

GRANDES ENCYCLOPÉDIES INDUSTRIELLES  
J.-B. BAILLIÈRE

ENCYCLOPÉDIE DE MÉCANIQUE APPLIQUÉE

Directeur : L. LECORNU  
Membre de l'Institut.

HORLOGERIE ET CHRONOMÉTRIE

PAR

JULES ANDRADE

Professeur à la Faculté des sciences de Besançon,  
Correspondant de l'Institut.



Les chevilles souvent sont faites en pierre dure.

Cet échappement a été apprécié dans des horloges de faibles dimensions.

**Échappement à cylindre.** — L'axe du balancier réglant est un cylindre creux et entaillé presque à moitié ; les arêtes de l'entaille forment les *lèvres*, *a* est la lèvre d'entrée, *a'* la lèvre de sortie. Les lèvres sont convenablement arrondies. Chaque dent de la roue présente une surface légèrement convexe *b*, c'est *l'incliné* de la dent qui en appuyant sur l'une ou l'autre des lèvres, renforce la rotation du cylindre et conduit ainsi *l'arc de levée du balancier*.

Le cylindre et la roue sont d'acier trempé, laissé dur aux parties frottantes.

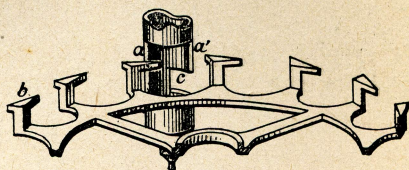


Fig. 24.

Le *repos* se fait par l'appui de la dent contre la surface latérale ou *l'écorce* du cylindre à l'intérieur après l'impulsion reçue par la lèvre d'entrée, à l'extérieur après l'impulsion donnée par la lèvre de sortie. Une entaille est pratiquée dans l'écorce à partir de la lèvre de sortie.

Cette *encoche* laisse faire au balancier une vibration aussi étendue que possible, en portant les dents sur *colonnes*.

Toutefois, l'oscillation du balancier ne saurait dépasser un tour, car alors la lèvre de sortie viendrait accrocher une dent de la roue.

La *goupille de renversement* placée en saillie sur la circonférence du balancier en rencontrant un *plot* fixe limite alors l'étendue exagérée de la vibration. L'amplitude de régime est ainsi limitée à  $\frac{3}{4}$  de tour soit  $270^\circ$ .

Cet échappement eut une grande vogue, mais il a fini par disparaître des montres de moyennes dimensions dès que l'échappement à ancre a pu être taillé à bas prix par les machines-outils et par fabrication en séries.

## CHAPITRE VII

### CRÉATION DU BALANCIER COMPENSATEUR DES CHRONOMÈTRES, PAR ARNOLD ET EARNSHAW SA THÉORIE, DONNÉE PLUS DE CENT ANS APRÈS, PAR Y. VILLARCEAU

Comme on l'a dit plus haut, page 12, la première idée de *compensation thermique* des chronomètres est due à Harrison ; une règle bimétallique d'acier et laiton chevillés ensemble, bien droite à la température de réglage, embrasse à l'une de ses deux extrémités en le spiral la lame laiton de la règle regarde le piston, où est encastré le spiral ; la température du chronomètre s'élevant par rapport à la température de réglage, la règle bilame se courbe vers le côté que regarde la lame acier, car celle-ci se dilatant moins doit laisser le laiton vers la partie externe de la nouvelle forme circulaire de la lame primitivement droite, le point où la lame bimétallique pince le spiral va donc s'avancer du piston vers la virole, ce qui diminue la longueur du spiral. Or, comme nous l'avons vu approximativement pour le gros ressort, mais avec plus d'approxi-

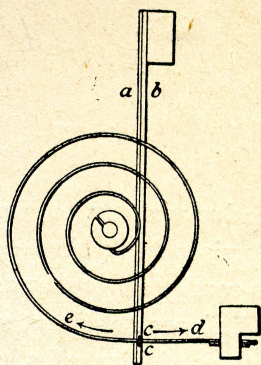


Fig. 91.

tion encore pour l'organe réglant comme on le verra par la suite, à l'encastrement du spiral au balancier écarté de l'angle  $u$  s'exerce un moment d'encastrement égal à  $\frac{EI}{L} u$ . Le balancier dont le moment d'inertie est  $A$  aurait à une température donnée un mouvement dont la loi serait, en répétant un raisonnement analogue à celui de Huygens sur le pendule composé, prévue par l'équation :

$$A \frac{d^2u}{dt^2} = - \frac{EI}{L} u,$$

ce qui donnera un mouvement pendulaire simple dont la durée de l'oscillation simple serait  $\pi \sqrt{\frac{AL}{EI}}$ ;  $A$  augmente quand la température augmente; de plus l'expérience montre que le chronomètre

non compensé retarde au chaud; le pincement du spiral par le dispositif de Harrison tend donc effectivement à compenser.

