

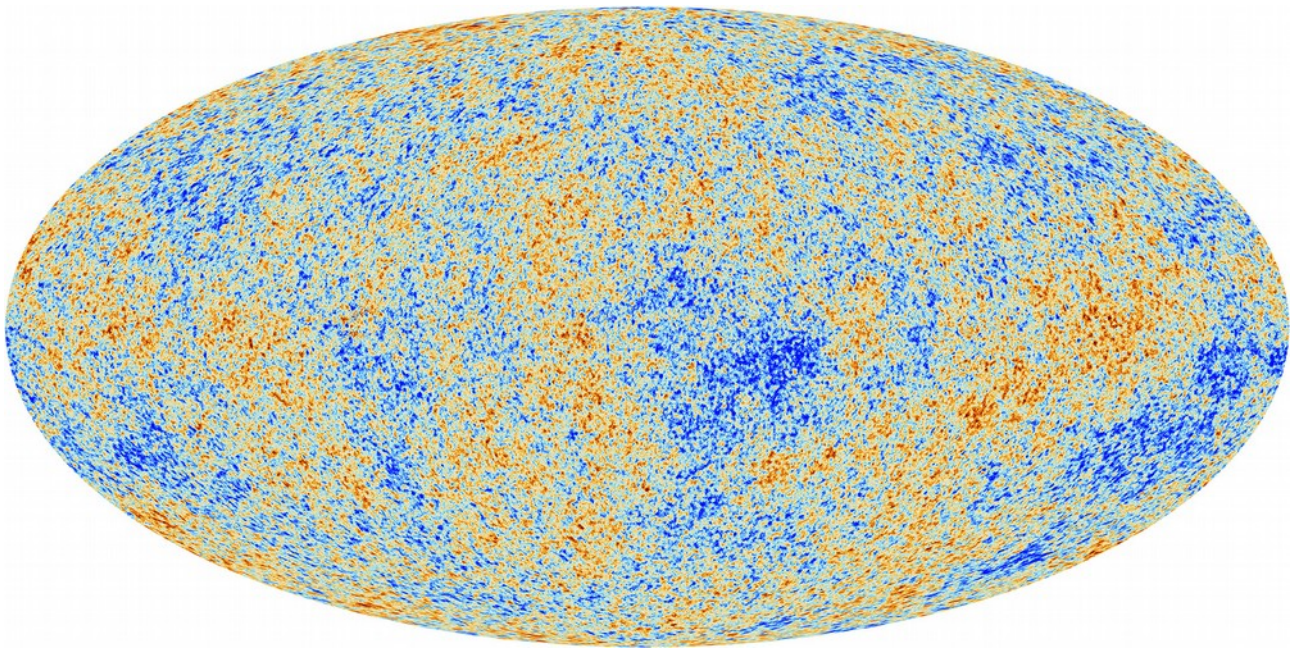


# La Démarche scientifique

## Qu'est ce que la démarche scientifique ?

La démarche scientifique est la méthode qui guide la production de connaissances scientifiques et permet d'améliorer la compréhension du monde. Pour appliquer une démarche scientifique efficace, il faut des fois accepter de remettre en cause des théories bien établies afin de laisser la possibilité à de nouvelles d'émerger. La science est un processus autocorrectif : elle contient en elle-même tous les procédés qui permettent d'affirmer ou de réfuter une théorie. En effet, une théorie ne respecte la méthode scientifique que si celle-ci est testable par l'expérience. Après la formulation d'une théorie vient nécessairement une phase de confirmation (ou infirmation) expérimentale. Les exemples d'outils développés au fil des siècles ne manquent pas (la lunette de Galilée, les microscopes, le télégraphe, le transistor, le laser, etc.). Dans la période récente, il existe des projets mondiaux permettant de monter des systèmes de pointe qui vont tester les limites de la Science connue. On peut citer : les dispositifs LIGO / VIRGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory et Virgo nommé d'après l'amas de la Vierge (la Vierge se disant Virgo en latin)) qui ont permis de détecter les ondes gravitationnelles ; le satellite Planck qui a permis de mieux comprendre l'Univers primordial (la phase juste après le Big Bang) et la formation de l'Univers actuel ; les horloges atomiques dans l'espace PHARAO / ACES (Projet d'Horloge Atomique par Refroidissement d'Atomes en Orbite / Atomic Clock Ensemble System) qui vont tester la Relativité Générale, etc. Le temps mis pour réaliser de telles expériences scientifiques se compte en dizaines d'années. L'utilisation de la démarche scientifique a entre autres permis de grandes avancées dans tous les domaines de notre société : développement des transports, la communication radio, l'informatique, les lasers, les vaccins, les énergies renouvelables, etc.

Néanmoins, la complexité des systèmes étudiés rend parfois difficile l'étude des phénomènes sous-jacents. Il faut avoir conscience de cette complexité et du fait que de nombreux paramètres peuvent agir sur le comportement à étudier. De ce fait, les résultats d'une expérience doivent systématiquement être présentés avec leur cadre restreint d'étude : on ne peut pas utiliser les mêmes lois pour décrire un solide et un gaz, ou transposer sans grande précaution des résultats sur la génétique des mouches à celle de l'être humain. La démarche scientifique s'applique le mieux quand on peut isoler un petit nombre de comportements à tester, et le dialogue entre théorie et expérimentation fonctionne car il produit des résultats utilisables et interprétables. La rigueur scientifique, qui implique une honnêteté et un sens de l'éthique de la part du chercheur, fait partie intégrante de la démarche scientifique. Les allers-retours entre théories et expérimentations avec une adaptation éventuelle de la théorie sont inhérents à la démarche du scientifique. Bien que le chercheur puisse formuler des hypothèses, il ne doit pas présupposer un résultat, en d'autres termes, le scientifique ne doit pas chercher à prouver le résultat qui l'arrange. Des cas de falsification ou de mauvaise interprétation de résultats ont pu être observés. C'est le cas du télescope BICEP2 (Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization), expérience de mesure de la polarisation gravitationnelle du Fond Diffus Cosmologique (en anglais : Cosmic Microwave Background, CMB).



