

# GUIDE PEDAGOGIQUE



## Pourquoi un guide pédagogique ?

Ce guide a été conçu pour être une aide à l'enseignant dans la préparation de sa classe avant la visite. Il contient une description générale de l'exposition et de ses objectifs, ainsi que les textes des panneaux, une explication des expériences et des documents historiques qui en font partie.

En parcourant ces textes, vous pourrez constater la présence de pictogrammes de différentes couleurs.



Ces couleurs font référence au niveau auquel le panneau en question est accessible. Ainsi, l'orange au secondaire inférieur et le bleu au secondaire supérieur. A l'intérieur du pictogramme est également indiquée la matière à laquelle on fait référence. Vous trouverez à la fin du dossier un récapitulatif des compétences et savoirs abordés, ainsi que les numéros des panneaux correspondants.

Ce dossier donne également des pistes de réflexion et un questionnaire par niveau portant sur l'exposition, destinés aux élèves.

Tout au long de la visite, le guide introduira également des sujets de réflexion et amènera vos élèves à se questionner à propos de la démarche scientifique, de la place des mathématiques dans le monde, ou encore des questions de la relation avec la religion qui apparaissent immédiatement lorsqu'on fait de la cosmologie.

Envie de venir visiter notre exposition avec votre classe ? N'hésitez pas à prévenir l'équipe de votre venue afin que nous vous réservions un accueil sur mesure.

Les visites des expositions sont libres, l'équipe du Confluent des Savoirs ne prévoit pas de visites guidées de celles-ci.



## Présentation de l'exposition

*« Juger que la vie vaut ou non la peine d'être vécue, c'est répondre à la question fondamentale de la philosophie. Le reste, si le monde a trois dimensions (...), vient ensuite. (...) Qui, de la Terre ou du Soleil, tourne autour de l'autre (...) c'est une question futile. (...) »*

*« L'absurde naît de la confrontation de l'appel humain au silence déraisonnable du monde ».*

Albert Camus in *Le Mythe de Sisyphe*

L'exposition démarre par cette pensée existentialiste. Elle y puise sa motivation philosophique sans pour autant y adhérer. Elle la confronte même...

L'Univers est silencieux, mais ce silence n'est pas déraisonnable puisque les scientifiques parviennent à l'interpréter. L'Univers est extrêmement vaste, plus de dix milliards d'années-lumière, plus de dix exposant quatre-vingts atomes. Et pourtant, la Science parvient à lui trouver du sens, à travers des explications et des théories qui fonctionnent.

La démarche scientifique permet donc une réflexion qui va au-delà de ce que la Science nous dit ; elle explique des faits en vue d'apporter des réponses à des questions encore plus abstraites, d'ordre épistémologiques, voire métaphysiques.

La Science explique l'Univers et lui apporte du sens... C'est ce que l'exposition compte vous montrer ! C'est pourquoi elle se présente sous la forme d'un diptyque :

# EXPO DÉCOUVERTE

# l'Univers

faceA faceB

La **faceA** vous fera découvrir la vision moderne de l'Univers, ce qu'on appelle le modèle standard du Big Bang chaud et le modèle de concordance. Elle vous en présentera leurs succès d'un point de vue observationnel, expérimental et théorique.

La **faceB**, quant à elle, vous emmènera vers une multitude de questions que suscitent ces modèles : des questions sur la nature de composantes intrigantes dans l'Univers comme la matière noire et l'énergie sombre ; des questions à la limite de la Physique et d'autres disciplines comme la nature exacte du Big Bang, la nature du temps, le lien entre la Physique et les Mathématiques... et des questions philosophiques qui sont liées à l'étude de la Cosmologie.



# L'exposition

## Les panneaux didactiques

L'exposition se décline en trois niveaux de lecture, elle est donc accessible à tous, peu importe le degré de connaissances et ce, dès l'âge de 12 ans.