Mais, au point de vue mécanique, les frottements ou les actions mécaniques résultant de l'attache glissante de l'extrémité du spiral est évidemment une disposition défectueuse.

Arnold reporta la conception de Harrison, du spiral sur le balancier, la lame bimétallique devient le balancier, mais elle était

fendue aux deux extrémités d'un même diamètre; l'effet prévu de Harrison sur la bilame se conservait d'ailleurs, le balancier coupé se courbera vers son ancien axe; ce déplacement géométrique tend à diminuer  $A$ , surtout si le balancier flexible porte en outre deux masses additionnelles, comme cela devient précisément réalisé sur les chronomètres marins.

Le balancier bimétallique d'Arnold était formé de deux lames chevillées ensemble, c'est Earnshaw qui eut l'idée de *souder* le laiton et l'acier.

Pour réaliser la méthode d'Earnshaw, au moyen d'un tour on

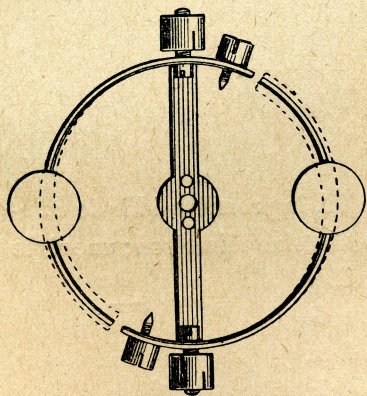


Fig. 92.

## CHAPITRE XIX

### NOUVELLES RECHERCHES SUR LES SPIRAUX ASSOCIÉS

---

#### I. — Lois des spiraux semblables ou symétriques

Si l'on fait abstraction du poids propre aux ressorts associés nous pouvons chercher à réaliser la production d'un couple pur, dont le plan est transverse, c'est-à-dire perpendiculaire à l'axe du balancier oscillant, sans actions transverses sur le balancier, et sans actions longitudinales si l'on ne tient pas à conserver une vibration sinusoïdale quatre spiraux égaux deux à deux et symétriques deux à deux suffisent pour résoudre ce problème.

Les formules de Résal elles-mêmes, non modifiées par les approximations de Caspari vont nous fournir la loi des spiraux symétriques, avec une généralité assez grande.

Rappelons d'abord ces formules qui nous ont déjà servi (au chapitre XI).

Dans les spiraux cylindriques la petite action complémentaire du couple d'encastrement au piton est assez faible pour que les effets de compression de la fibre moyenne du spiral soient négligeables.

Et nous avons établi ces formules de la déformation statique du spiral dues à l'angle d'écart  $\alpha$  du balancier.

L'axe  $x$  étant tourné du pied de l'axe du balancier vers le piton

la longueur  $s$  d'un arc de fibre moyenne du spiral et les coordonnées  $x$  et  $y$  de l'extrémité de cet arc compté à partir de son encastrement au piton sont données en un point de la courbe où la normale fait un angle  $\omega$  avec sa direction initiale au piton par les formules :

$$s = \frac{1}{\sqrt{c}} \int_0^{\omega} \frac{dz}{\sqrt{1 + a \cos z + b \sin z}},$$

$$x - R_0 = - \frac{1}{\sqrt{c}} \int_0^{\omega} \frac{\sin z \cdot dz}{\sqrt{1 + a \cos z + b \sin z}},$$

$$y = \frac{1}{\sqrt{c}} \int_0^{\omega} \frac{\cos z dz}{\sqrt{1 + a \cos z + b \sin z}},$$

les constantes  $a$ ,  $b$ ,  $c$  sont déterminées par les conditions d'attache à la virole, où  $\omega = \omega_0 = P + u$ , = étendue angulaire du spiral + l'écart du balancier à son point mort, et où les formules précédentes deviennent :

$$L \equiv R_0 P = \frac{1}{\sqrt{c}} \int_0^{\omega_0} \frac{dz}{\sqrt{1 + a \cos z + b \sin z}} \quad \text{où } \omega_0 = P + u$$

