Les lois du choc

Analyse et présentation : Serge Cabala

Première partie

I) Quelques rappels simples de mécanique classique

Soit O un point fixe de l'espace.
Soit M un point qui se déplace dans cet espace.
Le mouvement de M est décrit par la fonction qui, à toute date t, fait correspondre le vecteur $\overrightarrow{\mathrm{OM}}$, noté encore $\overrightarrow{\mathrm{OM(t)}}$.

La vitesse du point M à toute date t est donnée par $\overrightarrow{\mathrm{v(t)}} = \dfrac{d\overrightarrow{\mathrm{OM(t)}}}{dt}$.

Son accélération est : $\overrightarrow{\gamma(\mathrm{t})} = \dfrac{d\overrightarrow{\mathrm{v(t)}}}{dt} = \dfrac{d^2\overrightarrow{\mathrm{OM(t)}}}{dt^2}$

Si de plus le point M a une masse m et est soumis à des forces de résultante $\overrightarrow{\mathrm{F(t)}}$.
Le mouvement de M vérifie :

$$\overrightarrow{\mathrm{F(t)}} = \mathrm{m}\overrightarrow{\gamma(\mathrm{t})} = \mathrm{m}\frac{d^2\overrightarrow{\mathrm{OM(t)}}}{dt^2}$$. *Principe fondamentale de la mécanique classique.*

La quantité de mouvement (appelé autrefois force ou force impulsive ou impulsion ou moment) de M à la date t est : $\mathrm{m}\overrightarrow{\mathrm{v(t)}}$.

Sa force vive est : $\mathrm{m}\overrightarrow{\mathrm{v(t)}}^2$; appelée simplement force dans certains livres anciens.

Son énergie cinétique est : $\dfrac{1}{2}\mathrm{m}\overrightarrow{\mathrm{v(t)}}^2$, c'est la demi force vive.

Soient $\mathrm{M_i}$ i de 1 à n , n points matériels, de masses respectives $\mathrm{m_i}$, qui se meuvent dans l'espace.

On pose $m = \sum_{\mathrm{i=1}}^{\mathrm{i=n}} \mathrm{m_i}$

Le centre de gravité G(t) de ces n points, est à toute date t, défini par :

$$m\overrightarrow{\mathrm{OG(t)}} = \sum_{\mathrm{i=1}}^{\mathrm{i=n}} \mathrm{m_i}\overrightarrow{\mathrm{OM_i(t)}}$$

Soient $\overrightarrow{\mathrm{v_i(t)}}$ et $\overrightarrow{\gamma_{\mathrm{i}}(\mathrm{t})}$ la vitesse et l'accélération, à toute date t, de chaque point $\mathrm{M_i}$.

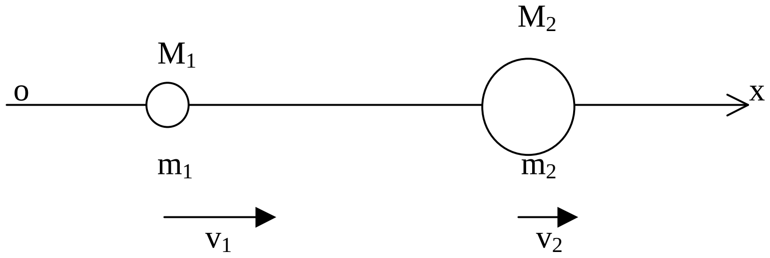
Soit $\overrightarrow{\mathrm{F_i(t)}}$ la résultante de toutes les forces à laquelle se trouve soumis chaque point $\mathrm{M_i}$.

Soient $\overrightarrow{\mathrm{v_G(t)}}$ et $\overrightarrow{\gamma_{\mathrm{G}}(\mathrm{t})}$ la vitesse et l'accélération de G à toute date t.

On a $\boxed{m\overrightarrow{\mathrm{v_G(t)}} = \sum_{\mathrm{i=1}}^{\mathrm{i=n}} \mathrm{m_i}\overrightarrow{\mathrm{v_i(t)}}}$ et $\boxed{m\overrightarrow{\gamma_{\mathrm{G}}(\mathrm{t})} = \sum_{\mathrm{i=1}}^{\mathrm{i=n}} \mathrm{m_i}\overrightarrow{\gamma_{\mathrm{i}}(\mathrm{t})} = \sum_{\mathrm{i=1}}^{\mathrm{i=n}} \overrightarrow{\mathrm{F_i(t)}}}$

Si l'ensemble des points $\mathrm{M_i}$ n'est soumis à aucune force extérieure, on a $\sum_{\mathrm{i=1}}^{\mathrm{i=n}} \overrightarrow{\mathrm{F_i(t)}} = \vec{0}$, dans ce cas G se déplace en ligne droite à vitesse constante, et $\sum_{\mathrm{i=1}}^{\mathrm{i=n}} \mathrm{m_i}\overrightarrow{\mathrm{v_i(t)}}$ est un vecteur constant.

II) La percussion frontale



Les corps M_1 et M_2 de masses respectives m_1 et m_2 ont pour vitesses respectives $\overrightarrow{v_1}$ et $\overrightarrow{v_2}$, colinéaires à l'axe ox.
Les centres de gravité sont sur l'axe ox , et les corps n'ont aucun mouvement de rotation.
Les surfaces choquantes sont perpendiculaires à ox, et il n'y a aucune force extérieure.
v_1 et v_2 désignent les mesures algébriques des vecteurs $\overrightarrow{v_1}$ et $\overrightarrow{v_2}$.

1) Cas des corps mous. (Cas des corps parfaitement durs)
   Les corps restent collés après la collision.
   Soit u la vitesse commune après le choc.
   Puisque la quantité de mouvement est inchangée, on a $(m_1+m_2)u = m_1v_1 + m_2v_2$.
   Soit : $u = \dfrac{m_1v_1+m_2v_2}{m_1+m_2}$
   Remarque : en appliquant la formule $m\overrightarrow{v_G(t)} = \sum_{i=1}^{i=n} m_i\overrightarrow{v_i(t)}$, on trouve que pour toute date t $(m_1+m_2)v_G = m_1v_1+m_2v_2$, soit $v_G = \dfrac{m_1v_1+m_2v_2}{m_1+m_2}$. Or après le choc, les corps collés ont même vitesse que leur centre G de gravité, donc après le choc $u = v_G$.
   G conserve son mouvement uniforme car il n'y a pas de force extérieure au deux corps.

Calcul de l'énergie cinétique perdue dans le choc mou.

L'énergie perdue est : $E_{perdue} = \frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 - \frac{1}{2}(m_1+m_2)u^2$

En replaçant u par sa valeur, on trouve que $\boxed{E_{perdue} = \frac{1}{2}\,\frac{m_1m_2}{m_1+m_2}(v_1-v_2)^2}$

Pour deux corps mous donnés, l'énergie perdue ne dépend que de la valeur absolue de leur vitesse relative. Elle est la même dans tous les repères.

Remarque
En partant de cette dernière formule, qui peut être obtenue expérimentalement, on retrouve, en valeur absolue, la vitesse u après le choc.

Autre façon de calculer u.

Si on constate, expérimentalement, pour deux corps mous donnés,

a) que l'énergie perdue ne dépend que de la valeur absolue de la vitesse relative,

$$E_{perdue} = E((v_1-v_2)^2)$$

b) que lorsqu'on l'on augmente v_1 et v_2 d'une même quantité α, alors u augmente de la même valeur α,

Alors on peut déduire u de ces deux conditions a) et b)

En effet : l'énergie perdue demeure inchangée car la vitesse relative des corps l'est. (E_{perdue} ne dépend pas de α.)

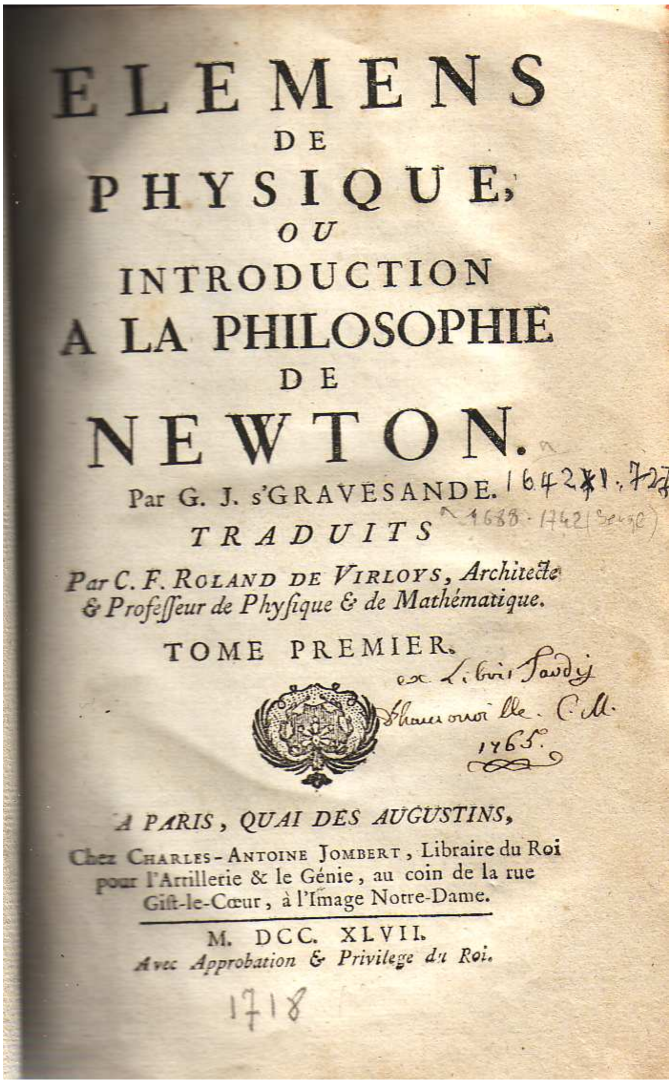
Or $$E_{perdue} = \frac{1}{2}m_1(v_1+\alpha)^2 + \frac{1}{2}m_2(v_2+\alpha)^2 - \frac{1}{2}(m_1+m_2)(u+\alpha)^2$$

En différenciant par rapport à α, on obtient :

$0 = m_1(v_1+\alpha) + m_2(v_2+\alpha) - (m_1+m_2)(u+\alpha)$, puis en prenant $\alpha = 0$

on retrouve $m_1v_1 + m_2v_2 - (m_1+m_2)u = 0$ qui donne u.

