

# INTÉGRATION DE REPÈRES CULTURELS EN ENSEIGNEMENT DES SCIENCES PAR LA DÉMONSTRATION

*Niveaux  
secondaire  
et collégial*



Sous la direction de Vincent Richard, PhD et de Marcel Lafleur, directeur du CDSP



Pour toute information et pour découvrir nos publications en libre accès, consultez notre site web :

<http://lel.crires.ulaval.ca/>

Illustration source utilisée selon les termes de la licence CC BY-SA 2.0 :  
[Certains droits réservés](#) par 350.org

**Mise en page** : Marie-Caroline Vincent, Shon Shachar Boubilil, Audrey April

**ISBN** : 978-2-921559-33-1

**Pour citer cet ouvrage :**

Richard, V. et Lafleur, M. (dir.) (2018). *Intégration de repères culturels en enseignement des sciences par la démonstration*. Québec : Livres en ligne du CRIRES. En ligne [http://lel.crires.ulaval.ca/public/richard\\_lafleur\\_2018.pdf](http://lel.crires.ulaval.ca/public/richard_lafleur_2018.pdf)

Centre de recherche et d'intervention sur la réussite scolaire (CRIRES), Québec : juillet 2018



Cette création est mise à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons [Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International](#).



# Table des matières

PRÉAMBULE .....	1
LA CAMERA OBSCURA ET L'ÉVOLUTION DES IDÉES « LUMINEUSES » .....	4
<b>Isabelle ARSENEAU, Mathieu RIOPEL, Nathalie BACON et Mathieu GENEST</b>	
1.1 La camera obscura et l'évolution des idées « lumineuses » .....	5
1.2 Références utiles .....	14
1.3 Description et utilisation des démonstrations .....	15
1.4 Annexe : Construction de la chambre noire .....	23
DU SON À LA MUSIQUE : OÙ CRÉATIVITÉ ET SCIENCES SE RECONTRENT .....	28
<b>Isabelle ARSENEAU et Mathieu RIOPEL</b>	
2.1 Intentions et structure du module .....	30
2.2 Sciences, musique et créativité .....	30
2.3 Perception et interprétation des sons et de la musique .....	61
2.4 Conclusion : La musique, un thème porteur pour l'enseignement des sciences .....	80
SE MESURER AU MONDE .....	81
<b>Isabelle ARSENEAU, Mathieu RIOPEL et Caroline PAQUET</b>	
3.1 Intentions et structure du module .....	83
3.2 Mesurer le monde .....	84
3.3 La lumière pour mesurer .....	109
3.4 Les limites de la mesure .....	127
3.5 Conclusion : la mesure pour introduire une réflexion de nature épistémologique en enseignement des sciences .....	136
POST-FACE .....	138
CRÉDITS PHOTOGRAPHIQUES .....	148

# Préambule

Mettre ensemble nos idées, croiser nos expertises, s'ouvrir à de nouvelles façons de faire, ce sont autant de sources de plaisirs que nous avons pu goûter en collaborant au développement de démonstrations visant à favoriser l'intégration de repères culturels dans l'enseignement des sciences aux niveaux secondaire et collégial. Au cours de cette collaboration (de 2013 à 2015) entre le Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP) du Cégep Garneau et la Faculté des sciences de l'éducation de l'Université Laval<sup>1</sup>, nous avons voulu mettre de l'avant une conception de la démonstration scientifique qui s'accorde avec une approche socioculturelle de l'enseignement des sciences. En effet, les démonstrations proposées, en plus de susciter surprise et émotion, permettent de présenter certains aspects sociaux et historiques qui ont marqué les développements scientifiques et d'illustrer ainsi la nature même de l'activité scientifique. Il s'agit donc ici, au-delà des concepts, de présenter les aspects humains de la science pour en saisir toute la portée.

## L'intégration de repères culturels : un aspect central

Ce projet d'intégrer « démonstration scientifique » et « ancrage culturel » des sciences répond directement aux orientations données par le *Programme de formation de l'école québécoise* (PFÉQ) en enseignement secondaire. En effet, celui-ci demande d'inscrire les activités scientifiques et technologiques dans leur contexte social et culturel, et ce, pour au moins deux raisons. D'une part, une telle mise en contexte permet de « donner un sens aux concepts de la discipline en les intégrant à un contexte dans lequel leur usage s'avère pertinent » (MELS, 2006, p. 273). De cette façon, on souhaite que les apprentissages contextualisés soient plus significatifs et plus durables pour les étudiants : « ces liens peuvent faire en sorte que les apprentissages effectués en classe débouchent sur des activités qui se passent au-delà des murs de l'école » (MELS, 2006, p. 273). D'autre part, la mise en contexte social et culturel des activités scientifiques et techniques permet de présenter la science comme une activité humaine ayant un impact sur toutes les sphères d'activité. Cette mise en contexte contribue donc à l'enrichissement et à la complexification de la vision du monde des étudiants, ce qui rejoint un aspect fondamental de la formation selon le PFÉQ : lors de son passage à l'école, l'élève est amené à construire sa vision du monde, une vision qui progresse par rapport à sa capacité à poser un regard critique sur les univers matériel et humain dont il faut comprendre les idées, l'histoire, la culture et les valeurs (MELS, 2007). Un tel objectif d'enseignement a des conséquences sur notre manière de concevoir les sciences. Pour le PFÉQ, « cela implique aussi une réflexion sur la nature même des savoirs scientifiques et technologiques, leur évolution et leurs multiples retombés, particulièrement sur le plan sociétal et environnemental » (MELS, 2007, p. 3).

Ces orientations du PFÉQ sont cohérentes avec un certain consensus qui se dégage sur le plan international parmi les spécialistes en éducation quant à l'importance de développer des outils pédagogiques qui permettent l'apprentissage des notions de sciences, mais aussi le développement des habiletés propres à l'entreprise scientifique et la réflexion sur la nature des sciences. Or, il a été démontré que plusieurs élèves ont tendance à accorder une « immunité idéologique » aux sciences et ont de la difficulté à concevoir comment la recherche et, plus généralement, l'entreprise scientifique, peuvent être influencées par des considérations sociales, politiques, économiques et éthiques (Pouliot, Bader et Therriault, 2010). Il est pourtant fort important de reconnaître les

---

<sup>1</sup> Remerciements à la fin, après conclusion.

négociations, les débats et les désaccords entre chercheurs comme étant une partie intégrante des sciences si l'on désire rendre compte de la science telle qu'elle se fait actuellement. L'objectif d'un tel projet consiste donc à contribuer à « qualifier » les savoirs scientifiques en amenant les étudiants à apprécier la science pour ce qu'elle est et, du coup, à développer un rapport plus positif aux sciences.

Or, de l'avis même des enseignants du secondaire et du collégial, ces aspects sont rarement traités explicitement dans les cours de sciences. Plusieurs raisons peuvent être évoquées : en formation initiale, l'intégration de repères culturels en enseignement des sciences est parfois considérée comme étant accessoire, les préoccupations des futurs enseignants se rapportant davantage aux aspects de formation pratique (aspects de gestion de classe, désir de couvrir « tout le programme », difficultés liées à la maîtrise de certains concepts scientifiques plus abstraits, etc.) ; l'approche en enseignement des sciences est souvent très disciplinaire de telle sorte qu'une réflexion sur la nature des sciences semble davantage relever de la philosophie des sciences; ou encore un manque de ressources (souvent en termes de temps de préparation) pour présenter ces différents aspects.

## **Les modules**

Ces diverses préoccupations en tête, nous avons donc cherché à développer des modules de démonstration qui explicitent certains concepts scientifiques tout en situant leur contexte d'élaboration en lien avec différents phénomènes observables. Trois modules sont présentés. Le premier module s'articule autour d'un objet qui incarne bien l'évolution de notre compréhension de la lumière, à savoir la *camera obscura*. Le module s'ouvre sur une synthèse historique de notre compréhension de la lumière et de la contribution des anciens dans l'évolution de ses diverses représentations. On y retrouve ensuite une série de démonstrations permettant aux participants de mieux « voir » plusieurs propriétés de la lumière. On y suggère des déroulements possibles d'animation en lien avec la démonstration ainsi que les modalités de fabrication des divers objets nécessaires.

Le second module rassemble sous quatre thèmes plusieurs manipulations touchant l'univers de la musique: les sciences et l'harmonie, l'exploration des instruments de musique, l'oreille et la perception du son, le cerveau et l'interprétation du son. De par la nature même du thème qui sert de fil conducteur, les différents phénomènes explorés ici conduisent nécessairement le lecteur à faire des liens avec les arts et la culture. On y explore aussi le monde fascinant de la perception du son et des technologies liées au domaine des ondes.

Le troisième et dernier module s'articule autour de l'idée de la « mesure », un thème central en science. Ce module est structuré de la même manière que le module 2 : on y retrouve des démonstrations organisées autour d'un thème plutôt qu'autour d'un objet. Dans ce cas-ci, la nature du thème nous ramène à réfléchir à notre conception des sciences et à notre rapport au monde naturel.

## **Leur utilisation**

Notre propre utilisation de ces modules dans la formation de futurs enseignants nous conduit à penser que tous les modules présentés dans ce document permettent d'explicitier et de s'interroger sur les contenus et les instruments de connaissance scientifique de manière concrète et intéressante. Pour ce faire, tous les modules se réfèrent d'abord à un montage physique, la démonstration en soi,

qui permet de surprendre, d'émerveiller, voire de déstabiliser en confrontant les conceptions initiales des participants. Dans tous les cas, ces démonstrations offrent des pistes permettant de mettre en perspective un concept scientifique en particulier ou l'évolution d'un modèle scientifique. Ainsi, ces démonstrations sont éloquentes en termes de construits sociaux, notamment en ce qui a trait à l'histoire des sciences et des technologies. Sur le plan de l'apprentissage, l'utilisation de la démonstration est ici présentée comme une stratégie permettant de mettre en évidence, de façon tangible, le processus de construction de savoirs à partir des préconceptions qui sont soulevées et remises en question par l'observation de phénomènes concrets. Ces modules se veulent donc des sources d'inspiration permettant de concevoir des situations d'apprentissage et d'évaluation transposables dans un contexte scolaire puisqu'ils sont directement en lien avec différents concepts prescrits par les programmes de formation. De plus, nous croyons que le lecteur pourra aussi exploiter le caractère « technologique » de la démonstration : en effet, elle peut facilement constituer la base d'un projet de fabrication permettant le développement de compétences disciplinaires associées à la résolution de problèmes technologiques. Selon nous, il s'agit d'un réinvestissement intéressant des modules.

Mentionnons finalement que, lors de l'élaboration des démonstrations, un souci particulier fut porté à l'utilisation de matériel et de matériaux simples, de façon à ce que les montages soient reproductibles avec des outils de base se retrouvant généralement dans les écoles secondaires et les collèges. Au besoin, les enseignants peuvent alors reproduire les démonstrations proposées et éventuellement en faire évoluer certains éléments.

En quelques mots, ces différents modules présentent la démonstration scientifique comme un outil pédagogique permettant d'aborder en classe des concepts scientifiques de manière surprenante et intéressante, tout en explorant les aspects culturels de la science. Nous espérons que cette publication permettra aux enseignants en exercice de se les approprier et de les faire vivre et évoluer pour répondre aux besoins particuliers des classes du secondaire et du collégial.

## Remerciements

Nous tenons à remercier le ministère de l'Éducation et de l'Enseignement supérieur qui a financé ce projet par son Programme de collaboration universités-collèges et permis la production de ces modules. Nous tenons aussi à remercier le CRIRES qui a permis l'édition de cet ouvrage.

## Références

**MELS. (2006).** Programme de formation de l'école québécoise, enseignement secondaire, premier cycle. Ministère de l'éducation des loisirs et du sport, Gouvernement du Québec.

**MELS. (2007).** Programme de deuxième cycle, Science et technologie. Ministère de l'éducation des loisirs et du sport, Gouvernement du Québec.

**Pouliot, C., Bader, B. et Therriault, G. (2010).** The notion of the Relationship to knowledge: A theoretical tool for research in science education. *International Journal of Environmental & Science Education*, 5 (3), 239-264.

# Chapitre 1

## LA CAMERA OBSCURA ET L'ÉVOLUTION DES IDÉES « LUMINEUSES »

Conception et rédaction :

*Isabelle Arseneau*, Centre de démonstrations en sciences physiques ;

*Mathieu Riopel*, Cégep Garneau ;

*Nathalie Bacon*, Université Laval ;

*avec la collaboration de Mathieu Genest*, Cégep Limoilou

**Pour citer ce chapitre de l'ouvrage :**

**Arseneau, I., Riopel, M. et Bacon, N. (2018).** La *camera obscura* et l'évolution des idées « lumineuses ». Dans V. Richard et M. Lafleur (dir.), *Intégration de repères culturels en enseignement des sciences par la démonstration* (p.4-26). Québec : Livres en ligne du CRIRES. En ligne : [http://lel.crires.ulaval.ca/public/richard\\_lafleur\\_2018.pdf](http://lel.crires.ulaval.ca/public/richard_lafleur_2018.pdf)

## Chapitre 1 : La *camera obscura* et l'évolution des idées « lumineuses »

Le contenu du présent module de démonstration aborde des concepts d'optique par l'entremise d'histoires choisies et d'expériences sensibles. Il s'intéresse particulièrement à la *camera obscura*, ou chambre noire, un appareil qui, à travers l'histoire, a permis de mieux comprendre différentes « idées lumineuses ». Le module s'articule autour de quatre thèmes – l'œil et la vision, l'imagerie, la perspective dans les arts, la composition de la lumière – et il présente des montages de démonstration pouvant illustrer concrètement certains phénomènes qui leur sont associés. L'objectif de ce module est de fournir des ressources utiles pour l'intégration d'une approche dite culturelle dans l'enseignement de certains principes d'optique géométrique abordés dans les cours de physique du secondaire et du collégial. En ce sens, les démonstrations présentées s'ancrent dans des contextes historiques qui nous apparaissent intéressants pour discuter de l'évolution de nos idées sur la lumière ainsi que des liens entre les arts, les techniques et les sciences.

En guise d'introduction, définissons d'abord ce qui est entendu par *camera obscura* – littéralement : chambre obscure. Il s'agit d'une pièce complètement sombre et fermée, où la lumière n'entre que par un très petit trou (un sténopé), que l'on peut éventuellement remplacer par une lentille convergente<sup>2</sup>. Le principe est simple : le sténopé ou la lentille laisse passer les rayons lumineux provenant d'une scène extérieure à la *camera obscura*. Ces rayons (projetés ou réfractés) formeront une image sur un écran blanc opposé à l'ouverture. Elle permet donc de voir au-dedans ce qui se présente au-dehors. Et la *camera obscura* n'a pas besoin de tout un attirail pour émerveiller : elle le fait pour ainsi dire par elle-même!



1.1 : Principe optique de la *camera obscura*,

### 1.1 La *camera obscura* et l'évolution des idées « lumineuses »

La *camera obscura* est un appareil qui a une longue histoire. Elle a contribué à mieux comprendre le fonctionnement de l'œil et la nature de la lumière, elle a permis de réaliser des observations astronomiques importantes et elle est à la base du développement de la perspective dans les arts. Dans cette section, quelques repères historiques seront présentés pour situer l'une ou l'autre des démonstrations proposées dans la section 4. Il sera question de différentes idées mises de l'avant par certains personnages célèbres de l'histoire des sciences, qui ont utilisé la *camera obscura* d'une manière ou d'une autre. On retrouve dans l'histoire de nombreuses variantes de cette « chambre noire ». Par exemple, Kepler parle de *camera clausa* (chambre close) alors qu'Ibn al-Haitham (ou Alhazen) utilise l'expression « lieu obscur » : *locus obscurus*. Cela dit, le terme *camera obscura* est assez ancien et ne peut être attribué à une personne en particulier, même s'il semble que cette expression se soit imposée au cours du XVII<sup>e</sup> siècle<sup>3</sup>.

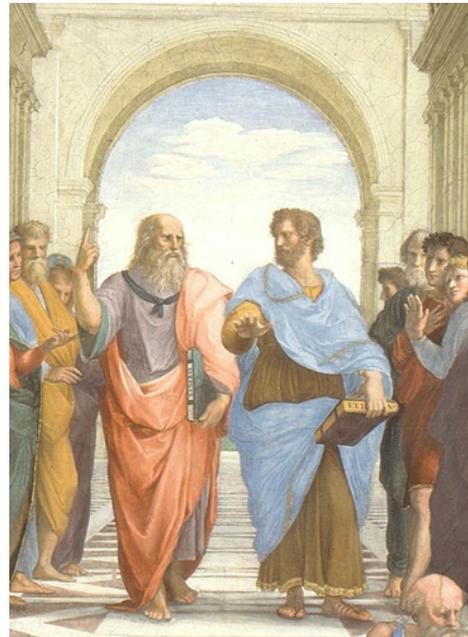
<sup>2</sup> Notons que la première mention de l'ajout d'une lentille biconvexe (convergente) daterait de 1550.

<sup>3</sup> Il semble important de mentionner que la plupart des informations historiques présentées ont été tirées de l'ouvrage de Martine Bubb (2010), qui a inspiré la conception de ce module de démonstration.

Avant de poursuivre, précisons que les repères historiques ne seront pas présentés comme des savoirs encyclopédiques où les dates et les noms sont listés de manière exhaustive. Ils sont introduits dans la mesure où ils permettent de faire prendre conscience que les idées de ceux dont l'histoire a conservé les noms sont issues certes de leurs réflexions et de leurs travaux, mais également des idées des autres qui les ont précédés ou qui leur ont été contemporains. Ces idées, parfois excellentes, parfois partiellement vraies ou complètement fausses, en ont souvent suscité d'autres, plus justes, plus appropriées, plus utiles ou simplement différentes. Ces repères permettent aussi de faire réaliser que ce que l'on sait aujourd'hui, toutes ces idées sur la propagation de la lumière, sur les couleurs, sur le fonctionnement de l'œil et le rôle du cerveau dans la vision a nécessité beaucoup de temps à être compris. Ces connaissances, qui semblent acquises et comprises aujourd'hui, ne l'ont pas toujours été. Ce que l'on sait aujourd'hui peut sembler fini, suffisant, mais n'est qu'une page de ce que nous aurons compris et saurons demain.

## Platon, Aristote et l'optique dans l'Antiquité grecque

Chez les Grecs de l'Antiquité, l'optique est un domaine assez constitué qui est avant tout théorique et mathématique, comme la philosophie de l'époque. L'optique technique ne se serait que très peu développée en raison, peut-être, d'une certaine méfiance vis-à-vis de ce qui déforme ou « trompe la vue » (comme les lentilles). Aristote aurait été un des premiers à accorder plus d'importance à l'observation et à l'expérience sensible. On dit de lui qu'il était fidèle à une pensée naturaliste, d'abord fondée sur les données expérimentales. Il se serait ainsi distingué de son maître Platon, qui proposait plutôt une vision « mythique » et mathématique du monde.



1.2 : Platon et Aristote.

À l'époque de Platon et d'Aristote, différentes théories expliquant la vision étaient proposées. L'une d'entre elles supposait qu'un flux visuel provenait de l'œil. Selon cette théorie, couramment associée à l'école pythagoricienne, l'œil « contiendrait » du feu qui jaillirait lorsque l'œil est touché. Autrement dit, la lumière partirait de l'œil et y reviendrait. Plus particulièrement, l'œil émettrait des *quid*

allant « reconnaître » les objets et reviendraient ensuite vers nous pour nous informer de ce qui aurait été détecté. Platon développera largement cette idée du feu intraoculaire. Pour lui, la vision résultait de la rencontre entre l'émanation de l'objet et le « corps simple et homogène » qui serait formé par la fusion de l'émanation oculaire et de la lumière du jour. À travers cette rencontre, les « mouvements », produits par des particules de différentes tailles (que Platon associe aux différentes couleurs), sont transmis à l'esprit et produisent des sensations (la vue et la pensée). L'argument de base repose sur le fait qu'on peut voir un objet lorsqu'on « pose » le regard sur lui, autrement dit que c'est l'action de regarder qui fait voir. Pour les défenseurs de cette théorie dite « extramissionniste », cela semble évident : les yeux fermés, on ne voit rien, puisque les rayons (ou *quid*) ne peuvent plus sortir.

De son côté, Aristote considère que l'œil possède une double nature. Il est d'abord un corps physique qui accueille les images sur la surface sensible que constitue la rétine. Il est aussi une entité sensible, qui transforme les effets colorés en impressions sensorielles et visuelles de la même façon que la cire prend l'empreinte des objets. La théorie d'Aristote est donc « intromissionniste », puisqu'il conçoit l'œil comme « récepteur » et non comme « émetteur ». Pour combattre la théorie rivale, soit que l'œil émettrait un quid, Aristote soutient comme Démocrite que nous devrions voir la nuit. Cette théorie de l'intromission posera les conditions théoriques de la *camera obscura*, bien



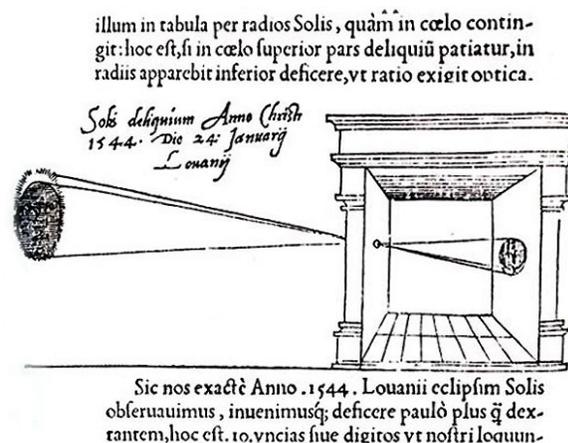
1.3 : Image du soleil au travers du feuillage, dans *Cours de physique purement expérimentale* de A. Ganot, 1859.

qu'il faudra attendre le Ve siècle pour en voir apparaître une utilisation concrète. Les premières *camera obscura* (chambres noires) construites à l'échelle humaine seraient généralement associées aux astronomes arabes. Cela n'empêchera toutefois pas Aristote de noter des faits optiques d'importance, comme la propagation de la lumière en ligne droite, ce qui sera plus tard démontré par Alhazen. Il en fait d'ailleurs une allusion au milieu de ses trente-huit livres des Problèmes : « Tout objet placé en face d'une boîte entièrement fermée et percée d'un trou se reflète, renversé sur le fond de cette boîte. » Aristote aurait ainsi décrit « le reflet » (l'image) du Soleil formé par les interstices entre les feuillages (voir image ci-contre), qu'il explique par la propagation rectiligne de la lumière.

## Les théories d'Alhazen et l'optique au Moyen Âge

Alhazen, ou Ibn al-Haytham (v. 965-1041), est souvent considéré comme le père de l'optique moderne. Avec ses recherches en optique, en mathématiques, en physique, en astronomie et en médecine, il développa une méthode scientifique qui le conduira à faire des expériences sur la propagation de la lumière et sur les couleurs. On devrait à Alhazen le premier usage raisonné de la *camera obscura*. En effet, il serait le premier à avoir fait l'observation d'une éclipse solaire dans une chambre noire munie d'une petite ouverture (voir image ci-contre). La référence la plus explicite dans son œuvre à la *camera obscura* se trouverait dans son Traité consacré à l'éclipse.

Alhazen fera de nombreuses observations pour tenter de comprendre pourquoi le Soleil, vu à travers un sténopé en forme de petit triangle, apparaît triangulaire si l'écran se trouve près du trou, alors qu'il se révèle rond en éloignant le trou de l'écran. À cette question, il répond en termes de cônes de lumière émanant de façon indépendante de chaque point du corps lumineux. Il nota que le disque solaire qui se forme à une certaine distance de l'ouverture est en fait formé de triangles de lumière superposés (voir la démonstration A : Surprenants sténopés). La théorie d'Alhazen sur la propagation de la

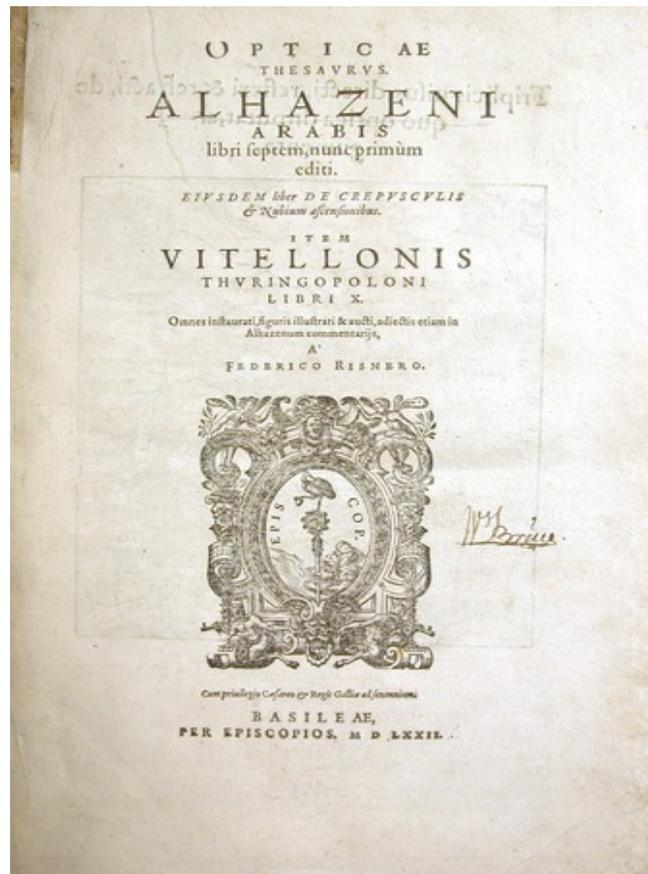


1.4 : Éclipse solaire vue à travers une camera obscura, 1545.

lumière est donc celle du point par point, c'est-à-dire que chaque point à la surface d'un objet lumineux serait une source indépendante de rayonnement se propageant aussi loin que la transparence du médium le permet. Il en résulte une sphère de propagation continue dans laquelle chaque rayon correspond à une trajectoire rectiligne, au cours de laquelle la *lumière* est transmise. Selon cette théorie punctiforme, l'œil serait bombardé simultanément de rayons provenant de toutes les directions. Mais cette idée représente un problème en soi : comment l'œil arrive-t-il à tirer un sens cohérent d'impressions visuelles si désordonnées et confuses? Le savant tentera d'apporter une réponse à ce problème en suggérant que le cristallin assumerait un rôle de filtre... Une idée intéressante qui ne résistera toutefois pas aux épreuves du temps.

Par ailleurs, sa description de la *camera obscura* lui aura permis de balayer la théorie « extramissionniste » prévalant toujours à l'époque, qui accordait un sens tactile à l'œil comme s'il s'agissait d'un bâton aveugle. Le meilleur argument appuyant la théorie « intromissionniste » des philosophes de la nature aurait été pour Alhazen celui-ci : lorsqu'on regarde longuement un point très lumineux comme le Soleil, celui-ci « brûle » les yeux. La lumière ne peut donc que partir de l'objet extérieur et pénétrer dans l'œil pour le blesser. Une expérience simple de « persistance rétinienne » (terme anachronique, puisque le rôle de la rétine n'est pas encore connu) permet de s'en rendre compte. Il suffit de fixer assez longtemps l'image d'un ciel lumineux à travers une lucarne puis de se tourner vers la partie obscure de la pièce : l'image persistera. Cela démontre que nous voyons la lumière, donc que nous ne l'émettons pas. Comme quoi, une simple observation suffit parfois à réfuter des siècles de théories!

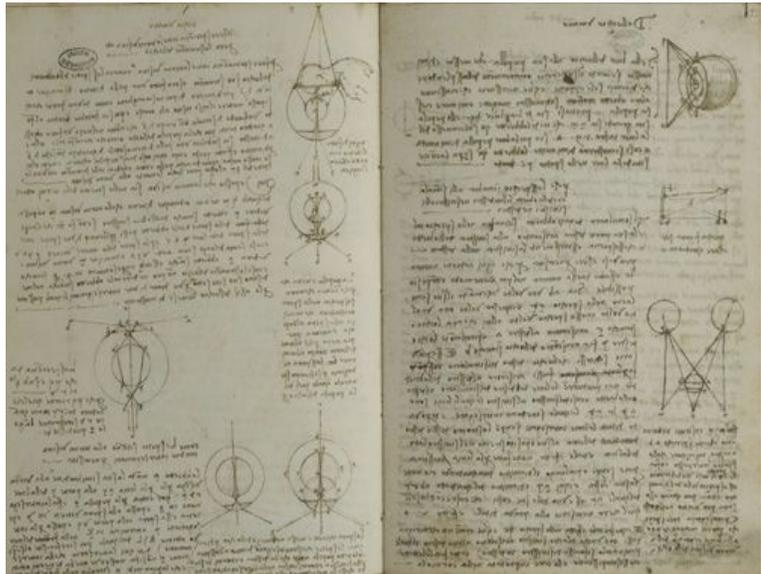
Alhazen jettera ainsi les bases physiques de la vision en termes de rayons lumineux colorés, il décrira la structure de l'œil et il soulignera la variabilité des conditions dans lesquelles se forme la vision. La méthode qu'il utilisa sera inductive et très largement empirique : on y trouve peu d'hypothèses et de déductions, sauf celles qui concernent la géométrie de l'œil, un peu idéalisée, puisque selon lui le cristallin serait censé sélectionner les rayons. En somme, la précision et la clairvoyance de ses analyses influenceront aussi bien de Vinci, Della Porta, Huygens que Kepler. Il devint un incontournable pour les scientifiques de la Renaissance qui s'intéresseront à la *camera obscura* et plus largement à l'optique géométrique.



1.5 : Le traité d'optique écrit par Alhazen qui a servi d'inspiration à de nombreux scientifiques de la Renaissance.

## Léonard de Vinci, Kepler et l'optique à la Renaissance

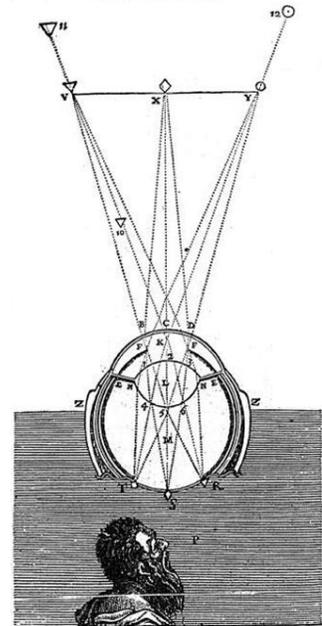
Léonard de Vinci (1452-1519) est parfois décrit comme le symbole de l'homme de la Renaissance. Sa contribution fut significative dans le domaine de l'optique, notamment sur la compréhension de l'œil et de la vision. Il étudia l'œil jusque dans ses troubles de réfraction, en insistant sur la presbytie et l'utilisation de lunettes. De Vinci serait d'ailleurs le premier (v. 1490) à avoir construit un œil artificiel en verre et en métal inspiré de la *camera obscura*. Si l'anatomie de l'œil qu'il propose reste assez primitive, le fait d'assimiler l'œil au système optique qu'est la chambre noire représente en soi une innovation technique importante.



1.6 : Étude de l'œil par Léonard de Vinci, v.1508.

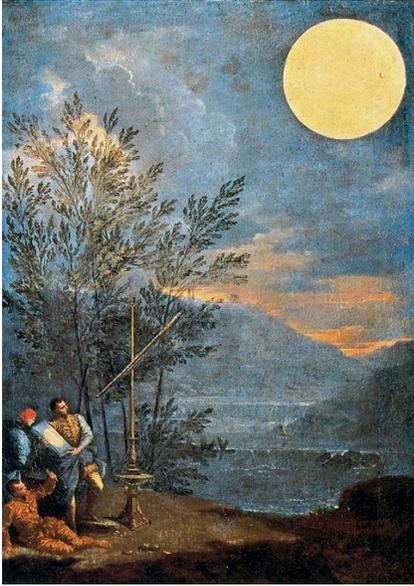
Comme ses prédécesseurs, de Vinci se butera au problème du renversement de l'image. Même si les documents d'archives laissent penser qu'il connaissait la raison de ce renversement, soit l'intersection des rayons, cette question restera irrésolue. Il refusera l'idée que l'image puisse être renversée sur la rétine, peut-être par respect pour l'absolutisme des lois physiques, et ne parviendra pas à imaginer que le cerveau puisse redresser les images. Or, cela semble surprenant sachant qu'il écrivait « à l'envers », soit de la droite vers la gauche, et ce, probablement sans même utiliser de miroir pour se relire!

Il faudra attendre jusqu'en 1604 pour que Johannes Kepler, impose l'idée que l'image se forme renversée sur la rétine et non sur le centre de la sphère cristalline ou encore sur la pupille, comme l'avait imaginé de Vinci. Kepler était troublé par le problème du renversement de l'image. Comme de Vinci, il imagina la possibilité d'une seconde intersection dans l'œil. Toutefois, il nota que même avec une image « droite » dans l'œil, le problème reste entier : cela aurait le même effet qu'une image de miroir. Pour Kepler, il n'y avait qu'une seule solution à ce problème. L'image devait être à la fois inversée et renversée sur la rétine avant d'être redressée par l' » âme<sup>4</sup>. Kepler n'illustrera pas (c'est dommage) sa théorie rétinienne, qui sera pourtant fondatrice de l'optique physiologique moderne. Cela dit, la figure de *La Dioptrique* de Descartes (ci-contre), publiée trente ans après, rend bien compte de cette théorie du champ visuel.



1.7 : La dioptrique de Descartes, 1637.

<sup>4</sup> Notons qu'à cette époque, le rôle du cerveau n'était pas compris comme il peut l'être aujourd'hui.



1.8 : Observations astronomiques du Soleil, Donato Creti, 1711.

La théorie rétinienne de Kepler, largement inspirée de sa pratique de la *camera obscura*, a donc été marquante pour l'avancement des connaissances en optique de son époque. On pourrait d'ailleurs supposer qu'ayant passé des heures innombrables à observer des images renversées dans une *camera obscura*, Kepler ait « accepté » que notre rétine reçoive de la même façon les images à l'envers. Pour la première fois dans l'histoire, il est question d'une « image optique » dans l'œil, formée par la convergence de rayons lumineux sur une surface. L'existence de cette image devient indépendante de l'observateur. La force de la découverte de Kepler réside donc dans le fait qu'il réussit à séparer le problème physique – la formation de l'image rétinienne – des problèmes psychologiques de la perception et de la sensation.

Bien que Kepler ait révolutionné notre conception de la vision, on se rappelle généralement de lui comme du célèbre astronome ayant découvert que les planètes ne tournent pas autour du Soleil en suivant des trajectoires circulaires parfaites, mais bien des trajectoires elliptiques. Pendant ses études en

astronomie, Kepler s'initiera au système ptoléméen et copernicien avant de devenir l'assistant de Tycho Brahé à la Cour de Prague. Il utilisera toutes sortes d'appareils, dont la *camera obscura* à laquelle il ajouta des lentilles, ainsi qu'un dispositif lui permettant de protéger ses yeux du rayonnement solaire. Un de ces dispositifs apparaît dans un tableau de Donato Creti (ci-contre), où Kepler serait représenté en train d'observer les taches solaires en projetant sur un écran l'image du Soleil capturée au travers d'un long tube dont l'extrémité est percée d'un orifice. Bref, il semble que ce serait grâce à la *camera obscura* et à la lunette astronomique, entre autres, que Kepler parvint à faire ses découvertes majeures. Elles auront des répercussions importantes sur tout un pan de la culture populaire et intellectuelle de l'époque.

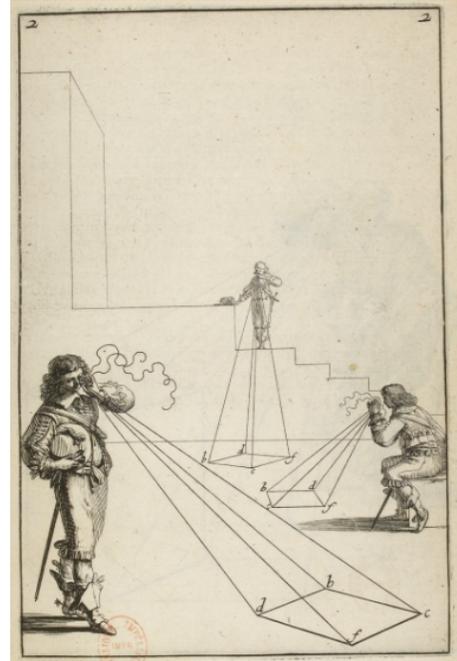
## L'invention de la perspective et l'usage « artistique » de la *camera obscura*

Perçue comme emblématique de la Renaissance, l'invention de la *perspectiva artificialis* au XV<sup>e</sup> siècle par Brunelleschi et Alberti va également contribuer à révolutionner notre vision du monde. L'invention de la perspective, qui serait étroitement liée à la *camera obscura*, marquera une rupture radicale avec le Moyen Âge et concernera tous les domaines de la pensée, principalement la peinture et l'architecture, mais aussi la géométrie et la philosophie. Jusqu'alors, les artistes du Moyen Âge tentaient de donner un sentiment de profondeur à leurs œuvres par d'autres méthodes, par exemple en utilisant des fonds d'or opaques pour représenter l'espace « divin » (voir image ci-contre).



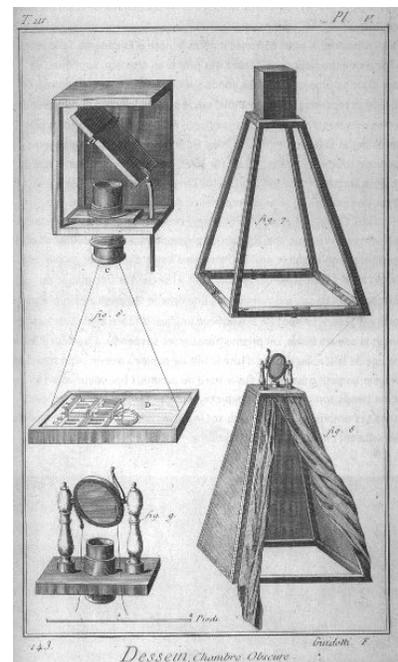
1.9 : La Vierge et l'Enfant entre saint Nicolas, sainte Catherine d'Alexandrie et un donateur, Gentile da Fabriano, v. 1395-1400.

La peinture sera décrite par Alberti comme une section du cône visuel, ou une « pyramide visuelle ». Entre sa pointe et sa base, les « rayons visuels » tissent une pyramide (sa pointe étant dans l'œil, sa base étant ce que l'on voit). Il en est de même pour l'image de la *camera obscura*, qui intercepte les rayons visuels sur le plan de son écran et forme ainsi une peinture « naturelle ». Alberti établit une quasi-égalité entre peinture et réel. Il parla des « miracles de la peinture », probablement associés à l'image de la *camera obscura* qu'Alberti utilisait comme instrument de « démonstration » de la perspective. Brunelleschi fit aussi des démonstrations avec la *camera obscura* dans une démarche plus expérimentale. Ainsi, à partir du XV<sup>e</sup> siècle, la chambre noire se met à prendre une importance de premier plan pour définir les rapports entre l'observateur et le monde. Au bout de quelques décennies, ce n'est plus un instrument ou une option visuelle parmi tant d'autres, mais le lieu obligé pour qui veut comprendre la vision ou la représenter. Autrement dit, la perspective et la *camera obscura* rompent avec la théologie médiévale et ouvrent toutes deux sur un espace, non pas sacré, mais objectivable, physiquement et mathématiquement.



1.10 : Pyramide Visuelle. Manière universelle de M. Desargues de pratiquer la perspective, Abraham Brosse. 1648.

Si les Italiens sont les « inventeurs » de la perspective dans leurs peintures, il est intéressant de noter que la *camera obscura* deviendra l'appareil de la peinture hollandaise. La « peinture » de la *camera obscura* aura la particularité d'être beaucoup plus mouvante et souple que celle des « perspectivistes ». Au XX<sup>e</sup> siècle, avec l'avènement de la photographie, plusieurs ont comparé la peinture de Vermeer à une image photographique. L'usage de la *camera obscura* chez Vermeer n'est pas totalement prouvé, mais certains effets de sa peinture permettent d'émettre de sérieuses hypothèses quant à son utilisation. La majorité des historiens s'accordent d'ailleurs pour dire que Vermeer a bien utilisé une *camera obscura*. La liberté avec laquelle Vermeer modifiait les effets optiques de ses sujets porte cependant à croire qu'il ne calquait pas directement l'image de la *camera obscura*. D'autres instruments d'optique, comme la *camera lucida* (voir la démonstration à ce sujet), seront plus tard utilisés par les artistes désirant représenter le plus réalistement possible les sujets de leurs œuvres.

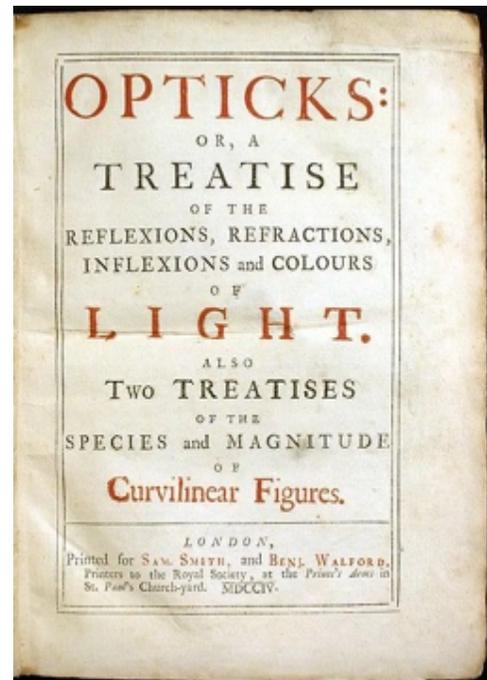


1.11 : Camera obscura pour dessin, Encyclopédie de Diderot et d'Alembert, 1751.

## L'approche expérimentale de Newton et son usage de la chambre noire

Fortement inspiré des idées de la Renaissance, Newton créera une véritable révolution scientifique, notamment par la publication de son *Opticks* (ci-contre) en 1704. On retrouve dans cet ouvrage majeur l'expérience récurrente de la *camera obscura*. Elle ouvre d'ailleurs son traité, pour dire son importance! « Un trait de lumière solaire entre dans une chambre fort obscure par un trou oblong ».

En s'intéressant à l'optique, la lumière et les couleurs, Newton fait de la chambre noire le lieu privilégié de sa méthode inductive. La présentation de son approche scientifique, avec des protocoles rigoureux, nous rappelle les expériences d'Alhazen. Toutefois, les expériences de Newton sont plus sophistiquées qu'au Moyen Âge, car elles font intervenir prisme, télescope, deux ouvertures ou plus, et prennent en compte la diffraction. Parmi ses expériences fondamentales, mentionnons celle sur la composition de la lumière blanche.



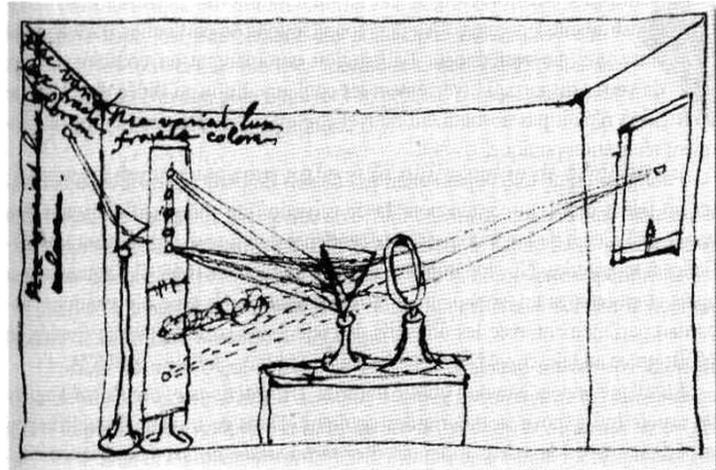
1.12 : *Opticks*, 1704.

Depuis l'Antiquité, le blanc était associé à la pureté, au Bien, à Dieu, et le noir, aux ténèbres et au mal. Même à la Renaissance, la question de la couleur demeure très intrigante. Il faudra attendre Newton pour que cette conception des couleurs progresse vraiment. Certains avaient déjà remarqué que la lumière qui traverse un prisme se déploie en arc-en-ciel. Pour expliquer ce phénomène, la conception commune de l'époque était que la lumière s'altère, se dégrade et s'affaiblit en traversant un milieu transparent comme le verre. On pensait que plus l'épaisseur du verre traversé était grande, plus la lumière perdait en clarté et en éclat. Le violet, par exemple, est la couleur la plus déviée : on la disait moins éclatante que le rouge. Du moins, c'est ce qu'on croyait jusqu'à ce que Newton fasse ses expériences en chambre noire ; une période de la vie de Newton qui est d'ailleurs assez surprenante.

En 1665, la peste éclate en Europe. L'Université de Cambridge décide alors de renvoyer chez eux les professeurs et les étudiants, dont le jeune Isaac Newton alors âgé de 23 ans. Celui-ci profite donc de ses vacances « forcées » pour s'enfermer dans sa chambre dont il obstrua presque complètement les fenêtres, mais où la lumière pouvait pénétrer que par une petite ouverture pratiquée dans un des volets. Newton va ainsi réaliser dans sa « chambre noire », avec du matériel très simple, une série d'expériences sur la réfraction et la dispersion de la lumière qui bouleverseront les idées de l'époque sur la lumière qui couraient depuis... 1500 ans!

Parmi ces expériences, Newton décide d'isoler à l'aide d'une fente un rayon bleu issu d'un premier prisme et le dirige vers un second afin de vérifier ce qui arrive à ce faisceau de lumière d'une seule couleur. Selon la théorie aristotélicienne, la couleur bleue aurait dû « s'affaiblir » au cours du passage dans le deuxième prisme, pour se rapprocher du violet ou du noir. À son grand étonnement, ce n'est pas ce qu'il observa : la couleur bleue reste la même. Il y avait forcément quelque chose qui n'allait pas dans la théorie sur la lumière. Il poursuivit donc ses expériences et fit passer à travers un second prisme, inversé par rapport au premier, tous les rayons dispersés. En recombinaison de la lumière prétendument dégradée, il se retrouva avec un faisceau de lumière blanche. Le faisceau avait retrouvé sa pureté initiale. Autrement dit, Newton avait mélangé de l'impur pour obtenir de la pureté...

Ainsi donc, même si ses travaux apportent des éclaircissements majeurs sur le comportement et la composition de la lumière, Newton attendra plus de six ans avant d'en divulguer les résultats dans sa correspondance avec Oldenburg (1672) et il ne publiera ses découvertes qu'en 1704, dans son fameux traité *Opticks*. À 23 ans, Newton n'est pas encore le grand NEWTON, et il était risqué pour lui de contester les théories sur les couleurs ayant cours depuis des siècles...



1.13 : Dessin réalisé par Newton illustrant la manière dont il a converti sa chambre en camera obscura, où un trou laisse passer un rayon de lumière du soleil.

## 1.2 Références utiles

### SUR L'HISTOIRE DE LA *CAMERA OBSCURA*

**Bubb, M. (2010).** *La camera obscura : philosophie d'un appareil.* Paris : Éditions L'Harmattan.

**Bessy, M. (1990).** *Le mystère de la chambre noire : histoire de la projection animée.* Paris : Éditions Pygmalion.

**Changeux, J.-P. (2005).** *La lumière au Siècle des lumières & aujourd'hui : art et science.* Paris : Éditions Odile Jacob.

**Crary, J. (1994).** *Art de l'observateur : vision et modernité au XIX<sup>e</sup> siècle.* Traduit par Frédéric Maurin. Éditions J. Chambon.

**De La Souchère, M.-C. (2010).** Quand la vue change de sens. *La Recherche*, (443), 108. Consulté en ligne [<http://www.larecherche.fr/idees/histoire-science/quand-vue-change-sens-01-07-2010-75706>].

### SUR LES IDÉES DE PHYSIQUE

**Viennot, L. (2002).** *Enseigner la physique.* Bruxelles : Éditions de Boeck.

**Paul Kopff. (2012).** Le site français de la photographie haute-résolution, Galerie-photo. Consulté en ligne [<http://www.galerie-photo.com/stenope-cercle-image-theorie.html>]

**Service camera pro.** Consulté en ligne [<http://www.servicecamerapro.com/f-lens.html>]

### SUR LA PHYSIOLOGIE DE L'ŒIL

**Le Cerveau à tous les niveaux!** Consulté en ligne [[http://lecerveau.mcgill.ca/flash/d/d\\_0\\_2/d\\_02\\_cr/d\\_02\\_cr\\_vis/d\\_02\\_cr\\_vis.html](http://lecerveau.mcgill.ca/flash/d/d_0_2/d_02_cr/d_02_cr_vis/d_02_cr_vis.html)].

## 1.3 Description et utilisation des démonstrations

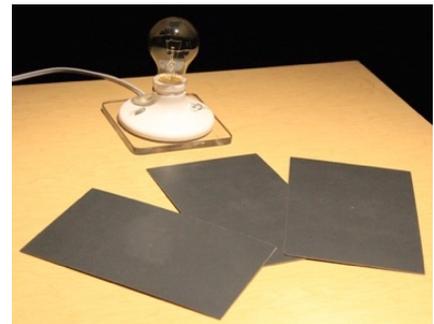
### Démonstration : Surprenants sténopés

#### Objectif

Cette démonstration constitue un excellent déclencheur en faisant appel à un phénomène contre-intuitif. Elle permet de situer l'hypothèse fondamentale de l'optique géométrique, soit que la lumière voyage en ligne droite. Elle illustre également le fait que la lumière provient des objets lumineux et non de l'œil, comme le supposaient certains penseurs de l'Antiquité. Finalement, cette démonstration peut servir à déterminer certaines des caractéristiques d'une image qui est « projetée » lorsque la lumière émise par une source lumineuse passe à travers un sténopé.

#### Matériel

- Deux cartons perforés d'un trou au centre de chacun : l'un avec un petit trou circulaire et l'autre avec une ouverture triangulaire de quelques millimètres.
- Une source lumineuse produisant de la lumière non diffuse. On peut utiliser par exemple une lampe de poche à DEL ou une ampoule incandescente transparente. Une ampoule incandescente blanche ne fonctionnera pas pour cette démonstration.

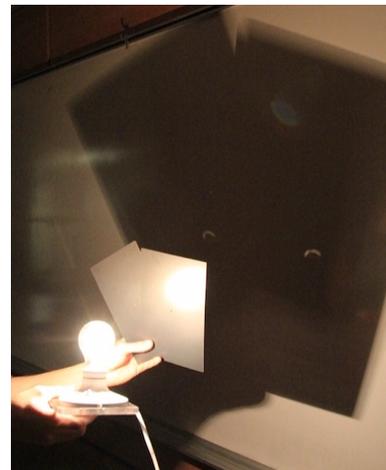


1.14 : CDSP, 2015.

#### Déroulement possible

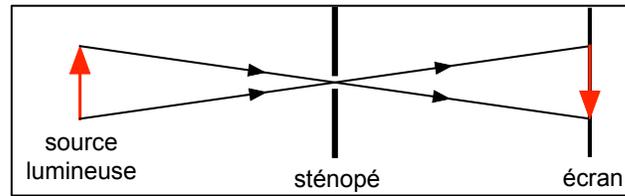
Pour réaliser cette démonstration, il est préférable de se trouver dans un environnement plutôt sombre. La démonstration consiste essentiellement à utiliser un carton troué comme sténopé sur lequel on projette la lumière produite par une source comme une ampoule incandescente ou une lampe de poche. La lumière traversant le sténopé est projetée sur un écran où l'on observe une image de la source de lumière (les DEL de la lampe de poche utilisée ou le filament de l'ampoule).

Pour cette démonstration, on montre d'abord aux étudiants les cartons qui présentent chacun, en leur centre, un trou de formes différentes. On demande ensuite à la classe de se prononcer sur ce qui pourra être observé sur un écran en plaçant les cartons entre celui-ci et la source de lumière. Intuitivement, plusieurs participants devraient penser qu'on observera des formes lumineuses correspondant aux formes des trous (petit cercle et petit triangle). Finalement, on projette sur un écran le résultat du passage de la lumière à travers chacun des trous. Dans tous les cas une image « projetée » (qui n'est pas une image optique dans le sens strict du terme) de la source de lumière apparaît. D'un sténopé à l'autre, seule l'intensité lumineuse devrait varier en fonction de la taille du trou (un sténopé plus petit laisse passer moins de lumière).



1.15 : CDSP, 2015.

On peut alors expliquer le phénomène observé en représentant la lumière émise par la source à l'aide de rayons voyageant en ligne droite. Un schéma semblable à celui présenté ci-dessous peut être utilisé pour appuyer les explications.



1.16 : CDSP, 2015.

## Démonstration : La boîte à projection (avec sténopés)

### Objectif

Cette démonstration est complémentaire à la précédente. Elle permet de déterminer certaines des caractéristiques d'une image qui est « projetée » à travers différents types de sténopés. Elle pourrait permettre aux étudiants de déduire une relation proportionnelle entre la taille de l'image projetée et la distance sténopé-écran ou sténopé-objet.

### Matériel

Ce montage est fait d'une longue boîte dans laquelle est placée une lampe, sur laquelle a été dessiné un symbole caractéristique (dans notre cas, le logo de Batman). La lampe pointe vers la face de la boîte percée de plusieurs sténopés. Chaque trou est muni d'un rabat numéroté pour les masquer. L'autre extrémité de la boîte est ouverte. Un écran (ou un mur) blanc sera nécessaire pour observer l'image projetée.

Les sténopés :

- 1 petit sténopé (1)
- 1 moyen sténopé (2)
- 1 grand sténopé (3)
- 1 paire de sténopés (4)



1.17 : CDSP, 2015.



1.18 : CDSP, 2015.

### Déroulement possible

Cette démonstration doit se dérouler dans un environnement sombre. Faire une première projection du logo de Batman sur l'écran en utilisant le sténopé 1. Cela permet de constater que l'image projetée est inversée. Montrer ensuite cette même image avec les sténopés 2 et 3, pour faire constater les effets de la taille du sténopé sur la résolution de l'image. Faire ensuite varier la distance entre l'écran et le sténopé, et entre l'objet lumineux et le sténopé. Finalement, il est possible de voir que deux sténopés qui sont près l'un de l'autre vont projeter deux images superposées.

## Démonstration : La chambre noire

### Objectif

L'expérience en chambre noire est immersive et permet généralement de susciter chez les étudiants une vive émotion. D'une certaine manière, elle permet de revivre ce que Alhazen, Kepler et Newton ont pu eux-mêmes ressentir lorsqu'ils ont vu apparaître une image inversée sur un écran, à l'intérieur d'une chambre complètement obscure. En ce sens, la chambre noire est un montage d'une apparente simplicité qui a pourtant permis des observations majeures en optique et en astronomie, et ce, à travers les siècles.

L'objectif de la démonstration est aussi d'observer et de différencier deux phénomènes qui permettent de générer une image dans la chambre noire : l'image projetée formée par le passage de la lumière dans un sténopé et l'image optique (réelle) formée par le passage de la lumière dans une lentille convergente. Les étudiants pourront alors réaliser que l'image observée à l'intérieur de la chambre noire est inversée, ce qui est une conséquence de la propagation rectiligne de la lumière.

Plus particulièrement, le dispositif permet de comprendre que :

- le diamètre du sténopé influence la netteté de l'image et son intensité lumineuse;
- la dimension de l'image dépend de la distance objet-sténopé ou sténopé-écran;
- tant pour un objet rapproché que pour une scène lointaine, l'image projetée par un sténopé demeurera bien définie, car il n'y a pas de plan objet (comme c'est le cas avec une lentille). Lorsqu'on déplace l'écran, l'image reste nette, mais elle change de grandeur. Parallèlement, plus l'écran sera proche du sténopé, plus l'image paraîtra intense.
- l'image (optique) obtenue avec une lentille convergente est réelle et inversée;
- l'image réelle se forme à un endroit précis, en fonction de la longueur focale de la lentille utilisée et de la distance de l'objet. Si l'écran est déplacé, une image qui était nette devient alors floue.



1.19 : CDSP, 2015.



1.20 : CDSP, 2015.



1.21 : CDSP, 2015.

## Matériel<sup>5</sup>

- Structure de la chambre noire fabriquée avec des tuyaux de PVC.
- Housse en tissu noir.
- Écran blanc.
- Roulette constituée de deux sténopés de tailles différentes et de deux lentilles de longueur focale différentes.

## Déroulement possible

Pour cette expérience, il est préférable de choisir une scène très éclairée. Idéalement, l'ouverture de la chambre noire, sur laquelle on installera la roulette de sténopés-lentilles, sera orientée dans la direction d'une fenêtre donnant sur l'extérieur. Une fois la chambre noire en place, mettre une chaise à l'intérieur et demander à un ou une étudiante de s'y asseoir. Placer la roulette de telle sorte que le plus petit sténopé soit vis-à-vis l'entrée de lumière. Laisser quelques minutes au volontaire afin que ses yeux s'adaptent à l'obscurité. Si la scène est très éclairée, il devrait voir une image se former (elle sera de faible intensité). Demander à l'étudiant de décrire les objets de la scène afin de lui faire remarquer que l'image est inversée.

En mettant l'accent sur la beauté du phénomène observé, l'enseignant pourrait ensuite :

- demander à l'étudiant de décrire les différences entre ce qu'il distingue sur l'écran lorsque l'on change le diamètre du sténopé (en tournant la roulette);
- demander à l'étudiant de changer la position de l'écran, qui est installé sur un support mobile, et de décrire l'effet sur l'image;
- mettre la première lentille ( $L_1$ ) en place et demander à l'étudiant de décrire l'image et ce qui la distingue de celle formée par une lentille ( $L_2$ ) de longueur focale différente (en tournant la roulette);
- demander à l'étudiant de changer la position de l'écran, qui est installé sur un support mobile, et de décrire l'effet sur les différents éléments de l'image (objets plus ou moins rapprochés).

