

Le Petit Oral de Sciences ... 3 déclinaisons

Thème : « Les ondes gravitationnelles »

DESCRIPTIF DU SUJET DESTINÉ AU PROFESSEUR

Objectif(s) généraux de formation	<ul style="list-style-type: none">* <i>Aborder avec les élèves des sujets scientifiques (parfois d'actualités) afin d'acquérir (ou renforcer) une culture scientifique solide et gage d'objectivité dans leurs choix futurs de citoyens.</i>* <i>Développer les capacités et compétences liées principalement :</i><ul style="list-style-type: none">⊕ <i>À l'analyse de ressources scientifiques diverses et variées.</i>⊕ <i>À la préparation et la réalisation d'une présentation orale structurée (Grand Oral)</i>⊕ <i>Au travail de groupe.</i>
Type d'activités	<ul style="list-style-type: none">* <i>Analyse et synthèse de ressources diverses (Articles, vidéos, images).</i>* <i>Préparation puis réalisation d'une présentation orale (Individuellement ou en groupes).</i>* <i>Évaluation d'une présentation orale par les élèves.</i>
Description succincte	<p><u>1^{ère} proposition d'organisation : Travail individuel</u></p> <ul style="list-style-type: none">* <i>Un élève volontaire se voit remettre un « dossier » contenant différentes ressources (plusieurs documents : écrits, liens de vidéos, images ... pas forcément tous pertinents) sur un sujet scientifique qu'il ne choisit pas (en lien avec sa spécialité).</i>* <i>Il dispose alors de plusieurs jours pour préparer une présentation orale sur le sujet proposé. Selon l'avancement de l'année et donc de l'acquisition des compétences visées on pourra moduler le cadre de la présentation : Une question possible sur le sujet est donnée ou non, une durée de présentation allant de 1 à 5 minutes, avec ou sans notes, devant le public ou à sa place ...</i>* <i>Lors de la séance de passage l'élève réalise sa présentation orale tandis que plusieurs petits groupes d'élèves sont assignés à l'évaluation d'une « brique » de la grille d'évaluation proposée par Eduscol (en annexe). À la suite de la présentation, chaque groupe évaluateur désigne un rapporteur qui propose un avis sur le degré de maîtrise des compétences évaluées.</i>* <i>La classe propose ensuite un bilan des points forts et fragiles assortis de quelques conseils.</i> <p><u>2^{nde} proposition d'organisation : Travail individuel comparé</u></p> <ul style="list-style-type: none">* <i>On propose à 2 élèves de traiter un même sujet.</i>* <i>Même organisation que précédemment sur les délais, sur les exigences et l'évaluation MAIS dans ce cas-là les deux élèves passent à la suite l'un de l'autre (le second peut préférer ne pas assister à la présentation afin de ne pas être influencé). L'idée forte est de discuter ensuite des différents choix effectués par les deux élèves et d'étudier la pertinence et l'efficacité de chacun.</i> <p>Remarque : <i>lors de ce choix d'organisation il est conseillé de ne pas donner de propositions de questions aux élèves afin d'examiner les choix qu'ils auront fait.</i></p> <ul style="list-style-type: none">* <i>Même organisation sur l'évaluation.</i>

	<p>3^{ème} proposition d'organisation : Travail de groupe</p> <ul style="list-style-type: none"> * On propose à un groupe d'élève de travailler ensemble sur un sujet, sur un temps de cours. * Chaque membre du groupe doit analyser les différentes ressources puis discuter/débattre/écouter/argumenter/proposer/convaincre ses camarades ... afin qu'un consensus se fasse sur les choix à faire pour préparer une présentation orale efficace. Comme précédemment on peut moduler le niveau d'exigence en donnant ou non une question possible ... * L'un des membres du groupe est désigné pour réaliser la présentation orale. * Même organisation sur l'évaluation.
Compétences travaillées	Toutes les compétences caractéristiques de la démarche scientifique sont travaillées (S'approprier, Analyser / Raisonner, Réaliser, Valider, Communiquer) ainsi que celles associées à l'oral (Qualités orales, mise à portée du discours, construction de l'argumentation, prise de parole en continu)
Mise en œuvre	Dès que possible, en alternance avec des Fast FlashBack (cf fiche activité) de façon à ce que chaque élève bénéficie d'un temps de passage sur l'exercice qu'il préfère (Présentation d'un sujet inconnu ou présentation d'une notion vue en cours / d'un TP).
Sources	<p>Article de Nicolas Baker – Carnets de science #1 : https://carnetsdescience-larevue.fr/boutique/mook/carnets-de-science-1/ Vidéo : https://lejournal.cnrs.fr/videos/ondes-gravitationnelles-les-detecteurs-de-lextreme Notes personnelles prises lors de diverses conférences : Cours introduction de Philosophie des sciences (9 cours) – Etienne Klein – Centrale Paris Formation enseignants « La science en marche » - CEA SACLAY – 25 au 27 février 2019</p>
Auteur(s)	Mercier Sylvain - LPO Thérèse Planiol – Loches

Les documents mis à disposition :

- Un dossier avec les consignes et ressources sur la thématique « Les ondes gravitationnelles ».
- Une fiche d'évaluation des capacités liées à l'oral.
- Une fiche méthode sur le travail de groupe.