1 Basique

2 Intermédiaire

3 Avancé

Le contenu est relativement exhaustif et aborde les thèmes suivants :

faceA :

- 1 Tout un univers par-delà notre galaxie
- 2 Comprendre l'infiniment grand
- 3 L'Univers en expansion
- 4 La fuite des galaxies
- 5 La découverte de l'expansion cosmique
- 6 Une relique du Big Bang : le rayonnement fossile
- 7 Une relique du Big Bang : la nucléosynthèse primordiale
- 8 Le grand jeu des constituants de la matière



faceB :

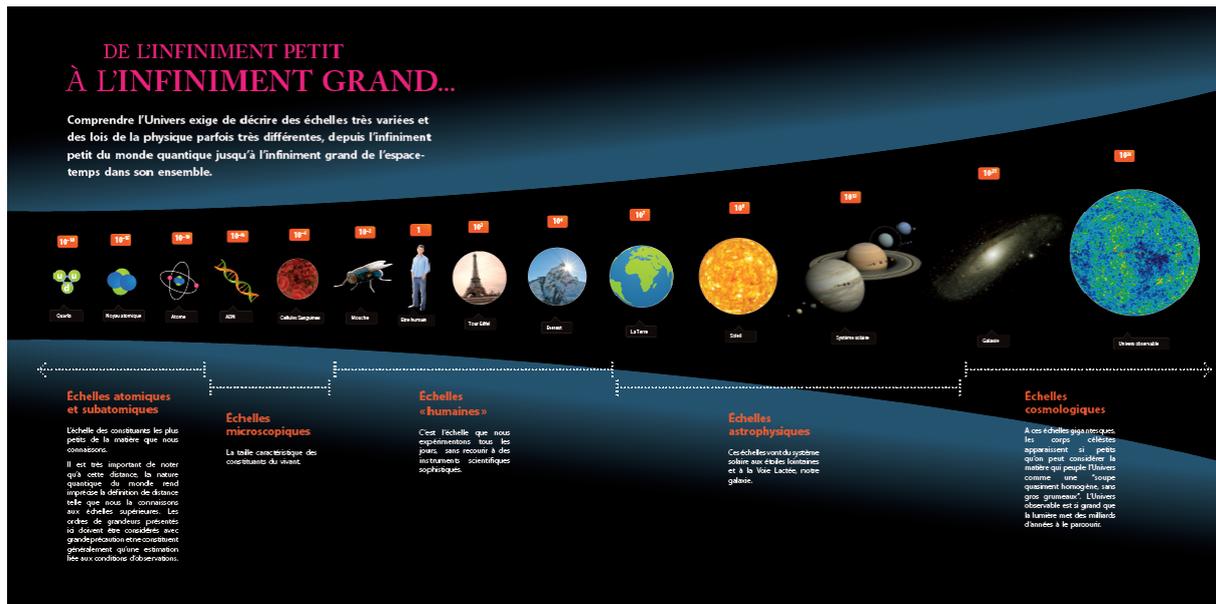
- 9 La face cachée de l'Univers
- 10 La face cachée de l'Univers (suite)
- 11 La forme de l'Univers
- 12 Vivons-nous dans le meilleur des mondes ?
- 13 Quelques autres mystères sur l'origine du monde
- 14 C'est quoi le Big Bang ?
- 15 La foire aux questions du Big Bang



- 16 La foire aux questions du Big Bang, la suite
- 17 La théorie du Big Bang peut-elle tout expliquer ?
- 18 Le monde est-il mathématique ?
- 19 L'universalité des mathématiques
- 20 Big Bang ou Genèse ?

De grandes lignes du temps sur toiles retracent également l'histoire de l'Univers (la formation des étoiles, la formation des éléments chimiques lourds, la formation des planètes...).

Comprendre l'Univers exige de décrire des échelles très variées et des lois de la physique parfois très différentes, depuis l'infiniment petit du monde quantique jusqu'à l'infiniment grand de l'espace-temps dans son ensemble.



Ordres de grandeur :

- $10^{-18}$  : les quarks
- $10^{-15}$  : le noyau atomique
- $10^{-10}$  : l'atome
- $10^{-8}$  : l'ADN
- $10^{-6}$  : les cellules sanguines
- $10^{-2}$  : la mouche
- 1 : l'être humain
- $10^2$  : la Tour Eiffel
- $10^4$  : l'Everest
- $10^7$  : la Terre
- $10^9$  : le Soleil
- $10^{13}$  : le système solaire
- $10^{21}$  : les galaxies
- $10^{26}$  : l'Univers observable



## 1 Tout un univers par-delà notre galaxie :



Les objets qui nous apparaissent petits peuvent être en réalité énormes s'ils sont très lointains : c'est **l'effet de perspective**.