C'est par les expériences et les forces vives que s'Gravesande (1688-1742) explique les lois des chocs dans :



ELEMENS
DE
PHYSIQUE,
OU
INTRODUCTION
A LA PHILOSOPHIE
DE
NEWTON.
Par G. J. s'GRAVESANDE.
TRADUITS
Par C. F. ROLAND DE VIRLOYS, Architecte & Professeur de Physique & de Mathématique.
TOME PREMIER.
1765.
A PARIS, QUAI DES AUGUSTINS,
Chez CHARLES-ANTOINE JOMBERT, Libraire du Roi pour l'Artillerie & le Génie, au coin de la rue Gist-le-Cœur, à l'Image Notre-Dame.
M. DCC. XLVII.
Avec Approbation & Privilege du Roi.
1718

s'Gravesande est un physicien hollandais à qui l'on doit le premier héliostat, ainsi que l'anneau qui porte son nom pour étudier les dilatations thermiques. Partisan déterminé des forces vives, il décrit et explique de nombreuses expériences. Ses écrits sont en latin.

Planche d'expériences qui permettent de comparer les forces vives.

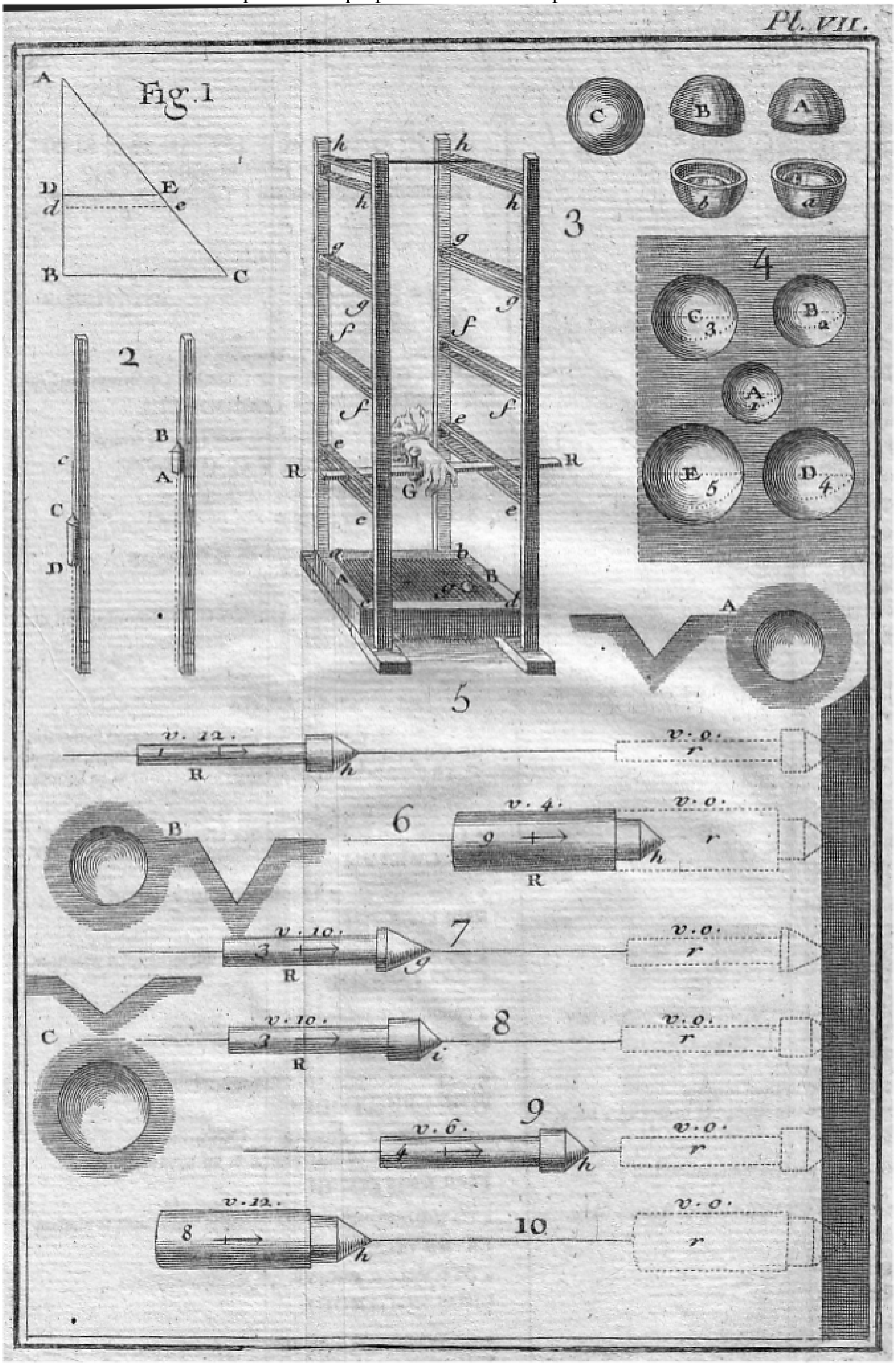


Fig.9,10 . Fig.10, on double masse et vitesse de fig.9 , empreinte octuple

Planche d’expériences sur les forces vives et les chocs mous.

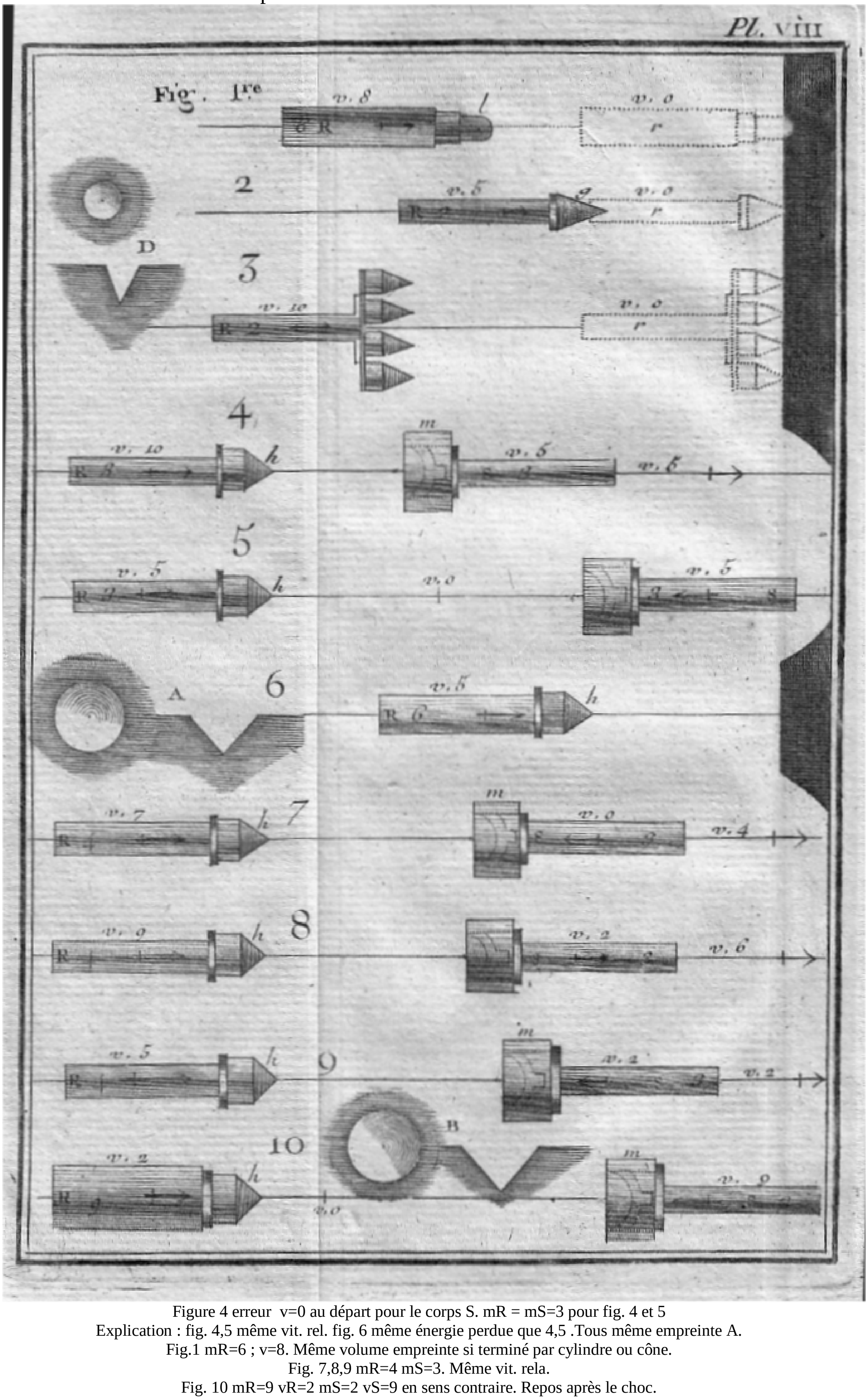


Figure 4 erreur v=0 au départ pour le corps S. mR = mS=3 pour fig. 4 et 5
Explication : fig. 4,5 même vit. rel. fig. 6 même énergie perdue que 4,5 .Tous même empreinte A.
Fig.1 mR=6 ; v=8. Même volume empreinte si terminé par cylindre ou cône.
Fig. 7,8,9 mR=4 mS=3. Même vit. rela.
Fig. 10 mR=9 vR=2 mS=2 vS=9 en sens contraire. Repos après le choc.

2) Cas des corps parfaitement élastiques.

(corps avec ressort considérés parfois comme parfaitement durs).

a) Présentation actuelle des lois du choc.

Soient v'_1 et v'_2 les vitesses après le choc.

Les quantités de mouvement sont conservées comme dans le choc mou.
Les énergies cinétiques sont conservées, par définition du choc parfaitement élastique.
On obtient le système :

$\begin{cases} m_1v'_1 + m_2v'_2 = m_1v_1 + m_2v_2 \\ m_1{v'_1}^2 + m_2{v'_2}^2 = m_1v_1^2 + m_2v_2^2 \end{cases}$. Sa résolution donne deux solutions qui sont :

$\begin{cases} v'_1 = v_1 \\ v'_2 = v_2 \end{cases}$, solution exclue car l'expérience montre que les corps ne se traversent pas.

