 3000mAh pouvait alimenter le mouvement pendant deux ans.

4.2 Charge d'un condensateur;

Ici, nous avons cherché à faire une analogie électrique avec une clepsydre.

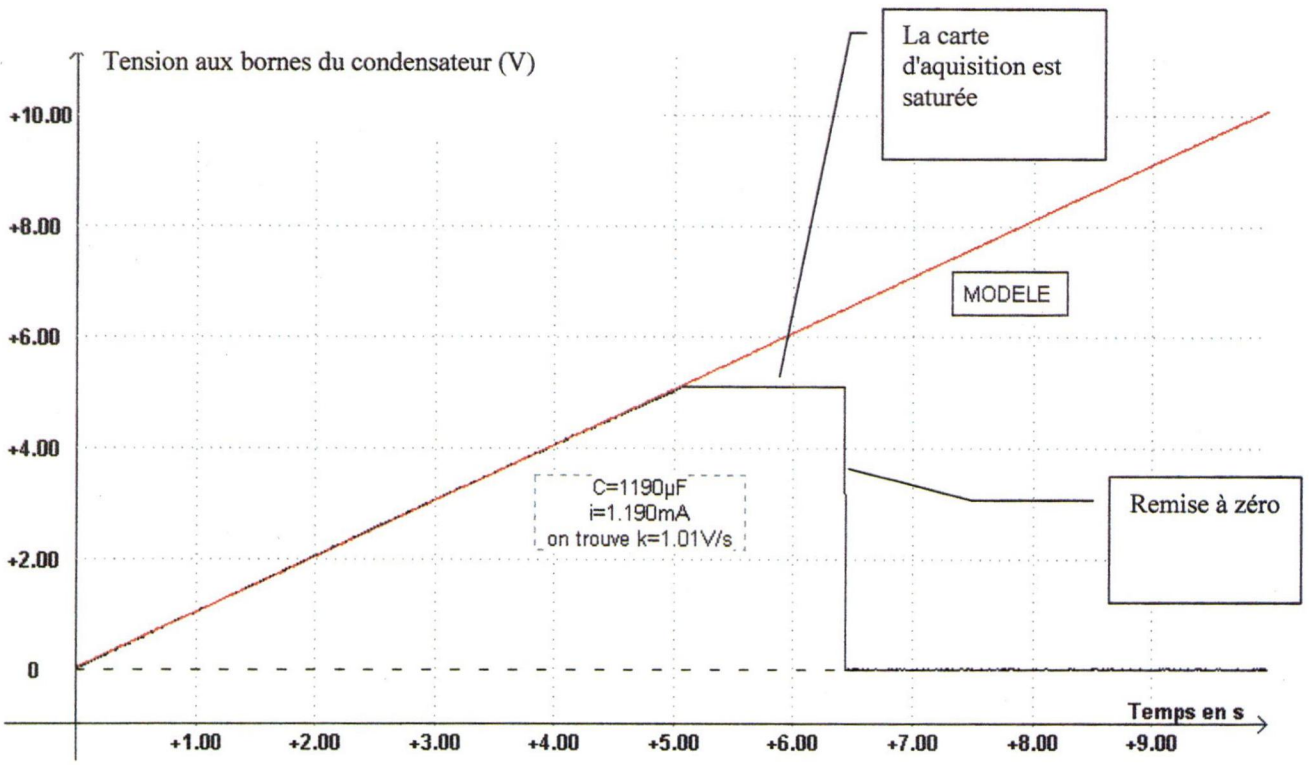


Un condensateur est constitué de deux plaques conductrices et un isolant : le diélectrique placé entre les deux.
A la fermeture de l'interrupteur, l'ampèremètre indique le passage d'un courant dans le circuit: i>0A.
Le courant i finit par être nul, on a atteint le régime permanent: Le condensateur ne laisse pas passer le courant continu. Mais transitoirement il est chargé. La tension U qui était nulle au départ augmente pendant la charge pour atteindre la valeur sa valeur maximale.



En connaissant la relation qui relie la quantité Q d'électrons du condensateur en fonction de la tension U à ses bornes et sa capacité nous avons: Q=Cu.
Avec un système d'acquisition appelé "synchronie" nous avons pu déterminer une courbe de l'évolution de la tension au cours du temps. Nous avons C=1190µF.
Pour obtenir une courbe qui avance dune seconde par graduation sur un voltmètre analogique par exemple nous devons obtenir une droite de coefficient directeur k=1.00V/s
Nous savons aussi que la quantité d'électricité est proportionnelle à l'intensité qui traverse le condensateur et au temps
Q=i*t Cu=i*t i=uC/t i=1*1190^{e}*-6= 1.19mA.

Pour obtenir une horloge à partir d'un condensateur il suffit de connaître la capacité du condensateur et d'employer un courant tel que i=1*C pur obtenir 1V/s.



Résultat :

Cette horloge peut afficher l'heure sur un voltmètre avec un maximum de quelques secondes !

