

## DIALOGUE ET RÉFUTATION

*Ce que je ne peux créer, je ne le comprends pas.*

L'une des devises du prix Nobel de physique Richard Feynman

Pour justifier la démarche pédagogique que nous préconisons aussi bien pour l'enseignement approfondi que pour la vulgarisation scientifique, commençons par un exemple édifiant.

### Le test du carton glissant sur un plan incliné

On présente à une classe de débutants en physique une expérience de pensée (donc qui n'est pas réalisée en laboratoire mais seulement imaginée).

Il s'agit d'un plan incliné parcouru à vitesse constante  $v$  par un carton.

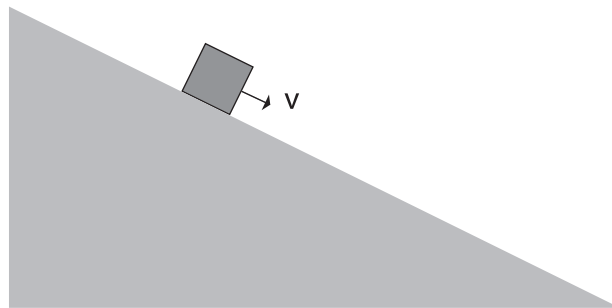


Figure 1. Un carton glissant sur un plan incliné.

## Le QCM sur le carton glissant

On demande ensuite aux élèves d'indiquer quelle est l'interprétation correcte du mouvement observé parmi une liste de possibilités, en cochant l'une des possibilités proposées via un QCM (question à choix multiples).

Pendant que le carton descend le long du plan (à vitesse constante) :

- La force qui pousse le carton vers le bas est plus grande que la force de friction qui le freine.
- La force qui pousse le carton vers le bas est plus faible que la force de friction qui le freine.
- La force qui pousse le carton vers le bas est égale à la force de friction qui le freine.
- Le poids du carton est plus grand que la force de friction qui le freine.
- Les forces ne jouent aucun rôle : le carton descend le long du plan car sa tendance naturelle est d'être au repos à la surface de la Terre.

La plupart des élèves débutants optent avec un bon degré de confiance pour la première possibilité. Au risque de tuer le suspense (nous reviendrons sur cet exemple plus loin), la réponse correcte est la troisième possibilité.

## Une exposition correcte : le livre et la table (les 4 forces)

L'étape suivante consiste à leur montrer une courte vidéo (une dizaine de minutes) qui leur expose la théorie de Newton avec ses trois lois célèbres, notamment la proportionnalité entre la résultante des forces et l'accélération.

Par ailleurs, le bref exposé inclut une vidéo montrant une personne déplaçant un livre avec sa main sur une table horizontale à vitesse constante. Les quatre forces en jeu sont visualisées :

- la force exercée par la main (parallèle à la table),
- la force exercée par la table (dirigée vers le haut),
- la force de friction de la table (parallèle à la table),
- la force de gravitation (orientée vers le bas).

## Nouveau test

Après la présentation de la vidéo, on demande aux élèves de confirmer ou non leur choix pour le mouvement du carton sur le plan incliné.

Le constat<sup>1</sup> surprenant est que la plupart des élèves maintiennent leur choix initial et déclarent même que leur confiance a augmenté !

## Pourquoi ce résultat paradoxal ?

Cette petite expérience montre la difficulté qu'il y a à contrecarrer l'idée fautive d'un élève lorsque celui-ci est persuadé de connaître déjà l'idée générale, ce qui entraîne un manque d'attention de sa part sur la solution correcte exposée. Les préconceptions tacites (qui n'ont pas été ouvertement critiquées) interfèrent de façon **destructive** avec la conception correcte présentée.

Autrement dit, l'enseignement habituel ne tient pas assez compte du fait que l'élève n'arrive pas en classe en étant ignorant mais au contraire confiant dans le savoir qui lui a été inculqué depuis sa plus jeune enfance.