$$R_0 \cos \omega_0 - R_0 = - \frac{1}{\sqrt{c}} \int_0^{\omega_0} \frac{\sin z \cdot dz}{\sqrt{1 + a \cos z + b \sin z}},$$

$$R_0 \sin \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{c}} \int_0^{\omega_0} \frac{\cos z \cdot dz}{\sqrt{1 + a \cos z + b \sin z}},$$

les valeurs de  $a$ ,  $b$ ,  $c$  calculées par les formules précédentes donnent pour les composantes  $x$  et  $y$  de la force complémentaire transverse sur l'extrémité du spiral encasté au piton par les formules

$$Y = \frac{aEIc}{2}, \quad X = - \frac{bEIc}{2}.$$

D'autre part les deux formules de Résat déterminant  $a$ ,  $b$ ,  $c$  peuvent s'écrire sur la formule équivalente suivante : avec élimination de  $c$

$$\frac{\cos \omega_0 - 1}{P} = \frac{- \int_0^{\omega_0} \frac{\sin z \cdot dz}{\sqrt{1 + a \cos z + b \sin z}}}{\int_0^{\omega} \frac{dz}{\sqrt{1 + a \cos z + b \sin z}}}$$

$$\frac{\sin \omega_0}{P} = \frac{\int_0^{\omega} \frac{\cos z dz}{\sqrt{1 + a \cos z + b \sin z}}}{\int_0^{\omega} \frac{dz}{\sqrt{1 + a \cos z + b \sin z}}}$$

$a$  et  $b$  ne dépendent donc que de  $\omega_0$  et de  $P$ .

# TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION .....	Pages 5
--------------------	------------

## CHAPITRE PREMIER

### LA MESURE MÉCANIQUE DU TEMPS ET LA NAISSANCE DE LA DYNAMIQUE

Quelques notions mathématiques préalables.....	13
Problème généralisé des vitesses et déterminisme mécanique.....	19
Théorème sur la dérivée totale, ou encore : théorème sur la dérivée d'une fonction composée.....	21
Cas particulier : problème balistique ou déterminisme mécanique.	23
Cas de très petites oscillations.....	27
Application au pendule.....	30
Prévision de l'effet d'un choc instantané produisant un accroisse- ment brusque de vitesse. Effet d'un frottement constant.....	32
Calcul du nombre des oscillations non entretenues dans le cas d'un frottement constant .....	35
Nouveau cas d'isochronisme.....	36

## CHAPITRE II

### LE TEMPS ET SON CONTRÔLE ASTRONOMIQUE. CONTRÔLES RÉCIPROQUES DE LA MESURE MÉCANIQUE ET DE LA MESURE ASTRONOMIQUE DU TEMPS. RAPPEL DE QUELQUES PRINCIPES DE MÉCANIQUE

Le bagage mathématique de l'étudiant horloger.....	42
Extinction naturelle des vibrations pendulaires libres amorties à la fois par une résistance visqueuse et par un frottement cons- tant .....	50
Méthode pour le contrôle photographique d'une vibration pendu- laire doublement amortie.....	56

	Pages
Entretien du régime vibratoire, le régime limite et l'acheminement.	58
Y aura-t-il un régime limite .....	59
Y a-t-il ici une limite et quelle sera sa valeur pour $n$ croissant indéfiniment .....	61

## CHAPITRE III

## LES ÉCHAPPEMENTS

Echappement à roue de rencontre.....	69
Echappement à rochet pour horloge.....	67
Echappement à repos. Echappement de Graham.....	68
Echappement à chevilles.....	69
Echappement à ancre de Brocot.....	70
Echappement à cylindre.....	71
Echappement Duplex.....	72
Echappements libres.....	73
Echappement à ancre.....	74
Organes contre le renversement.....	75
Le tirage .....	76
Quelques chiffres et tracés relatifs à l'échappement à ancre. Grandeurs des mouvements divers liés au fonctionnement de l'échappement à ancre.....	78
Les mouvements de l'ancre.....	78
Les mouvements du balancier.....	79
Les mouvements de la roue.....	79
Ebat de plateau et ébat de cornes.....	79
Tracés de l'échappement à ancre des montres.....	80
Roue et ancre.....	80
Tracés de l'échappement anglais.....	81
Distinctions entre l'échappement anglais et l'échappement suisse.	84
Fourchette et plateaux dans l'échappement à ancre.....	86
Longueurs des côtés de l'entrée, et cornes de la fourchette.....	87
Utilisation des lois du frottement dans la fonction de l'échappement.....	88
Précision de quelques termes géométriques.....	88
Angle et force de tirage ; force de dégagement.....	91
Force de dégagement.....	93
Phénomènes de l'arrêt au doigt et de l'arrêt sur le repos.....	94
Arrêt sur le repos.....	96
L'échappement, le régime limite et l'acheminement.....	100
Conclusions .....	104
Généralisation d'un régime limite.....	104