*Planck CMB : © ESA and the Planck Collaboration*

Elle avait pour objectif de chercher une signature des ondes gravitationnelles dans le rayonnement de l'Univers primordial car cela aurait pu valider certains modèles, dits inflationnaires, permettant d'expliquer la géométrie de l'Univers. Le signal en polarisation observé était en réalité produit par la poussière de notre propre Galaxie, et non par un phénomène lié à l'Univers primordial. Dans ce cas, la démarche scientifique a fait défaut. Le scientifique doit avoir des vérifications indépendantes, procéder à l'observation d'une autre prédiction, et croiser les résultats. Les extrapolations doivent être prudentes.

OBSERVATION D'UN PHÉNOMÈNE → ÉLABORATION D'UNE HYPOTHÈSE / THÉORIE →  
 EXPÉRIMENTATIONS → INTERPRÉTATION →  
 REFORMULATION DE LA THÉORIE / AMÉLIORATION DU MODÈLE / CHANGEMENT DE PARADIGME →  
 EXPÉRIMENTATIONS (AMÉLIORATION OUTILS, RÉDUCTION MARGE ERREUR, ETC.) →  
 INTERPRÉTATION → ...

**Les réponses que peuvent parfois apporter les scientifiques ne sont pas nécessairement fermes. C'est un principe de prudence car il n'y a pas de raison de dire que les connaissances sont fermes et définitives. La Science évolue constamment au fil des expériences qui s'affinent de plus en plus. Des expériences peuvent mener à des reformulations ou changements de théorie, modifications de modèle ou à des changements de paradigme comme dans le cas de la Relativité.**



## Exemples historiques de la démarche scientifique

**Les avancées technologiques de ces derniers siècles permettent d'imaginer et de créer des outils qui pourront valider ou infirmer une théorie « rapidement ». Cela n'a pas toujours été le cas, à une époque où la civilisation ne disposait pas d'autant de moyens, les expériences de pensée et les dogmes (références à des textes ou écrits) faisaient loi. Dans l'Antiquité, les théories avancées par Aristote par exemple n'étaient pas expérimentées par « une communauté scientifique » (qui n'existait pas !). Il était mal vu, voire considéré comme « sale » de procéder à des tâches réservées aux artisans et techniciens !**

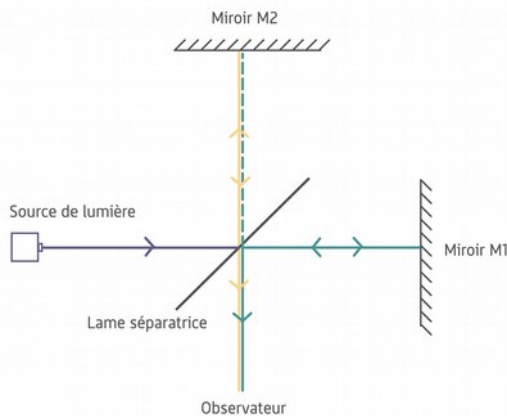
Le XIX<sup>e</sup> siècle est celui de la multiplication des expériences afin d'élaborer des statistiques visant à valider les hypothèses des scientifiques. Avant cela et en biologie par exemple, si une expérience était correctement menée, on considérait que son résultat était recevable tel quel, sans procéder à une multiplication d'expériences ou de remise en question. Pour l'exemple, Aristote et Ptolémée soutenaient la théorie géocentrique, et cette idée était acceptée sans qu'aucune expérience ne soit menée. Puis, grâce aux travaux de Copernic, il a été démontré que la Terre tourne autour du Soleil. Plus tard, Galilée faisait des observations et définissait les premiers principes qui justifiaient l'héliocentrisme. Il faut citer aussi Tycho Brahe dont les expériences raffinées ont permis ensuite à Kepler de formuler les premières lois de la mécanique céleste, avant que Newton ne les réinterprète dans le cadre de la gravitation universelle, en les unifiant avec les lois de la chute des corps. Maintenant, l'affirmation du modèle héliocentrique n'est plus dogmatique, mais est devenue une « vérité scientifique » grâce à la démarche scientifique au fil des siècles. Voici quelques exemples d'expériences où la démarche scientifique a permis des avancées majeures, parfois contre-intuitives !

**La découverte de Neptune** est un bel exemple de l'application de la démarche scientifique : après avoir observé le mouvement d'Uranus, une planète découverte en 1781, les astronomes remarquèrent des irrégularités par rapport à la théorie existante (la théorie de la gravitation de Newton, décrivant le mouvement des corps célestes). Le Verrier, après quelques calculs, en vint à supposer l'existence d'une nouvelle planète dont il communiqua les coordonnées précises. Le jour même où l'astronome Galle reçut ces coordonnées, il découvrit la planète ! Cet exploit valut à Le Verrier une fantastique renommée. Les calculs ne suffisent cependant pas, ils doivent toujours être validés par l'expérience. Par la suite, Le Verrier observa également des anomalies dans le mouvement de Mercure, et fort de sa réussite pour la découverte de Neptune, il en déduisit l'existence d'une planète hypothétique qu'il baptisa « Vulcain ». Les astronomes ne la trouvèrent pas et pour cause : les « anomalies » observées ne se comprendront qu'avec un changement complet de paradigme : l'arrivée de la Relativité Restreinte !