Dossier : « Les ondes gravitationnelles »

➤ Consignes de travail

Organisation retenue	Durée retenue	Présentation	La « Question »	Descriptif de l'organisation
<input type="checkbox"/> Travail individuel	<input type="checkbox"/> 1 min <input type="checkbox"/> 3 min <input type="checkbox"/> 5 min <input type="checkbox"/> 5+10 min	<input type="checkbox"/> Avec notes <input type="checkbox"/> Sans notes	<input type="checkbox"/> À trouver <input type="checkbox"/> Proposée	Vous disposez d'un porte documents contenant plusieurs ressources. Ces ressources vous permettent d'élaborer une présentation orale portant sur une question en rapport avec le sujet proposé. Cette présentation sera réalisée puis commentée en classe. Votre groupe dispose d'un porte documents contenant plusieurs ressources. Vous devez élaborer collectivement une présentation orale, à l'aide des ressources disponibles, portant sur une question en rapport avec le sujet proposé. Un (ou plusieurs) membre du groupe réalisera la présentation orale, qui sera ensuite commentée, en classe.
<input type="checkbox"/> Travail individuel comparé				
<input type="checkbox"/> Travail de groupe				

→ Interaction avec le jury.

Vous devez préparer 5 questions, et leurs réponses, que le jury sera susceptible de vous poser.

Mots-clés pour vous aider : Interférences constructives, destructives, conditions d'interférences, gravitation Newtonienne, force, laser, ondes électromagnétiques ...

➤ Le « pitch »

Le 14 Septembre 2015 est un jour historique, celui d'une découverte scientifique majeure. Pour la première fois, les chercheurs de la collaboration américano-européenne LIGO-VIRGO ont en effet détecté des ondes gravitationnelles prouvant ainsi leur existence. L'observation de ces ondes, prédites par Albert Einstein mais qu'il croyait indécélables, nous ouvre une nouvelle fenêtre sur l'Univers.

➤ Le porte documents.

Document n°1 : Ondes gravitationnelles, les coulisses d'une découverte

Campus d'Orsay. 9 h 00. C'est un lundi comme les autres pour Patrice Hello, physicien du Laboratoire de l'accélérateur linéaire (LAL). Il a consacré toute sa carrière à la quête des ondes gravitationnelles, ces tremblements de l'Univers provoqués par des événements cosmiques ultraviolents. Depuis leur description par Albert Einstein en 1915, on n'a que des preuves indirectes de leur existence. Patrice Hello et ses collègues chercheurs ou ingénieurs du LAL tentent de la confirmer depuis des années, en développant les instruments les plus sensibles du monde. Ils ont ainsi largement contribué à la construction de Virgo, le détecteur européen d'ondes gravitationnelles installé près de Pise, en Italie. Ils étudient et développent notamment des kilomètres de tubes à ultravide, dans lesquels circulent des lasers, des composants fondamentaux des détecteurs d'ondes gravitationnelles actuels. Ils appartiennent également à la collaboration LIGO-Virgo, vaste entente scientifique américano-européenne à l'écoute de cette musique cosmique qui échappe à l'humanité depuis des décennies. Nous sommes le 14 septembre 2015 au matin et le signal tant attendu s'apprête à atteindre notre planète. Il va secouer le monde scientifique sur son passage.

11 h 50 de l'autre côté de l'océan Atlantique. Un instrument scientifique géant installé en Louisiane aux États-Unis mesure, pour la première fois dans l'histoire, une vibration de l'espace. Pendant une fraction de seconde, l'instrument se déforme. Il se rallonge et s'amincit. Puis il se raccourcit et s'élargit. La déformation se répète une dizaine de fois. La même chose se produit sept millisecondes plus tard à 3 000 kilomètres de là, dans le détecteur de Hanford, dans l'État de Washington. En Italie, Virgo, le troisième instrument du réseau, est quant à lui en cours de maintenance. Le système d'alerte de LIGO, détecteur américain d'ondes gravitationnelles, se met en branle. Il sélectionne et enregistre l'événement dans la base de données GraceDB. Trois minutes plus tard, un courrier électronique est envoyé par le programme à un groupe restreint de chercheurs, les sentinelles qui surveillent les analyses en temps réel. À Hanovre, en Allemagne, Marco Drago est le premier à lire le message. Il est chercheur postdoctorant à l'Institut Max-Planck pour la physique gravitationnelle. « *Action required for GraceDB event : G184098 (burst_cwb_allsky)*. » Le message annonce un événement d'intérêt. Une action est requise.

