

## Histoire des horloges mécaniques

L'usage de l'horloge mécanique ne date que du XIII<sup>e</sup> siècle, date où apparurent les horloges à poids dont le principe, le mécanisme et le fonctionnement sont complètement différents des horloges hydrauliques.

Les historiens de la mesure du temps ne sont pas en parfait accord sur l'origine de ces horloges ni sur le nom de l'inventeur. À ce sujet:

C.Frémont dit : "Dans l'état actuel de nos connaissances, on a admis jusqu'ici que l'horloge du palais de Charles V avait été, sinon la première, au moins la copie d'horloge dont l'invention au XIV<sup>e</sup> siècle, était nouvelle de toutes pièces et d'origine allemande parce que l'ouvrier Henri de Vic qui construisit l'horloge de Paris est Wurtembergeois" <sup>(1)</sup>

Il est certain dit le Père Alexandre : "que celui qui a trouvé le moyen de mesurer la durée du temps par le mouvement des roues dentées, tempéré par la libération alternativement contraire du balancier, mérite tous nos éloges s'il nous était connu; mais l'histoire ne apprend rien de certain." <sup>(2)</sup>

Ferdinand Berthoud, parlant de l'horloge mécanique, dit: "Les diverses parties qui composent l'horloge à roues et à balancier, n'ont pas été inventées par le même auteur."

Nous empruntons à Berthoud la suite de l'histoire <sup>(2)</sup> :

"La technique de construction des horloges à poids se développa très rapidement et aboutit à la construction des horloges mécaniques dont le mouvement est communiqué par des roues dentées, la vitesse réglée par un balancier, l'impulsion donnée aux roues par un poids et le temps indiqué, sur un cadran divisé en douze parties égales, par une aiguille portée par l'axe de la roue. Cette aiguille fait un tour en douze heures et deux tours depuis le midi d'un jour jusqu'au midi suivant.

Lorsque l'on fut ainsi parvenu à avoir de pareilles horloges, dont les premières construites furent placées aux clochers des Églises, des ouvriers adroits et intelligents enchérent sur cette découverte, on y ajoutant un rouage, dont l'office est de faire frapper avec un marteau sur un timbre les heures indiquées sur un cadran; de sorte que par le moyen de cette addition, on pouvait savoir les heures de la nuit sans le secours de la lumière, ce qui devint d'une grande utilité, principalement pour les Monastères; car il fallait, qu'avant l'invention des horloges, les Religieux préposassent des gens pour observer les étoiles pendant la nuit, afin d'être avertis des heures de leurs offices; ce qui était très-incommode pour eux: aussi attribue-t-on l'invention des Horloges à roues, à Gerbert, Moine de Fleury, qui fut ensuite Archevêque de Reims, puis de Ravenne, et enfin Pape, sous le nom de Silvestre III. On s'est servi jusqu'en 1650 de cette invention:(voyez l'histoire de France de M. le Président Hénault Tome I page 126).

Quand on fut parvenu à avoir des Horloges de de gros volume, on construisit de plus petites pour l'usage des appartements. Enfin d'habiles Ouvriers imaginèrent de faire des Horloges portatives,

auxquelles on a donné le nom de Montres. C'est à ce temps que remonte l'origine du ressort spirale, dont l'action entretient le mouvement de la machine, et qui tient lieu du poids dont on se sert pour les Horloges; car le poids ne peut être appliqué à une machine portable, continuellement exposée à des mouvements en différents sens, qui troubleraient et empêcheraient l'action. On fit aussi des Montres à sonnerie. C'est proprement à ces dernières découvertes que commence l'art de l'Horlogerie.

La justesse à laquelle ont parvint pour mesurer le temps, en se servant des Horloges et des Montres, était infiniment au-dessus de la justesse des sabliers et Horloge d'eau; aussi faut-il avouer que c'est une des belles découvertes de ces temps-là. Mais elle n'était rien en comparaison de la perfection que l'horlogerie acquit en 1657.

"Huighens, Mathématicien célèbre créa de nouveau cet Art , par les belles découvertes dont il l'enrichit; je veux dire, par l'application qu'il fit du Pendule aux horloges pour en régler le mouvement ; et quelques années après il adapta aux balanciers des Montres, un ressort spiral qui produisait sur le balancier le même effet que la pesanteur sur le pendule. La justesse de ces machines devint dès lors si grande par ces deux additions, qu'elle surpasse autant celle des anciennes horloges, que celles-ci étaient au-dessus des clepsydes et horloges à eau."

1- C Frémont - Origine des horloges à poids - paris 1915

2 - Ferdinand Berthoud - Essai sur l'Horlogerie - Edition Berger- Levrault Paris 1978

### **Taqi al-Din et les horloges mécaniques**

Taqi al-Din a rédigé un traité volumineux sur les horloges mécaniques . Ce traité intitulé "Al-kawakeb al Durriya fi wad`al-Bankamanat al-Dawriyya" ( Les planètes précieuses pour la construction des horloges mécaniques). Une étude détaillée critique et analytique , a mis en relief l'importance de ce traité . En fait, ce fut le premier traité qui traite une bonne majorité des problèmes concernant la construction, et le fonctionnement de presque tous les types des horloges mécaniques à savoir: l'horloge à poids, l'horloge à sonnerie (la comtoise), le réveille- matin et les horloges portatives.

Dans l'introduction de son traité Taqi al-Din dit : " Très jeune j'avais une grande affection pour l'astronomie et un amour très profond pour la lecture des traités de mathématiques. Ainsi, j'ai pu embrasser toutes connaissances théoriques et pratiques sur les instruments de mesure astronomique, à savoir les cadrans solaires et les gnomons et j'ai pu découvrir tous les secrets de leur forme et de leurs dimensions; ceci nécessairement après avoir lu tous les traités d'Euclid et d'Archimède, les livres des moyens ingénieux les plus délicats, les documents qui traitent les problèmes de la balance ainsi que les machines élévatrices des poids lourds et tout ce qui concerne la mécanique appliquée`."

" Très soucieux de la mesure du temps, je notais jour et nuit les heures et leurs fractions au moyen d'instruments divers parmi lesquels les horloges mécanique qui m'intéressaient le plus. Ces horloges cachent des mécanismes très délicats. A part les quelques articles sur les phases de la lune et les éclipses, je n'ai point trouvé de livres qui m'aient prescrit les détails nécessaires pour dévoiler les secrets

du mécanisme très délicat de ces horloges. Les techniciens musulmans ne se sont pas intéressés à ces horloges, ils se contentaient d'instruments plus rudimentaires pour la mesure du temps. Pourtant les horloges mécaniques provenant d'Hongrie, d'Allemagne et de la France, étaient d'une technicité incomparable, d'aspects extérieurs très originaux. En plus elles étaient incrustées d'argent et étamées d'or. Leurs prix très élevés limitaient le nombre de leurs possesseurs."

Il poursuit: "Le problème se posait lorsqu'une horloge doit être réparée, les mains d'œuvre l'échangeaient sans avoir à l'appuie les règles ou les croquis de sa construction. Le technicien est ainsi embarrassé, surtout si l'une des roues de l'horloge se perdait et qu'il fallait le remplacer. À cette époque, j'étais au service du Sultan Suleyman le magnifique, que Dieu le bénisse, et je fus nommé secrétaire général de son premier Vizir Ali Pacha qui gardait dans son armoire des instruments de mesure du temps de tout genre : clepsydres, gnomons, cadrans solaires, horloges mécaniques simples et d'autres à sonnerie, des réveille- matin ...etc. Je m'intéressais à les examiner afin de comprendre leur mécanisme; je discutais les principes de base de leur fonctionnement et les méthodes techniques de leur construction avec des techniciens experts de toutes nations qui visitaient le Sultan. Ainsi, j'ai pu dévoiler leur secret et assimiler toutes connaissances les concernant. Mais j'ai remarqué que je ne pouvais plus poursuivre mes études dans ce domaine avec ce qui me restait de ma vie et à côté de mon poste de juge au tribunal."

" Ainsi j'ai décidé de rédiger un traité d'horlogerie, qui d'une part, résout le problème des horloges mécaniques, d'autre part aidera les techniciens et les amateurs après mon décès. Et ceci selon les paroles du prophète : Inscrivez la science dans les livres."

" Ce traité sera formé d'une introduction suivie de deux articles et d'une conclusion. Espérons que le Bon Dieu m'aidera dans ce projet."

Dans ce traité Taqi al-Din décrit quatre genres d'horloge à savoir: les horloges à poids, les horloges à sonnerie, les réveille- matin et les horloges portatives.