---

<sup>5</sup> Des informations complémentaires utiles à la fabrication ainsi que les schémas détaillés de la chambre noire sont fournis en annexe.

## Démonstration : La boîte-objectif

### Objectif

Cette démonstration permet aux étudiants d'observer l'image réelle produite par une lentille convergente. Ce montage simple peut être mis en relation avec un modèle de l'œil pour parler de la formation d'une image « optique » réelle, comme celle qui se forme sur la rétine de l'œil en passant par une lentille convergente (en référence au cristallin). On peut aussi l'utiliser pour illustrer le fonctionnement d'un appareil photo : l'objectif, l'obturateur, la lentille, l'écran CCD, etc. Les participants pourront prendre conscience de l'effet de la position de l'image et de la distance focale dans la définition de l'image optique obtenue avec une lentille.

### Matériel

Deux boîtes de carton rectangulaires à bases carrées (environ 20 cm) assez longues (environ 50 cm) pouvant glisser l'une dans l'autre et dont l'intérieur est peint en noir mat :

- *Boîte extérieure* : une extrémité ouverte, l'autre extrémité fermée, mais avec une ouverture au centre pour y coller une lentille convergente d'une puissance d'environ +6 dioptries (une lentille de loupe).
- *Boîte intérieure* : une extrémité ouverte, l'autre extrémité recouverte d'un écran semi-transparent (on peut utiliser un morceau de rideau de douche semi-transparent).



1.22 : CDSP, 2015.

### Déroulement possible

Insérer les boîtes l'une dans l'autre en les positionnant de telle sorte que les extrémités fermées soient dans la même direction. Cela reproduit en quelque sorte l'objectif d'un appareil photo avec une mise au point manuelle.

Inviter les étudiants à faire eux-mêmes l'essai d'ajuster la distance lentille-écran en couissant la boîte intérieure afin d'observer l'image réelle d'une scène formée sur l'écran semi-transparent à l'extrémité de la boîte intérieure. Proposer ensuite aux étudiants de masquer une partie de la lentille pour voir l'effet sur l'image. La luminosité de l'image sera plus faible, mais l'image sera tout de même complète. Ceci vient du fait que chaque partie de la lentille redirige des rayons provenant de chaque point-objet vers leur point-image.



1.23 : CDSP, 2015.

## Démonstration : Le projecteur à dessin

### Objectif

Ce montage simple permet de récupérer les anciens rétroprojecteurs, désormais peu utilisés. Cette démonstration sert à faire vivre au participant « une expérience artistique à la Vermeer » et de réaliser un croquis de l'image réelle qui se forme sur la feuille. En utilisant ce montage, l'étudiant pourra mieux saisir les caractéristiques d'une image optique réelle.

### Matériel

On utilise ici la « tête » optique d'un rétroprojecteur qu'on entoure avec un grand drap noir afin que la lumière ne puisse entrer sous le drap que par la lentille. Autrement dit, seule l'ouverture de la « tête » optique du projecteur doit être libre et permettre l'entrée de lumière. Une feuille blanche placée sur le rétroprojecteur servira d'écran ou de support à dessin (voir les photos ci-contre).

### Déroulement possible

On demande à une personne de s'installer sous le drap, avec un crayon en main. On lui explique qu'elle devra faire une mise au point sur l'objet qu'elle désire dessiner à l'aide du système faisant varier la hauteur de la lentille. Lorsque l'étudiant aperçoit l'image qui se forme sur la feuille de papier, on lui propose de calquer sur la feuille l'image qu'il observe. On peut ensuite présenter le résultat à l'audience. Si le papier utilisé est semi-transparent (un papier calque par exemple), il serait même possible d'utiliser le rétroprojecteur (dans sa fonction d'origine) pour projeter le dessin au reste de la classe.



*1.24 : CDSP, 2015.*



*1.25 : CDSP, 2015.*

## Démonstration : La *camera lucida*

### Objectif

La *camera lucida* (chambre claire) est un instrument d'optique qui fut utilisé en dessin. Elle est ici constituée d'un miroir semi-transparent fixé à une tige. Le miroir permet de former une image virtuelle qui crée l'illusion que la scène se trouvant devant soi l'est aussi sur la feuille de papier. Contrairement à une projection dans une *camera obscura* qui exploite la formation d'une image réelle, ici seul « l'artiste » placé dans la bonne position peut voir l'image. Cette « expérience artistique historique » (voir image ci-contre) permet ainsi de distinguer certaines différences entre des images virtuelles et réelles.



1.26 : Utilisation d'une camera lucida, 1807.

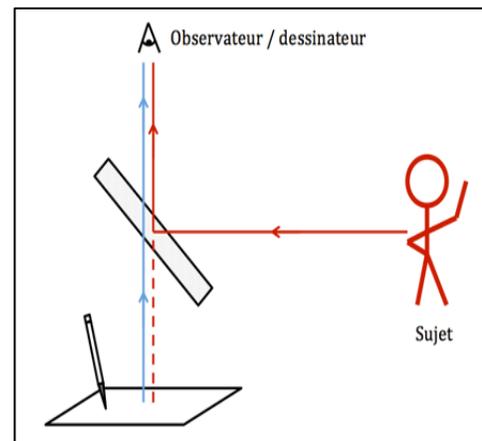
### Matériel

Cette version de *camera lucida* est faite d'une plaque de plexiglas sur laquelle a été appliqué un revêtement semi-réfléchissant. Une tige permet de fixer la plaque de plexiglas à un support universel. On doit ajuster l'angle de la plaque (autour de  $45^\circ$ ) afin de viser l'objet ou la personne que l'on cherche à dessiner (principe illustré ci-contre).

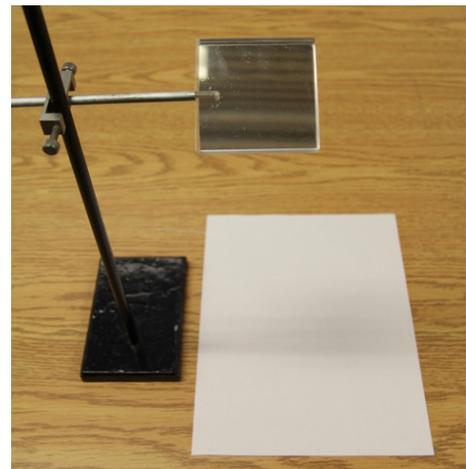
### Déroulement possible

On invite une personne à s'asseoir devant la *camera lucida*, puis à tracer sur une feuille l'image virtuelle qu'elle est la seule à voir. Une fois le dessin terminé, on peut montrer le résultat au reste de la classe.

Il est intéressant de questionner la personne sur les problèmes qu'elle a rencontrés en dessinant. On peut alors faire remarquer que dans le cas d'une image virtuelle, la position de l'observateur a un effet sur ce qu'il observera. Ce dernier aura l'impression qu'une image est formée sur sa feuille, mais il sera le seul à la voir. S'il se déplace, l'image se déplacera également (par rapport à la feuille à dessin qui reste en place).



1.27 : CDSP, 2015.



1.28 : CDSP, 2015.

## Démonstration : Le projecteur à téléphone (avec lentille)

### Objectif

Le projecteur à téléphone intelligent utilise une lentille pour transformer l'écran d'un téléphone ou d'une tablette en un système de projection à faible puissance. Cette démonstration est utile pour expliquer les bases de l'optique géométrique de façon amusante, concrète et surprenante. Comme le système produit une image réelle, inversée et agrandie ; on peut en profiter pour introduire les caractéristiques des images, la notion de grossissement, de distance focale et le tracé des rayons principaux pour la lentille convergente.



1.29 : CDSP, 2015.

### Matériel

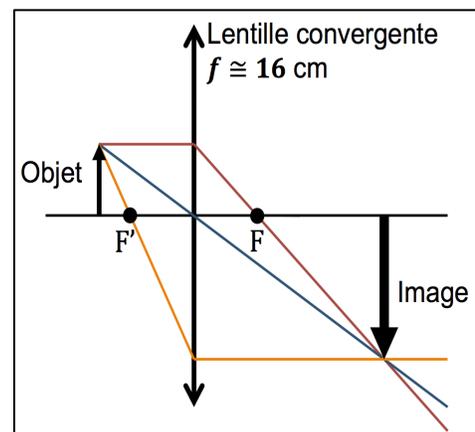
Le projecteur à téléphone est fait d'une boîte de carton équipée d'un support, servant à maintenir le téléphone à la verticale dans l'axe optique, et d'une lentille convergente, qui focalise la lumière de l'écran du téléphone. Plus précisément, il faut :

- une boîte de carton avec couvercle;
- une lentille convergente +6 dioptries;
- un support en carton;
- un adhésif (gommette bleue) pour maintenir le téléphone sur le support;
- de la colle chaude pour fixer la lentille.

### Déroulement possible

La démonstration doit se dérouler dans l'obscurité. La luminosité de l'écran de l'appareil doit être réglée au maximum (au besoin, désactiver la luminosité adaptative) pour obtenir une image assez brillante pour être visible.

Installer d'abord l'appareil sur le support situé dans la boîte du projecteur. Ajuster ensuite la distance entre l'appareil et la lentille afin que l'image soit nette sur l'écran blanc. Stabiliser le montage et démarrer enfin la projection d'une vidéo ou d'une image et observer les caractéristiques de l'image. Les principes de l'optique géométrique dans les lentilles peuvent alors être expliqués, comme cela est illustré ci-contre.



1.30 : CDSP, 2015.

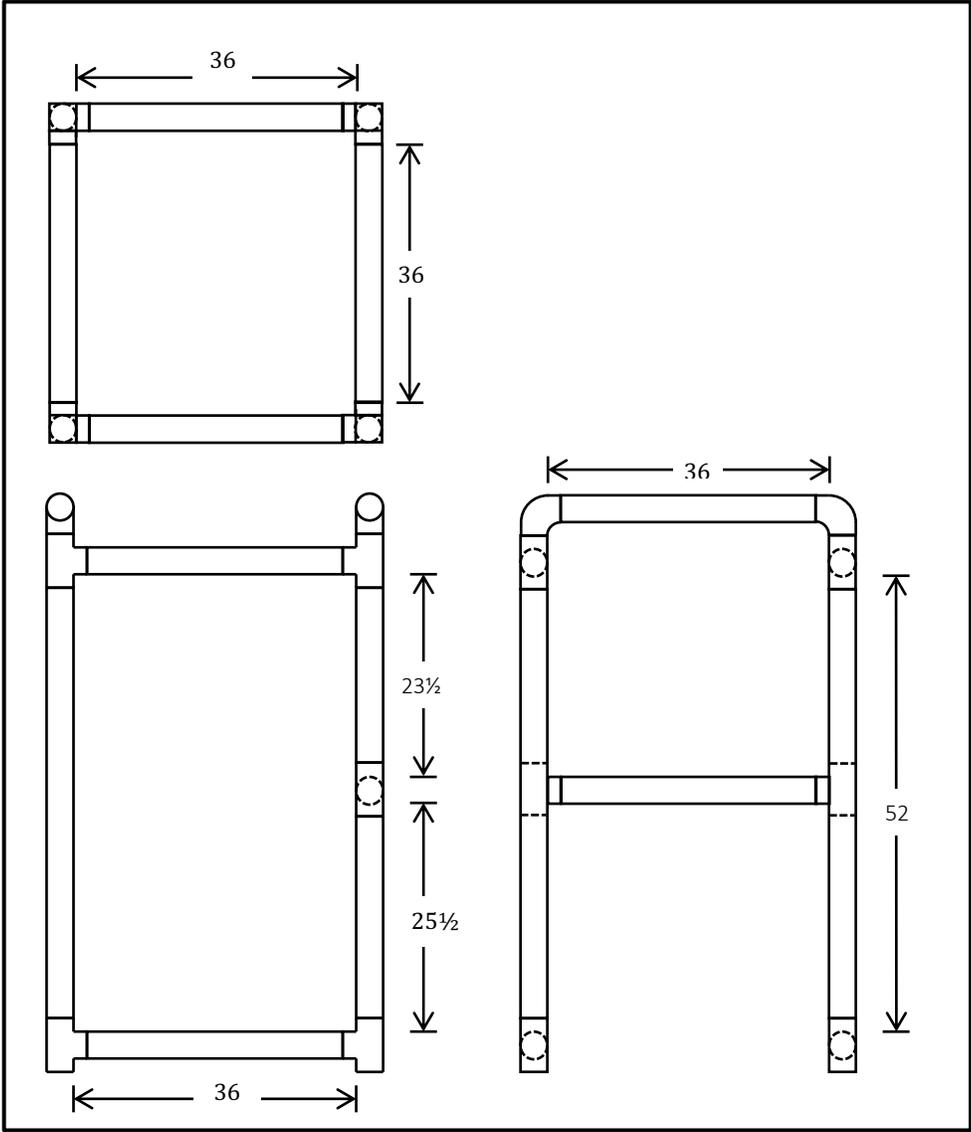
## 1.4 Annexe : Construction de la chambre noire

La *camera obscura* est essentiellement une tente portative en tissu opaque soutenue par une armature légère en PVC. Un trou dans le tissu permet à la lumière de traverser une sélection de lentilles ou d'orifices. Sa construction est relativement simple et peu coûteuse.

### A) Matériel

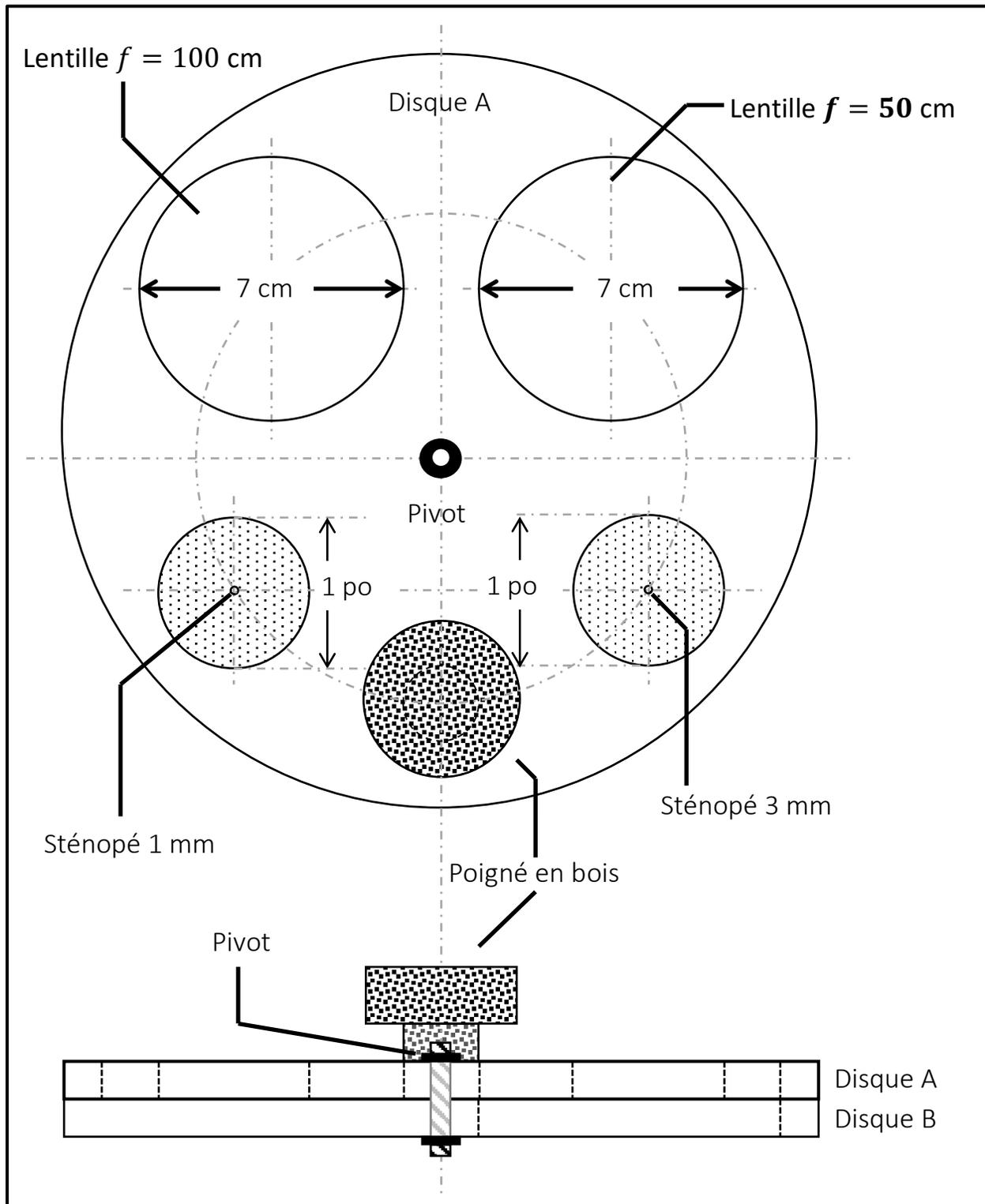
- Tuyaux de PVC diamètre 1½ po pour la structure
  - 2 × tuyaux PVC 52 po
  - 7 × tuyaux PVC 36 po
  - 2 × tuyaux PVC 23½ po
  - 2 × tuyaux PVC 25½ po
  - 4 × coudes PVC 90°  
  - 10 × jonctions « T » PVC 90°  
- Tissu noir « Black out » double épaisseur pour la tente
  - 1,5m × 195po pour le contour et la porte
  - 1,5m × 49po pour le toit
- Tissu blanc opaque de 1 m<sup>2</sup> pour l'écran
- 2 × règles en bois de 1 m
- Lentille  $f = 100$  cm
- Lentille  $f = 50$  cm
- Écran circulaire avec un trou de 1mm
- Écran circulaire avec un trou de 3mm
- Poigné en bois
- Deux disques en bois de diamètre 12po
- Un écrou et deux boulons pour le pivot

**B) Structure de la chambre noire en tuyaux de PVC**



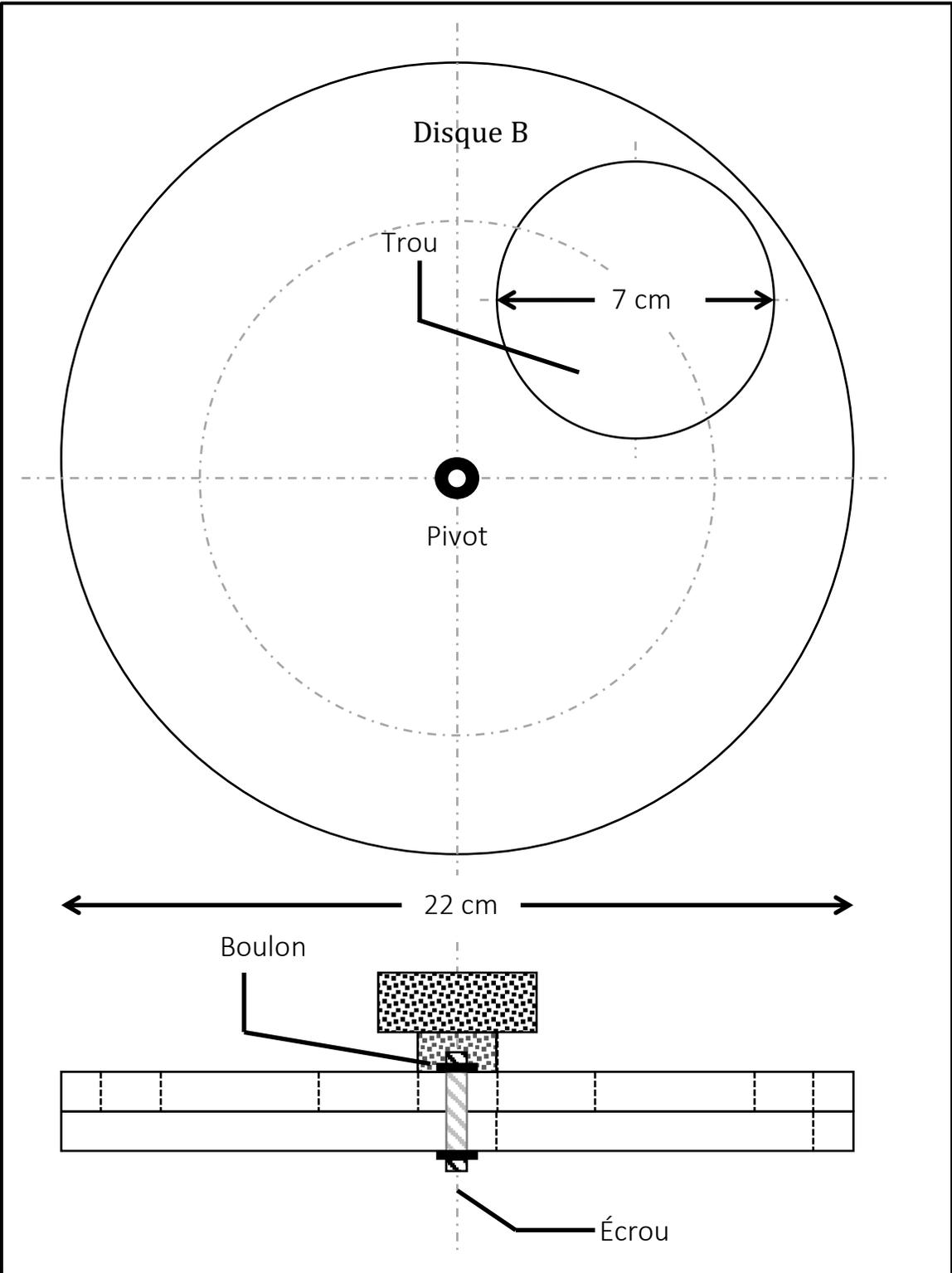
1.31 : CDSP, 2015

### C) Sélecteur d'ouverture – Face A



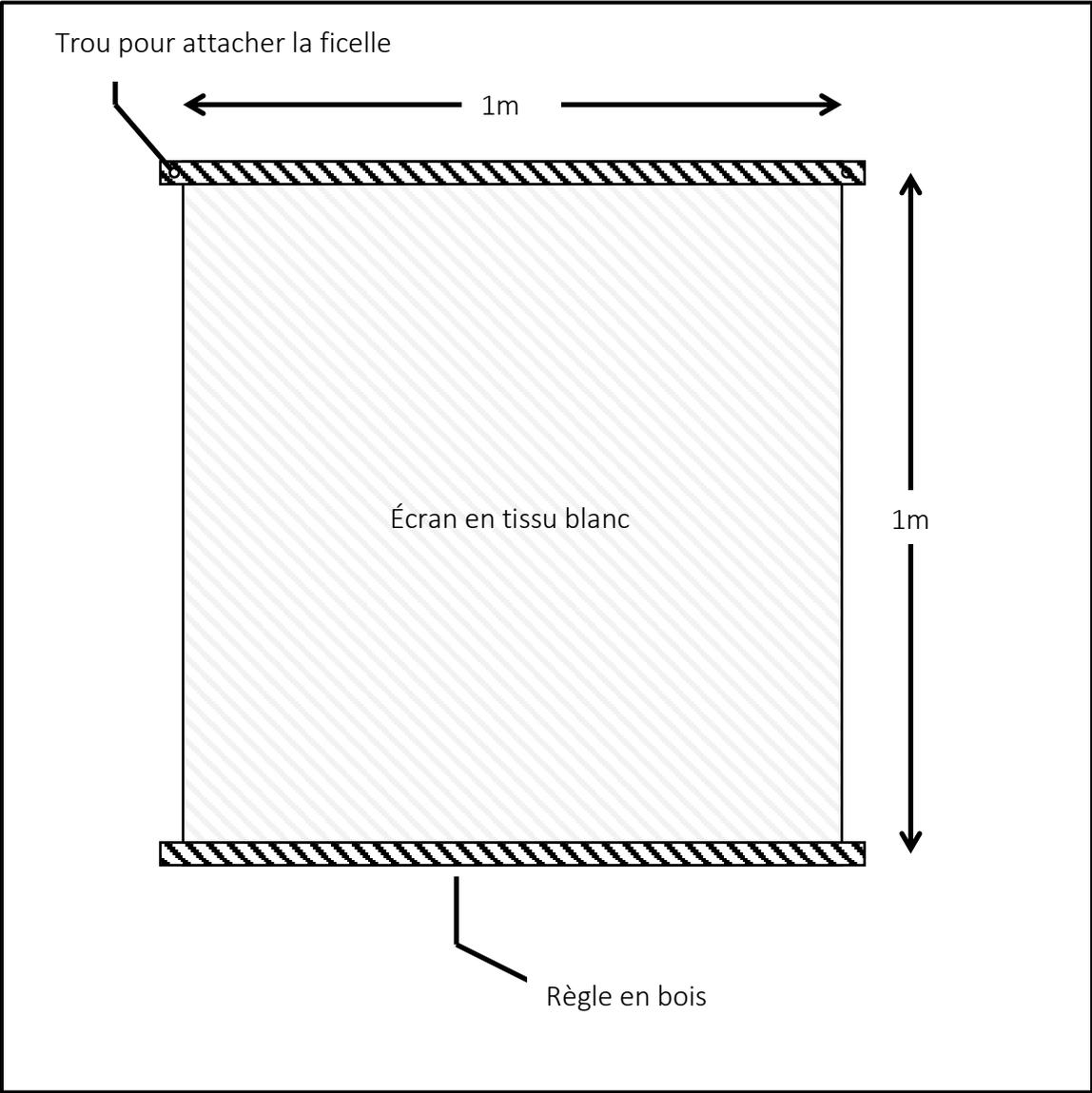
1.32 : CDSP, 2015

**D) Sélecteur d'ouverture – Face B**



*1.33 : CDSP, 2015*

**E) Écran coulissant**



1.34 : CDSP, 2015

## Chapitre 2

# DU SON À LA MUSIQUE : OÙ CRÉATIVITÉ ET SCIENCES SE RECONTRENT

Conception et rédaction :

*Isabelle Arseneau*, Centre de démonstrations en sciences physiques ;

*Mathieu Riopel*, Cégep Garneau ;

**Pour citer ce chapitre de l'ouvrage :**

**Arseneau, I. et Riopel, M. (2018).** Du son à la musique : où créativité et sciences se rencontrent. Dans V. Richard et M. Lafleur (dir.), *Intégration de repères culturels en enseignement des sciences par la démonstration* (p.27-78). Québec : Livres en ligne du CRIRES. En ligne : [http://lel.crires.ulaval.ca/public/richard\\_lafleur\\_2018.pdf](http://lel.crires.ulaval.ca/public/richard_lafleur_2018.pdf)

## Chapitre 2 : Du son à la musique, où créativité et sciences se rencontrent

La pièce *Dark Was the Night*, enregistrée par le chanteur blues *Blind Willie Johnson* en 1927, semble évoquer le sentiment de profonde solitude que l'on ressent parfois en contemplant l'immensité du ciel lors d'une nuit étoilée. Le compositeur de cette œuvre musicale pouvait-il s'imaginer que, cinquante ans plus tard, sa musique irait littéralement rejoindre le ciel de la nuit qui l'avait inspirée? Et pourtant, à des [dizaines de milliards de kilomètres](#) de la Terre, la sonde *Voyager 1* transporte actuellement à son bord un disque contenant une variété d'enregistrements représentant toute la diversité et la créativité de la culture musicale humaine. De Bach à Stravinsky, en passant par le rock'n'roll de Chuck Berry et les musiques traditionnelles issues de cultures originaires des quatre coins du monde, la musique gravée sur le *Voyager Golden Record* a pour but de propager vers les confins de la galaxie l'essence de ce qui fait de nous des humains afin qu'un jour, peut-être, une civilisation extra-terrestre puisse en apprendre un peu sur nous.



2.1 : Blind Willie Johnson, musicien Blues dont la musique voyage à bord des sondes Voyager.



2.2 : Photo du Golden Record se trouvant à bord des sondes Voyager.

Que penseraient des extra-terrestres de notre musique? Aurai-ils d'abord les capacités physiologiques pour l'écouter? Cette succession de sons et de motifs sonores leur serait-elle dénuée de sens? Pourquoi suppose-t-on que la musique, une activité profondément humaine, pourrait être comprise par des êtres différents de nous? Notre musique serait-elle universelle?

Un argument avancé pour expliquer l'universalité de la musique serait qu'elle possède de profondes racines dans les mathématiques, tel que Pythagore l'a découvert il y a environ deux mille cinq cents ans. Or, la musique est bien plus qu'un ensemble de règles mathématiques ou de phénomènes physiques. Il ne s'agit pas d'un phénomène naturel, mais bien d'une construction humaine...

Chez certaines espèces animales, comme les oiseaux, des sons s'apparentent à la musique et jouent divers rôles adaptatifs tels que la reproduction, l'agression, l'identification, etc. Cependant, aucune espèce n'est capable de créer, de comprendre ou de réagir à la musique comme le fait l'humain. L'origine de la musique, tout comme son rôle dans notre évolution, demeure bien difficile à cerner. D'ailleurs, Darwin, dans *La Descendance de l'homme et la sélection sexuelle*, en témoignait :

*L'aptitude à produire des notes musicales, la jouissance qu'elles procurent, n'étant d'aucune utilité directe [...], nous pouvons ranger ces facultés parmi les plus mystérieuses dont l'homme soit doué.*

**Charles Darwin**

Cette attirance forte pour la musique se manifeste dès l'enfance et se retrouve dans toutes les cultures du monde, et ce, peu importe l'époque. Cette mystérieuse faculté musicale ne serait-elle pas après tout l'une des caractéristiques faisant de nous des humains?

## 2.1 Intentions et structure du module

Ce module de démonstration aborde le thème de la musique comme trame de fond pour présenter différents phénomènes liés à la nature du son, à sa perception et à son interprétation. La musique, comme ancrage culturel, nous apparaissait particulièrement riche afin de situer différentes connaissances scientifiques dans leurs contextes d'élaboration, qu'ils soient historiques ou actuels, tout en présentant les préoccupations ou les croyances qui avaient cours à certaines époques et qui ont permis de faire évoluer nos connaissances. La musique nous sert ainsi de prétexte pour faire des ponts entre arts, sciences et mathématiques, une autre façon d'illustrer les prouesses de la créativité humaine.

Le module s'articule autour de deux axes. Le premier porte sur les liens entre sciences et musique, ou comment la musique a influencé les sciences (mathématiques, physique, astronomie, neurologie, etc.) et vice versa. Le deuxième s'intéresse à la question de la perception sensorielle des sons et de la musique, en ce qui concerne les structures de l'oreille, ainsi qu'à son interprétation par le cerveau. Ces deux axes regroupent chacun deux thèmes qui se déclinent d'une à trois fiches démonstration. Ces fiches servent à présenter les démonstrations qui constituent le module, mais aussi à proposer différents repères culturels se rattachant à une démonstration en particulier ou à une série de démonstrations. Évidemment, de nombreux choix ont dû être faits lors de l'écriture de ces fiches. L'intention était de proposer une série de repères organisés en courtes « histoires » qui ont le potentiel de susciter l'intérêt et de faire réfléchir des étudiants du secondaire et du collégial sur la nature des sciences. Cela dit, ces fiches s'adressent particulièrement aux futurs enseignants de sciences, du secondaire et du collégial, ainsi qu'aux professeurs et aux chargés de cours en didactique des sciences.

Toutes les fiches démonstration suivent la même structure. D'abord, les repères culturels sont présentés et généralement illustrés par des images, mais parfois aussi par des hyperliens insérés dans le texte en guise de complément. Ensuite, chacune des démonstrations est décrite en précisant de quelle manière elles pourraient être exploitées; la plupart du temps, elles portent sur un concept particulier. Au besoin, les caractéristiques techniques des montages de démonstration sont aussi présentées. À ce sujet, précisons que le choix des matériaux et la conception des montages ont été faits, autant que possible, avec le souci de rendre ce matériel reproductible et transférable en contexte de classe. À la fin des fiches, on énumère certains concepts de sciences qui pourraient être associés aux démonstrations présentées et on commente une liste de références utiles. Ajoutons en terminant que ces fiches peuvent être utilisées de manières indépendantes, mais qu'elles sont aussi interreliées. Un [Prezi](#) a été préparé afin d'illustrer ces liens et pour permettre une vue d'ensemble du module.

## 2.2 Sciences, musique et créativité

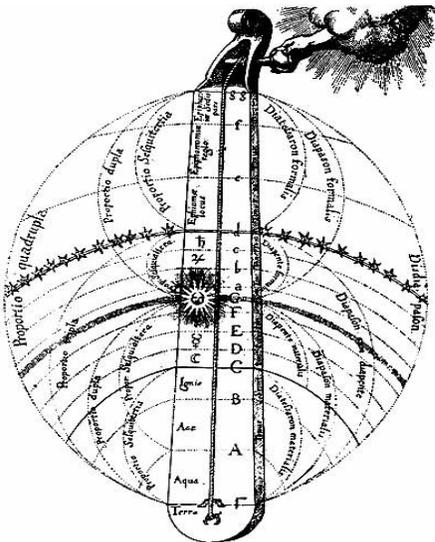
Sciences et musique, deux mots qui suscitent généralement des images fort différentes. En effet, le contraste entre les mots avec lesquels on décrit habituellement les sciences et la musique est notable. Tandis que la conception courante des sciences réfère souvent à des termes comme objectivité, rationalité et neutralité, on qualifie communément la musique comme étant subjective, émotive et personnelle. Parmi certains des clichés couramment entendus, la science viendrait de la tête et la musique du cœur. Pourtant, sciences et musique partagent beaucoup plus de points en

communs que ces généralités pourraient laisser sous-entendre. Les sciences, comme la musique, constituent des activités humaines liées à notre profond désir d'exprimer notre créativité, qui se développent et évoluent au sein de sociétés, de cultures et de contextes particuliers. D'aussi loin qu'on puisse se souvenir, la musique a inspiré les hommes et les femmes.

Selon la mythologie grecque, l'expression de la créativité humaine serait le résultat de l'inspiration divine de déesses, que l'on a nommées muses. À chaque muse correspond un domaine de la connaissance et des arts comme la poésie, l'histoire, le chant, la comédie, la danse ou l'astronomie. Ainsi, dans l'Antiquité grecque, ces différentes disciplines étaient toutes communiquées, enseignées et diffusées grâce à la musique. Par exemple, la poésie et le théâtre étaient généralement chantés ou accompagnés de musique, tout comme les récits historiques. Ce n'est donc pas un hasard si les mots muse et musique sont semblables. Ils possèdent en effet une origine commune. Il n'est alors pas surprenant de constater que l'étude de l'astronomie chez les Grecs fut aussi associée à la musique. Plusieurs philosophes grecs de l'Antiquité, comme Platon et Pythagore, croyaient que les principes de l'harmonie musicale pouvaient s'étendre à l'Univers tout entier. Il semblerait que Pythagore croyait notamment que le mouvement des planètes à travers l'espace produisait des sons harmonieux, telle une grande symphonie cosmique.



2.3 : Représentation des neuf muses.



2.4 : Le monocorde céleste, une illustration de Robert Fludd (1618) qui présente la relation entre le mouvement des planètes et certains intervalles musicaux.

Pendant des siècles, et encore aujourd'hui, la musique a continué à fasciner l'esprit des gens qui tentaient de percer les secrets de l'Univers. Durant la Renaissance, bon nombre de scientifiques s'intéressèrent à cette théorie de la « musique cosmologique » qui avait tant intrigué les penseurs grecs. L'exemple le plus marquant est probablement celui de l'astronome Johannes Kepler. En effet, ce dernier passa une grande partie de sa vie à chercher les indices d'une harmonie dans le mouvement des planètes du système solaire, qui étaient connues à cette époque. Ses recherches le menèrent d'ailleurs à la publication de son œuvre emblématique, *Harmonices Mundi* (L'harmonie du monde), dans laquelle ses célèbres lois du mouvement planétaire furent établies. À cette même époque, plusieurs autres savants et philosophes tels que Descartes, Kircher, Mersenne et Galilée tentèrent de déterminer les fondements théoriques de la musique, tout en l'associant à leur conception d'un univers harmonieux.

Les sciences et la musique, interreliées malgré leurs apparentes différences, possèdent ainsi une longue histoire commune. Si la musique exerçait une certaine fascination chez plusieurs scientifiques, de nombreux musiciens et compositeurs ont, parallèlement, tenté d'incorporer des éléments scientifiques à leur musique. L'œuvre de Bach, notamment, possède une structure qui est souvent inspirée de concepts mathématiques comme la symétrie. Par exemple, un [canon](#) tiré de son œuvre *L'Offrande musicale* peut être joué en lisant la partition dans un sens ou dans l'autre, voire dans les deux sens de façon simultanée!

Durant le XX<sup>e</sup> siècle, plusieurs compositeurs tels que Arnold Schoenberg, Pierre Boulez, Peter Maxwell Davies, Iannis Xenakis et Steve Reich, pour ne nommer que ceux-ci, ont aussi utilisé des concepts mathématiques et scientifiques comme outils pour concevoir certaines de leurs œuvres. On y retrouve des compositions construites à partir de la suite de Fibonacci, de carrés magiques, de matrices, de principes statistiques et même de la théorie du chaos. Plusieurs pourraient être tentés de critiquer une telle approche de la musique en lui reprochant d'être stérile, trop rationnelle et de laisser peu de place à la créativité du compositeur. Toutefois, les sciences et les mathématiques ne constituent pas une fin en soi dans ce genre de composition, mais plutôt un moyen nouveau permettant justement au compositeur de manifester sa créativité. Bref, un lien créatif semble toujours avoir été présent entre les sciences et la musique, parfois pour les unir, parfois pour les distinguer.

*Les mathématiques et la musique, les deux modes d'activité intellectuelle les plus opposés qu'on puisse imaginer, ont une liaison intime, se secourent mutuellement, comme si elles devaient prouver la liaison mystérieuse qui apparaît dans toutes les manifestations de notre esprit, et qui nous fait soupçonner, jusque dans les œuvres du génie artistique, l'action cachée d'une intelligence qui raisonne.*

**Hermann Ludwig von Helmholtz**

# THÈME 1 : SCIENCES ET HARMONIE

## FICHE : PYTHAGORE ET L'HARMONIE CÉLESTE

### A) Repères culturels

Pythagore est un personnage quasi mythique qui serait né vers 580 av. J.-C. sur l'île de Samos, située dans la mer Égée. Bien que son nom soit célèbre en raison de son fameux théorème, peu de choses sur sa vie sont certaines. Il n'existe en effet aucun document écrit de sa main, et les seules biographies à son sujet ont été écrites plusieurs siècles après sa mort<sup>6</sup>. On sait toutefois qu'il aurait fondé une organisation dont les rites, les croyances et les pratiques s'apparentaient à une sorte de secte. Le fondement de la philosophie des pythagoriciens résidait dans une fascination pour les nombres. Pour eux, tout ce qui nous entoure constituait une sorte de matérialisation des nombres, et la géométrie constituait la clé permettant de percer le secret de la réalité. Cette fascination pour les nombres, bien qu'elle soit à plusieurs égards plus mystique que scientifique, aurait tout de même permis à Pythagore d'étendre les connaissances de l'époque en mathématiques et de les lier à l'étude de la cosmologie et de la musique.



2.5 : Représentation du mythe de Pythagore et de son étude de la consonance.

Une légende raconte que Pythagore, alors qu'il passait devant l'atelier d'un forgeron tout en contemplant les étoiles, aurait été frappé par l'harmonie des sons qu'il entendait. En entrant chez le forgeron, il aurait alors eu l'idée de peser les marteaux qui produisaient ces sons harmonieux qu'il avait entendus. Il aurait constaté que le rapport des poids des marteaux émettant des sons consonants tels que des octaves, des quintes ou des quarts, pouvait être exprimé par des fractions simples, par exemple  $2/1$ ,  $3/2$ ,  $4/3$ . On relate que l'émerveillement produit par cette découverte serait à l'origine de sa théorie de la musique, incontournable encore de nos jours pour comprendre l'origine de la gamme utilisée dans la musique occidentale. Bien que cette histoire constitue vraisemblablement un mythe, elle permet d'illustrer comment la fascination de Pythagore pour les nombres a permis la découverte de certains principes de l'harmonie musicale. Il semble beaucoup plus probable que les constatations de Pythagore sur la consonance aient été faites à partir d'un monocorde, un instrument à une seule corde tendue sur un résonateur, le long d'une ligne graduée. Le monocorde, bien qu'il soit peu adapté pour l'interprétation de la musique, a été l'instrument d'analyse théorique de la musique jusqu'à la fin du Moyen Âge.

<sup>6</sup> Une des premières biographies importantes relatant la vie de Pythagore fut écrite par Jamblique au III<sup>e</sup> siècle, soit 800 ans après la mort du personnage.

Le monocorde était utilisé pour faire vibrer une partie de corde dont la longueur était ajustée à l'aide d'un chevalet mobile sur une échelle graduée. On pouvait ensuite comparer le son produit par une section de corde à celui émis par une corde entière. Ce dispositif permettait « d'écouter » les différentes proportions « consonantes » exprimées en rapports de nombres naturels.

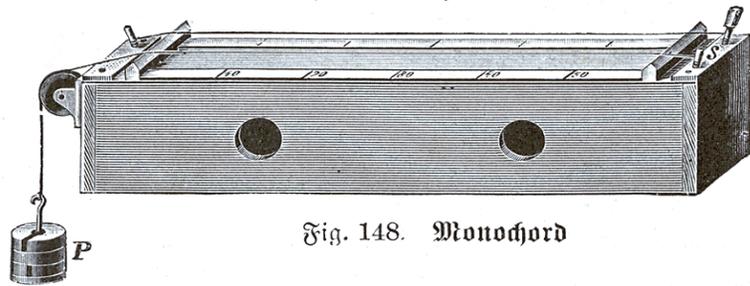


Fig. 148. Monochord

2.6 : Le monocorde.

Par exemple, si la moitié de la corde vibre, le son émis est une octave plus haute que le son émis par la corde entière. Le rapport de la longueur de la corde entière sur la partie vibrante est donc de  $1/(1/2)$  ou encore  $2/1$ . Si les deux tiers ( $2/3$ ) de la corde vibre, le rapport corde entière sur partie vibrante est de  $1/(2/3)$  qui est égal à  $3/2$ . Le son alors produit représente une quinte. Ainsi, tous les intervalles musicaux consonants peuvent être exprimés par des rapports de longueurs de cordes relativement simples. Le tableau ci-dessous fournit ces rapports pour les intervalles qui forment la gamme naturelle.

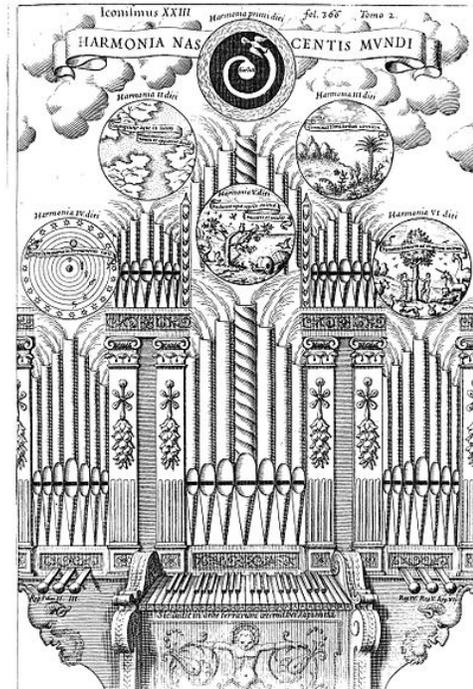
On sait aujourd'hui que ces fractions correspondent aux rapports entre les fréquences des ondes sonores. Ainsi, la note *do*, correspondant à une fréquence de 264 Hz, aura pour quinte la note *sol* ayant une fréquence de 396 Hz. On peut remarquer que la théorie de Pythagore n'explique toutefois pas les causes physiques de la consonance. Pourquoi ces sons sont-ils agréables à nos oreilles? Ce sont notamment les études sur l'acoustique, réalisées par Helmholtz au XIX<sup>e</sup> siècle, qui ont permis de mieux comprendre les causes de cette consonance. Pour Pythagore, par contre, le simple fait que ces sons puissent être exprimés par des fractions simples constituait une explication suffisante. Il est donc étonnant de constater qu'aujourd'hui la gamme tempérée, utilisée de façon dominante dans la musique occidentale, est définie par des nombres irrationnels, c'est-à-dire des nombres qui ne peuvent pas s'écrire sous la forme d'une fraction.

*Rapport des fréquences pour différents intervalles musicaux*

Intervalle	Rapport
unisson	1 : 1
ton	9 : 8
tierce majeure	5 : 4
quarte	4 : 3
quinte	3 : 2
sixte majeure	5 : 3
septième	15 : 8
octave	2 : 1

Pour Pythagore et ses disciples, les principes de l'harmonie n'étaient pas restreints uniquement à la musique, mais s'étendaient à l'univers tout entier. C'est d'ailleurs lui qui aurait inventé le mot *cosmos* pour désigner un univers ordonné et harmonieux. Les pythagoriciens croyaient en effet que les corps en mouvement dans l'espace produisaient des sons inaudibles pour l'homme. Selon eux, à chaque planète correspondait une note produite par sa rotation autour de la Terre.

Cette théorie de *l'Harmonie des Sphères*<sup>7</sup> est fondée sur l'idée que l'univers est régi par des rapports numériques harmonieux, et que les distances entre les planètes dans la représentation géocentrique de l'univers (Lune, Mercure, Vénus, Soleil, Mars, Jupiter, Saturne) sont réparties selon des proportions musicales. On raconte que l'analogie qui semble exister entre les intervalles musicaux et les espacements des planètes représentait pour Pythagore *le secret du monde*. Certains affirment même que Pythagore pouvait entendre cette musique céleste! « Pythagore écoutait l'harmonie de l'univers, car il percevait l'harmonie universelle des sphères et des astres dont les mouvements sont réglés sur elle, alors que nous ne sommes pas capables, nous, de l'entendre, à cause de l'étroitesse de nos facultés<sup>8</sup>. »



2.7 : La naissance du monde, *Musurgia Universalis*, Athanasius Kircher, 1650.



2.8 : Extrait de *L'harmonie du monde* de Kepler, 1619.

Encore au XVII<sup>e</sup> siècle, de nombreux scientifiques étaient préoccupés par cette idée d'Harmonie de l'Univers, un intérêt certainement motivé par une inébranlable foi en Dieu. Pour eux, Dieu avait nécessairement créé un univers simple, beau et harmonieux. Sans doute que cette conviction était aussi nourrie par la formation scolaire de l'époque, qui se composait du trivium « rhétorique, dialectique et grammaire » et du quadrivium « musique, arithmétique, géométrie et astronomie ». Les travaux sur la mécanique céleste de Kepler sont d'ailleurs fortement influencés par cette théorie. Son ouvrage intitulé *L'harmonie du monde* décrit les mouvements des planètes en les mettant en relation avec des théories musicales. Construisant à partir des mesures réalisées par

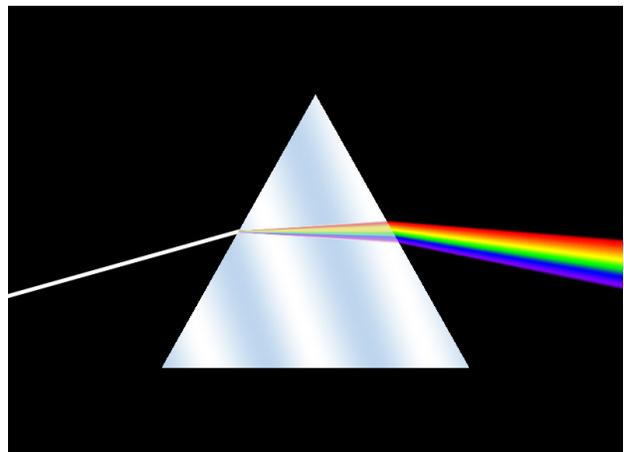
<sup>7</sup> Notons que chez les Grecs, le mot « harmonie » désigne surtout l'idée des bonnes proportions, celles qui existent entre parties, entre ces parties et un tout. Le mot « musique » renvoie à l'Art des Muses et réfère à la culture de l'esprit au sens large, qu'elle soit artistique ou scientifique. Le mot « sphère », d'origine aristotélicienne, se définit quant à lui comme la zone d'influence d'une planète.

<sup>8</sup> Porphyre, *Vie de Pythagore*, écrit vers 270.

Tycho Brahe sur le mouvement des planètes, Kepler chercha à démontrer que le mouvement des astres pouvait être décrit par des consonances musicales, correspondant à la marque d'une volonté divine. Il remarqua que la relation entre la vitesse maximale et minimale d'une planète durant son orbite s'approchait de rapports harmonieux. Par exemple, Saturne, à son aphélie, se déplace de 106 secondes d'arc par jour, tandis qu'elle couvre 135 secondes d'arc par jour à son périhélie. Le rapport entre ces vitesses est très près de  $5/4$ , correspondant à l'intervalle d'une tierce majeure. De la même façon, il obtint une tierce mineure pour Jupiter, une quinte pour Mars, un demi-ton pour la Terre, un dièse pour Vénus et une octave augmentée d'une tierce mineure pour Mercure. Même si ces résultats semblent plutôt mystiques aujourd'hui, c'est cette recherche d'harmonie dans le mouvement des planètes qui permit à Kepler d'énoncer trois lois qui portent aujourd'hui son nom et qui furent fondamentales à l'élaboration de la théorie de la gravitation que Newton allait formuler quelques dizaines d'années plus tard.

Au XVII<sup>e</sup> siècle, les progrès en astronomie vont donc de pair avec ceux de la musique, car il est bien difficile de se détacher de cette tradition solidement ancrée depuis l'Antiquité. Newton s'intéressa également de près à la musique et aux théories musicales de l'Antiquité. Par exemple, il associa les sept notes de la gamme aux couleurs du spectre obtenu en décomposant la lumière du soleil à l'aide d'un prisme. La musique des sphères de Newton unit ainsi les sept planètes, les sept notes et les sept couleurs. Au XIX<sup>e</sup> siècle, le chimiste John Newland s'inspira également des théories musicales lorsqu'il énonça sa loi des octaves selon laquelle les propriétés chimiques d'un élément se répètent tous les huit éléments, de la même manière qu'une note musicale est retrouvée après avoir joué une gamme complète formée généralement de huit notes (un intervalle d'une octave). Bien que ridiculisée à l'époque, la théorie de Newland constitua pourtant un premier pas vers l'élaboration du tableau périodique de Mendeleïev.

Aujourd'hui, la théorie des cordes en physique des particules repose sur l'hypothèse que les propriétés de la matière (masse, charge électrique, etc.) seraient en quelque sorte des modes de vibrations différents sur de minuscules cordes vibrantes. Cette théorie semble étrangement faire écho aux lointaines théories de Pythagore sur la musique du cosmos, comme quoi l'idée d'harmonie céleste de Pythagore exerce encore une influence aujourd'hui, autant chez les scientifiques que chez les musiciens!



2.9 : Cette illustration de la dispersion de la lumière dans un prisme n'est pas sans rappeler l'iconique album *The Dark Side in the Moon* du groupe de musique Pink Floyd.

*La musique est l'arithmétique du son, comme l'optique est la géométrie de la lumière.*

*Claude Debussy*

## B) Description et utilisation des démonstrations

### Démonstration : Le Monocorde

Bien que le monocorde soit fort peu adapté pour interpréter la musique, il permet de réaliser certaines démonstrations sur la consonance concernant les théories de Pythagore. Encore aujourd'hui, il est possible de retrouver cet instrument (photo ci-contre) dans la réserve de matériel scientifique de plusieurs établissements scolaires.



2.10 : CDSP, 2015.

En déplaçant le pont de bois le long de la corde afin de diviser sa longueur en deux parties, on peut vérifier que deux sons consonants correspondent à des longueurs de cordes dont le ratio peut être exprimé comme un rapport simple. Il est également intéressant de vérifier qu'à l'inverse, deux sons dissonants ne correspondent pas à un ratio des longueurs qui est simple. On peut donc aborder avec cette démonstration la relation entre les sons musicaux et la structure des échelles musicales. À noter que le monocorde doit être accordé en *do* avant la démonstration si on décide d'utiliser les deux cordes (voir plus bas la section *Informations et ressources complémentaires – Liens utiles* pour un lien vers un accordeur en ligne). Il est toutefois possible de faire la démonstration avec une seule corde. Dans ce cas, il n'est pas nécessaire d'accorder l'instrument. Des repères pratiques ont d'ailleurs été tracés afin d'indiquer l'endroit où placer le pont de bois en indiquant de quel intervalle musical il s'agit.

### Démonstration : Les tuyaux accordés

Une analyse similaire sur la consonance réalisée à l'aide d'un monocorde peut être faite avec des tuyaux. En effet, deux tuyaux fermés dont le ratio des longueurs correspond à un rapport simple produiront des sons consonants.



2.11 : CDSP, 2015.

Une méthode simple pour fabriquer une telle démonstration consiste à couper des tuyaux de cuivre de  $\frac{3}{4}$  de pouce de diamètre à différentes longueurs. Une extrémité des tuyaux est ensuite bouchée à l'aide d'un bouchon de liège, que l'on peut positionner de façon à accorder le tuyau à une note voulue. Le tableau ci-dessous fournit les longueurs approximatives de tuyaux que l'on peut utiliser afin que l'ensemble soit accordé pour jouer un accord de *Do majeur*.

*Fréquences générées par des tuyaux de cuivre ( $\frac{3}{4}$  de pouce) de différentes longueurs*

Note	Fréquence	Longueur
Do	262 Hz	34,3 cm
Mi	330 Hz	27,0 cm
Sol	392 Hz	22,0 cm
Do	523 Hz	17,4 cm

Les tuyaux produiront un son quand on souffle à l'intérieur, un peu comme on le ferait avec une flûte de pan ou une bouteille vide. On peut demander à quatre étudiants de souffler simultanément dans les tuyaux afin d'apprécier la consonance de l'accord majeur.

### **Démonstration : Le tourne-disque « de Savart »**

Une démonstration classique permettant d'illustrer la nature des ondes sonores consiste à souffler de l'air comprimé sur un disque perforé en rotation. Une onde sonore est alors générée, puisque l'air est périodiquement bloqué par le disque en rotation, puis laissé passé par un trou. La fréquence du son produit correspond ainsi à la fréquence à laquelle un trou passe devant le jet d'air. On retrouve ce principe à la base du fonctionnement de plusieurs sirènes d'alarme. Cette démonstration est particulièrement efficace pour montrer qu'un son est généré par un mouvement cyclique de l'air.

Une version peu coûteuse de ce montage consiste à modifier un ventilateur, tel qu'illustré sur la photo ci-dessus. Les pales du ventilateur sont remplacées par un disque en vinyle perforé. Dans la version illustrée, des trous ont été percés sur le disque le long de deux sillons, soit des cercles concentriques de différents rayons. Les trous sur chacun des cercles sont également espacés. Un cercle compte quatre trous tandis que l'autre en a huit. En soufflant de l'air comprimé successivement dans l'une et l'autre des séries de trous, on obtient deux sons dont les notes sont à un intervalle d'une octave, puisque la fréquence est doublée dans la série ayant huit trous. On montre ainsi que lorsque la fréquence d'un son est doublée, la note perçue est augmentée d'une octave.



2.12: CDSP, 2015.

### **C) Concepts scientifiques associés à la fiche**

- Vibration des cordes
- Ondes stationnaires
- Consonance
- Nature des ondes sonores

## D) Informations et ressources complémentaires

### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**Ross, A. (2008).** *Sciences : Histoire et Méthode*. Profador. Lévis.

Cet ouvrage a été écrit par un professeur de mathématiques du Cégep de Lévis-Lauzon et s'adresse aux étudiants du programme *Histoire et civilisation*. L'intention de l'auteur était de permettre aux étudiants de mieux comprendre le développement des sciences de la nature et de l'esprit scientifique moderne en tenant compte du contexte intellectuel et historique.

**Decreux, É. (2008).** *Mathématiques, sciences et musique – Une introduction historique*. Ellipses Édition. Paris. [<http://ariane.ulaval.ca/cgibin/recherche.cgi?qu=i9782729840969>]

Ce livre vient esquisser une perspective historique de la lente élaboration d'un modèle physico-mathématique du son, le plus souvent en réponse à des questions musicales, dont l'auteur situe les conditions de sa création et ses limites. Le premier chapitre constitue une bonne introduction aux phénomènes ondulatoires. Le troisième chapitre, portant sur la musique et les sciences dans l'Antiquité et au Moyen Âge, a inspiré certains des aspects présentés dans cette fiche.

**Fauvel, J., Flood, R. et Wilson, R. (2003).** *Music and Mathematics – From Pythagoras to Fractals*. Oxford University Press. [<http://ariane.ulaval.ca/cgibin/recherche.cgi?qu=i0198511876>]

Le premier chapitre de ce livre a servi de référence clé pour l'écriture de cette fiche. Le premier chapitre présente une brève histoire de la musique, de Pythagore à Kepler, et est ponctué d'images pour illustrer le propos. Les autres chapitres présentent une histoire plus contemporaine de l'évolution de la compréhension de la musique grâce à l'utilisation d'outils mathématiques.

### LIENS UTILES

**Accordeur de guitare en ligne :** [<http://www.proguitartuner.com/guitar-tuner/>]

L'utilisation de cet accordeur est assez simple. Pour accorder les cordes du monocorde en *do* (ou C), il faut serrer doucement la clé pour aller chercher la note *do* jusqu'à ce que le cadran soit vert. Il est préférable de ne pas dépasser la note pour ne pas trop étirer la corde. Précisons que la deuxième corde doit être accordée avec le pont en place, puisqu'il soulève légèrement la corde, ce qui a pour effet d'augmenter sa tension.