Au début, Marco Drago pense qu'il s'agit d'une fausse alerte. Des signaux artificiels mimant des événements astrophysiques peuvent en effet être « injectés » dans les instruments. Ce type de leurre instrumental permet de tester les procédures, la réactivité des chercheurs mais aussi leur patience. En 2010, lors de l'événement baptisé « Big Dog », un signal intéressant avait été produit par les trois détecteurs d'ondes gravitationnelles de la collaboration LIGO-Virgo. Après de laborieuses vérifications des données et une tout aussi laborieuse rédaction d'article scientifique, la nouvelle était tombée : « Big Dog » n'était qu'une injection test. Marco Drago avait donc des doutes, surtout que le détecteur commençait juste sa prise de données ce jour-là. Après quelques appels téléphoniques de vérification, le chercheur envoie un courrier électronique à tous les collaborateurs de LIGO-Virgo.

12 h 54. « *Very interesting event on ER8.* » Événement intéressant sur ER8, soit la période de test qui précède la prise de données officielle. Patrice Hello et ses collègues du LAL reviennent de la cantine lorsqu'ils lisent le courrier électronique de la collaboration. « *On s'est dit : "Ça y est, ils ont réussi à injecter les signaux dans le système de contrôle, ils ont enfin réussi à faire leurs injections"* », se souvient le physicien. Son collègue Nicolas Arnaud se rappelle également ce moment précis : « *Le signal avait l'air trop beau pour être vrai. Il était tellement fort qu'il se voyait à l'œil nu !* » Une heure plus tard, tous les chercheurs de la collaboration reçoivent un nouveau message de Marco Drago : il ne s'agit pas d'un faux signal. Les instruments LIGO sont encore incapables de réaliser des injections aveugles de signaux. Tout a fonctionné correctement et le signal correspondrait à la collision de deux trous noirs. L'événement sera baptisé GW150914, suivant la nomenclature de l'astronomie. Si l'information se confirme, il s'agit d'un double séisme scientifique. C'est la première détection directe d'ondes gravitationnelles et la première détection directe de trous noirs. Ces objets astrophysiques extrêmement compacts possèdent une force gravitationnelle telle que toute chose qui s'en approche de trop près ne peut plus s'extirper de leur attraction, pas même la lumière. Les astronomes sont ainsi incapables de les voir avec des télescopes conventionnels sensibles à la lumière et autres ondes électromagnétiques.

La découverte du siècle ?

Désormais, deux tâches se profilent : vérifier que le signal est effectivement d'origine cosmique et s'assurer que la nouvelle ne s'ébruite pas avant la publication des résultats. Il s'agit certainement de la découverte de l'année, peut-être même du siècle. « *Un de nos collègues appartient au comité de détection, ajoute Nicolas Arnaud. Ce groupe de scientifiques de LIGO et Virgo valide les étapes à suivre après la détection d'un signal.* » Il faut passer quatre phases de vérification avant d'aboutir à l'article qui sera soumis à une revue scientifique. Patrice Hello évoque une étape « épique » qui mènera à l'écriture d'un des articles scientifiques les plus attendus de la discipline. « *Il fallait vérifier jusqu'au bout que ce n'était pas des artefacts de l'appareil. Ces instruments sont tellement complexes que l'on ne comprend pas complètement le bruit qui accompagne le signal en sortie du détecteur. On a également imaginé des scénarios selon lesquels on avait été victimes d'actes malveillants. Puisque nous sommes capables d'injecter des signaux comme on veut dans le système de contrôle, des hackers auraient-ils pu faire la même chose ? On a fini par se convaincre qu'un tel acte était impossible sans laisser de traces.* » Reste désormais à organiser l'annonce de la nouvelle au monde entier. Nicolas Arnaud intègre un groupe de chercheurs qui animera la visite de presse du site de Virgo le 11 février, le jour de la publication. Mais d'ici là, il va falloir rester discret.

Un événement cataclysmique

Le signal du 14 septembre aurait été produit par la collision, ou « coalescence », de deux trous noirs d'une trentaine de masses solaires chacun. « *Il faut imaginer ces deux mastodontes qui tournent l'un autour de l'autre 75 fois par seconde alors qu'ils sont séparés par quelques centaines de kilomètres seulement. Leur vitesse commence à approcher celle de la lumière, donc l'espace-temps autour est tout chamboulé. Ces perturbations ont voyagé pendant plus d'un milliard d'années jusqu'à traverser la Terre le 14 septembre vers midi.* » Frédérique Marion travaille au Lapp, le Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de physique des particules, un des six laboratoires français à participer à Virgo. Elle rejoint l'aventure dès les années 1990 et travaille sur la simulation de l'instrument. Aujourd'hui, elle codirige le comité de détection de la collaboration LIGO-Virgo. « *Les ondes gravitationnelles doivent nous permettre d'observer l'Univers d'une manière totalement nouvelle. Contrairement à ce que l'on est capable de voir avec la lumière, ces ondes émises décrivent la dynamique des masses, ce qui se passe véritablement au cœur des phénomènes astrophysiques.* »