On ne l'utilise pas pour donner l'heure mais on la trouve par exemple dans l'oscilloscope ou elle est chargée de réaliser le balayage de l'écran. Elle permet alors de graduer l'axe des temps.

Evolution des horloges :

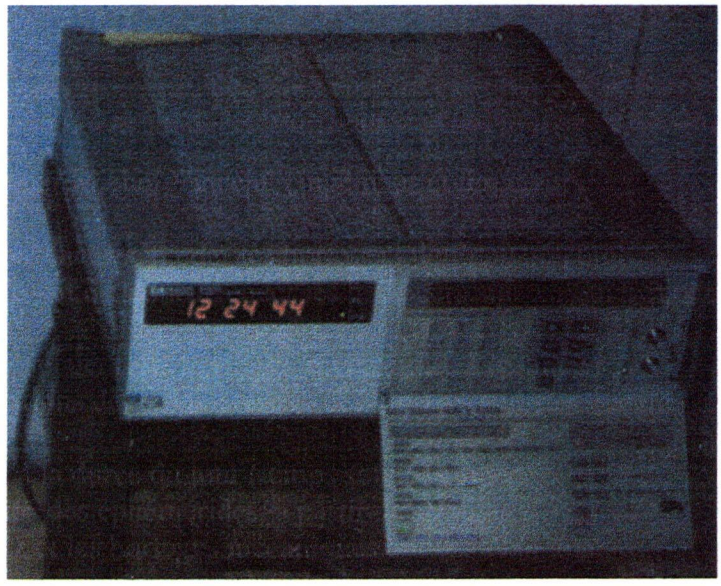
Dans l'horloge électrique précédente, le résonateur est classique (mécanique) et il est peu précis (1s par jour). La pile électrique sert seulement à éviter les nombreux "remontages" d'un poids ou d'un ressort tendu.
Dans la suite on a utilisé l'électricité pour réaliser le résonateur et la miniaturisation des circuits électroniques a permis l'utilisation du quartz dans une montre. Ce résonateur basé sur le principe de la piézo-électricité permet une précision de 1s par an.
Nous avons mesuré la fréquence d'oscillation d'un module utilisant un quartz et nous avons vu la nécessité des circuits diviseurs de fréquence pour arriver à la fréquence de 1Hz
(Les quartz "horlogers" ont une fréquence de 32768Hz; par division par 2^{15} on obtient1Hz)

5 L'horloge atomique :

5.1 La visite de l'observatoire de Besançon

Le mercredi 3 mai 2000 nous sommes reçus par Michel Vincent. (Ingénieur et directeur du laboratoire "temps fréquence")
L'observatoire a été créé en 1882 pour donner l'heure et aider les horlogers de Franche-comté à améliorer la qualité de leurs montres. Il s'agissait de concurrencer les horlogers suisses qui avaient un observatoire à Genève.
Au début les "garde-temps" de l'observatoire étaient des horloges mécaniques à balancier , installées au fond d'un puits à l'abri des variations de température et des vibrations. Elles étaient ajustées grâce à l'observation des étoiles .
La seconde a d'abord été définie par rapport à la durée du jour (temps solaire moyen)
Puis par rapport à la durée d'une année (temps des éphémérides, a partir de 1956)
Puis on a su réaliser des oscillateurs à quartz et les horloges mécaniques ont été abandonnées.
Enfin on a su réaliser des horloges atomiques très précises et alors la définition de la seconde a changé (1964) et l'observation du ciel n'a plus été nécessaire pour "garder l'heure".

Actuellement à l'observatoire, on continue à observer les planètes et les espaces galactiques mais sans le souci de donner l'heure. L'équipe du "**temps fréquence**" animée par M. Michel VINCENT effectue des recherches fondamentales sur le transfert du temps et des fréquences. Elle a abordé l'étude des pulsars et participe actuellement au projet Pierre AUGER d'étude des rayons cosmiques.
La fonction de "garde du temps" est réalisée par le BIPM qui calcule une moyenne nationale ou internationale basée sur les résultats des meilleures horloges atomiques françaises ou mondiales. Besançon possède trois horloges excellentes qui nous ont été présentées.
Elles sont situées dans une salle climatisée, ou la température est stabilisée au dixième de degré ;

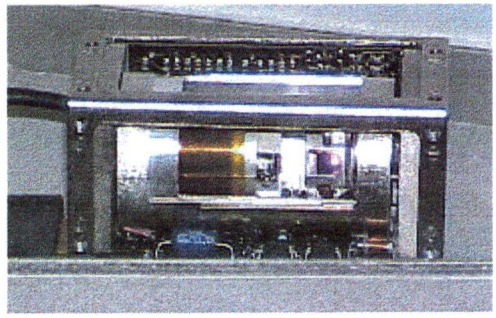


Horloge atomique de l'observatoire de Besançon

Bien sur elles donnent l'heure (TAI) (heure locale -2h en été) mais surtout elles élaborent des signaux qui ont de nombreuses applications.
Le GPS est une application importante des horloges atomiques.
De retour dans notre lycée nous avons décidé de comprendre le principe d l'horloge atomique et d'étudier une application.