**Clavier en ligne :** [<http://www.bgfl.org/virtualkeyboard/>]

Il peut être utile de référer à un clavier pour expliquer les accords consonants (quinte, tierce majeure, quarte, etc.). Par exemple, en partant du *do* (C) et en comptant huit notes, on revient au *do* (C1), ce qui constitue une octave. Du *do* (C) au *mi* (E), on compte trois notes, ce qui constitue une tierce majeure. Du *do* (C) au *fa* (F), on compte quatre notes : il s'agit d'une quarte, et ainsi de suite.

## THÈME 2 : LES INSTRUMENTS DE MUSIQUE

### FICHE : POUVONS-NOUS VOIR LE SON?

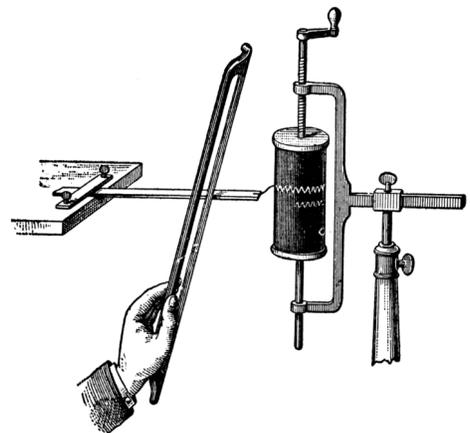
#### A) Repères culturels

Lorsque Pythagore étudia les sons produits par une corde, en associant notamment la hauteur du son à la longueur de la corde vibrante, il s'intéressa beaucoup plus à la question d'harmonie et de consonance entre différents sons qu'à leur nature physique. Autrement dit, la théorie musicale de Pythagore porta surtout sur les aspects harmoniques, mathématiques et cosmiques des notes de la gamme plutôt qu'à l'étude du son comme phénomène physique. Même au XVI<sup>e</sup> siècle, soit plus de deux mille ans après la mort de Pythagore, peu de choses avaient été encore avancées quant à notre compréhension de la nature du son. Comme aujourd'hui, les musiciens de l'époque devaient bien avoir une connaissance empirique sur l'effet de la longueur, de la taille et de la tension d'une corde en fonction de la hauteur d'un son qu'elle produit, mais il n'y avait pas encore d'explication scientifique à proprement dit.

À cette époque vivait Vincenzo Galilei (vers 1520-1591), joueur de luth, compositeur et théoricien de la musique. Il était l'une des grandes figures de son époque reconnue pour ses recherches sur la théorie musicale. Il a rédigé une étude détaillée de l'effet de la tension dans une corde sur la hauteur du son qu'elle produit. Ce n'est donc pas une surprise de réaliser que la vibration des cordes fut également un sujet d'investigation pour son fils, le célèbre Galileo Galilei. C'est d'ailleurs ce dernier qui aurait été le premier à associer la hauteur d'une note à la fréquence d'une vibration, faisant vraisemblablement un premier lien entre le son et une onde.

Bien que maintenant il peut paraître évident pour certains de reconnaître la nature ondulatoire du son, il n'existe pourtant que peu de façons qui permettent de le visualiser directement. Évidemment, il est possible de ressentir les vibrations causées par le son; pensons simplement à notre premier spectacle rock ou à des voisins (un peu trop!) amateurs de musique. Cependant, cela devient beaucoup plus abstrait lorsque vient le temps d'associer l'image de vagues (l'exemple le plus commun d'une onde) et le son que l'on entend. La technologie actuelle permet assez facilement, avec l'aide d'un logiciel, de visualiser les ondes sonores captées par un microphone. Pourtant, de telles mesures étaient beaucoup plus difficiles à réaliser il y a peine 150 ans, ce qui en mena plusieurs à se creuser la tête afin de concevoir des dispositifs permettant de « voir » le son.

Prenons l'exemple d'une expérience réalisée par Thomas Young (1773-1829), connu surtout pour ses découvertes sur la lumière. Il chercha une méthode mécanique afin de compter le nombre de vibrations d'un diapason. Dans son ouvrage *Lectures on Natural Philosophy* (1807), il décrit le fonctionnement d'un « chronographe à cylindre rotatif ». Un appareil très similaire, appelé vibroscope, fut inventé par Jean-Marie-Constant Duhamel (1797-1872) et servit à montrer le mouvement d'oscillation d'un diapason. En y attachant une pointe qui servait à laisser une trace à la surface d'un cylindre en rotation (voir l'image ci-contre), il fut non seulement possible de « voir » le son, mais aussi « d'enregistrer » une trace sonore. Cet instrument apparaît

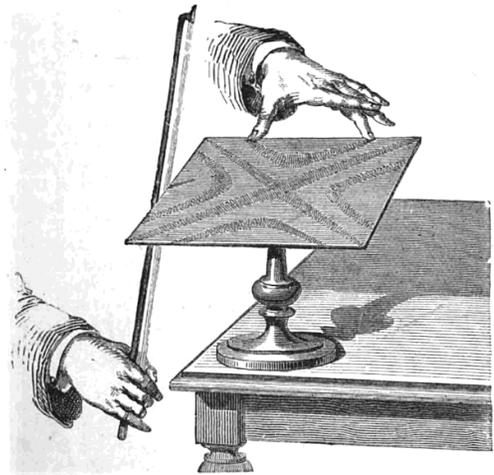


2.13 : Vibroscope mécanique, 1895.

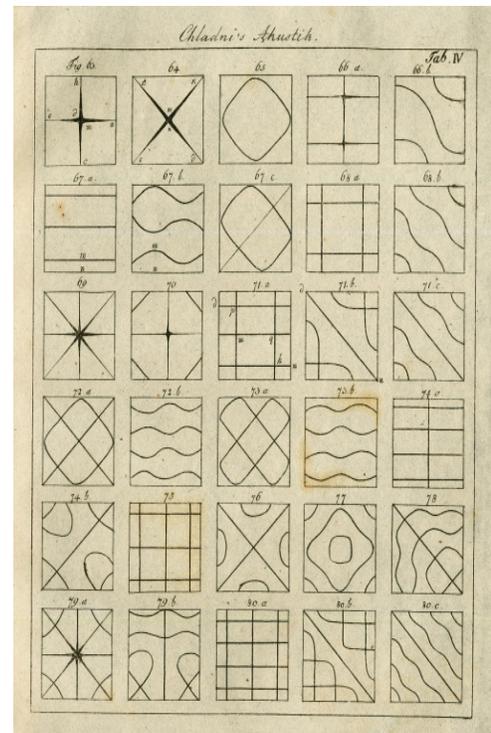
donc comme un précurseur du fameux phonographe d'Edison (1887), le premier appareil capable d'enregistrer et de reproduire des sons, qui fut d'abord imaginé pour des fins scientifiques. Par la suite, cette découverte mènera à l'invention du gramophone, un ancêtre à plusieurs technologies que nous utilisons quotidiennement, comme le téléphone.

Revenons tout de même au début du XIX<sup>e</sup> siècle, époque pendant laquelle Ernst Chladni réalisa ses fameuses démonstrations publiques où le son était à l'honneur. Chladni est en effet un de ces rares scientifiques qui est parvenu à susciter l'enthousiasme pour son travail, et ce, aussi bien dans les cercles d'initiés que dans le grand public. Il fit le tour de l'Europe afin de « montrer le son » à l'aide d'un archet, qu'il utilisait pour faire vibrer des plaques de cuivre afin d'y faire apparaître des figures bien particulières. Bien qu'il aurait souhaité se faire connaître pour les instruments de musique qu'il inventa (comme l'euphon, par exemple), ce sont ses plaques vibrantes qui lui offrirent sa renommée. Il reçut d'ailleurs une invitation personnelle de la part de Napoléon Bonaparte, désireux de voir ces démonstrations. Il est intéressant de savoir que Napoléon aurait été un grand amateur de sciences et qu'il avait d'excellentes connaissances en mathématiques. On raconte même qu'en 1796, lorsqu'il était encore un jeune général, il donna l'ordre à ses troupes, qui se trouvaient à Pavie (Italie), de préserver les maisons des professeurs d'université, où se trouvait justement la maison d'un certain Alessandro Volta!

Napoléon eut ainsi vent des expériences de Chladni et lui demanda, par l'entremise de Pierre-Simon Laplace, de lui en faire la présentation au Palais des Tuileries un soir de février 1809. Pour cette prestation, Chladni se vit offrir 6000 francs, mais à la condition qu'il publie son très célèbre *Akustik* en français, qui devint le *traité d'acoustique*. Il ne semble d'ailleurs pas exagéré de dire que l'acoustique est devenue une discipline en soi, d'abord grâce à cet ouvrage, mais aussi parce que Chladni fut l'initiateur de l'acoustique expérimentale. Bien qu'il ne fût pas le premier à observer des figures formées par des vibrations sonores, car de Vinci et Galilée l'avaient fait bien avant lui, il aurait néanmoins été le premier à examiner ce phénomène de manière systématique. Ce faisant, il développa une technique et des habiletés hors du commun pour produire ces figures afin de les étudier, au grand étonnement des foules qui se déplaçaient pour le voir s'exécuter.



2.14 : Méthode utilisée par Chladni pour produire des figures sur une plaque.



2.15 : Figures sonores d'une plaque carrée, *Die Akustik*, 1802.

Lors de sa démonstration aux Tuileries, Chladni ne fut toutefois pas en mesure d'expliquer ses expériences mathématiquement, à la grande déception de Napoléon. Ce dernier lança donc un concours avec à la clé un prix de 3000 francs pour qui saurait déterminer une théorie mathématique sur les figures observées. Il fallut près de sept ans avant que le défi soit relevé; en 1816, il le fut par une femme, Sophie Germain (1776-1831). Cette dernière remporta les honneurs avec son essai intitulé *Recherches sur la théorie des surfaces élastiques*. Cette extraordinaire mathématicienne, en refusant de se soumettre aux mœurs de son époque, réussit à repousser les barrières qui empêchaient les femmes d'avoir accès à une éducation scientifique, ce qu'elle acquerra d'ailleurs de manière autodidacte. Bien que son explication sur les surfaces élastiques restait incomplète, sa proposition représentait tout de même un net progrès<sup>9</sup>. En outre, Sophie Germain apportera d'importantes contributions à la théorie des nombres. Elle entretenit de longues correspondances avec Carl Friedrich Gauss, d'abord sous le pseudonyme masculin d'Antoine Auguste Le Blanc, puisque jamais à cette époque une femme mathématicienne n'aurait été prise au sérieux. En apprenant la supercherie, celui-ci lui écrivit en 1807 :



2.16 : Marie-Sophie Germain

*[...] Comment vous décrire mon admiration et mon étonnement, en voyant se métamorphoser mon correspondant estimé M. Leblanc en cette illustre personnage, qui donne un exemple aussi brillant de ce que j'aurois peine de croire. Le goût pour les sciences abstraites en général et surtout pour les mystères des nombres est fort rare : on ne s'en étonne pas ; les charmes enchanteurs de cette sublime science ne se decèlent dans toute leur beauté qu'à ceux qui ont le courage de l'approfondir. Mais lorsqu'une personne de ce sexe, qui, par nos mœurs et par nos préjugés, doit rencontrer infiniment plus d'obstacles et de difficultés, que les hommes, à se familiariser avec ces recherches épineuses, sait néanmoins franchir ces entraves et pénétrer ce qu'elles ont de plus caché, il faut sans doute, qu'elle ait le plus noble courage, des talents tout à fait extraordinaires, le génie supérieur. [...]*

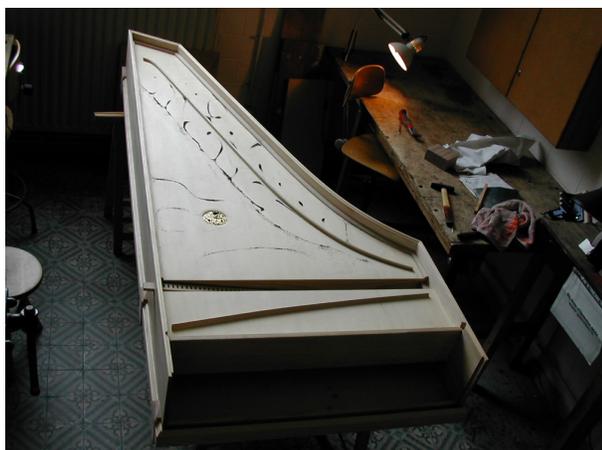
---

<sup>9</sup> Il faudra attendre près de 40 ans avant que Robert Kirchhoff ne réussisse à trouver la solution complète, mais pour les plaques circulaires seulement.

Gauss n'eut que des éloges pour cette femme de science exceptionnelle, tout comme le mathématicien Joseph Fourier, qui devint son ami. Grâce à son appui, elle sera la première femme autorisée à assister aux séances de l'Institut de France. On utilise encore aujourd'hui les techniques de Chladni dans le domaine de la lutherie afin d'observer les différents modes de vibration de la table d'harmonie de certains instruments de musique (guitare, violon, piano, etc.). Cette technique permet de mieux comprendre comment résonnera un instrument afin d'en optimiser le son. Notons enfin que le musicien Jack White, connu principalement comme chanteur et guitariste des White Stripes, a produit un vidéoclip pour sa chanson [High Ball Stepper](#) où les plaques de Chladni ainsi que d'autres démonstrations permettant de « voir le son » sont mises en scène. Comme quoi les démonstrations élaborées par Chladni il y a plus de 200 ans ne sont toujours pas démodées!



2.17 : Figures de Chladni sur une caisse de résonance de guitare acoustique.



2.18 : Figures de Chladni sur un clavecin.

## B) Description et utilisation des démonstrations

### Démonstration : Slinky

Un *Slinky* peut devenir un outil très utile pour démontrer divers phénomènes ondulatoires liés à la nature du son. Ces démonstrations sont d'autant plus intéressantes lorsqu'elles sont réalisées par les étudiants eux-mêmes. Nous énumérons ici quelques exemples de concepts pouvant être illustrés par des démonstrations « classiques » dont la plupart fonctionnent mieux lorsqu'elles sont effectuées en utilisant un long *Slinky* métallique.



2.19 : CDSP, 2015.

### Différence entre ondes transversales et longitudinales

Pour créer une onde transversale, il faut étirer le *Slinky* au sol et l'agiter de gauche à droite de manière à créer des ventres et des creux (image de gauche). Pour l'oscillation longitudinale, celle qui correspond au son, il s'agit d'une déformation qui est parallèle à la direction de propagation de l'onde (image de droite). Autrement dit, il faut créer une zone de compression qui se déplacera dans le milieu élastique en agitant le *Slinky* par petits coups, d'avant en arrière.



2.20 : CDSP, 2015.



2.21 : CDSP, 2015.

### Amplitude

On peut utiliser le *Slinky* pour générer des ondes de différentes amplitudes. En augmentant ou en diminuant l'ampleur du mouvement transversal du *Slinky*, on crée des ondes de différentes amplitudes.

### Vitesse de propagation

Le *Slinky* peut être utilisé pour montrer qu'une déformation se propagera dans un milieu élastique à une certaine vitesse. Pour y arriver, il suffit de générer une impulsion transversale à une extrémité du *Slinky* et d'observer que la déformation ainsi créée se rend à l'autre extrémité. Sa vitesse dépendra des caractéristiques du milieu dans lequel elle se propage. Ainsi, on pourra faire varier la tension dans le *Slinky* et montrer qu'en l'augmentant, elle aura pour effet d'augmenter la vitesse de propagation de l'onde générée.

### Fréquence et longueur d'onde

Une onde peut être caractérisée par sa longueur d'onde et sa fréquence. Il est possible d'utiliser le *Slinky* pour générer des ondes transversales ayant différentes fréquences et longueurs d'onde. Si une personne fait osciller de manière continue une extrémité du *Slinky*, elle produira des ondes transversales avec une fréquence donnée. En augmentant la vitesse d'oscillation, la fréquence de l'onde générée sera plus grande. Toutefois, on remarquera qu'une augmentation de la fréquence aura pour effet de diminuer la longueur d'onde, puisque celle-ci est inversement proportionnelle à la fréquence selon la relation suivante :  $\lambda = v / f$ .

### Onde stationnaire et modes

En gardant une extrémité du *Slinky* fixe, puis en faisant osciller l'autre extrémité à une fréquence particulière, il sera possible d'observer la formation d'une onde stationnaire résonante dans le *Slinky*. En augmentant ou diminuant la fréquence, il est possible d'observer différents [modes d'oscillation](#).

### Résonance

Cette démonstration doit être préférablement réalisée avec un *Slinky* assez court. Le démonstrateur, en position debout, tient une extrémité du *Slinky* dans une main tandis que l'autre extrémité pend librement, sans toucher le sol. En faisant osciller la main (de haut en bas) tenant le *Slinky*, celui-ci se mettra aussi à osciller. Si la fréquence à laquelle la main mettant en mouvement le *Slinky* est près de la fréquence d'oscillation naturelle du *Slinky*, celui-ci oscillera avec une très grande amplitude. Par contre, en oscillant la main très rapidement (fréquence élevée) ou très lentement (fréquence très basse), l'extrémité libre du *Slinky* ne se déplacera presque pas. On illustre ainsi le phénomène de résonance, c'est-à-dire un système qui oscille avec une forte amplitude lorsqu'il est soumis à une force excitatrice périodique dont la fréquence se situe près de la fréquence d'oscillation naturelle du système.

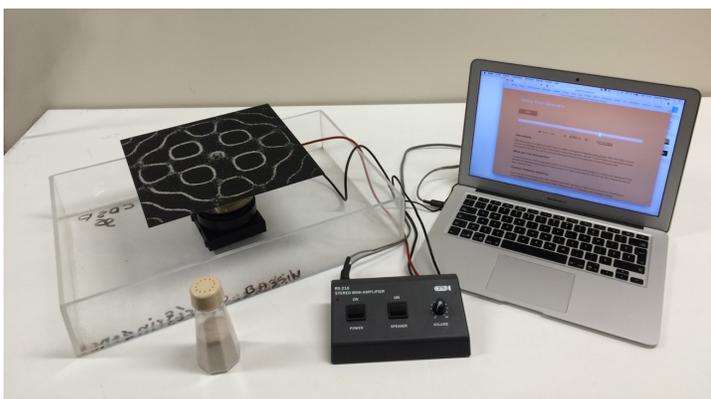
### Démonstration : Le mouvement du diapason

Lorsqu'un diapason est en vibration, il émet un son très pur contenant généralement peu d'harmoniques. Comme la fréquence d'oscillation du diapason est assez élevée et que l'amplitude de son mouvement est relativement faible, il est difficile d'observer directement la vibration du diapason. Pour se convaincre que le diapason effectue bel et bien un mouvement d'oscillation, on peut tremper un diapason en vibration dans un bol d'eau. Des éclaboussements d'eau seront alors générés puisqu'au lieu de mettre de l'air en mouvement, le diapason mettra de l'eau en mouvement.

On peut aussi observer le mouvement de vibration d'un diapason à l'aide d'un stroboscope réglé à une fréquence près de celle du diapason. On aura alors l'impression que le mouvement du diapason est ralenti, ce qui permettra d'en observer les détails. Pour mieux observer le phénomène, il est préférable d'utiliser un diapason dont la fréquence est assez faible (autour de 100 Hz).

### Démonstration : Les plaques de Chladni

Cette démonstration classique sur le son permet de visualiser les différents modes d'oscillation d'une plaque. Pour la réaliser, on utilise un [générateur d'ondes mécaniques](#) sur lequel est installée une mince plaque métallique. Le générateur d'ondes mécaniques peut alors être mis en mouvement par un générateur de fonctions en mode sinusoïdal. Un tel signal mettant en mouvement le générateur d'ondes mécaniques peut aussi être produit à l'aide de la sortie audio d'un ordinateur. Dans ce cas, il sera nécessaire d'utiliser également un petit amplificateur audio, puisque le signal généré par un ordinateur n'est



2.22 : CDSP, 2015.

pas assez puissant. Un signal sinusoïdal de fréquence variable peut être alors produit par l'ordinateur à partir d'un [site Web](#). La vibration transmise à la plaque produira des formes particulières selon le mode de vibration et la forme de la plaque (carrée ou circulaire). On pourra créer différents modes de vibration en variant la fréquence du signal.

L'expérience des plaques de Chladni pourrait aussi être réalisée en utilisant un archet pour faire vibrer la plaque. En frottant l'archet à différents endroits sur le côté de la plaque, on peut générer différents modes de vibration. Il est possible de forcer des nœuds de vibration en posant un doigt sur la plaque à certains endroits particuliers.

### C) Concepts scientifiques associés à la démonstration

- Fonction sinus
- Caractéristiques des ondes mécaniques
- Vitesse de propagation des ondes
- Nature des ondes sonores
- Résonance
- Ondes stationnaires (modes de vibration, ventres et nœuds)

### D) Informations et ressources complémentaires

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**L'Estrange-Turner, G. (1983).** *Nineteenth-century Scientific Instruments*. Berkeley : University of California Press. [Livre [disponible en ligne](#) sur *Google Livres*].

Cet ouvrage est magnifiquement illustré avec de nombreuses photographies d'instruments scientifiques du 19<sup>e</sup> siècle. Le chapitre 8 porte précisément sur la physique du son.

**Cantat, S. et Hillairet, L. (2012).** *Les figures « sonores » de Chladni*. Images des Mathématiques, CNRS. [En ligne : <http://images.math.cnrs.fr/Les-figures-sonores-de-Chladni.html>].

Cet article fort intéressant se retrouve sur le site *Images des Mathématiques*, qui est hébergé par le Centre national de la recherche scientifique (CNRS). Il présente une histoire plus détaillée des figures de Chladni d'un point de vue mathématique.

**Stöckmann, H.-J. (2007).** Chladni meets Napoleon. *The European Physical Journal Special Topics*, 145(1), 15-23. doi : 10.1140/epjst/e2007-00144-5

Cet article scientifique porte sur l'histoire de Chladni, un de ces rares scientifiques qui a permis, selon l'auteur, de susciter un engouement pour ses travaux à l'extérieur de la sphère professionnelle.

**Wikipédia. *Sophie Germain*.** [En ligne : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Sophie\\_Germain](http://fr.wikipedia.org/wiki/Sophie_Germain)].

L'histoire de Sophie Germain, une des exceptionnelles femmes mathématiciennes ayant réussi à se forger une place au sein de « l'élite scientifique » de son époque, alors presque exclusivement composée d'homme. Son histoire vaut la peine de s'y intéresser. Sa correspondance avec Gauss démontre, entre autres, la finesse d'esprit et l'acharnement de cette dame de science qui a résolu, en partie, l'énigme mathématique que posaient les figures de Chladni.

#### **LIENS UTILES**

**Générateur de signal sinusoïdal :** [<http://plasticity.szynalski.com/tone-generator.htm>]

Cet outil permet de générer très facilement des signaux sinusoïdaux (sons purs) à des fréquences particulières. Il est notamment utilisé pour faire la démonstration des plaques de Chladni.

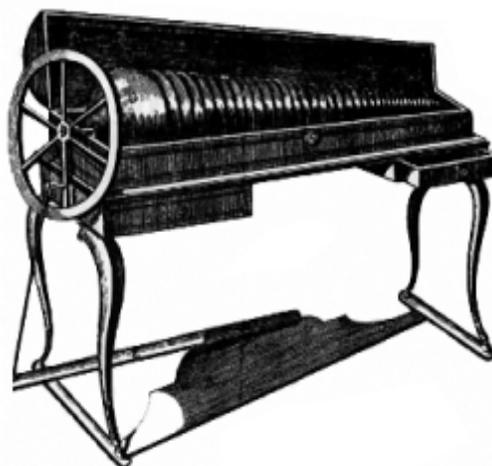
## THÈME 2 : LES INSTRUMENTS DE MUSIQUE

### FICHE : LES INSTRUMENTS DE MUSIQUE

#### A) Repères culturels

La créativité humaine s'exprime notamment dans la composition et l'interprétation de la musique, mais aussi dans la fabrication des instruments servant à jouer cette musique. Les humains ont en effet développé d'ingénieuses techniques pour arriver à produire une variété de sons donnant une couleur et une texture particulière à leur musique. Que serait la musique traditionnelle québécoise sans le violon, le folk américain sans le banjo, le jazz sans la trompette ou le rock sans la guitare électrique? Ainsi, chaque instrument de musique peut être associé à une époque, à une société ou à une culture qui a su exploiter les matériaux et les objets qui l'entouraient pour créer des musiques aux signatures particulières. C'est donc dire que l'incroyable diversité des instruments de musique qui existent est le résultat de la multiplicité des cultures que l'histoire humaine a connue.

Le perfectionnement des instruments modernes, comme le violon, peut souvent être associé à l'expertise et à l'intuition d'artisans ingénieux, dont le nom d'Antonio Stradivari est probablement le plus connu. Par ailleurs, il est intéressant de remarquer que d'importants scientifiques tels que Benjamin Franklin, Félix Savart, Ernst Chladni, Herman von Helmholtz et Lord Rayleigh, pour n'en nommer que quelques-uns, ont aussi contribué à perfectionner notre connaissance de l'acoustique et du fonctionnement des instruments de musique. Par exemple, on doit à Benjamin Franklin l'invention du *glassharmonica* en 1761. Cet instrument, formé de bols de verre rotatifs de différentes tailles, permet de produire différents sons un peu à la manière dont on fait chanter un verre en frottant son pourtour avec un doigt humide.



2.23 : Le *glassharmonica* de Benjamin Franklin.

On retrouve une très grande diversité dans les formes, les principes de fonctionnement et les matériaux utilisés pour fabriquer les instruments de musique. On peut classer les divers instruments dans quatre grandes familles, soit les cordophones, les idiophones, les membranophones et les aérophones. Les cordophones sont les instruments à cordes comme la guitare, le violon et la basse. Les aérophones sont les instruments à vent tels que les flûtes, les instruments à anche ou les cuivres. Les membranophones, comme les tambours, utilisent la vibration d'une membrane sur laquelle on frappe. Finalement, la famille des idiophones rassemble les autres instruments qui ne sont ni à cordes, ni à vent, ni à membranes et dont le corps de l'instrument peut résonner en entier afin de produire un son. Ces instruments sont faits de matériaux rigides tels que le bois et le métal. Le xylophone, les claves, la cymbale en sont quelques exemples. On classe donc les instruments selon l'élément principal qui produit le son et qui donne sa voix à l'instrument.

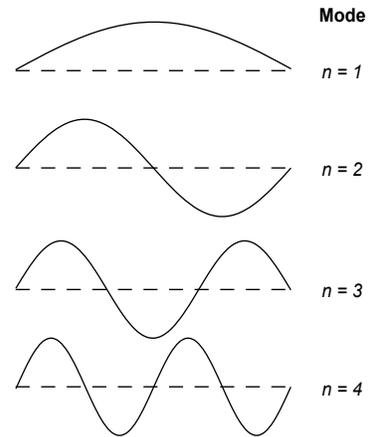
Peu importe la famille de l'instrument de musique, pour que celui-ci soit en mesure de produire des notes précises, une vibration doit être générée dans une partie de l'instrument de musique. Celle-ci est obtenue par la création d'une onde stationnaire dans une corde, dans une colonne d'air, dans une membrane ou dans le matériau formant l'instrument. En plus de la partie responsable de générer ces vibrations, tout instrument doit aussi être capable de projeter et d'amplifier le son de façon à ce qu'il soit suffisamment intense pour être entendu. Pour beaucoup d'instruments, la partie en vibration est indissociable de la partie qui projette le son. Par exemple, la vibration de la membrane du tambour produit le son et le projette en même temps. Par contre, comme la vibration d'une corde de guitare ne met pas en mouvement assez d'air pour produire un son suffisamment fort, on doit utiliser une caisse de résonance pour amplifier et projeter le son produit par les cordes.

### Les instruments à cordes (cordophones)

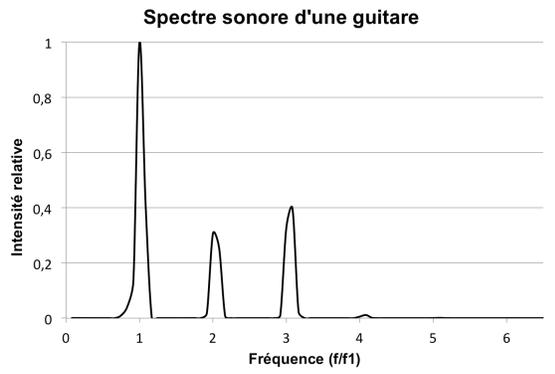
Les instruments à cordes occupent une place importante dans la musique. On les retrouve autant dans la musique populaire qu'au sein d'orchestres symphoniques. Lorsque l'on pince une corde ou qu'on la frotte à l'aide d'un archet, on génère dans celle-ci une onde stationnaire. Cette onde stationnaire est composée d'une superposition de différents modes de vibration étant possibles dans cette corde. Ces modes, dont les quatre premiers sont illustrés ci-contre, ont tous une fréquence qui est un multiple entier de la fréquence du mode fondamental ( $n = 1$ ). Pour une corde fixée aux deux extrémités, la fréquence de vibration d'un mode  $n$  de la corde dépend de sa longueur  $L$ , de sa tension  $T$  et de sa masse linéique  $\mu$  selon la relation suivante :

$$f = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

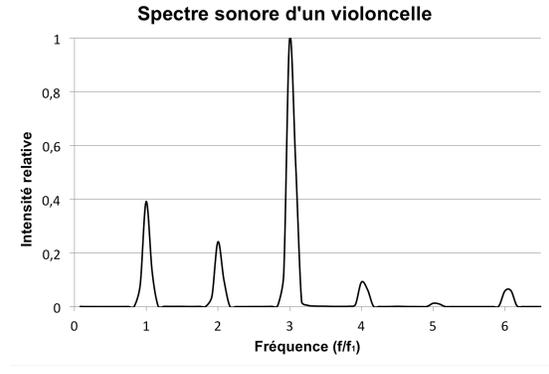
Ainsi, lorsque nous jouons la note *do* sur une guitare, l'onde stationnaire qui est produite dans la corde sera une superposition de vibrations à différentes fréquences. Par exemple, si le mode fondamental a une fréquence de 131 Hz, des modes de vibration plus élevés seront aussi présents avec des fréquences correspondant à des multiples entiers de la fréquence du mode fondamental, c'est-à-dire 262 Hz, 393 Hz, 524 Hz, 655 Hz, 786 Hz, etc. On peut remarquer que les modes générés ne correspondent pas tous à la note *do*. Par exemple, la fréquence de 393 Hz correspond à la note *sol*, la quinte de *do*. C'est donc dire que lorsque nous jouons une note sur un instrument de musique, une multitude de notes correspondant à différents modes de vibrations sont alors générées. Chacun de ces modes aura une intensité plus ou moins grande, donnant ainsi un timbre, soit une sonorité particulière à la note. Les intensités sonores pour les six premiers modes d'une guitare et d'un violoncelle jouant la même note sont présentées ci-dessous. On y remarque que des modes aux fréquences élevées sont plus prédominants pour le violoncelle, qui produit des sons que l'on perçoit comme étant plus riches que ceux produits par une guitare.



2.24 : Les quatre premiers modes de vibration d'une corde fixée aux deux extrémités.



2.25 : CDSP, 2015.



2.26 : CDSP, 2015.

Afin que le son généré par un instrument à cordes soit suffisamment fort pour être entendu, l'instrument doit aussi avoir une caisse de résonance. Cette caisse de résonance est en grande partie responsable du timbre qu'aura l'instrument. Par exemple, une plus grande caisse de résonance aura tendance à amplifier des sons plus graves, qui ont de plus grandes longueurs d'onde. Comme plusieurs autres facteurs sont également à considérer, la fabrication d'un instrument de musique à corde est complexe, et c'est le rôle du luthier de le concevoir afin qu'il soit adapté aux besoins du musicien.

### Les instruments à vent (aérophones)

Pour produire un son à l'aide d'un instrument à vent, une onde stationnaire résonante doit être générée à l'intérieur d'un tuyau. Pour y arriver, différents principes sont utilisés. Pour les cuivres, les lèvres du musicien agissent comme une valve, introduisant de courts jets d'air à la fréquence appropriée pour maintenir la vibration de l'air dans le tuyau. Certains bois utilisent la vibration d'une anche, tandis que les instruments s'apparentant aux flûtes profitent d'oscillations dans le jet d'air que l'on souffle dans l'embouchure du tuyau. Dans tous ces mécanismes, un phénomène de rétroaction entre l'oscillation de l'air dans le tuyau et l'entrée d'air par l'embouchure joue également un rôle important.

De la même façon qu'une corde aux extrémités fixes ne permet l'apparition que de certains modes d'oscillations ayant des fréquences précises, la vibration de l'air dans un tuyau ne se produira que pour certaines fréquences particulières. Ces fréquences sont essentiellement déterminées par la longueur du tuyau  $L$  ainsi que la vitesse  $v$  du son dans l'air. De plus, un tuyau dont l'extrémité est ouverte n'aura pas les mêmes fréquences de résonance qu'un tuyau fermé à une extrémité. Les relations suivantes permettent de calculer la fréquence des différents modes de résonance  $n$  dans un tuyau ouvert et fermé.

$$\text{Tuyau ouvert : } f_n = \frac{nv}{2L} \quad \text{où } n = 1, 2, 3, \dots$$

$$\text{Tuyau fermé : } f_n = \frac{nv}{4L} \quad \text{où } n = 1, 3, 5, \dots$$

Ainsi, un tuyau fermé à une extrémité ne peut produire que des modes qui sont des multiples impairs du mode fondamental  $n = 1$ . Ces relations sont toutefois des approximations qui ne tiennent pas compte de facteurs plus complexes comme la largeur du tuyau ou la présence d'un pavillon à l'extrémité du tuyau.

Comme pour les instruments à cordes, la fabrication d'instruments à vent est un véritable travail artisanal où de nombreux détails minutieux sont essentiels à la réalisation d'un instrument de qualité. L'entreprise québécoise [Casavant Frères](#), fondée en 1879, possède une expertise de renommée mondiale dans la fabrication d'orgues. Les nombreux tuyaux qui doivent être fabriqués pour construire un tel instrument le sont avec des techniques alliant sciences et techniques anciennes, dont certaines viennent du Moyen Âge, et ont été transmises de génération en génération. L'orgue construit récemment pour la Maison symphonique de Montréal, un des plus gros au monde, a nécessité la fabrication et l'assemblage de 6 489 tuyaux dont certains font plus de 10 mètres de long et pèsent jusqu'à 500 kg. L'assemblage, l'ajustement et l'accordage de tous ces tuyaux représentent un travail titanesque qui a pris plusieurs mois avant d'être terminé. La musique de cet instrument de 25 tonnes s'étirant sur quatre étages peut aujourd'hui être écoutée à Montréal, au grand plaisir des mélomanes.

### Des instruments de musique inusités

Les instruments de musique qui sont généralement utilisés aujourd'hui ont atteint un tel niveau de perfection et d'achèvement que l'on éprouve de la difficulté à s'imaginer leur bien plus modeste origine. Pourtant, les humains de toutes les époques et de toutes les cultures ont fabriqué des instruments de musique à partir de matériaux qui les entouraient. Par exemple, le charango, un instrument à cordes péruvien, était fabriqué à l'aide de la carapace d'un tatou, et les cordes de l'instrument étaient en fait de simples fils à pêche.

Quant à elles, les cordes des guitares étaient traditionnellement fabriquées à partir d'intestins de moutons. Par ailleurs, il est possible de fabriquer des instruments de musique à partir d'objets de notre quotidien. L'analyse du fonctionnement de ces instruments de musique peut s'avérer très intéressante, puisque les principes de base de l'acoustique y sont souvent plus faciles à cerner. Michel Lauzière et son groupe d'humoristes les Foubac ont fourni plusieurs exemples inventifs à ce sujet : une symphonie jouée par des pompes à vélo, une flûte fabriquée avec une poire à jus ou une [pièce de Mozart](#) jouée avec des bouteilles en patins à roues alignées. D'autres exemples tels que la scie musicale, l'arc musical ou la contrebassine sont tout aussi surprenants.

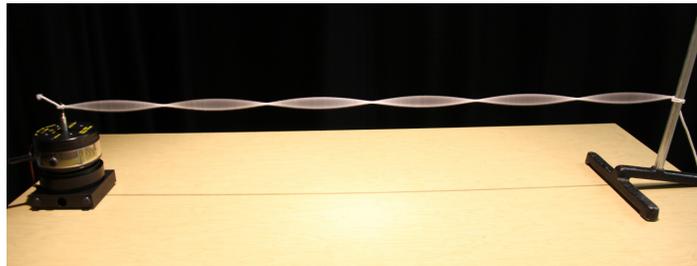


2.27 : Le charango était, à l'origine, fabriqué à partir de la carapace d'un tatou.

## B) Description et utilisation des démonstrations

### Démonstration : Onde stationnaire sur une corde

Dans ce montage classique, une extrémité de la corde est fixée à un générateur d'ondes mécaniques tandis que l'autre extrémité est attachée solidement à un objet fixe. Le générateur d'ondes mécaniques est mis en mouvement par un [signal sinusoïdal généré à l'aide d'un ordinateur](#) ou d'un générateur de fonctions. Pour certaines fréquences particulières, une onde stationnaire sera produite dans la corde. Plus la fréquence sera grande, plus le mode de l'onde stationnaire obtenue sera grand. On observera ainsi plus de nœuds et de ventres d'oscillation dans la corde. Un effet surprenant peut également être obtenu en observant l'oscillation de la corde à l'aide d'une lampe stroboscopique. Lorsque le flash de la lampe est réglé à une fréquence qui se trouve près de la fréquence d'oscillation de la corde, l'oscillation semble ralentir, voire presque s'arrêter.



2.28 : CDSP, 2015.

### Démonstration : La boîte à musique

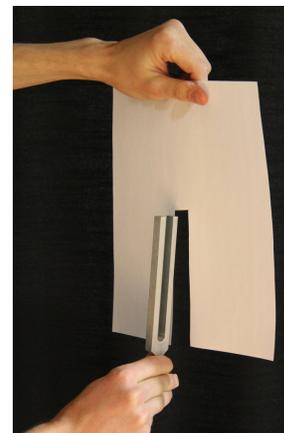
Certaines petites boîtes à musique (voir la figure ci-contre) sont vendues sans système permettant de produire un bon volume sonore. En effet, lorsque l'on tourne la manivelle de ces boîtes à musique, le son produit est très faible. On remarque toutefois que le simple fait de poser la boîte à musique sur une surface amplifie grandement le volume du son. L'effet est surprenant et permet d'illustrer le rôle important de la caisse de résonance des instruments de musique. C'est effectivement le même principe qui est mis à profit dans la caisse de résonance d'une guitare, par exemple, où l'on doit amplifier le son produit par les cordes, qui serait sinon trop faible pour être entendu.



2.29 : CDSP, 2015.

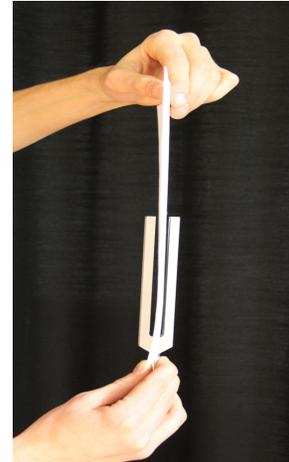
### Démonstration : Diapason et feuille de papier

Un diapason émet un son lorsqu'il est frappé sur une surface ou par un objet. L'intensité du son produit est toutefois très faible, généralement à peine perceptible. Ceci résulte du fait que les mouvements d'oscillation de chacune des branches du diapason sont déphasés de 180 degrés. Une méthode surprenante qui permet d'amplifier le son produit par le diapason consiste à l'approcher d'une feuille de papier dans laquelle une ouverture de la taille du diapason a été découpée.



2.30 : CDSP, 2015.

Lorsqu'une des branches du diapason se trouve dans l'ouverture de la feuille, celle-ci se met à vibrer en suivant le mouvement d'une seule branche. La feuille produit alors un son nettement perceptible. On remarque aussi que l'effet d'amplification produit par la feuille de papier disparaît presque complètement lorsque le centre du diapason est placé vis-à-vis de l'ouverture découpée dans la feuille de papier, de façon à ce que les branches du diapason soient de part et d'autre de la feuille (voir la figure 2.31). À ce moment, chacune des branches du diapason induit une vibration de la feuille. Comme les mouvements de chacune des branches ont des phases qui sont décalées de 180 degrés, la vibration résultante produite sur la feuille est donc nulle. Cette démonstration très simple permet donc d'illustrer des phénomènes qui sont relativement complexes tels que le déphasage, l'interférence et le couplage.



2.31 : CDSP, 2015.

### Démonstration : Le cistre chantant

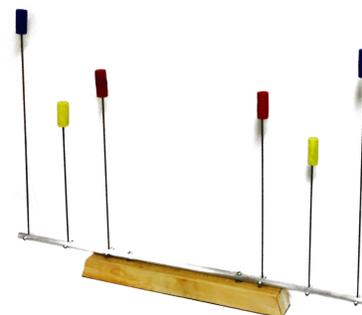
Cette démonstration permet d'illustrer assez simplement que le son peut se propager de façon très efficace dans un milieu solide. Pour fabriquer le montage, il suffit d'attacher deux ficelles longues d'environ un mètre à un cistre. On place ensuite l'extrémité libre de ces ficelles dans chaque oreille. En cognant le cistre, le son est transmis aux oreilles par les ficelles et non par l'air, ce qui permet de l'entendre beaucoup mieux. On montre ainsi que le son se propage aussi dans divers matériaux, souvent mieux que dans l'air.



2.32 : CDSP, 2015.

### Démonstration : Les tiges couplées

Ce montage permet d'illustrer le concept de résonance, en plus de permettre d'aborder le concept de couplage, c'est-à-dire l'influence entre deux oscillateurs ayant des fréquences de résonance semblables. Plusieurs tiges métalliques sont fixées à un tuyau, lequel est fixé à une base en bois. Pour chaque tige se trouvant d'un côté du tuyau, une tige de la même longueur est fixée de l'autre côté. Des bouchons de liège peints avec des couleurs voyantes sont fixés aux extrémités de chacune des tiges afin que leur mouvement soit plus évident à percevoir. Lorsque l'on met en mouvement une tige d'une certaine longueur, celle-ci se mettra à vibrer à sa fréquence d'oscillation naturelle déterminée par sa longueur. La vibration sera ensuite transmise par le tuyau à une autre tige qui possède la même fréquence d'oscillation naturelle, c'est-à-dire, une tige qui a la même longueur. Les autres tiges, celles de longueurs différentes, resteront à peu près immobiles.



2.33 : CDSP, 2015.

## Démonstration : La physique des bouteilles

Tout le monde à un jour tenté de souffler dans une bouteille de verre afin de produire un son. En ajoutant du liquide dans la bouteille, on remarque que le son devient de plus en plus aigu. On peut également produire un son avec la bouteille en la cognant sur le côté. Cette fois-ci, plus on ajoute du liquide dans la bouteille, plus le son deviendra grave. Cet effet surprenant s'explique par le fait qu'en soufflant dans la bouteille, c'est l'air qui résonnera dans la bouteille pour produire un son. Ainsi, plus il y aura de liquide dans la bouteille, plus l'espace occupé par l'air sera petit. L'onde stationnaire résonante dans la bouteille aura donc une plus courte longueur d'onde, c'est-à-dire qu'elle produira un son plus aigu. Si l'on cogne sur la bouteille, c'est la bouteille elle-même ainsi que l'eau qui se trouve à l'intérieur qui vibre. En ajoutant de l'eau, l'onde stationnaire résonante occupera plus d'espace et aura donc une longueur d'onde plus grande. Le son produit sera plus grave. On peut réaliser cette démonstration à l'aide de deux ou trois bouteilles de verre contenant une quantité différente de liquide.

Il n'est pas rare d'entendre des artistes de rue exploiter ces principes pour composer ou reproduire certains airs connus en utilisant des bouteilles ou des verres (voir en ce sens la vidéo de Michel Lauzière jouant Mozart en patins avec des bouteilles, dans la section Informations et ressources complémentaires).

## Démonstration : La scie musicale

L'idée d'utiliser une scie pour jouer des mélodies provient probablement d'un charpentier avec une âme artiste et illustre bien que l'être humain s'est toujours inspiré de son environnement pour inventer des instruments de musique. Bien qu'il existe aujourd'hui des scies spécialement adaptées pour jouer de la musique, sans dents et légèrement plus flexibles, n'importe quelle scie peut être utilisée pour jouer de la musique. Cet instrument fait partie de la famille des idiophones. On en joue assis, le manche en bois tenu entre les genoux. On plie ensuite la lame en forme de S avec une main, tandis que l'autre main est utilisée pour frotter la lame avec un archet. En saupoudrant du sel sur la lame de la scie, il est possible d'observer les modes de vibration de la lame, un peu comme on le fait pour l'expérience des tables de Chladni<sup>10</sup>. On s'aperçoit alors que la vibration s'effectue dans la direction transversale de la lame. La largeur de la scie ainsi que la tension dans la lame influencent la hauteur du son produit.



2.34 : CDSP, 2015.

---

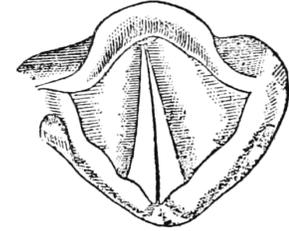
<sup>10</sup> Des vidéos de cette expérience se trouvent dans le dossier média de ce module.

## Démonstration : Cordes vocales

La voix peut être considérée comme un instrument de musique. Il est possible de fabriquer un modèle illustrant le fonctionnement des cordes vocales avec des matériaux très simples : un tube de plastique et un ballon de fête. On fixe le ballon à une extrémité du tube. On effectue ensuite une petite incision dans le ballon. En soufflant dans le tube, l'air circulant dans la fente fera vibrer le ballon qui émettra un son, comme le font nos cordes vocales.



2.35 : Modèle de cordes vocales. CDSP, 2015.



2.36 : Cordes vocales en position pour parler ou chanter.

## Démonstration : La flûte irlandaise (ou tinwhistle)

Le tinwhistle est une petite flûte à bec peu coûteuse que l'on retrouve chez à peu près n'importe quel détaillant d'instruments de musique. Cette flûte est constituée d'un tuyau métallique sur lequel une embouchure est fixée. La grande simplicité de l'instrument le rend particulièrement adapté pour réaliser quelques démonstrations sur les ondes stationnaires dans les tuyaux.

Dans ce type de flûte, le son est produit par une onde stationnaire générée à l'intérieur du tuyau. La fréquence  $f$  des différents modes  $n$  de cette onde est donnée par la relation suivante :

$$f = \frac{nv}{2L} \quad \text{où } v \text{ correspond à la vitesse du son dans l'air et } L \text{ à la longueur du tuyau}^{11}.$$



2.37 : CDSP, 2015.

<sup>11</sup> En pratique, cette relation n'est pas rigoureusement exacte, puisque la largeur du tuyau exerce également une certaine influence sur la fréquence du son produit.

Les différentes démonstrations suivantes permettent de vérifier l'influence de chacun des paramètres ( $n$ ,  $v$  et  $L$ ) sur la fréquence produite par la flûte.

### **Longueur du tuyau**

Lorsque l'on joue de la flûte, le fait de boucher ou non certains trous du tuyau permet de produire des notes différentes, c'est-à-dire de changer la fréquence du son produit. La longueur  $L$  de la partie du tuyau qui sera en résonance correspond à la distance entre l'embouchure et le premier trou ouvert. Par exemple, lorsque tous les trous sont fermés, c'est toute la longueur de la flûte qui est utilisée pour produire l'onde stationnaire. Si on retire quelques doigts posés sur les derniers trous de la flûte, la longueur  $L$  est diminuée et donc la fréquence est augmentée, ce qui est perçu par une note plus aiguë.

### **Vitesse du son**

La fréquence du son émit par la flûte dépend de la vitesse du son dans l'air. Celle-ci est influencée par la température. La température de l'air en résonance dans la flûte peut donc modifier la hauteur du son qui sera produit par la flûte. Pour vérifier cet effet, on joue une note lorsque la flûte est à la température de la pièce et on en mesure la fréquence. On refroidit ensuite la flûte dans de la glace et on joue la même note. La fréquence devrait alors diminuer un peu. Un spectrographe peut être nécessaire afin d'effectuer des mesures précises de fréquences, puisque l'effet est assez faible (environ 20 Hz de différence tout au plus). Un logiciel d'analyse sonore, comme ceux proposés dans les informations complémentaires de la fiche démonstration qui suit (fiche 4), peut être utilisé à cet effet.

### **Mode**

Plusieurs modes de résonance peuvent être générés dans une flûte telle que le tinwhistle. Bien que l'on utilise normalement le mode fondamental pour jouer des mélodies, en soufflant plus fort, on arrive à générer un son qui correspond à une onde stationnaire du second mode de résonance. La fréquence est alors deux fois plus élevée qu'au mode fondamental. On peut aussi atteindre des modes supérieurs en soufflant encore plus fort. Ces modes auront des fréquences qui sont toutes des multiples de la fréquence du mode fondamental.

### **Tuyau ouvert et fermé**

La fréquence de l'onde stationnaire générée à l'intérieur d'un tuyau dépend du fait que son extrémité soit ouverte ou fermée. On peut transformer l'extrémité ouverte du tinwhistle en extrémité fermée simplement en la trempant dans de l'eau. La fréquence du son généré par le mode fondamental ( $n = 1$ ) d'un tuyau fermé devrait correspondre à la moitié de la fréquence du mode fondamental du même tuyau lorsqu'il est ouvert.

On peut aussi vérifier, à l'aide d'un spectrographe, que le son produit par un tuyau ouvert aura des harmoniques dont les fréquences seront toutes des multiples entiers de la fréquence de la note jouée. Par exemple, si l'on joue un *la* à 440 Hz, on observera des harmoniques à 880 Hz, 1320 Hz, 1760 Hz, etc. Par contre, un tuyau fermé ne produira que des harmoniques qui sont des multiples impairs de la note jouée. Ainsi, si l'on joue un *la* à 440 Hz, les harmoniques qui seront observées se trouveront à 1320 Hz, 2200 Hz, 3080 Hz, etc.

## C) Concepts scientifiques associés à la fiche

- Ondes stationnaires (sur une corde et dans un tuyau)
- Résonance
- Couplage, déphasage et interférence
- Nature des ondes sonores

## D) Informations et ressources complémentaires

**Générateur de signal sinusoïdal :** [<http://plasticity.szynalski.com/tone-generator.htm>]

Cet outil permet de générer très facilement des signaux sinusoïdaux (sons purs) à des fréquences particulières. Il est notamment utilisé pour faire la démonstration d'une onde stationnaire sur une corde.

**Vidéo d'une performance de Michel Lauzière :** [<https://www.youtube.com/watch?v=moFr60mcYxM>]

Michel Lauzière est un humoriste, musicien et performeur québécois. Il s'est produit dans près de 45 pays où il performe surtout dans l'art de présenter des musiques avec des instruments inusités. Une de ses performances célèbres, présentée pour la première fois en 2006 à l'émission de David Letterman, est sa symphonie n° 40 de Mozart jouée sur des bouteilles de vin qu'il cogne successivement avec des tiges attachées à ses patins à roues alignées.

**Orgue de la Maison symphonique de Montréal construit par Casavant Frères:** [[http://www.buzzons.ca/reportage\\_qs/Orgue-et-delices](http://www.buzzons.ca/reportage_qs/Orgue-et-delices)]

Lorsqu'on parle des ondes stationnaires dans un tuyau fermé ou ouvert, il pourrait être intéressant de référer à l'orgue construit pour la Maison symphonique de Montréal, qui a été inauguré en 2014. C'est le plus imposant orgue jamais construit par le facteur québécois Casavant Frères. Il s'agit d'un des plus grands orgues à traction mécanique au monde. Il ne compte pas moins de 6 489 tuyaux. Certains des tuyaux s'étirent sur près de 10 mètres, pèsent presque 500 kg. Ils sont en métal comme en bois, de forme cylindrique, conique ou carrée, et disposés à la verticale ou à l'horizontale. Cet orgue est le 3 900<sup>e</sup> à être commandé à la maison de Saint-Hyacinthe des frères Casavant, fondée en 1879. Étonnamment, leur méthode de fabrication des orgues n'a pas changé depuis l'époque des frères, soit au tournant du XX<sup>e</sup> siècle, et leurs techniques n'ont pas beaucoup évolué depuis le Moyen Âge. Un article sur le sujet a été publié dans l'édition d'octobre 2013 du magazine *Québec Science*, dont on peut trouver un aperçu à l'adresse ci-haut.

## THÈME 2 : LES INSTRUMENTS DE MUSIQUE

### FICHE : L'ARC MUSICAL

#### A) Repères culturels

L'arc est une arme dont l'origine est fort ancienne (environ 20 000 ans). On peut facilement s'imaginer que les premiers hommes ayant tendu une corde à une branche pour se fabriquer un arc ont remarqué que celle-ci pouvait émettre un son lorsqu'elle était pincée. Il n'en fallait probablement pas plus pour que le premier instrument de musique à corde voie le jour : l'arc musical.



2.38 : Joueur d'arc musical africain.

Lorsque l'on pince une corde fixée à ses deux extrémités, des ondes stationnaires sont générées, produisant un son ayant une note précise. Toutefois, l'intensité de ce son est relativement faible, à moins qu'une caisse de résonance ne soit ajoutée à l'instrument. Avec l'arc musical, c'est généralement la bouche du musicien qui est utilisée comme caisse de résonance pour amplifier le son produit par la vibration de la corde.

Bien que son origine remonte à la préhistoire, on retrouve encore cet instrument dans la musique traditionnelle de plusieurs cultures du monde. Aux États-Unis, la région des Appalaches (Virginie, Caroline, Kentucky, etc.) possède une riche culture de musique traditionnelle où l'arc musical, appelé *mouthbow*, est encore utilisé. L'artiste [Buffy Ste-Marie](#) est probablement la musicienne à laquelle cet instrument est le plus souvent associé. Son usage en Amérique remonterait à l'arrivée des esclaves d'Afrique. D'ailleurs, on joue encore de l'arc musical dans différentes régions de l'Afrique. Par exemple, chez les Akélés, un groupe ethnique du Gabon, un rite initiatique consiste à fabriquer un arc musical appelé *ngongo*. Pour de nombreuses cultures, et en particulier celles dont l'évolution se situe hors du contexte historique de la musique savante occidentale, la musique est intimement liée au sentiment du sacré.

On sait également que plusieurs instruments de musique anciens, comme les rhombes ou les tambours, étaient à l'origine destinés à effrayer les personnes non initiées à certains rites guerriers. L'arc musical en est justement un exemple intéressant. Dans l'Inde antique, certains arcs étaient dotés de caisses de résonance formées de fruits creux qui participaient de manière importante à la terreur que pouvaient inspirer certains grands guerriers sur les champs de bataille. L'épopée indienne Mahâbhârata raconte que l'arc du terrible Arjuna produisait un son qui suffisait à faire fuir bien des ennemis...



2.39 : Peinture d'Arjuna « le terrible » contre Jayadratha lors de l'épopée indienne Mahâbhârata.

## B) Description et utilisation de la démonstration

### Démonstration : L'arc musical

L'arc musical est un instrument de musique constitué d'une corde fixée aux deux extrémités d'une pièce de bois (l'arc) et pouvant être tendue. La tension de la corde se règle à l'aide de la clé située à une des extrémités de l'arc. La tension et la longueur de la corde étant fixes lorsqu'on en joue, on ne peut donc pas modifier la fréquence fondamentale  $f$  de vibration de la corde.



2.40 : CDSP, 2015.

Un des éléments surprenant de la démonstration est la grande augmentation du volume des sons produits par l'instrument lorsque celui-ci est couplé à une caisse de résonance, généralement la bouche du musicien. Ainsi, on peut d'abord présenter l'objet en faisant vibrer la corde de l'arc sans utiliser la bouche comme caisse de résonance. Ensuite, en collant l'arc sur différents objets (comme une table, une chaise ou la bouche du manipulateur) avant de faire vibrer la corde, on peut montrer qu'à peu près tous les objets en contact avec l'arc peuvent agir comme caisse de résonance pour l'instrument.

Il peut être intéressant de poser la question suivante : est-il possible de produire différentes notes avec ce simple dispositif? Effectivement, on remarque qu'il est possible de produire différentes notes avec l'instrument lorsqu'on ouvre plus ou moins grand la bouche, modifiant ainsi la forme de cette caisse de résonance. Lorsque la bouche est légèrement ouverte, des notes graves sont produites; plus on ouvre la bouche, plus les notes deviennent aiguës. Comme on ne change ni la longueur, ni la tension, ni la masse de la corde, le seul paramètre qui est modifié est le mode de vibration de la corde, qui est principalement amplifié. On montre ainsi que lorsqu'une corde est en vibration, l'onde stationnaire qui y est générée correspond à une superposition de plusieurs modes. La forme variable de la caisse de résonance permet d'amplifier et d'entendre un mode précis à la fois. L'arc musical peut donc produire une succession de notes liées à l'intervalle musical entre chacun des modes sans que la fréquence fondamentale de vibration de la corde soit modifiée. Dans l'ordre du plus grave au plus aigu, les modes que l'on entend sont les suivants :

$f$	→	tonique
$2f$	→	octave
$3f$	→	octave + quinte
$4f$	→	deuxième octave
$5f$	→	deux octaves + tierce majeure
$6f$	→	deux octaves + quinte

Lors de la démonstration, il est possible d'utiliser un micro branché à un ordinateur équipé d'un logiciel (comme [AudioXplorer](#) ou [Audio Spectrum Analyser](#)) permettant d'afficher en temps réel le spectre du son capté. On pourra ainsi observer les fréquences et les amplitudes des différentes harmoniques produites par l'arc musical et constater que les différentes notes produites par l'instrument sont des multiples entiers d'une fréquence fondamentale.