L'Univers gélatineux

L'histoire des ondes gravitationnelles commence en 1915 lorsqu'Albert Einstein publie sa théorie de la relativité générale. Cette année-là, le physicien propose une nouvelle façon de voir le monde qui nous entoure. Sa théorie énonce notamment que la gravitation peut être comprise comme une courbure de l'espace-temps. L'espace et le temps sont intimement imbriqués depuis la théorie de la relativité restreinte publiée en 1905, par Einstein également. Par souci de visualisation, il est commun et plus aisé d'imaginer l'espace-temps comme une membrane élastique tendue. Placez une boule de pétanque sur la membrane et la surface s'enfoncera. L'espace-temps est désormais incurvé et les autres masses qui se déplacent auront tendance à suivre les pentes de la membrane avant de tomber sur la boule de pétanque. Une des conséquences de la relativité générale est que cette membrane (l'espace-temps en réalité) peut vibrer lorsque des masses sont accélérées. Tout comme notre membrane va vibrer si deux boules de pétanque finissent par s'entrechoquer. Dans la réalité, les vibrations se propagent dans toutes les directions à la vitesse de la lumière. Et le milieu de propagation n'est pas fait de matière, c'est l'espace lui-même qui vibre. L'Univers s'apparente ainsi à une sorte de gelée. Et notre gelée cosmique vibre au rythme des phénomènes astrophysiques. Chaque masse accélérée produit des tremblements d'Univers, et pas seulement les phénomènes les plus extrêmes. Un exemple : le système Terre-Soleil perd environ 200 watts par émission d'ondes gravitationnelles, soit la puissance nécessaire pour faire fonctionner la trancheuse à jambon de votre traiteur. Le cataclysme détecté en septembre 2015 a quant à lui libéré une puissance cinquante fois plus importante que toutes les étoiles de l'Univers observable !

Lorsque Einstein finit par admettre la réalité de ces ondes gravitationnelles, il concède toutefois que les vibrations seraient si faibles qu'elles échapperaient à toute tentative de détection. Effectivement, le signal est subtil. La vibration qui a traversé la Terre en septembre 2015 n'a ainsi fait varier les distances que de l'ordre de la taille d'un atome sur la distance Terre-Soleil (150 millions de kilomètres) ! Malgré sa grande capacité de projection, Einstein ne pouvait prévoir les trésors d'ingéniosité mis en œuvre par les scientifiques qui ont suivi ses pas. Afin de comprendre l'incroyable sensibilité d'un détecteur d'ondes gravitationnelles, direction le nord de l'Italie.

Un détecteur franco-italien

La ville de Pise possède une force d'attraction particulière sur les physiciens. Vers 1570, Galilée, père de la science moderne selon certains, y étudie le mouvement de pendules. Il aurait puisé son inspiration dans l'oscillation régulière des lustres de la cathédrale située sur la Piazza del Duomo. Cette magnifique place est connue dans le monde entier pour sa tour penchée et ses touristes qui tentent, le temps d'une photo, de la redresser. Prenez la route vers le sud-est et, 17 kilomètres plus tard, vous arrivez à la ville de Cascina où se dresse une autre cathédrale. Celle-ci n'est pas construite en pierre, mais en béton pris dans un enchevêtrement vertigineux d'acier inoxydable. Pas de vitraux colorés mais des lasers et des miroirs ultraréfléchissants. Nous sommes le mardi 12 janvier 2016. À l'entrée de Virgo, un vent soutenu met les drapeaux italien et français à rude épreuve. Aujourd'hui, la langue de Molière résonne plus que d'habitude dans les couloirs du site. Une équipe de Français issus de plusieurs laboratoires partenaires prépare l'annonce qui doit être faite dans trente jours. La tension est palpable. L'armure de confidentialité entourant la découverte de septembre commence à se fissurer. Le feu des rumeurs couve depuis des semaines et hier, en fin d'après-midi, le tweet du physicien américain Lawrence M. Krauss est venu souffler sur les braises : « *Ma rumeur précédente à propos de LIGO a été confirmée par des sources indépendantes. Restez à l'écoute ! Les ondes gravitationnelles ont peut-être été détectées !* » Les médias se glissent dans la brèche, impatients de titrer une fois de plus « *Einstein avait raison !* » Benoît Mours, responsable scientifique de Virgo pour la France, tente de désamorcer la rumeur avec les médias francophones. Il est au téléphone avec un rédacteur du quotidien *Le Parisien*. « *Pensez-vous qu'une fuite est possible ?* », interroge le journaliste loin d'être rassasié par les réponses du chercheur. « *Je suis mal placé pour me prononcer sur une fuite, je ne suis pas plombier* », réplique le physicien qui enchaîne sur la réponse type prévue pour cette situation : « *Nous collectons beaucoup de données. Nous les analysons et cela prend du temps. Les signaux que nous recherchons sont très faibles. Il faut attendre d'avoir tout collecté pour bien comprendre les choses. Nous essayons d'éviter de faire des erreurs. Ce n'est qu'à la fin de ce long processus que l'on peut être sûr de ce que l'on voit et publier nos résultats...* »