**L'expérience de Michelson et Morley** réalisée en 1887, reposait sur le postulat suivant : un milieu matériel comme l'air, l'eau ou un corps solide se met à vibrer lorsqu'il est parcouru par une onde sonore. Il était alors naturel de penser que la lumière avait besoin d'un milieu matériel pour se propager. Ce milieu matériel potentiel porterait le nom d'éther. La vitesse se propagerait dans ce milieu à une vitesse  $c$  de l'ordre de 300 000 kilomètres par seconde. Pour que la lumière des étoiles puisse nous parvenir, l'éther devrait remplir tout l'espace. Il ne devrait pas non plus être solide, sinon le mouvement des planètes serait ralenti, mais il devrait pourtant être très rigide pour que la vitesse de propagation soit si grande. Pour tester l'existence de cet éther, le principe de l'expérience de Michelson et Morley consistait à comparer les temps de parcours mis par la lumière pour faire des allers-retours de distances identiques dans des directions parallèle et

perpendiculaire à la direction qu'a la Terre en tournant autour du Soleil. Ils construisirent le premier interféromètre, qui porte maintenant leurs noms.

### Fonctionnement d'un interféromètre

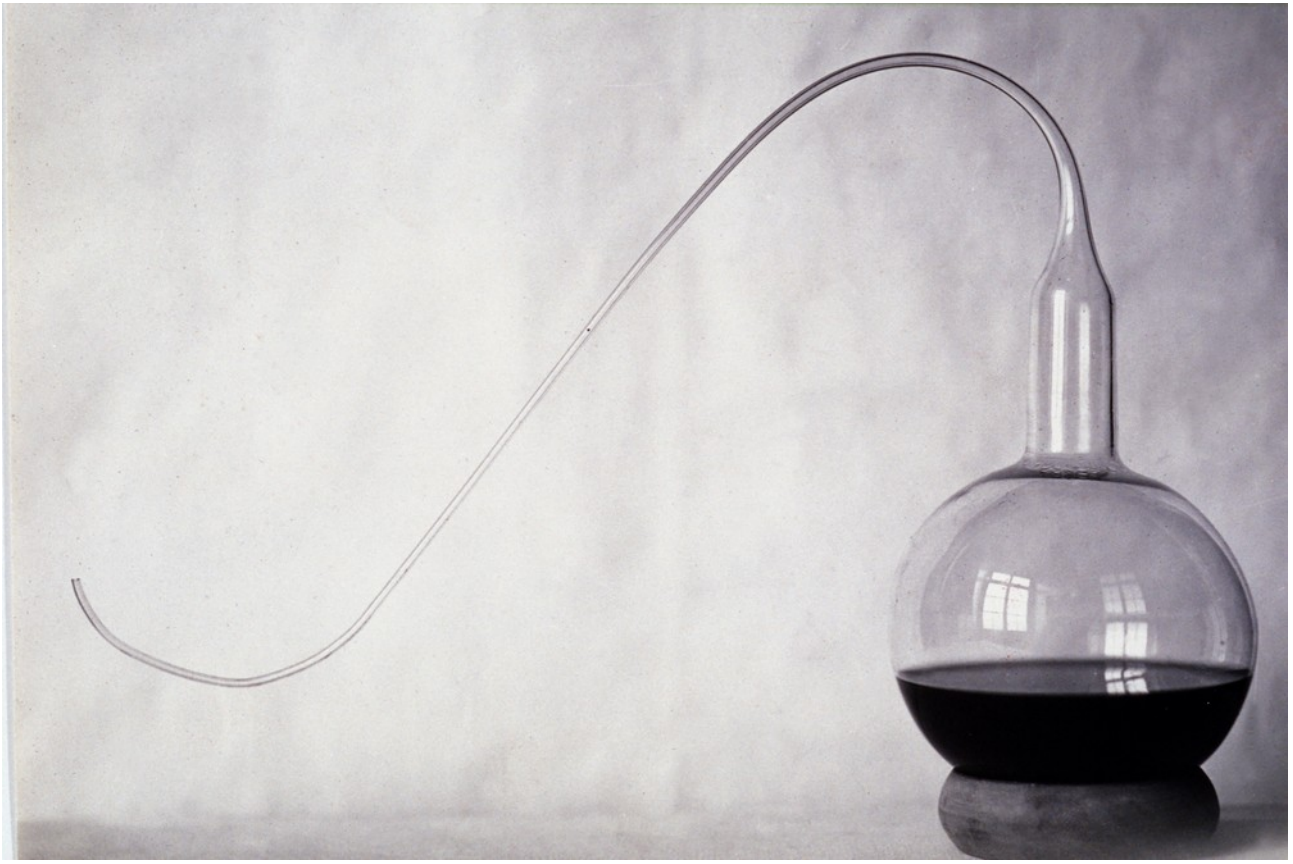


*Fonctionnement d'un interféromètre* Un faisceau lumineux arrive dans l'interféromètre, est scindé en deux par la lame séparatrice. Une partie du faisceau rencontre un premier miroir tandis que l'autre partie du faisceau rencontre un second miroir placé perpendiculairement au premier. Dans le cadre de l'expérience de Michelson et Morley, une partie du faisceau va dans la direction du « courant d'éther » (la Terre se déplaçant autour du Soleil au sein d'un éther supposé immobile par rapport au Soleil), l'autre transversalement à ce courant. Un écran placé à la sortie de l'interféromètre recueille les figures d'interférence. L'interféromètre est ensuite tourné de  $90^\circ$  de sorte que le premier miroir soit placé perpendiculairement au courant d'éther.