$\boxed{\begin{cases} v'_1 = \dfrac{(m_1 - m_2)v_1 + 2m_2v_2}{m_1 + m_2} \\ v'_2 = \dfrac{(m_2 - m_1)v_2 + 2m_1v_1}{m_1 + m_2} \end{cases}}$ Solution que l'on garde car conforme à l'expérience.

Digression : trouver l'erreur dans ce qui suit.

Dans un choc parfaitement élastique, on constate que la quantité de mouvement et l'énergie cinétique sont des constantes. Soient $v_1(t)$ et $v_2(t)$ les vitesses des mobiles à toute date t, le choc ayant lieu à la date $t = 0$ par exemple.

Nous avons donc, pour tout t, le système $\begin{cases} m_1v_1 + m_2v_2 = k_1 \\ m_1v_1^2 + m_2v_2^2 = k_2 \end{cases}$ k_1, k_2 constantes.

Donc $\begin{cases} m_1dv_1 + m_2dv_2 = 0 \\ m_1v_1dv_1 + m_2v_2dv_2 = 0 \end{cases}$ remplaçons dans la seconde équation m_2dv_2 par $-m_1dv_1$

On obtient $m_1(v_1 - v_2)dv_1 = 0$ si $v_1 \neq v_2$ on a $dv_1 = 0$ et de même $dv_2 = 0$.

On en conclu que $v_1(t)$ et $v_2(t)$ sont des constantes.

Le choc laisse les vitesses invariables, les corps se traversent.
On n'a obtenu que la solution exclue.

Fin de la digression.

Le résultat encadré précédent, quelque soit son mode d'obtention, est ce que l'on trouve toujours dans les livres (Mécanique de Bruhat par exemple). Elle n'est guère mnémotechnique, et elle rend difficile la découverte de certaines conséquence simples.

Autre expression de v'_1 et v'_2 $\boxed{\begin{cases} v'_1 = 2v_G - v_1 \\ v'_2 = 2v_G - v_2 \end{cases} \quad \text{avec} \quad v_G = \dfrac{m_1v_1 + m_2v_2}{m_1 + m_2}}$

v_G est la vitesse du centre de gravité du système des deux corps. Elle est constante, la même avant et après le choc.

Remarques simples: a) La vitesse relative des corps est la même, au signe près, avant et après le choc.

En effet, on voit immédiatement que $\boxed{v'_1 - v'_2 = v_2 - v_1}$

b) Les vitesses relatives des corps par rapport au centre de gravité sont les mêmes, au signe près, avant et après le choc.

En effet : $\boxed{\begin{cases} v'_1 - v_G = v_G - v_1 \\ v'_2 - v_G = v_G - v_2 \end{cases}}$

Les corps rebondissent toujours sur le centre de gravité du système.

Pour chaque corps, t secondes avant et après le choc, la distance au centre de gravité est la même.

c) Si $v_G = 0$, soit si $m_1 v_1 + m_2 v_2 = 0$ on a : $\begin{cases} v'_1 = -v_1 \\ v'_2 = -v_2 \end{cases}$

b) Détermination des lois à l'aide de la remarque a).

Il est facile, expérimentalement, de constater que les quantités de mouvement et les vitesses relatives sont conservées par le choc des corps à ressort. (On verra plus loin comment étaient mesurées les vitesses au XVII° siècle.)

On a donc $\boxed{\begin{cases} m_1 v'_1 + m_2 v'_2 = m_1 v_1 + m_2 v_2 \\ v'_1 - v'_2 = v_2 - v_1 \end{cases}}$

Ce système qui ne donne que la bonne solution, colle mieux à l'expérience.

De plus, si le ressort n'est pas parfait, l'expérience montre, pour deux corps donnés, que les vitesses relatives des corps avant et après le choc ont toujours même rapport (lorsque les chocs ne sont pas trop violents).

Soit donc que $v'_1 - v'_2 = k(v_2 - v_1)$ avec $0 \le k \le 1$, k est le coefficient de restitution.

(Selon Newton dans ses Principia, k=5/9 pour des pelotes de laine bien serrées, 15/16 pour des boules de verre, et quasiment 1 pour des boules d'acier.)

Les vitesses après le choc s'obtiennent en résolvant le système :

$$\begin{cases} m_1 v'_1 + m_2 v'_2 = m_1 v_1 + m_2 v_2 \\ v'_1 - v'_2 = k(v_2 - v_1) \end{cases}$$

On trouve $\begin{cases} v'_1 = v_G + k\dfrac{m_2}{m_1 + m_2}(v_2 - v_1) \\ v'_2 = v_G + k\dfrac{m_1}{m_1 + m_2}(v_1 - v_2) \end{cases}$ avec $v_G = \dfrac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}$

L'énergie cinétique perdue dans ce choc un peu mou vaut :

$$E_{perdue} = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 - (\frac{1}{2} m_1 v'^2_1 + \frac{1}{2} m_2 v'^2_2) = \frac{1}{2}(1-k^2)\ \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}(v_1 - v_2)^2$$

On constate que c'est l'énergie perdue dans le choc totalement mou que multiplie $(1-k^2)$

L'énergie cinétique perdue ne dépend que de la vitesse relative des deux corps.

c) Détermination des lois par la force vive et la vitesse relative.
En notant, sur les expériences, qu'à l'issue d'un choc parfaitement élastique il y a conservation de la force vive et de la vitesse relative, on trouve les vitesses finales.

$$\begin{cases} v'_1 - v'_2 = v_2 - v_1 \\ m_1 v'^2_1 + m_2 v'^2_2 = m_1 v_1^2 + m_2 v_2^2 \end{cases}$$

On obtient deux solutions comme dans le cas **a)**
s'Gravesande décrit le choc élastique en s'appuyant sur ce type de constatations.

d) Résolution d'Emile Jouguet dans sa critique de Huygens.

Il suffit que l'équation $\boxed{m_1(v'_1 - u)^2 + m_2(v'_2 - u)^2 = m_1(v_1 - u)^2 + m_2(v_2 - u)^2}$

Soit vérifiée pour deux valeurs différentes de u, $u = 0$ et $u = 1$ par exemple, pour déterminer v'_1 et v'_2. En prenant $u = 0$, on obtient l'équation des énergies cinétiques, puis en prenant $u = 1$ et en se servant du résultat acquis avec $u = 0$, on obtient la conservation des quantités de mouvements.

Remarque : L'équation étant vérifiée pour toute valeur de u, en dérivant les deux membres par rapport à u, puis en prenant $u = 0$, on obtient l'équation de la conservation des quantités de mouvements.

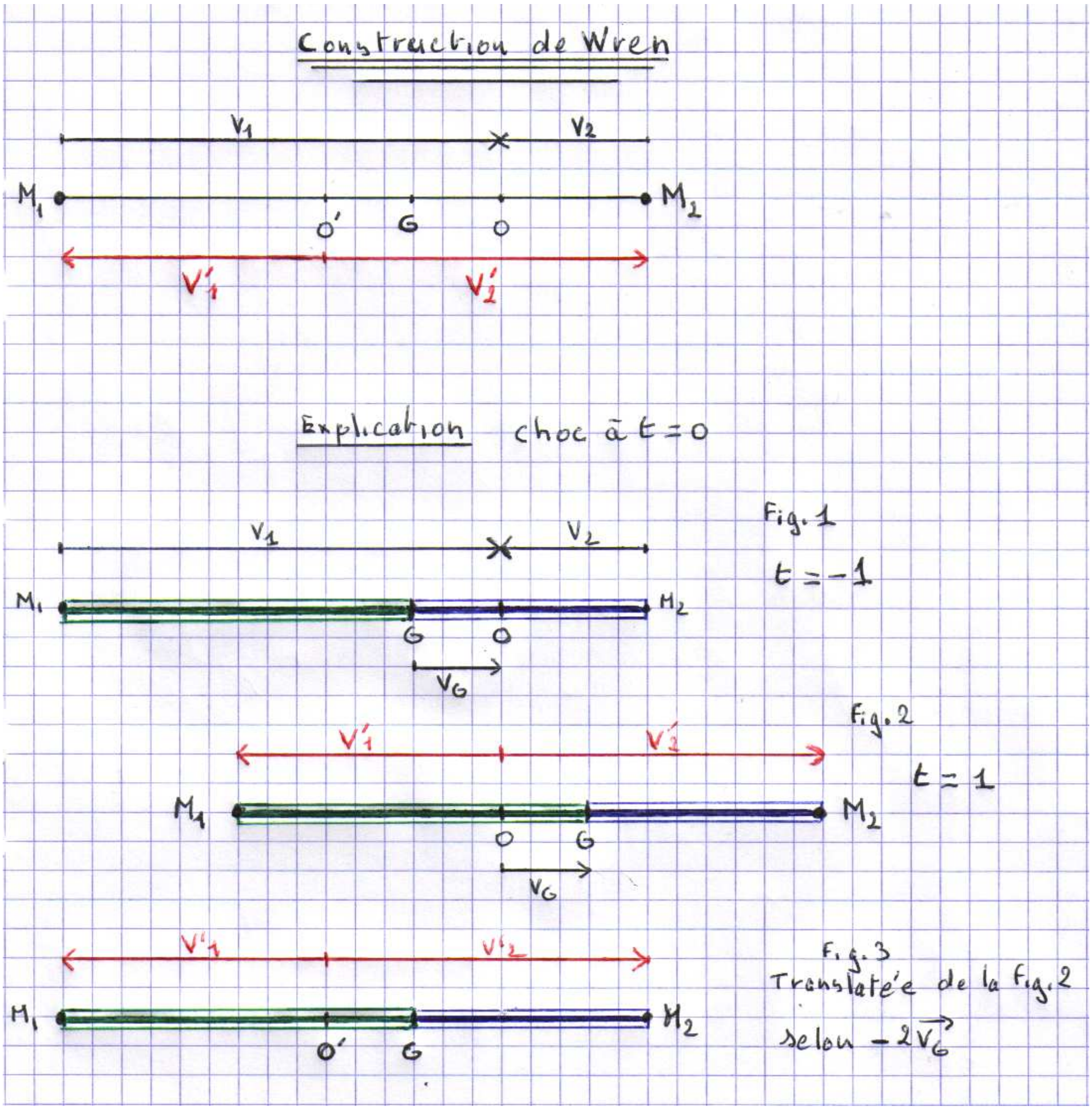
e) Détermination faisant intervenir le ressort (utilisé très souvent jusque fin XIX°).
La force vive ne convenant pas à tous les physiciens, on a expliqué la loi du choc élastique en gardant la conservation des quantités de mouvements comme première équation, et en justifiant la conservation de la vitesse relative par l'effet du ressort.