Grand, fin, paré de lunettes et d'un sourire qu'il faut déchiffrer, Benoît Mours parle d'une voix douce qui oblige souvent à tendre l'oreille. Le physicien de 58 ans aime comparer le travail de chercheur à celui d'un enquêteur de série policière. « *Sauf qu'au lieu de travailler avec des cadavres, on travaille avec la matière, la vie et les grandes énigmes de l'Univers.* » Le secret de l'événement, il a su le garder pour lui. « *J'ai passé les fêtes de Noël avec toute ma famille sans rien leur dire. Partager ce secret n'est pas forcément un cadeau. Une fois qu'on le détient, c'est dur de le garder pour soi.* »

Benoît Mours travaille sur la quête d'ondes gravitationnelles depuis qu'il a quitté le monde de la physique des particules à la fin des années 1980. « *Le problème, c'est qu'il n'y avait plus de problème, tout se passe comme prévu par le modèle standard. Et puis l'astronomie, ça fait rêver.* » Lors d'une année sabbatique, il part aux États-Unis, où il noue des premiers liens avec les équipes de LIGO. Il leur présentera notamment le format .gwf (gravitational wave frame) qu'il vient de développer pour standardiser les données produites par les détecteurs. Les Américains sont convaincus : Virgo et LIGO parleront la même langue. En 2007, alors que Benoît Mours est porte-parole du détecteur européen, LIGO et Virgo s'associent de manière plus intime. Les deux équipes partagent leurs données, les traitent ensemble et cosignent toutes les publications scientifiques. Les miroirs qui équipent les détecteurs américains sont les mêmes que ceux de Virgo. Tous ont été traités au Laboratoire des matériaux avancés de Lyon. « *Nous nous réunissons deux fois par an, dont une fois à Pasadena, en Californie. Mais sinon il y a des réunions téléphoniques toutes les semaines.* » La fréquence des échanges entre les deux équipes a considérablement augmenté depuis septembre, surtout depuis les rumeurs.

Les détecteurs de l'extrême

Sur le site de Virgo, Benoît Mours est accompagné, entre autres, de ses collègues Frédérique Marion et Nicolas Arnaud. Ils préparent la conférence de presse qui aura lieu dans moins d'un mois, ce qui va être dit au public (« *Il ne faut pas expliquer les choses avec des puissances de dix, c'est trop compliqué* ») et ce qui va être fait (« *Faut-il faire visiter la salle du laser ?* »). L'équipe quitte le bâtiment des bureaux pour se diriger vers l'instrument à proprement parler. Les détecteurs d'ondes gravitationnelles cumulent les superlatifs. « *Virgo est l'un des plus gros tubes à vide qui existe sur Terre. Il a même un volume d'ultravide supérieur à celui du LHC* », souligne Gabriel Chardin, le président du comité des Très Grandes Infrastructures de recherche (TGIR). Cet organe du CNRS participe à la gestion des instruments scientifiques géants comme Virgo, ceux du Cern et les grands télescopes tournés vers le cosmos. Vu de l'espace, Virgo dessine un grand L. En gravissant la colline sur laquelle trône un bâtiment central blanc et sans fenêtre, on aperçoit les deux tubes qui s'étirent sur 3 kilomètres chacun. Avec de telles distances et un instrument aussi sensible, la courbure de la Terre devient un paramètre à prendre en compte. Dans chaque tube de 3 kilomètres règne l'ultravide. La construction de Virgo fut une prise de risque sans précédent pour le CNRS et son partenaire italien, l'Institut national de physique nucléaire (INFN).

« Habituellement, il y a un continuum entre les différentes étapes qui mènent à la création d'un très gros instrument », détaille Gabriel Chardin. *« Il y a l'émergence, le démarrage des idées, suivi de projets intermédiaires, qui débouchent finalement sur une très grande infrastructure de recherche.*

Pour Virgo, tout était nouveau, il fallait commencer directement par la construction d'un très gros instrument. La part de risque était forte, mais les études montraient que l'on devait pouvoir y arriver. » Patrice Hello, du LAL, se rappelle également les balbutiements des débuts. *« Les arguments étaient à la fois scientifiques et techniques. Il fallait construire un grand interféromètre suspendu, avec des lasers à la fois de puissance et stabilisés en amplitude et en fréquence. Ces deux choses sont habituellement antagonistes. Mais on s'est rendu compte que toutes les technologies nécessaires étaient mûres : lasers, optique et technique du vide. Quand on regardait chaque petit défi, cela paraissait possible. La grande difficulté de Virgo était d'assembler et de faire fonctionner ensemble toutes ces technologies de pointe. »*