5.2 Principe de l'horloge atomique

Comment comprendre ce qui se passe dans le petit module ci-contre ?
Un jet d'atomes de césium entre dans une cavité résonante et ses électrons vibrent à une fréquence très élevée de 9 192 631 770 Hz, correspondant à la frange de Ramsey. Cette fréquence est si précise

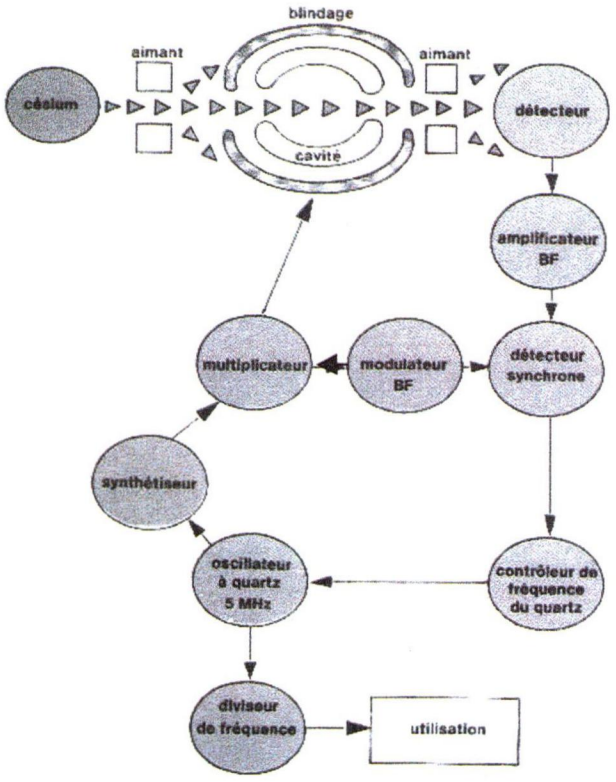


qu'elle sert de référence pour la définition de l'unité de temps : la seconde.

Le **schéma de principe** montre des choses qui nous semblent bien mystérieuses.

On peut voir un système comprenant oscillateur à quartz qui élabore une fréquence pour le tube à césium.
Sortant du tube, un courant vient finalement commander l'oscillateur à quartz.
C'est un système bouclé.
Pour afficher l'heure, il suffit de compter les périodes (T=1/f)

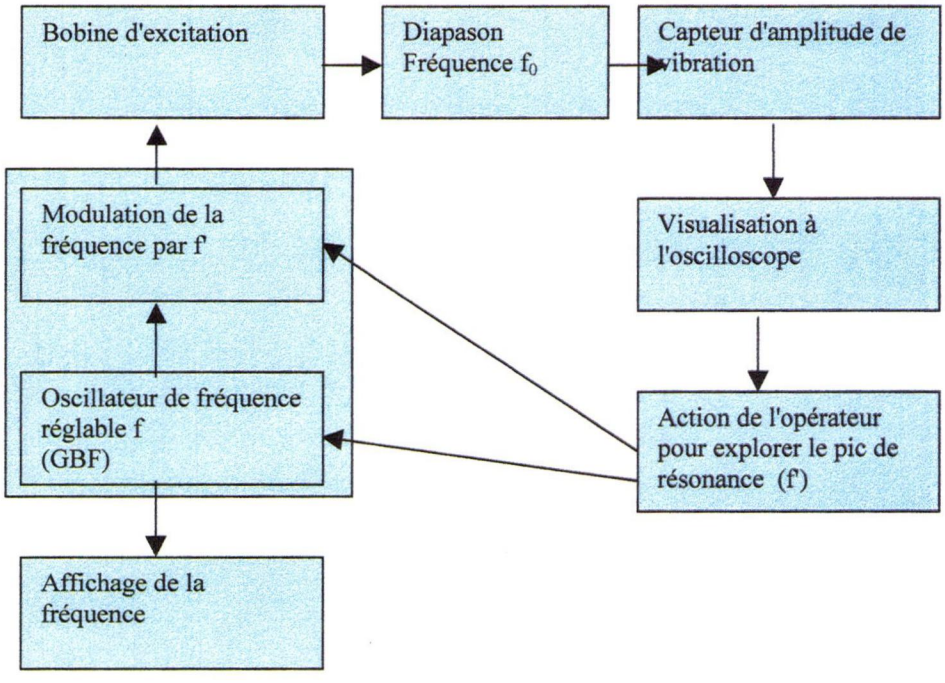
Mais pourquoi commander l'étalon césium avec un quartz moins précis ?



5.3 La maquette

Nous avons réalisé une expérience similaire en utilisant un résonateur classique : un diapason .