Avant de commencer la description de ses horloges Taqi al-Din donne les définitions de la science qui les concerne . il dit:

'Binkam : mot d'origine persane qui signifie - instrument de mesure du temps –

' Ilm al-Bankamat : C'est la science qui étudie les problèmes de la construction des instruments de la mesure du temps, il étudie les mouvements précis exécutés par des systèmes bien définis qui parcourent une distance connue pendant un temps bien déterminé car le mouvement perpétuel est impossible dans ce monde "

Un peu plus loin il continue: " L'objet de cette science consiste à déterminer les heures des prières (jour et nuit) et à régler avec précision le temps nécessaire pour résoudre les problèmes du royaume. Cette science exige des connaissances profondes dans les domaines scientifiques plus particulièrement en mathématiques et en physique. Dans le premier on étudie l'arithmétique, la géométrie, la mécanique et les mesures des poids. Le second parle de la chimie, du traitement des métaux et de l'astrologie."

“La science horlogère exige un homme de génie qui accorde la pratique à ses connaissances théoriques. Il doit être expert dans les métiers de base à savoir: l'orfèvrerie, la menuiserie et la plomberie. De plus il doit être un excellent forgeron. On a besoin de la chimie car d'après Avicenne : « un chimiste traite les matières premières des métaux pour extraire les produits qui en dérivent ». Nous avons besoin de ces procédés pour construire la cloche et les anneaux”.

Taqi al-Din continue:" Il existe trois sortes d'horloge. Les sabliers qui sont utilisés depuis des siècles. Les clepsydres que j'ai déjà développé dans mon traité- les méthodes sublimes des machines spirituelles- et les horloges mécaniques qui font l'objet de ce traité."

Ces derniers renferment des roues en fer , en acier , en cuivre ou en bois , dont les unes entraînent les autres en rotation et ceci suivant le rapport du nombre des dents ou le rapport de leurs diamètres. La plus rapide de ces roues est celle qui est la plus éloignée de la force motrice, mais elle a une plus faible force de traction. Par contre la roue la plus proche de la force motrice est la plus lente et sa force de traction est faible. Mais, nous pouvons régler ces vitesses pour avoir des roues qui effectuent un tour complet durant une année, un mois ou un jour. C'est ainsi que les techniciens ont pu construire des horloges mécaniques très variées qui marquent les heures et leurs divisions. Ils ont développé cette technique pour associer à ces horloges des sonneries qui sonnent l'heure et ses fractions, d'autres sont allés plus loin en ajoutant des automates musiciens ou tout autres figurines qui ajoutent à ces horloges une perfection remarquable."

La première horloge décrite dans ce traité est une horloge à poids (Al-Suryaqa) . Pour sa description nous traduisons textuellement le texte de Taqi al-Din

### **AL- Suryaqa (horloge à poids)**

C'est l'horloge qui tourne sous l'action de la force de traction d'un fil "Suryaq" qui porte à ses deux extrémités des poids inégaux.

## **1 - Description des éléments de cette horloge**

### **a - La roue de rencontre**

Si on considère une roue mobile dans un plan vertical et si l'on veut qu'elle effectue un tour par heure au moyen d'une corde enroulée sur la gorge d'une poulie fixée à son axe et que cette corde porte à son extrémité libre un poids, le mouvement de cette roue ne peut pas être uniforme que si on lui adjoint un élément qui ralentit son mouvement. Dans ce cas on associe à la roue une couronne qui ressemble à la couronne d'un tamis afin de pouvoir fraiser ses dents inclinées en forme de dents de scie. Le nombre de ces dents doit être impair et son axe doit tourner dans deux trous pratiqués dans deux supports opposés. (Fig -1-)



Fig - 1



Fig - 2 -

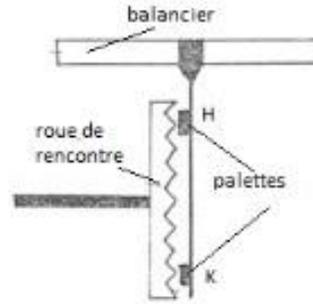


Fig - 3 -

On considère ensuite une tige de longueur bien supérieure au diamètre de cette roue. On soude sur sa longueur deux palettes rectangulaires de longueur convenable mais dont la largeur est égale à la hauteur d'une dent de la roue. Ces palettes sont fixées à angle droit et la distance qui les sépare est égale au diamètre de la roue.

On dresse cette tige verticalement et on soude près de son extrémité supérieure un petit cadre auquel on fixe, juste en son centre d'inertie, le balancier (règle rectangulaire de longueur convenable et qu'on peut parfois alourdir par des masses). Les deux extrémités de cette tige tournent dans deux trous pratiqués dans deux piliers horizontaux. (fig - 2 -)

La tige étant suspendue en face de la roue à couronne ou roue de rencontre, il est clair que lorsque cette roue tourne et qu'une de ses dents écarte la palette (H) puis s'échappe, l'autre palette (K) se présente à une dent diamétralement opposée qui l'écarte à son tour, vu que la roue tourne dans le même sens. Le balancier va et revient sur lui-même et effectue des vibrations qui modèrent le mouvement de la roue de rencontre (Fig-3-).

Or si l'on veut que cette roue effectue un tour par heure, il faut agrandir son diamètre et par conséquent augmenter le nombre de ses dents pour atteindre mille cinq cent (c'est le nombre nécessaire pour une heure); ou bien il faut utiliser un balancier beaucoup plus long ce qui est encombrant.

Pour avoir une machine plus petite Taqi-al-Din propose deux méthodes:

a - La première méthode consiste à associer à la roue de rencontre une autre roue au moyen d'une courroie.

On prend une roue à gorge de diamètre moyen, on mesure son périmètre et on construit une poulie de périmètre égale au 1/19 du périmètre mesuré. Cette poulie sera ensuite fixée sur l'axe de la roue de rencontre. Une courroie sera enroulée sur la gorge de la grande roue et celle de la poulie (Fig - 4 -).

Ainsi si la roue (A) effectue un tour, la roue de rencontre (c) effectue dix-neuf tours. Comme cette dernière porte 79 dents, les palettes passent devant ces dents 1501 fois (ce nombre est le produit de  $79 \times 19$ ).

Notons que Taqi-al-Din fait remarquer que cette méthode est très ancienne et elle fut abandonnée depuis longtemps car elle n'est applicable qu'avec des roues en bois .

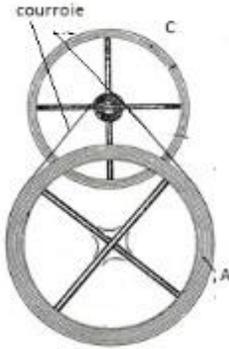


Fig - 4 -



Fig - 5 -

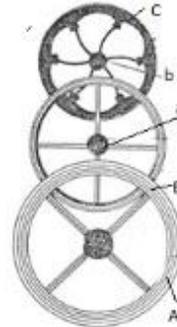


Fig - 6 --

b - La deuxième méthode consiste à associer à la roue de rencontre un système d'engrenage.

On fixe sur l'axe de la roue de rencontre un pignon de cinq dents. Ces dernières s'engrènent avec les 96 dents d'une grande roue qu'on appelle la roue principale ou roue de partition. Ainsi si cette dernière effectue un tour, la roue de rencontre effectue 19 tours (c'est le quotient de  $96/5$  ) . Donc les palettes passent 1501 fois devant les dents de la roue de rencontre et on aboutit au même résultat. (Fig -5 -)

Pour avoir toujours la même vitesse de la roue de rencontre, on pourra former un système d'engrenage de plusieurs roues ( Fig -6 - )

#### Exemple

- Supposons que la roue principale (A) de 54 dents engrène avec le pignon (a) de six dents fixé sur l'axe de la roue (B) de 48 dents qui engrène avec le pignon (b) de six dents fixé sur l'axe de la roue de rencontre (C) de 21 dents.

Il est clair que si la roue (A) fait un tour, la roue (B) effectue 9 tours ( $54/6$ ) et la roue (C) effectue 8 tours ( $48/6$ ) pour chaque tour de (B), soit  $9 \times 8 = 72$  tours. Ainsi les palettes passeront  $72 \times 21 = 1512$  fois sur les dents de la roue de rencontre et le balancier effectue  $2 \times 1512 = 3024$  oscillations par heure. (Fig-5-)

Remarques signalées par Taqi-al-Din

1 - Dans le système précédemment décrit la longueur de la règle qui forme le balancier doit être petite, de même la largeur de la couronne de la roue de rencontre doit être faible.

2 - Nous avons déjà signalé que la roue la plus éloignée de la force motrice est la plus lente surtout si les dents des pignons sont petites. Pour cela il faut que les dimensions de chaque dent soient respectées, que les axes de rotation soient parfaitement horizontaux et parallèles.