Le principe de Virgo, un grand interféromètre de Michelson, est relativement simple. Un faisceau laser est scindé en deux par un miroir semi-réfléchissant, appelé « séparatrice ». Les deux faisceaux produits parcourent alors une certaine distance, sont réfléchis par des miroirs puis recombinaison au niveau de la séparatrice. La recombinaison produit des interférences que l'on peut enregistrer avec un capteur. Cette technique a été inventée à la fin du XIX^e siècle par Albert Abraham Michelson et Edward Morley lorsqu'ils ont tenté de démontrer l'existence de l'éther, support supposé de propagation de la lumière. Leur expérience a finalement montré que l'éther n'existait pas et que la lumière conservait une vitesse constante quels que soient les déplacements de l'observateur. Les bras de leur interféromètre mesuraient 10 mètres chacun. Les bras de Virgo mesurent 300 fois plus. *« D'un point de vue technologique, c'est sans commune mesure »,* s'enthousiasme Gabriel Chardin, pourtant habitué des instruments scientifiques les plus puissants et volumineux du monde. *« C'est un dépassement technologique extraordinaire. La précision obtenue par ces interféromètres est gigantesque par rapport à ce qui se faisait avant en termes de recherche d'ondes gravitationnelles. »* La sensibilité extrême de Virgo et LIGO repose sur la taille de l'interféromètre mais aussi sur la stabilité de ses éléments. Les miroirs ultrapolis qui guident les faisceaux laser doivent être suspendus à des systèmes qui annulent toute vibration qui viendrait du sol. Une colonne de sept stabilisateurs empilés assure que les miroirs et bancs optiques restent les objets les plus immobiles sur Terre. Sans ces précautions, une vague qui percute la côte à des dizaines de kilomètres perturberait la mesure. Le passage d'une onde gravitationnelle, en modifiant la longueur du chemin à parcourir par le laser entre les miroirs, laisse un signal dans l'interférence des deux faisceaux laser recombinaison.

Des signaux à traiter en temps réel

La fréquence et l'amplitude de l'onde gravitationnelle peuvent ensuite être déterminées à partir de ce signal. Puis, de ces deux paramètres, les chercheurs déduisent la nature de l'événement astrophysique à la source de l'émission. *« Les analyses sont faites en temps réel afin de pouvoir envoyer des alertes à des télescopes conventionnels pour détecter un signal électromagnétique, avec de la lumière donc, lié au même événement »,*

souligne Frédérique Marion. L'analyse en temps réel se fait en « glissant » des espèces de calques numériques sur les données produites en continu par les instruments. *« Pour la recherche de signaux provoqués par la collision de trous noirs ou étoiles à neutrons, on peut s'appuyer sur nos prédictions. Si on connaît les masses des astres, on peut prédire le signal qui va être produit. La difficulté, c'est que le signal que l'on cherche dépend de la masse des objets que l'on ne connaît pas a priori. Cela veut donc dire qu'il faut balayer tout l'espace des paramètres pour rechercher plein de signaux différents correspondant à plein de paramètres différents. »*

La création des centaines de milliers de calques qui balayent les données de Virgo et LIGO représente un travail colossal, appuie Patrice Hello : *« On peut considérer que c'est une grande découverte en soi. Résoudre numériquement les équations de la relativité générale est très compliqué. Il nous a fallu des supercalculateurs et des méthodes numériques très sophistiquées. »* Cette difficulté provient du caractère non linéaire de la relativité générale, explique Frédérique Marion : *« La masse influe sur l'espace qui est autour d'elle mais en même temps, c'est l'espace, sa courbure, qui va dire à la masse comment elle doit se déplacer. Donc il y a un effet qui se mord la queue. Et ces effets non linéaires sont d'autant plus forts dans des conditions extrêmes, comme dans le cas des trous noirs. »*

Une nouvelle fenêtre sur l'Univers

La visite de Virgo touche à sa fin pour les équipes françaises. Après un passage à l'extrémité du bras ouest, Nicolas Arnaud revient vers le bâtiment central de la séparatrice au volant d'une voiturette électrique « qui sert surtout lors de la visite des journalistes ». À sa gauche défile le tube à vide de 3 kilomètres dans lequel circule le laser. *« Virgo est un instrument gigantesque, donc on éprouve à la fois un sentiment de grandeur et une humilité liée au fait que l'on est très nombreux à y contribuer. Que l'on travaille dans l'électronique, dans le contrôle du vide, dans l'informatique, dans l'analyse des données, dans l'instrumentation, chacun apporte sa propre pierre. Et voir que toutes ces volontés, ces activités convergent vers un seul et même but, je trouve cela très beau. »*