## CHAPITRE IV

Pages

## LE ROUAGE INTERMÉDIAIRE. LES ENGRENAGES DE L'HORLOGERIE

Conditions qui déterminent le tracé des dentures des roues et pignons.....	113
Le principe de la composition des mouvements. Mouvement absolu et mouvement relatif.....	117
Etude de l'engrenage à flanc rectiligne. Denture.....	123
Prélèvement du jeu.....	124
Angles de conduite après la ligne des centres.....	124
Prolongement de l'aile du pignon.....	127
Exemple emprunté au cours de M. Grossmann.....	130
Rayon total du pignon. Rayon total de la roue.....	133
Approximation plus grossière de l'excédent circulaire.....	133
Tables à l'usage du compas de proportion.....	135

## CHAPITRE V

## L'ARITHMÉTIQUE DU ROUAGE

Nombre d'oscillations par heure d'un balancier de montre.....	140
Calcul des nombres de dents.....	140
Nombre d'oscillations du balancier.....	142
La minuterie.....	143
Division du cadran en 24 heures.....	144
Double indication du cadran.....	144
Assurer un délai donné dans le remontage d'une horloge.....	145
Problème du mobile perdu.....	147
Cas de deux mobiles à la fois perdus.....	148
Indicateur du développement du ressort dans les pièces à fusée..	148
Quantièmes simples.....	149

## CHAPITRE VI

## LA FORCE MOTRICE DU GROS ROUAGE

Rôle de la force motrice.....	151
Phénomènes élastiques dans les cas les plus simples.....	151
Déformations simples et coefficient d'élasticité.....	153
Le problème de Saint-Venant.....	155
Intérêt pratique du problème de Saint-Venant. Sa généralisation approchée par Philips.....	158
Evaluations approchées de la force d'un ressort de montre.....	161
Cas d'un ressort à section rectangulaire.....	162
Limite de bandage du ressort.....	163
Appréciation pratique de la longueur d'un ressort.....	164
Déplacement et déformation du ressort dans le barillet.....	165
Maximum d'utilisation du ressort.....	166

## CHAPITRE XIX

## NOUVELLES RECHERCHES SUR LES SPIRAUX ASSOCIÉS

I. Lois des spiraux semblables ou symétriques.....	479
Couple transverse pur.....	482
II. Ajustages isochrones et semi-isochrones.....	485
III. Hypothèse des techniciens.....	487
IV. Conséquences techniques nouvelles de l'hypothèse des techniciens .....	489

## CHAPITRE XX

I. — MÉTHODES D'OBSERVATION PHOTOGRAPHIQUE  
 II. — LE PENDULE LIBRE ET LA MESURE DU TEMPS  
 D'APRÈS PAUL LE ROLLAND

I. Photographies des oscillations.....	514
II. Le pendule libre et la mesure du temps.....	530

## CHAPITRE XXI

## PROBLÈMES MÉCANIQUES ET CHRONOMÉTRIQUES ACTUELS

I. Promenade rapide à travers l'histoire des machines horaires.	539
II. Le problème du réglage à la fin du xvii <sup>e</sup> siècle.....	544
III. Propriétés des spiraux associés.....	549
IV. Nouvelles recherches de chronométrie et de mécanique sur les spiraux associés .....	551
V. Balance pour la pesée des frottements de glissement à l'approximation du millième.....	555

## CHAPITRE XXII

QUELQUES PRÉCAUTIONS DANS L'EMPLOI DES MÉTHODES NOUVELLES  
 POUR LES MESURES DES RÉSISTANCES PASSIVES.....

559

## CHAPITRE XXIII

POURQUOI LA MÉCANIQUE RATIONNELLE, SEULE, NE PEUT CONSTRUIRE LES LOIS DES RESSORTS RÉGLANTS : LE PROBLÈME RESTE UN PROBLÈME DE MÉCANIQUE PHYSIQUE ET EXPÉRIMENTALE. IDÉES DIRECTRICES POUR OBTENIR UNE RÉPONSE PRÉCISE A L'ATELIER OU AU LABORATOIRE. ....	563
--	-----