## C) Concepts scientifiques concernant la fiche

- Ondes stationnaires dans une corde

La fréquence  $f$  des ondes stationnaires pouvant être générées sur une corde fixée aux deux extrémités peut être déterminée à l'aide de la relation suivante :

$$f = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

où  $n$  est un entier correspondant au numéro du mode de vibration de la corde,  $L$  est la longueur de la corde,  $F$  est la grandeur de la force de tension dans la corde et  $\mu$  est la masse linéique de la corde.

- Harmoniques et modes de vibration
- Spectre sonore
- Résonance

## D) Informations et ressources complémentaires

### LIENS UTILES

#### Vidéos sur l'arc musical africain :

[<https://www.youtube.com/watch?v=9BALU9Xu7Ho>]

[<https://www.youtube.com/watch?v=M4utzIywV4E>]

Voici deux vidéos intéressantes montrant des joueurs d'arc musical africain. Le premier lien permet d'apprécier la performance d'un joueur d'arc musical talentueux, tandis que le deuxième est un court documentaire sur la tradition des Akélé concernant l'arc musical et leur rite initiatique du Bwiti.

**Vidéo sur l'arc musical dans la musique des Appalaches :** [[https://www.youtube.com/watch?v=LXkM11kp\\_tg](https://www.youtube.com/watch?v=LXkM11kp_tg)]

Cette vidéo est un extrait de l'émission américaine Sesame Street et met en scène l'artiste Buffy Ste-Marie, une des plus célèbres joueuses d'arc musical en Amérique.

**Vidéo sur les harmoniques dans la vibration d'une corde :** [<https://www.youtube.com/watch?v=sPOLR60ADs8>]

Cette courte vidéo, produite par eduMedia, illustre et résume très bien le concept d'harmonique, dans le cas de la vibration d'une corde. Il est en français.

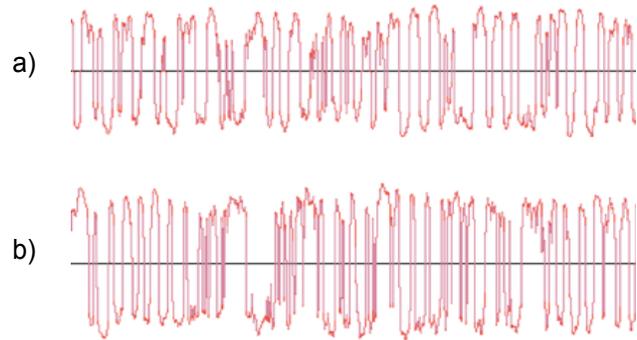
#### Logiciels d'analyse sonore :

*AudioXplorer* : logiciel gratuit pour l'analyse sonore pour Mac. [<http://www.arizona-software.ch/audioplayer/>]

*Audio Spectrum Analyser* : logiciel gratuit pour l'analyse sonore pour Windows. [<http://www.techmind.org/audio/specanaly.html>]

## 2.3 Perception et interprétation des sons et de la musique

Lorsqu'une personne discute avec une autre, elle produit de toutes petites perturbations dans l'air se trouvant à sa proximité. Les petites variations de pression ainsi causées, d'à peine quelques parties par million, voyagent dans l'air jusqu'aux oreilles de l'auditeur. En une fraction de seconde, et seulement grâce à ces petites vibrations dans l'air, le système auditif de la personne qui écoute lui permet de déterminer la nature du son qu'elle entend, de reconnaître l'individu en train de lui parler, de comprendre le message qui lui est transmis et même d'en juger l'émotion, le sarcasme ou l'ironie qui y est dissimulée.



2.41 : Trace sonore produite par a) une foule de gens en train de discuter; b) un extrait de la 9<sup>e</sup> symphonie de Beethoven. CDSP, 2015.

Sans difficulté, on admet que l'oreille humaine est un organe sophistiqué qui possède des capacités tout à fait exceptionnelles. Celle-ci est constituée de plusieurs structures minuscules qui permettent de capter les sons, de les amplifier et d'en déterminer la fréquence et l'amplitude. Jumelé à ce système se trouve un réseau neuronal complexe qui permet de traduire les sons captés par les deux oreilles en un influx nerveux. Ce signal est ensuite analysé par le cerveau, ce qui permet de lui donner du sens.

Grâce à notre système auditif, nous sommes d'ailleurs capables de distinguer quasi instantanément une symphonie d'un bruit ambiant (voir figure ci-dessus). Pourtant, lorsqu'on observe la trace sonore de ces deux sons, correspondant à la variation de pression dans l'air en fonction du temps, il est à peu près impossible de les différencier l'une de l'autre. Ainsi, pour arriver à apprécier la musique, notre système auditif doit non seulement nous permettre de juger les caractéristiques physiques des sons, comme la fréquence et l'amplitude, mais doit également effectuer un grand nombre de tâches complexes. Par exemple, il réussit aisément à associer un timbre sonore à un certain type d'instrument de musique, et ce, tout en localisant la position des différentes sources sonores et en effectuant des regroupements rythmiques.

Avec l'essor récent des sciences neurologiques, on commence peu à peu à comprendre les mystères du « cerveau musical ». À ce sujet, il a été démontré que le cerveau traite séparément certains attributs de la musique comme le tempo, le contour, le timbre, le volume et la réverbération. Autrement dit, chacun de ces attributs contenus dans une pièce musicale peut être modifié sans altérer les autres. La différence qui existe entre la musique et un ensemble de sons désordonnés réside donc dans la combinaison de ces attributs fondamentaux et dans la relation qui se crée entre eux. Lorsque leur agencement permet de créer du sens, ils engendrent des concepts plus élevés comme la mesure, la tonalité ou encore la mélodie. Autrement dit, le cerveau possède l'incroyable faculté de percevoir et d'interpréter la musique en détectant les intervalles, le contour d'une mélodie, la consonance d'un air et même l'émotion qu'elle porte.

Si l'écoute de la musique constitue une activité stimulante pour le cerveau, le fait de jouer de la musique est d'autant plus exigeant. Il semble en effet qu'une personne qui joue de la musique doit solliciter simultanément plusieurs régions du cerveau comme la mémoire, le langage et le système moteur. Par exemple, un musicien de jazz improvisant au saxophone doit être en mesure d'interpréter la musique qu'il entend, et ce, afin de réagir en temps réel pour créer une mélodie qu'il jouera sur son instrument en exécutant des mouvements précis de ses doigts et de sa bouche. Ces tâches hautement complexes, effectuées de façon presque instantanée, nécessitent énormément de répétitions et de concentration chez le musicien. Des études faites par résonance magnétique sur le cerveau d'un musicien en action ont d'ailleurs permis d'observer qu'un véritable feu d'artifice se produit dans son cerveau lorsqu'il joue de la musique. La pratique d'un instrument aurait même plusieurs effets bénéfiques permanents sur le développement de certaines facultés cognitives.

Bien qu'un petit nombre d'êtres humains soient dépourvus de l'équipement neurologique pour apprécier les tonalités ou les mélodies, l'immense pouvoir de la musique s'exerce sur tous les autres (ou presque!). Dès la petite enfance, cette propension à la musique est évidente, comme en témoignent de nombreuses [vidéos en ligne](#). De récentes recherches ont démontré que les bébés ont une perception musicale très fine, et il semble que l'apprentissage qu'ils font d'une langue passerait d'abord par sa musicalité. La musique est manifeste et centrale dans toutes les cultures et remonte donc vraisemblablement à l'origine de notre espèce...

## THÈME 3 : L'ÉTONNANTE OREILLE

### FICHE : LA PERCEPTION SPATIALE DU SON

#### A) Repères culturels

» La nature nous a donné une langue et deux oreilles afin que nous écoutions le double de ce que nous disons. » Bien qu'on ne puisse nier la pertinence de ce conseil, énoncé par le philosophe grec Zénon, il semble que nous possédions deux oreilles surtout pour nous permettre de localiser la source d'un son dans l'espace.

Observer [un renard arctique](#) essayant de localiser sa proie sous la neige en utilisant uniquement son sens aiguïté de l'ouïe ou encore savoir qu'une [chouette effraie](#) pivote si subtilement la tête pour « entendre la position » de sa proie a quelque chose de fascinant. La précision avec laquelle ces animaux parviennent à déterminer la position de la source d'un son est en effet remarquable. Les yeux fermés, un être humain est lui aussi capable de déterminer avec une grande précision la position d'une source sonore. Pour arriver à une telle prouesse, le cerveau doit constamment interpréter les subtiles différences entre l'intensité et la phase des sons perçus par chacune de nos oreilles.

Il est intéressant de savoir que la distance entre nos oreilles joue un rôle important dans notre capacité à localiser la position d'un son. Par exemple, en utilisant un système de tuyaux permettant de capter des ondes sonores qui sont séparées par des distances plus importantes que ce que nos oreilles peuvent normalement atteindre, on arrive à augmenter notre capacité à discerner l'emplacement d'une source sonore. De tels systèmes furent notamment utilisés au début du XX<sup>e</sup> siècle, durant la Première Guerre mondiale, afin de détecter la présence d'avions ennemis dans le brouillard. Les Allemands ont d'ailleurs exploité ce principe de façon remarquable afin de construire un véritable radar acoustique, le *Ringrichterrichtungshoerer* ou RRH (voir ci-contre), qui pouvait détecter la position d'un avion se trouvant à des distances entre 5 et 12 km, et ce, avec une précision de seulement deux degrés. Durant les années 1930, l'invention du radar utilisant plutôt les ondes électromagnétiques a bien sûr rendu désuets ces ingénieux dispositifs.



2.42 : Chouette effraie.



2.43 : Système de radar acoustique.

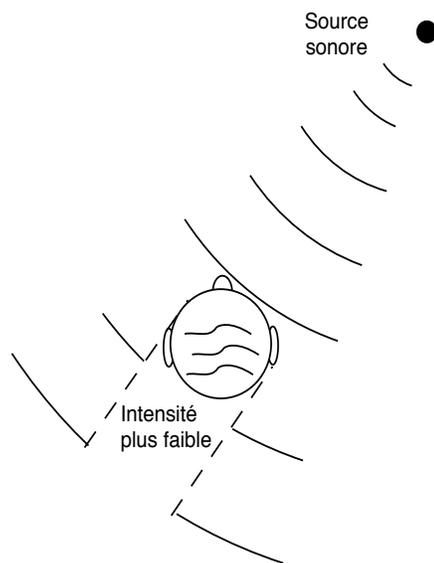


2.44 : Le RRH, un radar acoustique.

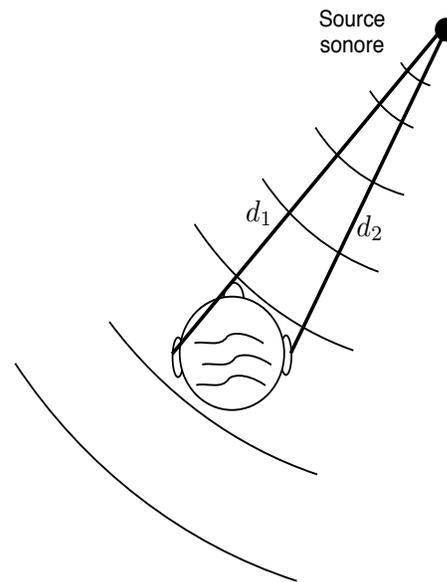
On retient que Lord Rayleigh (1842-1919) fut le premier scientifique à fournir une explication à propos de notre faculté de perception spatiale du son. Notre cerveau exploite en fait deux phénomènes pour localiser la source d'un son : la différence d'intensité et le délai entre les sons perçus par chacune des oreilles.

Lorsqu'un son atteint d'abord un côté de notre tête, l'intensité perçue sera plus grande dans l'oreille se trouvant du côté de la source. Ceci résulte du fait que la tête bloque une partie du son qui aurait atteint l'autre oreille (voir la première figure ci-dessous). Cette différence d'intensité est interprétée par le cerveau et permet ainsi de localiser la source. À des fréquences inférieures à 1000 Hz, cet effet devient toutefois moins important en raison de la diffraction des ondes sonores autour de la tête puisqu'à 1000 Hz, la longueur d'onde du son devient comparable à la taille de la tête.

Par ailleurs, un son qui est émis d'un certain côté arrivera forcément à une oreille avant l'autre (voir la deuxième figure ci-dessous). Notre cerveau exploite cette différence pour localiser un son à des fréquences inférieures à 1000 Hz. Étonnement, il ne suffit que d'un délai inférieur à deux millisecondes entre la perception du son par chacune des oreilles pour que l'on puisse détecter avec précision la position de la source sonore. Le [modèle de Jeffress](#) permet d'expliquer de quelle manière notre cerveau arrive à analyser ces délais si courts.



2.45 : Localisation d'une source sonore grâce à la différence d'intensité entre le son capté par chacune des oreilles. CDSP, 2015.



2.46 : Localisation d'une source sonore grâce au délai entre le son capté par chacune des oreilles. CDSP, 2015.

## B) Description et utilisation des démonstrations

### Démonstration : Les grandes oreilles

Un protecteur auditif est percé de façon à y introduire un entonnoir pour chacune des oreilles. Cet entonnoir permet de mieux capter les sons autour de nous. Le sens de l'ouïe de la personne portant ce casque sera accru. Elle pourra ainsi entendre des sons de très faible intensité et en discerner la position facilement.



2.47 : CDSP, 2015.

Ce système permet de capter une plus grande partie de l'énergie des ondes sonores émises et donc de percevoir plus facilement des sons très faibles. La distance entre les deux « grandes oreilles » captant le son est également augmentée, ce qui devrait en principe nous permettre de mieux localiser des sons, à la façon des opérateurs de radar acoustiques. Notons par contre que ces derniers se sont probablement longuement entraînés à localiser les sons et parions qu'ils ont été sélectionnés en fonction de leur « oreille »!

La démonstration est assez simple à utiliser. Il ne s'agit que de demander à un élève de porter le casque et d'exprimer ce qu'il perçoit. On peut ensuite lui demander d'essayer, les yeux bandés, de localiser la source d'un son. Il peut aussi être intéressant de proposer au reste de la classe de demeurer relativement silencieuse, en ne produisant que quelques sons très faibles, comme le froissement d'une feuille ou le craquement d'une chaise. L'élève aux « grandes oreilles » sera alors probablement surpris de l'intensité de ces sons, normalement presque imperceptibles.

### Démonstration : Les oreilles non synchronisées

Un protecteur auditif est encore utilisé pour cette deuxième expérience. Ici, le son est capté par un unique entonnoir, puis il est séparé dans deux tuyaux de longueurs différentes reliés à chacune des oreilles. Avec une différence de 20 cm entre les deux tuyaux, le son atteint l'oreille reliée au tuyau le plus court 0,6 ms avant l'oreille reliée au tuyau le plus long. Ce très court délai sera alors interprété par le cerveau, comme expliqué plus haut, en donnant l'impression que la position de la source sonore se situe du côté de l'oreille où le son est arrivé en premier.



2.48 : CDSP, 2015.

Pour cette démonstration, il est suggéré de ne pas montrer le montage préalablement à la classe. On demande d'abord à un élève volontaire de s'asseoir sur une chaise, idéalement pivotante, avant de lui bander les yeux et de le faire tourner quelques fois sur lui-même. Cette ruse lui fera perdre ses repères. On lui demande alors de mettre le casque sur sa tête. Par la suite, le démonstrateur, placé à une certaine distance de l'élève, peut parler ou produire un son tout en demandant à l'élève d'indiquer à quel endroit selon lui la source du son est située. Le démonstrateur peut ensuite se déplacer autour de l'élève en lui demandant d'indiquer d'où vient le son. En général, l'élève sera porté à croire que le son provient du côté où l'oreille est reliée par un tuyau plus court à l'entonnoir. Toutefois, comme cet effet est relativement subtil, il se peut que cette démonstration fonctionne moins bien avec certains élèves.

## C) Concepts scientifiques associés à la fiche

- Vitesse du son
- Nature des ondes sonores
- Intensité sonore
- Déphasage et différence de marche
- Diffraction

## D) Informations et ressources complémentaires

**Vidéo d'un renard:** [<https://www.youtube.com/watch?v=dP15zlyra3c>]

Extrait du reportage *Yellowstone*, produit par la BBC, montrant un renard tentant de détecter la position de sa proie sous un couvert de neige.

**Animation du modèle de Jeffress :** [<http://auditoryneuroscience.com/topics/jeffress-modelanimation>]

Cette animation issue du site *Auditory Neuroscience*, une source riche d'informations concernant la perception et l'interprétation des sons et de la musique, présente le modèle de Jeffress de manière très simplifiée (il s'agit bien d'un modèle). Il explique comment la localisation spatiale des sons est possible en fonction du délai entre la réception des sons par chacune des oreilles.

**Données et informations sur la localisation spatiale du son :** [<http://auditoryneuroscience.com/topics/acoustic-cues-sound-location>]

Cette page, elle aussi issue du site *Auditory Neuroscience*, permet d'aller plus loin sur la question des modèles utilisés pour comprendre le rôle du cerveau dans la géolocalisation des sons.

**Les radars acoustiques :** [<http://www.douglas-self.com/MUSEUM/COMMS/ear/ear.htm>]

Cette page, tirée du site du *Museum of RetroTechnology*, présente différents modèles de radars acoustiques qui ont notamment été utilisés lors de la Première Guerre mondiale. Il est intéressant de voir ces nombreux appareils devenus obsolètes avec la venue du radar moderne, utilisant des ondes électromagnétiques plutôt que des ondes sonores (mécaniques).

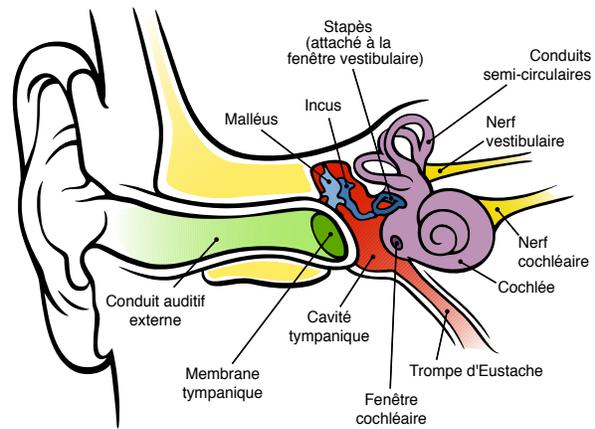
# THÈME 3 : L'ÉTONNANTE OREILLE

## FICHE : LE FONCTIONNEMENT DE L'OREILLE

### A) Repères culturels

On dit souvent que pour devenir un musicien talentueux, il est nécessaire d'avoir l'oreille musicale. Pourtant, même certaines personnes possédant une excellente acuité auditive peuvent néanmoins avoir beaucoup de difficulté à évaluer la justesse d'une harmonie musicale. Notre système auditif, bien que doté de facultés remarquables, joue un rôle que l'on peut grossièrement résumer à celui d'un microphone, en ce sens qu'il sert à capter des ondes sonores pour les transformer en signal électrique.

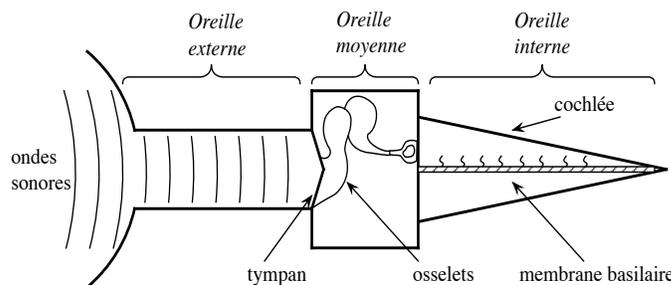
L'interaction de notre système auditif avec le cerveau est ce qui nous donne la capacité incroyable de décoder ce que nous entendons. Le fait d'avoir ou non une oreille musicale ne serait donc pas tellement relié à nos oreilles, mais plutôt à ce qu'on a entre les deux oreilles!



2.49 : Schéma anatomique de l'oreille.

L'oreille, en tant que récepteur et transducteur, est un appareil hautement sophistiqué, robuste et extrêmement sensible. À certaines fréquences, il est possible de percevoir des sons faisant osciller notre tympan (une simple membrane tendue sur des tissus et des os) à une amplitude aussi faible que  $10^{-11}$  m, soit environ 1/10 du diamètre d'un atome d'hydrogène! C'est le seuil de l'audition. À l'opposé, notre oreille est également capable d'entendre des sons dont l'intensité est un million de millions ( $10^{12}$ ) de fois plus grande<sup>12</sup>. C'est ce qui explique pourquoi nous utilisons généralement l'échelle des décibels, une échelle logarithmique, pour mesurer l'intensité d'un son.

Il semble utile de se rappeler que toutes nos impressions (ou presque) du monde auditif, allant de la profonde émotion que nous procure l'écoute d'une mélodie jusqu'au sentiment d'agression provoqué par un bruit désagréable, ne sont après tout que le résultat d'une multitude de collisions entre des molécules d'air et notre tympan. Il est étonnant de réaliser que le cerveau, à partir de cet amas désordonné de molécules percutant une membrane, soit en mesure de déterminer ce qui se passe dans le monde extérieur et même d'interpréter la musique.

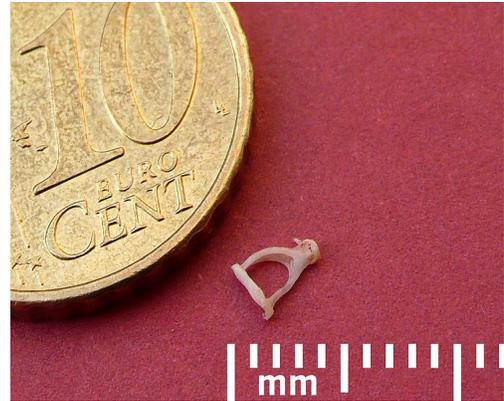


2.50 : Schéma simplifié des structures de l'oreille. CDSP, 2015.

<sup>12</sup> Notons que l'intensité d'un son est proportionnelle au carré de son amplitude.

Pour comprendre le processus qui nous permet d'entendre, nous devons d'abord explorer le fonctionnement de l'oreille, qu'on divise généralement en trois structures : l'oreille externe, l'oreille moyenne et l'oreille interne. Le schéma de la page précédente illustre ces structures de façon simplifiée.

Les ondes sonores sont canalisées par le pavillon de l'oreille vers le conduit auditif externe et atteignent la membrane tympanique. La vibration du tympan met en mouvement les osselets (marteau, enclume et étrier) qui sont organisés en système de leviers et qui servent à amplifier les vibrations du tympan. Notons que ces osselets sont les plus petits du corps humain et que le diamètre d'une branche de l'étrier n'est que deux fois celui d'un cheveu. Cette vibration amplifiée est transmise à la cochlée et aux cils qui s'y trouvent, dont le rôle est ensuite de transformer les vibrations en impulsions nerveuses pouvant être analysées par le cerveau.



2.51 : Étrier d'une oreille humaine.

La membrane basilaire se situant à l'intérieur de la cochlée contient environ 14 000 cellules ciliées formant le nerf auditif. Celle-ci est plus rigide à sa base qu'à son sommet, ce qui lui permet d'agir comme un analyseur du spectre sonore. En effet, lorsque la cochlée est soumise à un son ayant une haute fréquence, la partie plus rigide de la membrane basilaire entrera en vibration, mettant en mouvement les cils se trouvant à cet endroit (voir la démonstration du modèle de la cochlée). À l'opposé, si un son de basse fréquence est capté par l'oreille, ce sont les cils situés à l'autre extrémité de la membrane basilaire qui se mettront alors à vibrer. Une telle structure permet ainsi d'encoder l'information fréquentielle d'un signal sonore capté par l'oreille.

La gamme de fréquences pouvant être perçue par l'oreille varie beaucoup d'une personne à l'autre. On considère généralement que le spectre des sons audibles s'étend de 20 Hz à 20 000 Hz. Toutefois, il est plutôt rare que des gens soient capables de percevoir des sons sur une plage aussi étendue. En effet, les cils de l'oreille interne étant plus fins que les cheveux, ceux-ci s'abîment à mesure que l'on vieillit ou s'ils sont exposés à des sons trop forts, trop souvent ou trop longtemps. L'oreille perd alors peu à peu sa capacité à détecter les fréquences auxquelles ces cils sont associés. Il est intéressant de savoir que les cils sont isolés des voies sanguines, et heureusement, car le vacarme de notre rythme cardiaque deviendrait probablement insupportable. Par contre, lorsqu'on écoute notre chanson préférée, nos [cellules ciliées « swinguent »](#) leur influx nerveux à cœur joie!

Les sons à basse fréquence situés en dessous du seuil de perception (environ 20 Hz) sont nommés les infrasons. Ces vibrations de l'air, qui sont inaudibles, peuvent parfois être ressenties par notre corps, l'énergie des vibrations étant transmise à d'autres organes comme la peau, la cage thoracique ou le crâne. Les premières recherches sur les effets des infrasons auraient été réalisées au cours des années 1960 par Vladimir Gavreau. Ce scientifique français s'y serait intéressé, car lui et ses assistants souffraient de douleurs aux oreilles et de migraines lorsqu'ils travaillaient au laboratoire. On raconte que Gavreau aurait remarqué des vibrations dans une tasse de café similaires à des ondes stationnaires pouvant être générées par des sons. C'est ce qui lui aurait permis de comprendre que la pièce dans laquelle se trouvait son laboratoire était soumise à un son inaudible, mais qui produisait vraisemblablement des effets physiologiques. Il découvrit par la suite qu'un ventilateur

générait ces infrasons et le répara, ce qui fit du même coup disparaître les effets qu'il ressentait. Il décida ensuite d'approfondir le sujet en réalisant plusieurs expériences. Aujourd'hui, certaines études suggèrent que les infrasons pourraient avoir des effets physiologiques et psychologiques comme des réactions de fatigue, des maux de tête, des nausées, etc. La cause de telles réactions serait la mise en vibration de certains organes. On raconte que des personnes auraient eu des hallucinations causées par des infrasons qui auraient fait entrer leur globe oculaire en résonance. Pour cette raison, certains lieux réputés « hantés » auraient peut-être été simplement soumis à des infrasons. On raconte également que des infrasons produits par quelques éoliennes auraient mystérieusement décimé un troupeau de 400 chèvres en Taiwan, qui auraient péri en raison d'un manque prolongé de sommeil causé par les infrasons<sup>13</sup>. Bien que certaines affirmations à propos des infrasons relèvent beaucoup plus du mythe que de la science, il reste que plusieurs études sur ce sujet controversé ont été réalisées récemment afin de déterminer les effets réels des infrasons, particulièrement dans le cas de l'implantation d'éoliennes à proximité de zones habitées.

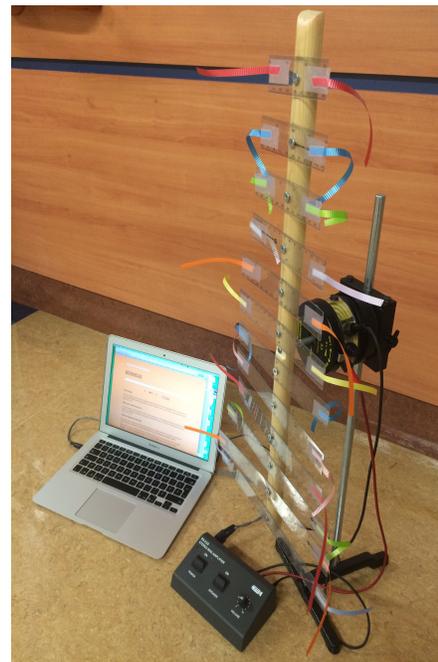
À l'autre extrémité du spectre sonore audible, on retrouve les ultrasons, c'est-à-dire les sons à haute fréquence situés au-dessus du seuil de perception (environ 20 000 Hz). Ces vibrations sont utilisées dans différents domaines techniques ainsi que par certains animaux tels que les chauves-souris et les dauphins.

## B) Description et utilisation des démonstrations

### Démonstration : Le modèle de la cochlée

Un modèle simplifié de la cochlée, ou plus précisément de la membrane basilaire peut être construit avec des matériaux simples. Ce modèle permet d'illustrer comment la variation graduelle dans la rigidité de la membrane lui permet d'agir comme un véritable analyseur spectral des fréquences du son. Le modèle est constitué de plusieurs règles, coupées à des longueurs différentes, fixées en ordre croissant de longueur sur une tige de bois. Cette tige est mise en mouvement par un générateur d'ondes mécaniques. En produisant un [signal sinusoïdal à l'aide d'un ordinateur](#) ou d'un générateur de fonctions, on met en mouvement la tige.

Pour qu'une règle se mette à vibrer avec une amplitude importante, la fréquence d'oscillation du système doit être près de la fréquence de résonance de la règle. Comme les règles sont de différentes longueurs, elles se mettront en mouvement à des fréquences différentes, car les règles plus longues possèdent une fréquence de résonance plus basse que les plus courtes. Des rubans sont collés aux extrémités des règles afin de rendre leur mouvement plus évident.



2.52 : CDSP, 2015.

---

<sup>13</sup> Voir à ce sujet l'article de Jean-François Guay, *Éoliennes et infrasons : le point sur la question*, présenté dans la section « Informations et ressources complémentaires ».

On peut donc associer différentes parties du modèle de la cochlée aux différentes parties de l'oreille de la façon suivante :

Modèle de la cochlée	Oreille humaine
Générateur de signal	Ondes sonores entrant dans l'oreille
Générateur d'ondes mécaniques	Étrier
Règles et tige de bois	Membrane basilaire <i>les règles plus courtes correspondent à la zone plus rigide de la membrane, située près de l'étrier dans l'oreille</i>
Rubans	Cellules ciliées



2.53 : CDSP, 2015.

## Matériel

- Tige de bois assez rigide
- Environ 10 règles en plastique de 30 cm
- Générateur d'ondes mécaniques ([Mechanical Wave Driver de Pasco](#))
- Support universel
- Rubans de couleur
- Amplificateur (si on utilise un ordinateur pour générer le signal)

## Fabrication

- Un trou doit être percé au centre de la tige en bois pour permettre de fixer celle-ci au générateur d'ondes mécaniques.
- Les règles sont coupées à différentes longueurs. Sur la photo du montage, 12 règles sont utilisées avec des longueurs variant de 8 cm à 30 cm.
- Les règles sont fixées à la tige avec de petites vis et de petits morceaux de ruban sont collés à leurs extrémités.
- On fixe le modèle de la cochlée au générateur d'ondes mécaniques. Le générateur peut être fixé à un support universel afin que le montage soit plus facile à voir.

## Mise en œuvre

Pour compléter cette démonstration représentant un modèle de la cochlée, on peut faire un test d'audition afin d'illustrer les limites de l'oreille humaine. En général, la grande majorité des gens entendront un son de 8000 Hz. Par contre, plus on augmentera la fréquence, moins de gens arriveront à entendre le son. En effet, les capacités auditives diminuent avec l'âge. Il pourrait alors être intéressant de se servir de ce test afin d'introduire une discussion sur la santé de l'oreille et sur les dommages que peut causer une exposition prolongée à de la musique ou à des bruits trop forts. De la même manière, il est possible de vérifier la limite de fréquence inférieure des sons que l'oreille peut entendre, sous laquelle on retrouve les infrasons. Cela pourrait servir d'introduction afin d'amorcer une réflexion autour de l'idée de controverse scientifique, notamment celle portant sur les effets des infrasons sur la santé humaine.

## Démonstration : Les infrasons

Une expérience simple peut montrer que différentes parties de notre corps, et non pas seulement nos oreilles peuvent réagir à différents sons. On place l'extrémité d'un tube en carton contre le corps d'une personne (près des organes comme le cœur, le foie, etc.), tandis que l'on chante à l'autre extrémité. La personne soumise aux différents sons devrait ressentir une vibration plus ou moins grande dans son corps, selon la fréquence du son que l'on chante, puisque les organes peuvent résonner à certaines fréquences. On peut ainsi faire un lien avec les vibrations que peuvent causer les infrasons dans notre corps.



2.54 : Quelques-unes des éoliennes du parc éolien de Cap-Chat, dont Éole, la plus haute éolienne à axe vertical au monde.

Finalement, en référence à la controverse sur les infrasons produits par des éoliennes, telle que décrite dans la section A, on peut montrer qu'en soufflant à travers les pales d'un ventilateur, on arrive à générer des infrasons. Le son qui est généré aura une fréquence qui dépendra de la vitesse à laquelle le ventilateur tournera.

## C) Concepts scientifiques associés à la démonstration

- Résonance
- Nature des ondes sonores
- Anatomie des organes auditifs

## D) Informations et ressources complémentaires

**Générateur de signal sinusoïdal :** [<http://plasticity.szynalski.com/tone-generator.htm>]

Cet outil permet de générer très facilement des signaux sinusoïdaux (sons purs) à des fréquences particulières. Il est notamment utilisé pour faire la démonstration du modèle de la cochlée.

**Animation sur le fonctionnement de l'oreille :** [<https://www.youtube.com/watch?v=PeTriGTENoc>]

Cette animation impressionnante, réalisée par Brandon Pletsch en 2002, illustre merveilleusement bien de quelle manière les différentes structures de l'oreille interviennent dans la perception des sons et de la musique. À voir!

**Article *Éoliennes et infrasons : le point sur la question*** [<http://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Regions/chaudiereappalaches/journalvisionagricole/avril2011/Pages/infrason.aspx>]

Cet article, tiré du site du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, présente les grandes lignes de la controverse entourant les éoliennes, plus particulièrement concernant l'impact des infrasons produits par des éoliennes sur la santé des individus et des animaux. On y présente brièvement le point de vue des scientifiques et des environnementalistes ainsi que les questions qui demeurent. Il s'agit d'une réponse aux opposants au développement de cette forme d'énergie.

**Étude bibliographique *Limites d'exposition aux infrasons et aux ultrasons :*** [<http://www.inrs.fr/accueil/produits/mediatheque/doc/publications.html?refINRS=ND%202250>]

Cet article scientifique, téléchargeable en ligne, a été écrit par un chercheur de l'INRS. L'article aborde la physique de la transmission des infrasons et des ultrasons, la sensibilité humaine aux fréquences associées, les effets physiologiques constatés lors d'une exposition à des niveaux élevés et les mesures de prévention possibles. Les valeurs limites d'exposition proposées par plusieurs pays sont discutées et des recommandations sont proposées.

## THÈME 4 : LE CERVEAU ET LA MUSIQUE

### FICHE : LE CERVEAU MUSICAL

#### A) Repères culturels

Comment notre cerveau crée-t-il du sens à partir des agencements de sons qui constituent la musique? D'où provient le plaisir que nous procurent certaines mélodies? Pourquoi la musique arrive-t-elle à créer de profondes émotions en nous? Est-ce que la pratique d'un instrument peut favoriser un meilleur développement de nos facultés cognitives? Est-ce qu'à long terme l'écoute de certains genres musicaux peut nous procurer des capacités particulières ou encore, à l'opposé, nous abrutir? D'où vient notre désir, voire notre besoin, d'écouter et de jouer de la musique? Depuis les dernières décennies, les sciences neurologiques tentent de répondre à plusieurs questions concernant la façon dont le cerveau réagit à la musique. Ce champ de recherche en émergence nous permet déjà de mieux comprendre certains effets de la musique sur notre esprit, bien que de nombreuses questions demeurent encore en suspens. Pourtant, toutes ces questions ne datent vraiment pas d'hier.

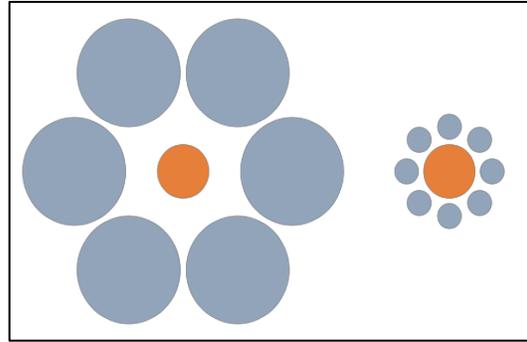
Alors que la musique occupait une place centrale dans la Grèce antique, plusieurs philosophes se sont questionnés sur l'influence de la musique sur « notre âme ». Ainsi, Platon croyait que la musique pouvait affecter directement l'*éthos* d'une personne, c'est-à-dire son caractère, son comportement et sa morale. Selon lui, certaines musiques avaient le pouvoir d'induire à l'ivresse ou à la violence, tandis que d'autres inspiraient la joie, le courage ou permettaient de développer l'intelligence et d'élever l'âme. La musique, grâce à sa capacité à « forger le caractère », occupait ainsi une place importante dans l'éducation des jeunes grecs durant l'Antiquité. Dans *La République*, Platon va même jusqu'à associer directement des modes, c'est-à-dire certaines gammes musicales, à des traits de caractère précis. Bien que cette théorie puisse aujourd'hui paraître plutôt curieuse, il est tout de même assez facile de remarquer que la gamme mineure transmet des émotions généralement plus tristes que la gamme majeure.



2.55 : Illustration d'un cours de musique sur une céramique grecque antique.

Aujourd'hui, plusieurs recherches en neurosciences semblent confirmer que la pratique régulière d'un instrument de musique en bas âge aurait des effets bénéfiques sur le développement de certaines facultés cognitives comme le langage, la mémoire, la coordination et les capacités de raisonnement. Jouer de la musique agirait donc sur le cerveau comme un véritable entraînement. Les effets de la musique sur le développement du cerveau seraient tels que, de nos jours, les anatomistes ne seraient pas en mesure d'identifier le cerveau d'un artiste plasticien, d'un écrivain ou d'un mathématicien, mais qu'ils reconnaîtraient le cerveau d'un musicien professionnel sans la

moindre hésitation<sup>14</sup>. En effet, on observe des agrandissements très visibles des corps calleux, du cortex et du cervelet (voire du tronc cérébral) chez les musiciens. De plus, les effets repérables dans le cerveau des musiciens seraient fortement corrélés à l'âge auquel la musique commença à leur être enseignée ainsi qu'à l'intensité de la pratique et de la répétition.



2.56 : Illusion de Ebbinghaus. Les deux cercles centraux ont la même taille, mais celui de droite semble plus grand.

En plus des effets bénéfiques sur le développement cognitif, la musique aurait des effets positifs sur la santé. Selon certaines études, la pratique d'un instrument de musique diminuerait les chances de développer certains troubles cognitifs comme l'Alzheimer et la démence. On utilise également la musique pour intervenir auprès de personnes souffrant de troubles neurologiques, de problèmes de santé mentale ou de troubles d'apprentissage. Cette technique, appelée musicothérapie, est aujourd'hui fréquemment utilisée et appuyée par des études scientifiques de plus en plus nombreuses. Dans son livre *Musicophilia* (2009), le neurologue Oliver Sacks discute justement de l'effet de la musique sur certains patients souffrant de démence et affirme que la musique « a le pouvoir à nul autre pareil de les rendre à eux-mêmes et à autrui, pendant quelques instants au moins. » Notre perception et notre interprétation de la musique auraient donc des effets étonnants tant sur nos structures cérébrales que sur notre comportement.

Le rythme constitue également une partie importante de ce qui nous fait apprécier certaines pièces musicales. Il nous fait danser, taper du pied et hocher de la tête. Sans surprise, le cerveau joue un rôle fondamental dans notre perception du rythme en effectuant des regroupements de certaines structures sonores. On peut explorer l'effet de différents facteurs (timbre et tempo) influençant notre perception de regroupements rythmiques grâce à l'expérience des [rythmes galopants](#). Ce même phénomène de regroupement peut aussi être illustré par l'écoute de certaines œuvres pour piano, comme [Le gazouillement du printemps de Sinding](#), dans lesquelles les notes défilent à une très grande vitesse, ce qui crée la perception d'une mélodie. Pourtant, l'écoute de cette pièce à une vitesse trop lente nous en fait perdre le sens. Ce phénomène a ainsi été mis à profit dans certaines œuvres de célèbres compositeurs et virtuoses comme Chopin et Liszt.

Une autre des capacités impressionnantes de notre système auditif est son pouvoir de sélectivité. En effet, lorsque l'on prend le temps d'écouter les sons qui nous entourent, à tous moments et peu importe l'endroit – un café, une classe, une bibliothèque, un parc – il est possible de fixer notre attention sur certains sons particuliers et de discerner au moins une demi-douzaine de sources sonores différentes. Cette capacité à distinguer ces sons est tout à fait remarquable, si l'on considère l'information dont notre cerveau dispose, soit les signaux captés par les récepteurs sensoriels. Il exploite des principes de regroupement (en fonction du timbre, de la localisation spatiale, du volume, etc.) pour réussir à faire le tri et séparer les sources sonores, une tâche hautement complexe qu'aucun ordinateur à ce jour n'a été capable d'effectuer.

<sup>14</sup> Sacks, O. (2009). *Musicophilia – La musique, le cerveau et nous*. Paris : Éditions du Seuil, 124-125 p.

Malgré tout, l'interprétation des sons par notre cerveau ne se fait pas sans failles. Lorsque nous interagissons avec le monde qui nous entoure, nous faisons intuitivement confiance à nos perceptions sensorielles. Or, plusieurs expériences peuvent nous permettre de réaliser que nos sens nous trompent souvent. Il existe effectivement de nombreuses illusions visuelles, comme celle illustrée ci-contre, et des illusions auditives. Par exemple, la gamme de Shepard est une illusion où un ensemble de sons semblent devenir de plus en plus aigus, et ce, de façon infinie. Ce genre d'impression se retrouve d'ailleurs dans certaines œuvres célèbres comme le *canon per tonos* de l'*Offrande musicale* de Jean-Sébastien Bach. Dans cette pièce, la hauteur des notes de la mélodie semble augmenter continuellement. Bach aurait composé cette pièce pour illustrer la gloire sans cesse grandissante du roi de Prusse Frédéric II. Ce type d'illusion semble former une boucle étrange qui, malgré un mouvement continu vers le haut ou vers le bas, revient perpétuellement en son point initial. La gamme de Shepard n'est donc pas sans rappeler les [illustrations réalisées par M.C. Escher](#).

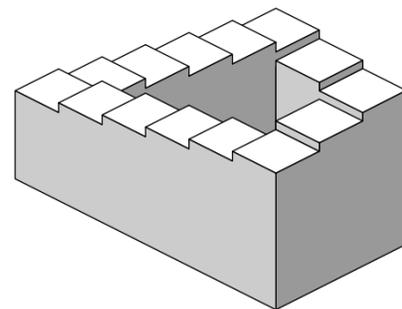
La perception combinée d'un son et d'une image peut également être la source d'illusions et d'erreurs dans le rôle d'interprétation que joue notre cerveau. L'effet McGurk, qui a été décrit pour la première fois en 1976, est une illusion obtenue lorsque notre système auditif capte un son alors que nous observons une image associée à un autre son. Notre cerveau perçoit alors un son qui est différent de celui capté par nos oreilles, mais qui ne correspond pas non plus à l'image que nous voyons. Par exemple, si nous entendons le son « bababa », mais que nous voyons une personne dont les lèvres semblent dire « gagaga », notre cerveau sera généralement trompé et nous percevrons « dadada ». Ces quelques illusions nous permettent de réaliser à quel point le rôle de notre cerveau est important dans l'interprétation des stimuli sonores que nos oreilles perçoivent. Il n'est donc pas étonnant qu'on se pose tous la question, un jour ou l'autre, si le craquement étrange que nous entendons la nuit est bien réel ou s'il n'est le fruit que de notre imagination!

En somme, lorsque nous écoutons de la musique, le cerveau joue un rôle important afin d'organiser et de structurer les sons que nous entendons. Toutefois, il demeure encore difficile de comprendre, d'un point de vue scientifique, pour quelles raisons d'intenses émotions peuvent être ressenties grâce à l'appréciation de structures sonores plus ou moins complexes.

## B) Description des démonstrations

### Démonstration : La gamme de Shepard

L'écoute de la gamme de Shepard donne l'illusion d'un son dont la hauteur semble monter sans cesse. Il s'agit d'une séquence sonore constituée d'une superposition d'ondes sinusoïdales séparées par une octave. La fréquence de ces sons est augmentée (ou diminuée) progressivement et donne l'illusion que la tonalité du son que l'on écoute augmente (ou diminue) infiniment. On peut faire un parallèle entre cette illusion auditive et l'illusion visuelle des marches de Penrose, illustrée ci-contre. On peut présenter le spectre sonore associé au son de la gamme de Shepard afin de mieux saisir le mécanisme derrière cette illusion. À cet effet, un logiciel d'analyse sonore pourra être utilisé (voir les *Informations et ressources complémentaires* se trouvant à la fin de cette fiche). L'illusion de la gamme de Shepard montre bien qu'il peut parfois être difficile de juger la hauteur d'un son.

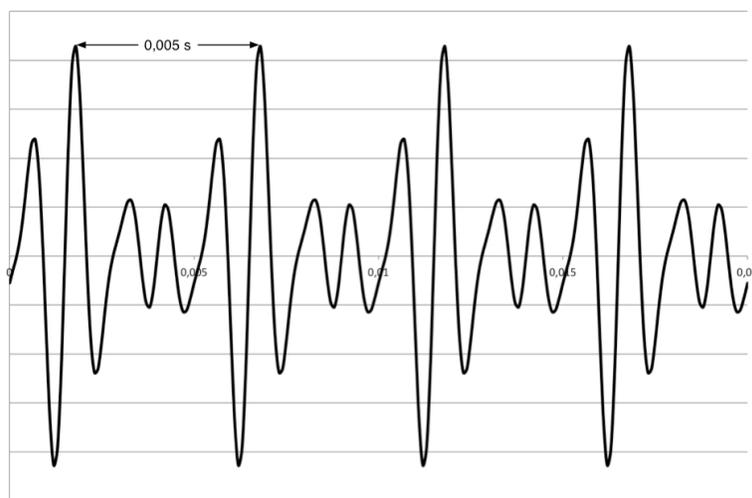


2.57 : Les marches de Penrose.

## Démonstration : La fondamentale manquante

L'écoute de la séquence sonore de la fondamentale manquante permet aussi d'illustrer que notre cerveau peut parfois nous tromper dans son interprétation de la hauteur d'un son. Dans cette démonstration, deux sons sont joués en alternance. Le son A, que l'on entend en premier, est formé d'un signal sinusoïdal dont la fréquence est de 500 Hz. Le son B, quant à lui, est formé d'une superposition de quatre signaux sinusoïdaux ayant des fréquences de 600 Hz, 800 Hz, 1000 Hz et 1200 Hz. Toutefois, même si le son B est formé uniquement de signaux ayant tous des fréquences plus élevées (donc des sons plus aigus) que le son A, le son B sera perçu comme plus grave.

Cette démonstration s'explique par le fait que notre système auditif est sensible à la différence de fréquence entre les signaux formant un son lorsqu'il en juge la hauteur. Le son B est formé de signaux dont la différence de fréquence entre ceux-ci est un multiple de 200 Hz. Dans ce cas, nous interprétons ce son comme si la fréquence fondamentale était de 200 Hz. Les signaux formant le son, dont les fréquences sont 600 Hz, 800 Hz, 1000 Hz et 1200 Hz, correspondent alors aux harmoniques 3, 4, 5 et 6. Comme un son qui a une fréquence fondamentale de 200 Hz est plus grave qu'un son de 500 Hz, le son B nous apparaît plus grave. On peut aussi comprendre un tel résultat en observant la trace sonore du son complexe B, qui possède une période de 0,005 s, ce qui correspond à une fréquence de 200 Hz. Notre système auditif serait donc plus sensible à la périodicité générale d'un son qu'aux fréquences particulières qui le composent.



2.58 : Son formé de signaux ayant des fréquences de 600 Hz, 800 Hz, 1000 Hz et 1200 Hz.  
CDSP, 2015.

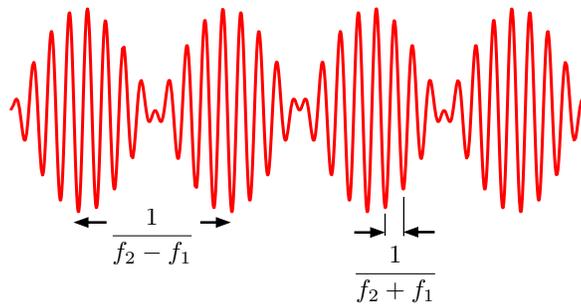
## Démonstration : L'effet McGurk

L'effet McGurk, décrit dans la section *Repères culturels* de cette fiche, illustre bien le fait que notre cerveau ne capte pas les sons d'une façon passive, mais interprète continuellement ces stimuli en utilisant différentes ressources pour y arriver. Plusieurs vidéos présentant l'effet McGurk sont disponibles sur Internet, mais nous suggérons tout de même une vidéo dans les *Informations et ressources complémentaires* à la fin de cette fiche.

## Démonstration : Les battements binauraux

Lorsque deux sons dont les fréquences sont légèrement différentes se superposent, le résultat que nous entendons est un son dont l'amplitude varie périodiquement à une fréquence correspondant à la différence entre les fréquences de ces deux sons. Ce phénomène, nommé battement, est d'ailleurs exploité par tous les musiciens lorsqu'ils accordent leurs instruments.

Mais alors, que se produit-il si ces deux signaux sont captés indépendamment par chacune des oreilles? Autrement dit, quel effet produirait la perception d'un signal d'une fréquence de 200 Hz, capté uniquement par l'oreille droite, et d'un signal d'une fréquence de 204 Hz, capté uniquement par l'oreille gauche? Étonnamment, même si ces deux signaux ne se superposent pas dans l'air, le cerveau les interprétera, ce qui donnera l'impression d'un réel battement qui ne sera en fait qu'une reconstruction faite par notre cerveau. Pour percevoir ce phénomène, il faut utiliser des écouteurs en stéréo, c'est-à-dire qui envoient des sons différents pour chacune des oreilles.



2.59 : Superposition de deux signaux sinusoïdaux de fréquence  $f_1$  et  $f_2$ . L'amplitude du signal résultant varie périodiquement avec une fréquence  $f_2 - f_1$ . CDSP, 2015.

## Démonstration : Inversion temporelle et compréhension d'un discours

Lorsqu'on fait subir une inversion temporelle à une bande sonore sur laquelle est enregistrée une conversation, le discours deviendra incompréhensible et rappellera la voix d'une personne parlant une langue étrangère. Des chercheurs ont toutefois remarqué que si le son d'une conversation est découpé en de multiples segments très courts (environ 20 ms), tous inversés temporellement, le discours entendu demeurera compréhensible. À partir de segments ayant une durée de 50 ms, le discours deviendra plus difficile à comprendre. Il sera totalement incompréhensible à partir de 100 ms environ. Dans cet exemple, même si la structure temporelle des sons est complètement altérée, nous arrivons quand même à déchiffrer l'information qu'ils contiennent. L'interprétation des sons se ferait donc d'une façon plus globale. Autrement dit, cette expérience illustre le fait que notre système auditif ne capte pas les sons de façon totalement passive, mais que le cerveau joue un grand rôle dans l'analyse des sons que l'on entend.

## C) Concepts scientifiques concernant la fiche

- Psychologie et perception
- Éléments de neurosciences
- Battements

## D) Informations et ressources complémentaires

### LIVRES AYANT POUR THÈME LA MUSIQUE ET LE CERVEAU

**Sacks, Oliver (2009).** *Musicophilia – La musique, le cerveau et nous*. Paris : Éditions du Seuil.

**Levitin, Daniel J. (2010).** *De la note au cerveau – L'influence de la musique sur notre comportement*. Montréal : Les Éditions de l'Homme.

Ces deux ouvrages écrits pas des neurologues, se décrivant tous les deux comme des mélomanes, questionnent les rapports du cerveau et de la musique. S'appuyant sur des recherches souvent récentes en neuroscience, ils font valoir les liens fondamentaux entre la musique et notre espèce.

### FILM ET ANIMATIONS, EN COMPLÉMENT D'INFORMATION

**Documentaire *Alive inside*** [[http://www.aliveinside.us/ - land](http://www.aliveinside.us/)]

Ce récent documentaire, faisant notamment intervenir le neurologue Oliver Sacks, suit le parcours d'un intervenant social qui démontre le pouvoir de la musique chez les malades atteints d'Alzheimer et de démence, entre autres. Cet extrait du film est à ce sujet particulièrement éloquent : [<https://www.youtube.com/watch?v=fyZQf0p73QM>].

**The scientific Power of Music** [<https://www.youtube.com/watch?v=SePL2w5f6dE>]

Cette courte animation (en anglais) a été produite par la chaîne Youtube *AsapSCIENCE* et présente brièvement pourquoi nous éprouvons du plaisir à écouter de la musique, en lien avec la réponse chimique du cerveau (sécrétion de dopamine).

### ANIMATIONS « TEDED »

**La musique dans l'Antiquité et l'éducation selon Platon :** [<https://ed.ted.com/lessons/music-and-creativity-in-ancient-greece-tim-hansen>]

**Jouer d'un instrument de musique et son effet bénéfique sur le cerveau :** [<https://ed.ted.com/lessons/how-playing-an-instrument-benefits-your-brain-anita-collins>]

Ces deux animations intéressantes abordent le thème de la musique et du cerveau. L'initiative des TEDed a pour objectif de créer des « leçons qui valent la peine d'être diffusées » (*lessons worth sharing*), dans l'esprit des grandes conférences TED.

### VIDÉO

**Vidéo de l'effet Mcgurk :** [<https://www.youtube.com/watch?v=PWGeUztTkRA>]

Voici un exemple de vidéo présentant l'effet Mcgurk, une illusion auditive assez connue dont il est question dans cette fiche.

**Sites internet *Auditory neuroscience, Making Sense on Sound.*** [<http://auditoryneuroscience.com>]

Ce site (en anglais) est une ressource très complète pour explorer les connaissances actuelles, issues des neurosciences, que nous avons concernant la perception et l'interprétation des sons. Il résulte du travail d'une équipe de chercheurs de l'Université d'Oxford (*The Oxford Auditory Neuroscience Group*). Il contient de nombreux enregistrements audio, des figures, des animations et des liens vers du matériel complémentaire concernant les phénomènes liés à l'audition.

**Dossier de l'émission *Découverte* : Le cerveau.** [[https://ici.radio-canada.ca/actualite/Decouverte/dossiers/83\\_cerveau/index.html](https://ici.radio-canada.ca/actualite/Decouverte/dossiers/83_cerveau/index.html)]

Ce site présente un dossier réunissant tous les reportages de l'émission *Découverte* touchant de près ou de loin les recherches scientifiques sur le cerveau. Une section (onglet : La créativité) aborde plusieurs thèmes liés au cerveau et à la musique, comme « Cerveau musical », « Bébés et musique » et « Cerveau et émotions ». Le contenu est bien vulgarisé et très accessible.

## **LOGICIELS D'ANALYSE SONORE**

***Audacity* : logiciel libre.** [<http://audacity.sourceforge.net/>]

La plupart des démonstrations impliquant l'écoute de sons ont été produites à l'aide du logiciel libre *Audacity*. Il s'agit d'un logiciel multiplateforme très utile pour l'enregistrement et l'édition de sons.

***AudioXplorer* : logiciel gratuit pour l'analyse sonore pour Mac.** [<http://www.arizona-software.ch/audioplayer/>]

***Audio Spectrum Analyser* : logiciel gratuit pour l'analyse sonore pour Windows.** [<http://www.techmind.org/audio/specanaly.html>]

## 2.4 Conclusion : La musique, un thème porteur pour l'enseignement des sciences

En guise de conclusion à ce module de démonstration, il apparaît utile de discuter brièvement de l'intérêt du thème de la musique comme ancrage culturel pour l'enseignement des sciences. Il s'agit donc de revenir sur les différents types de repères culturels abordés dans les fiches démonstrations, à la manière dont ils sont catégorisés dans le Programme de formation de l'école québécoise (PFÉQ).

Dans le PFÉQ, la place accordée aux repères culturels, décrits comme des appuis pour le développement des compétences disciplinaires, est claire et revêt une importance évidente. Ces repères permettent d'associer les apprentissages à divers champs de l'activité humaine tout en les situant dans des contextes sociaux et historiques susceptibles d'en éclairer le sens. Cette intention est précisée dans le programme du secondaire (premier cycle) où on dit que les champs disciplinaires d'ordre scientifique ainsi que les champs d'applications technologiques sont accessibles par des repères culturels. On y précise d'ailleurs que l'activité scientifique et l'activité humaine « s'inscrivent l'une et l'autre dans un contexte social et culturel et elles sont le fruit du travail d'une communauté qui construit de manière collective de nouveaux savoirs sur la base de connaissances acquises antérieurement. » (p.267). De plus, on décrit ces activités scientifiques et humaines comme sollicitant l'imagination, la créativité, le désir d'explorer, le plaisir de la découverte et le besoin de comprendre et d'expliquer. C'est donc sur la base de ces considérations que le module de démonstration tel que présenté a été imaginé.

Puisque ce module de démonstration s'adresse à la formation des futurs enseignants du secondaire, mais aussi à ceux du collégial, il semble intéressant de rappeler que ces considérations sont aussi présentes dans le programme de *Science de la nature*, notamment, bien qu'elles y prennent une moindre importance que dans le programme du secondaire. En effet, afin d'atteindre les buts généraux de ce programme, les étudiants devraient être amenés à « établir des liens entre la science, la technologie et la société » et à « situer le contexte d'émergence et d'élaboration des concepts scientifiques » abordés dans les différentes disciplines scientifiques.

