



Éléphant du Congo vu de face, Pieter Boel (1622/1625-1674), pierre noire avec rehauts de pastel.

qui faisait semblant de lui jeter à manger et, pour les mêmes raisons, aspergea-t-il d'eau un peintre et son œuvre! À sa mort, le roi lui-même assista à la séance de dissection, menée par l'anatomiste Joseph Guichard du Verney sur place, à la différence des autres animaux qui étaient envoyés à Paris. On découvrit alors que l'éléphant était une femelle.

Le squelette et l'animal naturalisé sont présentés aux visiteurs, mais plus encore, en matière de témoignages, ce sont les portraits, dont celui réalisé par Pieter Boel (*voir la reproduction ci-dessus*), qui retiennent l'attention.

En effet, l'artiste, qui a passé beaucoup de temps à observer les attitudes naturelles de l'animal, s'attache à son expressivité en insistant sur son regard, son

comportement... En un mot, il fait du pachyderme un individu à la personnalité singulière. Ce faisant, il emboîte le pas à de nombreux membres de la cour fervents anticartésiens. Au médecin et architecte Claude Perrault, ajoutons la princesse Palatine, belle-sœur de Louis XIV, Claude Adrien Helvétius, maître d'hôtel ordinaire de la reine, Charles Georges Leroy, lieutenant des chasses royales... Ces deux derniers ont publié des ouvrages dans lesquels ils défendent énergiquement l'idée d'une intelligence animale.

Par exemple, Leroy, considéré comme un pionnier de l'éthologie et de la psychologie animale, écrit à propos du chien dans ses *Lettres sur les animaux*: «Cet animal est tellement connu que son exemple seul aurait dû rejeter bien loin toute idée de

l'automatisme des bêtes.» S'ils avaient eu plus de succès que l'œuvre de Descartes, peut-être notre rapport au monde et au vivant en aurait-il été changé. Rappelons qu'au regard de la loi française, les animaux ne sont des «êtres vivants doués de sensibilité» que depuis 2015... ■

« Les animaux du roi », au château de Versailles, jusqu'au 13 février 2022.
<https://bit.ly/3vyAK8s>



L'auteur a publié:
**Pollock, Turner, Van Gogh,
 Vermeer et la science...**
 (Belin, 2018)

LES AUTEURS



**JEAN-MICHEL COURTY
ET ÉDOUARD KIERLIK**
professeurs de physique
à Sorbonne Université, à Paris

UNE BALANCE QUI NE PERD PAS L'ÉQUILIBRE

Certains dispositifs inventés il y a plusieurs siècles continuent d'intriguer les physiciens. L'astucieuse balance de Roberval en fait partie!

Elle a depuis longtemps disparu de nos marchés, mais la balance de Roberval nous est familière: beaucoup d'entre nous l'ont utilisée à l'école pour effectuer des pesées. De la science élémentaire, donc? Pas vraiment. Cette balance a intrigué nombre de physiciens. En particulier, pourquoi les positions des masses sur les plateaux ne jouent-elles pas sur l'équilibre de la balance, alors que l'effet d'une force sur un objet en rotation autour d'un axe varie avec la distance entre cet axe et l'endroit où s'applique la force?

Tout tient à une astuce géniale de Gilles Personne de Roberval (nom du village picard où ce physicien et mathématicien du XVII^e siècle est né). Dans sa balance, le fléau visible s'accompagne d'un second fléau parallèle dissimulé par le socle, et ces éléments sont articulés avec les tiges verticales qui soutiennent les plateaux de façon à constituer un parallélogramme déformable.

Pour comprendre l'intérêt de ce dispositif, intéressons-nous d'abord à un objet rustique et analogue à une balance: la balançoire tape-cul de notre enfance. Il s'agit d'un tronc d'arbre (plus généralement une barre rigide) qui pivote autour d'un axe horizontal et perpendiculaire au tronc, passant par le centre de masse de ce dernier. Lorsque personne n'est assis sur le tronc, il y a équilibre quel que soit l'angle que fait le tronc avec l'horizontale, puisque l'axe passe par son centre de masse.