L'annonce

11 février 2016. La découverte va être annoncée simultanément à Washington DC, au siège du CNRS à Paris et sur le site de Virgo en Italie. Nicolas Arnaud débute la visite du site italien avec des journalistes triés sur le volet. Benoît Mours et Frédérique Marion sont assis à la table des intervenants au CNRS face à un parterre de caméras, de calepins et de micros. *« Je vis un mélange de tension, d'émotion et de soulagement de pouvoir enfin partager ce secret avec le monde »,* confie Frédérique Marion. Tous les sites sont reliés par visioconférence et des serveurs dédiés retransmettent l'événement en direct. Un record de connexions fait d'ailleurs tomber quatre serveurs du centre de calcul. Après quelques balbutiements techniques, la conférence peut commencer. La parole est donnée en premier aux Américains. Ce sont leurs instruments qui ont fait la détection. Le directeur du LIGO, David Reitze, prend la parole sous les applaudissements : *« We did it ! »* Fulvio Ricci, porte-parole de Virgo, enchaîne depuis Cascina, en Italie. *« C'est un cap crucial pour la physique, mais, plus important encore, il s'agit du début d'une longue série de nouvelles découvertes excitantes à faire avec LIGO et Virgo. »*

Après les ondes électromagnétiques (lumière, ondes radio, rayons X...), qui ont permis aux astronomes d'observer des phénomènes et des objets cosmiques de plus en plus éloignés, les ondes gravitationnelles vont désormais permettre d'étudier des événements extrêmes et de remonter plus loin dans l'histoire de l'Univers. Le détecteur Virgo redémarrera bientôt avec une sensibilité plus poussée. Grâce aux trois instruments de la collaboration LIGO-Virgo, la communauté scientifique disposera alors d'un observatoire gravitationnel capable d'identifier et de localiser encore plus précisément les sources de ces précieuses ondes. L'ère de l'astronomie gravitationnelle est née.

Document n°2 : Vidéo (5 min 59) – les détecteurs de l'extrême

<https://lejournal.cnrs.fr/videos/ondes-gravitationnelles-les-detecteurs-de-lextreme>

Document n°3 : Quelques notes sur l'évolution des idées sur la gravitation

Au lycée on apprend que la gravitation est l'une des 4 interactions fondamentales qui régissent la plupart des phénomènes qui nous entourent. Cette interaction est la plus faible et nécessite de cumuler une très grande quantité de matière avant de devenir sensible pour nous. La Terre est un bon exemple. Elle exerce une force dite de gravitation que Newton a réussi à quantifier avec sa relation :

$$F_G = G \frac{m_{Terre} m_{objet}}{(d_{Terre-objet})^2}$$

Cette relation, simple, a permis à travers une théorie élégante (la mécanique Newtonienne) d'innombrables succès. Comme toute théorie elle reste toutefois sous le joug de l'expérience et l'une d'entre elle va sceller va son destin et la restreindre à l'étude de systèmes « classiques », c'est-à-dire de masse pas trop importante (pas de trous noirs !), pas trop rapide (vitesse très inférieure à celle de la lumière) et pas trop petit (macroscopique). Cette célèbre incompatibilité entre la théorie de Newton et l'expérience est connue sous le nom « d'avance du périhélie de Mercure ». Au fur et à mesure de ses révolutions, l'orbite elliptique de mercure se décale et forme une « rosace ». Le périastre se décale donc dans le temps et peut être évalué à l'aide de la théorie de Newton. Le calcul fut réalisé de très nombreuses fois et comparé aux observations de plus en plus précises. À chaque fois le même constat : un écart de 43 secondes d'arc par siècle. Un écart absolument infime (c'est l'angle sous lequel on voit l'épaisseur d'un cheveu à un m) mais réel. Les scientifiques vont imaginer beaucoup d'explications ... sans résultats. Un jeune physicien Allemand, Albert Einstein va déduire de cette anomalie qu'une nouvelle approche de la gravitation doit-être mise en place. Après d'énormes efforts conceptuels, Einstein va publier en 1913 une esquisse de sa nouvelle théorie de la gravitation : la relativité générale. Dans cette nouvelle théorie, Einstein change le statut de l'Univers. Avant cette révolution, l'Univers était désigné comme l'enveloppe qui contient tous les objets physiques. Avec Einstein, il devient un objet physique appelé espace-temps. Cet espace-temps est en interaction permanente avec son contenu : la matière (Étoiles, planètes, ...), les rayonnements, ... par une équation unique et très élégante qui les relie. Dans ce cadre-là les objets massifs ne sont plus soumis à des forces. Ils déforment l'espace-temps qui, en se déformant, guide leur mouvement. L'interaction étant décrite par l'équation.