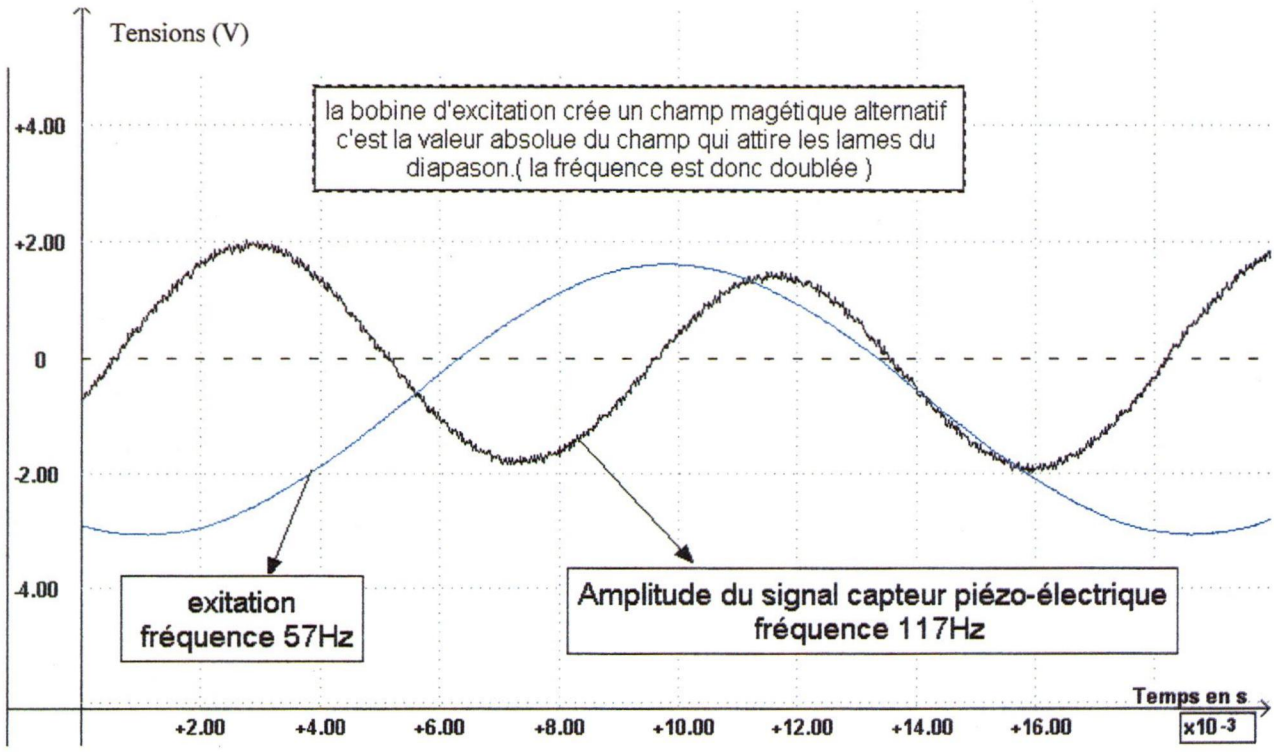
Notre montage à pour but d'entretenir la résonance d'un diapason en élaborant avec un GBF un signal convenable.