Cette expérience fondatrice, pourtant porteuse d'un « résultat négatif » (la non-existence de l'éther), a permis une remise en cause de la théorie de la Relativité de Galilée pour conduire à la Relativité Restreinte.

**Les travaux de Louis Pasteur** sur les origines de la vie consistaient en une démarche hypothético-déductive. Son hypothèse qui consistait à dire que la vie se crée par contamination avait fait l'objet d'expériences multiples :

- l'utilisation de flacons en col-de-cygne crée un chemin qui permettrait d'affirmer ou d'infirmer sa thèse. En effet, si l'air était effectivement contaminé par des germes, cette technique permettrait de les récupérer et les étudier car ils se fixeraient sur les parois ;
- si effectivement l'air comportait des germes, il devrait y en avoir plus dans l'air « sale » que dans l'air propre. Une vingtaine de ballons furent donc utilisés en trois endroits en France pour confirmer cette hypothèse.



*Ballon à col-de-cygne utilisé par Louis Pasteur © Institut Pasteur / Musée Pasteur*

Il fallut à Pasteur six années de recherches pour démontrer la fausseté sur le court terme de la théorie selon laquelle la vie pourrait apparaître à partir de rien, et les microbes être générés spontanément.



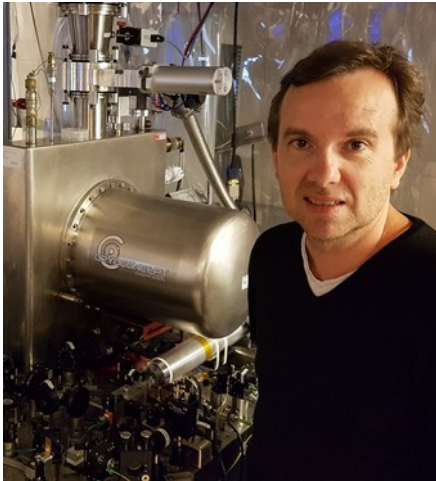
## Physique quantique & Astrophysique

### Rencontre avec Antoine Heidmann, directeur de recherche au CNRS

Ma vision de la démarche scientifique consiste en des allers et retours entre expérimentations et validations théoriques. En effet, un théoricien a besoin d'avoir une confirmation expérimentale de ses modèles théoriques tandis qu'un physicien expérimental doit maîtriser les outils théoriques pour comprendre les résultats expérimentaux qu'il obtient. Au laboratoire où nous travaillons dans le domaine de la physique quantique, la plupart des chercheurs ont cette double formation de théoricien et d'expérimentateur : seulement 20 % d'entre nous sommes purement théoriciens. Ces allers et retours se retrouvent dans la démarche scientifique : les expériences sont construites pour valider ou infirmer les théories ; ces dernières sont ensuite modifiées, précisées, ou de nouvelles théories émergent en réponse aux résultats des expérimentations. Mon travail de recherche porte sur les conséquences de la physique quantique dans les mesures, notamment lorsque l'on utilise des faisceaux laser pour effectuer ces mesures. C'est le cas par exemple dans les détecteurs d'ondes gravitationnelles LIGO et VIRGO, où des faisceaux laser sont utilisés pour détecter les infimes perturbations produites par le passage sur Terre d'une onde gravitationnelle. La nature quantique de la lumière se traduit par des bruits dans la mesure, préjudiciables à la détection de l'onde. Je travaille notamment à l'analyse, au contrôle et à la réduction de ces bruits intrinsèques à la mécanique quantique.

Les ondes gravitationnelles viennent d'être observées par ces détecteurs, avec une première détection obtenue en 2015 suivie de plusieurs observations depuis lors. Ces résultats sont majeurs et confirment une fois de plus la théorie de la Relativité Générale d'Albert Einstein. Notre objectif aujourd'hui est de combattre les bruits quantiques dans les détecteurs pour améliorer encore leur sensibilité et ouvrir la voie vers une nouvelle méthode d'observation de l'Univers par l'intermédiaire des ondes gravitationnelles, une véritable « astronomie gravitationnelle ». De manière plus générale, les travaux de recherche dans le domaine de la physique quantique s'orientent aujourd'hui vers la création d'outils et d'appareils qui vont faire partie de notre vie de tous les jours. Les chercheurs développent ainsi des « ordinateurs quantiques » basés sur la physique quantique, ou encore de nouveaux modes de communication impossibles à espionner car basés sur des méthodes de « cryptographie quantique » inviolables. C'est essentiellement la liberté de choisir mes recherches qui m'a orienté vers le domaine scientifique académique. Cette liberté permet d'explorer de nouveaux domaines sans trop de contraintes, même si aujourd'hui la recherche devient de plus en plus gouvernée par des objectifs à court terme et par la définition de directions de recherche prioritaires, ce qui est regrettable. Nous gardons toutefois la liberté d'explorer tout le potentiel d'un résultat scientifique dans les domaines dans lesquels nous en voyons une utilisation potentielle.