Dans le ciel nocturne apparaissent au côté des étoiles des taches de lumière qu'on appelle des nébuleuses. Il y a un siècle, on croyait encore que toutes les nébuleuses que l'on pouvait observer appartenaient à notre galaxie, et que celle-ci était unique en son genre.

Avec le progrès des techniques, on a pu observer de plus en plus finement ces nébuleuses, et découvrir les détails de leur structure interne. On découvrit ainsi que certaines étaient elles-mêmes des galaxies, semblables à la nôtre, avec leurs milliards d'étoiles, leurs nuages de gaz et de poussière, et leurs bras spiraux.

Il devenait alors clair que de nombreuses nébuleuses étaient en réalité beaucoup plus grandes que ce que l'on croyait et également plus lointaines.



## 2 Comprendre l'infiniment grand



Notre Soleil n'est qu'une étoile parmi des milliards d'autres dans la galaxie, qui est elle-même une des millions de galaxies observées dans les télescopes! Mais nous ne sommes pas désarmés pour autant pour comprendre l'infiniment grand. Les physiciens ont formulé une hypothèse, appelée le principe cosmologique, qui leur permet de construire un modèle pour l'Univers dans son ensemble.

Ce principe se base d'abord sur l'idée d'universalité, c'est-à-dire que nous n'occupons pas une position d'observation privilégiée dans cet Univers immense et qu'à ce titre les expériences que nous effectuons depuis notre caillou perdu dans l'espace sont universelles. Ensuite, les astronomes supposent que l'Univers est identique dans toutes les directions (isotropie).

On peut dès lors voir l'Univers comme une soupe homogène avec des grumeaux.