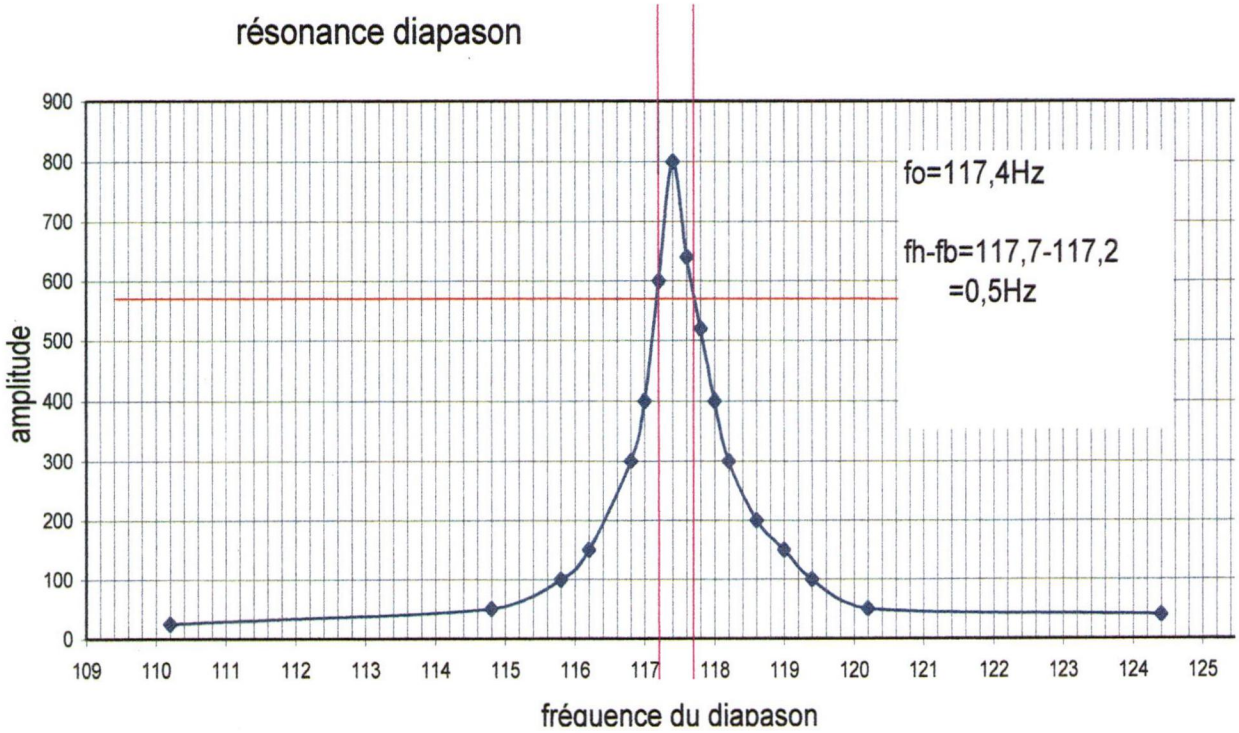


C'est le diapason qui sert de **"cavité résonante" précise** et impose sa fréquence f_0 .Mais il faut entretenir cette vibration. On doit l'exciter avec une fréquence f réalisée avec un oscillateur moins précis et réglable (GBF). Le jeu consiste à essayer de réaliser $f=f_0$. C'est est facile : on regarde sur l'oscilloscope si le diapason vibre bien et l'opérateur corrige la fréquence f jusqu'à ce que l'amplitude maximum soit atteinte. On lit la fréquence f sur le GBF et donc on connaît f_0.
Cela ne suffit pas car si on suppose que le GBF est moins stable que le diapason et donc il se peut que f change un peu. Si l'opérateur est sérieux, il doit rester vigilant et surveiller que f est toujours égal à f_0. La solution est simple : on explore régulièrement et périodiquement le sommet de la courbe de résonance en modifiant légèrement la fréquence f. l'examen de l'oscilloscope ou du diapason renseigne sur la correction à apporter au réglage de f. C'est comme pour la recherche des stations d'un poste de radio ancien !

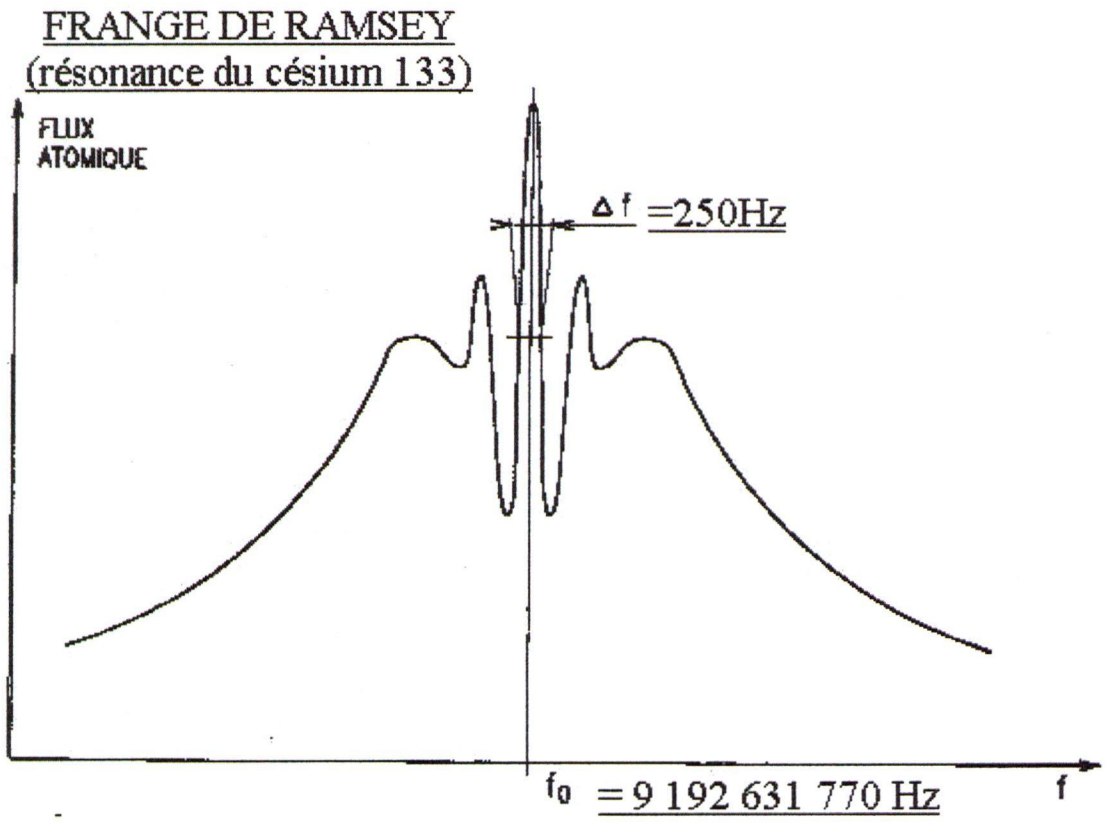
Ce qui est simple pour un manipulateur est plus délicat à réaliser en électronique et nous n'avons pas su réaliser un système automatique de contrôle de la résonance du diapason.