Lorsque deux enfants de même masse s'assoient sur le tronc à égale distance de l'axe, l'équilibre est conservé. Si leurs masses diffèrent, l'équilibre peut être maintenu à condition que le plus léger des enfants s'éloigne du centre, afin que le produit de son poids par la distance à l'axe de rotation soit le même que celui de son compagnon. Ce «moment», produit de la force par le bras de levier

(distance entre la ligne d'action de la force et l'axe de rotation), est la grandeur qui compte pour les mouvements de rotation. Il y a équilibre pour la rotation lorsque la somme (vectorielle) des moments est nulle.

DE LA BALANÇOIRE À LA BALANCE

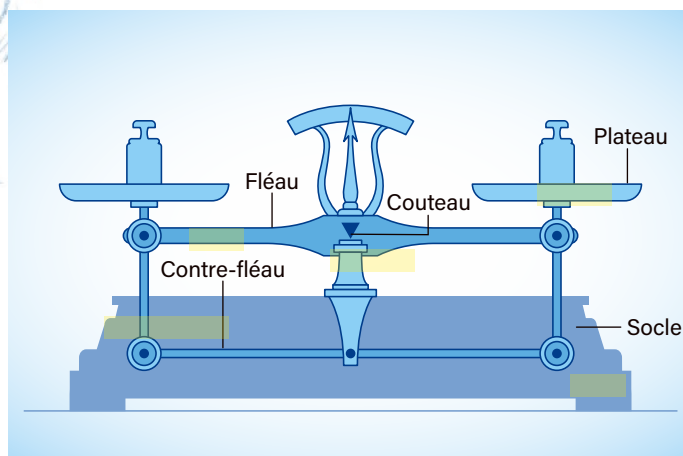
Pour réaliser une balance rudimentaire, fixons sur ce tronc deux plateaux à égale distance de l'axe central. On constate d'abord que ces plateaux s'inclinent avec le tronc; des masses posées dessus peuvent donc glisser. Ensuite, pour obtenir un équilibre avec deux masses identiques, la position de celles-ci sur les plateaux n'est pas indifférente: il faut les placer elles aussi à égale distance de l'axe central. Enfin, même dans ces conditions, l'équilibre obtenu se révèle instable! Ce n'est pas étonnant. Avec des plateaux situés au-dessus de l'axe, le centre de





UNE BALANCE À DOUBLE FLÉAU

La balance de Roberval comporte deux fléaux de même longueur articulés avec deux tiges, de même longueur également, qui soutiennent les plateaux. Les deux fléaux sont fixés en leurs centres à une potence verticale, mais sont libres de pivoter autour de ces centres. Les fléaux et les tiges forment ainsi un parallélogramme déformable ; les tiges restent verticales, de sorte que les plateaux restent horizontaux.



La balançoire tape-cul, au deuxième plan, est analogue à une balance simple dont les plateaux sont fixés sur le fléau et qui s'inclinent donc avec lui. La balançoire du premier plan, qui rappelle le principe de la balance de Roberval, ne présente pas ce type d'inconvénient.

masse de l'ensemble tronc-plateaux-masses est aussi au-dessus de l'axe; il tend donc à passer au-dessous, comme dans un pendule pesant, d'où l'instabilité.

Comment corriger ces trois défauts? Commençons par régler la question de l'indifférence de l'équilibre à la position des masses. Considérons la balance ordinaire à plateaux (*en arrière-plan dans l'illustration ci-dessus*) et sa variante de précision, le trebuchet du joaillier ou la balance d'apothicaire. Dans ces appareils, le fléau, une barre métallique rigide, repose en son centre sur l'arête d'un prisme, le «couteau». Et à chaque extrémité du fléau, on suspend, à égale distance de l'axe, deux plateaux à l'aide de tiges ou de fils.