De plus il faut faire attention à ce que la distance entre les dents des roues soit très légèrement supérieure à la distance entre les dents des pignons. Cette différence de distance n'est pas remarquable à l'œil nu.

3 - En ce qui concerne les palettes nous avons déjà signalé qu'elles se fixent à angle droit sur l'axe, mais dans les montres, elles peuvent former entre eux un angle aigu ou un angle obtus (Fig - 7 - ). Dans le premier cas le mouvement serait beaucoup plus lent que dans le second cas.



Fig - 7 -



Fig - 8 -

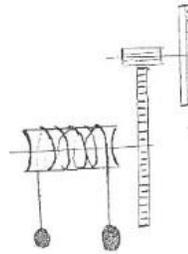


Fig - 9 -

## B - La poulie

Pour construire la poulie, il suffit de prendre un petit tuyau métallique de longueur convenable (ce tuyau forme la gorge de la poulie). On fixe à ses deux extrémités deux disques pour former les bords.

Pour régulariser la vitesse de rotation de la roue à laquelle on accorde cette poulie, on prend un anneau métallique très mince, on perfore sa surface de deux trous très proches (Fig - 8- ) par lesquels on fixe l'anneau sur le disque de la bobine. Cet anneau porte, diamétralement opposé aux trous, une dent inclinée qui s'appuie sur l'un des bras de la croix de la roue principale. Ainsi lorsque la poulie tourne, c'est cette dent qui entraîne directement la rotation de la roue sans perte de temps.

Remarque :

Concernant la rotation des roues, il faut noter que dans le cas d'un système d'engrenage formé par la superposition de plusieurs roues, celles de nombre impair tournent dans le même sens que la roue motrice, tandis que celles de nombre pair tournent en sens inverse.

## C- La corde (al-suryaq)

On prend une corde de longueur correspondant à la durée de vingt-quatre heures. On accroche à chacune de ses deux extrémités un crochet qui doit recevoir un poids convenable. On enroule ensuite cette corde sur la gorge de la poulie et on cherche par l'expérience la valeur du poids et du contrepoids qu'il faut accrocher pour que la roue principale effectue une révolution par heure. Ainsi lorsque le poids

descend, le contrepoids plus léger s'élève et la roue tourne entraînant la rotation de tout le système. Pour remonter l'horloge on tire le contrepoids vers le bas, le poids remonte en même temps (fig – 9 - ).

L'anneau fixé à la poulie , par sa flexibilité, s'écarte en éloignant sa dent du bras de la roue, le système se libère et le poids commence à redescendre d'un mouvement régulier.

Remarque :

Nous avons déjà signalé que la longueur de la corde est proportionnelle au nombre des heures et que pour une journée complète cette longueur doit être équivalente à la durée de 24 heures . C'est une très grande longueur. Mais on pourra la réduire au 1/8 si on fixe sur l'axe de la roue principale un pignon de huit dents qui s'engrènent avec les 64 dents d'une autre roue . Dans ce cas on enlève la poulie de l'axe de la roue principale et on la fixe sur celui de la roue de 64 dents. Cette dernière effectue trois tours pendant 24 heures. Ainsi on aura besoin d'une corde de longueur égale au huitième de la précédente.

#### **D- La roue du cadran (Fadl al-Dair )**

C'est la roue qui actionne l'aiguille des heures de l'horloge .Pour déterminer le nombre de ses dents, il suffit de scier des dents à l'extrémité de l'axe de la roue principale. Ces dents doivent être du côté de la poulie.et leur nombre ne doit pas dépasser le nombre 5 . Ainsi fait, le nombre des dents de la roue du cadran sera égale au nombre de dents sciées, multiplié par 24 . Soit 48, 72, 96, ou 120.

Notons que ces nombres sont utilisés dans les horloges à temps complet c'est-à-dire 24 heures. Dans les horloges à demi temps, il faut diviser ces nombres par 2.

Une fois la roue du cadran construit on lui accorde un axe qui passe par son centre d'inertie. On pratique ensuite dans deux supports verticaux et parallèles deux trous dans lesquels doit tourner l'axe de la roue du cadran de sorte que ses dents s'engrènent avec les dents sciées à l'extrémité de la roue principale

#### **E - Le cadran (Al-Muhit)**

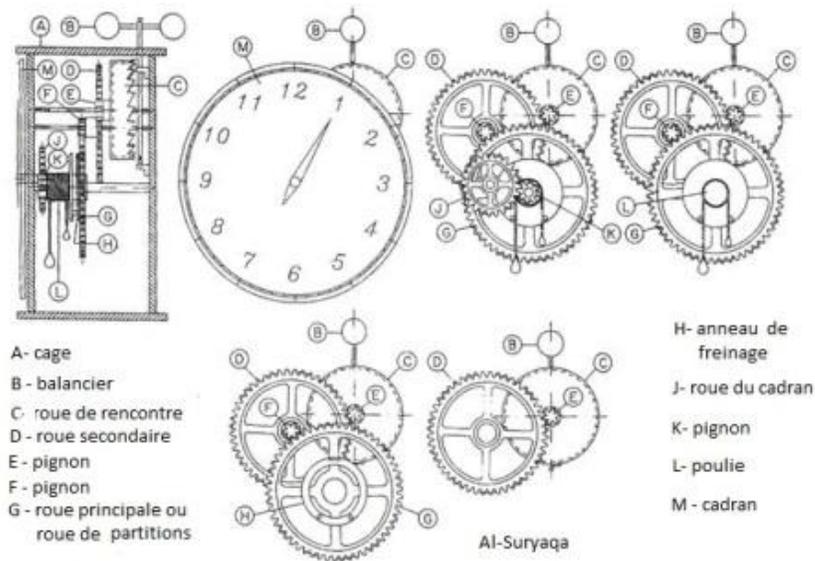
On prend une plaque métallique très mince et on la coupe en forme de cercle de diamètre convenable. On trace ensuite sur ce cercle une autre cercle concentrique et plus petit. On aura une couronne qu'on divise en vingt-quatre, ou en douze parties égales suivant le temps choisi. On écrit dans chaque case le numéro de l'heure en tournant dans le sens direct. Ce cercle gradué forme le cadran des heures.

On fixe ce cercle sur une plaque métallique de façon que l'extrémité de l'axe de la roue du cadran traverse son centre d'inertie. On fixe à cette extrémité une longue tige terminée par un index qui doit se déplacer devant les graduations du cadran.

#### **Montage**

Notons directement que Taqi-al-Din n'a pas représenté son horloge monté avec tous ses éléments. Il s'est contenté de représenter chaque élément au moment de sa description. Ainsi nous avons fait le

croquis de l'horloge monté dans la figure ci-dessous. (G) représente la roue de partition ou roue principale. Sur son axe mobile, dans deux ouvertures pratiquées dans les deux piliers parallèles du cadre (A), est fixée la poulie(L) qui porte l'anneau de freinage (H) muni d'une dent qui s'appuie sur l'un des bras de la croix de la roue principale(G). (J) est la roue du cadran dont les dents s'engrènent avec celles du pignon (k) fixé sur l'axe de la poulie (L). L'extrémité de l'axe de la roue (J) porte l'aiguille des heures. Cette dernière se déplace devant les graduations du cadran (M). L'axe de la roue secondaire (D) porte le pignon (F) dont les dents s'engrènent avec celle de la roue principale (G). L'axe de la roue de rencontre(C) porte le pignon (E) dont les dents s'engrènent avec celle de la roue (D). La tige à palette qui se dresse verticalement devant la roue de rencontre porte le balancier (B).



### **Fonctionnement**

L'horloge étant ainsi montée, on tire la petite masse vers le bas et on l'abandonne. La grande masse occupant alors sa plus haute position commence à descendre d'un mouvement régulier entraînant la rotation de tout le système d'engrenage. Ainsi la roue de rencontre tourne, le balancier oscille et l'aiguille des heures indique le temps écoulé.

### **Les Horloges à sonneries**

Dans son traité sur les horloges mécaniques Taqi al- Din décrit dans cette catégorie deux horloges : Une horloge à sonnerie normale et un réveille - matin

Nous suivons le texte de Taqi-al-Din pour la description de ces deux horloges .

### **A- Définition**

Une horloge à sonnerie est une horloge qui sonne d'elle -même ( automatiquement) les heures et les demi-heures (définition donnée par Taqi al-Din).