## Une méthode efficace : la réfutation avec dialogue

Afin de faire prendre conscience à l'élève de ses idées fausses, on ne peut faire l'économie de la méthode dite de **réfutation** : celle-ci consiste à comparer les différentes thèses et à expliciter les erreurs de raisonnement en favorisant le dialogue.

Les idées fausses sont exposées en pleine lumière à l'aide d'expériences de pensée et leurs insuffisances en tant qu'alternatives sont expliquées clairement, avec les liens qui les rattachent éventuellement aux idées correctes. C'est à ce prix que l'on peut inculquer à l'élève les conceptions correctes. Il n'y a pas d'espoir réel d'y parvenir si on se limite à un point de vue unique présenté comme la norme. On ne doit pas hésiter à exposer les différentes interprétations possibles d'un effet physique et à montrer pourquoi l'on doit préférer celle-ci à celle-là.

L'**engagement créatif** de l'élève (à travers un dialogue constructif) est un préalable à un vrai investissement de sa part dans l'effort de compréhension nécessaire pour surmonter les idées fausses.

L'histoire de la physique apporte un éclairage précieux en évitant d'exposer les idées correctes comme des espèces de croyances gravées dans le marbre : par exemple la physique d'Aristote était loin d'être absurde mais elle s'est révélée être en conflit avec l'expérience (à laquelle elle n'accordait pas suffisamment d'importance) et ne décrit donc pas correctement le monde dans lequel nous vivons. Comprendre le cheminement de la pensée ayant conduit à nos meilleures théories physiques (à ce jour) est essentiel.

---

1. Cet exemple est détaillé dans l'excellent article de Derek A. Muller et Manjula D. Sharma, *Tackling Misconceptions in Introductory Physics Using Multimedia Presentations*, Symposium Presentation, UniServe Science Teaching and Learning Research Proceedings, 2007.

Nous choisissons donc pour ce livre la réfutation : une pédagogie simple qui favorise la discussion argumentée des explications possibles et permet d'explicitier sans détour les idées fausses en montrant pourquoi elles sont en contradiction avec les observations ou insatisfaisantes du point de vue logique.

## GW150914 : LE GAZOUILLIS DU SIÈCLE

L'événement extraordinaire connu sous le nom **GW150914** sera notre fil rouge tout au long des pages à venir.

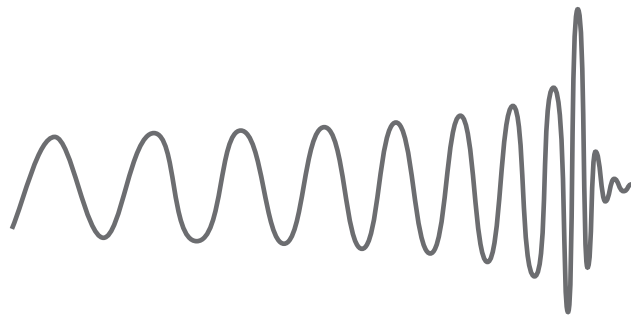
Il est passionnant à plus d'un titre. Tout d'abord décodons son nom.

GW est l'acronyme de *Gravitational Wave* (onde gravitationnelle) tandis que 150914 est une date qui doit se lire à l'envers (à l'anglo-saxonne), le 14 septembre 2015.

Que s'est-il donc passé le 14 septembre 2015 ?

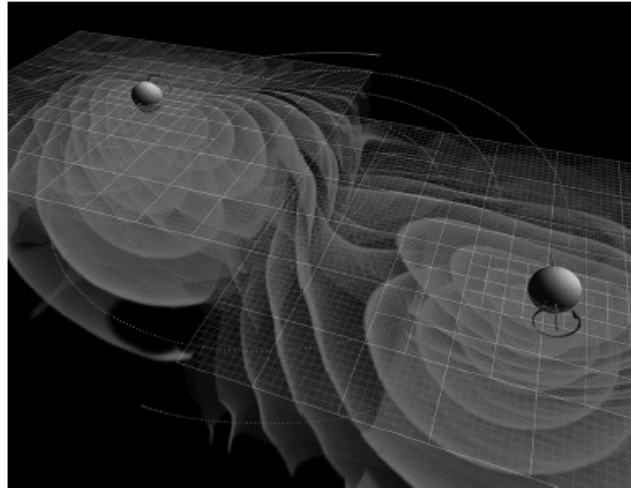
C'est une date vraiment historique puisque, sauf coup de théâtre improbable, l'espèce humaine, ce jour-là, durant une fraction de seconde, a enregistré pour la toute première fois le passage d'une onde gravitationnelle, dont la source est la fusion (ou coalescence) de deux trous noirs stellaires très éloignés de notre planète.