En somme, différents repères culturels ont été abordés à travers les fiches démonstration constituant ce module. Il y a été question de différentes disciplines scientifiques (mathématiques, physique, neurosciences, biologie), de périodes historiques (ex. : Antiquité, Renaissance), de personnes d'hier (ex. : Johannes Kepler, Sophie Germain, Ernst Chladny) et d'aujourd'hui (ex. : Michel Lauzière, Oliver Sacks) et de technologies anciennes et actuelles (ex. : radar acoustique, analyseur spectral). Nous avons aussi parlé de mythes (ex. : Pythagore, Muses grecques), de croyances (ex. : rites des Akélés, Harmonie céleste) et de controverses (éoliennes, infrasons). À cela se sont ajoutés des montages de démonstration qui permettent à la fois d'apprécier la beauté de certains phénomènes (table de Chladny, vibration d'un diapason), mais aussi d'en comprendre certains aspects (slinky, tiges en résonance) tout en procurant un effet de surprise (oreilles désynchronisées, monocorde, scie musicale) et des questionnements. En complément, certaines vidéos ont été présentées (renard arctique, cellule ciliée) et quelques séquences audio (extraits musicaux, illusions auditives) étonnantes, toujours dans le but de donner du sens aux concepts présentés. Bref, l'intention générale derrière la conception de ce module de démonstration est celle d'enrichir la conception des sciences des futurs enseignants en parlant de contextes, d'histoires, de lieux, de créativité, de culture, d'ingéniosité et, avant tout, d'histoires humaines.

# Chapitre 3

## SE MESURER AU MONDE

Conception et rédaction :

*Isabelle Arseneau*, Centre de démonstrations en sciences physiques ;

*Mathieu Riopel*, Cégep Garneau ;

*Caroline Paquet*, Cégep Garneau ;

**Pour citer ce chapitre de l'ouvrage :**

**Arseneau, I., Riopel, M. et Paquet, C. (2018).** Se mesurer au monde. Dans V. Richard et M. Lafleur (dir.), *Intégration de repères culturels en enseignement des sciences par la démonstration* (p.79-134). Québec : Livres en ligne du CRIRES. En ligne : [http://lel.crires.ulaval.ca/public/richard\\_lafleur\\_2018.pdf](http://lel.crires.ulaval.ca/public/richard_lafleur_2018.pdf)

### Chapitre 3 : Se mesurer au monde

La mesure fait partie de notre quotidien et relève pour certains de la banalité. On utilise une règle, une balance ou un GPS presque tous les jours sans trop se poser de questions sur le fonctionnement, l'histoire ou l'étalon de ces appareils de mesure. En effet, rares sont les occasions où l'on parle du mètre en lien avec la vitesse de la lumière, du gramme comme la seule mesure reposant encore sur un artefact ou encore de notre position géospatiale à partir des techniques de triangulation utilisées en Égypte antique. Pourtant, lorsqu'on si attarde un peu, l'idée même de mesure peut s'avérer tout à fait fascinante. Elle ouvre sur un monde d'idées, centrales dans le développement des sciences et des instruments de mesure, qui ne cessent de se complexifier dans la quête d'une précision encore inégalée. Parler de mesures en sciences est aussi l'occasion de discuter de la manière dont elles se font ou se sont faites, ce qui constitue une réflexion épistémologique qui nous semble d'une grande pertinence et qui devrait, de notre point de vue, faire partie de l'enseignement des sciences. Pour ce faire, il apparaît intéressant de discuter d'histoire *des* sciences, mais aussi d'histoires *de* sciences pour situer les contextes sociaux et politiques dans lesquels se sont faites certaines avancées, des controverses scientifiques ou publiques<sup>15</sup> ainsi que des pratiques de recherche, anciennes ou actuelles, sur le terrain ou en laboratoire. C'est ce dont il sera question dans ce module.

Nous aborderons d'abord la question de l'origine et de l'évolution de certains instruments de mesure afin de parler, entre autres, du concept d'étalon. Le mètre, par exemple, a d'abord été défini comme une portion du méridien terrestre. Pour l'établir, il a donc fallu « mesurer le monde », rien de moins! Ainsi, l'histoire « épique » de la conquête du mètre, en pleine Révolution française, nous permettra de mettre en contexte cette réflexion. Il sera question de justice, d'équité, mais aussi de précision et d'incertitudes. Nous verrons comment le savant des Lumières est devenu le scientifique de l'époque contemporaine. Toujours dans cette quête de mesurer notre monde, nous traiterons de la controverse, d'abord scientifique, qui s'est déroulée sur plusieurs siècles autour de la détermination de l'âge de la Terre et dans laquelle croyances religieuses et sciences s'entremêlaient. On discutera aussi de la controverse qui oppose les tenants de l'enseignement de la théorie de l'évolution de Darwin, des tenants d'autres théories souvent disqualifiées à cause de leurs fondements jugés non scientifiques.

Dans un deuxième temps, il sera question de mesures sur la lumière, mais aussi de la lumière pour mesurer. La controverse scientifique concernant la nature de la lumière, qui aurait opposé les défenseurs du modèle corpusculaire à ceux défendant le modèle ondulatoire, sera d'abord présentée. Cela nous mène à proposer une réflexion portant sur l'usage d'anecdotes historiques en enseignement des sciences, pour lesquelles il nous semble utile de situer les contextes d'élaboration et d'évolution des idées. En effet, présenter certains éléments concernant la vie de laboratoire et le travail de terrain, comme la question du financement des recherches, de la compétition, du genre, des débats, etc., nous apparaît comme des pistes intéressantes. L'histoire de la découverte de la structure en double hélice de l'ADN nous permet aussi d'illustrer et de situer certaines de ces considérations. Autrement dit, il s'agit de faire des liens entre le passé et le présent, entre sciences faites et sciences en train de se faire. Enfin, puisqu'il est question de mesures et de modèles en sciences, il nous apparaissait incontournable de discuter aussi de leurs limites. En ce sens, poser un

---

<sup>15</sup> On distingue ici les controverses scientifiques (ou savantes) aux controverses publiques, qui peuvent inclure des éléments scientifiques et même interférer avec des controverses scientifiques, mais qui débordent du champ scientifique et font intervenir d'autres acteurs sociaux aux intérêts et aux formations diverses.

regard sur les sciences de la complexité se veut une ouverture sur un champ de recherches interdisciplinaires en plein essor. Cela nous a permis de discuter de déterminisme, d'incertitudes et de systèmes complexes, naturels et artificiels.

### 3.1 Intentions et structure du module

Ce module de démonstrations aborde ainsi le thème de la mesure comme trame de fond pour présenter différentes « histoires de science » par l'entremise de montages permettant soit d'illustrer des techniques de mesurage soit de présenter des phénomènes surprenants. Ces histoires portant sur l'idée de mesure, comme thème intégrateur, nous apparaissent particulièrement riches afin de situer différentes connaissances scientifiques dans leurs contextes d'élaboration, qu'ils soient historiques ou actuels, tout en présentant les préoccupations ou les croyances qui avaient cours à certaines époques et qui ont permis de faire évoluer nos représentations du monde. Le thème de la mesure nous sert ainsi de prétexte pour faire des ponts entre sciences, technologies et sociétés, notamment dans le but de mener en classe une réflexion de nature épistémologique.

Le module s'articule autour de trois axes. Le premier, *Mesurer le monde*, porte sur la mesure de la Terre, en particulier sa dimension et son âge. Le deuxième, *La lumière pour mesurer*, s'intéresse à la lumière et sur la façon dont on est arrivé à mesurer des phénomènes lumineux, tandis que le troisième, *Les limites de la mesure*, a pour objectif de discuter de certaines limites de la mesure et des modèles prédictifs en s'initiant aux sciences de la complexité. Ces trois axes regroupent un ou deux thèmes qui s'incarnent chacun en une fiche démonstration. Ces fiches servent à présenter les démonstrations qui constituent le module, mais aussi à proposer différents repères culturels se rattachant à une démonstration en particulier ou à une série de démonstrations. Évidemment, de nombreux choix ont dû être faits lors de l'écriture de ces fiches. L'intention était de proposer une série de repères organisés en courtes « histoires » qui ont le potentiel de susciter l'intérêt et de faire réfléchir des étudiants du secondaire et du collégial sur la nature des sciences. Cela dit, ces fiches s'adressent particulièrement aux futurs enseignants de sciences, du secondaire et du collégial, ainsi qu'aux professeurs et aux chargés de cours en didactique des sciences.

Toutes les fiches démonstrations suivent la même structure. D'abord, les repères culturels sont présentés et généralement illustrés par des images, mais parfois aussi par des hyperliens insérés dans le texte en guise de complément. Ensuite, chacune des démonstrations est décrite en précisant de quelle manière elles pourraient être exploitées; la plupart du temps, elles portent sur un concept particulier. Au besoin, les caractéristiques techniques des montages de démonstration sont aussi présentées. À la fin des fiches, on énumère certains concepts de science qui pourraient être associés aux démonstrations présentées et on commente une liste de références utiles, soit des ouvrages, des articles et des liens intéressants qui sont suggérés pour aller plus loin, au besoin. Ajoutons en terminant que ces fiches ont été conçues pour être utilisées de manières indépendantes, bien que différents liens peuvent être faits pour les mettre en relation.

## 3.2 Mesurer le monde

### THÈME 1 : TRAVAIL DE TERRAIN ET CONTEXTES POLITIQUES

FICHE : À LA CONQUÊTE DU MÈTRE

#### A) Repères culturels

*La grandeur des actions humaines se mesure à l'inspiration qui les fait naître.*

Pour la plupart d'entre nous, l'acte de mesurer est considéré comme allant de soi. Cela relève d'une banalité tellement la mesure fait partie de notre quotidien. Certains affirment même que l'usage que fait une société de ses mesures serait en quelque sorte le reflet de son sens de l'équité, ce qui expliquerait par exemple l'origine de la balance comme symbole de justice. Les sociétés humaines se sont en effet munies de systèmes d'unités dans la quête d'un plus grand accord, notamment dans le développement des échanges commerciaux. Ces systèmes sont aussi devenus nécessaires pour l'avancement des sciences, particulièrement en introduisant des méthodes empiriques dont les fondements reposaient, entre autres, sur le caractère reproductible des expériences. Autrement dit, il fallait s'appuyer sur des mesures prises à l'aide d'instruments créés sur la base de références communes. Puisqu'il faut se doter d'une référence pour parler de grandeur physique, mesurer voudrait donc aussi dire comparer. Que serait un mètre ou un gramme sans référence à un étalon? Comment pourrait-on déterminer la valeur d'un terrain sans arpentage précis ou encore la valeur d'un sac de farine sans balance?

**Louis Pasteur (1822-1895)**



3.1 : La justice, Jost Amman, entre 1539 et 1591.

De nos jours, le système international d'unités (SI) est le plus utilisé. Ce système repose sur sept unités de base dont toutes les autres unités dérivent. Il s'agit du mètre (longueur), du kilogramme (masse), de la seconde (temps), de l'ampère (courant électrique), du kelvin (température), de la mole (quantité de matière) et enfin de la candela (intensité lumineuse). Le SI trouve son origine au sein des plus vieilles civilisations, et son achèvement est relativement récent : la mole n'a été adjointe qu'en 1971. Les étalons de ces unités sont quant à eux encore sujets au changement. C'est le cas pour les étalons du kilogramme, de l'ampère, de la mole et du kelvin, qui seront appelés à être redéfinis en 2018 afin que ces unités soient désormais reliées à la valeur numérique de constantes fondamentales de la physique<sup>16</sup>. De toute évidence, les mesures que nous tenons aujourd'hui pour acquises sont le fruit du travail de femmes et d'hommes qui se sont posé de nombreuses questions et qui ont eu des idées, souvent fécondes, afin de mesurer le monde ou... de s'y mesurer!

<sup>16</sup> À ce sujet, et pour aller plus loin sur cette question, le numéro de *La Recherche* de mai 2015 est intéressant (voir la référence complète dans la section D).

Lorsqu'il faut estimer une mesure et qu'aucun instrument ne se trouve à portée de main, on utilisera intuitivement notre corps comme référence. Pensons seulement à la manière dont nous alignerions des zones de but pour jouer au soccer ou au ballon chasseur dans un parc. On compterait probablement le nombre de fois que nous pouvons mettre un pied devant l'autre, ce que nous avons tous fait intuitivement étant plus jeunes. On peut donc dire que notre corps est certainement l'instrument de mesure le plus accessible, puisqu'il nous suit partout. Cette façon de faire n'est certes pas nouvelle, mais l'évoquer nous permet d'introduire l'origine de certaines unités de mesure justement basées sur des parties du corps. En Égypte antique, par exemple, on utilisait comme unité de mesure la paume, le doigt, la coudée, le pas, etc.

*L'homme pense avec sa main.*

### **Anaxagore (V<sup>e</sup> siècle avant J.-C.)**

Ce que l'on sait aujourd'hui sur l'administration égyptienne nous permet de penser, sans trop d'incertitudes, qu'elle devait reposer sur un souci d'exactitude et de justice, notamment lorsque venait le temps de déterminer la surface des champs, puisque celle-ci était directement liée à la perception des impôts. Le besoin de reconfiguration des terrains après chaque décrue du Nil fut un des leviers du développement de la géométrie égyptienne ainsi que de l'élaboration d'outils de mesure gradués, souvent basés sur la longueur de différentes parties du corps. Un de ces outils est la corde à 13 nœuds, séparée en 12 intervalles d'une coudée. Le choix de diviser la corde en 12 parties n'est pas le fruit du hasard, car le chiffre 12 comporte plusieurs diviseurs. Cela devait faciliter les opérations mathématiques qui se faisaient, à l'époque, essentiellement sur la base de rapports simples. En Égypte antique, le tendeur de cordes jouait d'ailleurs le rôle d'arpenteur royal, une position sociale très prestigieuse. Parfois, l'étirement de la corde pouvait même être réalisé par des rois durant la phase initiale de la construction d'un temple, ce qui relevait alors davantage d'une cérémonie sacrée. Cela illustre bien l'importance accordée à cette opération de mesurage.

Plus particulièrement, cette corde à 13 nœuds permettait de manier sur le terrain des principes élémentaires de trigonométrie. Faisant appel au triangle 3-4-5 pour effectuer leurs mesures et tracer des angles droits (voir la démonstration de la corde à 13 nœuds à la section B), ces tendeurs de cordes devaient ainsi posséder certaines connaissances sur la technique de triangulation, et ce, bien avant les propositions de Pythagore sur les relations possibles dans un triangle rectangle. La triangulation est une méthode qui permet de déterminer géométriquement la position d'un point en mesurant les angles entre ce point et des positions de référence connues.

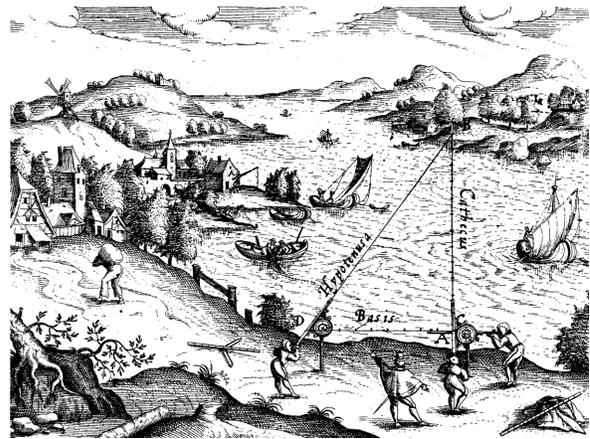


*3.2 : Cette image de tendeurs de cordes en action a été découverte dans la tombe de Menna (Thèbes) et serait datée d'environ 1200 ans avant J.*

Plus tard, ces techniques de triangulation ont été raffinées et appliquées à une courbe, ce qui deviendra la base de la géodésie. Ce terme, dont la racine grecque signifie « diviser (désie) la Terre (géo) », désigne la science qui s'est attachée à résoudre le problème des dimensions, puis de la forme de la Terre. Notons que la géodésie reposera sur les techniques de triangulation jusqu'à l'arrivée des satellites artificiels. Elles furent par exemple utilisées par les cartographes du XVII<sup>e</sup> siècle afin de concevoir des cartes « géométriquement correctes », sur lesquelles les distances entre les villes étaient plus précises et ne s'évaluaient plus en termes de « nombre de jours de chevauchée ».

Les géodésiens ont ainsi utilisé la triangulation pour mesurer la Terre, mais encore fallait-il qu'ils s'entendent sur l'unité de mesure à considérer et sur son étalon. En effet, il fut une époque où coexistait une myriade d'unités de mesure. Seulement en France, sous l'Ancien Régime (donc avant la Révolution de 1789-1799), on a estimé que derrière les quelque huit cents appellations qui étaient alors d'usage, se cachaient pas moins de deux cent cinquante mille unités de poids et de mesures différentes! De quoi rendre les échanges commerciaux et ceux au sein de la communauté scientifique bien confus.

Aujourd'hui, si chacun de nous se basait sur sa propre mesure pour vendre ou acheter un produit, il est facile de s'imaginer à quel point cette situation serait conflictuelle. Ce fut le cas en France, peu de temps avant la Révolution. L'absence de référence commune était devenue intenable. Il fallait se doter d'unités de mesure plus universelles, mais surtout s'entendre sur la manière d'établir les étalons. Ce sera la prémisse d'une longue aventure, celle de l'invention du mètre, qui conduira éventuellement à l'établissement du système métrique. Mais comment cette mesure a-t-elle été définie? Pour apprécier le travail accompli par la communauté savante dans sa quête d'un étalon utilisé « par tous les hommes », le périple de deux astronomes français, Jean-Baptiste Joseph Delambre et Pierre François André Méchain, s'avère fort intéressant. Par leur travail, « ils ont modifié non seulement l'idée que nous nous faisons de la forme de la Terre, mais aussi celle que nous nous faisons de l'erreur<sup>17</sup>. » Cette histoire permet aussi d'illustrer que les mesures sont le fruit de conventions sociales et l'aboutissement de processus politiques.



3.3 : Illustration de la mesure de la largeur d'une rivière par triangulation, tirée d'un traité de Hulsius (16<sup>e</sup> siècle).

*Le système métrique doit être pour tous les hommes, pour tous les temps.*

**Condorcet**

<sup>17</sup> Cette citation est tirée de l'excellent ouvrage de Ken Adler (2005) : *Mesurer le monde - L'incroyable histoire de l'invention du mètre*. L'essentiel des informations portant sur le récit de Delambre et Méchain est d'ailleurs issu de cet ouvrage historique.

En juin 1792, mandatés par l'Académie des sciences, Delambre et Méchain partaient dans des directions opposées afin de mesurer par triangulation la partie de l'arc du méridien terrestre allant de Dunkerque à Barcelone. Alors que la monarchie française vivait ses derniers jours et que l'égalité révolutionnaire mobilisait le peuple, ces deux astronomes partaient accomplir une mission qui avait pour but de définir la nouvelle unité de mesure, le mètre, en utilisant le globe comme étalon de mesure commun. On se disait que le mètre deviendrait alors éternel, comme la Terre elle-même, et donc qu'il appartiendrait également à tous les hommes. Le mètre serait désormais défini comme la dix millionième partie du quart de méridien terrestre<sup>18</sup>.

Les deux astronomes et géodésiens, reconnus par leurs pairs pour leur rigueur exceptionnelle, commencèrent ainsi leur périple : Delambre vers le nord et Méchain vers le sud, et ce, dans un pays déjà ébranlé par la Révolution. Pendant sept ans, Delambre et Méchain auront parcouru la section du méridien pour déterminer sa valeur avec une précision jusqu'alors inégalée grâce à l'utilisation d'un nouvel instrument de mesure d'angles, le cercle répétiteur de Borda. Il va sans dire que le contexte politique et social extrêmement tendu dans lequel se situait leur mission entraîna son lot de péripéties aux deux géodésiens. Par exemple, en traversant certaines frontières, Delambre dut plusieurs fois réaliser des démonstrations publiques afin de prouver aux gardes nationaux et aux curieux que les objets mystérieux avec lesquels il voyageait, ses fameux cercles répétiteurs, n'étaient pas conçus à des fins militaires ou pour faire de l'espionnage. Lors de plusieurs escales, il lui fallut donc convaincre les révolutionnaires qu'il s'agissait bien d'instruments d'astronomie servant à mesurer la Terre et non d'instruments de guerre. On raconte même que ces démonstrations publiques pouvaient attirer des foules, à mesure que se répandait le bruit qu'une attraction scientifique avait lieu aux abords de la ville.

Une anecdote intéressante concerne l'aventure de Delambre à Saint-Denis. Lors de son passage, celui-ci réussit à sauver une basilique de la destruction. En effet, plusieurs patriotes révolutionnaires exigeaient qu'on détruise les églises, qui étaient alors un symbole d'autorité associé à la royauté. La basilique de Saint-Denis était le lieu de sépulture de plusieurs cadavres royaux, comme ceux d'Henri IV et du Roi-Soleil. Les populistes ayant exhumé les cadavres voulaient que le clocher de la basilique soit détruit. Comme celui-ci était essentiel pour le travail de triangulation de Delambre, la Commission des poids et mesures



3.4 : Jean-Baptiste Delambre (1749-1822) par Julien Leopold Boilly (1820).



3.5 : Portrait de Pierre-François Méchain (1744-1804) peint par Hurle.



3.6 : Basilique Saint-Denis.

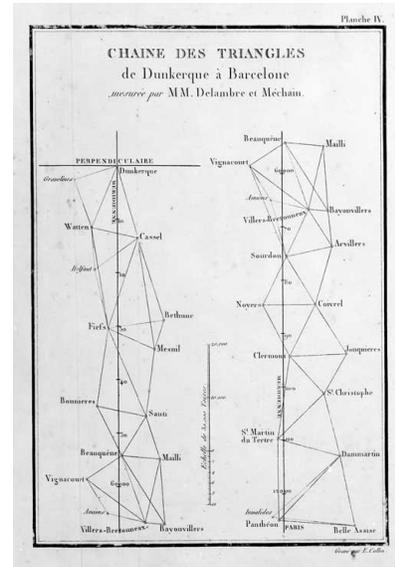
<sup>18</sup> Le quart de méridien correspond à la distance séparant le pôle Nord de l'équateur.

intervint et réussit à éviter que la tour ne soit détruite en justifiant qu'elle était d'une grande utilité pour la science et la détermination des unités de mesure de la République. Seuls les crucifix et les fleurs de lys, offensant pour les patriotes, ont disparu. Encore aujourd'hui, il est possible d'admirer cette œuvre architecturale de style gothique « sauvée » par la conquête du mètre. On pourrait donc dire que la science est littéralement venue au secours de cette basilique!

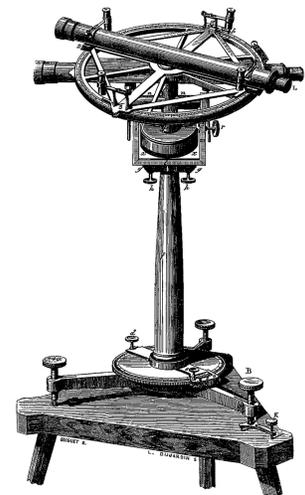
La technique de Delambre et Méchain était somme toute assez simple (voir la démonstration La triangulation et la dioptra, à la section B). Elle consistait à mesurer tous les angles d'une chaîne de triangles ayant un côté commun avec un autre ainsi que la longueur d'un seul côté (auss appelé la grande base), et ce, afin de déterminer mathématiquement la longueur de tous les côtés (étant donné que deux triangles adjacents ont un côté commun). Le travail de Delambre et Méchain était donc d'appliquer ces principes à partir de stations en hauteur (clochers, tours, volcans, etc.), qui deviendront les sommets de ces triangles. Chaque sommet devait être visible depuis au moins trois autres stations afin d'obtenir une longue chaîne de triangles chevauchant le méridien. Ensuite, ils devaient mesurer sur le terrain la longueur réelle de la grande base, le côté d'un seul de ces triangles. Cette mesure était effectuée en plaçant bout à bout des règles (sur plusieurs milliers de toises, soit une ancienne unité de mesure valant six pieds ou approximativement l'envergure des bras) et elle servait à déduire par la suite la longueur de tous les côtés des triangles contigus. « À partir de là, [le géodésien] pouvait trouver la longueur de l'arc de méridien depuis la station la plus au nord jusqu'à la station la plus au sud. Enfin, il calculait les latitudes respectives des deux extrémités nord et sud en utilisant les résultats de ses observations astronomiques, de façon à déterminer la longueur du quart de méridien à partir de la longueur de l'arc. Et il obtenait ainsi les dimensions de la Terre. » (Alder, 2005, p. 57).

Bref, en appliquant ce principe, l'Académie des sciences cherchait à obtenir une précision extrême par l'entremise du savoir-faire des consciencieux Delambre et Méchain et de leur très précis cercle de Borda<sup>19</sup>. Cela dit, ce qu'il apparaît particulièrement important de discuter à propos de cette histoire est son lien avec la définition de l'erreur en science et de ses implications. Au départ,

<sup>19</sup> Notons toutefois que plusieurs aspects devaient être corrigés, dont voici quelques exemples. Puisque les mesures étaient faites en hauteur, le géodésien devait corriger les valeurs obtenues en ramenant le triangle à l'horizontale. La réfraction atmosphérique altérait aussi les visées; il fallait donc tenir compte de la déviation des rayons lumineux. Comme la somme des angles d'un triangle sur une surface courbe n'atteint pas tout à fait 180 degrés, une autre correction devait être faite. Et ainsi de suite.



3.7 : La triangulation de la méridienne de Paris par Delambre et Méchain (1792-

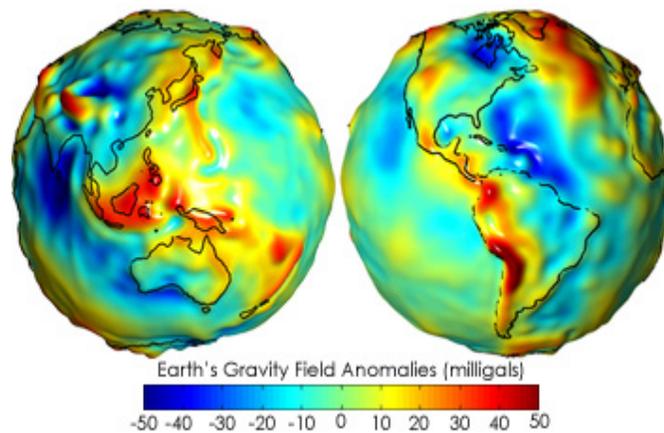


3.8 : Cercle répéteur de Borda, disposé pour les observations azimutales.

Delambre et Méchain étaient à la recherche d'une perfection utopique, mais ils en sont venus (malgré eux) à accepter d'inévitables imperfections à leurs mesures. Par leur travail, ils ont non seulement réussi à modifier l'idée que nous nous faisons de la forme de la Terre, mais ils nous ont surtout permis de modifier celle que nous nous faisons de l'erreur.

De nos jours, la science dite moderne accepte l'erreur comme faisant partie de son lot. On n'attend pas des scientifiques qu'ils trouvent « la vérité », on leur demande seulement d'être honnêtes, ce qui ne fut toutefois pas toujours le cas. À cette époque justement, l'erreur était plutôt vue comme une défaillance morale. La question qu'on se posait n'était pas de savoir *à quoi* faire confiance, mais plutôt *à qui*. « Un savant honorable se rendait personnellement responsable de la cohérence de ses résultats, sans toutefois préciser en quoi consistait cette cohérence. » (Alder, 2005, p. 336). Cela explique probablement pourquoi Méchain, en pensant avoir fait une erreur dans sa mesure de latitude prise au Mont-Jouy, développa une réelle obsession pour la précision. Il ira jusqu'à trafiquer ses données pour qu'elles correspondent davantage à la valeur attendue<sup>20</sup>. Méchain et ses contemporains n'étaient simplement pas en mesure de concevoir l'idée que l'erreur pouvait provenir non pas de la nature ni des observations, mais plutôt de la façon dont ils interprétaient cette erreur. En effet, ils ignoraient encore tout des statistiques. Ils ne faisaient donc pas de distinction formelle entre la précision (la cohérence intrinsèque des résultats) et l'exactitude (la mesure du degré de rapprochement des résultats et de la « réponse correcte »).

Désormais, on sait que Méchain ne s'était pas réellement trompé; il s'était simplement mépris sur le sens de l'erreur. Or, c'est justement grâce à cette méprise qu'il a, sans le savoir, contribué à améliorer notre compréhension de l'erreur et changé à jamais la conception de la pratique scientifique. Malheureusement, seul Delambre, en acceptant l'idée difficile de l'imperfection des connaissances terrestres, aura survécu pour tirer parti de ces nouveaux outils intellectuels développés à partir des résultats de Méchain. En partie grâce à ceux-ci, les géodésiens se seraient alors mis d'accord sur le fait que la Terre soit un ellipsoïde aplati aux pôles. Par contre, ils restaient incapables de s'entendre sur son degré d'excentricité, qui pouvait varier d'un endroit à l'autre. Ils ont dû assumer l'idée que les résultats avaient été obtenus par des hommes faillibles (mais exigeants) avec l'aide d'instruments faillibles (mais ingénieux) à la surface d'une planète qui était (peut-être) irrégulière et bosselée. Ils en arrivèrent à se demander quelle était la courbe qui correspondait le mieux à la moyenne des résultats des observations et combien les autres résultats s'écartaient de cette courbe.

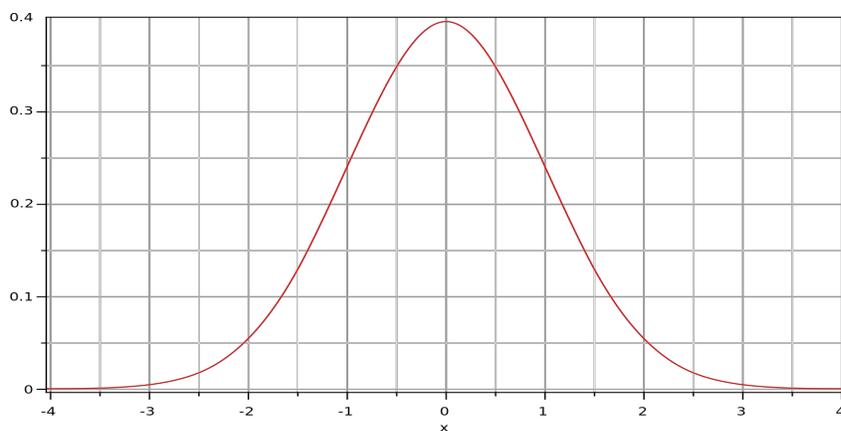


3.9 : Le géoïde selon la NASA.

<sup>20</sup> Précisons toutefois que cela était une pratique plutôt courante à l'époque, voire une prérogative accordée aux savants.

Ce fut justement la question que se posa Adrien Marie Legendre (1752-1833). L'analyse qu'il proposa – le principe des moindres carrés – deviendra la base des statistiques modernes. Ce fut une découverte immense pour la science, non parce qu'elle permettait de mieux connaître *la nature*, mais parce qu'elle permit de mieux connaître l'erreur. Pendant des siècles, les savants ont utilisé leur intuition et leur expérience pour attester du résultat de la mesure d'un phénomène correspondant à la « meilleure » observation. Au courant du XVIII<sup>e</sup> siècle, ils croyaient que la moyenne arithmétique de leur mesure offrait un aperçu « équilibré » de leurs résultats. Certains savants parmi les plus rigoureux, comme Méchain, croyaient pourtant que les mesures s'écartant trop de la moyenne comptaient forcément moins et donc qu'il était possible de les supprimer. Cependant, lorsqu'ils se trouvaient confrontés à des phénomènes aux variables multiples et à des observations contrastées, comme la mesure de la courbure de la Terre à partir d'observations faites en des points de latitudes différents, de nouvelles questions apparaissaient. La proposition de Legendre devenait bien commode dans ces contextes en suggérant de prendre la courbe la plus représentative, celle qui minimise le carré de l'écart entre chaque point et cette courbe. Précisons d'ailleurs qu'il testa sa méthode avec la collection des données de Delambre et Méchain, ce qui lui permit d'établir que c'était bien la Terre qui était déformée et non leurs résultats.

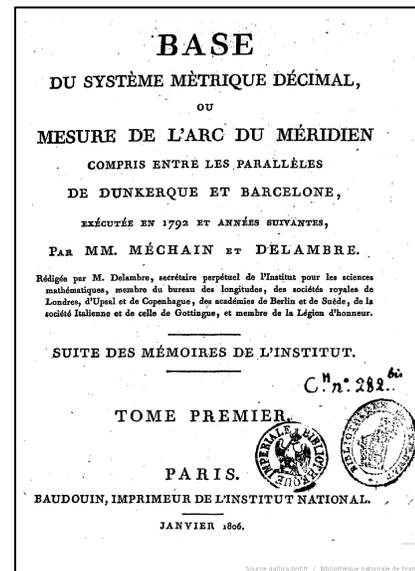
Près de quatre ans après que Legendre ait publié sa méthode, le grand mathématicien allemand Karl Friedrich Gauss (1777-1855) prétendit qu'il utilisait la règle des moindres carrés depuis déjà plusieurs années. Cette découverte simultanée n'avait pourtant rien d'une coïncidence. Les deux hommes s'étaient penchés sur le même problème de géodésie. Bien que Legendre fût le premier à publier, c'est le nom de Gauss qu'on retient pour parler de sa « fameuse courbe ». En effet, Legendre a présenté sa règle des moindres carrés comme une méthode pratique et convaincante, mais ce serait Gauss qui l'aurait justifiée en montrant qu'elle donnait la valeur la plus probable dans des situations où les erreurs étaient réparties selon une courbe en cloche. Cette approche fondée sur les probabilités présentait des avantages certains : elle réduisait d'autant plus l'erreur que le nombre d'observations augmentait, elle indiquait comment faire la distinction entre les erreurs aléatoires (du domaine de la précision) et les erreurs constantes (du domaine de l'exactitude). C'était nouveau. « Dans leur quête d'une perfection illusoire, les savants n'avaient pas seulement appris à faire la distinction entre différents types d'erreurs, ils savaient maintenant que l'on pouvait aborder l'erreur avec une confiance quantitative. » (Alder, 2005, p. 473).



3.10 : Fonction gaussienne.

Ainsi, au cours du siècle suivant, on apprit à gérer l'incertitude. Le domaine des statistiques en émergence transforma les sciences physiques, inspira la biologie et donna naissance aux sciences sociales. Entre-temps, les « savants » sont devenus des « scientifiques »!

Finalement, la valeur définitive et officielle du mètre sera fixée à 443,296 lignes<sup>21</sup> par la loi du 10 décembre 1799. Lors de l'officialisation du mètre comme unique étalon, soit une règle de platine qui fut présentée en grande pompe, Pierre Simon Laplace (1749-1827), probablement le plus important spécialiste de physique mathématique de son époque, rappela à l'assistance qu'un mètre fondé sur les dimensions de la Terre faisait de chaque propriétaire terrien un « copropriétaire du monde ». Pourtant, ce mètre étalon ne correspondait déjà plus à la Terre, et ce, à cause des anomalies dans les résultats de Méchain. Sa « fraude » ne sera découverte par Delambre que plusieurs années plus tard lors de la rédaction de la *Base du système métrique*. En 1837, le gouvernement français imposera le système métrique et le rendra obligatoire dans toute la France et dans ses colonies à partir du 1<sup>er</sup> janvier 1840.



3.11 : Base du système métrique décimal, ou mesure de l'arc méridien compris entre les parallèles

L'étalon du mètre a ainsi reposé sur un artéfact jusqu'en 1960, année où il sera dématérialisé et où le Système international d'unité (SI) succédera au système métrique lors de la 11<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures, qui rassemble tous les quatre ans à Paris les métrologistes du monde entier. Le mètre fut alors redéfini comme étant égal à 1 650 763,73 fois la longueur d'onde, dans le vide, d'une radiation orangée de l'atome krypton 86.



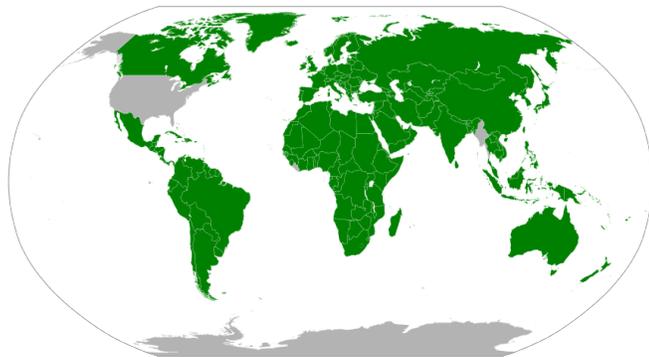
3.12 : Mètre étalon (l'un des seize réalisés par Chalgrin entre 1796 et 1797) situé au 36, rue de Vaugirard à Paris.

<sup>21</sup> La ligne était une division de la toise, une ancienne unité de mesure, un peu comme le millimètre est une division du mètre. Il y avait 864 lignes dans une toise, soit approximativement six pieds.

Défini à partir d'un phénomène physique, l'étalon du mètre devenait naturel et reproductible, ce qui offrait des garanties de permanence et d'invariabilité. Cela permettait aussi d'avoir une exactitude près de cinquante fois supérieure à celle qu'autorisait le prototype international, et une meilleure garantie de conservation à très long terme. En 1983, année importante pour l'avancement des travaux sur la vitesse de la lumière et sur les horloges atomiques, le mètre est à nouveau redéfini, cette fois en fonction de la vitesse de la lumière. Aujourd'hui, il est égal à la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant  $1 / 299\,792\,458$  de seconde.

Aujourd'hui, le SI a été adopté presque partout sur la planète et souvent dans le contexte de crises politiques (Alder, 2005), à l'exception des États-Unis, du Libéria et de l'Union du Myanmar (ex-Birmanie). De son côté, le Canada a adopté le système métrique depuis 1970, sans attendre son voisin du Sud avec qui il entretient pourtant d'importantes relations internationales. Néanmoins, près de 45 ans plus tard, le système impérial est encore couramment utilisé, particulièrement dans le domaine de la construction et de l'alimentation. Cependant, cette double utilisation ne se fait pas sans problème. L'exemple de l'écrasement de la sonde américaine *Mars Climate Orbiter* (1998) est révélateur. Cet accident a été causé par une erreur dans l'expression d'une force de poussée, ce qui a modifié la trajectoire de la sonde. Les deux équipes responsables du projet ne travaillaient pas avec le même système de référence. Deux équipes d'ingénieurs avaient utilisé le système métrique alors que l'autre s'était servie des unités de mesure anglaises. Il en est résulté une erreur de trajectoire de 96 km et la perte de l'engin, soit 125 millions de dollars.

En fin de compte, il semble n'y avoir aucune façon d'échapper à la sentence de Protagoras, vieille de 2500 ans : « L'homme est la mesure de toutes choses »!

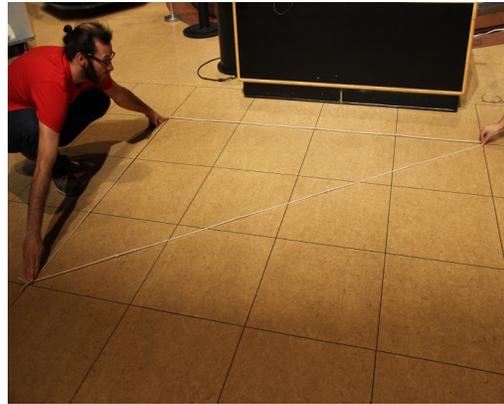


3.13 : En gris, pays n'ayant pas encore adopté le système métrique.

## B) Description et utilisation des démonstrations

### Démonstration : La corde à 13 nœuds

Pour cette démonstration, on utilise une corde ayant 13 nœuds, qui divisent la corde en 12 parties égales d'une coudée chacune. En guise d'introduction, il est intéressant de montrer aux participants que la distance entre deux nœuds correspond à la distance entre le bout de l'index et le coude, soit une coudée. Comme expliqué dans la section « repères culturels » de cette fiche, la coudée est une unité de mesure de longueur très ancienne. On présente d'abord la corde à 13 nœuds comme étant un instrument de mesure utilisé jadis par les Égyptiens pour l'arpentage de terrains. Ensuite, il est utile de faire réaliser aux participants que la corde est divisée en 12 sections afin de faciliter certaines opérations mathématiques. En effet, la base 12 comporte plus de diviseurs communs que la base 10. Pour illustrer cette idée, l'animateur plie la corde et montre comment elle est, en quelque sorte, l'ancêtre lointain de nos calculatrices modernes. Par exemple, pour obtenir  $5/8$  de coudée, on prend cinq coudées et on plie le tout en deux une première fois ( $5/2$ ), une deuxième ( $5/4$ ) et une troisième fois ( $5/8$ ).

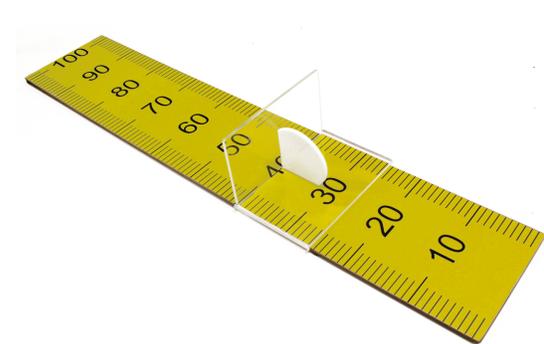


3.14 : CDSP, 2015.

Par la suite, l'animateur peut interroger les participants quant à la manière dont ils s'y prendraient pour faire un angle droit sans utiliser d'instruments modernes comme un rapporteur d'angle. Après cette courte discussion, il invite deux participants à venir tenir un nœud de la corde afin de former un triangle 3, 4, 5. Il peut alors démontrer qu'il s'agit bien d'un triangle rectangle en étirant la corde et en la déposant au sol en l'alignant sur les tuiles du plancher. Cette démonstration peut ainsi servir de prémisses pour parler d'instrument de mesure, mais surtout de triangulation.

### Démonstration : Le mètre debout et couché

Pour introduire l'idée de référence, l'animateur demande aux participants de faire une estimation de sa taille. Peut-être que certains proposeront des mesures en mètre alors que d'autres utiliseront les pieds, ce qui est en soit intéressant à souligner. L'animateur répète ensuite sa question, mais cette fois en se rapprochant du mètre jaune qui aura préalablement été adossé à un mur ou à une porte (un participant devra le tenir en place). Il est probable que les valeurs suggérées par les participants soient plus précises, considérant la référence à proximité.



3.15 : CDSP, 2015.



3.16 : CDSP, 2015.

L'animateur pourrait alors raconter l'histoire (fictive) de sa grand-mère qui lui disait : « *Si tu te sens petit, va te coucher.* » Pour en discuter, l'animateur invite un participant à venir se mesurer debout, puis couché. On montre ainsi que nous sommes plus grands couchés, ce qui permet de parler de l'importance de décrire le contexte pour justifier une mesure. En effet, la différence entre la mesure debout et celle couchée dépasse la plupart du temps l'incertitude de la règle ( $\pm 0,5$  cm). Cette différence de grandeur s'explique par le fait qu'en position verticale (debout), la gravité agit sur notre colonne vertébrale. L'espace entre chacune d'elles s'en trouve réduit par l'écrasement des disques intervertébraux. Il peut être intéressant de conclure cette démonstration en discutant du cas des astronautes qui, lors d'un séjour dans l'espace, peuvent gagner de 5 à 8 cm, et ce, à cause de l'absence apparente de gravité. En fin de compte, cette démonstration offre un contexte propice pour réfléchir sur la manière dont l'erreur sur la mesure est prise en compte et comment cela influence l'analyse des données recueillies.

### Démonstration : La triangulation et la dioptra

Cette démonstration vise à faire comprendre la technique de triangulation. Le montage est une référence au cercle répétiteur de Borda, l'instrument qu'ont utilisé Delambre et Méchain pour déterminer la longueur de la partie du méridien pour définir l'étalon du mètre. Toutefois, le montage (ci-contre) s'apparente davantage à une [dioptra](#), un instrument bien plus rudimentaire (et plus ancien, qui remonte vraisemblablement à l'Antiquité) de triangulation, qui convient mieux au contexte de la classe.

Afin d'introduire la démonstration, l'animateur peut proposer une première expérience interactive de triangulation. Dans un premier temps, les participants sont invités à se jumeler avec quelqu'un. La première personne place son index devant son collègue, qui a un œil fermé. Ce dernier doit tenter d'aligner son propre index directement sur le doigt de l'autre en partant d'assez haut. L'exercice devrait lui faire réaliser que sans ses deux yeux, il est beaucoup plus difficile de déterminer les distances. En effet, notre cerveau interprète les distances relatives notamment grâce à la distance qu'il y a entre nos deux yeux.

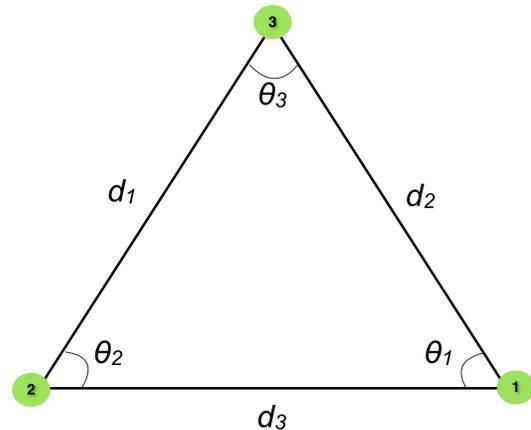


3.17 : CDSP, 2015.

Dans un deuxième temps, tous les participants sont invités à placer leur index à environ 15 cm de leur nez, en fixant un objet de référence se trouvant loin devant eux (par exemple le coin du tableau de la classe). Avec leur main, ils cachent ensuite successivement chacun de leurs yeux en prenant soin d'observer le déplacement de leur doigt par rapport à leur objet de référence. Ils répètent ensuite les mêmes étapes, mais cette fois en éloignant la distance entre l'index et le nez. Cette fois, ils constateront que leur doigt par rapport à l'objet de référence ne se déplace pratiquement plus.

Cette deuxième expérience permet donc de constater une des limites de notre sens de la vue dans l'évaluation des distances. Lorsqu'un objet est éloigné, nos yeux n'arrivent plus à trianguler, ce qui a probablement conduit à la création d'instruments de mesure. La dioptra et le GPS en sont des exemples. La table est ainsi mise pour discuter du rôle des deux yeux dans la perception des distances afin de faire un lien avec la technique de triangulation utilisée pour mesurer des distances, comme celle des étoiles.

L'utilisation de la dioptra en classe permet de vivre une expérience concrète de triangulation et une situation de résolution de problème tout en réinvestissant les notions liées à la géométrie des triangles. D'abord, l'animateur dispose trois « sommets » dans trois coins de la classe, idéalement sur des tables (représentés sur la figure ci-contre par les points 1, 2, 3). Ces sommets pourraient être des pattes de chaises ou des bâtons tenus par des assistants, par exemple. Ils serviront de points de visée, à la manière des clochers d'église qu'utilisaient Delambre et Méchain. Par la suite, l'animateur demande à la classe de trouver une manière de déterminer les distances  $d_1$  et  $d_2$ , si on ne connaît que  $d_3$  (qu'on détermine avec un ruban à mesurer). Une discussion et des essais s'en suivront.



3.18 : CDSP, 2015.



3.19 : CDSP, 2015.

Pour y parvenir, il faudra d'abord déterminer les angles  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  et  $\theta_3$  avec la dioptra. Pour ce faire, une personne doit positionner l'instrument sur un sommet, par exemple le sommet 1, et faire en sorte que le curseur est à zéro lorsque ses deux pointes sont alignées avec le sommet 2. Il faudra approcher son œil des pointes (voir photo ci-contre). Il est utile de demander à une autre personne de valider l'alignement, comme le faisaient justement les assistants des triangulateurs de l'époque. Par la suite, il suffit de déplacer le curseur afin de l'aligner avec le sommet 3 et de noter la mesure de l'angle  $\theta_1$ . Pour déterminer les deux autres angles, il faut refaire les mêmes étapes, mais cette fois à partir des sommets 2 et 3 en plaçant la dioptra à la place du sommet. Enfin, il ne reste qu'à mettre les valeurs dans l'équation (loi des sinus) et de la résoudre :

$$\frac{\sin \theta_1}{d_1} = \frac{\sin \theta_2}{d_2} = \frac{\sin \theta_3}{d_3}$$

Pour conclure cette démonstration, il pourrait être intéressant de comparer ces valeurs calculées à des mesures directes (faites avec un ruban à mesurer). Cela pourrait introduire une discussion portant sur l'idée d'incertitude sur la mesure.

## C) Concepts de sciences associés à la fiche

- Triangle rectangle (3, 4, 5)
- Technique de triangulation
- Incertitude sur la mesure
- Étalons et unités de mesure

## D) Informations et ressources complémentaires

### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**Alder, K. (2005).** *Mesurer le monde : l'incroyable histoire de l'invention du mètre*. Paris : Éditions Flammarion, collection Champs histoire.

Ce livre relate l'histoire de la conquête de l'étalon du mètre défini d'après les dimensions de la Terre, ou du moins la partie du méridien qui va de Dunkerque à Barcelone en passant par Paris. C'est en 1792 que deux astronomes et géodésiens, Delambre et Méchain, sont mandatés par l'Académie des sciences (sous la pression du peuple) pour « mesurer le monde » par triangulation. On cherche à se doter d'une mesure universelle, le mètre, correspondant à la dix millionième partie de la longueur d'un quart de méridien terrestre.

**Glavieux, V. (2015, mai).** *Unités de mesure cherchent étalon*. La Recherche, (499), 62-67.

Cet article concerne la révision de quatre unités de mesure (le kilogramme, l'ampère, la mole et le kelvin) prévue pour la prochaine Conférence générale des poids et mesure, qui se tiendra en 2018. Ces unités sont maintenant en décalage avec les besoins des sciences modernes. On y explique les raisons de ces changements ainsi que les nouvelles définitions qui serviront à établir ces étalons.

### LIENS UTILES

**Le Bureau international des poids et mesures :** [<http://www.bipm.org>]

Ce site est celui de l'organisation intergouvernementale dont les États membres agissent en commun en ce qui concerne les sujets liés à la science des mesures et aux étalons de mesure. On y présente notamment l'actualité concernant les domaines métrologiques.

**Histoire du mètre :** [<http://www.entreprises.gouv.fr/metrologie/histoire-metre>]

Cet article intéressant présente les grandes lignes de l'histoire du mètre et du passage au système décimal. Il y est notamment question du système métrique et de l'évolution des étalons.

**La métrologie française :** [<http://www.metrologie-francaise.fr/fr/histoire/histoire-mesure.asp>]

Ce site du Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE) présente de manière très synthétique l'histoire du mètre et l'épopée de Delambre et de Méchain. Le LNE a la responsabilité du pilotage de la métrologie française et il est l'homologue des plus grands instituts nationaux de métrologie du monde. Les unités de base, leur définition et les unités dérivées du Système international d'unités (SI) y sont aussi présentées.

## THÈME 2 : CROYANCES ET ÉVOLUTION DES IDÉES

### FICHE : L'ÂGE DE LA TERRE

#### A) Repères culturels

On associe assez couramment les concepts scientifiques et la méthodologie expérimentale qui s'y rattache aux idées de neutralité et d'objectivité. Nous réalisons rarement que les valeurs de ceux qui œuvrent en science, leurs croyances, leurs a priori, les contextes sociaux et économiques dans lesquels ils évoluent et les principes sur lesquels ils s'appuient peuvent avoir une influence sur leur travail et sur les conclusions auxquelles ils arrivent. Pour illustrer ce propos, l'histoire de la détermination de l'âge de la Terre, qui a évolué sur plusieurs centaines d'années et qui a été sujet de controverses, semble intéressante.



3.20 : La Bille bleue : vue de la Terre par l'équipage d'Apollo 17 lors de leur voyage vers la Lune.

Très longtemps, on a cru que la Terre existait depuis toujours. Ce n'est qu'au milieu du XVII<sup>e</sup> siècle que cette idée fut remise en question par plusieurs « savants » qui ont cherché à estimer son âge à l'aide de différentes méthodes. De nombreux débats ont alors divisé des groupes de penseurs dont les principales propositions sont présentées ici. Sans prétendre à une description exhaustive et chronologique, ces diverses théories, formulées à différentes époques, permettent de mettre en exergue un contexte riche concernant l'évolution de l'idée de mesure en sciences.

#### Décompte des générations dans la Bible

Vers le milieu des années 1600, James Ussher (1581-1656), un théologien irlandais, avança que la Terre n'existait pas depuis toujours, mais seulement depuis 4 004 ans av. J.-C. Pour réaliser cette estimation, il aurait fait le décompte de toutes les générations citées dans la Bible, qui en contient une chronologie détaillée. Par exemple, Adam aurait vécu 930 ans, il aurait enfanté Seth à l'âge de 130 ans, qui engendra Énoch à 105 ans, qui donna naissance à Qénân à 90 ans, etc. À partir de ces informations, il devient possible de déduire la date de la naissance de Noé, soit 1 056 ans après la Création. Comme Noé avait 600 ans quand arriva le Déluge, ce cataclysme se serait produit 1 656 ans après la Création. Abraham naît donc 292 ans plus tard, et ainsi de suite... Jusque-là, la « précision » est totale!

Par ailleurs, grâce aux indices décelés dans ce document sacré, Ussher ira jusqu'à avancer une date particulière pour la Création : le 22 octobre 4 004 av. J.-C. En effet, on peut lire dans la Bible qu'à ce moment précis le jour et la nuit étaient de même durée, ce qui correspondrait à l'un des équinoxes. On y dit aussi que le jardin d'Éden était alors abondant. Cela peut laisser croire qu'il s'agissait



3.21 : Bible de 1866.

de l'équinoxe d'automne, correspondant au temps des récoltes, plutôt qu'à l'équinoxe du printemps. Cette estimation de l'âge de la Terre est venue bousculer les idées de l'époque alors véhiculées par l'Église et selon lesquelles la Terre aurait toujours existé. Comme la religion chrétienne occupait alors une place très importante dans la vie des gens et qu'elle exerçait sur eux un pouvoir important, plusieurs ont évidemment rejeté cette théorie.

D'autres scientifiques de renom, comme Johannes Kepler (1571-1630) et ensuite Isaac Newton (1643-1727), ont voulu concilier sur la base de leur croyance religieuse les écrits bibliques et leurs savoirs scientifiques pour estimer l'âge de la Terre. Ceux-ci ont ainsi tenté de faire la *preuve* de la validité de l'estimation d'Ussher en reliant certaines observations astronomiques déjà bien documentées, que les Babyloniens avaient réalisées durant l'Antiquité, à différentes informations tirées des légendes grecques et des Écrits sacrés. Avec cette méthode, Kepler et Newton seraient eux aussi arrivés à une estimation d'environ 4 000 ans av. J.-C.

### **Diminution progressive du niveau de la mer**

Toujours dans l'optique de concilier les observations scientifiques aux croyances établies, René Descartes (1596-1650) se serait aussi penché sur une estimation de l'âge de la Terre, mais selon l'angle du récit de la Création. Selon ce récit, la Terre était entièrement recouverte d'eau au commencement et ce ne serait que plus tard que les continents auraient émergé. Les observations géologiques de fossiles que l'on retrouvait à plusieurs endroits sur la Terre, même en montagne, semblaient corroborer ce récit. Selon Descartes, entre autres, la compréhension de l'évolution géologique de la Terre permettrait d'estimer son âge. À cette époque, on commençait à dire que même si la Terre avait été créée par Dieu, les lois physiques devaient être universelles, applicables non seulement dans le présent, mais aussi dans le passé. En ayant comme prémisses les travaux de Copernic, qui auraient contribué de manière significative à faire réaliser que la Terre n'est pas au centre du Monde, certains vont tenter d'expliquer comment notre planète s'est formée. Cette « théorie de la Terre », dont Descartes ouvre la porte dans la quatrième partie de ses *Principia Philosophiae*, devint rapidement une science « à la mode ».



3.22 : Portrait de René Descartes (1596-1650) par Frans Hals.

En s'inscrivant dans la continuité des travaux de Descartes, Benoît de Maillet (1656-1738) en est arrivé à mesurer la distance entre les ports ensablés afin d'en extrapoler la vitesse d'élévation des continents et de déterminer ainsi l'âge de la Terre, qu'il estima à près de deux milliards d'années. Cependant, comme cette proposition était en profonde contradiction avec les Saints Écrits, Benoît de Maillet prendra la précaution de publier ses résultats sous l'anagramme de *Telliamed*, un ouvrage qui ne circula d'abord que sous la forme de manuscrits clandestins. Son *Telliamed* (ou *Entretiens d'un philosophe indien avec un missionnaire français*) ne sera édité officiellement que dix ans après sa mort. Cet ouvrage controversé et très critiqué par certains de ses contemporains aura néanmoins une influence certaine sur les naturalistes des Lumières qui, sur les plans scientifique et philosophique, accordent de plus en plus d'importance à la raison plutôt qu'à la foi et aux croyances, et sur les plans politique et économique, davantage de valeur à la liberté et à l'égalité plutôt qu'à la noblesse et au clergé.



BENOÎT DE MAILLET *Gentilhomme Lorrain, Consul Général du Roi en Egypte et en Tyrone, depuis l'ordonnance de l'Échelle du Levant et de Barbarie et nommé par Sa Majesté au grade de son Excellence avec le Roi d'Ethiopie - Autour des Monstres de l'Égypte - et de l'Éthiopie.*

3.23 : Benoît de Maillet, 1656-1738.

## Mesures de température

*C'est par des expériences fines, raisonnées et suivies, que l'on force la nature à découvrir son secret; toutes les autres méthodes n'ont jamais réussi [...]. Les recueils d'expériences et d'observations sont donc les seuls livres qui puissent augmenter nos connaissances [...].*

### Préface du comte de Buffon dans sa traduction de *La Statique des végétaux* de Stephen Hales, 1735

Cette citation du comte de Buffon, écrite près d'une centaine d'années après le début des premières estimations de l'âge de la Terre, illustre bien la vision des sciences à cette époque. En effet, l'empirisme était le paradigme dominant des sciences au 18<sup>e</sup> siècle, dont la prémisse situait la connaissance comme étant issue de l'expérience sensible et non de croyances religieuses. On conçoit les expérimentations et les mesures comme des moyens d'accumuler des observations qui permettent ensuite, en faisant appel à un raisonnement inductif, de formuler des règles générales et d'en extraire des lois.