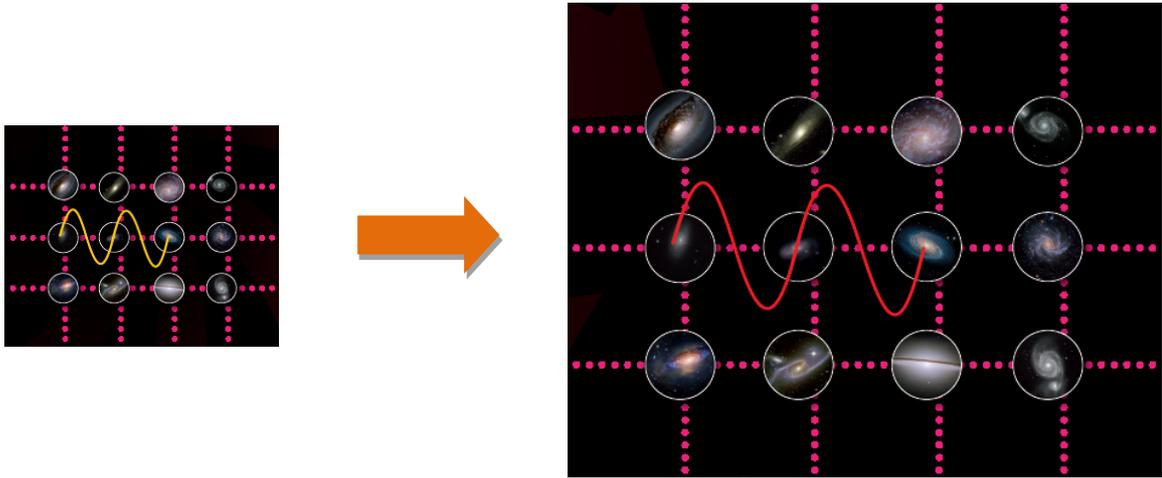
## 3 L'univers en expansion



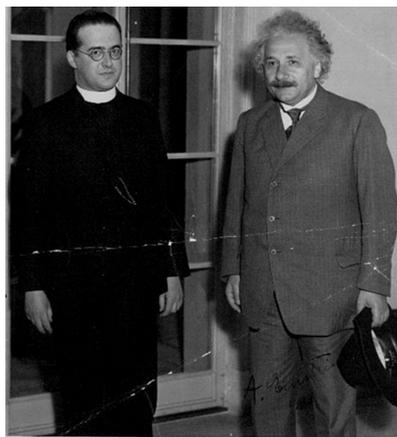
Les premiers modèles d'Univers, formulés entre autres par Einstein, considéraient l'Univers comme immuable, ayant toujours existé, et avec les mêmes propriétés qu'aujourd'hui. On comprit bien vite que ce modèle n'était pas viable. En effet, un univers rempli uniquement de matière finit toujours par s'effondrer sous propre poids, sauf s'il existe un mouvement d'ensemble d'éloignement qui s'oppose à la gravité. Ce mouvement, c'est l'expansion cosmique! La révolution cosmologique, c'est donc que l'Univers subit une constante évolution!

L'expansion cosmique a été suggérée par Georges Lemaître pour résoudre les problèmes d'un Univers immuable. Elle peut se concevoir comme la dilatation uniforme d'une grille au cours du temps, ou celle d'un ballon que l'on gonflerait. Cette grille, ou ce ballon, représente le volume de l'Univers: les observateurs qui y sont pris au piège ont l'impression que tous les points distants s'éloignent les uns des autres.





Mais attention : l'expansion cosmique est une « production d'espace ». L'Univers n'est pas en expansion dans quelque chose de plus grand car l'Univers, c'est tout l'espace! Il peut même être infini et en expansion: le moindre centimètre de vide entre deux galaxies se dilate constamment. Cet effet est très faible, mais comme il existe beaucoup de centimètres entre deux galaxies, il est possible de le mesurer astronomiquement. Par contre, comme cet effet est faible, on ne le ressent pas aux très petites distances de la vie quotidienne.



*Image : Georges Lemaitre (à gauche) et Albert Einstein (à droite)*

### **Comment vérifier cette théorie?**

Cette théorie est appelée « théorie du Big Bang chaud ». L'expansion cosmique prédit un mouvement d'ensemble des galaxies lointaines qui a été depuis longtemps mesuré. Si l'Univers grandit à mesure que le temps s'écoule, cela veut logiquement dire qu'il y a bien longtemps, il était très petit, et aussi très chaud. On a pu également trouver des reliques de ce passé dense et chaud de l'Univers, comme le rayonnement fossile et les éléments chimiques légers.

Mais, si on remonte suffisamment loin dans le temps, l'Univers devient toujours plus petit. A quelle taille l'Univers a-t-il commencé son expansion? Le modèle actuel prévoit une taille initiale exactement nulle! C'est l'instant du Big Bang où l'Univers est supposé avoir été infiniment dense et chaud. C'est surtout le signe que la théorie actuelle n'est pas complète. En effet, un univers de taille nulle et infiniment dense est physiquement impossible !