Cet événement est très riche par son contenu, à la fois par ce qu'il nous raconte sur la façon de faire de la science mais aussi pour le caractère sublimement étrange de l'effet physique mesuré, dont la confirmation n'est pas une surprise mais qui n'en est pas moins littéralement « extraordinaire ».



**Figure 2.** La forme de l'onde gravitationnelle détectée le 14 septembre 2015. En abscisse, le temps écoulé jusqu'à la fusion des deux trous noirs (une fraction de seconde). En ordonnée, la distance fluctuante entre les deux masses terrestres séparées de 4 km.

Le dispositif expérimental utilisé est constitué d'un interféromètre dont les bras perpendiculaires sont longs de 4 kilomètres. Le signal lumineux initial (source laser) est partagé en deux faisceaux qui parcourent chacun l'un des deux bras et se retrouvent au même point, grâce à des miroirs disposés aux extrémités. En situation normale (donc en l'absence d'onde gravitationnelle), on s'arrange pour que les deux signaux reçus s'annulent *via* des interférences destructives (les creux et les bosses de chaque onde lumineuse se compensent exactement). La détection d'un signal non nul est le signe du passage d'une onde gravitationnelle, abstraction faite des parasites (vibrations diverses).



**Figure 3.** Simulation numérique de la fusion de deux trous noirs. Les deux sphères représentées pour les trous noirs ne sont faites que de vide délimité par l'horizon des événements (source : Nasa).

L'oscillation des masses séparées de 4 kilomètres marque le passage d'une onde gravitationnelle car aucun autre événement alternatif (comme un mini-séisme) n'a pu être identifié.

De plus, la forme de l'onde correspond dans le catalogue des « gazouillis » possibles à la fusion de deux trous noirs de masses respectives 35 et 30 masses solaires, la masse du trou noir final étant de 62 masses solaires. Nous expliquerons plus loin l'origine de ce déficit de 3 masses solaires pour le trou noir final.

La source est distante de la Terre de 1,4 milliard d'années-lumière. La distance a pu être estimée à partir de l'amplitude de l'onde reçue sur Terre qui est inversement proportionnelle à la distance de la source. L'amplitude de l'onde émise étant connue, la différence avec l'amplitude de l'onde reçue donne la distance.

La forme de l'onde fait apparaître trois phases successives de la coalescence des deux trous noirs : la phase initiale en spirale avec une dizaine de cycles orbitaux, la phase de fusion très courte et enfin la phase de relaxation du trou noir final. Le trou noir final est censé être un trou noir de Kerr (donc en rotation) avec un rayon

de Schwarzschild de 180 km environ (qui est proportionnel à sa masse). La vitesse des trous noirs juste avant fusion était 180 000 km/s, soit 60 % de la vitesse de la lumière. Le rayon de chacun des trous noirs était voisin de 90 km.

Certaines personnes se sont déclarées tristes de cette annonce car elle était sans surprises : on ne faisait que confirmer l'existence de phénomènes qui avaient été prédits un siècle plus tôt par Einstein. Était-ce si formidable ?

Cette réaction n'est pas appropriée pour plusieurs raisons.