Einstein, lui-même avait posé comme « test » à sa théorie, qu'elle soit en mesure de calculer le mouvement du périhélie de Mercure ... il s'attèle au calcul et ... retrouve exactement les 43 secondes d'arc. Cette théorie incroyable ne va pourtant pas susciter un engouement très fort chez les jeunes physiciens et ceci pour deux raisons : elle nécessite de s'approprier des outils mathématiques nouveaux et difficiles d'accès et elle ne propose pas d'applications concrètes puisqu'elle surpasse la théorie Newtonienne dans de rares cas. Par contre, comme toute équation, elle est prédictive, c'est-à-dire qu'elle porte en son sein des solutions qui décrivent l'existence d'objets et phénomènes absolument impensables comme des objets de masse immense et de volume très faible (des trous noirs ; inconnus à l'époque alors qu'ils sont familiers aujourd'hui), la possibilité de faire vibrer l'espace-temps lors de chocs colossaux entre objets extrêmement massifs (des ondes gravitationnelles) ...

Cette théorie nous a permis de remonter l'histoire de notre espace-temps pour arriver aux tous premiers instants où cette théorie se retrouve insuffisante puisqu'alors la matière est tellement dense et granulaire qu'elle requiert un autre corpus de connaissance, la mécanique quantique, parfaitement incompatible avec la relativité générale ...

Notes personnelles prises lors de diverses conférences
Cours introduction de Philosophie des sciences (9 cours) – Etienne Klein – Centrale Paris
Formation enseignants « La science en marche » - CEA SACLAY – 25 au 27 février 2019

➤ **La grille d'évaluation de votre présentation orale.**

	Très satisfaisant	Satisfaisant	Insuffisant	Très insuffisant
Qualité orale	La voix soutient efficacement le discours. Débit, fluidité, variations et nuances pertinentes, ... Candidat pleinement engagé dans sa parole. Vocabulaire riche et précis	Quelques variations dans l'utilisation de la voix. Prise de parole affirmée. Il utilise un lexique adapté. Le candidat parvient à susciter l'intérêt.	La voix devient plus audible et intelligible au fil de l'épreuve mais demeure monocorde. Vocabulaire limité ou approximatif.	Difficilement audible sur l'ensemble de la prestation. Le candidat ne parvient pas à capter l'attention.
Qualité de la prise de parole en continu	Discours fluide, efficace, tirant pleinement profit du temps et développant ses propositions	Discours articulé et pertinent, énoncés bien construits.	Discours assez clair mais vocabulaire limité et énoncés schématiques.	Énoncés courts, ponctués de pauses et de faux démarrages ou énoncés longs, à la syntaxe mal maîtrisée.
Qualité des connaissances	Connaissances maîtrisées, les réponses aux questions du jury témoignent d'une capacité à mobiliser ses connaissances à bon escient et à les exposer clairement.	Connaissances précises, une capacité à les mobiliser en réponses aux questions du jury avec éventuellement quelques relances.	Connaissances réelles, mais difficulté à les mobiliser en situation à l'occasion des questions du jury.	Connaissances imprécises, incapacité à répondre aux questions, même avec une aide et des relances.
Qualité de l'interaction	S'engage dans sa parole, réagit de façon pertinente. Prend l'initiative dans l'échange. Exploite judicieusement les éléments fournis par la situation d'interaction.	Répond, contribue, réagit. Se reprend, reformule en s'aidant des propositions du jury.	L'entretien permet une amorce d'échange. L'interaction reste limitée.	Réponses courtes ou rares. La communication repose principalement sur l'évaluateur.
Qualité de la construction et de l'argumentation	Maîtrise des enjeux du sujet, capacité à conduire et exprimer et une argumentation personnelle, bien construite et raisonnée.	Démonstration construite et appuyée sur des arguments précis et pertinents.	Début de la démonstration mais raisonnement lacunaire. Discours insuffisamment structuré.	Pas de compréhension du sujet, discours non argumenté et décousu.

- **Fiche méthodologique sur le travail en groupe.**

Le travail en groupe

Quelques compétences sociales à acquérir

1. Écouter et prendre en considération les autres.
2. Prendre des initiatives.
3. Savoir quand il est pertinent de se mettre en avant mais aussi en retrait.
4. Coordonner le travail dans une équipe.
5. Résoudre des conflits.
6. Ne pas abandonner à la moindre difficulté.
7. Être prêt à prendre les responsabilités des autres.
8. Écouter et discuter de toutes les opinions.
9. Savoir gérer un temps imparti.

Les erreurs à ne pas faire si l'on veut réussir à travailler efficacement en groupe

1. Le groupe met du temps à s'installer.
2. Des membres du groupe n'ont pas leur matériel.
3. Le groupe ne se met pas au travail immédiatement et prend rapidement du retard.
4. Chaque membre parle quand il en a envie et personne n'écoute les autres.
5. Un membre du groupe fait tout le travail, les autres sont oubliés. D'autres ne font rien du tout et se contentent de regarder.
6. À la moindre difficulté le groupe appelle l'enseignant.
7. Un seul membre du groupe écrit, les autres ne notent rien et seront incapables de présenter les réponses à l'enseignant.
8. Les membres du groupe se chamaillent entre eux et avec d'autres élèves d'un autre groupe.