Lorsqu'on place une masse sur le plateau, le centre de gravité du système masse-plateau-fils n'est pas nécessairement situé toujours au même endroit. Cependant, comme le plateau est suspendu, il se

comporte mécaniquement comme un pendule pesant: le système pivote autour du point de suspension de façon qu'à l'équilibre, le centre de masse du plateau chargé se place parfaitement à la verticale du point de suspension. Autrement dit, où que l'on place la masse sur le plateau, le poids correspondant s'applique toujours au point de suspension sur le fléau.

C'est donc en ajoutant des pivots à notre dispositif que l'on a réglé la question du positionnement des masses. Par ailleurs, si le segment qui relie ces pivots passe aussi par l'axe de rotation du fléau, l'équilibre est indifférent à l'inclinaison du fléau et est donc stable. Pour que le fléau revienne spontanément à l'horizontale, il suffit de décaler légèrement son centre de gravité sous l'axe de rotation, par exemple en ajoutant une simple aiguille dirigée vers le bas.

Ce dispositif a toutefois un inconvénient: pour que les plateaux ne s'inclinent

À VISITER

En 2005, la municipalité et une association locale de Roberval, dans l'Oise, ont fait construire la plus grande balance de Roberval du monde. Longue de 5,6 mètres et haute de 2,20 mètres, cette balance est pleinement fonctionnelle. Son mécanisme a toutefois été bloqué pour des raisons de sécurité et afin que ce monument ne devienne pas un jeu.

Les auteurs ont notamment publié: **En avant la physique!**, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).



pas trop lors des pesées, ils doivent être placés le plus bas possible par rapport aux pivots – en pratique, à une distance au moins égale à deux ou trois fois leur taille. On obtient ainsi les balances d'apothicaire dont la sensibilité atteint le dixième de gramme. Le prix à payer est une taille imposante et un dispositif fort fragile, ce qui en fait d'ailleurs la beauté.

DU FLÉAU SIMPLE AU DOUBLE FLÉAU

Pour obtenir un appareil plus robuste, Gilles Personne de Roberval a conçu une balance dont les plateaux ne sont pas suspendus, mais placés au-dessus du fléau, comme dans notre balance rudimentaire. Cependant, ce fléau visible n'est que le bras supérieur d'un parallélogramme articulé, fixé sur la potence centrale (voir l'encadré page 89). Un second fléau parallèle, le «contre-fléau», est dissimulé dans le socle. Par construction, les tiges latérales restent verticales quand le parallélogramme se déforme, et les plateaux demeurent ainsi horizontaux quelle que soit l'inclinaison des fléaux.

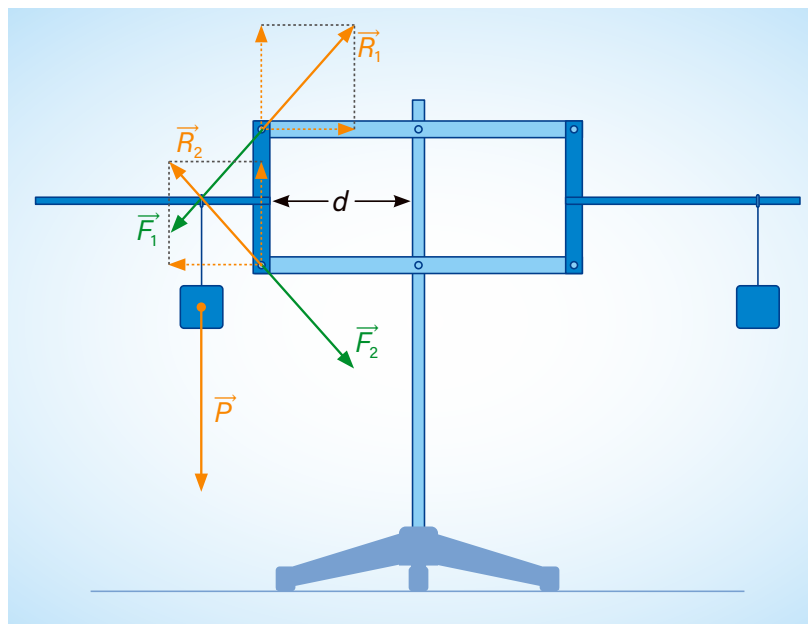
Comment la balance de Roberval s'équilibre-t-elle? Analysons le modèle de démonstration où les plateaux sont remplacés par deux bras horizontaux fixés rigidement au centre des tiges verticales du parallélogramme (voir l'encadré ci-contre). En l'absence de masses ajoutées, cette balance est parfaitement équilibrée.