Notons que ce genre d'horloge porte le nom de comtoise dont la définition est la suivante : Une horloge comtoise se caractérise par la présence de deux mécanismes, le premier pour le mouvement et le second pour la sonnerie . Ces mécanismes sont situés côte à côte dans une cage de fer démontable. L'entraînement est effectué par deux poids en fonte. Le régulateur est assuré par un long balancier (ou pendule

Nous suivons la description donnée par Taqi al-Din

## B- Aspect général

Au système d'engrenage qui indique les heures et dont on vient de voir la description dans l'horloge à poids, on ajoute un autre système qui actionne un marteau. Ce dernier frappe sur un timbre un nombre de coups relatif à l'heure indiquée par l'aiguille. Ainsi, il effectue un seul coup lorsque l'aiguille se fixe sur le nombre 1 du cadran, deux coups pour préciser que l'aiguille est déjà sur le nombre 2 du cadran ... et 12 coups pour indiquer que c'est le midi.

D'autres sonneries portent deux marteaux, dont l'un indique les heures et l'autre indique les demi-heures et les quarts d'heure.

Pour construire cette sonnerie, il faut connaître le nombre de coups que doit donner le marteau pour un temps complet ou pour un demi temps. Dans ce dernier cas, ce nombre est 78, On obtient ce nombre soit en additionnant les nombres de 1 à 12 soit en multipliant la moitié de 12 par (12+1) soit  $6 \times 13 = 78$ . (Cette méthode nous rappelle la relation concernant la somme arithmétique d'une de n nombres  $S = n(n+1)/2$  pour  $n=12$  ).

Le nombre  $78 = 39 \times 2 = 26 \times 3 = 13 \times 6$ . Ces nombres seront par la suite nécessaires pour choisir le nombre convenable de chevilles de la roue motrice de la sonnerie.

## C- Description des éléments constituant la sonnerie

### a - la roue de base ou porteuse

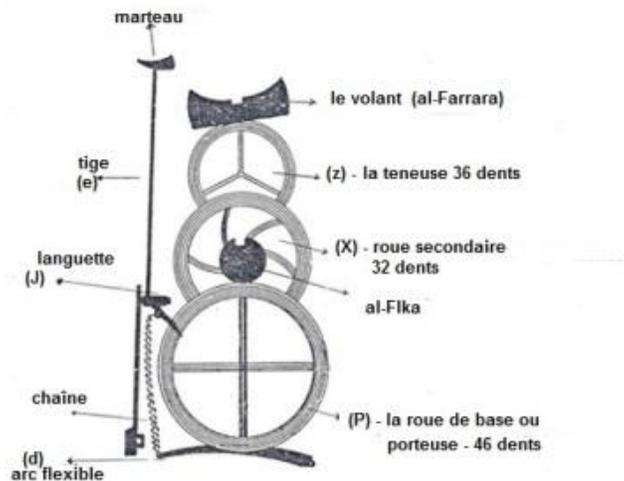
On construit une roue identique à la roue principale de l'horloge à poids mais dont le nombre de dents est 48. On fixe à sa surface, suivant une couronne et du côté de la poulie, des petits pitons dont le nombre est un multiple de 78 soit 6 ( $13 \times 6 = 78$ ). Rappelons que le nombre 78 est le nombre de coups du marteau pour le demi temps (soit 12 heures). Cette roue s'appelle la roue de base ou porteuse, son axe porte à l'une de ses extrémités la poulie (N) avec sa corde et ses deux poids, tandis que l'autre extrémité porte le pignon (R) de quatre dents. On construit de même la roue secondaire (X) de 42 dents, dont l'axe porte à l'une de ses deux extrémités le pignon (a) de huit dents et à l'autre un petit disque muni sur sa périphérie d'un creux triangulaire prête à recevoir une cheville ou une petite verge pour le bloquer. Soit (w) ce petit disque on l'appelle "al-Filka". (voir figure ci-dessous)

On construit ensuite une troisième roue (Z) de 36 dents dont l'axe porte le pignon (Y) de six dents qui s'engrènent avec la roue (X). La roue (Z) s'appelle la teneuse. Puis on prend un axe, on fixe à l'une de ses

deux extrémités un petit volant à ailettes et à l'autre extrémité un pignon (b) à six dents qui s'engrènent avec celle de la roue (Z) .

Ce système étant monté on remarque qu'à chaque tour de la roue de base (P) correspond 6 (48:8) tours de la roue de base (X) et  $6 \times 7 = 42$  tours de la roue (Z) et  $6 \times 7 \times 6 = 252$  tours du volant .

Figure tirée du manuscrit de Taqi-al-Din mais sans les annotations



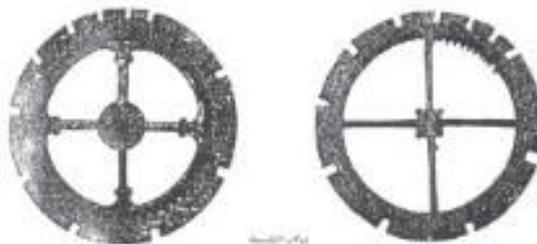
### b - Le marteau et son timbre

On prend une tige rigide et on fixe à l'une de ses deux extrémités une petite plaque percée d'un trou. Tout près de l'autre extrémité, on fixe horizontalement une petite verge. De même on prend une autre tige plus longue et plus fine que la première, soit (e) cette tige; on fixe à son extrémité supérieure la tête d'un petit marteau et à l'autre une petite tige vide qui porte en son milieu une languette (J) qui doit rentrer les chevilles de la porteuse. Cette dernière tige doit pénétrer solidement dans la verge horizontale de la première tige. On relie ensuite par une chaîne métallique la languette à l'extrémité d'un arc flexible (d) dont l'autre extrémité sera fixée au-dessous de la roue porteuse.

Une demi sphère métallique vide(f) fixée au-dessus du marteau jouera le rôle de timbre.

### c - La roue de compte

C'est la roue qui permet au marteau de frapper sur le timbre un seul coup pour la première heure, deux coups pour la deuxième, trois coups pour la troisième et ainsi de suite jusqu'à la douzième heure.



Rappelons-nous que le nombre de chevilles fixées à la surface de la roue porteuse est six , et que son multiple qui nous donne 78 (nombre de coups du marteau) est 13. Ainsi on construit une roue de même diamètre que la roue porteuse (P), on scie ses dents à l'intérieur de sa couronne, soit  $(13 \times 4 = 52)$ , le nombre de ces dents. On lui adjoint une croix portée par quatre pitons fixés à sa surface, On pratique ensuite sur sa couronne des entailles inégales dont les longueurs sont proportionnelles aux nombre 1,2,3,...,12 . Cette roue s'appelle la roue de compte . Soit (S) cette roue.

Notons que la teneuse porte à sa surface et du côté du petit disque (W) une verge (g) qui rentre dans la fente de (W).

#### d - La détente

On conçoit, que le rouage soit arrêté aussitôt que le marteau a frappé le nombre de coups correspondants à l'heure, indiquée sur le cadran, et divisés par la roue de compte. Cet arrêt est la fonction d'une pièce appelée "détente" dont voici la disposition. La détente est composée d'un axe mis en cage, roulant sur deux pivots. Cet axe porte un bras terminé par un talon qui appuie sur le bord de roue compte, par l'action d'un ressort ou d'un contrepoids. L'axe de la détente porte un second bras qui s'étend vers l'axe de la roue (Z). Cette roue porte, sur sa surface, une cheville. C'est cette cheville que la détente doit arrêter aussitôt que le marteau a frappé le dernier des coups mesurés par la roue de compte; ce qui s'opère de la façon suivante: Lorsque la bras à talon de la détente appuie sur le bord de la roue de compte, le bout du second bras, de cette même détente, laisse passer la cheville de roue (Z) et ceci à lieu durant l'intervalle qui sépare les entailles ; mais aussitôt que la roue de compte présente au talon une de ses entailles, celui-ci y descend, et le second bras se présente à la cheville de la roue (Z) et l'arrête au moment où le dernier coup du marteau a été effectué pour l'heure actuelle.

Il reste à expliquer comment la sonnerie est mise en jeu à la fin de chaque heure révolue, et comment on donne la liberté au rouage de tourner et au marteau de fonctionner.

Dans ces horloges à roues et à balancier, la roue qui porte le poids fait, en une heure, sa révolution; (Celle-ci sert à conduire les roues du cadran, c'est-à-dire, à conduire une autre roue portant un pignon qui fait faire un tour en douze heure à la roue qui porte l'aiguille des heures.) Cette roue montée sur la grande roue du mouvement, porte une cheville qui correspond à un troisième bras de la détente; c'est ce bras qui étant élevé à chaque heure par la cheville, dont nous venons de parler, donne au rouage de la sonnerie la liberté de tourner de nouveau et au marteau de reprendre son action.