Pour fixer les idées, supposons $v_1 > v_2 \geq 0$.
L'explication est, qu'à la compression, comme à la détente, le ressort diminue la vitesse du premier corps de deux valeurs identiques. Et le ressort augmente la vitesse du second de la même façon. On écrivait : le ressort double l'effet du choc.

Lorsque les corps se choquent, le ressort se compresse. Lorsque la compression atteint son maximum, les deux corps ont la même vitesse u.
Le premier corps a perdu $v_1 - u$ de degré de vitesse, tandis que le second augmente la sienne de $u - v_2$. A partir de cet instant, où la compression est maximale, le ressort se détend de la même façon qu'il s'est tendu. Le premier corps reperd encore $v_1 - u$ de degré de vitesse comme à la compression, tandis que le second augmente encore la sienne de $u - v_2$.
On a donc $\boxed{v'_1 = v_1 - (v_1 - u) - (v_1 - u)}$ et $\boxed{v'_2 = v_2 + (u - v_2) + (u - v_2)}$.
En soustrayant membre à membre ces deux équations, on retrouve que $v'_1 - v'_2 = v_2 - v_1$.
On retrouvait ainsi la conservation des vitesses relatives, qui associée à la conservation de la quantité de mouvement redonnait les vitesses finales.
Mais on remarquait aussi que u est la vitesse finale dans le choc des corps mous.
Donc en remplaçant u par cette valeur, on obtenait les vitesses après le choc.
Cette manière de faire intervenir le ressort, semble avoir été utilisée la première fois par l'abbé Edme Mariotte(1620-1684) dans son *Traité de la percussion ou choc des corps* (1673).

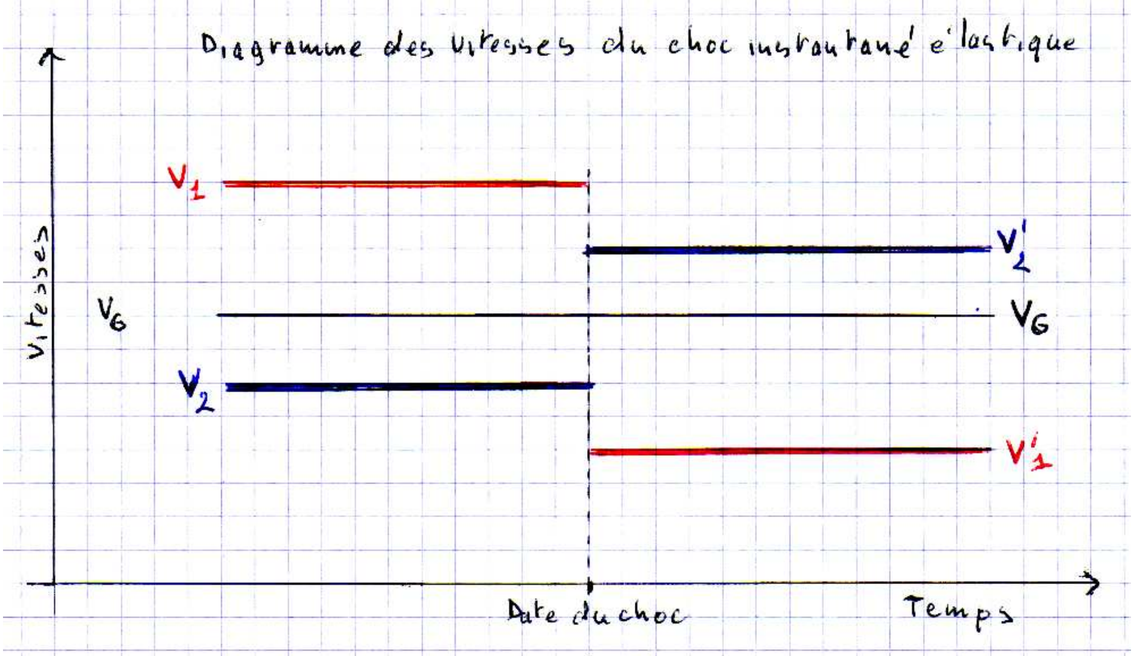
f) Détermination géométrique, ou méthode de Wren.

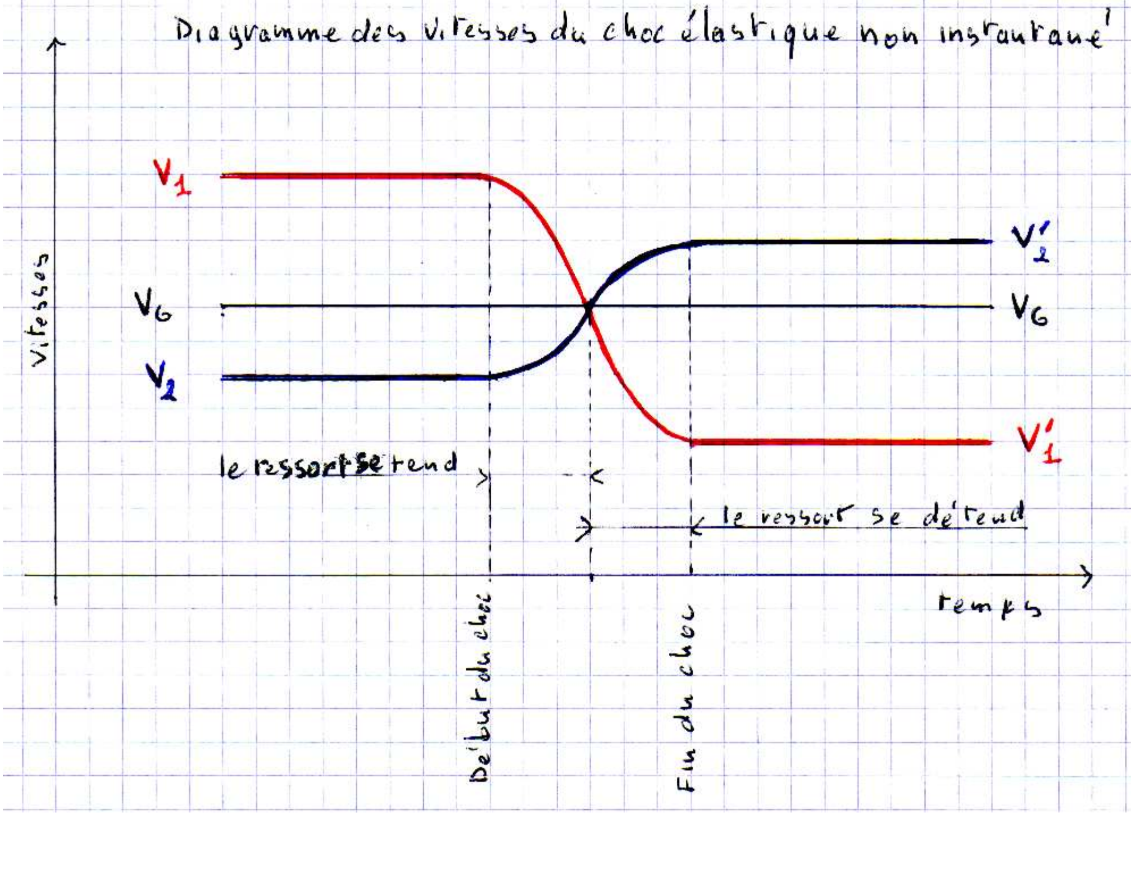
Les corps M_1, M_2 sont représentés une seconde avant le choc qui a lieu au point O.
G représente leur centre de gravité à cette date. O' est le symétrique de O par rapport à G.
Les vitesses avant le choc sont donc: $\overrightarrow{v_1} = \overrightarrow{M_1O}$ et $\overrightarrow{v_2} = \overrightarrow{M_2O}$
Les vitesses après le choc sont : $\overrightarrow{v'_1} = \overrightarrow{O'M_1}$ et $\overrightarrow{v'_2} = \overrightarrow{O'M_2}$



Wren n'a pas donné d'explication.
Sa publication dans les « Philisophical Tansactions » sera examinée dans la seconde partie.

Ce diagramme des vitesses n’est pas de Wren.





Résolution du problème posé dans la digression.

Si le choc est instantané, les fonctions $v_1(t)$ et $v_2(t)$ sont discontinues à la date du choc, et les équations proposées ne sont plus valables à cette date. (Les différentielles ne peuvent pas traverser la date du choc.)

Si le choc n'est pas instantané, entre le début du choc et sa fin, il y a variation de la force vive.

La seconde équation du système $\begin{cases} m_1v_1 + m_2v_2 = k_1 \\ m_1{v_1}^2 + m_2{v_2}^2 = k_2 \end{cases}$ avec k_1, k_2 constantes, est fausse car k_2 n'est pas constant **durant** le choc.

Fin de la résolution

g) Méthode de huyghens.

Huyghens pose comme hypothèses de travail les constatations expérimentales suivantes:

a) Le principe du bateau (principe de relativité galiléen).

b) Si les corps ont des vitesses opposées inversement proportionnelles aux masses, alors après le choc ils rebroussent chemin avec la même vitesse.

Soit : si $m_1v_1 + m_2v_2 = 0$, alors $v'_1 = -v_1$ et $v'_2 = -v_2$.

Avec ces hypothèses, déterminons v'_1 et v'_2 lorsque $m_1v_1 + m_2v_2 \neq 0$.

Dans un bateau à vitesse u les vitesses avant le choc sont $(v_1 - u)$ et $(v_2 - u)$.

Celles après le choc sont $(v'_1 - u)$ et $(v'_2 - u)$.

Soit u tel que $m_1(v_1 - u) + m_2(v_2 - u) = 0$. (On remarque que $u = v_G = \dfrac{m_1v_1 + m_2v_2}{m_1 + m_2}$).

Dans le bateau ayant cette vitesse u, la condition b) est respectée.