## Rencontre avec Pierre-François Cohadon, maître de conférences à l'ENS



Mon sujet de recherche a connu beaucoup de succès ces dernières années : je travaille sur l'observation des ondes gravitationnelles ; des ondes qui lors de leur passage sur Terre provoquent des variations de longueurs de nos détecteurs kilométriques de l'ordre du milliardième de milliardième de mètre ! En particulier, mon travail consiste à identifier et à réduire les bruits qui perturbent la détection de ces ondes. Ils peuvent être de plusieurs origines : thermique, acoustique, liée à la nature quantique de la lumière, etc. La démarche scientifique est présente dans tous mes travaux, mais peut prendre diverses formes. De la rigueur est bien sûr obligatoire pour vérifier et analyser les résultats des expériences LIGO / VIRGO, mais mon travail, avec plusieurs allers-retours entre théories, expériences et

simulations, peut parfois aussi s'apparenter à du bricolage pour régler des problèmes techniques apparus sans crier gare. Je suis un expérimentateur, mais je peux me transformer en théoricien s'il le faut. Comprendre la théorie est un grand atout : quand l'expérimentateur comprend parfaitement les phénomènes qui se produisent, il interprète beaucoup plus facilement ses résultats. Les ondes gravitationnelles sont un formidable outil de test de la Relativité Générale, une théorie qui s'est au final avérée fort utile au quotidien. Elle est en effet indispensable au positionnement GPS. Sans elle, la position calculée serait fautive de plusieurs dizaines voire centaines de mètres !

## Astrophysique

### Rencontre avec François Levrier, maître de conférences à l'ENS



Ne pouvant mener d'expérience sur place, les astrophysiciens ne sont pas des expérimentateurs, sauf dans le cas rare de manipulations réalisables sur Terre. Par exemple, les conditions (pression, température) proches de celles qui règnent dans le milieu interstellaire sont reproduites sur Terre. On y place des échantillons dont la surface simule celle des grains de poussière interstellaire, en les bombardant d'atomes, on observe et mesure les différentes espèces chimiques (molécules) qui se forment à la surface. J'ai procédé à l'analyse de données sur la polarisation du ciel vu dans le domaine des micro-ondes (quelques centaines de GHz) de la mission *Planck*. Les données de la mission *Planck* prennent la forme de cartes du rayonnement électromagnétique provenant de tout le ciel, et on cherche à en tirer des informations sur les sources de ce rayonnement. À ces longueurs d'onde, il s'agit

essentiellement du Fond Diffus Cosmologique (qui est constitué des photons traçant des époques lointaines, 380 000 ans seulement après le Big Bang) et surtout de l'émission des poussières de notre galaxie, qui sont chauffées par les étoiles. Ce dernier rayonnement est en partie polarisé, c'est-à-dire que le champ électrique qui se propage oscille dans une direction privilégiée. Cette direction de polarisation est perpendiculaire à celle du champ magnétique de la galaxie, dans lequel s'alignent les poussières, un peu comme des petits aimants. La direction de la polarisation nous renseigne donc sur la géométrie de ce champ magnétique, dont on sait par ailleurs qu'il a un rôle important à jouer dans le fonctionnement de la « machinerie galactique » (en régulant par exemple le nombre d'étoiles qui se forment dans la galaxie par an). La fraction du rayonnement qui est polarisé est assez faible (20 % au plus) et sa valeur en chaque point du ciel est a priori déterminée par l'orientation du champ magnétique, mais aussi par l'efficacité d'alignement des grains (leur probabilité d'être plus ou moins alignés dans le champ magnétique). Nous avons analysé statistiquement cette direction de polarisation et la fraction de polarisation, et nous les avons comparées à des modèles numériques des écoulements du gaz et des poussières interstellaires. Nous avons ainsi découvert en particulier que le champ magnétique seul était responsable de ces propriétés de polarisation, et que nous ne pouvions déterminer si les propriétés d'alignement des grains changeaient d'une région à l'autre. Nous avons aussi montré que dans les régions les plus denses du milieu interstellaire, le champ magnétique avait tendance à être perpendiculaire aux filaments de matière, et plutôt parallèle à eux dans les régions les plus diffuses. Ces observations fournissent des contraintes que les modèles d'évolution de la matière interstellaire se doivent d'être capables de reproduire pour asseoir leur crédibilité. L'analyse des données nécessite d'avoir des idées pour les interpréter. Nous avons atteint un niveau de bruit minimal avec la mission *Planck*, il faut maintenant améliorer le modèle pour mieux comprendre les données relatives à la polarisation.

### Son conseil

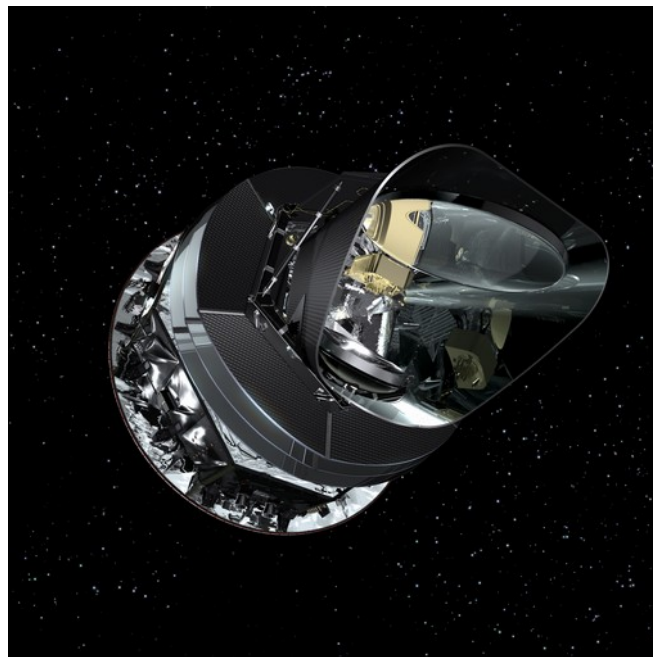
**« Il ne faut pas écouter celui qui parle le plus fort. Les scientifiques vont dans les écoles et rencontrent des gens pour démythifier la Science. Du côté des scientifiques, il faut expliquer**