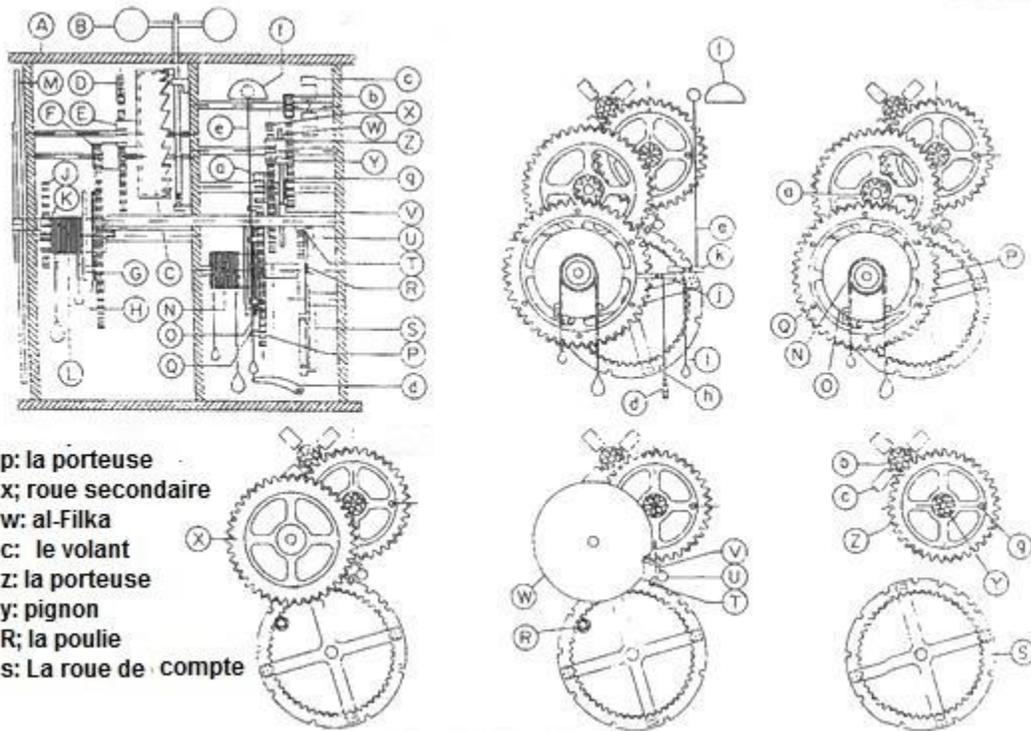
Taqi al-Din continue: Nous pouvons construire une horloge qui sonne le quart de l'heure et par un seul coup.

À ce but, on construit une roue de 60 dents, qui porte sur sa surface dix chevilles. On construit ensuite une couronne percée de trous dans lesquels on introduit les dix chevilles. On associe à cette roue une roue secondaire de 48 dents dont l'axe porte un pignon de six dents et on lui adjoint le disque à fente . On construit enfin la dernière roue de 36 dents et dont l'axe porte un pignon de six dents. Enfin, on construit le volant modérateur et l'on fixe sur son axe un pignon de six dents.

On ajoute à tout ce système d'engrenage la détente décrite précédemment munie de ses bras.

Notons que le rouage de chaque horloge sera enfermé dans une cage et il n'apparaît que le cadre et les aiguilles.

La figure ci-dessous montre l'horloge à sonnerie montée avec tous ses éléments d'après la description de Taqi-al-Din



### Le réveille-matin de Taqi-al-Din

En général un réveille-matin est une horloge qui sonne à l'heure voulue.

C'est une petite pendule, munie d'un mécanisme qui actionne une sonnerie bruyante et prolongée à l'heure que l'on a marquée par une aiguille spéciale.

C'est aussi une pendule munie d'une sonnerie dont le déclenchement peut-être grâce à un mécanisme réglé et fixé à une heure déterminée.

Nous suivons textuellement la définition et la description de l'auteur.

## Définition

Le réveille- matin est une horloge à laquelle on a ajouté un mécanisme afin qu'à une heure quelconque donnée, un double marteau frappe sur une cloche d'un mouvement précipité et continu, en faisant un son capable d'interrompre le sommeil de la personne auprès de laquelle l'horloge est placée.

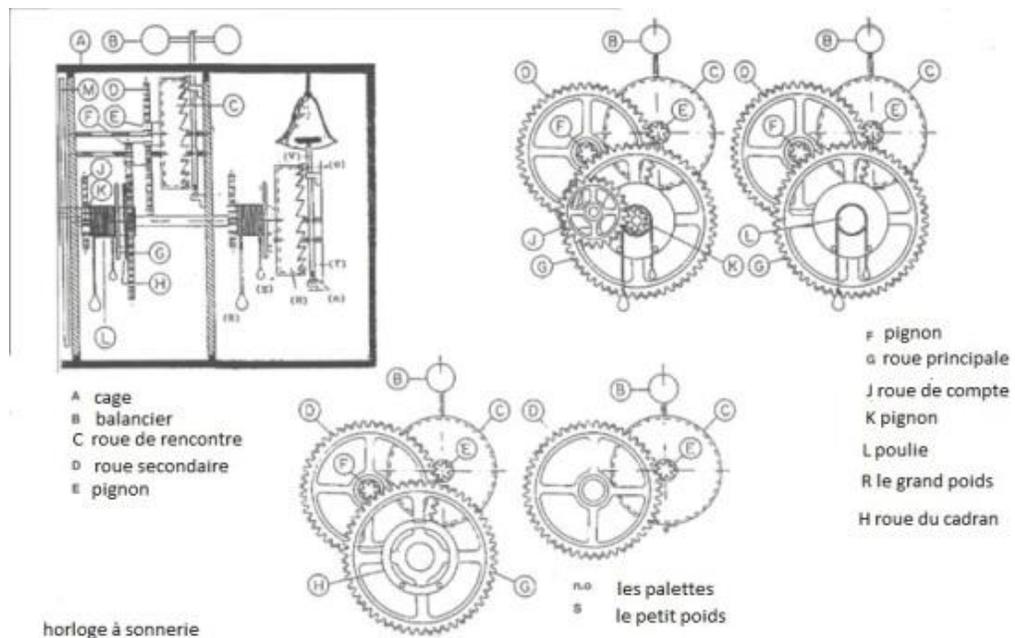
## Description

a - Le rouage du mouvement ou rouage qui actionne l'aiguille des heures. Ce rouage est composé de quatre roues contenues dans la cage de l'horloge. (G) est la grande roue qui porte sur son arbre une poulie sur laquelle s'enroule une corde portant le poids moteur et son contrepoids. Cette poulie porte l'anneau d'encliquetage.

La roue principale (G) fait sa révolution en une heure. L'extrémité de son axe, qui est aussi celui de la poulie, porte un pignon à deux dents qui s'engrènent avec la roue du cadran (J) qui porte 48 dents. L'axe de cette dernière roue porte un pivot prolongé en dehors de la platine. Ce pivot porte un canon, au bout duquel est ajustée l'aiguille des heures.

La roue (G), de 45 dents, s'engrène avec le pignon (F) de 6 dents. L'axe de ce pignon porte la roue (D) de 48 dents; qui s'engrène avec le pignon (E) de 6 dents. L'axe du pignon porte la roue de rencontre ou roue à couronne (C) de 21 dents. Cette roue fait échappement avec les palettes portée par l'axe du balancier qui est le régulateur de cette machine.

A chaque révolution de la roue de rencontre (C) le balancier fait 2x1 soit 42 vibrations, et cette roue fait huit tours pour un tour de la roue (D) et cette dernière fait neuf tours pour un tour de (C). Comme la révolution de dernière est d'une heure, donc le balancier effectue 9x8x42 soit 3024 vibrations par heure.



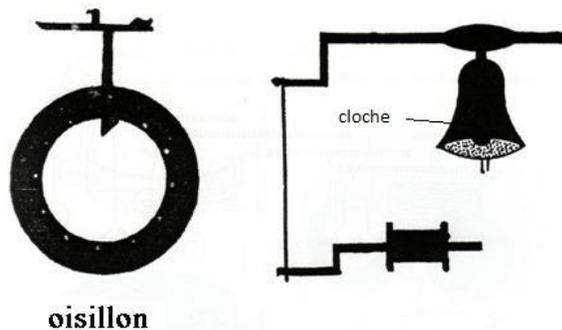
## b - Le mécanisme du réveil

Le mécanisme du réveil, qui est très simple, est inséré dans la seconde cage assemblée avec celle qui renferme le rouage de l'horloge.

La roue à couronne (H), ou roue d'échappement, porte sur son axe une poulie. Sur la gorge de cette poulie est enroulée une corde qui porte à l'une de ses deux extrémités le poids moteur (R) et à l'autre le contrepoids (S). Cette poulie porte un anneau d'encliquetage.