Maintenons ce modèle dans une position quelconque tout en suspendant une masse sur le bras latéral gauche (par exemple). Trois forces s'exercent sur ce bras et la tige dont il est solidaire: le poids, la réaction du fléau supérieur sur le haut de la tige et la réaction analogue du fléau inférieur sur le bas de la tige. Comme le système est immobile, la somme de ces trois forces est nulle: les composantes verticales des réactions compensent le poids, et leurs composantes horizontales sont de même module, mais de sens opposés.

En vertu de la loi de l'action et de la réaction, la tige exerce, sur chacun des fléaux, des forces opposées aux deux réactions. Quels sont leurs effets sur la rotation des fléaux, solidaires par construction? Les composantes verticales de ces forces créent un moment égal à celui du poids ajouté et s'exerçant à l'extrémité gauche des fléaux. Pour les composantes horizontales, les moments exercés par la tige sur les deux fléaux se compensent, car ces forces horizontales sont opposées tandis qu'elles ont le

INDÉPENDANCE VIS-À-VIS DE LA POSITION

Ce modèle de démonstration du principe de la balance de Roberval reste à l'équilibre même si les deux masses égales sont suspendues à des distances différentes de l'axe vertical central. La position d'équilibre des « fléaux » représentée ici est horizontale pour simplifier. On considère le système masse-barre-tige de gauche. Il est soumis à trois forces : le poids $\vec{P}$, la réaction $\vec{R}_1$ du fléau supérieur et la réaction $\vec{R}_2$ du fléau inférieur. La somme des composantes verticales de $\vec{R}_1$ et $\vec{R}_2$ est égale au poids $\vec{P}$. Par la loi de l'action et de la réaction, les fléaux subissent, à gauche, les forces $\vec{F}_1 = -\vec{R}_1$ et $\vec{F}_2 = -\vec{R}_2$. Le moment total exercé sur eux par $\vec{F}_1$ et $\vec{F}_2$ est égal, en module, au produit du poids P par la distance d . Il est donc indépendant de la position du point de suspension.



même bras de levier par rapport aux pivots de la potence centrale.

Le point remarquable est que le moment total ne dépend pas de la position de la masse ajoutée sur le bras latéral. Lorsqu'on la déplace, on ne change que le module des composantes horizontales des forces agissant sur les fléaux; or le moment dû à ces composantes est toujours nul!

Ce résultat surprend les physiciens qui font remarquer que les moments des poids posés sur la balance de Roberval, prise dans sa totalité, ne sont pas identiques si les masses ne sont pas à égale distance de la potence centrale. Comment l'équilibre serait-il alors possible? En fait, il faut tenir compte des forces de réaction du support sur lequel est posée la balance. En 2019, Jaeseong Park et deux collègues, en Corée du Sud, ont ainsi montré que ces réactions, verticales et à égale distance de la potence centrale, ne sont pas égales en module. La différence de leurs moments compense justement la différence des moments des poids. La balance est bien à l'équilibre! ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Park et al., **What force and torque are working with the Roberval balance?**, *The Physics Teacher*, vol. 57(3), pp. 166-168, 2019.

P. Chagnon, **The Roberval balance**, *The Physics Teacher*, vol. 30(4), p. 238, 1992.

E. S. Barr, **The Roberval balance**, *The Physics Teacher*, vol. 22(2), p. 121, 1984.