***et ne pas hésiter à simplifier le discours (mais pas à outrance). Il nous faut expliquer comment fonctionne la démarche scientifique pour développer l'esprit critique en étant ouverts et précis. Il nous faut expliquer que même s'il n'y a pas d'utilité directe, cela peut en avoir dans 20 ou 30 ans. La Science fait tout de même avancer la compréhension du monde ! »***

### ***La mission Planck***

Selon le modèle du Big Bang, l'Univers primordial était très lumineux. Si cette lumière s'est considérablement diluée au cours de l'expansion de l'Univers, elle peut toutefois encore être détectée en scrutant le ciel. Ce rayonnement, appelé « Fond Diffus Cosmologique », a été analysé de mai 2009 à octobre 2013 par le satellite *Planck*. Grâce à ces observations, les astrophysiciens ont pu « photographier » l'Univers tel qu'il était 380 000 ans seulement après sa naissance. Avec à la clé, de précieuses informations sur sa naissance, ainsi que sur les mécanismes qui ont présidé à l'apparition des galaxies.



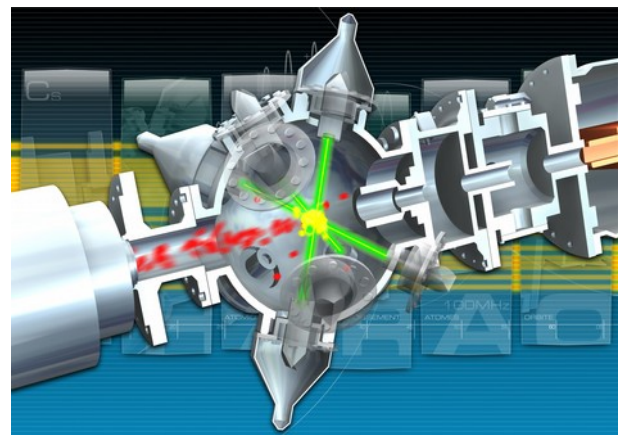
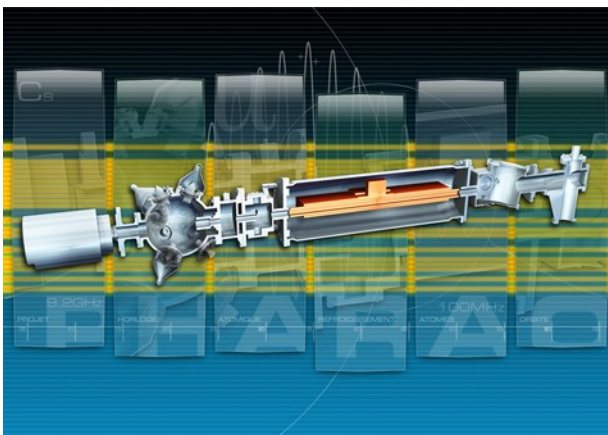
*Vue de face du satellite Planck © ESA - AOES Medialab*

## Zoom sur PHARAO / ACES

Pour élaborer la théorie de la Relativité Restreinte (1905), Einstein partit de deux observations : d'une part, les équations de Maxwell font apparaître une vitesse particulière (la vitesse de la lumière) en contradiction profonde avec la Relativité de Galilée mettant toutes les vitesses sur un même pied d'égalité. D'autre part, le résultat de l'expérience de Michelson et Morley vient confirmer expérimentalement l'existence de cette vitesse universelle de près de 300 000 km/s. Einstein, en utilisant les travaux de Lorentz et Poincaré proposa alors un changement de paradigme qui mélange espace et temps en une seule entité : l'espace-temps. C'est à partir de ce travail que la célèbre formule  $E=mc^2$  voit le jour, lien entre la masse d'un objet et l'énergie qu'il contient.

La théorie de la Relativité Générale publiée en 1915 est une généralisation de la Relativité Restreinte. Cette nouvelle théorie décrit la gravitation comme l'effet de la courbure de l'espace-temps. Elle vient remplacer la gravitation classique comme la Relativité Restreinte avait remplacé la Mécanique Galiléenne. À l'époque, cette théorie reçut peu de soutien, et c'est une preuve du fonctionnement de la démarche scientifique : comme il n'était pas possible de la tester, il est normal que de nombreux chercheurs aient exprimé leur scepticisme ! De nombreuses preuves expérimentales sont cependant apparues au cours du XX<sup>e</sup> siècle et ont validé cette théorie, dont très récemment la découverte des ondes gravitationnelles.

Le projet PHARAO / ACES va être déployé pour tester les prédictions de la Relativité Générale. ACES est une nouvelle génération d'horloge atomique qui profite de l'environnement en micropesanteur de l'ISS. La charge utile ACES distribuera une base de temps stable et précise qui sera utilisée comme référence pour les comparaisons de plusieurs horloges au sol avec ACES comme relai. Il s'agit d'une horloge atomique basée sur des atomes de césium refroidis par laser.





## Fonctionnement d'une horloge atomique

### Fonctionnement d'une horloge atomique

Qu'est-ce qu'une horloge atomique ? Partons d'abord d'atomes, environ 100 millions, qui sont piégés à l'intersection de six faisceaux laser (deux dans chaque direction de l'espace). Dès que les atomes approchent du piège, ils sont vite refroidis, à 1 microKelvin ( $\approx -273,15^\circ\text{C}$ ), et leur vitesse est de l'ordre du centimètre par seconde. On sélectionne les atomes qui se trouvent dans un état quantique particulier, et on les transfère dans une cavité micro-ondes. Les atomes restants sont écartés. Ceux sélectionnés vont interagir deux fois avec le champ micro-ondes, dans deux zones spatialement séparées dites de Ramsey\*. Après ces interactions, ils entrent dans la zone de détection où on mesure à nouveau l'état quantique des atomes. Comparer cette information à la donnée de l'état initial permet de mesurer précisément le temps mis pour faire une oscillation, et créer ainsi une référence des temps.