Les dents de la roue (H) font échappement avec la palettes (n,o) fixées sur l'axe verticale (TV) qui porte à son extrémité supérieure la tête d'un marteau. Cette tête en forme de cylindre, frappe alternativement les bords intérieurs d'une cloche.

Une détente sera accordée à la verge du balancier pour arrêter son mouvement au moment voulu. Cette détente porte un bras qui appuie sur la verge et qu'on appelle "le dragon", car il prend souvent cette forme. Un contre ressort sur lequel est fixé une cheville sert à élever le bras d'un axe parallèle à la détente pour ramener celle-ci à sa position initiale. Pour écarter la détente et libérer le mécanisme de la roue du réveil, on fixe au "dragon" une petite verge appelée "oisillon" qui pend devant la roue du cadran. Cette verge sera actionnée par un piton planté dans l'un des trous pratiqués à la surface de la roue de rencontre. Ces trous sont au nombre de douze correspondant au nombre des heures du demi temps (12 heures).



### **Fonctionnement**

Pour que le réveille- matin parte à l'heure précise où l'on veut se réveiller; il suffit d'introduire le clou dans le trou convenable. Dès que l'aiguille de l'horloge indique l'heure désirée, le clou pousse l'oisillon qui agit à son tour sur le dragon et la détente pour libérer la verge du réveil qui vibre fortement. Son marteau donne alors des coups rapides sur la cloche qui résonne.

### **Les horloges portatives**

#### **Définition**

Les horloges portatives sont des horloges de petites dimensions, dans lesquelles le poids moteur est remplacé par un ressort - spiral, dont la force de traction joue le rôle de force motrice.

Taqi-al-Din distingue deux catégories pour ses horloges portatives :

#### A - Les horloges sans corde

##### Description

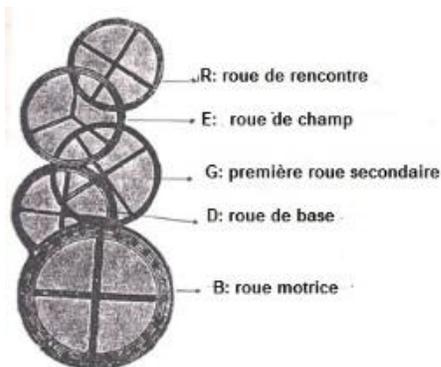
Une horloge sans corde se compose des éléments suivants:

##### a - Le tambour ou barillet

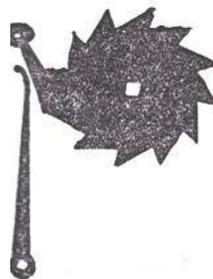
(A) est un tambour appelé barillet, qui sert à recevoir le ressort spiral moteur de l'horloge. Il est formé par une roue (B), par une boîte cylindrique de fer ou de cuivre, dont la base se fixe sur la roue, et par un couvercle qui entre solidement dans trois chevilles fixées sur le bord de la boîte . On fixe au centre d'inertie du fond de la boîte et de son couvercle un petit cube métallique qu'on appelle "tétine" pour augmenter l'épaisseur des trous dans lesquels passe l'axe de rotation du barillet. Le fond de cette dernière porte deux ou trois tenons qui servent à la river sur la roue (B) .

##### b - Le ressort

Le ressort, moteur des horloges portatives, est une longue lame de fer ou d'acier trempé, pliée en spirale. Sa largeur doit être légèrement inférieure à la hauteur du barillet. Sa longueur est telle que, une fois enroulé en spires non jointives, elle entre facilement dans le barillet sans frotter sur ses bords. l'extrémité intérieure de cette lame est fixée à l'axe de rotation du barillet, tandis que l'autre extrémité est soudée à un crochet fixé à l'intérieure du barillet.



Le système d'engrenage



le cliquet et son rochet



la clef et son rochet

Figures tirées du traité de Taqi al-Din

##### c - La roue motrice

Cette roue est celle qui s'applique au fond du barillet. Soit (B) cette roue. Notons que son périmètre porte 45 dents triangulaires et dépasse légèrement le périmètre du barillet.

Les dents de la roue motrice (B) s'engrènent avec celles du pignon (a) dont l'axe porte la roue (D). Cette dernière roue a 45 dents et porte sur sa surface quatre chevilles qui indiquent que la durée d'une

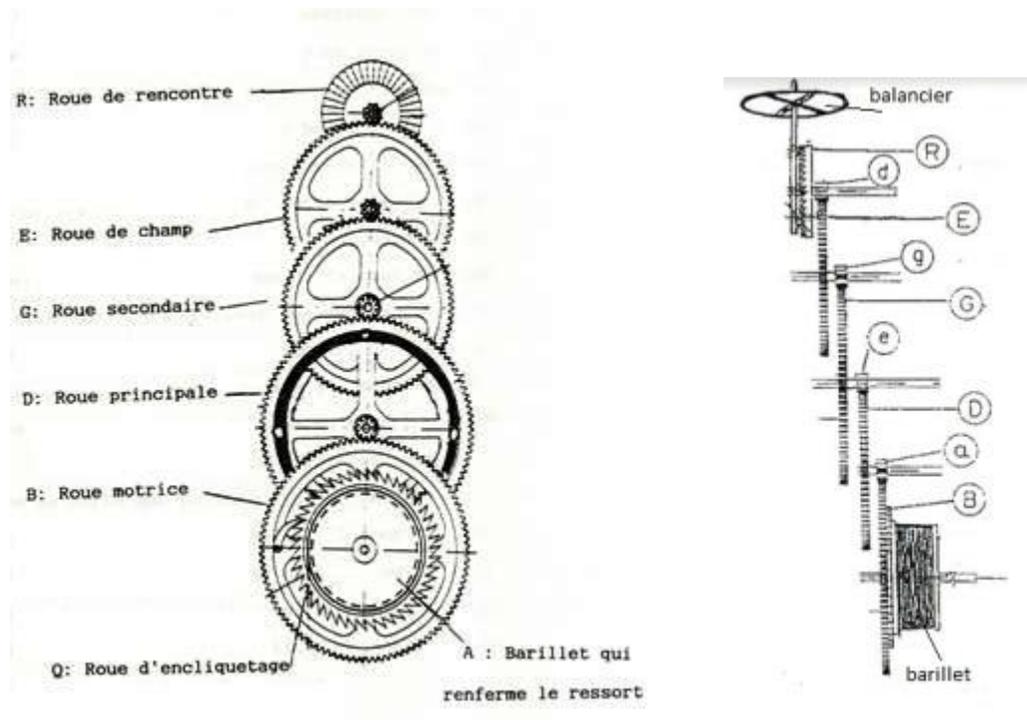
révolution de cette roue est de quatre heures. La roue (D) engrène avec le pignon (e) de six dents dont l'axe porte la roue secondaire (G) de 50 dents qui s'engrènent avec les cinq dents du pignon (g). Ce dernier pignon porte sur son axe la roue de champs (E) de 45 dents qui s'engrènent avec celles du pignon (d) de cinq dents. L'axe de ce dernier pignon porte la roue de rencontre (R) de quinze dents.

#### d - Le balancier

Le balancier est formé d'un cerceau métallique sur lequel on a fixé deux barres rectangulaires qui se croisent à angle droit. Une tige verticale, fixée au centre d'inertie (o) du cerceau, porte deux palettes (g et h) qui font échappement avec la roue de rencontre (R)

#### e - La roue du cadran

On ajoute à l'extrémité de l'axe de la roue principale un pignon dont les dents s'engrènent avec une roue qui porte sur son axe l'aiguille des heures qui doit se déplacer devant un cadran gradué



La comtoise d'après la description de Taqi al-Din

#### **Fonctionnement**

Le tambour (A) ou barillet roule sur un arbre placé dans la cage de l'horloge. Cet arbre porte un crochet qui s'accroche à l'ouverture intérieure du ressort moteur; de sorte qu'en faisant tourner cet arbre, on bande le ressort. A cet effet , l'arbre porte en dehors de la platine un pivot prolongé dont la partie excédante à la platine prend la forme d'un carré, dans ce carré entre un rochet d'encliquetage sur lequel

agit un cliquet et un arc flexible pour arrêter l'action du ressort (voir figure ci-dessous) . Ainsi le ressort agit seulement sur le barillet. De même le bout de l'arbre du tambour porte une carré dans laquelle on introduit la clé pour rebander le ressort moteur .

Pour faire fonctionner l'horloge, il suffit de tourner la clé pour bander le ressort . Ce dernier entraîne ensuite la rotation de tout le système d'engrenage et la montre fonctionne .