3.24 : Forges de Buffon, Bourgoigne, France.

Vers 1755, Georges-Louis Leclerc (dit comte) de Buffon (1707-1788), mesure dans sa forge la décroissance de température en fonction du temps en chauffant des sphères métalliques de différents diamètres (voir à ce sujet la démonstration proposée dans cette fiche à la section B). Sur la base de ses observations, soit que la courbe de décroissance de température de n'importe quel matériau a toujours la forme d'une exponentielle décroissante (sauf lors des transitions de phase), et ce, peu importe l'état dans lequel il se trouve (solide, liquide ou gazeux), Buffon fera une extrapolation pour le cas de la Terre, dont les dimensions étaient connues. Le résultat qu'il obtint, soit environ 10 millions d'années, le surprit tellement qu'il n'osa pas en faire part à la communauté scientifique. Il parla plutôt de 77 000 ans, ce qui restait néanmoins nettement supérieur aux croyances de l'époque. L'Église étant encore très influente, il sera forcé plus tard se rétracter, car selon son expression : « il valait mieux être plat que pendu! »

Quelques décennies après Buffon, Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) tente à son tour d'estimer l'âge de la Terre. Son analyse mathématique est plus élaborée que celle de Buffon. C'est d'ailleurs en s'intéressant au problème de propagation de la chaleur que Fourier développera ses techniques d'analyse mathématique (séries de Fourier, transformée de Fourier, etc.) qui sont aujourd'hui utilisées dans plusieurs domaines, notamment l'astronomie. Dans son calcul de l'âge de la Terre, Fourier tenta de considérer un facteur lui apparaissant important et que Buffon n'avait pas pris en compte. Il s'agit de l'idée que la croûte terrestre solidifiée puisse agir comme un isolant diminuant ainsi les pertes de la chaleur par la Terre. Cela dit, bien qu'on soit à peu près certain que Fourier ait effectivement tenté de calculer l'âge de la Terre, on ne retrouva pas de traces de son calcul, puisqu'il les aurait détruites. Toutefois, en réutilisant le modèle de Fourier, on peut conclure qu'il aurait obtenu un âge de 100 millions d'années pour la Terre. Il est donc probable qu'il n'ait pas conservé ce résultat, qui était beaucoup trop élevé par rapport à ce qui était socialement reconnu à cette époque et selon ce qu'il était lui-même en mesure d'admettre.

William Thomson (1824-1907), connu plus tard sous le nom de lord Kelvin et reconnu comme illustre physicien, reprendra le modèle du comte de Buffon en se basant sur les lois de la diffusion de la chaleur. Son hypothèse de base était qu'à sa naissance, la Terre n'était qu'une boule de feu refroidissant graduellement depuis. Ses calculs le conduiront à estimer l'âge de la Terre entre 20 à 400 millions d'années et entre 20 à 40 millions d'années pour celui du Soleil. Puisqu'il semblait alors évident pour Kelvin que la Terre était plus jeune que le Soleil, ce dernier se basera sur ses estimations de l'âge du Soleil pour diminuer d'autant celles de l'âge de la Terre.

## Observations géologiques

Pour certains géologues et naturalistes de cette période, comme Charles Lyell (1797-1875) et Charles Darwin (1809-1882), l'estimation de Kelvin paraissait beaucoup trop faible. Ces derniers, inspirés par les travaux de James Hutton (1726-1797) et surtout par ceux de Nicolas Steno (1638-1686), s'appuyaient sur le principe de superposition selon lequel la couche supérieure d'une succession sédimentaire est toujours plus récente que les couches inférieures, à moins que des processus ultérieurs soient intervenus. La stratification est en

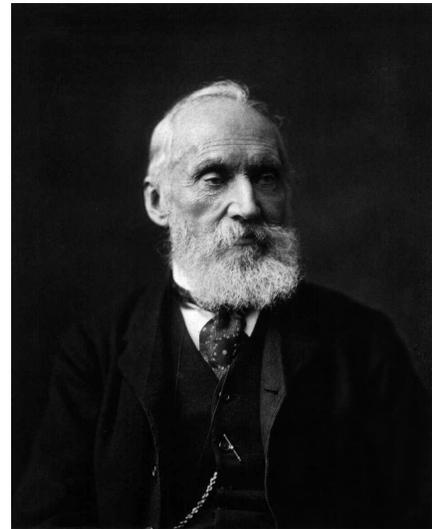


3.25 : Stratification de la formation Arisaig (Silurien), Nouvelle-Écosse.

effet utile pour classer certains vestiges, notamment des fossiles d'organismes vivants. En fonction de la profondeur des strates sédimentaires qui se succèdent et dans lesquelles se retrouvent ces vestiges, il est possible de déduire une chronologie relative, sans toutefois être en mesure d'obtenir une date précise. La technique reste donc plus « incertaine » que ce que les théories mathématiques des physiciens arrivaient à prédire. Néanmoins, les nombreuses observations de fossiles permirent aux géologues de proposer une nouvelle estimation de l'âge de la Terre, cette fois en termes de milliards d'années. Cela constituait une rupture catégorique avec ce qui était alors suggéré. La querelle opposant naturalistes et physiciens était dès lors lancée et elle durera plus de 50 ans.

## Salinité des océans

Cette controverse, souvent décrite à tort comme étant *un* débat entre Thomson et Darwin, fut longue et complexe et souleva de nombreux désaccords au sein même de la communauté des naturalistes et des physiciens. Par exemple, le géologue irlandais John Joly (1857-1933) reprit certaines des idées qui avaient déjà été avancées par l'astronome Edmund Halley (1656-1742) – que l'on connaît pour avoir déterminé la périodicité de la désormais célèbre comète de 1682 – selon lesquelles le sel de la mer est apporté par les rivières. Sur cette base, il affirma que les océans deviendraient de plus en plus salés, puisque l'eau qui s'évapore retourne ensuite dans les rivières, rapportant plus de sel dans les océans. Ainsi, en estimant la quantité de sels des océans et le débit total des fleuves il serait, selon Joly, possible de calculer le temps nécessaire pour en arriver à cette salinité. Son hypothèse lui fit dire que la Terre devait être âgée de 25 à 200 millions d'années. Cette supposition, évidemment réfutée aujourd'hui (la salinité des océans serait à peu près constante depuis un ou deux milliards d'années), conforte pourtant les estimations de Thomson plutôt que celle des géologues. Précisons qu'à cette époque Thomson jouissait déjà d'une grande réputation parmi la communauté scientifique et que la physique était considérée comme une science plus « respectable » que la géologie. Dans ce contexte, il est facile de comprendre pourquoi les idées et les résultats de Joly et de Thomson étaient davantage pris au sérieux.



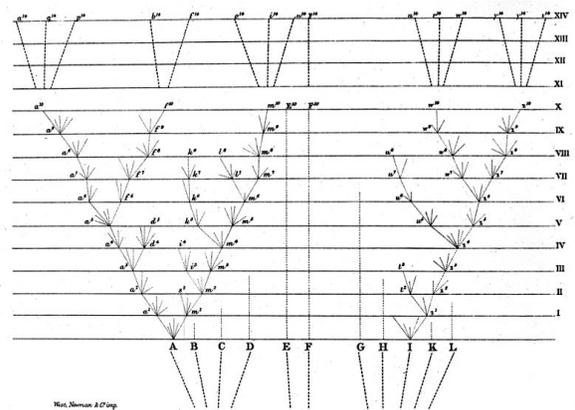
3.26: William Thomson, dit Lord Kelvin.

## La polémique Kelvin-Darwin

Les temps relativement courts pour situer l'origine de la Terre selon les propositions soutenues principalement par les physiciens vont donc être acceptés par une bonne partie de la communauté scientifique dans la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle. Cependant, Charles Darwin (1809-1882) sera l'un de ceux qui n'y croiront pas. Cette estimation de quelques dizaines de millions d'années lui semblait nettement insuffisante par rapport au temps nécessaire pour rendre compte de l'évolution de la faune et de la flore supportée par ses nombreuses observations, qui le conduisirent d'ailleurs à proposer sa célèbre théorie de l'évolution des espèces. Sans avancer de valeur

précise afin de ne pas avoir à nier l'universalité des lois de la physique et surtout parce que Thomson est alors le seul à proposer une démonstration scientifique et à donner une estimation quantitative, Darwin pensait plutôt que l'âge de la Terre se chiffrait en milliards d'années. Il soupçonnait une erreur dans le raisonnement de Thomson. Il suggéra donc, sans grande conviction, que le Soleil pourrait transférer de l'énergie magnétique, ce qui avait pour effet de chauffer la Terre et fausserait ainsi les calculs de Thomson. L'idée fut rapidement rejetée par la communauté scientifique, et Darwin mourut sans connaître la fin de l'histoire...

En 1895, le physicien irlandais John Perry (1850-1920) doute lui aussi de la proposition de lord Kelvin (Thompson fut anobli par la reine Victoria en 1892). Celui-ci réfléchit à la possibilité que la Terre puisse ne pas être complètement rigide et donc que la chaleur du globe ne puisse pas être transportée à la surface que par conduction, comme le propose celui pour qui il fut l'assistant. Il faut comprendre qu'à l'époque, on est encore loin de connaître la structure interne de la Terre<sup>22</sup>. Selon Perry, si les températures à l'intérieur de la Terre étaient effectivement de l'ordre de milliers de degrés, il lui semblait probable que certaines parties soient partiellement fondues. Dans ce cas, la chaleur serait plutôt transportée à la surface par convection, un processus bien moins efficace que la conduction et qui implique un déplacement de matière. Cette proposition impliquerait alors une sous-estimation importante des temps de refroidissement prévus par Kelvin. Cette intuition de Perry ne convainquit toutefois pas Kelvin, qui tint fermement sa position. Pourtant, la controverse tirait à sa fin. En 1896, le physicien français Henri Becquerel (1852-1908) découvrait la radioactivité naturelle.



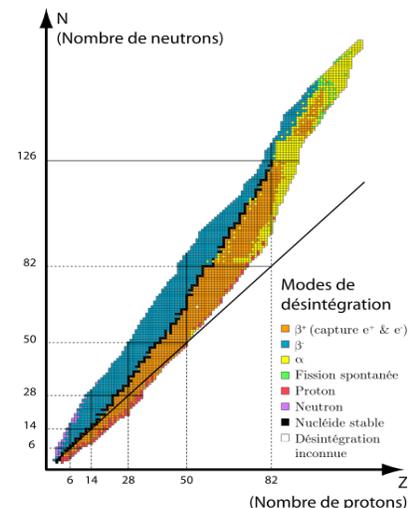
3.27 : Schéma de Darwin illustrant l'évolution des espèces.

<sup>22</sup> À ce sujet, le célèbre roman fantastique, *Voyage au centre de la Terre*, de Jules Verne, dans lequel des aventuriers explorent les profondeurs de la Terre et y découvrent un océan, entre autres, permet de s'imprégner des théories géologiques de l'époque.

## Radioactivité

La controverse entre les idées de Kelvin et celles de Darwin perdura en effet jusqu'à la découverte de la radioactivité à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. Pierre Curie et son collaborateur Pierre Laborde étudièrent les propriétés de la radioactivité du radium et constatèrent que la quantité de chaleur produite par la désintégration des atomes était énorme par rapport à leur petite taille. Le physicien néo-zélandais Ernest Rutherford (1871-1937), qui étudiait lui aussi les propriétés radioactives du radium, déduisit que ceux-ci, distribués dans l'ensemble de la croûte terrestre, étaient une source de chaleur non négligeable dont Kelvin n'avait pas tenu compte dans ses calculs basés sur la thermodynamique. Les résultats auxquels il était arrivé ne tenaient donc plus la route.

Malgré tout, il fallait encore trouver un moyen d'estimer l'âge de la Terre. Les connaissances sur la radioactivité se développant alors à un rythme grandissant, il ne se passa pas très longtemps avant que cette nouvelle branche de la physique trouve une solution à la question. En effet, on comprit assez vite qu'en étudiant le nombre de désintégrations de certains éléments radioactifs ainsi que leur rythme de désintégration, il devenait possible de déduire la durée d'un phénomène. Ces deux propriétés décroissent en effet dans le temps selon une courbe exponentielle, qui dépend du nuclide qui se désintègre. En faisant un choix approprié de l'isotope radioactif étudié, en fonction de sa demi-vie (temps pour que la moitié des noyaux de départ se désintègrent, et ce, quelle que soit la quantité de départ) et de l'endroit où l'on peut le déceler, il a été possible de mettre au point une horloge *absolue* remplaçant l'échelle *relative* jusqu'alors utilisée par les géologues.



3.28 : Table des isotopes par type de désintégration majoritaire.

La datation au carbone 14, par exemple, peut être utilisée pour déterminer l'âge d'échantillons d'origine biologique. La technique uranium-thorium permet quant à elle de mesurer l'âge de certaines formations carbonatées d'origine animale ou sédimentaire. C'est toutefois la méthode uranium-plomb qui permet d'estimer l'âge de la Terre à environ 4,5 milliards d'années. Cette technique fut mise au point au début des années 1950 par Clair Patterson. En réalisant des mesures précises de concentration de plomb nécessaire à la datation de la Terre, Patterson fit une constatation inattendue et alarmante : il remarqua que la concentration de plomb dans l'environnement s'était grandement accrue depuis les dernières décennies. Selon lui, les pétrolières étaient les responsables de cette préoccupante situation. En effet, depuis le milieu des années 1920, elles avaient introduit des additifs à base de plomb dans l'essence. Patterson se lança alors dans une longue lutte contre les puissants lobbys pétroliers américains afin que les additifs au plomb soient retirés de l'essence. Ce n'est qu'en 1986 que l'essence au plomb fut finalement interdite aux États-Unis, notamment grâce aux efforts acharnés de Patterson et à son expertise, développée lorsqu'il tentait de déterminer l'âge de la Terre.

Il est intéressant de relater qu'en 1904, Rutherford se rendit en Angleterre pour prononcer une conférence à la *Royal Institution* de Londres. Devant lord Kelvin lui-même, il y présenta ses travaux et montra que les calculs de ce dernier ne tenaient plus la route. Camper dans sa position, lord Kelvin ne put pourtant jamais se résoudre à accepter l'idée que la Terre pouvait être à ce point âgée, car cela ouvrait inévitablement la porte à la théorie de l'évolution qu'il rejetait catégoriquement. Il mourut donc sceptique. Comme l'écrivit le physicien allemand Max Planck dans son autobiographie :

*Une nouvelle vérité scientifique ne triomphe pas en convainquant ses opposants et en leur faisant voir la lumière, mais plutôt parce que les opposants finissent par mourir et que la nouvelle génération grandit et devient familière avec la nouvelle théorie.*

Bref, les physiciens ont finalement donné raison aux géologues et aux naturalistes qui croyaient à une Terre très ancienne sans avoir réussi à en donner une preuve suffisante pour satisfaire la communauté scientifique.

### **Un débat toujours d'actualité**

On peut aujourd'hui dresser une longue liste d'évidences qui indiquent que notre planète serait apparue bien avant le 22 octobre de l'an 4 004 av. J.-C., comme l'avait initialement calculé James Ussher au XVII<sup>e</sup> siècle. La découverte de la radioactivité, la théorie de l'évolution des espèces, appuyée d'une compréhension de plus en plus précise de la génétique, les techniques de datation radiométriques ainsi que plusieurs analyses géologiques et astronomiques sont autant d'arguments qui font désormais consensus au sein de la communauté scientifique. Peut-on alors affirmer que ce long débat scientifique, qui s'étire depuis près de quatre siècles, est désormais chose du passé? Étonnamment, de récents sondages permettent d'en douter. Une [enquête réalisée en 2010](#)<sup>23</sup> montre que près du quart des Canadiens croirait à la thèse créationniste, soit que Dieu aurait créé seul les humains au cours des 10 000 dernières années. Ce pourcentage est encore plus élevé chez nos voisins américains où seulement 35 % de la population dit privilégier la théorie de l'évolution par rapport aux théories créationnistes. Des chiffres qui ont de quoi faire réagir!

Bien que ce problème soit souvent exposé dans les médias comme une opposition entre les thèses créationnistes et évolutionnistes, il semble que ce soit également la question de l'âge de la Terre que l'on remet en doute dans ce débat. Or, nous l'avons vu, affirmer que la Terre n'a pas plus de 10 000 ans revient à rejeter des pans entiers de la physique, de la biologie et de la géologie pourtant largement reconnues par la communauté scientifique. Le débat autour de l'âge de la Terre n'est donc pas encore chose du passé et démontre toute l'importance de l'éducation scientifique visant à mieux faire connaître au public les connaissances scientifiques ainsi que les processus qui mènent à leur élaboration.

---

<sup>23</sup> Buzzetti, H. (2010, 16 juillet). Le créationnisme, une affaire d'Américains... et d'Albertains. *Le Devoir*. Récupéré du site du périodique : <https://www.ledevoir.com/societe/292691/le-creationnisme-une-affaire-d-americaains-et-d-albertains>

## B) Description et utilisation des démonstrations

Les deux démonstrations proposées permettent d'enregistrer en temps réel la température d'un solide et d'un liquide chauffés afin d'observer les courbes de décroissance exponentielle de cette variation de température en fonction du temps. Il est intéressant de constater que peu importe le matériau chauffé et l'état dans lequel celui-ci se trouve (solide, liquide ou gazeux), la courbe de décroissance de la température en fonction du temps a toujours la forme d'une exponentielle décroissante, à l'exception des changements d'état. Pour ce faire, il ne suffit que de réchauffer légèrement les matériaux ou les substances utilisés et de les laisser ensuite refroidir en prenant des mesures en continu à l'aide de senseurs de température adaptés.

Les démonstrations choisies servent aussi à faire réaliser aux étudiants que le problème avec le résultat obtenu à partir de la mesure du temps de refroidissement, la technique utilisée par le comte de Buffon pour estimer l'âge de la Terre, n'est pas un problème lié aux difficultés d'exécution ou encore un problème lié à la compréhension du phénomène mesuré. La mesure que le comte de Buffon a faite n'est pas erronée en tant que telle. L'erreur réside plutôt au niveau du lien que l'on fait entre ce que l'on veut connaître – ici, l'âge de la Terre – et les concepts sur lesquels on s'appuie pour l'estimer.

### Démonstration : Mesure de température d'un solide

#### Matériel

- un senseur de température *de surface* (Vernier);
- un système d'acquisition de données (LabQuest);
- un objet métallique que l'on peut réchauffer dans la main (ex. : pièce de cuivre, sphère métallique);
- un ordinateur muni de l'application *Vernier Graphical Analysis* ou du logiciel *LoggerPro* (si l'on veut faire la projection de l'écran du *LabQuest* sur l'écran de la classe).



3.29 : CDSP, 2015.

### Démonstration : Mesure de température d'un liquide

#### Matériel

- une sonde de température (Vernier);
- un système d'acquisition de données (LabQuest);
- une boisson chaude (ex. : café, thé, eau chaude);
- un ordinateur muni de l'application Vernier *Graphical Analysis* ou du logiciel *LoggerPro* (si l'on veut faire la projection de l'écran du *LabQuest* sur l'écran de la classe).



3.30 : CDSP, 2015.

### Précisions techniques sur les montages

- L'application gratuite [Vernier Graphical Analysis](#) est disponible en ligne et permet de projeter le graphique de variation de température qui se trace en temps réel.
- Pour faire la démonstration sur la mesure de la variation de température d'un solide, il faut savoir que l'objet métallique choisi doit être tenu dans la main pendant quelques minutes (5-6) pour le réchauffer avant de procéder à l'acquisition de données. Il faut donc penser à cette étape au moment où l'on introduit la controverse portant sur la mesure de l'âge de la Terre.
- Concernant la mesure de la température d'un liquide, il faut être vigilant afin de ne pas plonger le senseur *de surface* dans le liquide, car cela risquerait de le briser.

### Prolongement possible

L'expérience sur la mesure de la concentration de sel dans l'eau, qui varie dans le temps, serait aussi intéressante à faire en lien avec l'histoire de la mesure de l'âge de la Terre présentée dans cette fiche. Il est bon de savoir qu'il existe une sonde *Vernier* que l'on peut plonger dans l'eau et qui mesure en temps réel la concentration de sel de la solution. Pour faire varier cette concentration dans le temps, on pourrait faire chauffer un échantillon d'eau légèrement salée afin d'accélérer le processus d'évaporation. L'eau évaporée est évidemment de l'eau douce, ce qui implique que la concentration de sel augmenterait dans la solution.

## C) Concepts de sciences associés à la fiche

- Refroidissement
- Décroissance exponentielle
- Transmission de chaleur par conduction
- Radioactivité et demi-vie
- Concentration d'une solution

### *Décroissance exponentielle*<sup>24</sup>

Une quantité est sujette à une décroissance exponentielle si elle diminue à un taux proportionnel à sa valeur. Mathématiquement, cela peut être exprimé par l'équation différentielle suivante, avec  $N$  la quantité et  $\lambda$  un nombre positif appelé la « constante de décroissance » :

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N(t)$$

La solution de cette équation se traduit ainsi, en notant  $N_0$  la valeur de  $N$  à l'instant  $t = 0$  :

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

La décroissance exponentielle est caractéristique des phénomènes sans vieillissement, c'est-à-dire qui se produisent avec une égale probabilité, quelle qu'ait été leur durée de vie.

---

<sup>24</sup> Décroissance exponentielle. (n.d.). Dans *Wikipédia, l'encyclopédie libre*. [[http://fr.wikipedia.org/wiki/Décroissance\\_exponentielle](http://fr.wikipedia.org/wiki/Décroissance_exponentielle)].

## D) Informations et ressources complémentaires

### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**Bryson, B. (2007).** *Une Histoire de tout, ou presque...* Paris : Éditions Payot & Rivages.

Le chapitre 10 de ce livre traite de la controverse de la pollution par le plomb. Clair Patterson, qui s'efforçait d'établir l'âge définitif de la Terre à l'aide de la méthode Plomb-Plomb, constata que tous ses échantillons étaient fortement contaminés. Il passa ensuite plusieurs années à combattre l'utilisation de cette neurotoxine dans les produits de consommation courante.

**Nye, B. (2014).** *Undeniable : Evolution and the Science of Creation.* États-Unis : Éditeur Corey S. Powell.

Bill Nye est un vulgarisateur scientifique américain connu principalement comme animateur de l'émission *Bill Nye the Science Guy* de *Walt Disney Educational Productions*. En 2012, il attira l'attention de nombreux médias américains en déplorant qu'un énorme pourcentage de la population américaine ne croyait pas aux théories évolutionnistes, affirmant qu'un tel phénomène avait de graves conséquences sur l'éducation scientifique des jeunes. Il fut alors sévèrement critiqué par de nombreux créationnistes fondamentalistes. Dans le but d'exprimer clairement au public le point de vue de chacun des camps, un débat télévisé fut organisé. Ce débat fut visionné par plus de 4 millions de personnes sur *YouTube*. Bill Nye a également écrit un livre à ce sujet.

**Vernes, J. (1864).** *Voyage au centre de la Terre.* Genève : Éditions Bellerive.

Ce grand classique de la science-fiction du XIX<sup>e</sup> raconte l'histoire d'un savant et de son neveu qui entreprennent un voyage afin d'explorer l'intérieur de la Terre. En s'introduisant par le cratère d'un volcan éteint, les protagonistes découvrent ce qui se cache au centre de la Terre. Le récit est construit autour de données scientifiques de l'époque et d'extrapolations qui permettent de situer les théories du XIX<sup>e</sup> siècle quant à la structure géologique de la Terre. Le chapitre six présente d'ailleurs un débat fort intéressant sur les théories scientifiques qui cherchaient à prédire la température à l'intérieur de la Terre.

**Gingras, Y. (2008).** *Parlons sciences : entretiens avec Yanick Villedieu sur les transformations de l'esprit scientifique.* Montréal : Les Éditions du Boréal.

Ce livre présente différentes chroniques diffusées à Radio-Canada pour l'émission *Les années-lumière* réalisées par Yves Gingras, historien et sociologue des sciences. Il discute de différents sujets mettant en relation la science, l'histoire, la société, la religion, etc. Un chapitre est dédié à la question de l'âge de la Terre et a inspiré la rédaction de cette fiche. Un autre chapitre porte sur la controverse publique opposant évolutionnistes et créationnistes.

**Gingras, Y. (2009).** Mais quel âge a donc la Terre? *La Recherche*, (434), 92-94.

[<http://www.larecherche.fr/idees/histoire-science/quel-age-a-terre-01-10-2009-86743>]

**Lemarchand, F. et Cariou, G. (2014).** Chapitre 4 : L'âge de la Terre – Darwin contre Kelvin. Dans A. Richard, H. Le Meur et La Recherche, *Les Grandes controverses scientifiques* (p. 39-49). Paris : Dunod.

Ces deux derniers articles présentent les grandes lignes de la controverse qui a opposé physiciens et naturalistes et dont il est question dans cette fiche.

#### **LIENS UTILES**

**Vidéo du débat Ken Ham – Bill Nye :** [<https://www.youtube.com/watch?v=z6kgvhG3AkI>]

**Vidéo sur la vie de Nicolas Steno :** [<http://ed.ted.com/lessons/the-most-groundbreaking-scientist-you-ve-never-heard-of-addison-anderson>]

Nicolas Steno s'est intéressé à la géologie dès son jeune âge. Il a légué une importante contribution à ce champ d'études et a influencé Charles Lyell, James Hutton et Charles Darwin.

**Datation de la Terre par la méthode Plomb-Plomb :** [<http://aces.ens-lyon.fr/aces/terre/limites/Temps/datation-isotopique/enseigner/datation-de-la-terre-par-la-methode-pb-pb>]

Ce site permet d'en apprendre davantage sur la méthode de datation par la méthode Pb-Pb. Les résultats de cette méthode de calcul sont, encore aujourd'hui, considérés comme la meilleure mesure de l'âge de la Terre.

**Application Vernier Graphical Analysis :** [<http://www.vernier.com/products/software/ga-app/>]

Cette application est nécessaire si l'ordinateur utilisé n'est pas muni du logiciel *LoggerPro*, afin de projeter l'écran du module *LabQuest* à la classe. Il est gratuit et simple d'utilisation.

### 3.3 La lumière pour mesurer

## THÈME 3 : CONTROVERSES SCIENTIFIQUES ET ÉVOLUTION DES DÉBATS

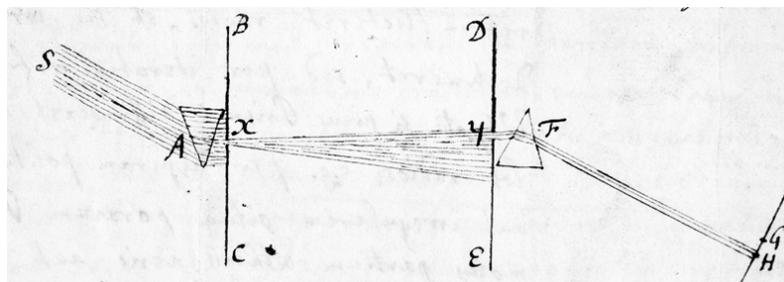
FICHE : LA NATURE DE LA LUMIÈRE

### A) Repères culturels

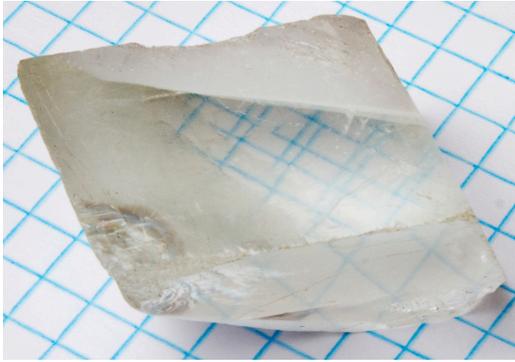
Parler de controverses scientifiques permet notamment de réfléchir à la manière dont les idées de science évoluent dans le temps, aux contextes qui accélèrent ou au contraire ralentissent cette évolution et à ce qui fait, par exemple, qu'un certain consensus d'une époque finit plus tard par être mis de côté. Ces contextes peuvent être de différents ordres : politique, économique, social, éthique, et sont utiles pour présenter une image des sciences en société où les intérêts de l'un entrent certaines fois en conflit avec les croyances de l'autre. Ces controverses deviennent inévitablement des processus longs et complexes, qu'il apparaît néanmoins important de présenter si l'on veut apprécier toute la portée d'un savoir scientifique qu'on tient désormais pour acquis. Il importe parfois d'aller au-delà du récit anecdotique et, en ce sens, le long débat de la physique opposant deux théories sur la nature de la lumière, la théorie corpusculaire et la théorie ondulatoire semble particulièrement intéressant.

L'histoire que l'on présente généralement débute avec Newton et ses expériences en optique. Ce dernier avait une importante notoriété due à son explication de la gravité, soit une force agissant à distance sur les planètes, idée qu'il reprit pour expliquer ses observations en optique. Il croyait en effet que des forces agissaient sur les particules lumineuses qui posséderaient donc une masse. À partir de cette prémisse, il parvint à expliquer différents phénomènes lumineux comme la réfraction, la dispersion, la diffraction et la biréfringence.

Ainsi, il expliqua la réfraction de la lumière par une accélération des particules de lumière produite par les forces en jeu, au passage de celle-ci à l'interface entre deux substances. Soulignons qu'avec cette théorie corpusculaire, la vitesse de la lumière doit être supposée plus grande dans le milieu plus dense, puisqu'une force agissant sur un corps lui imprimerait une accélération faisant par le fait même augmenter sa vitesse. Aujourd'hui, nous savons que la lumière voyage à une vitesse maximale de  $3 \times 10^8$  m/s dans le vide et que sa vitesse diminue dans les substances plus réfringentes, donc plus denses.



3.31 : Expérience de Newton démontrant que chacune des couleurs de l'arc-en-ciel est réfractée avec un angle qui lui est propre.



3.32 : Phénomène de la biréfringence (double réfraction) où l'on observe deux images d'un même objet à cause de la polarisation de la lumière par le cristal de calcite.

Par sa théorie, Newton put aussi rendre compte de la dispersion des couleurs de l'arc-en-ciel par un prisme en associant à chacune de ces couleurs une masse différente. Les forces exercées par le milieu réfringent auraient alors une action différente sur chaque couleur, ce qui expliquerait leur angle de déviation différent. Toujours dans cette logique, il expliqua la diffraction de la lumière comme étant une collision entre les particules lumineuses et le bord de l'obstacle frôlé, faisant ainsi dévier les particules « massives » de lumière. En outre, il dota les particules lumineuses de côtés opposés, ayant chacune des propriétés différentes. Autrement dit, il concevait que les côtés opposés de chaque particule

de lumière possédaient des caractéristiques particulières, ce qui selon lui expliquerait la biréfringence observée lorsque la lumière traverse un cristal de calcite (voir image ci-contre). Bref, ce qu'il semble intéressant de remarquer ici est le fait que Newton a dû ajouter des éléments de plus en plus complexes (masses différentes pour chaque couleur, côtés des particules ayant des propriétés différentes, etc.) aux considérations de départ de sa théorie, et ce, au fur et à mesure qu'il réalisait de nouvelles observations expérimentales qu'il cherchait à expliquer.

Ainsi, grâce à la notoriété de Newton et au fait qu'il était reconnu dans la communauté scientifique comme étant un expérimentateur hors du commun, la théorie corpusculaire de la lumière s'est imposée comme modèle pendant le XVIII<sup>e</sup> siècle. Ajoutons que s'installait aussi à cette époque une certaine ambition d'unifier toutes les disciplines : de l'infiniment grand à l'infiniment petit, tous les phénomènes naturels devaient répondre à la loi de l'attraction (gravitation, astrophysique, charges électriques, optique). Une véritable école de pensée se forme donc autour de Newton, dont les théories étaient alors considérées comme une véritable « explication de la nature ».

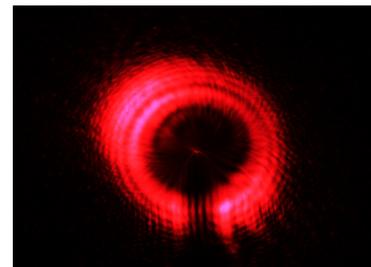
Dans ces circonstances, ce n'est qu'au début du XIX<sup>e</sup> siècle qu'on commença à réaliser que certaines observations expérimentales sur la polarisation et sur la diffraction s'accordaient de moins en moins bien avec le modèle corpusculaire. Pour situer le contexte de cette controverse scientifique, on fait souvent appel à l'histoire anecdotique d'Étienne-Louis Malus (1775-1812). Un jour, alors que Malus observait la lumière réfléchie d'une fenêtre voisine à travers un cristal doté de la double réfraction (biréfringence), il constata à sa grande surprise qu'au lieu des deux images qu'il s'attendait à voir, il n'en vit pourtant qu'une seule. On raconte qu'après une nuit d'expériences diverses et de réflexions intenses, il proposa une interprétation nouvelle du phénomène de polarisation en faisant état de la nature ondulatoire de la lumière. La façon dont on relate généralement ces événements est plutôt classique : expérience vieille comme le monde, mais dont certaines particularités avaient échappé à tous, événement fortuit, travail opiniâtre d'un seul homme sur un court laps de temps, juste récompense à la fin... En réalité, les événements se sont déroulés tout autrement et semblent bien plus complexes : plusieurs personnes se questionnaient déjà sur ces phénomènes de diffraction et de polarisation depuis un bon moment déjà (en plus de Malus, nommons Huygens, Laplace, Newton, Bartholin, Wollaston, Young, Fresnel, etc.). De plus, ces questionnements étaient d'une assez grande importance dans l'actualité scientifique de l'époque à tel point que l'Académie des sciences de Paris demandera que cette question sur la nature (corpusculaire ou ondulatoire) de la lumière soit définitivement tranchée.

En 1818, un concours est ainsi lancé sur l'étude de la diffraction. L'issue est importante, car elle influe sur les travaux qui pourront ou non être retenus. La commission, truffée de newtoniens (Siméon-Denis Poisson, Jean-Baptiste Biot, Pierre-Simon Laplace), ne semble pas impartiale. De plus, l'énoncé du concours est rempli de sous-entendus en faveur de la théorie corpusculaire, ce qui n'était probablement pas invitant pour les défenseurs de la théorie « vibratoire » (modèle ondulatoire de la lumière), comme l'était Augustin Fresnel (1788-1827). Ce serait Ampère qui aurait poussé Fresnel, malgré ces tensions, à présenter les résultats de ses travaux lors de ce concours.



3.33 : Augustin Fresnel.

L'expérience communément racontée comme celle qui fut décisive à l'issue du concours eut lieu vers 1819, alors que Siméon Denis Poisson (1781-1840) cherchait des failles au modèle de Fresnel. Poisson crut en effet avoir trouvé cette faille : le modèle de Fresnel menait à la prédiction que si l'on masque la lumière par un très petit obstacle circulaire disposé perpendiculairement à la direction de propagation des rayons lumineux, le centre de l'ombre devrait être aussi éclairé que si l'obstacle n'y était pas. Cette conclusion lui semblait pour la moins absurde, puisqu'une telle lumière n'avait jamais encore été observée. L'expérience est donc réalisée dans le but de clore la question. Contre toute attente, un point lumineux est effectivement observé au centre de l'ombre, précisément à l'endroit où les calculs l'avaient prédit. Probablement au grand dam de son détracteur, on retient cette expérience comme celle de la tache de Poisson! Ce qui devait mettre fin à la théorie ondulatoire eut pourtant l'effet contraire. Cette théorie avait plutôt permis de faire la prédiction d'un phénomène encore jamais observé.



3.34 : Tache de Poisson observée au centre de l'ombre d'un petit obstacle circulaire.

Cette anecdote historique est elle aussi assez classique, notamment en enseignement de la physique. On retrouve souvent dans les manuels scolaires quelques lignes sur cette « fameuse expérience décisive ». Cet extrait tiré d'un manuel d'enseignement écrit par Raymond A. Serway<sup>25</sup> en témoigne bien :

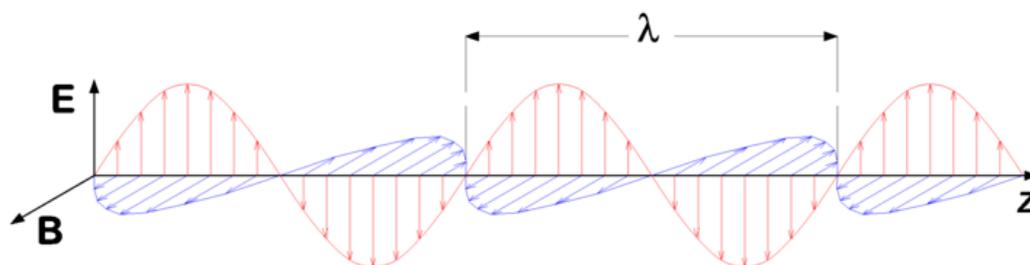
*[...] les Laplaciens organisèrent un concours sur les franges de diffraction. En fait, ils désiraient recevoir un mémoire **qui démontrerait, hors de tout doute, la nature corpusculaire de la lumière**. Fresnel était un des deux seuls candidats à présenter un mémoire, sous un faux nom. Au grand désarroi du comité, c'est son mémoire qui retint l'attention. Denis Poisson, grand mathématicien français, faisait partie du comité d'évaluation. Il tenta de détruire la théorie ondulatoire de Fresnel en prédisant, à partir des équations fournies par ce dernier, qu'il fallait qu'une tache blanche se trouve au centre de la figure de diffraction..., ce qu'Arago **prouva expérimentalement!** [...] **La victoire de la vision ondulatoire de la lumière sur la vision corpusculaire était alors consacrée.**<sup>26</sup>*

<sup>25</sup> Serway, R.A. (1997). *Physique III, Optique et physique moderne* (4<sup>e</sup> éd.). Laval : Éditions Études vivantes, 156 p.

<sup>26</sup> Le caractère gras de certaines expressions a été ajouté afin de faire ressortir la conception positiviste des sciences qu'illustre cet extrait.

Ici encore, l'histoire est plus subtile et nuancée que ce récit anecdotique. D'abord, malgré le prestige que l'on donne à ce concours, il n'y avait que deux concurrents, dont l'un étant à peine considéré tellement son mémoire contenait des lacunes. Ensuite, il faut préciser que la commission n'était pas formée que de partisans de la théorie corpusculaire. Arago, le mentor de Fresnel, était membre du jury de même que Louis Joseph Gay-Lussac, qui n'avait quant à lui pas de position tranchée sur la question. Il apparaît aussi que les membres de la commission semblaient moins intéressés à trancher la question de la nature de la lumière que de reconnaître les qualités mathématiques et expérimentales du travail de Fresnel. Pour eux, le fait d'attribuer le prix à Fresnel n'impliquait pas forcément de devoir se convertir à la théorie ondulatoire. D'ailleurs, Poisson, Laplace et Biot doutèrent jusqu'à leur mort de cette théorie. Pour les scientifiques de l'époque, le sujet de la diffraction n'était pas celui qui permettrait de trancher la question entre les deux théories. Il serait donc exagéré de parler de l'expérience de la tache de Poisson comme d'une expérience décisive, celle ayant réussi à clore la controverse. Elle semble pourtant l'être, de notre point de vue, grâce aux développements scientifiques qui ont eu lieu depuis et par l'histoire magnifiée qui nous est racontée des événements. Pourtant, la question la plus susceptible de départager les deux théories était plutôt, à l'époque, celle de la polarisation de la lumière.

En effet, cette question faisait encore se buter la théorie ondulatoire, à moins que la lumière ne soit constituée de vibrations transversales (et non longitudinales, comme l'onde sonore qui était déjà bien connue à cette époque et qui servait de référence). Cette idée aurait ainsi poussé Fresnel à quelques acrobaties permettant d'expliquer le phénomène observé par Malus en tournant sur lui-même un deuxième cristal de calcite. « [Mais] il hésite à publier ses résultats. Pourquoi? Parce qu'il se heurte à un obstacle insurmontable : si la lumière est une vibration transversale, il faut revoir de fond en comble la nature du fluide – l'éther – dans lequel elle se déplace<sup>27</sup>! »



3.35 : Schéma d'une onde électromagnétique transversale se propageant dans la direction de l'axe  $z$ . Les champs électriques  $E$  et magnétique  $B$  oscillent selon une fonction sinusoïdale de longueur d'onde  $\lambda$ .

<sup>27</sup> Monnier, E. (2001). La lumière prend les chemins de traverse. *Les cahiers de Science & Vie*, (65), 88.

Ce que nous pouvons ajouter à notre réflexion, c'est que l'opposition entre la théorie corpusculaire et la théorie ondulatoire n'a pas été si tranchée. Newton lui-même ne s'est jamais clairement prononcé en faveur de tel ou tel modèle. « La théorie corpusculaire a tout simplement suivi la carrière naturelle à toute théorie fautive. Capable d'expliquer les phénomènes pour lesquels elle a été conçue, elle doit être compliquée d'hypothèses auxiliaires chaque fois que l'observation en révèle de nouveaux. Jusqu'à ce que, finalement, ces ajouts incohérents [...] englobent et renversent la structure d'origine. À l'inverse, la théorie des ondes a anticipé sur l'observation, coïncidence que seule la vérité peut susciter<sup>28</sup>. »

Aujourd'hui, le modèle de la lumière généralement accepté par les physiciens n'est ni tout à fait corpusculaire, ni tout à fait ondulatoire, mais une sorte de combinaison de ces deux aspects. Cette dualité du comportement de la lumière a été proposée au début du XX<sup>e</sup> siècle pour expliquer différents phénomènes que le modèle ondulatoire ne pouvait expliquer à lui seul. Ainsi, on considère que l'énergie électromagnétique est émise et absorbée par petits paquets, ce qu'on nomme des photons, et qu'elle se transmet d'un endroit à un autre sous forme d'onde. Il est facile de deviner que ce modèle suggéré par Einstein en 1905 ne fit pas immédiatement l'unanimité. Après avoir passé près d'un siècle à se convaincre de la validité du modèle ondulatoire, les scientifiques devaient maintenant admettre que la lumière possédait, dans certaines circonstances, des propriétés que l'on ne pouvait qu'associer à une particule. Par exemple, on réalisa durant les années 1920, grâce aux développements de la mécanique quantique, que cette dualité onde-particule n'était pas seulement une propriété de la lumière, mais bien de toute la matière connue. Ainsi, des objets comme les électrons, les neutrons ou même les atomes, qui depuis longtemps étaient considérés comme des particules, se comportaient dans certaines situations comme des ondes.

Encore aujourd'hui, cette double nature de la lumière conserve un certain caractère énigmatique aux yeux de plusieurs scientifiques et soulève la controverse. On s'explique plutôt mal pourquoi la lumière, dans certaines expériences, se comporte comme une onde, alors que dans d'autres expériences, elle se comporte comme une particule. En 2014, une expérience réalisée par une équipe de chercheurs suisses<sup>29</sup> a généré un certain enthousiasme puisque pour la première fois les natures ondulatoire et corpusculaire de la lumière étaient mises en évidence, semble-t-il, de façon simultanée. Dans certains médias de vulgarisation scientifique, on déclara qu'il s'agissait de « La toute première photographie de la lumière se comportant à la fois comme une particule et une onde<sup>30</sup>. » S'agissait-il d'une expérience cruciale, démontrant hors de tout doute le modèle de la double nature de la lumière? Il semble que l'histoire se répète, puisqu'encore ici, entre ce qui fut réalisé par les scientifiques et ce qui fut rapporté dans les médias, une importante nuance s'impose,

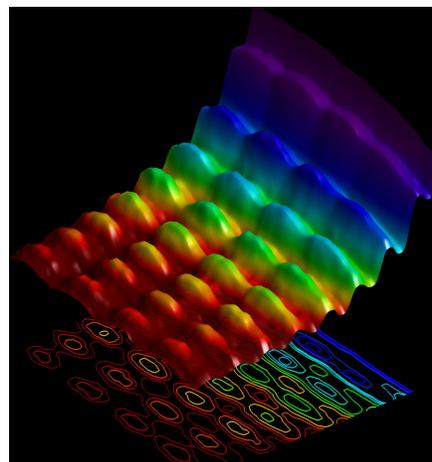
---

<sup>28</sup> Cette citation semble intéressante pour exprimer l'idée de l'évolution d'une théorie qui s'adapte au fil des observations. Toutefois, il semble utile d'y apporter certaines nuances, puisqu'elle fait appel à des arguments reflétant une vision des sciences positivistes, vision que l'on cherche justement à enrichir. Les expressions « théorie fautive » ou « coïncidence que seule la vérité peut susciter » méritent en effet d'être discutées de manière critique, par exemple dans le contexte d'une réflexion de nature épistémologique sur les sciences. Citation tirée de : Orvas, G. (2001). La victoire des ondes. *Les cahiers de Science & Vie*, (65), 90.

<sup>29</sup> Piazza, L., Lummen, T.T.A., Quiñonez, E., Murooka, Y., Reed, B.W., Barwick, B. et Carbone, F. (2015). Simultaneous observation of the quantization and interference pattern of a plasmonic near-field. *Nature Communications*, 6(6407), 1-7. doi : 10.1038/ncomms7407

<sup>30</sup> École Polytechnique Fédérale de Lausanne. (2015, mars). *The first ever photograph of light as both a particle and wave*. Récupéré du site *Phys.org* : <http://phys.org/news/2015-03-particle.html>

comme l'ont d'ailleurs précisé certains scientifiques peu de temps après la publication de cette nouvelle « controversée<sup>31</sup> ». La première question qu'il faut se poser est bien entendu la suivante : comment est-il possible de photographier la lumière en elle-même? Une photographie n'est-elle pas justement une « trace » laissée par la lumière? En fait, l'image produite par les chercheurs n'est pas une « véritable » photographie dans le sens commun du terme, mais il s'agit plutôt d'un graphique mettant en relation intensité, énergie et position. En s'intéressant aux conditions expérimentales, on remarque par ailleurs que l'onde lumineuse étudiée était en fait une onde électromagnétique stationnaire confinée à un mince fil de cuivre. Une autre question se pose donc : est-ce qu'une onde dans un fil métallique peut être considérée comme de la lumière? Il s'agit d'une question à laquelle il n'est certes pas facile de répondre. En somme, on remarque encore que le contexte est plus subtil et nuancé que le récit anecdotique raconté, *preuve* que juger une théorie est un exercice fort complexe!



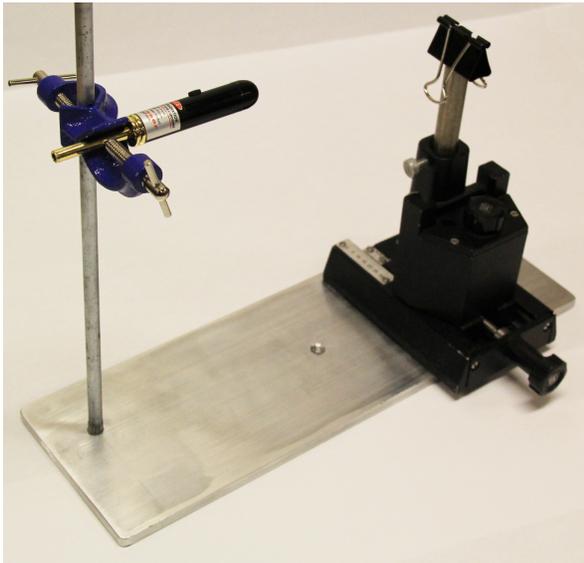
3.36 : « Photographie » rapportée de la double nature de la lumière, qui n'apparaît pourtant pas dans la publication originale parue dans la revue Nature Communications.

---

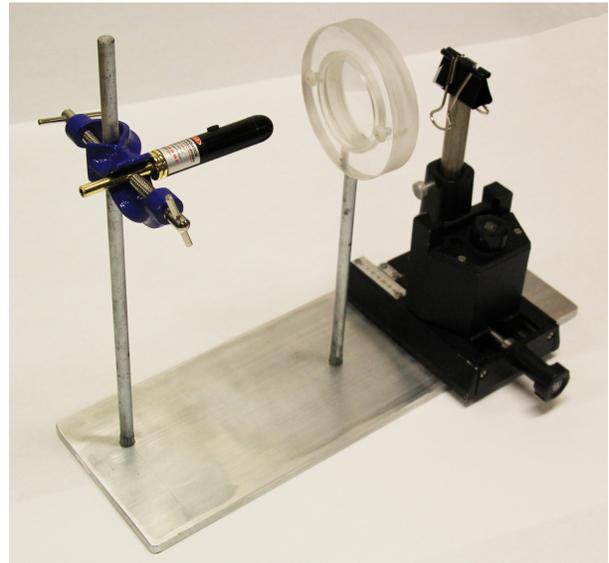
<sup>31</sup> Stein, B.P. (2015). No, You Cannot Catch An Individual Photon Acting Simultaneously As A Pure Particle And Wave. *Inside Science*. Récupéré du site de la revue : <http://www.insidescience.org/blog/2015/03/13/no-you-cannot-catch-individual-photon-acting-simultaneously-pure-particle-and-wave>

## B) Description et utilisation des démonstrations

Au début du XIX<sup>e</sup> siècle, il y a eu différentes observations expérimentales qui semblaient s'accorder moins bien avec la théorie corpusculaire de la lumière. L'observation du phénomène de diffraction de la lumière en fait partie, ce qui peut être intéressant de présenter en classe. Plusieurs expériences relativement simples permettent en effet d'observer ce phénomène. Trois propositions sont présentées ici : (1) la diffraction de la lumière par une fente, (2) la diffraction de la lumière par un cheveu, (3) la tache de Poisson. Les deux premières démonstrations (1 et 2) peuvent être réalisées avec le même montage (ci-dessous, voir image 3.37), puisqu'il ne suffit que de changer l'objet éclairé par le pointeur laser. Nous avons installé ces divers objets dans des cadres de diapositives (voir image 3.39) afin que l'ajustement soit simple à réaliser. Nous les installons dans le pince-notes que l'on positionne avec le support à deux axes. Quant à elle, l'expérience de la tache de Poisson peut aussi être réalisée à la suite des deux autres avec le même montage auquel on ajoute une lentille divergente entre le pointeur laser et l'épingle pour obtenir un faisceau plus large, couvrant ainsi entièrement la tête de l'épingle (voir image 3.38). Différentes précisions concernant ces trois démonstrations sont présentées à la page suivante.



3.37 : Montage prêt à recevoir la fente mince et le cheveu. On voit ici le pointeur laser et le support, surmonté d'un pince-notes, permettant des ajustements sur deux axes.



3.38 : Montage prêt à recevoir l'épingle. On voit ici qu'une lentille divergente a été ajoutée pour élargir le faisceau laser. Celui-ci doit pouvoir couvrir entièrement la tête de l'épingle.



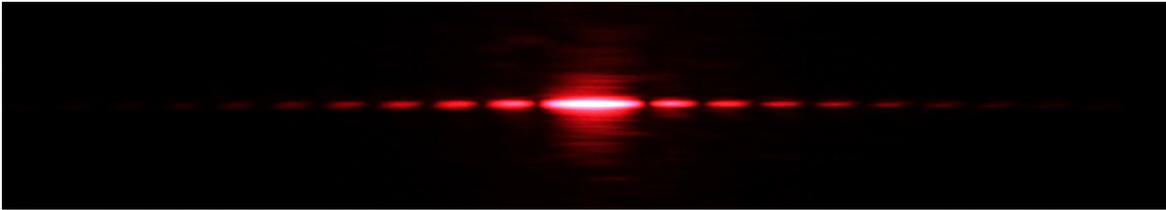
3.39 : Diapositives à placer dans le pince-notes. De gauche à droite : un cheveu, une fente de largeur variable (deux cartons dont l'un peut glisser légèrement) et une épingle de couture.

## Démonstration : Diffraction de la lumière par une fente

### Matériel

- un laser He-Ne;
- un support ajustable 2 axes;
- une diapositive munie d'une fente de largeur variable;
- un écran blanc.

Lorsque la lumière passe par une fente dont la largeur est très petite, il est possible d'observer le phénomène de la diffraction. On peut réaliser l'expérience en utilisant un pointeur laser avec lequel on éclaire une diapositive munie d'une fente mince. En centrant bien le faisceau lumineux sur la fente, on peut observer, sur l'écran placé plus loin, le patron de diffraction présentant une alternance de zones brillantes et ombragées. La fente utilisée est de largeur variable, ce qui permet de modifier la largeur des modes de la figure de diffraction.



3.40 : Diffraction de la lumière par une fente mince placée à la verticale.

## Démonstration : Diffraction de la lumière par un cheveu

### Matériel

- un laser He-Ne;
- un support ajustable 2 axes;
- un cheveu;
- un écran blanc.

Lorsque la lumière est envoyée sur un obstacle dont la largeur est très petite, il est aussi possible d'observer le phénomène de la diffraction. On peut réaliser l'expérience en utilisant un pointeur laser avec lequel on éclaire un cheveu. En centrant bien le faisceau lumineux sur le cheveu, on peut observer sur l'écran placé plus loin un patron de diffraction très semblable présentant aussi une alternance de zones brillantes et ombragées.



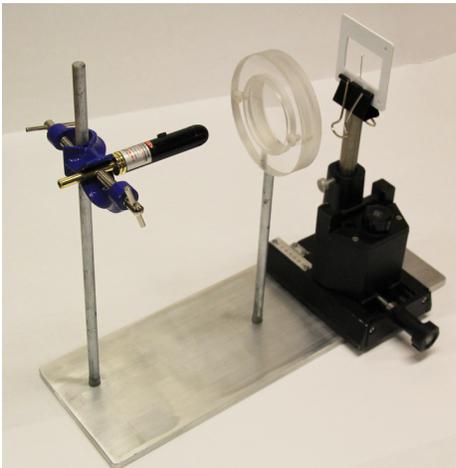
3.41 : Diffraction de la lumière par un cheveu placé à la verticale.

## Démonstration : Tache de Poisson

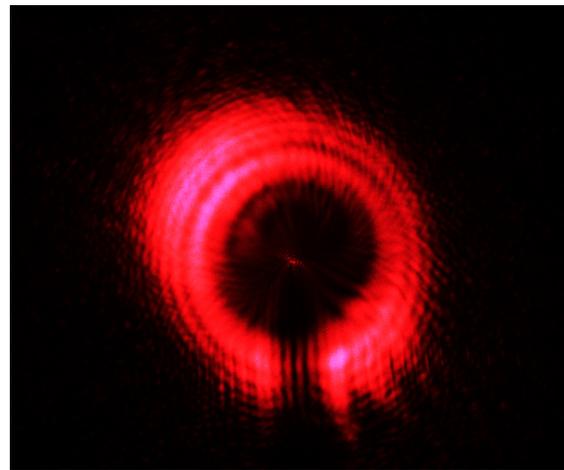
### Matériel

- un laser He-Ne;
- un support ajustable 2 axes;
- une épingle droite munie d'une petite tête;
- une lentille divergente;
- un écran blanc.

Selon les prédictions faites à partir des équations présentées par Fresnel à ce « fameux » concours (voir à ce sujet la section *Repères culturels* de cette fiche), une tache lumineuse devrait se trouver au centre de l'ombre projetée par un petit obstacle circulaire placé perpendiculairement à la direction de propagation du faisceau lumineux utilisé. Denis Poisson, défenseur de la théorie corpusculaire, pense avoir là l'argument contre Fresnel, puisque personne n'avait encore fait une telle observation. Cependant, en réalisant l'expérience, tous les membres de l'académie ont pu observer la zone lumineuse au centre de l'ombre, dûment nommée « tache de Poisson ». Il est possible et relativement simple de reproduire cette expérience avec le matériel proposé.



3.42 : On éclaire la tête de l'épingle avec un pointeur laser dont le faisceau est élargi grâce à une lentille divergente.



3.43 : La tache de Poisson est le point lumineux présent au centre de l'ombre de la tête d'épingle. Elle peut permettre de conclure que la lumière se comporte comme une onde.

### Précisions techniques relatives aux trois démonstrations

- Il est nécessaire de travailler dans un local sombre pour effectuer ces démonstrations.
- La sécurité est importante à considérer en manipulant le laser. Le faisceau lumineux ne doit jamais être dirigé vers les yeux d'une personne. Il est donc préférable de travailler à une hauteur différente par rapport à celle des yeux des gens dans le local. Pour éviter les réflexions parasites, il est aussi conseillé d'enlever montre, bague ou tout autre bijou de métal. De plus, il faut éviter de diriger le faisceau vers un bord de tableau métallique ou tout autre objet du genre.
- L'ajustement de la position du laser avec les vis micrométriques permet une bonne précision pour bien centrer le laser sur la fente mince ou sur le cheveu.

## C) Concepts de sciences associés à la fiche

- Diffraction de la lumière
- Réfraction et dispersion de la lumière
- Polarisation et biréfringence de la lumière
- Ondes transversale et longitudinale

## D) Informations et ressources complémentaires

### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**Les cahiers de Science & vie. (2001).** Dossier Thématique : 1800-1825; Comment la lumière est devenue une onde, les hommes, les faits, les controverses, les enjeux. *Science & Vie*, 65, 82 pages.

Ce dossier thématique de 82 pages comporte une série d'articles sur le sujet de la controversée nature de la lumière. C'est essentiellement à partir de la lecture de ce numéro que cette fiche a été rédigée. Plusieurs des informations de nature historique y ont été puisées.

**Pestre, D. (2009).** La « tache de Poisson » fit triompher Fresnel. *La Recherche–L'actualité des sciences*, (436), 92. [<http://www.larecherche.fr/idees/histoire-science/tache-poisson-fit-triominpher-fresnel-01-12-2009-84078>]

Ce court article de Dominique Pestre, historien et sociologue des sciences, présente un point de vue intéressant et inspirant relativement à la pertinence de parler de controverses scientifiques (en particulier celle sur la nature de la lumière) en précisant les contextes afin de dépasser les récits anecdotiques qui donnent généralement peu de précision quant aux liens de sciences et société.