Voici quelques résultats expérimentaux:





Voici la courbe de résonance du césium :

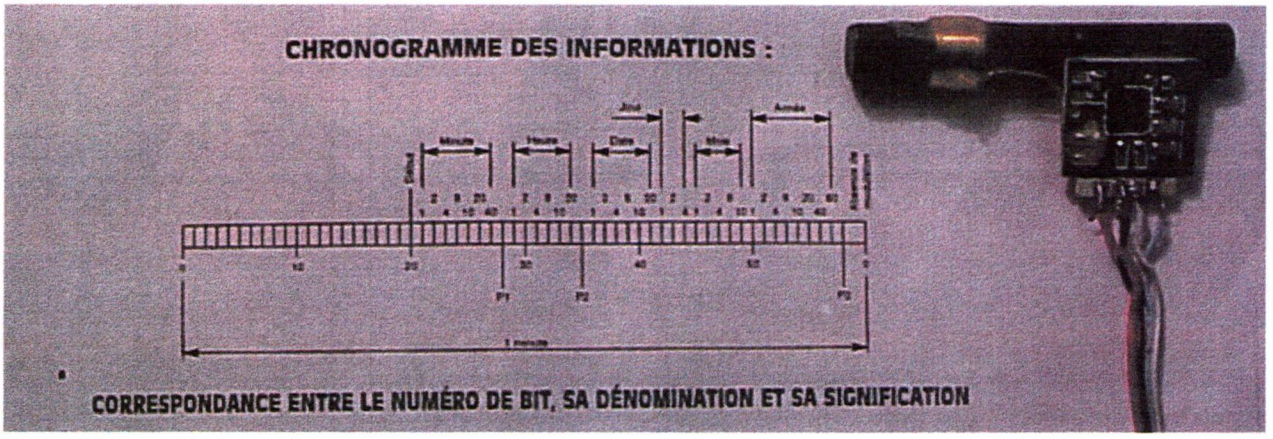


Le facteur de qualité de notre "cavité résonante" est $f_0/\Delta f$= 117/05 = **234**

Celui d'un tube à césium est 9 10^9 / 250= **30000000** C'est bien plus précis !

5 Application de l'horloge atomique : le signal DCF77

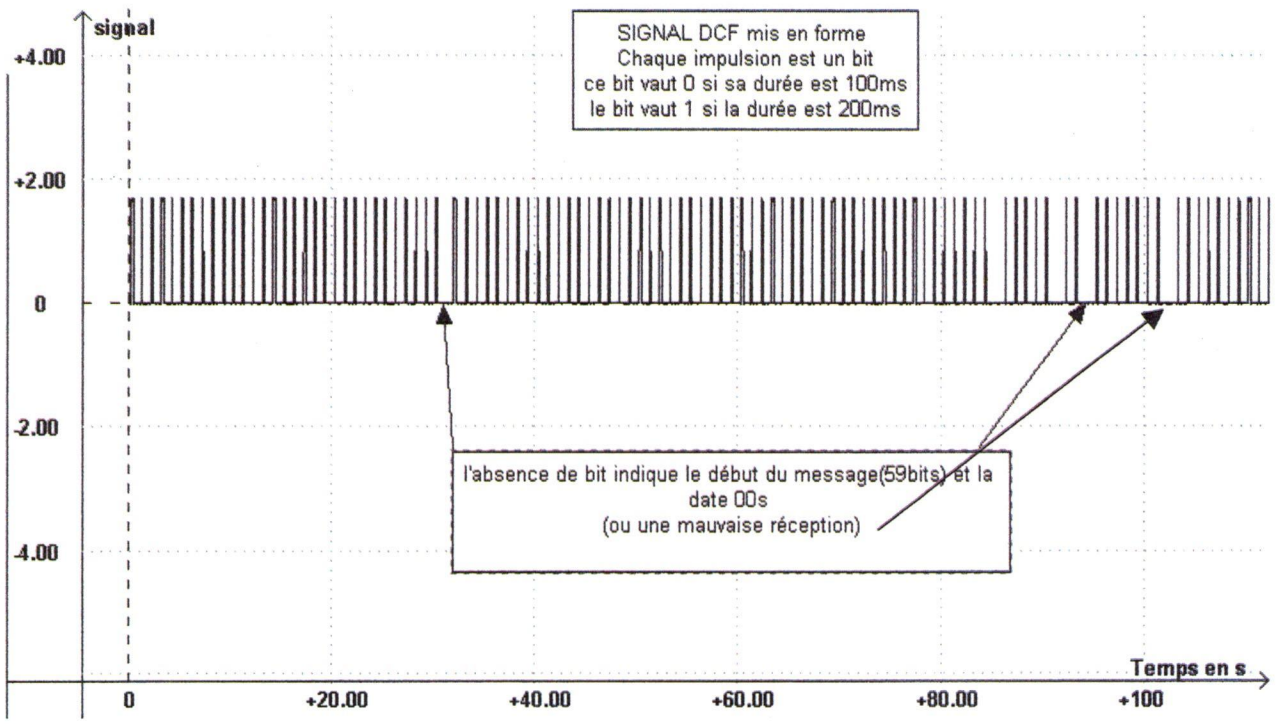
Nous n'avons pas manipulé sur une horloge atomique, pourtant nous disposons tous de signaux issus d'une horloge atomique. Un émetteur situé près de Francfort émet des signaux sur une portée moyenne de 1500km en grandes ondes à la fréquence77kHz. Cette fréquence est modulée de façon à contenir un message indiquant date et heure à tous les réveils et horloges "radiopilotés" Nous avons acheté un module de réception et nous avons appris à décoder le message. On peut comparer le résultat avec l'indication d'un réveil offert par l'UPD aux candidats des olympiades 1998.
On trouve sur internet de nombreux sites sur le sujet (DCF77)