#### Les remarques signalées par Taqi-al-Din

- Pour que l'horloge fonctionne régulièrement, il faut que l'enroulement et le déroulement du ressort soient limités. A cette fin on prend une plaque de fer, on applique la pointe d'un compas en son centre d'inertie et on trace un cercle de même diamètre que le barillet. On divise ensuite le rayon en cinq parties égales et on trace un autre cercle concentrique au premier et de rayon égale au  $\frac{4}{5}$  du grand rayon . Les deux cercles ainsi tracés forment une couronne. On trace de nouveau une autre cercle concentrique aux deux premiers et de rayon  $\frac{2}{5}$  du grand rayon , puis on lie l'arc supérieur de ce petit cercle à la couronne par deux autres arcs et on vide le reste de la plaque . On coupe ensuite la plaque selon le périmètre du grand cercle tout en laissant une languette diamétralement opposée à la bande. Cette pièce ainsi fabriquée s'appelle (al- dabita) la clavette .



La clavette (al-Dabita)



la virole

Figures tirées du traité de Taqi al-Din

On fabrique ensuite une virole de même périmètre que les trous de la base du barillet. On fixe à son bord inférieur une dent qui peut rentrer facilement dans un des trous de la base du barillet. On lime le bord supérieur de cette virole en forme d'hélice, tout en tournant dans le sens opposé de l'inclinaison des dents de la roue de base du barillet.

On fait rentrer le barillet dans cette virole et on lui accorde la clavette de sorte que sa languette se déplace sur le bord de la virole. Ceci fait, on tourne la clé pour enrouler le ressort jusqu'à ce que le balancier se déplace. On tire ensuite la virole et on la place dans une nouvelle position tel que la languette de la clavette reprend sa position initiale.

C'est ainsi qu'on limite les positions extrêmes du ressort.

## **B- Les horloges à corde**

Ces horloges ne peuvent être actionnées que par l'enroulement d'une corde sur le barillet.

Dans ces horloges la mesure du temps est beaucoup plus précise que dans les précédentes. En effet : Lorsque la première horloge portative fut exécutée, on ne tardait pas à observer que, dans les cours des vingt-quatre heures, elle faisait des variations considérables. Ceci est attribué à la variation de la force motrice du ressort. Cette variation apparaît nettement en remontant l'horloge, car la force du ressort augmente très sensiblement, jusqu'au point où lorsqu'il est complètement tordu sa force devient à peu près le double de ce qu'elle était à la fin de sa course.

Pour garder la force motrice du ressort constante, on se sert d'une fusée.

Cette dernière est une espèce de cône tronqué. Dans sa surface latérale est creusé, en spirale, une rainure qui commence par sa base et se termine à son sommet. Cette fusée communique au barillet au moyen d'une chaîne dont l'une des extrémités s'accroche à la base du barillet et l'autre à la fusée.

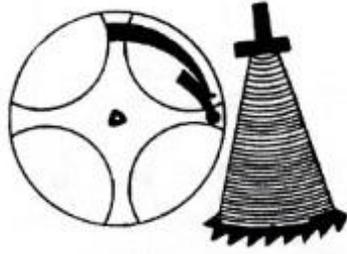
La fonction de la fusée est de rendre homogène l'action du ressort sur le rouage, et ceci à cause des différentes longueurs des rayons qui forment la rainure spirale; ils sont tels que lorsque le ressort est à son premier tour de déroulement où sa force motrice est la plus faible, la chaîne se développe de dessus de la plus grand rayon de la fusée et agit sur le rouage avec une force qui se conserve lorsque le ressort arrive vers la fin de son déroulement la chaîne se développe de dessus du plus petit rayon de la fusée. Il est certain que la force motrice du ressort augmente au fur et à mesure qu'on le remonte, en même temps la chaîne se déroule de la fusée à travers des rayons qui diminuent progressivement; ce qui a pour effet de maintenir la force motrice du ressort constante.

### **Description de l'horloge à corde d'après Taqi al-Din**

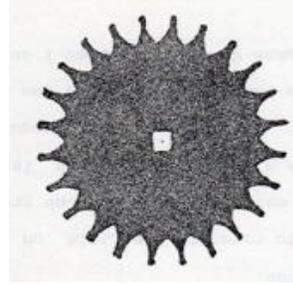
On construit un barillet identique à celui des horloges sans corde. On le débarrasse de sa roue motrice et on lui accorde le rochet d'encliquetage avec son cliquet. Dans ce barillet, on enferme le ressort spiral dont la traction joue le rôle de force motrice. L'ensemble tourne autour d'un axe dont les deux bouts sont mobiles dans deux trous pratiqués dans deux piliers verticaux et parallèles.

De même on construit l'ensemble des roues qui constituent le système d'engrenage de l'horloge à savoir: la roue principale, les roues secondaires, la roue de rencontre et le balancier muni de sa verge sur laquelle sont fixées les palettes d'échappement.

Pour régulariser la force qu'exerce le ressort spiral sur ce système d'engrenage, on associe à l'axe de la roue principale une fusée. Cette dernière est un cône tronqué dont la surface latérale renferme une rainure en spirale qui commence par sa grande base et se termine à la petite base. On fixe à la grande base de cette fusée une roue de diamètre légèrement plus grand, ce qui permet de tailler son diamètre en dents de rochet c'est-à-dire ces dents sont droites d'un côté et inclinées de l'autre. La roue principale est appliquée contre le rochet de la fusée au moyen d'une virole qui entre à frottement dans l'axe de la fusée, ce qui l'empêche de s'en écarter tout en lui permettant seulement de tourner. (voir la figure ci-contre)



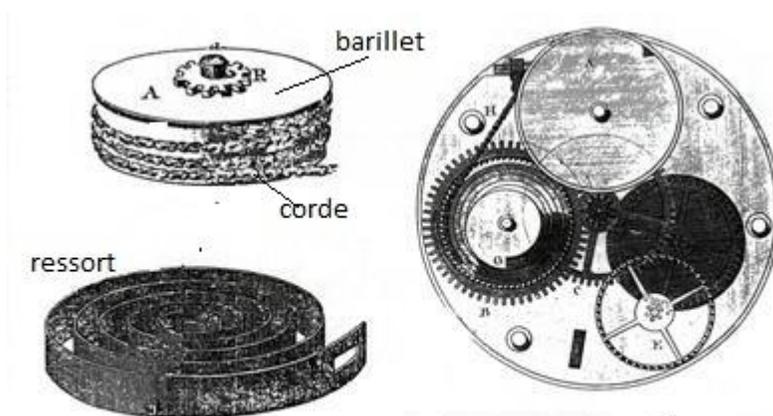
La fusée et son cliquet



la roue de base

Figure tirée du traité de Taqi al-Din

Cette roue porte une tige à extrémité recourbée , appelée cliquet. On attachera aussi sur la surface de cette même roue, et près du cliquet, un ressort qui en s'appuyant sur le cliquet l'obligera de s'engager entre les dents du rochet. Ainsi lorsqu'on tourne la fusée pour remonter l'horloge, les dents du rochet échapperont de dessous le cliquet (ce mécanisme s'appelle l'encliquetage), car l'inclinaison de chaque dent permet d'écarter le cliquet, mais l'action du ressort l'oblige toujours à retomber entre deux dents. Dès que l'on cesse de tordre le ressort , les côtés droits des dents du rochet arc - boutent contre le cliquet , ainsi la fusée ne pourra tourner sans entraîner avec elle la roue principale.



horloge portative d'après Berthoud

### **Fonctionnement**

L'horloge ainsi construite, il suffit d'enrouler la corde autour du barillet, puis d'introduire la clé dans l'axe de la fusée et de la tourner afin que la corde s'enroule sur les rainures de la fusée. Cette opération bande le ressort spiral enfermé dans le barillet. Ce ressort se déploie ramenant la corde autour du barillet. La fusée tourne dans le sens contraire que précédemment entraînant par conséquent la rotation de la roue principale et de tout le système d'engrenage. C'est ainsi que l'horloge entre en action.