Donc $(v'_1 - u) = -(v_1 - u)$ et $(v'_2 - u) = -(v_2 - u)$ ce qui donne v'_1 et v'_2.

h) D'autres façons d'aborder le problème du choc.

Nous verrons dans la partie II, où l'on développe davantage la partie historique et les contributions de Wallis, Wren, Huygens, Mariotte, les originalités de d'Alembert et Maupertuis.

Deux planches de s'Gravesande sur le choc avec ressort.

Planche de s’Gravesande sur l’effet d’un ressort.

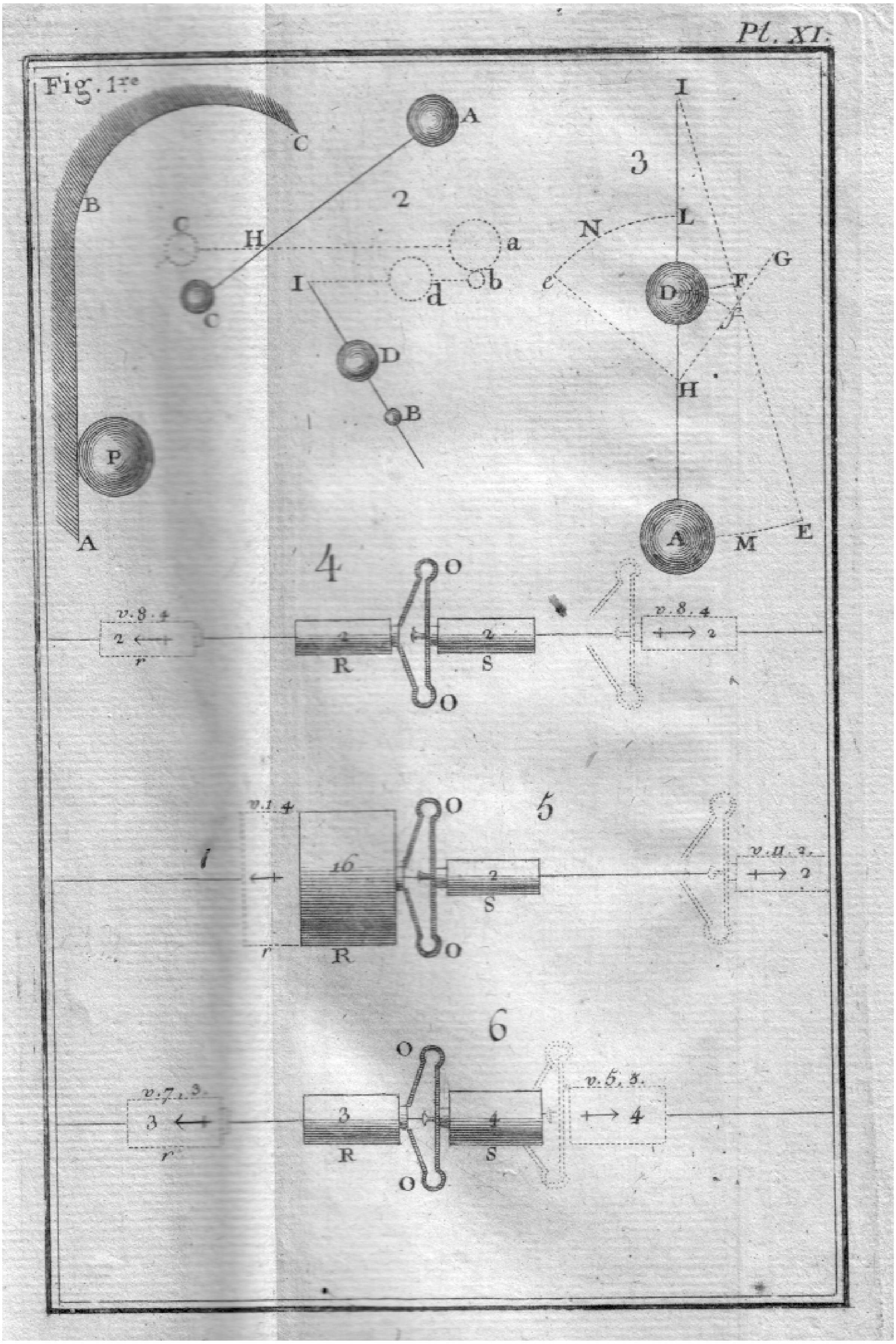
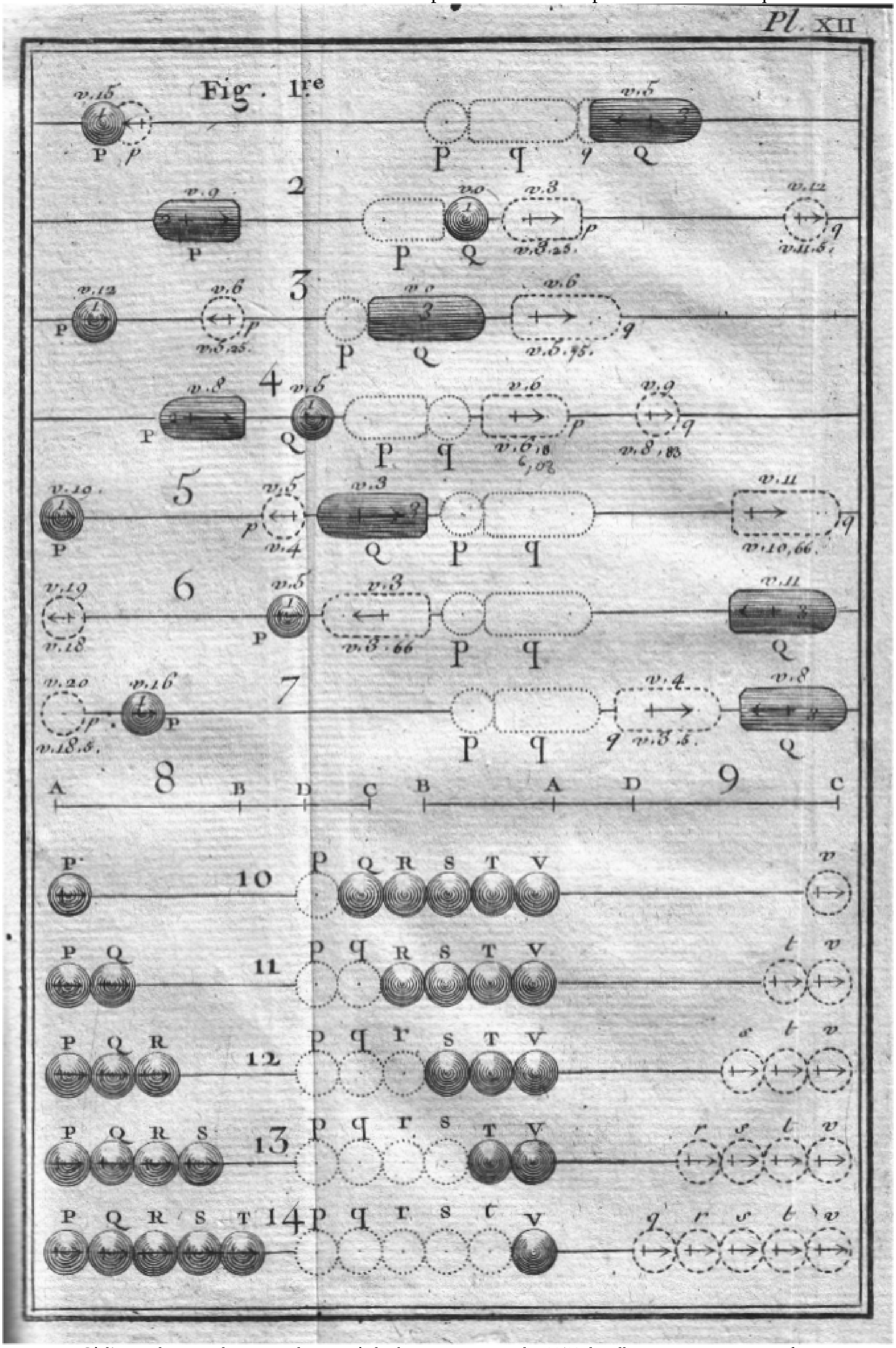


Planche de s'Gravesande sur le choc parfaitement et imparfaitement élastique.



Où l'on explique que la vitesse relative après le choc est ici toujours les 11/12 de celle avant, car ressort imparfait.

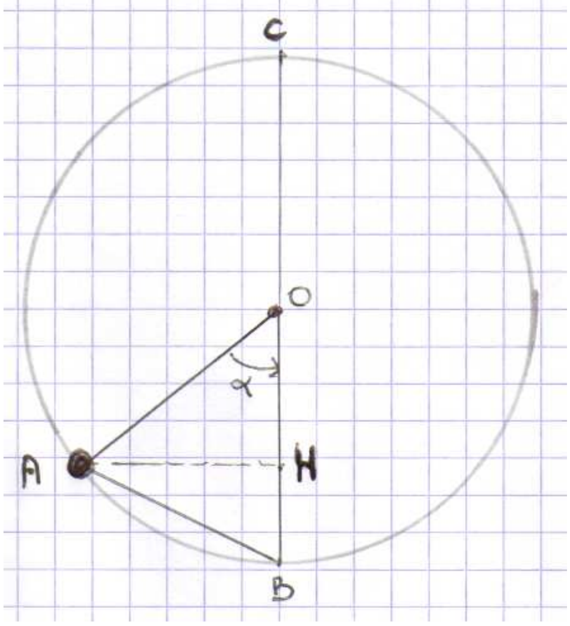
Les expériences avec des pendules.

Les pendules dans l'étude des percussions remonte bien avant janvier 1669, date de publication des lois du choc.

Huyghens, lors d'un voyage à Londres en 1661, ou il rencontre plusieurs savants dont Wallis et Wren, leur prédit exactement le résultat d'une expérience sur le choc de deux pendules inégaux.
A partir d'octobre 1666, la Royal Society (fondée en 1662) s'occupe d'avantage du choc des corps et cherche à élucider les lois du mouvement. Elle se soucie avant tout d'expériences, et les pendules en font partie.

L'abbé Edme Mariotte, dans son *Traité de la percussion ou choc des corps* paru la première fois en 1673, où presque tout n'est qu'expérimental, utilise largement les pendules.

Manière simple de mesurer la vitesse d'un pendule.