**Gluck, P. (2010).** Easy demonstration of the Poisson spot. *Physics Education*, 45(5), 458-459. doi : 10.1088/0031-9120/45/5/F04

L'article de Paul Gluck donne une bonne description technique de l'expérience de la tache de Poisson qui permet de la reproduire en classe. L'article s'adresse à des enseignants de physique. Il a inspiré une des démonstrations associées à cette fiche.

**Serway, R.A. (1997).** *Physique III, Optique et physique moderne* (4<sup>e</sup> éd.). Laval : Éditions Études vivantes.

Un extrait de la page 156 a été cité pour témoigner du fait que les manuels scolaires abordent encore souvent l'histoire des sciences de manière anecdotique, ce qui contribuerait à renforcer une image des sciences passéiste (parfois qualifiée de naïve), donnant peu de précisions sur les contextes de recherche, leurs limites, leur insertion dans un contexte social, culturel ou politique qui les oriente.

## THÈME 4 : FEMMES, SCIENCES ET VIE DE LABORATOIRE

FICHE : QUAND L'ADN DEVIENT UNE DOUBLE HÉLICE<sup>32</sup>

### A) Repères culturels associés

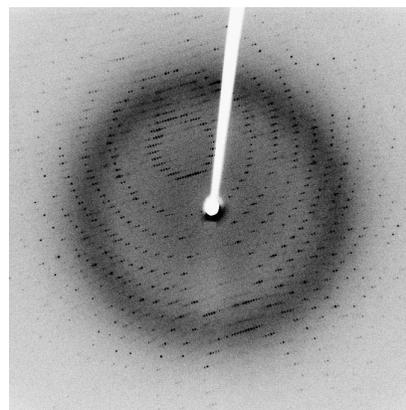
« Nous avons découvert le secret de la vie! », se serait exclamé Francis Crick au pub Eagle, à Cambridge, le 28 février 1953. Il annonçait pour la première fois publiquement l'une des plus grandes avancées scientifiques du XX<sup>e</sup> siècle : la modélisation de la structure de la molécule d'ADN en forme de double hélice. Quelques mois plus tard, soit le 23 avril 1953, Francis Crick et James Watson publiaient les fruits de leurs recherches dans la revue *Nature*, ce qui les conduira au prix Nobel.

L'ADN, qu'on décrit généralement comme étant le support à la vie, est présent en très grande quantité dans tous les organismes. Chaque cellule de notre corps en contiendrait près de deux mètres de long dans son noyau, mais comprimés dans un tout petit volume. Le code qui se trouve inscrit dans un brin d'ADN humain comporte environ 3,2 milliards de lettres d'encodage. Cela permet d'exprimer toute la diversité et la complexité de la vie. Il va sans dire que notre compréhension de la structure de l'ADN est devenue essentielle pour interpréter les mécanismes de transmission de l'information héréditaire et que les progrès technologiques que permet aujourd'hui la génétique s'appuient sur le modèle de l'ADN en double hélice.

L'histoire de la modélisation de la structure de l'ADN qui sera discutée dans cette fiche illustre bien que, en reprenant les mots de James Watson dans l'avant-propos de son récit *La double Hélice*, « la science [...] procède rarement de la manière logique que lui prêtent les profanes. Au contraire, sa marche en avant (et parfois en arrière) est faite d'évènements très humains dans lesquels les personnalités et les traditions culturelles jouent un rôle majeur<sup>33</sup>. »

### La cristallographie par rayon X

Au cours du XIX<sup>e</sup> siècle, les travaux de Charles Darwin (1809-1882) permirent d'identifier la sélection naturelle comme étant un mécanisme clé servant à décrire l'évolution des espèces. À cette époque toutefois, les processus liés à la transmission et à la diversification des caractères héréditaires restaient encore mystérieux. Comme le souligne Bill Bryson, auteur américain de sujets scientifiques, « il est surprenant de songer qu'au début du XX<sup>e</sup> siècle, les plus grands esprits scientifiques pouvaient à peine nous expliquer de manière claire d'où viennent les bébés. Et c'était ces hommes, rappelons-le, qui jugeaient que la science ne pouvait pratiquement plus progresser<sup>34</sup>. » Ce n'est donc qu'au début du XX<sup>e</sup> siècle, grâce au développement de techniques permettant d'accéder au monde microscopique, que l'on put mettre en évidence les différents mécanismes liés à la reproduction et au développement de la vie.



3.44 : Patron obtenu par la diffraction de rayons X sur une enzyme cristallisée.

<sup>32</sup> A aussi participé à la rédaction de cette fiche démonstration François Bourassa, finissant du Cégep Garneau.

<sup>33</sup> Watson, J. D. (1968). *La double hélice*. Paris : Robert Laffont, 13 p.

<sup>34</sup> Bryson, B. (2007). *Une Histoire de tout, ou presque...* Paris : Éditions Payot & Rivages, 480 p.

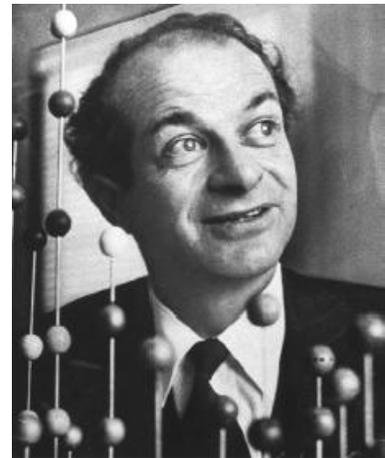
Plus particulièrement, c'est la technique de la cristallographie par rayon X qui permet de mieux comprendre la structure des biomolécules essentielles à la vie, comme celle des protéines.

En 1912, Max von Laue conçut une expérience dans laquelle des rayons X projetés sur des cristaux produisaient des figures de diffraction semblables à celles que l'on observe lorsqu'on éclaire un réseau de diffraction avec de la lumière visible (voir image 3.44). Comme la longueur d'onde des rayons X est de la taille des distances interatomiques dans un cristal, cette technique permet en quelque sorte de sonder la structure atomique de la matière. Les règles permettant l'interprétation des figures de diffraction produites lors de telles expériences furent développées conjointement par William Lawrence Bragg et son père, William Henry Bragg, en 1913, ce qui leur a d'ailleurs valu un prix Nobel deux ans plus tard. Les biologistes exploitèrent cette percée technologique afin de déduire les dimensions et l'organisation de molécules imperceptibles au microscope. De nombreuses analyses mettant à profit cette technique furent ainsi réalisées sur des biomolécules cristallisées par différents procédés chimiques. La cristallographie par rayons X permit ainsi d'élucider la structure de plusieurs molécules importantes pour la vie telles que l'hémoglobine (John Kendrew et Max Perutz, 1960), l'insuline (Dorothy Hodgkin, 1969) et, bien sûr, l'ADN. Au total, 28 prix Nobel furent remis en lien avec des découvertes impliquant l'utilisation de ce procédé.

Il s'agit d'un bel exemple de recherche interdisciplinaire : des techniques issues d'une découverte de la physique permettent d'identifier la structure chimique d'une molécule afin de mieux comprendre certains phénomènes biologiques. Il va sans dire que de telles avancées ont tracé la voie pour que la médecine se développe à pas de géant.

### Un modèle de la structure de l'ADN

Au début des années 1950, la composition chimique de la molécule d'ADN avait été identifiée. Toutefois, sa structure tridimensionnelle demeurait encore inconnue et apparaissait comme la *clé* qui permettrait de comprendre un bon nombre de données biologiques accumulées depuis le début du siècle. Entre autres, la structure de l'ADN devait pouvoir expliquer le mécanisme de réplication du matériel génétique et donc la perpétuation de la vie. À cette époque, l'équipe travaillant au laboratoire de Caltech sous la direction de Linus Pauling faisait figure d'autorité dans le domaine de la biologie moléculaire. Les travaux de Pauling sur la nature de la liaison chimique (pour lesquels il reçut le prix Nobel de chimie en 1954) et son identification de la structure d'hélice alpha des protéines faisaient de lui le candidat le mieux placé pour élucider l'énigme de l'ADN. Or, l'histoire montrera plutôt que la structure de l'ADN sera identifiée non pas par Pauling, mais principalement grâce au travail de quatre jeunes scientifiques œuvrant en Angleterre.

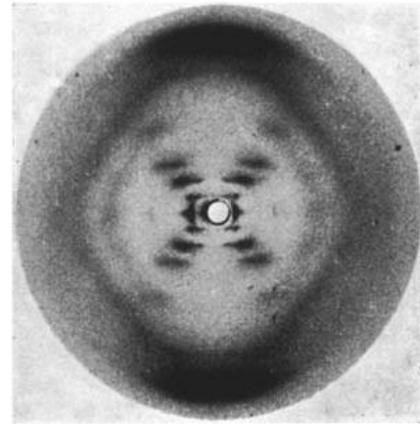


3.45 : Linus Pauling  
(1901-1994).

On doit donc à la rencontre entre James Watson et Francis Crick à Cambridge ainsi que leur collaboration avec Maurice Wilkins et Rosalind Franklin, deux chercheurs du King's College à Londres, le premier modèle viable de la structure de l'ADN. Le contexte dans lequel cette collaboration se situe est toutefois particulièrement intéressant et révélateur du genre de mentalité qui prévalait à cette époque dans les hautes sphères de la recherche scientifique. D'abord, un esprit

de compétition régnait entre les différents laboratoires qui se penchaient sur la question de la structure de l'ADN à travers le monde. Watson et Crick espéraient trouver la structure de l'ADN avant Linus Pauling, mais recevaient au compte-gouttes les informations sur les progrès de ce dernier. Peter Pauling, le fils de Linus, qui se trouvait à Cambridge avec Watson et Crick, leur – fournissait d'ailleurs des informations cruciales sur les recherches de son père. On raconte que ce serait après avoir obtenu de la main de Peter Pauling un manuscrit non publié de son père, où ce dernier supposait une structure en triple hélice de l'ADN, que Watson et Crick comprirent qu'ils étaient encore dans la course. Ils décidèrent alors de redoubler d'efforts dans leurs recherches.

Les deux chercheurs de Cambridge reçurent également un support décisif de la part de Maurice Wilkins et Rosalind Franklin qui, à la même époque, s'étaient spécialisés dans la cristallographie par rayons X de biomolécules. Cette équipe du King's College travaillait dans une relation plutôt conflictuelle témoignant d'un certain sexisme qui régnait apparemment parmi les scientifiques à cette époque – qui étaient en grande majorité des hommes. Pour Wilkins, il était naturel que Franklin soit son assistante. Pourtant, cette dernière avait reçu dès son arrivée une lettre du directeur du laboratoire, J. T. Randall, lui certifiant qu'elle mènerait son propre projet de recherche, ce que Wilkins n'aurait jamais vraiment accepté. Les mémoires de James Watson témoignent aussi de la condescendance qu'il portait à Franklin : il la surnomme « Rosy » et raconte que, lors d'une de ses conférences, il se demandait tout en l'écoutant « de quoi elle aurait l'air si elle quittait ses lunettes et changeait de coiffure<sup>35</sup> ». Watson répète sans cesse que Franklin était convaincue que l'ADN n'était pas hélicoïdal. Or, certaines de ses notes manuscrites de 1951 montrent qu'elle envisageait au contraire tout à fait cette hypothèse.



3.46 : La photographie 51 réalisée par Rosalind Franklin illustrant un patron obtenu par la diffraction de rayons X sur de l'ADN. © King's College London ; this image can not be reproduced or modified without the express permission of King's College London. © King's College London ; cette image ne peut être reproduite ou modifiée sans la permission écrite du King's College London.

À l'époque, c'est Franklin qui avait réussi à obtenir les meilleures images desquelles il était possible d'en déduire la structure de l'ADN. Grâce à un travail minutieux en laboratoire et à un savoir-faire unique dans le traitement d'échantillons d'ADN, elle obtint des clichés précis qui offraient une nouvelle perspective sur des paramètres importants de la molécule. À partir de la photographie 51 (l'une des images les plus connues de l'histoire des sciences), présentée ci-contre, un regard aiguisé peut effectivement déduire une structure hélicoïdale de la molécule observée. À partir de cette image, il pourrait même déterminer la mesure du pas de l'hélice de 34 Å, la distance entre deux bases azotées de 3,4 Å, et le diamètre de l'hélice de 20 Å.

<sup>35</sup> Watson, J.D. (1968). *La double hélice*. Paris : Robert Laffont, 75 p.

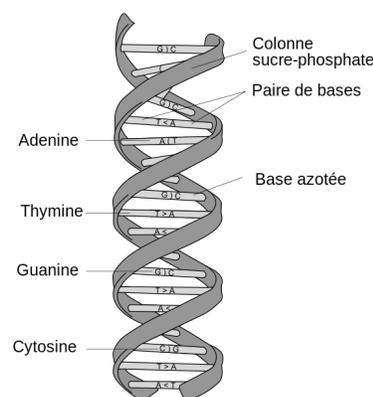
Au grand désarroi de ses collègues, Rosalind Franklin refusait toutefois de partager ces informations cruciales. Mais qui pourrait la blâmer pour ça? Qu'aurait-elle eu à gagner en partageant ses résultats avec trois hommes qui n'avaient strictement rien à lui offrir en retour et qui, par ailleurs, ne lui accordaient que très peu de respect<sup>36</sup>? Ce serait en raison de ses désaccords avec Franklin que Wilkins finit, petit à petit, par se ranger du côté de Watson et de Crick, expliquant aussi qu'en janvier 1952, ce dernier aurait remis sans le consentement et à l'insu de son auteure une copie de la photographie 51 aux chercheurs de Cambridge. Ce cliché fut en effet essentiel à l'élaboration de leur modèle final publié dans la revue *Nature* peu temps après. Précisons d'ailleurs que plusieurs années plus tard, Watson avoua que l'obtention de cette photo avait été l'évènement déterminant dans la réalisation de leur modèle.

Pourtant, dans leur article, Watson et Crick n'ont offert qu'un court remerciement aux travaux de Franklin. Ils présentèrent son apport d'une façon ambiguë, suggérant même que ses travaux n'avaient été utilisés que comme simple confirmation pour leur modèle. Malheureusement, Franklin mourut prématurément d'un cancer en 1958, probablement causé par une surexposition aux radiations auxquelles elle avait été soumise durant ses années de recherche, la rendant ainsi inéligible pour le prix Nobel.

L'importance de Rosalind Franklin dans l'élaboration du modèle de la structure de l'ADN a aujourd'hui été établie grâce à quelques historiens et historiennes des sciences. Elle fait aujourd'hui office de cas de figure pour présenter les inégalités qui peuvent exister entre les hommes et les femmes scientifiques. Il apparaît toutefois important de remarquer que cette histoire ne devrait pas diminuer l'importance des réalisations de Watson, de Crick et de Wilkins, ni glorifier outre mesure celle de Franklin, mais plutôt offrir un point de vue plus nuancé et moins anecdotique. Les avancées importantes réalisées par ces quatre scientifiques offrent suffisamment de gloire pour que ceux-ci puissent tous la partager!

Cela dit, la publication de Watson et de Crick en 1953 présentant le modèle de la double hélice eut un effet considérable dans le monde de la biologie et chez le grand public. C'est grâce à ces travaux que l'ADN finit par devenir unanimement accepté en tant que support de l'hérédité. L'accueil favorable que reçut ce modèle tenait pour beaucoup dans sa grande simplicité et sa capacité à expliquer les mécanismes d'autoréplication du matériel génétique. Le modèle hélicoïdal qui fut présenté par Watson et Crick prit néanmoins plusieurs années avant d'être confirmé par de nouvelles expériences. Francis Crick remarqua (comme le cite Bryson) qu'» il a fallu plus de vingt-cinq ans pour que notre modèle de l'ADN passe d'assez plausible [...] à très plausible [...] et de là, à certainement exact<sup>37</sup>. »

Il est aussi important de remarquer que le modèle de la double hélice est loin de résoudre tous les problèmes liés à la transmission de l'hérédité. À l'époque des travaux de Watson et de Crick, la



3.47 : Modèle « standard » de la structure de la double hélice d'ADN.

<sup>36</sup>Elkin, L.O. (2003) Rosalind Franklin and the Double Helix. *Physics Today*, 56(3), 42-48. doi: <https://doi.org/10.1063/1.1570771>

<sup>37</sup> Crick, F. (1998) *What Mad Pursuit: A Personal View of Scientific Discovery*. New York: Basic Books.

molécule d'ADN était perçue comme une longue chaîne de gènes fournissant le code pour produire certaines protéines ayant un rôle précis à réaliser à l'intérieur de la cellule. Des recherches réalisées depuis ont toutefois permis de constater que cette image de l'ADN s'apparentant à celle d'un code informatique était peu satisfaisante. Entre autres, la notion de gène apparaît aujourd'hui beaucoup plus complexe à définir que ce qu'elle pouvait a priori le sembler<sup>38</sup>. Depuis les dernières décennies, l'application de l'étude des systèmes complexes à différents domaines scientifiques, dont la génétique, a également grandement contribué à l'amélioration de notre compréhension de l'hérédité.

## B) Description et utilisation des démonstrations

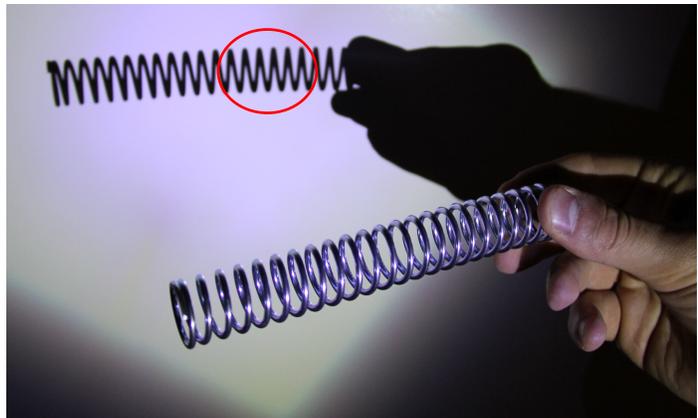
### Démonstration : Diffraction sur un ressort

#### Matériel

- pointeur laser;
- support ajustable 2 axes;
- ressort installé dans un cadre à diapositive;
- écran blanc.

Cette démonstration a pour but de permettre à des étudiants de réaliser le même genre d'observations que celles effectuées par Rosalind Franklin et mettant en évidence la structure hélicoïdale de l'ADN. Évidemment, le contexte expérimental original ne peut être reconstitué intégralement en contexte de classe, puisqu'il nécessite une source de rayons X et un échantillon d'ADN cristallisé. Néanmoins, il est possible d'utiliser une source de lumière visible (un laser), ayant une longueur d'onde plus grande que celle des rayons X. Dans ce cas, on doit se servir d'un objet hélicoïdal d'autant plus grand, soit un ressort de petit diamètre comme ceux que l'on retrouve dans certains stylos.

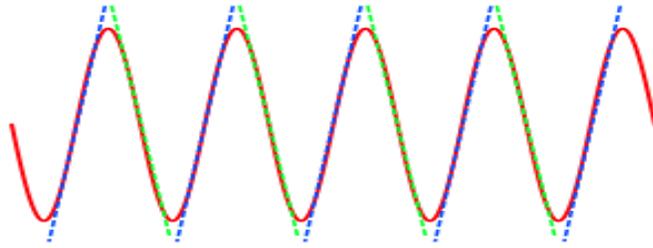
Ainsi, en projetant le faisceau d'un laser sur le ressort, il devient possible de recréer un patron de diffraction semblable à celui se trouvant sur la photographie 51 (voir image 3.46), qui présente deux bandes lumineuses croisées et une alternance de franges claires et sombres. Pour expliquer ce phénomène, il faut d'abord considérer que le ressort vu de côté prend l'allure d'une courbe sinusoïdale, tel qu'illustré ci-contre (voir image 3.48).



3.48 : L'ombre illustre bien le profil sinusoïdal du ressort, particulièrement dans la zone entourée en rouge (les rayons de la source lumineuse ne sont pas parfaitement parallèles).

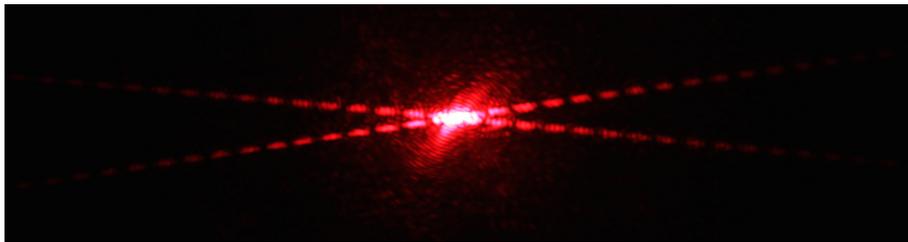
<sup>38</sup> Morange, M. (2004). Déconstruction de la notion de gène. *M/S Médecine sciences*, 20(10), 835-836. doi : <https://doi.org/10.1051/medsci/20042010835>.

Le ressort présente donc deux séries de segments parallèles, l'une inclinée vers la droite et l'autre vers la gauche. La figure ci-dessous illustre cette situation.



3.49 : Segments parallèles d'un ressort vu de côté. L'une des deux séries de segments est en vert, l'autre est en bleu; le ressort est en rouge.

En vertu du principe de Babinet, ces obstacles éclairés par le laser donneront une figure de diffraction identique à celle de fentes de largeur égale au diamètre du fil du ressort. Le ressort agit donc comme deux séries de fentes parallèles ayant des inclinaisons différentes. Un exemple typique de résultat est présenté ci-dessous.

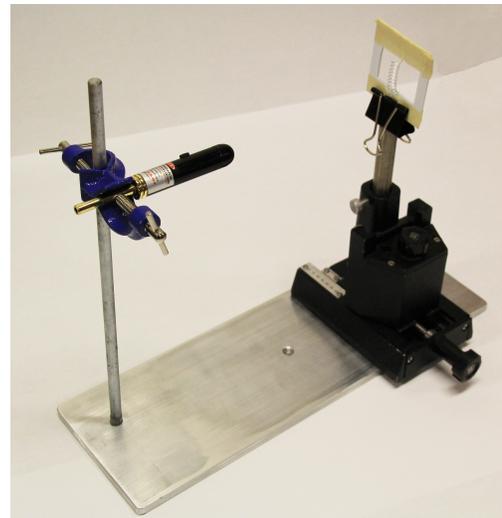


3.50 : Patron de diffraction produit lorsqu'un faisceau laser est projeté sur un petit

### Précisions techniques sur le montage

Le montage à utiliser est le même que celui décrit dans la fiche « La nature de la lumière ». Le laser est projeté sur le ressort qui est installé dans son support.

- Il est nécessaire de travailler dans un local sombre pour effectuer cette démonstration.
- La sécurité est importante à considérer en manipulant le laser. Le faisceau lumineux ne doit jamais être dirigé vers les yeux d'une personne. Il est donc préférable de travailler à une hauteur différente par rapport à celle des yeux des gens dans le local. Pour éviter les réflexions parasites, il est aussi conseillé d'enlever montre, bague ou tout autre bijou de métal. De plus, il faut éviter de diriger le faisceau vers un bord de tableau métallique ou tout autre objet du genre.
- L'ajustement de la position du laser avec les vis micrométriques permet une bonne précision pour bien centrer le laser sur le petit ressort.



3.51 : Montage utilisé pour la diffraction sur un petit ressort. On voit ici le pointeur laser et le support, surmonté d'un pince-notes, permettant des ajustements sur deux axes.

## C) Concepts de sciences associés à la fiche

- Diffraction
- Interférence
- Réseau de diffraction
- Loi de Bragg
- Modèle de la structure de l'ADN

## D) Informations et ressources complémentaires

### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**Braun G. Tierney D. et Schmitzer H. (2011).** How Rosalind Franklin Discovered the Helical Structure of DNA : Experiments in Diffraction. *The Physics Teacher*, 49(3), 140-143. doi : 10.1119/1.3555496

Cet article fournit des détails à propos de la démonstration qui est proposée dans cette fiche. On y retrouve quatre activités à propos de la double hélice qui peuvent être réalisées en classe.

**Bryson, B. (2007).** *Une Histoire de tout, ou presque...* Paris : Éditions Payot & Rivages.

Dans ce livre de vulgarisation scientifique lauréat de nombreux prix, l'auteur raconte plusieurs histoires de sciences dans un langage accessible et souvent humoristique. Le chapitre 26 présente les formidables propriétés de la molécule d'ADN et constitue un bon résumé de l'histoire de la double hélice.

**Elkin, L. O. (2003).** Rosalind Franklin and the Double Helix. *Physics Today*, 56(3), 42-48. doi : 10.1063/1.1570771

Cet article traite du rôle de Rosalind Franklin dans l'élaboration du modèle de la double hélice. Il offre aussi une réflexion critique quant à la place des femmes en sciences en prenant appui sur l'histoire de Rosalind Franklin. On y retrouve plusieurs informations qui permettent de situer d'une manière plus juste l'apport de cette scientifique ainsi que le contexte de la « vie de laboratoire » à cette époque. Cette référence fut très utile pour la rédaction de la fiche démonstration.

**Watson J. D. et Crick F.H. (1953).** Molecular structure of Nucleic Acids. *Nature*, 171(4356), 737. doi : 10.1038/171737a0

C'est dans cet article historique d'une seule page que Watson et Crick publièrent leur modèle de la double hélice. On y retrouve une mention du travail de Rosalind Franklin.

**Watson, J. D. (1968).** *La double hélice.* Paris : Robert Laffont.

Dans cet ouvrage, Watson raconte sa version personnelle de l'histoire de la découverte de la double hélice. Ce livre constitue un bon récit illustrant la science « en train de se faire ». Il est toutefois important de remarquer que sa version des faits, parfois manquant de nuances, ne rend pas justice à certains de ses collègues, en particulier Rosalind Franklin.

**Morange, M. (2004).** Déconstruction de la notion de gène, *M/S Médecine sciences*, 20(10), 835-836. doi : 10.1051/medsci/20042010835

Cet article aborde notre conception parfois simpliste, voire naïve, de la notion de gène. L'auteur y apporte certaines nuances très intéressantes, notamment du point de vue épistémologique.

#### **LIENS UTILES**

**Vidéo sur la cristallographie :** [<https://youtu.be/uqQlwYv8VQI>]

La cristallographie par rayons X fut et est encore assez importante pour que l'UNESCO décide de faire de l'année 2014 « l'année internationale de la cristallographie ». Cette vidéo retrace l'histoire de cette technique essentielle en sciences.

### 3.4 Les limites de la mesure

## THÈME 5 : DÉTERMINISME, INCERTITUDES ET SYSTÈMES COMPLEXES

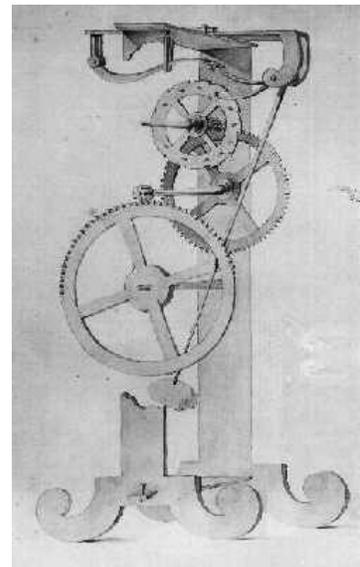
FICHE : REGARDS SUR LA COMPLEXITÉ

### A) Repères culturels associés

*Mesurer tout ce qui peut être mesuré et rendre mesurable ce qui ne l'est pas.*

**Galilée (1564-1642)**

On raconte qu'en 1582, alors qu'il se recueillait à la cathédrale de Pise, l'attention de Galilée fut détournée vers le mouvement régulier d'oscillation des chandeliers qui ornaient le plafond de l'église. Il aurait alors remarqué que la durée des oscillations de ces chandeliers était indépendante de l'amplitude de leur mouvement. En utilisant son propre pouls comme chronomètre, il serait parvenu à mesurer la durée de ces oscillations. Ainsi, à l'âge de 19 ans, Galilée venait de réaliser une expérience cruciale à propos du mouvement des pendules<sup>39</sup>. D'ailleurs, cet événement déclencheur aurait été particulièrement significatif pour Galilée. Quelques années plus tard, cela lui aurait en effet permis d'élaborer les plans de ce qui deviendrait la première horloge à balancier, exploitant la prédictibilité du pendule comme moyen de mesurer le temps. Ses observations auraient également contribué à développer sa propre intuition quant à d'autres types de mouvement, ce qui le conduisit à formuler de nombreuses prédictions à ce sujet. Par exemple, c'est en utilisant des modèles mathématiques qu'il réussit par la suite à décrire la chute des corps et le mouvement des projectiles. L'approche scientifique de Galilée, à la fois empirique et mathématique, deviendrait un modèle pour les scientifiques qui allaient suivre.



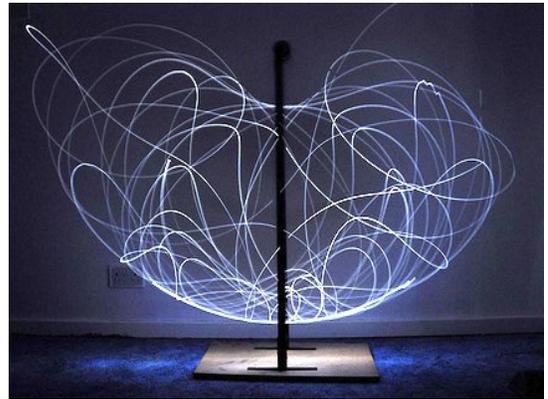
3.52 : Horloge à pendule conçue par Galilée vers 1637.

La description du mouvement du pendule peut être vue comme l'archétype de la science classique s'inspirant de l'approche de Galilée. L'oscillation du pendule est prévisible, régulière et déterminée par un modèle mathématique ayant une solution simple, tout comme les phases de la Lune ou le mouvement des planètes dans notre système solaire. L'exemple de la prédiction par Halley du retour de la comète qui porte aujourd'hui son nom, l'un des premiers grands triomphes de la mécanique classique, est particulièrement évocateur de la puissance de cette approche. Les succès de la mécanique classique allaient ainsi contribuer à forger une vision mathématique et déterministe de la nature chez un grand nombre de scientifiques de l'époque. D'ailleurs, une telle conception du

<sup>39</sup> Du moins, c'est le récit anecdotique qui est souvent relaté.

monde n'est pas sans rappeler l'idée pythagoricienne que « tout est mathématique », un sentiment qui fut probablement ressenti d'une certaine façon par Galilée lorsqu'il affirma que « le livre de la Nature est écrit en langage mathématique ». Notons que ce discours semble, aujourd'hui encore, être partagé par de nombreux scientifiques<sup>40</sup>.

Il paraît toutefois légitime de se demander si un tel déterminisme ou une telle capacité de prédiction des lois scientifiques sont des caractéristiques générales des systèmes étudiés en sciences ou si elles ne se retrouvent que pour certaines situations particulières et idéalisées. Un grand nombre de phénomènes naturels n'échappent-ils pas à la prédictibilité habituelle de la science classique? Par exemple, le comportement d'un pendule double, en apparence d'une grande simplicité, devient en quelques instants complètement imprévisible (voir en ce sens la démonstration proposée à la section B). Pourtant, notre premier réflexe serait probablement de prédire que son mouvement ne doit pas être très différent de celui d'un pendule simple, ce qui n'est ici pas du tout le cas. Plusieurs autres phénomènes naturels se comportent d'ailleurs de façon similaire, comme c'est le cas pour la météo, dont l'évolution semble impossible à prédire avec certitude au-delà de quelques jours. Une multitude de situations échapperaient ainsi à toute prédictibilité à long terme, et ce, malgré le fait qu'elles puissent être décrites par des modèles mathématiques complexes.



3.53 : Photo à longue exposition d'un pendule double au comportement chaotique muni de DEL.

Au début du XX<sup>e</sup> siècle, le mathématicien français Henri Poincaré (1854-1912) s'intéressa au problème des trois corps : un modèle mathématique décrivant le mouvement de trois objets liés entre eux par la gravitation de Newton. L'analyse mathématique qu'il en fit lui permit de constater que ce système pouvait devenir imprévisible à long terme. S'il est mathématiquement impossible de prédire l'évolution d'un système aussi simple, qu'en est-il alors de la plupart des systèmes que l'on étudie en sciences où plusieurs éléments se retrouvent en interactions? Les recherches de Poincaré semaient ainsi le doute sur les prétendues facultés déterministes de la science.

Toutefois, ce ne fut qu'à partir des années 1970, grâce aux nouvelles possibilités ouvertes par le développement de l'informatique, qu'un plus grand nombre de scientifiques s'intéressèrent à des phénomènes qui semblaient jusqu'alors imprévisibles. Au lieu de s'esquiver devant des problèmes en apparence trop complexes ou de succomber à la tendance classique de les simplifier et de les idéaliser, certains scientifiques décidèrent au contraire de caractériser et de mesurer ces phénomènes afin d'en cerner certaines propriétés communes. Ils définissaient les contours d'une nouvelle science : celle du chaos et des systèmes complexes.

Aujourd'hui, les idées ayant émergé des sciences de la complexité sont appliquées à une foule de disciplines allant de la physique à l'économie, en passant par la météorologie, la biologie, la sociologie ou les neurosciences.

---

<sup>40</sup> À ce propos, citons le cosmologue Max Tegmark, qui a récemment repris cette idée dans son livre « Notre univers mathématique : En quête de la nature ultime du réel » où il affirmait que le monde dans lequel nous vivons est purement constitué de mathématiques.

*La question de l'avenir de la science est souvent posée. Pour certains, tel Stephen Hawking dans sa Brève histoire du temps, nous sommes proches de la fin, du moment où nous serons capables de déchiffrer la « pensée de Dieu ». Je crois au contraire que nous sommes seulement au début de l'aventure. Nous assistons à l'émergence d'une science qui n'est plus limitée à des situations simplifiées, idéalisées, mais nous met en face de la complexité du monde réel, une science qui permet à la créativité humaine de se vivre comme l'expression singulière d'un trait fondamental commun à tous les niveaux de la nature<sup>41</sup>.*

**Ilya Prigogine**

## **La science du chaos et les systèmes chaotiques**

L'apparition puis le développement fulgurant qu'a connu l'informatique depuis le milieu du XX<sup>e</sup> siècle ont transformé radicalement nos vies ainsi que nos manières de faire des sciences. Tout comme le télescope ou le microscope l'ont fait auparavant, l'ordinateur, grâce à sa capacité d'effectuer de nombreux calculs très rapidement, a transformé notre rapport à la nature en permettant, entre autres, l'utilisation de modèles numériques. Cette technique consiste à modéliser un système par certaines équations mathématiques, puis à calculer et à présenter l'évolution de ce système grâce aux capacités d'un ordinateur. On emploie des modèles numériques dans des domaines aussi divers que l'économie, la météorologie, la circulation automobile, l'écologie, les sciences sociales, la cosmologie ou l'ingénierie. L'historien et sociologue des sciences, Yves Gingras, en donne un bon exemple en décrivant comment des modèles numériques peuvent servir à analyser des situations politiques :

*On veut savoir, par exemple, si un monde où cohabitent deux superpuissances peut être stable. Pour ce faire, on définit des règles qui modélisent une compétition entre deux ou plusieurs pays. On écrit des équations qui permettent d'analyser les effets de la compétition, en supposant par exemple que le pays Y va investir plus d'argent en armements s'il voit que le pays X augmente ses propres budgets d'armements. Couplé à d'autres équations qui tiennent compte de différents aspects de l'économie des pays, le modèle peut évaluer la stabilité du système en fonction du nombre de pays participant à la compétition<sup>42</sup>.*

Cela dit, l'une des premières utilisations des ordinateurs consistait à prédire la météo grâce à des modèles numériques. En effet, durant la Seconde Guerre mondiale, il devenait parfois crucial de connaître le temps qu'il ferait pour organiser des opérations militaires. Les équations mathématiques permettant de déterminer l'évolution des systèmes météorologiques étaient connues depuis plusieurs années, mais l'arrivée de l'ordinateur permit dès lors de traiter ces équations plus rapidement afin de prédire le temps qu'il fera sur une certaine période donnée. Ainsi, grâce à l'analyse de certains modèles météorologiques, un nouveau champ de recherche allait naître, celui de la science du chaos.

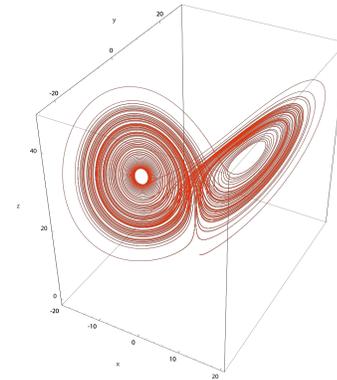
---

<sup>41</sup> Prigogine, I. (2009). *La fin des certitudes*. Paris : Odile Jacob, 15 p.

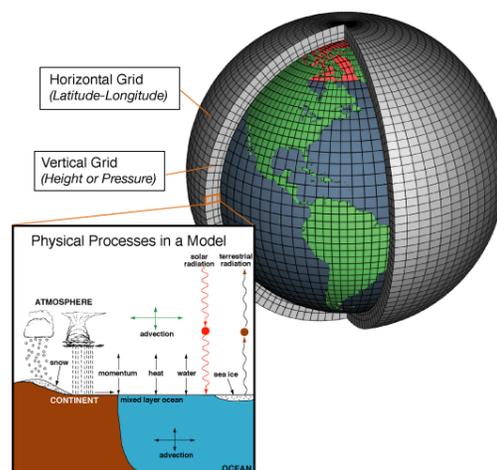
<sup>42</sup> Gingras, Y. (2008). *Parlons sciences : Entretiens avec Yannick Villedieu sur les transformations de l'esprit scientifique*. Montréal : Boréal, 36 p.

Plus particulièrement, ce serait au début des années 1960 que le météorologue Edward Norton Lorenz utilisa un modèle numérique pour prédire l'évolution de la météo. Ses analyses l'amènèrent à constater que lorsqu'une très légère variation était introduite au niveau des conditions initiales du système qu'il étudiait, il en résultait à long terme une évolution qui était complètement différente de sa prédiction. De plus, il remarqua que cette dépendance sensible aux conditions initiales était une propriété inhérente des modèles météorologiques. Lorenz donna alors le nom d'*effet papillon* à cette propriété des systèmes chaotiques qu'il retrouva dans les modèles météorologiques. Dans une formulation, qui a depuis marqué l'imaginaire collectif, il se questionne : « Le battement d'ailes d'un papillon au Brésil peut-il provoquer une tornade au Texas? ». Autrement dit, pour être capable de prédire sur une longue période l'évolution d'un système météo, il faudrait être en mesure d'en déterminer les conditions actuelles avec un niveau de précision extrême. En effet, la moindre imprécision dans les mesures pourrait produire un comportement complètement imprévisible. Or, toute mesure comporte une incertitude, aussi petite soit-elle, et de ce fait, tout système présentant une sensibilité aux conditions initiales sera imprévisible à long terme. C'est ce qui explique qu'aujourd'hui encore, même si on utilise des modèles numériques plus complexes et que les mesures météorologiques sont plus précises, il est impossible de prédire (avec certitude) la météo au-delà d'une semaine.

Des scientifiques de divers horizons remarquèrent également que cette sensibilité aux conditions initiales ne se retrouvait pas que dans les modèles météorologiques et que dans un grand nombre de situations, il était impossible de prévoir l'évolution d'un système. L'idée d'un univers déterministe imaginé par plusieurs scientifiques à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle ne tenait donc plus. On avait pourtant longtemps cru que l'importance d'une action devait être proportionnelle à son effet, c'est-à-dire qu'une petite action produit un petit effet, tandis qu'une plus grande action produit un effet plus grand. Or, la science du chaos qui se développa à partir des années 1970 permit de comprendre qu'une action, même si elle est très petite, pourra engendrer une série d'interactions dans un système et en modifiera significativement son évolution à long terme.



3.54 : On peut mettre en évidence un certain niveau d'organisation dans un système chaotique en représentant son évolution à long terme dans l'espace des phases. Cette représentation porte le nom d'attracteur étrange.



3.55 : Cette image montre certains concepts utilisés dans les modèles climatiques. Chacune des milliers de cellules tridimensionnelles peut être représentée par des équations mathématiques décrivant la matière qui s'y trouve et la façon dont

Par ailleurs, les systèmes chaotiques ne sont pas pour autant dépourvus d'un certain niveau d'organisation. En effet, les scientifiques qui s'intéressèrent à différents phénomènes sensibles aux conditions initiales observèrent que ceux-ci possédaient certaines propriétés communes. Les phénomènes que l'on dit chaotiques se distinguent donc des phénomènes aléatoires où un hasard complet prévaut. Bien qu'il ne soit pas possible de prédire l'évolution d'un système chaotique, certains aspects plus généraux de ces systèmes sont quant à eux prévisibles. Par exemple, même s'il est impossible de prévoir à long terme le temps qu'il fera à un endroit choisi, certaines prévisions globales sur le climat sont possibles, notamment grâce à l'utilisation de modèles numériques et des connaissances relatives aux systèmes chaotiques. En somme, cette compréhension des systèmes chaotiques a trouvé des applications dans une variété de domaines (physique, biologie, chimie, économie, etc.), faisant des sciences du chaos un véritable champ de recherche interdisciplinaire qui permet de porter un regard scientifique sur le hasard, l'ordre et la prédictibilité.

### **Les systèmes complexes**

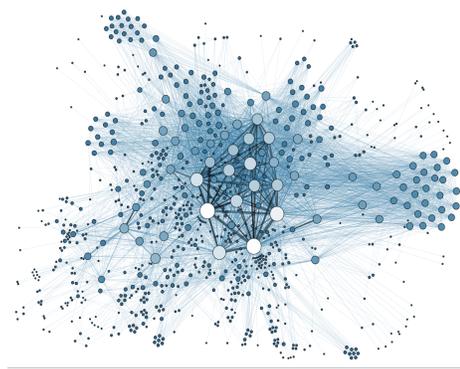
Une approche qui apparaît comme dominante en science lorsqu'il s'agit de comprendre un système complexe est de le diviser d'abord en parties plus simples qui seront ensuite analysées individuellement. Cette approche, que l'on nomme *réductionnisme*, est centrale à la méthode scientifique que René Descartes énonça au XVII<sup>e</sup> siècle : « Diviser chacune des difficultés que j'examinerais, en autant de parcelles qu'il se pourrait, et qu'il serait requis pour les mieux résoudre ». Depuis l'époque de Newton, de Galilée et de Descartes, le réductionnisme fut donc central dans le développement de la science. Par exemple, c'est ainsi que plusieurs scientifiques tentèrent de déterminer les plus petits constituants de la matière dans l'espoir de trouver des réponses à leurs questions... Ce qui mena ultimement au modèle de l'atome. On comprend aujourd'hui beaucoup mieux l'origine de l'énergie qui est dégagée par notre Soleil grâce aux développements de la physique nucléaire.

Un peu de la même manière, cette « quête réductionniste » en biologie conduisit à s'intéresser aux plus petits constituants de la vie, la molécule d'ADN, ce qui permit de comprendre les mécanismes de l'évolution. Cette approche s'est donc avérée très puissante dans plusieurs domaines, mais elle possède toutefois certaines limites, notamment pour expliquer un grand nombre de phénomènes complexes qui surviennent à notre échelle. Par exemple, la nature de l'intelligence et le fonctionnement du cerveau ne peuvent être complètement compris, bien que l'on connaisse très bien la structure et le fonctionnement d'un neurone. Dans plusieurs cas, même en ayant une connaissance précise des constituants fondamentaux d'un système, cela ne suffit pas pour expliquer ce qui se produit à grande échelle.

Revenons à l'exemple du pendule double pour mieux cerner les limites du réductionnisme. Deux pendules simples oscillent d'une façon parfaitement régulière lorsqu'ils ne sont pas en interaction l'un avec l'autre. Toutefois, s'ils sont reliés, leur comportement devient alors chaotique et imprévisible. Si l'on considère que notre cerveau est constitué de plusieurs milliards de neurones qui interagissent ensemble, on peut alors entrevoir la complexité potentielle qu'un tel système peut réussir à générer. Pour exprimer les limites du réductionnisme, on utilise souvent l'expression : « Un tout est plus grand que la somme de ses parties ». Ainsi, les sciences de la complexité, qui se sont développées depuis quelques dizaines d'années, ne tentent plus d'isoler les parties individuelles d'un système, mais essaient plutôt de comprendre les relations qui lui permettent de s'organiser.

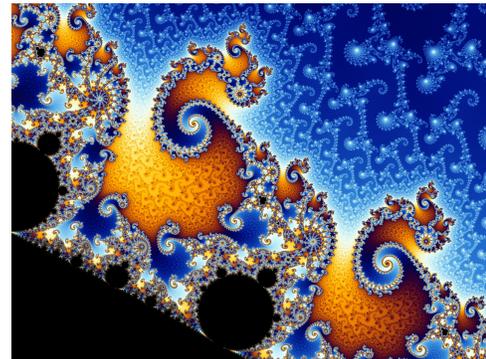
Une des ramifications des sciences de la complexité, dont on réalise de plus en plus l'importance et la portée, est l'étude des réseaux. Trouvant des échos dans divers domaines comme la télécommunication, la sociologie, la génétique ou l'étude des écosystèmes, la théorie des réseaux s'intéresse aux relations entre les différents éléments d'un système. Plutôt que de se centrer sur ses éléments particuliers, on tente maintenant d'analyser son ensemble. On remarque alors que certaines de ses propriétés ne deviennent claires que lorsqu'on prend du recul pour appréhender le système comme un tout.

Cette science a ainsi permis de répondre à des questions variées qui ne semblaient pas reliées a priori : pourquoi l'espérance de vie typique d'un organisme dépend-elle de sa taille? Pourquoi des rumeurs, blagues ou légendes urbaines se répandent-elles si rapidement? Pourquoi des réseaux immenses et complexes comme l'Internet ou les systèmes de distributions électriques sont-ils si robustes dans certains cas, mais parfois sujets à certaines pannes majeures? Quels événements peuvent entraîner l'effondrement d'un écosystème<sup>43</sup>?



3.56 : Exemple de graphique constitué de nœuds et de liens permettant de visualiser un réseau.

Ce que l'on comprend de mieux en mieux, grâce aux développements de ce champ de recherche, est qu'il est possible de générer un système complexe à partir de quelques règles très simples. Par exemple, les fractales sont des figures qui présentent des détails similaires à différentes échelles et qui semblent d'une très grande complexité ; elles ne sont pourtant générées qu'à partir de l'itération répétée de règles mathématiques élémentaires. Plusieurs formes observées dans la nature, surtout chez les plantes, possèdent aussi une structure qui s'apparente aux fractales; cela laisse supposer que leur développement pourrait être produit par l'itération de certaines règles simples.



3.57 : Figure fractale extraite de l'ensemble de Mandelbrot.

En outre, à partir de quelques règles de base appliquées à une grille bidimensionnelle, on arrive à générer des structures qui se transforment et évoluent à chaque itération. *Le jeu de la vie* (Conway's *Game of life*), le plus connu des automates cellulaires, a été élaboré par John Horton Conway en 1970. Ce « jeu » met en scène différentes formes qui apparaissent, se déplacent, interagissent entre elles, se reproduisent. Tous ces comportements qui à première vue apparaissent comme étant fort complexes ne sont, ici aussi, générés qu'à partir de quelques règles de base très simples. Comme c'est le cas avec les fractales, on obtient un système très complexe en apparence, mais qui ne

<sup>43</sup> Mitchell, M. (2009). *Complexity, A Guided Tour*. New York : Oxford University Press.

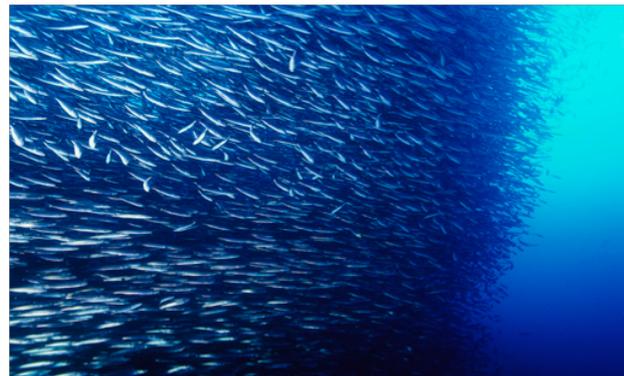
repose que sur quelques interactions élémentaires. On peut considérer *Le jeu de la vie* comme un modèle simplifié permettant de comprendre comment certains objets simples et inanimés peuvent interagir entre eux et générer des comportements hautement complexes comme la vie ou l'intelligence. En somme, la notion de complexité ne fait donc pas référence à des phénomènes complètement désordonnés, mais plutôt à des systèmes où plusieurs éléments interagissent entre eux grâce à quelques règles simples, donnant lieu à un comportement collectif sophistiqué.



3.58 : La structure fractale du chou romanesco.

On peut d'ailleurs utiliser ces idées afin de mieux comprendre certains aspects du comportement animal qui, jusqu'à tout récemment, semblaient encore mystérieux. Par exemple, plusieurs espèces de poissons ont tendance à se regrouper en banc afin de se protéger de leurs prédateurs. Comment des centaines, voire des milliers de poissons, peuvent-ils se regrouper et former des structures ordonnées et diverses, comme s'ils ne constituaient qu'un seul super organisme? Des études réalisées à partir de modèles informatiques ont permis de découvrir que cette dynamique complexe et organisée des poissons pouvait être décrite par seulement deux règles de base : l'attraction et l'alignement des individus. Ainsi, l'organisation de ce système n'est pas le résultat d'un contrôle centralisé (d'un poisson en chef), mais plutôt de l'interaction entre une multitude d'individus. On retrouve ce type d'organisation chez un grand nombre d'espèces : abeilles, fourmis, oiseaux migrateurs, etc. Ce serait donc l'interaction entre un grand nombre d'individus, reposant sur des règles simples et peu nombreuses, qui permettrait à ceux-ci de se coordonner, de survivre et de se reproduire. Ces espèces ont ainsi développé des capacités qui n'existent pas à l'échelle individuelle, où la communauté devient plus grande que la somme de ses parties.

Bref, la théorie des systèmes complexes permet de mieux comprendre comment une organisation complexe peut résulter du comportement simple de plusieurs individus à l'intérieur d'un système et trouve des applications dans des domaines très variés : comportement animal, fonctionnement du cerveau, système immunitaire, économie, etc. Grâce aux sciences de la complexité, certains scientifiques dressent maintenant des parallèles entre l'organisation d'une colonie de fourmis et le fonctionnement du cerveau. Celles-ci constitueraient en quelque sorte un aperçu de la façon dont des milliards de neurones arrivent à travailler de concert et produire l'intelligence<sup>44</sup>.



3.59 : Banc de poissons.

---

<sup>44</sup> Arnold, C. (2014). Ants swarms like brain thinks. *Nautilus*, (012). Récupéré du site de la revue : <http://nautil.us/issue/12/feedback/ants-swarm-like-brains-think>

## B) Description et utilisation des démonstrations

### Démonstration : Le double pendule

La démonstration du double pendule est à la fois simple, surprenante et extrêmement révélatrice de certains éléments essentiels de la théorie des systèmes complexes. Le double pendule est constitué de deux parties faites en aluminium, pouvant osciller librement, reliées entre elles par des roulements à billes. Lorsque le pendule est mis en mouvement avec suffisamment d'énergie, son mouvement devient imprévisible. Il s'agit d'un système chaotique et donc sensible aux conditions initiales.

Le pendule peut servir à illustrer qu'un tout est plus grand que la somme de ses parties. Ici, deux pendules ayant un comportement simple et prévisible se comportent d'une façon complexe et imprévisible lorsqu'ils sont reliés ensemble. Il s'agit donc d'une démonstration tout à fait appropriée pour faire ressortir les principaux concepts que l'on retrouve dans les sciences de la complexité. Cela pourrait amorcer une discussion permettant de mettre en perspective l'idée de déterminisme des lois scientifiques ainsi que l'approche réductionniste de la science.



3.60 : CDSP, 2015.

### Précisions techniques sur le montage

Le pendule doit être solidement fixé à une tige d'acier. Des vibrations dans la tige peuvent se produire lorsque le pendule est en mouvement. Pour réduire autant que possible ces vibrations, il est suggéré de ne pas fixer le pendule trop haut sur la tige. Une serre à angle est utilisée pour fixer la tige à une table. Plus celle-ci sera stable, plus le double pendule oscillera longtemps, car moins il y aura d'énergie transférée dans la vibration de la table.



3.61 : Serre à angle utilisée pour fixer la tige à une table.



3.62 : Photo détaillée du double pendule.

## C) Concepts de sciences associés à la fiche

- Le mouvement du pendule
- La dynamique des systèmes chaotiques
- Les systèmes complexes

## D) Informations et ressources complémentaires

### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**Mitchell, M. (2009).** *Complexity, A Guided Tour*. New-York : Oxford University Press.

Cet ouvrage très complet fait état des différents développements des sciences de la complexité et fut une référence importante pour la rédaction de cette fiche. On y retrouve, entre autres, une description bien étoffée de la théorie du chaos, des automates cellulaires, de la théorie des réseaux ainsi que de nombreux exemples d'applications à différents domaines. Le contexte historique du développement de ces nouvelles sciences est également présenté.

**Gleick, J. (1987).** *La théorie du chaos*. Paris : Flammarion.

Ce livre écrit il y a plus de 25 ans fut le premier ouvrage ayant pour but de présenter la théorie du chaos à un public élargi. À l'époque, il connut un énorme succès et contribua grandement à faire connaître cette théorie. L'auteur y vulgarise les différents concepts clés en les situant dans leur contexte historique.

**Gingras, Y. (2008).** *Parlons sciences : Entretiens avec Yannick Villedieu sur les transformations de l'esprit scientifique*. Montréal : Boréal.

Deux des chapitres de cet ouvrage ont inspiré certaines idées se retrouvant dans cette fiche démonstration. Il s'agit d'abord du chapitre 3, *Des lois aux modèles*, qui traite de construction des modèles en sciences, de leur évolution et de leur complexité grandissante. Le chapitre 8, *Un nouveau genre de science?*, présente la question des automates cellulaires en lien avec la parution (en 2002) de l'imposant ouvrage de Stephen Wolfram, *A New Kind of Science*, qui a fait alors beaucoup parlé de lui dans la communauté scientifique, puisque selon son auteur, il ne constituait rien de moins qu'une « nouvelle bible des sciences »!

### LIENS UTILES

**Générateur de l'ensemble de Mandelbrot:** [<http://tilde.club/~david/m/>]

Ce site Web permet de générer des figures fractales issues de l'ensemble de Mandelbrot.

**Vidéo d'un banc de poissons :** [<https://www.youtube.com/watch?v=V5up0yaYz9E>]

**Le jeu de la vie de Conway :** [<http://golly.sourceforge.net>]

Ce site Web permet de télécharger *Le jeu de la vie* (Conway's Game of life), un automate cellulaire qui permet de créer des structures qui présentant un comportement complexe.

**Fabrication d'un double pendule:** [<http://www.instructables.com/id/The-Chaos-Machine-Double-Pendulum/>]

On retrouve sur ce site des plans détaillés pour la fabrication d'un pendule double.

### 3.5 Conclusion : la mesure pour introduire une réflexion de nature épistémologique en enseignement des sciences

En guise de conclusion à ce module de démonstration, il apparaît utile d'aborder brièvement l'intérêt du thème de la mesure comme ancrage pour discuter des rapports entre sciences et société dans l'enseignement des sciences, et ce, par l'entremise de divers repères historiques et culturels. Il semble en effet pertinent de revenir sur les différents types de repères culturels abordés dans les fiches démonstrations, à la manière dont ils sont présentés dans le Programme de formation de l'école québécoise (PFÉQ). La place accordée aux repères culturels, décrits comme des appuis pour le développement des compétences disciplinaires, y est claire et revêt une importance évidente. Ces repères permettent d'associer les apprentissages à divers champs de l'activité humaine tout en les situant dans des contextes sociaux et historiques susceptibles d'en éclairer le sens. Cette intention est précisée dans le programme du secondaire (premier cycle) où il est écrit que les champs disciplinaires d'ordre scientifique ainsi que les champs d'applications technologiques sont accessibles par des repères culturels. On y précise d'ailleurs que l'activité scientifique et l'activité humaine « s'inscrivent l'une et l'autre dans un contexte social et culturel et elles sont le fruit du travail d'une communauté qui construit de manière collective de nouveaux savoirs sur la base de connaissances acquises antérieurement. » (p. 267) De plus, on décrit ces activités scientifiques et humaines comme sollicitant l'imagination, la créativité, le désir d'explorer, le plaisir de la découverte et le besoin de comprendre et d'expliquer. C'est donc sur la base de ces considérations que le module de démonstration tel que présenté a été imaginé.

Puisque ce module de démonstration s'adresse à la formation des futurs enseignants du secondaire, mais aussi du collégial, il semble intéressant de rappeler que ces considérations sont aussi présentes dans le programme de *Science de la nature*, notamment, bien qu'elles y prennent une moindre importance que dans le programme du secondaire. En effet, afin d'atteindre les buts généraux de ce programme, les étudiants devraient être amenés à « établir des liens entre la science, la technologie et la société » et à « situer le contexte d'émergence et d'élaboration des concepts scientifiques » abordés dans les différentes disciplines scientifiques.