Remarques et conclusion

Taqi al-Din termine son traité sur les horloges par des remarques très importantes et une conclusion assez intéressante. Nous les traduisons :

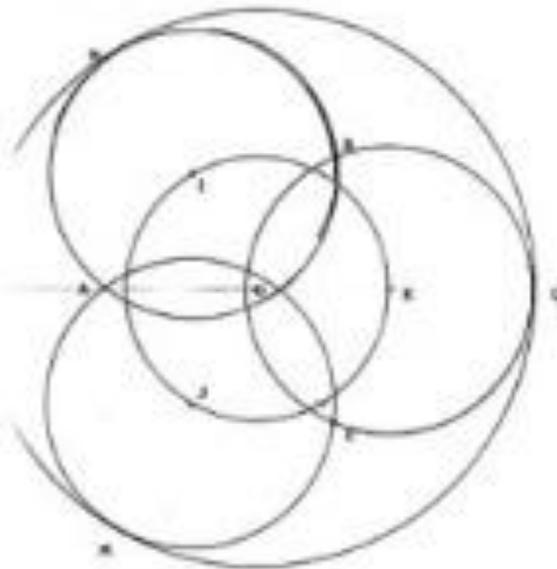
#### Remarque I

Comme les horloges à poids, les horloges portatives peuvent être à sonnerie. Dans ce cas il suffit de remplacer le poids de la sonnerie déjà décrite, par le ressort spiral, le barillet et la fusée. Quant au système d'engrenage, il comprend les mêmes éléments à savoir, la roue de compte, les roues secondaires et le volant modérateur. Il faut ajouter aussi la détente qui accorde le mécanisme de la sonnerie avec celui des heures.

#### Remarque II

Dans cette remarque Taqi al-Din propose une méthode pour préciser le diamètre et le nombre des dents de ses roues. A ce sujet il dit: " Sur une plaque métallique mince, on trace un cercle de rayon moyen et on divise ce rayon en 30 parties égales. Soit (o) le centre de ce cercle dont le rayon renferme 30 divisions. On trace un autre cercle concentrique à la première et de rayon égal à 14 divisions. On divise ensuite le périmètre de ce dernier cercle en trois parties égales. Soit I, J, et K ces trois points.

Avec ces points comme centre on trace respectivement trois cercles égaux de rayon égal à 16 divisions. Ces trois cercles se rencontrent aux points (A), (B) et (C). On coupe ensuite toutes les parties de la plaque qui se trouvent à l'extérieur de ces cercles. On aura ainsi la forme de l'enveloppe du mécanisme de l'horloge.



On construit ensuite le barillet de rayon de base égal à 13 divisions et dont l'axe de rotation occupe l'un des centre (I), (J) ou (K). La roue principale aura un rayon égal à celui du barillet. Son périmètre sera fraisé en 65 dents identiques. La première roue secondaire aura comme rayon la distance qui couvre 12 divisions et aura 48 dents sur son périmètre. L'axe de rotation de cette roue secondaire porte un pignon

de huit dents qui s'engrènent avec les dents de la roue principale. Une deuxième roue secondaire aura comme rayon 10 divisions et porte sur son périmètre 42 dents. Son axe porte un pignon de huit dents qui s'engrènent avec les dents de la première roue secondaire. La roue de champs aura un rayon de 8 divisions et porte 36 dents. Son axe porte un pignon de six dents qui s'engrènent avec la deuxième roue secondaire. Enfin la roue de rencontre aura un rayon de six divisions, sa couronne porte 11 dents et son axe porte un pignon de six dents qui s'engrènent avec les dents de la roue de champ

La roue principale est construite pour accomplir une révolution en quatre heures. Ainsi la roue du balancier effectue 4851 oscillations par heure. En effet: À chaque tour de la roue principale, la roue secondaire effectue 7 tours, la deuxième roue secondaire effectue  $7 \times 6 = 42$  tours, la roue de champ effectue  $42 \times 7 = 294$  tours et la roue de rencontre effectue  $294 \times 6 = 1764$  tours. Enfin les palettes rencontrent la roue  $1764 \times 11 = 19404$  fois pour quatre heures. Soit 4851 fois par heure. Le balancier effectue alors  $4851 \times 2 = 9702$  oscillations par heure.

On fixe sur l'axe de la roue principale un pignon de rayon quatre divisions et demi; son périmètre porte 16 dents. Sur un axe parallèle à celui de la roue principale on fixe un pignon de quatre dents qui s'engrènent avec les dents du premier pignon. Sur le même axe on fixe la roue du cadran dont le rayon est 11,25 divisions et qui porte 48 dents sur son périmètre intérieur. C'est au bout de cet axe qu'on doit fixer l'aiguille des heures qui doit tourner devant un cadran circulaire divisé en douze parties égales. La conclusion signalée par Taqi al-Din

Taqi al-Din dit : " Cette conclusion est très importante vu qu'elle traite des opérations de la main d'œuvre pour l'exécution des pièces d'horlogerie.

#### a - soudure du fer sur fer

Dans ce cas il faut limer les bords à souder jusqu'à ce que la couleur noire disparaisse. On lie les deux pièces à souder par un clou ou par un fil métallique. On couvre la partie à souder par des lames de cuivre rouge assez fines et très minces ( le cuivre jaune est aussi plus facile à faire fondre), puis on fait concasser un morceau de verre de très bonne qualité et bien pur. On mélange le verre réduit en poudre avec de la salive, on obtient ainsi une pâte. Avec le bout d'un canif on prend une petite quantité de cette pâte et on couvre les lames de cuivre. Cette opération se fait en faisant tourner la partie à souder, sur un feu modéré jusqu'à ce que la pâte se sèche. Puis on augmente la puissance du feu jusqu'au moment où la couche de cuivre qui est au-dessous de la pâte de verre fond et s'écoule. On éteint le feu et on laisse refroidir. À l'aide d'un marteau on casse le verre et l'on obtient ainsi une soudure parfaite."

Taqi al-Din signale à la fin de ce paragraphe ce qui suit: " Si l'on veut que la soudure n'apparaît pas sur la pièce métallique, on pourra mélanger le cuivre jaune avec de l'argent dans une proportion double c'est-à-dire à 5mg de cuivre jaune, il faut ajouter 10 mg d'argent. Puis on suivra le procédé précédemment décrit pour la soudure.

#### b - Soudure du cuivre sur le fer.

Pour faire souder deux pièces métalliques de nature différente, du cuivre et du fer par exemple, il suffit d'ajouter au mélange précédent et en quantité égale à la moitié de son volume, du plomb pur. Dès que le mélange commence à fendre, on ajoute du nitrate de sodium puis on étend la pâte sur une pierre lisse et poreuse et on le laisse refroidir. On obtient une plaque mince dont l'épaisseur sera homogène par quelques coups de marteau. Pour la soudure, on utilise des lames de cette plaque. On mélange ensuite le nitrate de sodium avec du verre réduit en poudre (à 10 volumes de nitrate on ajoute 1/2 volume de verre concassé). On transforme ce mélange en pâte en ajoutant de l'eau. On suivra ensuite le même procédé décrit précédemment pour la soudure. Quant à la fabrication de la cloche, il faut ajouter à chaque ratl (2,5kg) de cuivre rouge 400 g de plomb. Pour avoir la pâte de ce mélange, on suivra la méthode suivante: On fait fondre le cuivre, on lui ajoute 600 g d'arsenic, 300g d'antimoine et une petite quantité de nitrate de sodium. On ajoute enfin le plomb. On verse le mélange obtenue dans un moule et on laisse refroidir. On obtient ainsi une cloche qui résonne fortement.

Notons que la hauteur du son (grave ou aigu) dépend non seulement du métal qui constitue la cloche mais aussi de la forme de ce dernier.

Pour le ressort moteur, il faut choisir une lame d'acier vénitien. ce genre d'acier est le meilleur. Cette lame doit être bien forgée afin de la rendre homogène; mais dans les horloges portatives ou dans les montres, il faut que le ressort soit plus épais, ce qui rend son déroulement beaucoup plus difficile. Pour remédier à cet inconvénient, il faut tremper l'acier. Pour cela, il faut suivre le procédé suivant: On enroule le ressort en spirales sans trop serrer les spires, puis on le trempe dans l'eau et on le saupoudre d'un mélange composé des éléments suivants: on réduit en poudre la corne d'une chèvre, on lui ajoute un volume égal de sel marin et quelques morceaux de l'épluchure d'une grenade. Ensuite on le lave afin qu'il soit bien propre. S'il n'est pas assez propre, on répète l'opération. D'autre part, on fait fondre le plomb, on le débarrasse de son écume et on trempe le ressort de façon qu'il soit complètement immergé. On attend quelques minutes et on attend pour voir sa couleur. Si cette couleur est toujours blanche on le trempe de nouveau. L'opération est répétée plusieurs fois jusqu'à ce que la couleur passe du blanc au jaune clair puis au violet. À ce moment on retire le ressort du bain de plomb et on le laisse refroidir."

la transcription de ce traité fut terminée le Lundi matin à la date du 11 du mois de ``rabi' al thani`` de l'année 973 de l'hégire . Cette transcription a été faite à partir d'un autre traité écrit par Taqi-al-Din le fils du juge Ma'rouf.