A est une est une masse ponctuelle suspendue en O par un fil ou une tige rigide OA de masse négligeable. Lorsqu'on lâche, sans vitesse initiale, le pendule de la position A indiquée, sa vitesse lorsqu'il arrive en B est proportionnelle à la corde AB.
La vitesse est mesurée par la corde AB. Même chose lorsque le pendule remonte de B en A.

Preuve : La hauteur de chute est HB ; Posons r = OA, h = HB, On a :
$AB^2 = HA^2 + HB^2$ soit $AB^2 = (r \sin\alpha)^2 + (r - r\cos\alpha)^2 = r^2(\sin^2\alpha + (1-\cos\alpha)^2)$
On trouve : $AB^2 = 2\, r^2(1-\cos\alpha) = 2\, r\, h$.

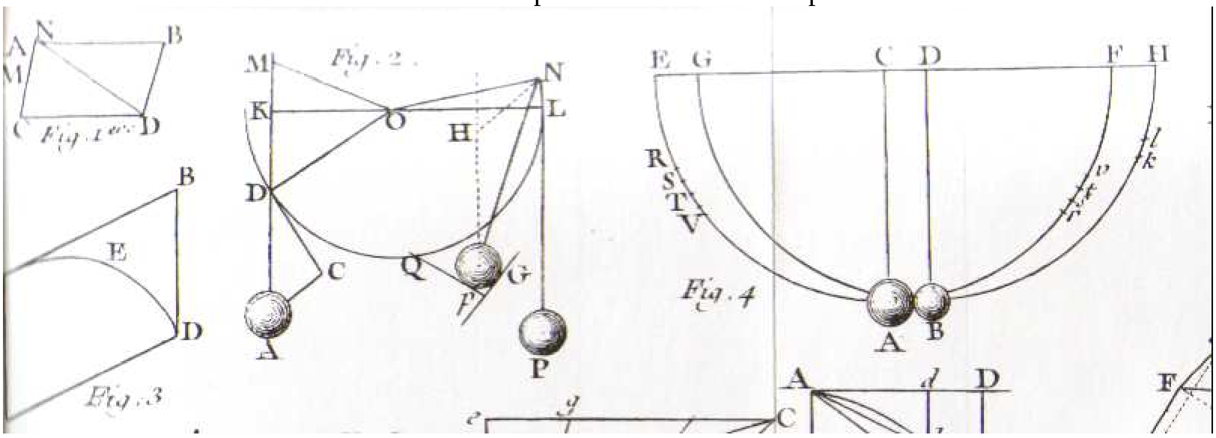
Or la vitesse v au point B est $\boxed{v = \sqrt{2\, g\, h} = AB\sqrt{\frac{g}{r}}}$

Complément : Deux corps lâchés simultanément, sans vitesse initiale, l'un de A sur le plan incliné AB, l'autre de C en chute libre, arrivent en même temps au point B.

Ces résultats étaient connus de Galilée.

Newton, s’inspirant en partie de Mariotte (il est cité dans les Principia), vérifie par de nombreuses expériences sur des pendules de 10 pieds, les lois du choc.
Newton tient compte de la résistance de l’air, selon une méthode qu’il décrit mais n’explique pas. Les résultats s’accordent assez bien avec la théorie.

Extrait d’une planche tirée des Principia



La Fig.4 représente les pendules utilisés, ainsi que la façon de tenir compte des frottements.

Méthode d’élimination du frottement : A est seul (on enlève B).On le lâche de R et il remonte en V après une oscillation complète. On prend ST = RV/4 et on place ST tel que RS = TV.
En lâchant A de S, sa vitesse au bas de la courbe est égale à celle qu’aurait A en le lâchant de T dans le vide (sa vitesse est la corde TA lorsque A est en bas). On remet B en place et on lâche A de S, les corps se percutent et après percussion, A vient en s et B en k. On enlève B, et par tâtonnements, on cherche le point v tel que A lâché de v remonte en r et que st = vr/4 et st au centre de vr. La vitesse de A après le choc est alors la corde tA , lorsque A est au plus bas. On procède de même pour B.

Newton compare les quantités de mouvement qui s’obtiennent en multipliant les masses par les cordes qui représentent les vitesses. Ses pendules étaient en toute sorte de matière, bois, verre, laine, acier, ivoire .. A chaque fois il constate la conservation de la quantité totale de mouvement.

Remarque :
Si la boule du pendule a un diamètre non négligeable, une partie de l’énergie de chute est transformée en énergie de rotation (la boule non seulement descend parallèlement à elle même mais tourne encore sur elle même car elle tourne autour du point de suspension).
La vitesse donnée plus haut par la mesure de la corde n’est plus tout à fait exacte. De plus lors de la percussion, les rotations viennent perturber le choc de différentes façons, suivant que les boules sont plus ou moins lisses. Dernier point : le choc ne se faisant pas sur les centres d’oscillation (ou centres de percussion), mais sur les centres de gravité, d’autre perturbations peuvent apparaître. (Le centre d’oscillation est plus bas que le centre de gravité).

Newton signale qu’il y a toujours des écarts entre ses prévisions et le résultat expérimental, mais que cela n’excède jamais 2 ou 3 pouces, écarts qu’il attribue aux difficultés de mesures ainsi qu’à la peine d’obtenir le choc au bas des trajectoires.
Si les corps A et B partent simultanément de hauteurs différentes, ils n’arrivent pas en même temps au bas des cercles (les cercles ne sont pas tautochrones). Obtenir le choc au bon endroit demande beaucoup d’adresse de la part de l’expérimentateur.

Appareils de l’abbé Jean Antoine Nollet (1700-1770) .
Il fut le premier à pratiquer un enseignement de physique expérimentale (collège de Navarre).
Il fut précepteur des Dauphins.
Ses appareils sont inspirés de ceux de Mariotte