Principe :

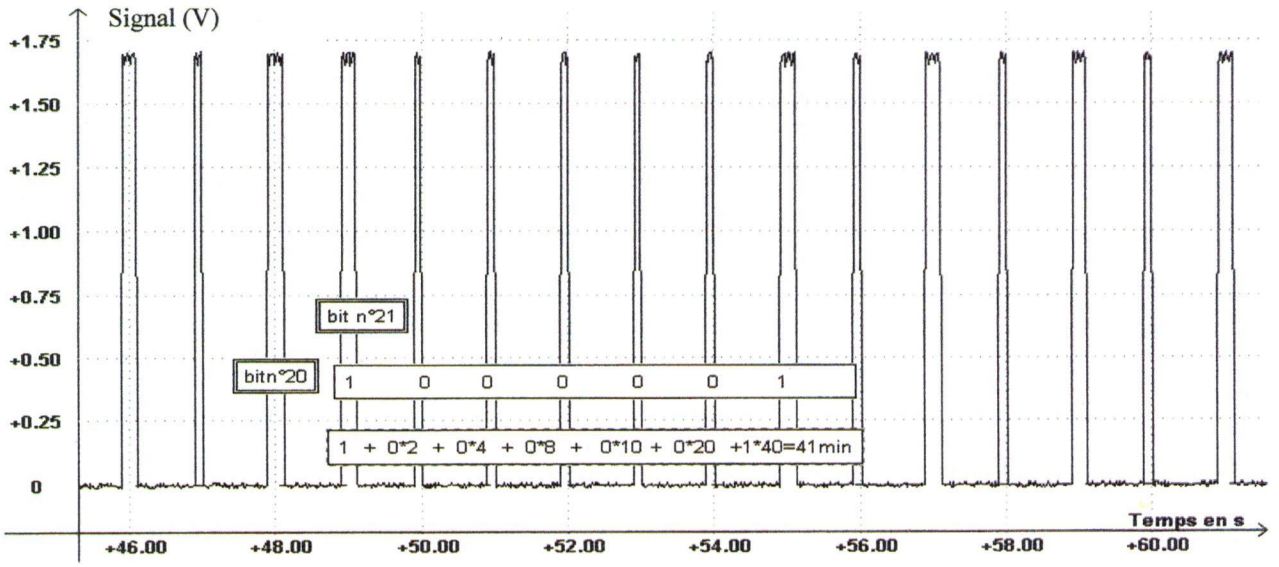
La porteuse 77kHz transporte une salve de 59 bits en 1 min (1 bit par seconde)
Les salves sont séparées par un bit absent.
Le bit de valeur 0 est une impulsion de durée 100ms
Le bit de valeur 1 est une impulsion de durée 200ms
Entre deux bits la porteuse est réduite de 25%
L'heure est décodée a partir d'une table donnée en annexe.
À la fin de la salve, on connaît la date du front montant suivant (qui est le bit 0 du message suivant)

Les essais :
Sur notre module, une DEL indique les impulsions, et un buzzer permet de les écouter.



On a enregistré avec un logiciel d'acquisition le signal mis en forme. La principale difficulté a été de bien orienter l'antenne qui est peu sensible.
Nous avons appris à décoder le signal, à déceler les erreurs de transmission.
Nous avons fait un programme en pascal qui affiche directement le résultat: date et heure.

Voici par exemple le décodage des minutes :



Conclusion :

Notre travail nous a conduit à refaire le parcours des hommes qui ont cherché à mesurer le temps de la préhistoire à nos jours. Cela nous a donné l'occasion d'approfondir nos connaissances dans différents domaines de la physique :

- **Mécanique avec le clepsydres, horloge à foliot, pendule, ressort spiral**
- **Electricité avec les horloges électriques, à quartz, et l'horloge atomique.**