En somme, différents repères historiques et culturels ont été abordés à travers les fiches démonstration constituant ce module. Il y a été question de différentes disciplines scientifiques (mathématiques, physique, géodésie, géologie, biologie, chimie), de périodes historiques (ex.: l'Antiquité, le siècle des Lumières, l'Époque contemporaine), de rencontres entre scientifiques d'hier et d'aujourd'hui (ex.: Delambre et Méchain, Darwin et Kelvin, Newton et Fresnel, Crick, Watson et Franklin, Wolfram, Lorenz et Mandelbrot) ainsi que de technologies anciennes et actuelles (ex.: corde à 13 nœuds, dioptra, thermocouple, cristallographie, modélisation systémique). Nous avons aussi parlé de mythes et de croyances (ex.: l'âge de la Terre selon la Bible, théorie du créationnisme), de controverses (âge de la Terre, nature de la lumière) et d'épistémologie (déterminisme, réductionnisme, complexité, débats, limites). À cela se sont ajoutés des montages de démonstration qui permettent à la fois d'apprécier la beauté de certains phénomènes (double pendule, tache de Poisson), mais aussi d'en comprendre certains aspects (températures et courbe de décroissance exponentielle, diffraction de la lumière avec fente et cheveux) tout en procurant à tout coup des questionnements (Comment trianguler en classe? Qu'est-ce qu'un étalon? Qu'entend-on par complexité?), mais parfois un effet de surprise. Bref,

l'intention générale derrière la conception de ce module de démonstration est celle d'enrichir la conception des sciences des futurs enseignants en parlant d'épistémologie, de contextes, d'histoires, de lieux, de créativité, de culture, d'ingéniosité et d'histoires humaines, toujours dans le but de donner du sens aux concepts présentés.

# Post-Face

## **LA DÉMONSTRATION : UNE HISTOIRE DE SCIENCE**

*Yvon Fortin, professeur de physique à la retraite, a enseigné au niveau collégial durant plus de 30 ans. Au cours de ces années, il a développé une expertise indéniable pour la démonstration scientifique, amenant régulièrement en classe plusieurs montages qu'il avait réalisés. En guise d'épilogue à ce livre, M Fortin nous présente sa vision de la démonstration et de son l'intégration en enseignement des sciences. Ce texte est tiré d'une entrevue menée avec M Yvon Fortin.*

## Un avantage pédagogique

J'ai commencé à faire des démonstrations en me rappelant le genre d'activités qui me surprenaient lorsque j'étais étudiant. Pour moi, voir un professeur arriver avec un montage, une « patente », ça m'intriguait : avec un montage qui me semblait quelconque, il voulait nous montrer comment on pouvait mesurer telle ou telle chose. Ça, ça m'intriguait et je me disais : « qu'est-ce qu'il va nous montrer? Est-ce qu'il y a vraiment quelqu'un qui a conçu ça? Comment a-t-il fait cela ? » Souvent, il nous parlait de son montage de façon bien informelle. Parfois, je ne comprenais pas – en fait, ça m'arrivait même souvent de ne pas comprendre -, mais l'objet m'intriguait toujours. Malgré l'évidence, il m'arrivait très souvent d'être plus intéressé par ce qu'il n'avait pas dit. Je me suis très souvent demandé comment quelqu'un en était arrivé à imaginer telle ou telle expérience pour vérifier une idée. Quand je regarde un objet, un montage ou un phénomène, j'essaie d'y voir les idées, les histoires, les événements qu'il renferme. Cela m'amène à lire sur l'histoire, et je ne surprendrai personne en disant combien tout ce qu'on découvre alors est riche pour nous aider à parvenir à nos fins comme enseignant. Les objets mieux que les théories avaient sur moi ce pouvoir de questionnement. C'est un des effets que je veux produire en faisant une démonstration : *amener les gens à voir des idées partout*. Vous voyez une route : je vois des idées; vous voyez un avion : je vois des idées et si on en discute, il est fort probable que les vôtres soient différentes des miennes et que les vôtres comme les miennes ne soient qu'une partie infime de toutes celles qui s'y cachent.

## Pour le professeur d'abord

Selon moi, concevoir des démonstrations est une démarche porteuse d'abord pour le professeur. Qu'est-ce que ça lui apporte de planifier et de monter des démonstrations ? C'est un véhicule extrêmement efficace pour aborder des idées qui peuvent donner du sens à ce qu'on leur demande d'apprendre. Pas seulement les concepts et les méthodes liées au programme, mais surtout comment on en est arrivé là. Les objets, les montages, les expériences auxquels on décide d'exposer nos étudiants sont autant de réservoirs d'idées qu'on peut exploiter pour leur faire voir comment ils réagissent face à l'inconnu et surtout comment à leur tour ils peuvent s'investir dans la quête de réponses.

Une des avenues qui s'offre au professeur serait de décider de reproduire une expérience qui existe déjà, bien documentée, avec le matériel qu'il a sous la main. Dans ce cas, la démonstration s'apparente à la démonstration d'un développement théorique au tableau : le professeur fait la démonstration pour arriver à extirper une réponse, une expression et il l'exploite en classe de la manière qu'il juge la plus appropriée et tout ça, à partir des phénomènes qu'il provoque dans son expérience. C'est un outil très efficace pour mettre en contact le sensible et le « construit ». Ma vision de la démonstration est un peu plus large. En fait, je n'ai jamais hésité à m'éloigner des montages « déjà tout fait ». Non pas qu'ils soient sans intérêt, mais plutôt parce qu'ils ne me permettaient pas toujours de bien installer les idées que je voulais aborder concernant la démarche expérimentale, l'avant et l'après, comment on en est arrivé là et ce qu'on fait après. C'est l'aventure des idées qui suscite l'intérêt premier. Surtout celles qui relèvent de la conception de l'expérience ou de la théorie.

De mon point de vue, faire une démonstration comme je la conçois, ça engage dans un processus de conception de longues haleines. Mon expérience de préparation des démonstrations, c'est d'abord être confronté à différents défis : bien souvent je réalisais que, pendant que je préparais ma démonstration, ça ne donnait pas ce que je voulais, le système ne tenait pas la route, ça ne marchait pas. J'ai réalisé aussi que bien souvent, je ne comprenais pas aussi bien ce qui se passait que je le croyais au départ. À mon avis, c'est l'état dans lequel se trouve quiconque aborde un sujet nouveau, inconnu ou incompris: je m'attendais à un certain résultat, mais ce résultat était parfois autre chose et cette « autre chose » n'était pas toujours facile à expliquer. Je me mettais alors à « bricoler ». En fait, j'entrais dans une démarche expérimentale : je voulais que ça donne un certain résultat, mais ça ne le donnait pas alors je poussais plus loin l'expérimentation.

La démonstration, c'est très riche pour les enseignants : ils peuvent revivre ce qu'ils ont vécu comme étudiant, les mêmes questions, les mêmes obstacles, parfois aussi la même frustration du : « ça ne marche pas », mais aussi la même émotion qui pousse à vouloir mieux comprendre ce qui se passe. Si tu racontes à tes étudiants l'histoire de la démonstration, ils vont très souvent se reconnaître dans ce récit et il y a un souvenir qui va les suivre : la joie, la surprise, l'étonnement ou la frustration... Pour moi, la démonstration introduit toute cette richesse dans la classe. D'une certaine manière, ça rend en quelque sorte possible d'accepter de se remettre en question, de faire un saut dans l'inconnu. Ça permet de « donner l'exemple » plutôt que de « donner des exemples ».

## **Bricoler**

Quand j'ai commencé à enseigner, j'ai très rapidement commencé à bricoler des démonstrations. Plus jeune, au secondaire et au cégep, j'ai construit des fusées. Étant donné que je suis bricoleur, j'étais celui qui fabriquait les rampes de lancement et les leviers pour contrôler le décollage. J'aimais bricoler, mais c'était pour moi surtout du « taponnage ». Dans ce taponnage, étant plutôt autodidacte, je « construisais » par essais et erreurs. Je n'allais pas nécessairement fouiller pour avoir des plans ou pour aller voir comment d'autres avaient résolu tel ou tel problème. De toute façon, il n'y avait pas beaucoup de documentation sur le sujet à l'époque. J'aimais « *essayer mes idées* ». C'est ce que la démonstration m'a d'abord permis de faire : essayer mes idées.

Pour moi, la démonstration est un outil extraordinaire parce que, comme enseignant, ça crée des attentes chez les élèves : peut-être qu'il va y avoir une démonstration, peut-être pas. Parfois, ce sont les élèves qui demandent à voir la démonstration. Quand ça arrive, c'est une victoire parce qu'au fond, ils veulent des clés pour comprendre, une mobilisation pour placer ces idées. En fait, un des buts de la démonstration, c'est qu'à la fin, ils doivent se sentir intelligents, se sentir capable de comprendre, avoir l'impression d'avoir compris. Si tu as l'impression d'avoir compris, tu es encore réceptif. Tu es encore prêt à jouer le jeu, à t'impliquer, à oser une réponse. Si dans la classe tu installes un climat où toutes les réponses sont considérées, même si tu dis quelque chose qui semble ne pas avoir de bon sens, on va l'exploiter. En science, parfois on n'a pas la bonne réponse, mais ce n'est pas nécessairement faux.

Comme professeur, je me suis vite rendu compte que lorsque j'arrivais avec une démonstration, je captais l'attention de tout le monde : tu rentres dans la classe avec ta patente, tes étudiants sont intrigués. Même s'ils n'aiment pas le cours, même s'ils sont forcés d'être là, il y a comme une « période de grâce » quand tu arrives avec tes montages. Ils te regardent t'installer et ça crée un

moment unique : ils ont alors plein de questions à te poser et parfois même tu peux commencer à discuter avec eux pendant l'installation. Puisque j'ai l'attention de tout le monde, grâce à ce que je mets en avant, mes étudiants sont prêts à entendre ce que j'ai à dire. Mais, au juste qu'est-ce que j'ai à dire? C'est ça la bonne question!

### **Qu'est-ce que j'ai à dire avec la démonstration ?**

Qu'est-ce que j'ai à dire avec la démonstration que je vais faire? Est-ce que je veux leur présenter une preuve, un raisonnement? Est-ce que je veux leur montrer qu'en faisant telle ou telle opération, on vérifie les contenus de science que je vais leur enseigner tantôt? Faire tout ça, c'est déjà beaucoup. Personnellement, je me suis rendu compte que la démonstration était probablement un des meilleurs véhicules pour amener mes étudiants à se remettre en question. Non pas à questionner ce que je leur disais, mais à se remettre eux-mêmes en question.

### **Une mise en scène d'idées**

Une chose que j'ai trouvée extrêmement riche pour engager mes étudiants à me suivre dans les démonstrations que je préparais, c'était tout l'aspect de « mise en scène ». Mais pour moi, la mise en scène ce n'est pas d'abord un « spectacle », c'est une mise en scène d'idées. Il me fallait identifier les idées qui allaient porter ma présentation et qui allaient amener mes étudiants à se remettre en question et, dans certains cas, à accepter sans comprendre ce que je vais leur dire. Lorsque l'on enseigne, cette posture n'est pas des plus agréable, mais elle est parfois nécessaire pour un moment. En science, ce n'est pas l'acte de foi, mais le raisonnement, l'explication, la vérification qui ont de la valeur. Par contre, il y a des phases par lesquelles ils doivent passer qui exigent de faire confiance au professeur et cette confiance, on doit la mériter. J'ai compris une des forces de la démonstration : elle permet de mettre en scène des idées qui ne relèvent pas simplement d'une quelconque autorité que je pourrais avoir comme enseignant. Pourquoi mes élèves croiraient-ils ce que je leur présente ? Cela ne peut pas simplement reposer sur le fait que c'est l'enseignant qui parle. En fait, il ne faut pas que cela repose sur mon autorité d'enseignant. De mon point de vue, il faut que ça repose sur la démarche des personnes qui ont développé ces idées scientifiques : ces personnes sont beaucoup plus crédibles. Cela peut aussi reposer sur le fait que ceux qui ont vu la démonstration ont vu ce qu'ils ont vu – quoique souvent, ce n'est pas suffisant de voir un phénomène pour le comprendre. Par contre, la démonstration fait en sorte que ceux qui assistent ne peuvent nier qu'ils ont vu ce qu'ils ont vu. Ensuite, c'est en analysant ce qu'ils ont observé ou détecté, en cherchant à voir les concepts à travers l'expérience présentée qu'il peut y avoir un apprentissage des sciences. C'est ce que j'appelle : « chercher à faire correspondre le monde construit avec le monde sensible ». Il y a une sorte de confrontation entre ce que je perçois et ce que sais, ce que j'imagine, ou ce que je comprends.

Ce que je trouve important, ce sont les idées : c'est cela la matière première. Les montages et tout le matériel que j'amène à l'avant sont avant tout un véhicule pour les idées. D'ailleurs, j'ai conçu le matériel, parce que je trouvais qu'il exploitait bien les idées que je voulais présenter. Il y a donc toute une gamme d'éléments que tu dois mettre ensemble pour que la démonstration fonctionne. Ce n'est jamais simplement d'arriver avec son matériel et de faire sa prestation.

## **Adhérer à la proposition des sciences**

Les premières fois que tu prépares une démonstration, tu ne veux pas arriver en avant de ta classe et rater ton coup. Je me suis rendu compte que cette attitude n'était pas la bonne. En fait, quand une démonstration ne fonctionne pas, tu exposes alors une erreur que toute la classe vient de voir apparaître. Quand on enseigne, on vise des tonnes de cibles : on voudrait que nos étudiants comprennent, par exemple, telle ou telle équation; qu'ils maîtrisent tel ou tel concept. En réalité ces notions sont bien souvent des idées qui n'ont pas été faciles à mettre au monde et qui exigent de la part de quiconque désire les acquérir ou les maîtriser une bonne part de travail et de réflexion. Juste le concept de masse, le concept d'accélération, de force : ce sont des idées qui ont demandé des millénaires à développer. Comment peut-on penser pouvoir guider nos étudiants pour qu'ils y arrivent en dix minutes de présentation?

Je me disais : « qu'est-ce que je peux leur dire d'une démonstration – par exemple – sur la force, la masse et l'accélération, qui recouvre en grande partie ce qu'ils ne peuvent probablement pas comprendre sur-le-champ, mais qu'on va leur demander d'accepter. Ça ne peut pas être juste parce que c'est moi, le professeur, qui l'affirme ! » Quelque part, tu as l'impression que la démonstration va rendre la chose évidente : quand ils vont voir que pour une même force, l'accélération a diminué si je double la masse, et bien, il y a des liens là ! Il y a un rapport de proportion dans cette démonstration. En réalité ce n'est pas plus évident pour ceux qui ne comprennent pas. Certains vont comprendre. Mais pour l'autre qui ne sait pourquoi la force est représentée ainsi, qui a du mal à se représenter ce qu'est la masse et qui se questionne sur la nature de l'inertie, tu peux faire la démonstration, mais ses questions ne sont pas nécessairement disparues : il ne sait toujours pas ce que c'est que l'inertie ! Il voit bien que ça marche et que l'expérience le confirme. Mais l'idée de force et le concept de force, ce n'est pas pareil et il est souvent difficile de remplacer une idée par un concept.

Je me suis rendu compte que, sur le plan de l'enseignement, exposer mes étudiants à des démonstrations, à quelque chose qui ne donne pas toujours ce que tu veux, ça permettait d'aborder une multitude de sujets, que ce soit du contenu de science, que ce soit sur l'attitude, sur les aptitudes, sur les émotions qui, parfois, sont générées. En préparant les démonstrations, je le vivais personnellement. Je me suis donc dit qu'il fallait absolument que j'exploite ce filon parce que c'était probablement aussi ce qui leur arriverait lors de la présentation. En d'autres termes, probablement qu'eux non plus ne comprendront pas, même si mes explications sont, pour moi, limpides. Ce qui compte, en fait, c'est ce qui se passe dans leur tête.

Faire des démonstrations en classe c'est donc d'abord accepter que tu t'exposes. Il faut mettre en place un climat qui rende possible l'erreur, voire un climat qui la rende presque attrayante, parce que ce climat te permettra de revenir sur la mise en scène des idées. On peut alors se poser la question : « Je voulais que ça donne ça. Ça ne l'a pas donné, vous étiez-là : vous avez vu. Qu'est-ce qui s'est passé ? avez-vous compris, avez-vous une idée à me proposer? » Il faut donc penser à organiser les idées que je veux leur présenter pour qu'ils se remettent en question, pour qu'ils aient envie de se questionner et de remettre en question l'expérience, tout cela en ayant du plaisir à le faire.

Je dis toujours que je fais une démonstration « avec » mes élèves, pas « devant » eux. L'histoire que je raconte vise à les toucher sur le plan personnel plutôt que de présenter une histoire aseptisée. Il y a un doute, une écoute critique des élèves. Si la démonstration ne fonctionne pas, c'est moi, le professeur, qui ai fait l'erreur. Une démonstration, ce n'est pas simplement un résumé de la matière : c'est une interaction, un travail collectif où même l'erreur a sa place.

Dans les démonstrations que je monte, il y a aussi un aspect de défi. Souvent, lorsque la démonstration ne fonctionne pas comme je l'avais annoncé, je m'exclame en disant : « Bon, enfin! On va pouvoir travailler! » Le fait d'installer un climat qui permet l'erreur amène justement les élèves à se remettre en question. Il y a quelque chose du défi dans cette attitude.

## **Raconter une histoire, surprendre son auditoire**

Un autre aspect important de la démonstration, c'est de chercher à surprendre son auditoire. En fait, l'idée est simple : *il faut raconter des « histoires »*. Quand tu racontes des histoires, ton auditoire veut entendre la suite, surtout s'ils sont surpris par l'histoire : la surprise c'est quelque chose de puissant dans une présentation parce qu'un auditoire surpris c'est un auditoire qui attendait quelque chose et qui ne l'a pas. La surprise amène l'auditoire à remettre en question sa propre manière de raconter ce qui se passe. En science, il y a plein d'évènements et de phénomènes surprenants, ce qui fait qu'il est assez facile d'être un bon conteur.

## **Une vraie occasion**

Je veux que les démonstrations scientifiques que je monte fonctionnent, ça va de soi. Par contre, je sais très bien que si ça ne fonctionne pas comme je voulais, je vais pouvoir faire tout un tas d'autres choses, que j'aurai de toute façon à faire, que je n'avais peut-être pas prévu de faire à ce moment-là, mais étant donné qu'une vraie occasion se présente, je peux l'exploiter et lui donner du sens.

Des fois, on dirait que je m'arrange pour que ça ne marche pas. En fait, je ne fais pas tout ce qu'il est possible de faire pour que ça fonctionne. Que la démonstration fonctionne ou pas, l'important c'est que ce qui est présenté soit authentique et pertinent : il y a quelque chose qui se produit pour de vrai. Et je vais exploiter ça. Mais pour être capable de le faire, il faut avoir une vision assez nette du sens et de la portée des idées que tu veux mettre en scène et que tu aies une certaine maîtrise de ton contenu.

*Pour moi, la quête scientifique c'est, face à ce que l'on ne comprend pas, de chercher à le comprendre sans avoir, a priori, les outils intellectuels ou matériels pour savoir comment s'y prendre pour comprendre. Monter des démonstrations de cette nature-là implique d'être à l'aise avec le fait qu'elles ne fonctionnent pas toujours comme tu le veux. Si on veut amener nos élèves à avoir cette attitude intellectuelle, on ne peut pas juste leur dire : « Vous savez, c'est rationnel. Si vous faites un effort et si vous faites des expériences, vous allez comprendre. » Pour moi, le recours à l'histoire des connaissances est ma principale stratégie pour présenter ainsi les sciences.*

## Genèse des idées

C'est pour cette raison que je développe souvent une autre perspective : je mets en situation en soulignant qu'à telle époque, quand on regardait tel phénomène, ce que l'on voyait ce n'était pas du tout ce que la science permet de voir maintenant. Or, c'est un peu ce qui se passe dans une classe : souvent, nos élèves ne connaissent pas tel ou tel concept scientifique. Ce n'est donc pas surprenant qu'ils ne voient pas ce que je voudrais qu'ils voient dans la démonstration. En fait, quand tu lis sur l'histoire des connaissances, comment untel a pensé ses affaires, tu te rends compte que c'est le même genre de questions qu'un étudiant qui n'est pas au courant du sujet se poserait. Cette perspective a plusieurs avantages. En général, ça me permettait d'avoir une idée de la manière dont une personne peut expliquer un phénomène avant d'être mise en contact avec une explication scientifique. C'est un peu comme savoir à l'avance à quelle difficulté je m'expose en leur présentant certaines idées de sciences, mais en sachant aussi comment les gens ont résolu le problème. Prenons, par exemple, la mesure de la température. C'est facile : tu prends un thermomètre, tu mets ça dans l'eau et tu lis. Mais quand on y pense du point de vue de l'histoire de la connaissance, comment parle-t-on de la température avant d'avoir ces outils? C'est quoi « zéro »? Dans l'eau glacée? Sur des glaçons ? Dans la zone où le glaçon fond? Toutes ces questions, il a fallu y répondre. Il y a des livres extraordinaires qui ont été écrits là-dessus. D'ailleurs, ce sont des livres qui sont difficiles à lire parce qu'il faut adopter la perspective de l'époque.

Mais il y a une autre difficulté, bien scientifique celle-là : tu veux mesurer une température et pour la mesurer, ça te prend un étalon de mesure qui dépend de la température... C'est circulaire : difficile de s'en sortir ! Être capable de raconter ces histoires-là devant une classe rend crédible l'histoire que tu racontes, mais surtout ça présente un contexte et des attitudes qui ont joué dans l'élaboration d'un concept. Les élèves vont accepter l'acte de foi que tu leur demandes, parce qu'ils savent qu'éventuellement on va compléter ensemble l'histoire que tu es en train de raconter. Pour cela, lire sur l'histoire d'une notion scientifique est porteur : étonnamment, ça révèle beaucoup de choses sur ta propre ignorance. Ça fait partie de la démarche : en science, la connaissance s'est construite sur la somme des erreurs commises. Personne ne tombe sur la réponse en partant. Si tu refuses l'erreur, ou que tu présentes l'erreur comme ce qui doit être éliminé, cela revient à dire : « Vous allez être confronté à une vie d'erreurs, mais il ne faudrait pas. En science, tout ce qui nous importe, c'est la réussite ». En science, la réussite vient après avoir éliminé tout ce qui ne marchait pas. Savoir que quelque chose ne fonctionne pas du point de vue de la science, c'est déjà savoir quelque chose d'important. Il m'est arrivé souvent de dire à des élèves qui tentaient une réponse : « Vous êtes des gens généreux, vous avez offert à tout le groupe une mauvaise réponse. » Je pouvais alors interpellier le groupe : « Qu'est-ce que vous avez à dire maintenant ? Vous ne pouvez pas dire la même chose, vous savez que c'est faux. Avez-vous une meilleure idée? » *La mise en scène d'idée ne fonctionne pas si la seule ligne dans l'histoire que tu racontes c'est : « Voici la vérité ! »*

Il arrive que mes étudiants - comme nous tous d'ailleurs - sachent des choses sans les comprendre. Par exemple, l'eau qui arrête à de réchauffer à 100°C est un bon exemple. Lorsque tu continues de chauffer un bécher d'eau à 100°C, la température, elle, ne monte plus. Je dis alors à mes étudiants : « si vous n'êtes plus étonné de ça, c'est que vous ne comprenez pas. » C'est un fait, on le sait, l'eau bout à 100°C. Mais on se retrouve quand même devant une situation surprenante : je chauffe encore, mais l'eau ne réchauffe plus. Mes étudiants répondent habituellement : « Oui, mais elle

s'évapore! » Je les relance alors : « D'accord, mais pourquoi? L'eau s'évapore, mais la température, elle : qu'est-ce qui se passe ? » En fait, ça montre qu'il y a encore des liens qu'ils doivent faire : *dans ce temps-là, je dis qu'ils ne comprennent pas ce qu'ils savent*. La démonstration permet de mettre en scène ces liens, mais c'est tout un effort, tout un travail. On peut savoir plein de choses, mais il arrive qu'on ne les comprenne pas ! Par contre, quand je rentre dans la classe, je veux amener mes étudiants à faire un exercice : être animé par le désir de comprendre. Et c'est un désir exigeant. Parce que même en faisant tous les efforts possibles, il se peut, malgré tout, qu'on ne comprenne jamais. L'histoire rend ça possible : en science, l'histoire est pleine de gens qui ont consacré toute leur vie à la recherche d'une compréhension, mais tout ce qu'ils ont trouvé s'est révélé être faux. Par contre, la génération suivante, sachant que ça ne marchait pas - ou malgré le fait que certains pensaient que c'était vrai - ont exploré d'autres avenues et trouvé des explications plus exactes. Lorsque tu mets en place une telle perspective qui prend en considération le développement des idées parfois sur des générations, ça permet d'ouvrir sur une dimension humaine qui vient nous chercher profondément. De mon point de vue, c'est aussi vrai pour n'importe quel type d'activités : ce n'est pas juste pour un cours de science. « Comprendre » relève plus de la gestation que de la révélation.

### **Faire appel aux souvenirs**

Un des buts de la démonstration est aussi de faire ressortir des aspects du montage qui ne faisait pas partie, à la base, de ce que tu voulais montrer. Quand je prépare une démonstration, je fais souvent plusieurs prototypes avant d'obtenir le résultat que je souhaite. Dans la démonstration, je peux choisir de me servir de plusieurs de ces prototypes pour pouvoir raconter l'histoire que je crois la plus pertinente parce que, en travaillant sur ces prototypes, j'ai résolu énormément de problèmes qui ne sont pas apparents dans le prototype final. Des fois, on parle de semaines de travail pour tout solutionner. De la même manière, comprendre une idée complexe, ça peut prendre des années. Une idée mûre à la condition que tu la travailles. Pourquoi Galilée a-t-il vu un marqueur de temps sur la lampe qui se balançait ? Parce qu'il se cassait la tête sur un marqueur de temps : il cherchait des marqueurs de temps! Alors que la majorité des personnes voit simplement quelque chose qui se balance, pour lui, le pendule est devenu une horloge. C'est un peu comme les enfants qui vont à la balançoire, ils ne se disent pas : « je suis en train de marquer le temps! » Par contre, si on s'y arrête, intuitivement, on le sait qu'on marque le temps, on le sent qu'il y a une périodicité dans ce qu'il se passe. La plupart du temps, ce n'est pas conceptualisé. Toutefois, se balancer, vivre cette expérience du « swing », des forces qui agissent, de l'accélération, du mouvement, l'enfant l'éprouve, le ressent physiquement. C'est pour cette raison que lorsque tu parles de mesure de temps ou de pendule, tu peux amener tes élèves à retourner dans leurs souvenirs, à cette expérience que nous avons tous vécue enfant : celle d'être sur une balançoire. Je l'ai souvent expérimenté : étonnamment, si tu fais le mouvement devant eux, ils le ressentent. Le corps le sent. Le souvenir de la sensation se manifeste. Souvent même, ils me suivaient en se balançant. On peut alors faire appel au souvenir : « Rappelez-vous qu'est-ce que vous ressentiez quand vous étiez au point le plus bas : tu te sens écrasé, tu vas vite, tes cheveux sont en arrière... le mouvement continue : quand tu arrives en haut, ça s'arrête, tu te sens léger. » On le sent ça. On peut exploiter ça et revisiter ces souvenirs, on peut exploiter l'émotion de la connaissance, l'émotion des événements pour y placer les idées de science.

## **Travailler avec les émotions**

Des présentations comme celles dont je te parle, ça génère beaucoup d'émotions. À ce moment-là, les élèves ne sont pas d'abord dans le rationnel : tu racontes une histoire et cette histoire-là a du sens. Comme quelqu'un qui vient de compter l'histoire de son voyage. Je pense qu'une bonne porte d'entrée pour la démonstration, c'est de générer des émotions.

Dans ma classe, c'est ce que j'essayais de faire vivre. Lorsque je fais mes conférences-démonstration, c'est ce que j'ai en tête. C'est aussi pour cette raison que je reste très attentif aux réactions de ceux qui assistent à la démonstration : c'est important pour moi de voir la réaction des étudiants. Je ne cherche pas tant à faire des démonstrations de type : « voici la démonstration sur le principe d'Archimède. » Le but d'une démonstration ce n'est pas de régler la question. Très souvent, je vais l'aborder avec toutes les conceptions erronées que j'ai pu voir et qui sont, pour la plupart, vraiment surprenantes dans l'évolution historique des concepts présentés en classe. Souvent, d'ailleurs, je vais le présenter comme on le croyait à l'époque, avant de le comprendre. Donc je présente certaines « fausses idées », sur le plan de la science, mais des idées qui sont souvent « justes » sur le plan de l'intuition. Intuitivement, c'est comme ça que les gens le voient.

C'est une approche qu'on pourrait me reprocher sur le plan de l'enseignement : on peut penser qu'il ne faut pas faire ça, parce qu'après il faut déconstruire, mais, en fait, c'est souvent déjà ce qu'ils pensent. Quand j'affirme la version connue, même si je la montre et je la fais travailler, c'est extrêmement difficile d'aller contre une idée qui semble fonctionner pour quelqu'un, même si ça ne tient pas la route sur le plan de la science. L'expérience de toute ta vie confirme que ça marche, mais l'enseignant vient dire : « Non, ce n'est pas ça ! » Pour moi, la démonstration joue là-dessus et nous permet de confronter plusieurs idées.

## **Un « obstacle intelligent »**

S'engager dans la démonstration demande un effort. Des fois, je me disais : « je dois être un obstacle intelligent », c'est-à-dire que je vais présenter à mes étudiants certaines difficultés que j'ai rencontrées, que l'humanité a rencontrées. À ce moment-là, ce n'est plus l'enseignant qui parle. En quelque sorte, je mets en scène la quête que l'humanité a menée pour la compréhension du monde. À ce moment-là, en classe, l'interlocuteur pour mes élèves, ce n'est plus moi, c'est cette quête. La démonstration, c'est aussi cela : une difficulté d'entraînement, un moment pour développer des réflexes.

Tous les aspects de la mise en scène ont une dimension « spectaculaire ». C'est vraiment un « spectacle » que tu organises, mais le spectacle ne vise pas à « satisfaire » ou faire rire les étudiants. Je me sers des éléments du spectacle pour leur donner à réfléchir sur certains aspects de ce qui vient de se passer.

Pour moi, une démonstration bien faite est celle qui fait que l'idée qui a été mise en scène laisse une trace, qu'elle dérange, qu'elle intrigue, qu'elle explique. Une démonstration bien faite va probablement réussir à toucher tout le monde d'une façon ou d'une autre.

Dans mes démonstrations, c'était un peu pareil. Quand je voyais que j'avais obtenu l'effet voulu, je ne cherchais pas alors à tout expliquer : je laissais beaucoup de place au non-dit parce que je crois que les questions auxquelles on s'intéresse, très souvent, ne sont jamais complètement « réglées » même quand on pense qu'on les a bien comprises. Il reste toujours des zones d'ombres. Même si dans ma présentation, je peux cerner le problème, le conclure et l'encapsuler, je laisse souvent une porte ouverte sur d'autres questions. D'ailleurs, je les mets toujours devant ce fait : ce que je veux, c'est que mes étudiants sortent de la classe avec plus de questions que lorsqu'ils sont entrés, et pas nécessairement avec plus de réponses. Je sais que c'est souvent « frustrant » de ne pas savoir, mais ce que je veux susciter, c'est une « frustration positive », celle qui vous amène à vous mobiliser. Pour mes élèves, il y a souvent un intérêt par obligation : il faut passer le cours. Mais si le sujet te dérange un peu, ou t'intrigue, es-tu prêt toi à aller fouiller et à y réfléchir un peu plus ? Ils aiment être défiés quand on s'y prend bien. Et la démonstration s'y prête bien.

## **Conclusion**

Lorsque mes étudiants se prennent au jeu de la démonstration, ils embarquent parce que le travail qu'ils ont devant eux, ce n'est pas seulement de mémoriser une formule, ce n'est pas simplement d'être capable de la recracher à l'examen. Non. Ils s'engagent afin de mettre en place une idée dans leur tête pour qu'ils puissent la porter. Je pense que la démonstration, si on la présente comme ça, si on présente ce livre-là, c'est pour cette raison : dans cette perspective, la démonstration vise à capter l'imagination des élèves, à se servir de leurs souvenirs, de leur attention, de leurs aptitudes pour les exposer à des idées auxquelles ils ne sont pas habitués. Ce n'est pas simplement un « mode d'emploi de la démonstration ». La démonstration, comme je la conçois, ce n'est jamais du « clé en main ». La démonstration, ce n'est pas « résoudre le problème pour passer à autre chose ».

Le questionnement qu'on peut générer par les démonstrations est un révélateur de préconceptions voire de préjugés qui font partie des obstacles à l'apprentissage des sciences. Le recours à l'Histoire pour faire prendre conscience de l'universalité de la quête de savoir est un levier puissant dont on ne doit pas se priver. Mais c'est surtout un révélateur de tout un spectre d'attitudes. Entre la modestie et l'arrogance en passant par la détermination : accepter que les choses ne se passent pas comme on le voudrait sans jamais douter qu'on soit capable de parvenir à nos fins en y mettant les efforts possibles.

# Crédits photographiques

## CHAPITRE 1

- 1.1 Crédit photo de l'utilisateur : Fæ. Plus de détails sur Wikipédia. Optics, the principle of the *camera obscura*. Engraving. V0025358. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Optics;\\_the\\_principle\\_of\\_the\\_camera\\_obscura.\\_Engraving.\\_Wellcome\\_V0025358.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Optics;_the_principle_of_the_camera_obscura._Engraving._Wellcome_V0025358.jpg) p.5
- 1.2 Œuvre de : Raphael Sanzio da Urbino. Crédit photo de l'utilisateur : Paul012. QS : P195, Q5597. Plus de détails sur Wikipédia. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:"The\\_School\\_of\\_Athens" by Raffaello ùSanzio da Urbino.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:) p.6
- 1.3 A. Ganot, 1859, p. 391, <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k205797p/f394.image.r=Ganot.%20A> p.7
- 1.4 Reinerus Gemma-Frisius, Tiré de « De Radio astronomica et geometrico », 1545, page 31, <http://precinemahistory.net/1400.htm> p.7
- 1.5 The History of Science Collections of the University of Oklahoma Libraries (Ouhos) Exif Version : 0210 <https://www.flickr.com/photos/111589357@N08/11409856983/in/photostream/> p.8
- 1.6 Bibliothèque de l'Institut de France, René-Gabriel Ojéda. <http://www.universalleonardo.org/work.php?id=50> p.9
- 1.7 Tiré de : Descartes, R. (1658). Discours de la méthode pour bien conduire sa raison chercher la vérité dans les sciences (p.116). Paris, France : Le Gras. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b21000448/f57.item.r=Descartes+Les+météores.langEN> p.9
- 1.8 Pinacothèque vaticane (Vatican Museums). <http://www.museivaticani.va/content/museivaticani/en/collezioni/musei/> p.10
- 1.9 Crédit photo de l'utilisateur : Sailko creator. Plus de détails sur Wikipédia. [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2f/Gentile\\_da\\_fabriano%2C\\_madonna\\_in\\_trono\\_col\\_bambino%2C\\_i\\_ss.\\_nicola\\_e\\_caterina\\_e\\_due\\_committenti%2C\\_1395-1400\\_ca.\\_01.JPG](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2f/Gentile_da_fabriano%2C_madonna_in_trono_col_bambino%2C_i_ss._nicola_e_caterina_e_due_committenti%2C_1395-1400_ca._01.JPG) p.10
- 1.10 Brosse, A. (1648). Manière universelle de Mr Desargues pour pratiquer la perspective (p.60). Paris, France : De l'imprimerie de Pierre Des-hayes. [http://www.mathouriste.eu/Quatuor\\_Sorbonne/Desargues/Persp\\_4.JPG](http://www.mathouriste.eu/Quatuor_Sorbonne/Desargues/Persp_4.JPG) p.11
- 1.11 D'Alembert, J et Diderot, D. (1751). Encyclopédie ou dictionnaire raisonné des sciences, des Arts et des métiers (p.143). Paris, France. Crédit photo de l'utilisateur : Maksim. Plus de détails sur Wikipédia. [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9f/Camera\\_obscura.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9f/Camera_obscura.jpg) p.11
- 1.12 Crédit photo de l'utilisateur : Xocoyote. Plus de détails sur Wikipédia. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Opticks.jpg> p.12
- 1.13 Schéma de Newton, *experimentum crucis*, (non publié en 1672). En ligne : [http://steph923.free.fr/newton/img\\_prisme.htm](http://steph923.free.fr/newton/img_prisme.htm) p.13
- 1.14 I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015. p.15
- 1.15 I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015. p.15
- 1.16 I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015. p.16
- 1.17 I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015. p.16

1.18	I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSF), 2015.	p.16
1.19	I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSF), 2015.	p.17
1.20	I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSF), 2015.	p.17
1.21	I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSF), 2015.	p.17
1.22	I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSF), 2015.	p.19
1.23	I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSF), 2015.	p.19
1.24	I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSF), 2015.	p.20
1.25	I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSF), 2015.	p.20
1.26	Crédit de la part de l'utilisateur : Dpbsmith. Plus de détails sur Wikipédia. <a href="https://fr.wikipedia.org/wiki/Chambre_claire#/media/File:Cameralucida01.jpg">https://fr.wikipedia.org/wiki/Chambre_claire#/media/File:Cameralucida01.jpg</a>	p.21
1.27	I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSF), 2015.	p.21
1.28	I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSF), 2015.	p.21
1.29	I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSF), 2015.	p.22
1.30	I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSF), 2015.	p.22
1.31	I. Arseneau, M. Riopel et M. Genest, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSF), 2015.	p.24
1.32	I. Arseneau, M. Riopel et M. Genest, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSF), 2015.	p.25
1.33	I. Arseneau, M. Riopel et M. Genest, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSF), 2015.	p.26
1.34	I. Arseneau, M. Riopel et M. Genest, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSF), 2015.	p.27

## CHAPITRE 2

2.1	Page 40 : <a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Blind_Willie_Johnson">https://en.wikipedia.org/wiki/Blind_Willie_Johnson</a>	p.29
2.2	Crédit photo de NASA Center : Jet Propulsion Laboratory. Center Number : p24652a GRIN DataBase Number : GPN- 2000-001976 <a href="https://web.archive.org/web/20041101160119/http://dayton.hq.nasa.gov/IMAGES/LARGE/GPN-2000-001976.jpg">https://web.archive.org/web/20041101160119/http://dayton.hq.nasa.gov/IMAGES/LARGE/GPN-2000-001976.jpg</a>	p.29
2.3	Crédit photo Comunale Altivole (Comune di Altivole). <a href="https://bibliotecaltivole.it/index.php?option=com_content&amp;view=article&amp;id=176&amp;Itemid=1625&amp;lang=en">https://bibliotecaltivole.it/index.php?option=com_content&amp;view=article&amp;id=176&amp;Itemid=1625&amp;lang=en</a>	p.31
2.4	Fludd, R. (1617). <i>Utriusque cosmi majoris scilicet et minoris metaphysica, physica atque technica historia</i> . Oppenheim, J. T. De Bry, H. Galleri, 1617-1624, I, 1, Livre III, Chap. 3, p. 90.	p.31
2.5	Gaffurius, F. (1492). <i>Theorica musicae</i> . Milan, Italie : Philippium Mantegatium. Démonstration de la légende de la découverte des proportions musicales, de Tubal à Pythagore.	p.33
2.6	Crédit photo de Kogo, Bibliothek allgemeinen und praktischen Wissens für Militäranwärter Band III, 1905 / Deutsches Verlaghaus Bong Co. <a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Monochord#/media/File:Monochord3.png">https://en.wikipedia.org/wiki/Monochord#/media/File:Monochord3.png</a>	p.34

- 2.7 Crédit photo de Wellcome library. Numéro : L0015994. p.35  
<https://wellcomecollection.org/works?query=L0015994&wellcomeImagesUrl=/indexplus/image/%0BL0015994.html> Tiré du livre : Kircher, A. (1650). Musurgia universalis, sive Ars magna consoni et dissoni in X. libros digesta (vol 2). Rome, Italie : Heirs of Franciscus Corbellet ; L. Grignani.
- 2.8 Johannes Kepler, Harmonie du monde, 1619. Crédit photo : Bibliothèque publique de New York / Science Source. SS2494498, BT8527. p.35  
<https://www.sciencesource.com/archive/Johannes-Kepler--Harmony-of-the-World--1619-SS2494498.html>
- 2.9 Crédit photo de Florenco. p.36  
[https://fr.wikiversity.org/wiki/Données\\_de\\_physique\\_utilisées\\_%0Ben\\_biologie/Lumière#/media/File:Dispersion\\_prism.jpg](https://fr.wikiversity.org/wiki/Données_de_physique_utilisées_%0Ben_biologie/Lumière#/media/File:Dispersion_prism.jpg)
- 2.10 I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015. p.37
- 2.11 I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015. p.37
- 2.12 I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015. p.38
- 2.13 Crédit photo Internet Archive. Tiré du livre : Avery, E. M. (1895). School physics, a new text- book for high schools and academies. New York, États-Unis : Sheldon and company. p40  
Page 238, figure 176. <https://archive.org/stream/schoolphysican00avergoog#page/n242/mode/2up>
- 2.14 Tiré du livre : Stone, W. H. (1879). Elementary lessons on sound. Londres. Angleterre : Macmillan and co. p.41  
[https://books.google.ca/books?id=B\\_s4AAAAMAAJ&pg=PA25#v=onepage&q&f=false](https://books.google.ca/books?id=B_s4AAAAMAAJ&pg=PA25#v=onepage&q&f=false)
- 2.15 Crédit photo Aphelis. Tiré du livre : Chladni, E. (1802). Die Akustik. Wiesbaden, Allemagne : Breitkopf und Härtel. p.41  
<https://aphelis.net/representing-sound/>
- 2.16 Crédit photo de la part de l'utilisateur : Vanished user fijtji34toksdcknqrjn54yoimascj. p.42  
Plus de détails sur Wikipédia. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Germain.jpeg>  
Inspiré de la pièce de monnaie : Ph. Coll. Archives Larbor  
[http://www.larousse.fr/encyclopedie/images/Sophie\\_Germain/1004195](http://www.larousse.fr/encyclopedie/images/Sophie_Germain/1004195)
- 2.17 Crédit photo de la part de l'utilisateur : Mrspokito. Plus de détails sur Wikipédia. p.43  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Chladni.jpg>
- 2.18 Crédit photo de la part de l'utilisateur : WikiWilli. Plus de détails sur Wikipédia. p.43  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Resonance\\_soundboard\\_harpsichord\\_clavecin.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Resonance_soundboard_harpsichord_clavecin.jpg)
- 2.19 I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015. p.44
- 2.20 I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015. p.44
- 2.21 I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015. p.44
- 2.22 I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015. p.45
- 2.23 Auteur inconnu, probablement un employé de B. Franklin. Crédit photo de la part de l'utilisateur : SunCreator. Plus de détails sur Wikipédia. p.48  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Glassharmonica.png>
- 2.24 I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015. p.49

2.25	I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015.	p.50
2.26	I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015.	p.50
2.27	Crédit photo de Mathieu Riopel, 2015.	p.51
2.28	I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015.	p.52
2.29	I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015.	p.52
2.30	I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015.	p.52
2.31	I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015.	p.53
2.32	I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015.	p.53
2.33	I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015.	p.53
2.34	I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015.	p.54
2.35	I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015.	p.55
2.36	Scheppegregell, W. M. (1903). Voice, song and speech. <i>Popular science monthly</i> , 64, 262-273. <a href="https://archive.org/details/popularsciencemon64newy/page/264">https://archive.org/details/popularsciencemon64newy/page/264</a> Aussi disponible sur Wikipédia, crédit photo de la part de l'utilisateur : Ineuw. <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PSM_V64_D268_Vocal_cords_in_position_for_speaking_or_singing.png">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PSM_V64_D268_Vocal_cords_in_position_for_speaking_or_singing.png</a>	p.55
2.37	I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015.	p.55
2.38	Crédit photo de la part de l'utilisateur : Libertad y Saber. Plus de détails sur Wikipédia. <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:MusicalBow.gif">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:MusicalBow.gif</a>	p.58
2.39	Peinture de l'artiste : Shri Vitthal Das Rathore. Crédit photo de Exotic India <a href="https://www.exoticindiaart.com/product/paintings/arjuna-kills-jayadratha-from-mahabharata-WD95/">https://www.exoticindiaart.com/product/paintings/arjuna-kills-jayadratha-from-mahabharata-WD95/</a>	p.58
2.40	I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015.	p.59
2.41	I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015.	p.61
2.42	Photographe : Peter Trimming, publié sur Flickr. <a href="https://www.flickr.com/photos/peter-trimming/5973600724/">https://www.flickr.com/photos/peter-trimming/5973600724/</a>	p.63
2.43	Crédit photo du Cold War Air Museum. <a href="http://blog.cwam.org/2011/03/before-radar.html">http://blog.cwam.org/2011/03/before-radar.html</a>	p.63
2.44	Photographe : Eisenhardt, 1939. Bild 183-E12007. Crédit photo de la part de l'utilisateur : Common Good. Plus de détails sur Wikipédia. <a href="https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Bundesarchiv_Bild_183-E12007_Horchger%C3%A4t_der_Flak_bei_Berlin.jpg">https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Bundesarchiv_Bild_183-E12007_Horchger%C3%A4t_der_Flak_bei_Berlin.jpg</a>	p.63

2.45	I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015.	p.64
2.46	I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015.	p.64
2.47	I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015.	p.65
2.48	I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015.	p.66
2.49	Crédit photo de la part de l'utilisateur : Cherkash. Plus de détails sur Wikipédia. <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Anatomy_of_the_Human_Ear.svg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Anatomy_of_the_Human_Ear.svg</a>	p.67
2.50	I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015.	p.67
2.51	Crédit photo de la part de l'utilisateur : Welleschik. Plus de détails sur Wikipédia. <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stapes_human_ear.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stapes_human_ear.jpg</a>	p.68
2.52	I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015.	p.69
2.53	I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015.	p.70
2.54	Crédit photo de la part de l'utilisateur : Pierre5018. Plus de détails sur Wikipédia. <a href="https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Fichier:Eole_Cap-Chat.jpg">https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Fichier:Eole_Cap-Chat.jpg</a>	p.71
2.55	Crédit photo de la part de l'utilisateur : Bibi Saint-Pol. Plus de détails sur Wikipédia. <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Music_lesson_Staatliche_Antikensammlungen_2421.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Music_lesson_Staatliche_Antikensammlungen_2421.jpg</a>	p.73
2.56	Crédit photo de la part de l'utilisateur : Fibonacci. Plus de détails sur Wikipédia. <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mond-vergleich.svg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mond-vergleich.svg</a>	p.74
2.57	Crédit photo de la part de l'utilisateur : Sakurambo. Plus de détails sur Wikipédia. <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Impossible_staircase.svg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Impossible_staircase.svg</a>	p.75
2.58	I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015.	p.76
2.59	I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015.	p.77

### CHAPITRE 3

3.1	Crédit photo de la part de l'utilisateur : Markus Mueller. Plus de détails sur Wikipédia. <a href="https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Fichier:Justitia_Jost_Amman.png">https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Fichier:Justitia_Jost_Amman.png</a>	p.84
3.2	Crédit photo de la part de l'utilisateur : External Radiance. Plus de détails sur Wikipédia. <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Measure_and_Harvest005.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Measure_and_Harvest005.jpg</a> Guinness, A. E. (2012). Reader's Digest: Mysteries of the Bible: The Enduring Question of the Scriptures. Pleasantville, New York/Montreal : The Reader's Digest Association, Inc.1988. ISBN : 0-89577-293-0. Crédit photo de la part de l'utilisateur :	p.85
3.3	Crédit photo de la part de l'utilisateur : Phe. Plus de détails sur Wikipédia <a href="https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:CD006-Triangulation_16th_century.png">https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:CD006-Triangulation_16th_century.png</a>	p.86

- 3.4 Crédit photo et travail de la part de l'utilisateur : Clicgauche. Plus de détails sur Wikipédia p.87  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Jean-Baptiste\\_Joseph\\_Delambre#/media/File:Jean\\_Baptiste\\_Joseph\\_Delambre.png](https://fr.wikipedia.org/wiki/Jean-Baptiste_Joseph_Delambre#/media/File:Jean_Baptiste_Joseph_Delambre.png)  
 Image originale : Engraving of French astronomer Jean-Baptiste Joseph, Chevalier Delambre (1749-1822) by Julien Leopold Boilly (1796-1874).
- 3.5 Crédit photo et travail de la part de l'utilisateur : Grebenkov. Plus de détails sur Wikipédia. p.87  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pierre\\_mechain.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pierre_mechain.jpg)  
 Cambridge University Press. (2008), p.23. La peinture originale se trouve à la Bibliothèque de l'Observatoire de Paris.
- 3.6 Crédit photo et travail de la part de l'utilisateur : Thomas Clouet. Plus de détails sur Wikipédia. p.87  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Basilique\\_Saint-Denis#/media/File:Saint-Denis\\_-\\_Façade.jpg](https://fr.wikipedia.org/wiki/Basilique_Saint-Denis#/media/File:Saint-Denis_-_Façade.jpg)
- 3.7 Crédit photo : Les expositions virtuelles de l'Observatoire de Paris. p.88  
<http://expositions.obspm.fr/lumiere2005/images/d0000145.jpg>
- 3.8 Arago, F. (1856). Astronomie populaire. Paris, France : Gide et J. Baudry. Page : 261 p.88  
<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k6149102h/f268.image.texteImage>
- 3.9 Crédit photo de la NASA p.89  
<https://earthobservatory.nasa.gov/features/GRACE/page3.php>
- 3.10 Crédit photo de la part de l'utilisateur : Autiwa. Plus de détails sur Wikipédia. p.90  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gauss\\_reduite.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gauss_reduite.svg)
- 3.11 Méchain et Delambre. (1806). Du système métrique décimal, ou mesure de l'arc méridien compris entre les parallèles. Paris, France : Baudouin. p.91  
<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k110604s.texteImage>
- 3.12 Crédit photo et travail de la part de l'utilisateur : NYKevin. Plus de détails sur Wikipédia. p.91  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Metric\\_system\\_adoption\\_map.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Metric_system_adoption_map.svg)
- 3.13 Crédit photo de la part de l'utilisateur : LPLT. Plus de détails sur Wikipédia. p.92  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Mètre-étalon\\_Paris.JPG](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Mètre-étalon_Paris.JPG)
- 3.14 I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015. p.93
- 3.15 I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015. p.93
- 3.16 I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015. p.94
- 3.17 I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015. p.94
- 3.18 I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015. p.95
- 3.19 I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015. p.95
- 3.20 Crédit photo de Johnson Space Center, NASA Center, AS17-148-22727. p.98  
<https://web.archive.org/web/20160112123725/http://grin.hq.nasa.gov/ABSTRACTS/GPN-2000-001138.html>
- 3.21 Crédit photo de la part de l'utilisateur : Maksim. Plus de détails sur Wikipédia. p.98  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bibel-1.jpg>
- 3.22 Frans Hals : Portrait van René Descartes. André Hatala [e.a.] (1997) De eeuw van Rembrandt, Bruxelles. Crédit photo de la part de l'utilisateur : Maksim. Plus de détails sur Wikipédia. p.99  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/René\\_Descartes\\_-\\_media/File:Frans\\_Hals\\_-\\_Portret\\_van\\_René\\_Descartes.jpg](https://fr.wikipedia.org/wiki/René_Descartes_-_media/File:Frans_Hals_-_Portret_van_René_Descartes.jpg)

- 3.23 Étienne Jeurat. Illustration du livre : Le Mascrier. (1735). Description de l'Égypte. Paris, France : Quay des Augustins. Crédit photo de Livre Rare Book : [https://www.livre-rare-book.com/displayImage/CTE/004653\\_1.jpg](https://www.livre-rare-book.com/displayImage/CTE/004653_1.jpg) p.100
- 3.24 Crédit photo de la part de l'utilisateur : Pline. Plus de détails sur Wikipédia. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Forges\\_de\\_Buffon\\_DSC\\_0103.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Forges_de_Buffon_DSC_0103.JPG) p.100
- 3.25 Crédit photo et travail de la part de l'utilisateur : Michael C. Rygel. Plus de détails sur Wikipédia. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:An\\_example\\_of\\_hummocky\\_cross-stratification.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:An_example_of_hummocky_cross-stratification.jpg) p.101
- 3.26 Photographie : Messrs. Dickinson & Foster. <http://www.sil.si.edu/DigitalCollections/hst/scientific-identity/fullsize/SIL14-T002-07a.jpg> p.102
- 3.27 Darwin (1859). On the Origin of Species by Natural Sélection. Paris, France : Éditions Ligarán. Crédit photo et travail de la part de l'utilisateur : Grook Da Oger. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Arbre\\_phylogénétique#/media/File:Darwins\\_tree\\_of\\_life\\_1859.png](https://fr.wikipedia.org/wiki/Arbre_phylogénétique#/media/File:Darwins_tree_of_life_1859.png) p.103
- 3.28 Crédit photo de la part de l'utilisateur : Napy1kenobi. Plus de détails sur Wikipédia. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Table\\_isotopes.svg?uselang=fr](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Table_isotopes.svg?uselang=fr) p.104
- 3.29 I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015. p.106
- 3.30 I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015. p.106
- 3.31 Crédit photo de la part de l'utilisateur : Martinvl. Plus de détails sur Wikipédia. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NewtonDualPrismExperiment.jpg> p.110
- 3.32 Crédit photo de la part de l'utilisateur : Uflund. Plus de détails sur Wikipédia. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Crystal\\_on\\_graph\\_paper.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Crystal_on_graph_paper.jpg) p.111
- 3.33 Crédit photo de la part de l'utilisateur : Tholme. Plus de détails sur Wikipédia. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Augustin\\_Fresnel.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Augustin_Fresnel.jpg) p.112
- 3.34 I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015. p.112
- 3.35 Crédit photo de la part de l'utilisateur : P.wormer~commonswiki. Plus de détails sur Wikipédia. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic\\_wave.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic_wave.png) p.113
- 3.36 École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2015. Crédit photo de l'utilisateur Wjfox2005. Plus de détails sur Wikipédia. [https://ar.wikipedia.org/wiki/%D9%85%D9%84%D9%81:Light\\_imaged\\_as\\_both\\_a\\_particle\\_and\\_wave.jpg](https://ar.wikipedia.org/wiki/%D9%85%D9%84%D9%81:Light_imaged_as_both_a_particle_and_wave.jpg) p.115
- 3.37 I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015. p.116
- 3.38 I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015. p.116
- 3.39 I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015. p.116
- 3.40 I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015. p.117
- 3.41 I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015. p.117
- 3.42 I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015. p.118
- 3.43 I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015. p.118
- 3.44 Crédit photo de la part de l'utilisateur : Jeff Dahl. Plus de détails sur Wikipédia. [https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Fichier:X-ray\\_diffraction\\_pattern\\_3clpro.jpg](https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Fichier:X-ray_diffraction_pattern_3clpro.jpg) p.120

- 3.45 Crédit photo de Library of Congress, Encyclopedia Of world Biography. p.121  
<https://www.notablebiographies.com/Ni-Pe/Pauling-Linus.html>
- 3.46 © King's College London ; p.122  
*This image can not be reproduced or modified without the express permission of King's College London.*  
 © King's College London ;  
*Cette image ne peut être reproduite ou modifiée sans la permission écrite du King's College London.*
- 3.47 Crédit photo de la part de l'utilisateur : Dosto. Plus de détails sur Wikipédia. p.123  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:DNA\\_structure\\_and\\_bases\\_FR.svg](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:DNA_structure_and_bases_FR.svg)
- 3.48 I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015. p.124
- 3.49 I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015. p.125
- 3.50 I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015. p.125
- 3.51 I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015. p.125
- 3.52 Crédit photo de la part de l'utilisateur : Chetvorno. Plus de détails sur Wikipédia. p.128  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Galileo\\_Pendulum\\_Clock.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Galileo_Pendulum_Clock.jpg)
- 3.53 Crédit photo et travail de la part de l'utilisateur : George Ioannidis. Plus de détails sur Wikipédia p.129  
<https://www.i-programmer.info/news/167-javascript/7528-a-double-pendulum-in-100-lines-of-javascript.html>
- 3.54 Crédit photo de la part de l'utilisateur : D.328. Plus de détails sur Wikipédia. p.131  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lorenz\\_attractor\\_boxed.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lorenz_attractor_boxed.svg)
- 3.55 Crédit photo de la part de l'utilisateur : Koldunov. Plus de détails sur Wikipédia. p.131  
 Créer par NOAA, 2007. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:AtmosphericModelSchematic.png>
- 3.56 Grandjean, M. (2014). La connaissance est un réseau : Perspective sur l'organisation archivistique et encyclopédique. Les cahiers du numérique 10(3), 37-54. doi : 10.3166/LCN.10.3.37-54  
 Disponible sur Wikipédia, crédit photo de la part de l'utilisateur : Calvinus  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Social\\_Network\\_Analysis\\_Visualization.png](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Social_Network_Analysis_Visualization.png)
- 3.57 Crédit photo de la part de l'utilisateur : Wolfgang Beyer. Plus de détails sur Wikipédia. p.133  
[https://gl.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Mandel\\_zoom\\_11\\_satellite\\_double\\_spiral.jpg](https://gl.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Mandel_zoom_11_satellite_double_spiral.jpg)
- 3.58 Crédit photo de la part de l'utilisateur : David.Monnaux. Plus de détails sur Wikipédia. p.134  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fractal\\_Broccoli.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fractal_Broccoli.jpg)
- 3.59 Polyglotus, M. (2012). Mockingbird Tales : Readings in Animal Behavior. Figure 7. p.134  
[https://cnx.org/contents/Cp8sC4k\\_@5.1:ETfm5re9@3/Schooling-in-Fish](https://cnx.org/contents/Cp8sC4k_@5.1:ETfm5re9@3/Schooling-in-Fish)
- 3.60 I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015. p.135
- 3.61 I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015. p.135
- 3.62 I. Arseneau et M. Riopel, Centre de démonstration en sciences physiques (CDSP), 2015. p.135