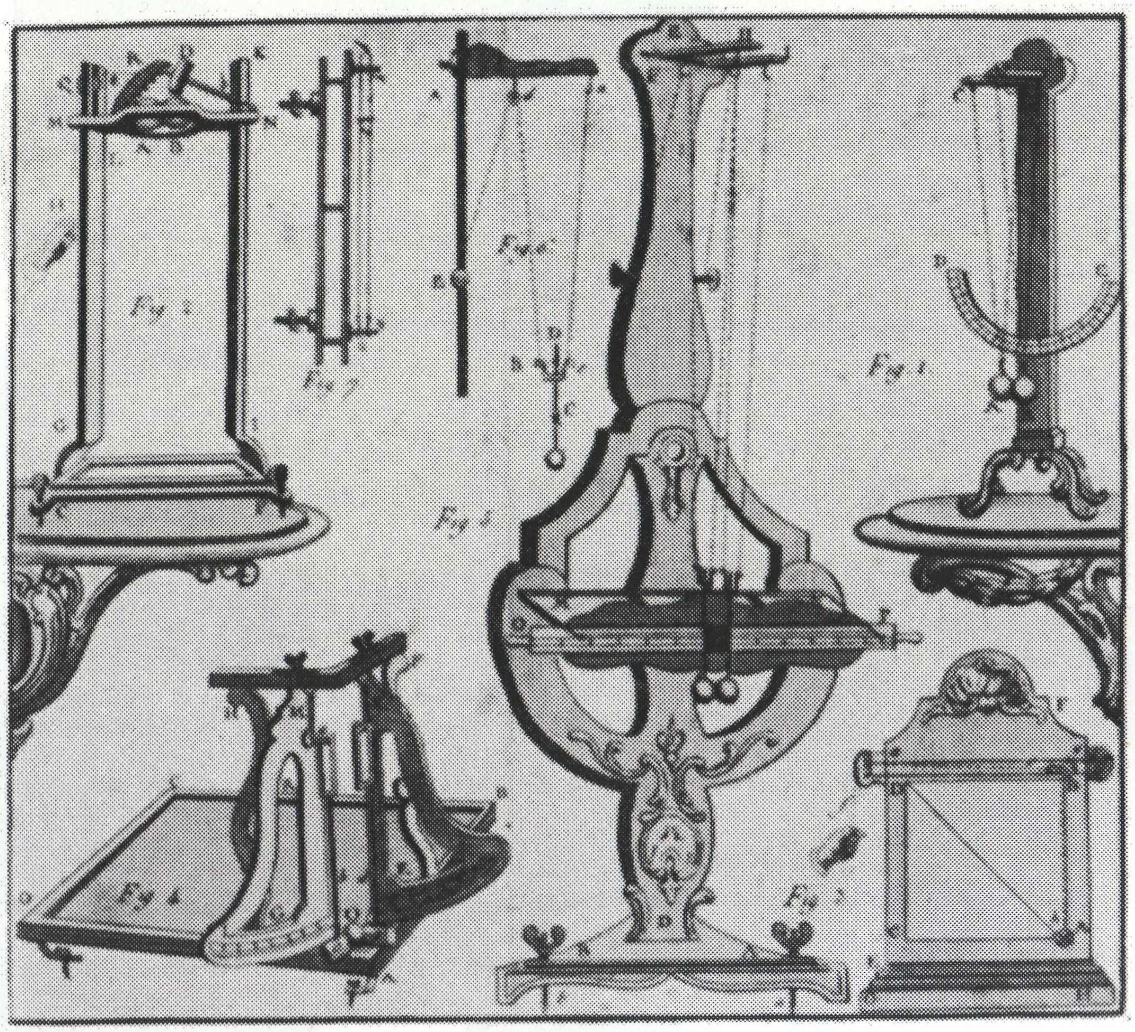
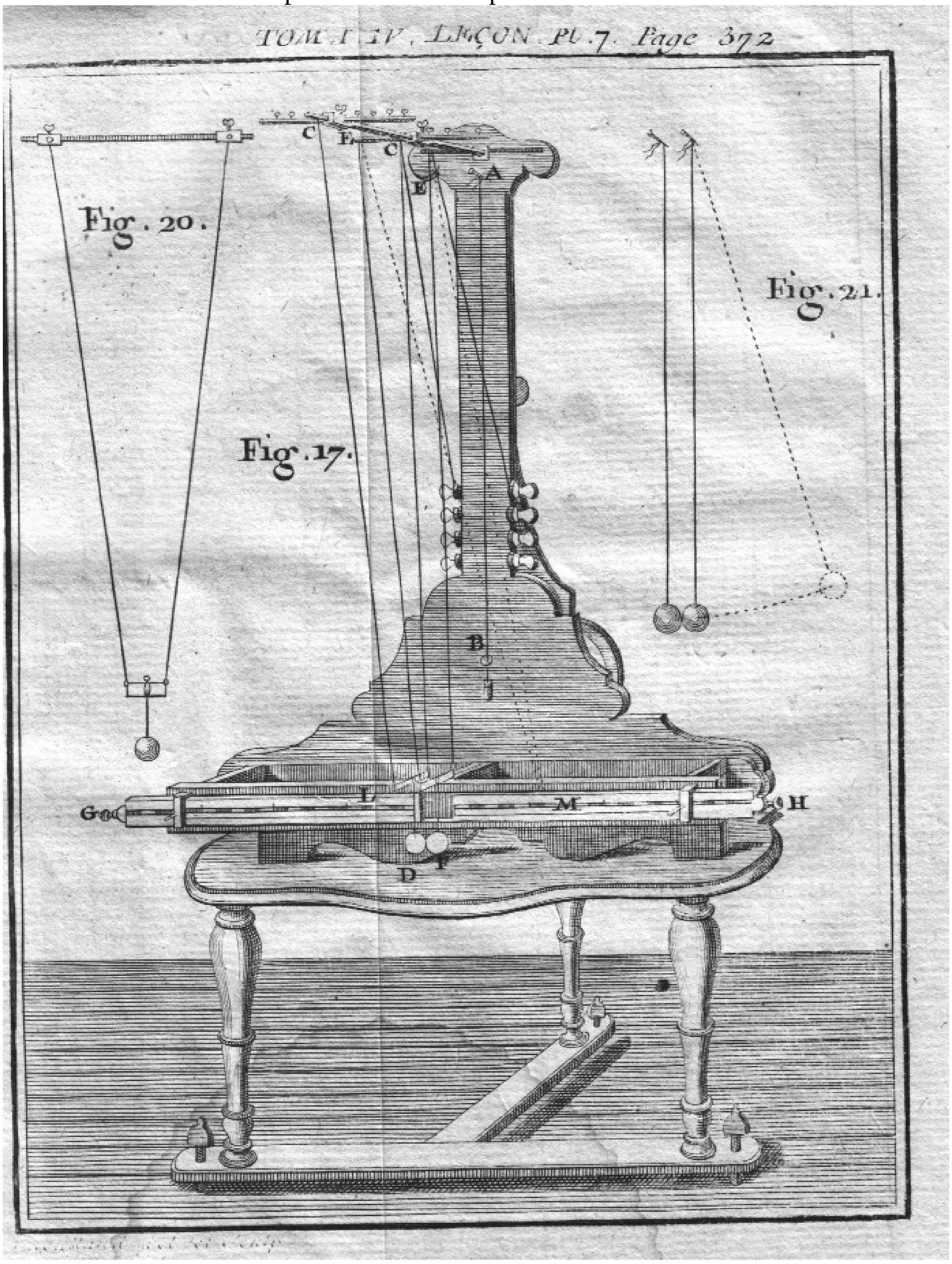
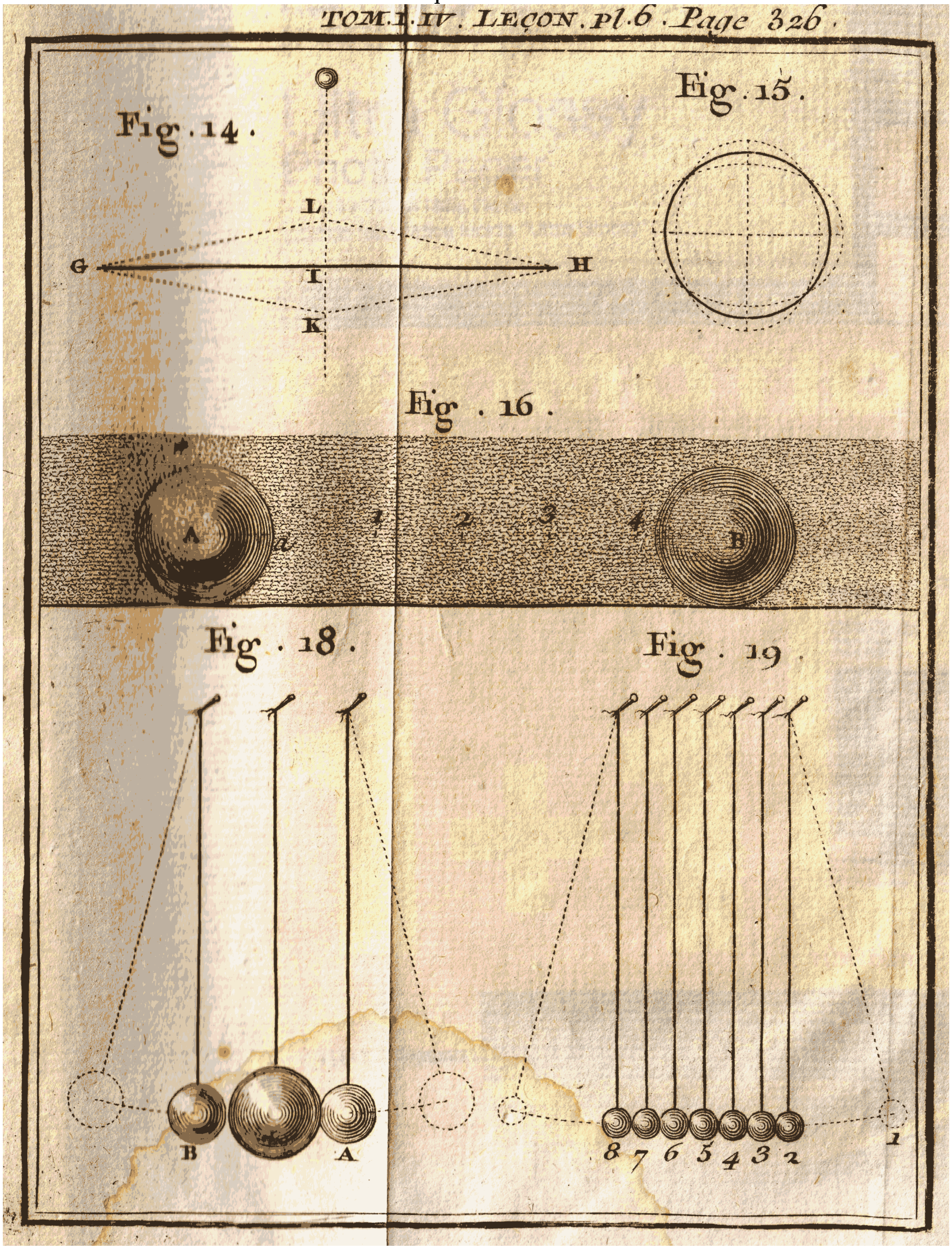


Fig. 69. — Appareils de démonstration des lois des chocs élastiques (Nollet, *Leçons de physique expérimentale*).

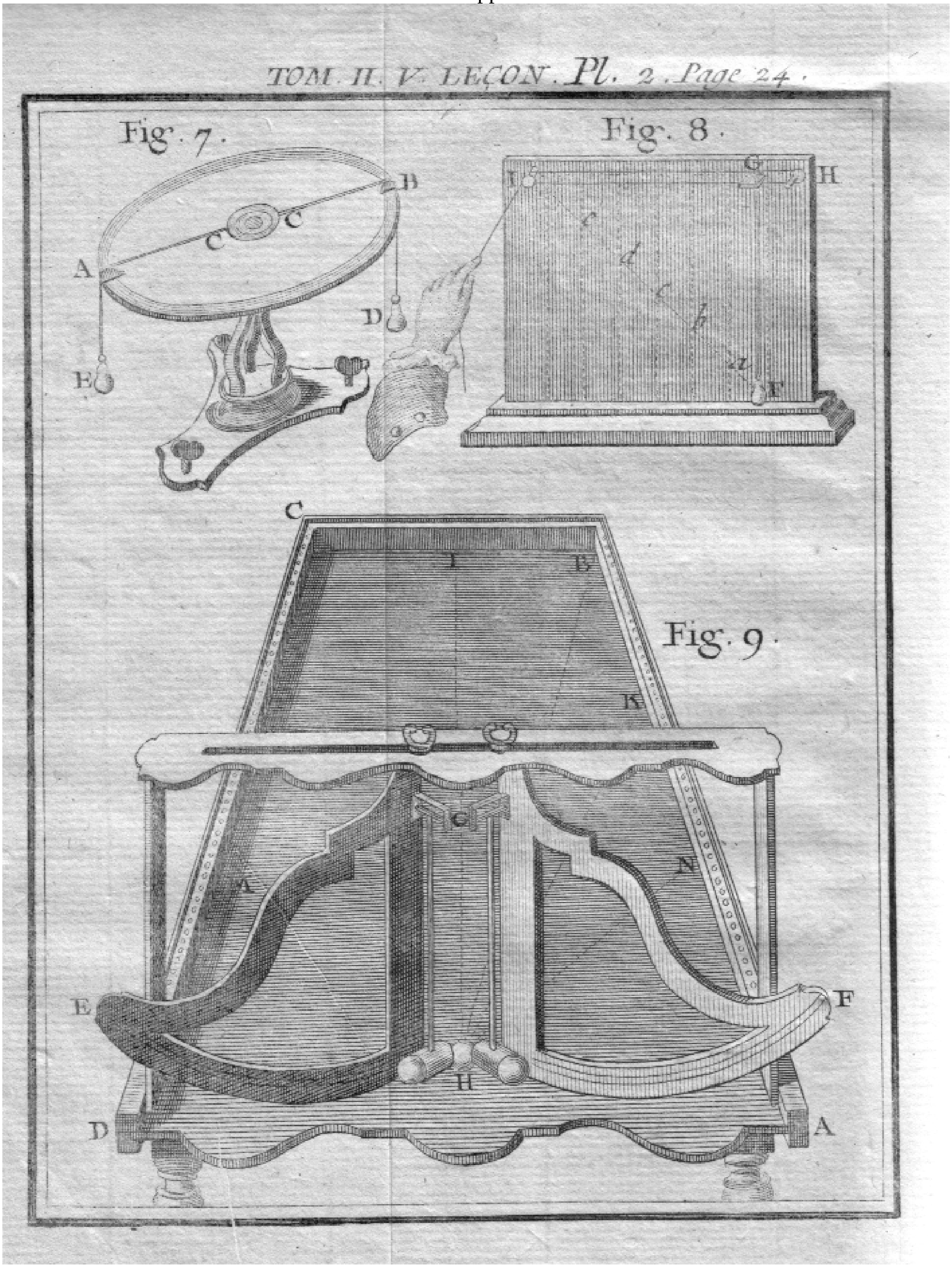
Autre pendule de Nollet pour l'étude des chocs