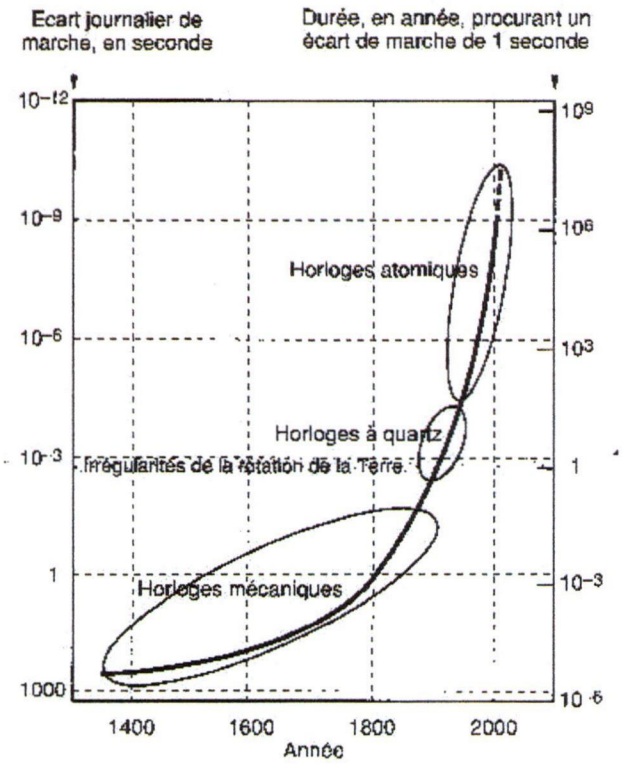
De plus nous avons constaté que le temps est une "chose de la nature" à part. En effet, à travers les ouvrages que nous avons consultés, nous avons remarqué que, lorsqu'on traite du temps, on ne peut pas se limiter aux domaines de la physique et de la technique. Les auteurs abordent inévitablement les questions d'histoire de la société ainsi que les questions philosophiques et cet aspect est très enrichissant.

Alors, merci au temps !

Précision de la mesure du temps :

Voici un Graphique extrait de "Les fondements de la mesure du temps "

L'évolution de la mesure du temps



– Evolution de la qualité des horloges artificielles et comparaison avec l'horloge « rotation terrestre ».

Quelques idées sur la mesure du temps :

Le temps se mesure avec des horloges.

On ne mesure pas le "**temps**" mais des "**durées**" qui sont des différences entre deux **dates**.

C'est par l'observation d'un **mouvement** qu'on mesure le temps. (écoulement, mouvement des astres, vibrations…)

Les horloges doivent présenter trois qualités :

- Etre fiables (ne pas tomber en panne)
- Etre précises (donner les dates avec un grand nombre de chiffres significatifs)
- Etre stables (ne pas dériver au cours du temps)

On contrôle une horloge avec une horloge plus précise.
L'unité de temps et la seconde. La définition de cette unité a évolué au fur et à mesure que les horloges devenaient plus précises.

Jusqu'en 1956 la seconde est basée sur le mouvement de la terre sur elle-même :
1s= la fraction 1/86400 du jour solaire moyen.
Le temps légal est le TSM (temps solaire moyen)

En 1956 on se base sur la rotation de la terre autour du soleil :
1s = fraction 1/31556925,9747 de l'année tropique 1900.
Le temps légal est appelé TE (temps des éphémérides) (éphémérides : tables donnant chaque jour la position des astres)

En 1964 on utilise l'horloge atomique :
1s=durée de 9192631770 périodes de la transition entre deux niveaux du césium 133.
Le temps légal est appelé TA (temps atomique)
Le TAI est obtenu par moyenne des meilleurs horloges atomiques mondiales.

BIBLIOGRAPHIE

Les livres :

Les fondements de la mesure du temps Claude AUDOIN Bernard GUINOT ; Masson
Des rythmes au chaos Pierre BERGE
Pendules spiral, diapason… BOUASSE ; Delagrave
Le temps Etienne KLEIN
Enclyclopédia Universalis
Encyclopédie Encarta
Alpha encyclopédie

Les publications et les périodiques :
Métrologie du temps et des fréquences JJ GAGNEPAIN et G AUDOIN
Etalons atomiques de fréquence V GIORDANO ; FORTEF juin 1997
Anales françaises des microtechniques et de chronométrie 1997 (horloge atomique)
Cadrans solaires COLENEOT
Pour la science avril 1996 (GPS)
Sciences et vie junior dossier n°30 octobre 1997 (le temps)
Le journal de Carrefour déc 99 n°58
Sciences et avenir hors série n°96 de 1994 (les énigmes du temps)
Revue de l'association astronomique de Franche-Comté n°35 déc1999
Et de nombreux sites internet...

REMERCIEMENTS :

Nous remercions :

Nos professeurs qui ont trouvé du **temps** pour nous faire de la physique autrement…

Le personnel de laboratoire qui a toujours été disponible pour trouver, en **temps** voulu, le matériel indispensable.

Monsieur Vincent qui a trouvé plusieurs heures, dans son **emploi du temps,** pour parler des applications de l'horloge atomique.

La société "BESANCON PLASTIQUE" qui a donné, à **temps**, le plexiglass pour les maquettes.

Et tout ceux, non cités, qui nous ont donné un peu de leur **temps….**