- Tout d'abord ce résultat est doublement important : il constitue une preuve forte de l'existence des trous noirs (y compris binaires) et il s'agit de la première détection directe d'une onde gravitationnelle (on a mesuré les effets de son passage sur Terre).
- Les spécialistes, peut-être un peu blasés, s'étaient convaincus que ces ondes devaient exister, indirectement par l'observation de l'évolution de la période de rotation d'un pulsar binaire dans les années 1970 (étude qui valut en 1993 le prix Nobel à Russell Hulse et Joseph Taylor). Toutefois, si l'on se rappelle à quel point les trous noirs et les ondes gravitationnelles sont vraiment étonnants car éloignés de nos concepts familiers, alors on en conclut que de telles prédictions stupéfiantes requièrent des preuves de grande qualité pour que le doute raisonnable ne soit plus permis. Par ailleurs, l'histoire des ondes gravitationnelles sur le plan théorique est loin d'être simple, les physiciens étant demeurés longtemps dubitatifs.
- La relativité générale a été testée en champ fort (même si l'onde nous arrive très affaiblie en amplitude) et pour deux trous noirs tournant à des vitesses proches de celle de la lumière, ce qui est une première.
- Il y a déjà une surprise dans les masses des deux trous noirs stellaires : on ne s'attendait pas pour des trous noirs issus de l'effondrement d'étoiles massives à une masse aussi importante.

La détection de ces ondes gravitationnelles est la promesse de découvertes importantes. Les interféromètres terrestres seront capables de détecter des ondes dont la fréquence est comprise entre 10 Hz et quelques KHz (1 Hz signifie 1 cycle par seconde).

Citons quelques sujets qui devraient être éclairés par les futures détections.

- La vitesse de propagation des ondes gravitationnelles pourra être confirmée, même s’il ne fait guère de doute qu’elle est égale à celle de la lumière.
- Les asymétries des étoiles à neutrons pourront être étudiées.
- La valeur de la constante de Hubble (qui mesure le taux d’expansion de l’Univers) pourra être affinée.
- Si les cordes cosmiques (hypothétiques) émettent des ondes, peut-être les détecterons-nous.
- Le bestiaire des trous noirs pourra être précisé.
- L’explosion des supernovae (en combinant les ondes électromagnétiques et les ondes gravitationnelles) pourra être investiguée.
- De façon plus générale, nous allons entrer dans l’ère de l’astronomie multi-messages : un même événement pourra être étudié dans certains cas par son rayonnement électromagnétique et gravitationnel.

Il faut garder à l’esprit le caractère extraordinaire de l’onde gravitationnelle : il s’agit de la vibration du contenant lui-même (l’espace-temps) ; les autres ondes connues se propagent à l’intérieur de l’espace-temps et font partie du contenu.

## Une puissance émise gargantuesque

Il a été fait mention dans les médias de la puissance exceptionnelle émise par cette onde. Précisons ce que cela signifie.

Nous avons indiqué que la masse du trou noir final (après la fusion) n’était pas égale à la somme des masses des deux trous noirs. Il manque 3 masses solaires qui ont été émises sous la forme de l’onde gravitationnelle. Durant une fraction de seconde, la fusion des trous noirs a converti en onde gravitationnelle l’équivalent de trois fois la masse du Soleil.

Par comparaison, pour une durée comparable (moins d’une seconde), le Soleil convertit une toute petite partie de sa masse en rayonnement électromagnétique par les réactions de fusion thermonucléaire. L’énergie émise par la fusion des deux trous noirs durant ce bref intervalle de temps est dix fois plus grande que celle émise par les étoiles de toutes les galaxies de l’univers observable pour une durée comparable.

Une autre façon de l’exprimer : La fusion des trous noirs a libéré en une fraction de seconde 500 milliards de fois plus d’énergie (3 masses solaires) que celle émise sous forme de rayonnement électromagnétique par notre galaxie durant le même intervalle de temps.

Pour finir, signalons qu’un deuxième événement, GW151226, a été annoncé en juin 2016 (une autre onde gravitationnelle détectée en décembre 2015) : la source était composée de deux trous noirs respectivement de 8 et 14 masses solaires, avec un trou noir final de 21 masses solaires.