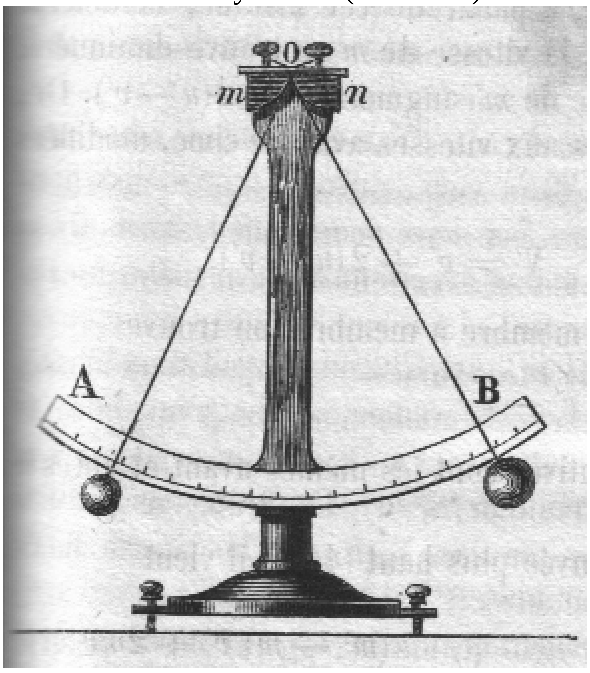
Chocs élastiques. Livre de Nollet



Billard et autres appareil de Nollet.



Pendule cycloïdal (vers1850)



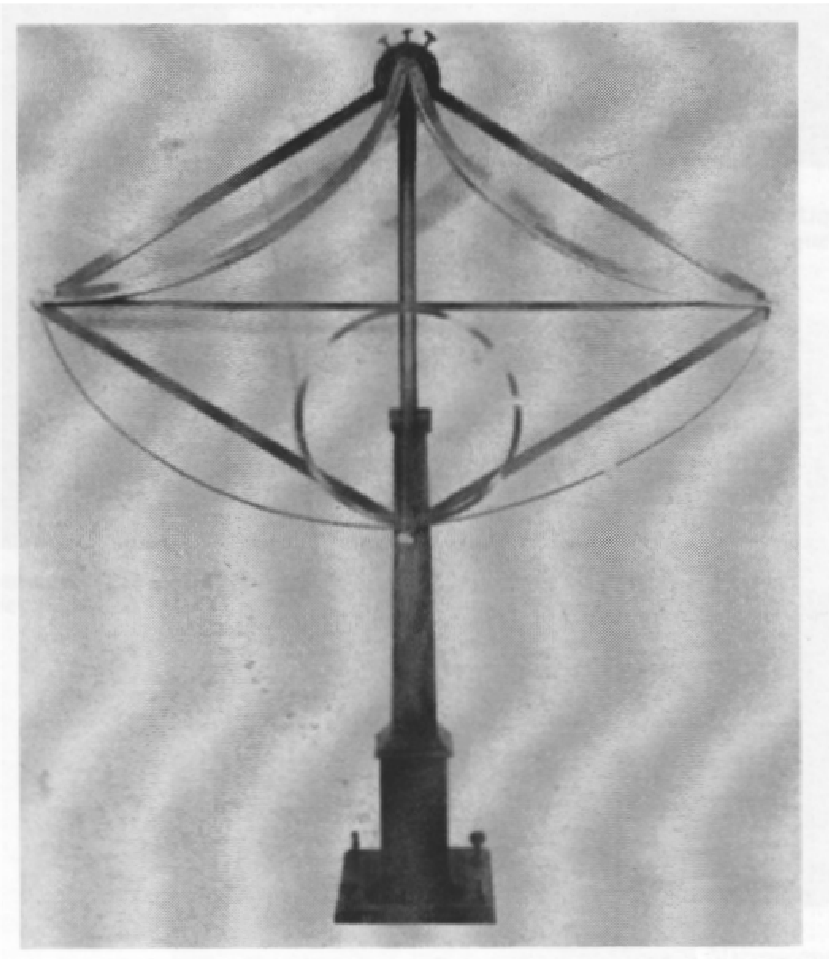
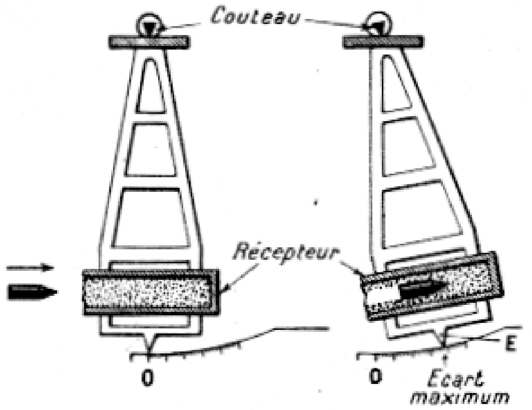


FIG. 70. — **Pendule cycloïdal d'Huygens.**
Vient probablement du cabinet de physique de Charles (C. N. A. M.).

Une application des lois du choc :

Le pendule balistique ou pendule de Robins.

Pendule imaginé par Jacques Cassini vers 1707, réalisé par Robins en 1742.



PENDULE BALISTIQUE.

Un récepteur en fonte est rempli de terre. Celle-ci est retenue par une très mince feuille de plomb. Le récepteur est mobile autour d'un couteau. Une balle de fusil Lebel en s'enfonçant dans la terre fait dévier le pendule d'un écart OE que l'on mesure. Une balle de fusil Lebel de 15 grammes avec 630 mètres de vitesse initiale donne, par exemple, au moment du choc, un écart de 10 centimètres à un pendule d'un mètre de long et pesant 35 kilogrammes.

Un autre pendule balistique.

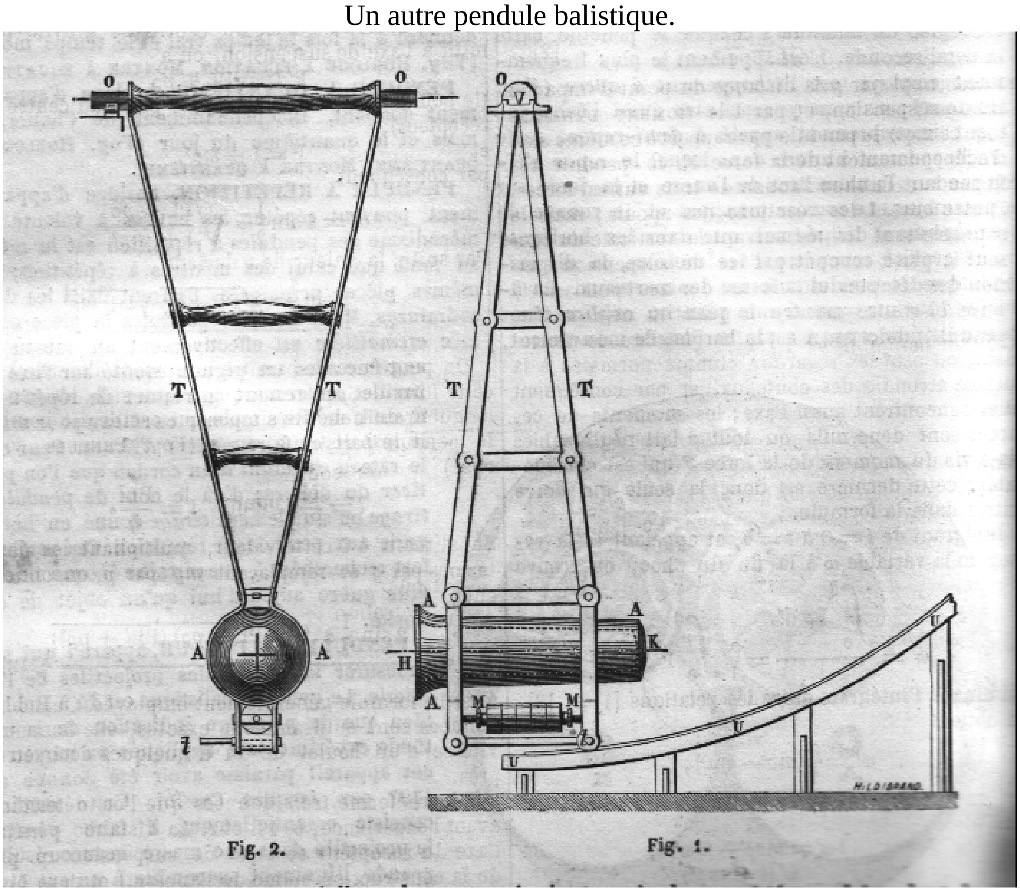


Fig. 2. Fig. 1.

Figure en dehors du sujet du choc.
La boule brûlante ne passe plus à travers l'anneau froid.

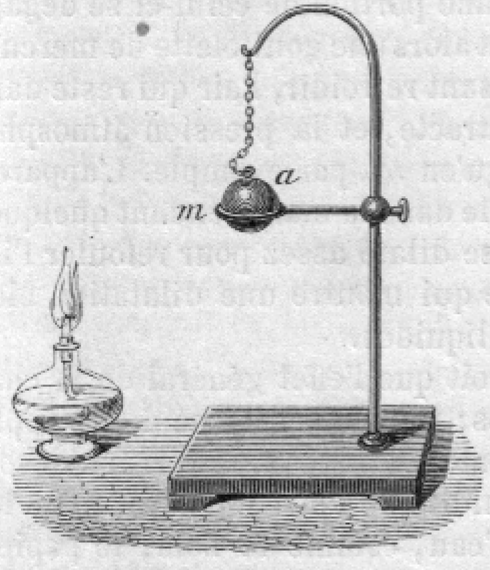


Fig. 161. —
Anneau de s'Gravesande.

Appareil auquel est attaché le nom de s'Gravesande.

Fin de la première partie.