*\* La méthode à deux zones d'interaction de N. Ramsey conduit à un signal d'interférences atomiques pour lequel l'écart entre franges d'interférence est inversement proportionnel au temps de vol des atomes entre les deux zones. Plus les atomes sont lents, plus les franges sont fines et meilleure sera l'horloge.*

### Comment refroidir les atomes avec des lasers ?

À température ambiante, les atomes et molécules ont des vitesses moyennes de l'ordre de 500 m/s, soit plus de 1500 km/h ! Les forces exercées par des faisceaux laser sur des atomes permettent de diminuer leur vitesse moyenne de déplacement (ralentissement) et leur vitesse d'agitation désordonnée (refroidissement). Le faisceau laser exerce sur l'atome une force de pression de radiation considérable : l'accélération (ou la décélération) communiquée à l'atome est de l'ordre de 100 000 fois l'accélération de la pesanteur. Utiliser une horloge atomique pour tester la Relativité Générale a pour avantage de bénéficier d'une stabilité intrinsèque des niveaux d'énergie d'un atome et de pouvoir en contrôler les mouvements. Le refroidissement laser quant à lui va contribuer à ralentir la vitesse des atomes, ce qui va permettre de longs temps de mesure et d'avoir une observation fine des résonances.



## La démarche scientifique de nos jours

### La coopération mondiale

Lorsqu'une théorie est validée par une série d'expériences, suivre la démarche scientifique suggère de tester la théorie dans une limite encore jamais testée : une énergie plus grande, des particules plus petites, des étoiles plus massives, etc. Monter de tels projets devient de plus en plus onéreux (atteignant plusieurs milliards d'euros), qu'un pays seul ne peut pas supporter. Se créent alors naturellement des projets internationaux afin de partager les coûts mais aussi les bénéfices de telles expériences de l'extrême. La communauté scientifique européenne est particulièrement soudée, et propose de nombreux financements communs à tous les États membres de l'Union européenne dans l'optique d'être compétitive avec la recherche américaine.

Néanmoins, il subsiste toujours un aspect compétitif inhérent à la recherche nationale voire locale autour d'un même programme scientifique. Concernant la détection d'ondes gravitationnelles par exemple, la coopération internationale a été excellente. Pour rappel, trois détecteurs sont déployés : un en Europe et deux aux États-Unis. Cela fait dix ans que le partage de données se fait sans friction. Cette harmonie se justifie par le fait que les besoins sont mutuels pour faire avancer la recherche. La proximité affective des intervenants pour les pays en collaboration joue également. Aujourd'hui, il faut cependant savoir qu'il existe des domaines où la collaboration mondiale est moins développée pour des raisons de compétitivité économique et de sécurité.

### Préoccupations de chercheurs

- La démarche scientifique est soumise aux contextes économiques et politiques qui la biaisent. Par exemple, les contrats demandés pour financer nos projets de recherche sont établis sur des durées allant de 3 à 5 ans alors qu'une expérience scientifique a une durée de vie souvent beaucoup plus longue. Ainsi, la construction des dispositifs VIRGO et LIGO a débuté au début des années 1990 alors que les premières détections d'ondes gravitationnelles n'ont été obtenues qu'en 2015. Cela a nécessité un support sur le long terme, notamment du CNRS, très différent de la vision à plus court terme imposée par beaucoup de financements aujourd'hui.
- Les perspectives sur la qualité de l'enseignement dispensé aujourd'hui, la difficulté d'accéder à des postes permanents en recherche, sont autant d'indices supplémentaires qui alimentent nos craintes.
- La majorité des chercheurs applique une démarche scientifiquement raisonnable. La perception des résultats par le grand public, dépendante de son traitement par les médias est des fois préoccupante. Ces derniers ont souvent tendance à faire du sensationnel là où les scientifiques restent précautionneux car conscients d'être aux frontières de la connaissance. Il y a une marge de progrès sur la communication scientifique, la communauté scientifique ne peut se permettre d'être trop affirmative quand cela touche à des domaines encore inconnus sur lesquels elle travaille encore. Les scientifiques trouvent regrettable de voir des théories bancales mises sur un même pied d'égalité que les théories scientifiques bien établies.



## Appliquer la démarche scientifique au quotidien

- « *Mesurez, quantifiez plus, et dialoguez avec tout un chacun. Concernant le climat par exemple, on ne peut conclure sur le réchauffement climatique en ne se basant que sur les températures estivales de 2018 à Paris, il y a bien d'autres indices à prendre en considération.* » **Michel Morange**
- « *Soyons vigilants quant à la vision caricaturale qui est véhiculée dans les médias. Nous sommes passés en quelques années du stéréotype du savant fou en blouse blanche au sensationnel. La démarche scientifique peut s'observer dans la vie de tous les jours et n'est pas aussi sensationnelle que ce que l'on peut observer dans les reportages. Par exemple, lorsqu'un individu procède à un travail de bricolage, la démarche scientifique s'exerce : le problème est identifié, des solutions sont envisagées pour répondre à la difficulté observée, et l'on procède à la résolution physique du problème. Par ailleurs, des actions sont menées pour ouvrir à la démarche scientifique : nous intervenons dans les lycées et il existe des initiatives comme le Café des Sciences qui s'émancipe du formatage imposé par les médias en laissant libre cours à la parole des scientifiques.* » **Antoine Heidmann**
- « *Des personnes peuvent n'avoir aucun titre scientifique ni aucun diplôme scientifique mais qui par contre peuvent avoir une démarche parfaitement rigoureuse et qui méthodologiquement est une vraie démarche scientifique. Ce qui compte le plus c'est la démarche. La validation d'une hypothèse ou d'un fait ne dépend pas de la personne qui affirme, de ses titres ou de ses diplômes, mais de la possibilité de vérifier.* » **Henri Broch**

## Incertitudes et méconnaissances

### L'allégorie de Flatland peut permettre d'expliquer l'humilité propre à la Science :

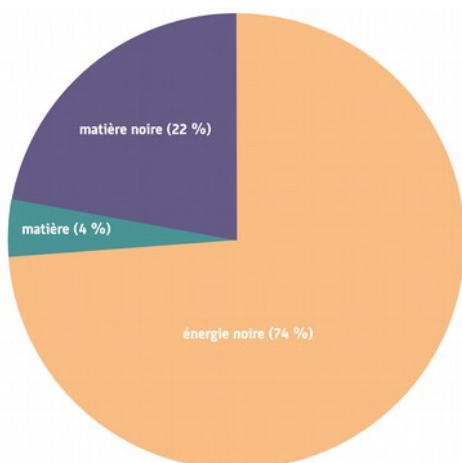
Imaginons un monde à deux dimensions sur lequel apparaîtrait un point qui s'agrandirait en cercle, ce cercle s'agrandirait puis rétrécirait par la suite jusqu'à devenir un point puis disparaîtrait. Les habitants de ce monde en deux dimensions (Flatland) ne comprendraient pas a priori ce phénomène alors qu'un observateur en trois dimensions verrait une sphère traverser ce monde en deux dimensions. Les scientifiques rencontrent les mêmes difficultés en se confrontant aux limites de la compréhension de certains phénomènes physiques.

### Existe-t-il de la vie ailleurs ?

La question de l'existence d'une vie extraterrestre et de la forme qu'elle pourrait prendre, tout le monde se la pose. Les chercheurs, toujours avec cette démarche scientifique cherchent à détecter des exoplanètes en trouvant de nouvelles méthodes toujours plus raffinées, étudient leurs propriétés comme la composition de leur atmosphère pour y détecter d'éventuelles molécules organiques qui pourraient traduire la présence de vie !

### De quoi est composé l'univers ?

À ce jour, plusieurs missions sont en développement pour lever le voile sur certaines incertitudes sur des phénomènes observés :



#### Matière noire

Les galaxies de notre Univers tournent si vite que la gravité produite par la matière observable qu'elles contiennent ne peut pas les faire tenir ensemble. Il en va de même pour les amas de galaxies. C'est pourquoi les scientifiques pensent qu'intervient un élément invisible et encore inconnu : quelque chose que nous n'avons pas pu encore détecter directement donne à ces galaxies une masse supplémentaire, ce qui produit le surplus de gravité dont elles ont besoin pour ne pas se défaire. Cette matière est appelée « matière noire ».

#### Énergie noire

L'Univers est en expansion. Or la gravitation étant une force attractive, la cohésion des amas de galaxies devrait freiner cette expansion au cours du temps. Non seulement on observe que cette



expansion ne freine pas, mais elle accélère ! Les physiciens cherchent à lever ce paradoxe, et proposent l'existence d'une énergie invisible avec nos télescopes : l'énergie noire.

## Environnement, climat

Les questions relatives à l'environnement sont évidemment des axes de recherche majeurs pour les scientifiques. Des recherches sur le climat demandent par exemple des compétences dans de nombreux domaines comme la physique, la chimie, les géosciences. Cela peut aller de la recherche fondamentale comme l'étude des phénomènes atmosphériques cycliques à la recherche appliquée en cherchant à développer des cellules solaires plus performantes.

Les scientifiques sont très sensibles à ces problématiques, et peuvent être frustrés du peu d'écoute que les politiques accordent à ces enjeux. Sur un problème de société comme celui-ci, il est indispensable que la démarche scientifique s'exerce, afin que les conclusions tirées soient sans ambiguïté. L'objectif du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) est justement de fournir des évaluations détaillées de l'état des connaissances scientifiques, techniques et socio-économiques sur les changements climatiques, leurs causes, leurs répercussions potentielles et les stratégies de parade.

**Voici plusieurs de leurs prédictions issues du [cinquième Rapport d'évaluation du GIEC \(consultable librement sur le site de l'IPCC\)](#) :**

- « Il est quasiment certain que, dans la plupart des régions continentales, les extrêmes chauds seront plus nombreux et les extrêmes froids moins nombreux aux échelles quotidienne et saisonnière, à mesure que la température moyenne du globe augmentera. Il est très probable que les vagues de chaleur seront plus fréquentes et dureront plus longtemps. Toutefois, des extrêmes froids pourront continuer de se produire occasionnellement en hiver. »
- « Les épisodes de précipitations extrêmes deviendront très probablement plus intenses et fréquents sur les continents des moyennes latitudes et dans les régions tropicales humides d'ici la fin de ce siècle, en lien avec l'augmentation de la température moyenne en surface [...]. »
- « Le niveau moyen mondial des mers continuera à s'élever au cours du XXI<sup>e</sup> siècle [...]. Selon tous les RCP (Representative Concentration Pathway (trajectoires représentatives de concentration)), il est très probable que cette élévation se produira à un rythme plus rapide que celui observé entre 1971 et 2010, en raison du réchauffement accru de l'océan et de l'augmentation de perte de masse des glaciers et des calottes glaciaires. »