## 4 La fuite des galaxies

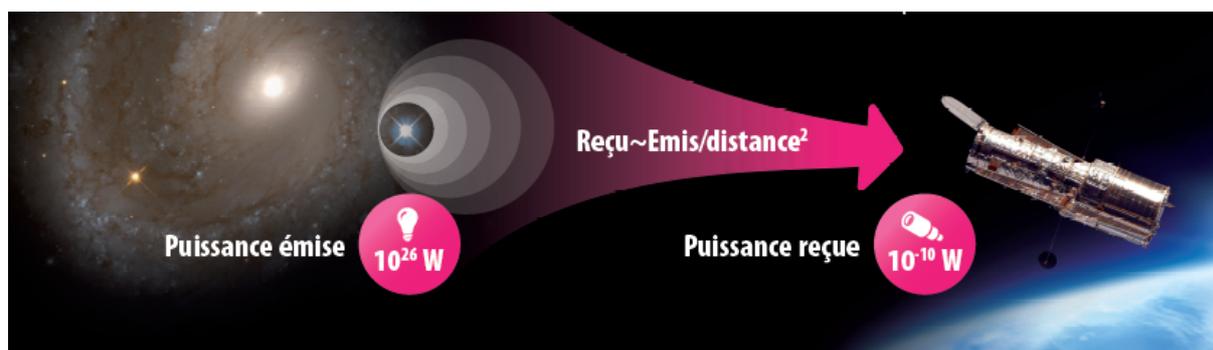


### Comment arpenter notre univers ?

Lorsque l'on observe les régions très éloignées de l'Univers, il existe deux informations qu'il est particulièrement important de pouvoir déterminer: la distance qui nous sépare de chaque région et l'évolution de cette distance avec le temps, c'est-à-dire la vitesse de déplacement.

### Déterminer les distances d'objets lointains

Les astres lointains ne nous envoient pas de SMS pour nous signaler leur position. Déterminer leurs distances par rapport à nous est un problème difficile et délicat. Les astronomes essaient de retrouver dans les galaxies lointaines certains types d'étoiles dont ils connaissent la puissance lumineuse émise. Ils peuvent alors déduire la distance en mesurant la puissance lumineuse reçue. On appelle ces étoiles des chandelles standards.



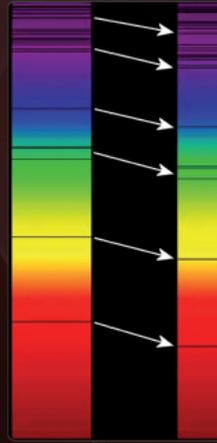
### Mesurer des vitesses d'objets lointains

La couleur que nous percevons lorsque l'on regarde une étoile est liée à la fréquence de la lumière émise. Or, la fréquence que nous percevons peut très bien être différente de la fréquence émise, surtout si l'étoile est en mouvement par rapport à nous: c'est l'EFFET DOPPLER.

Cet effet très général explique par exemple pourquoi le son d'une ambulance qui s'éloigne de nous semble plus grave, alors qu'il est plus aigu lorsqu'elle se rapproche. La situation est analogue dans le cas des étoiles, si ce n'est que les ondes sonores sont alors remplacées par des ondes lumineuses. Une source de lumière qui s'éloigne présentera une lumière plus rouge alors que si elle se rapproche elle aura une lumière plus bleutée. On peut alors déterminer la vitesse de l'astre par la mesure du décalage.



L'observation des étoiles à travers un prisme permet d'identifier les couleurs d'émission caractéristiques de celles-ci.



À cause de l'effet Doppler, on constate un décalage vers le rouge des couleurs observées, qui trahit une vitesse d'éloignement des objets très lointains.

## 5 La découverte de l'expansion cosmique :

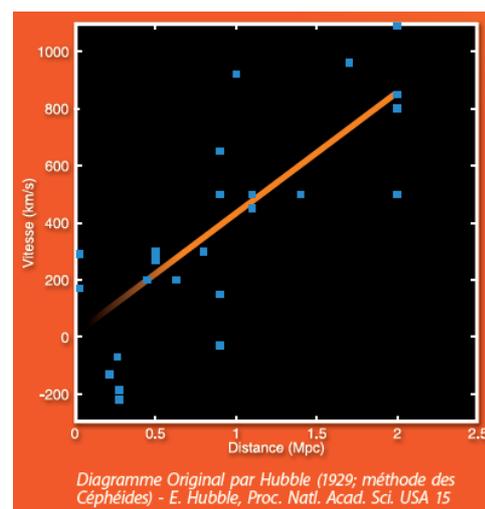


### Le diagramme de Hubble

En 1929, Edwin Hubble publie un catalogue de galaxies en étudiant leur distance et leur mouvement. Il classa ses observations sur un diagramme donnant, sur un premier axe la distance, et sur un second, la vitesse d'éloignement. A sa grande surprise, les positions et les vitesses des galaxies lointaines n'étaient pas quelconques, mais bien proportionnelles. Au plus une galaxie était éloignée, au plus sa vitesse d'éloignement était grande.



Image : Edwin Hubble



## Loi de Hubble : $V=H_0 d$

Cette loi célèbre, appelée loi de Hubble, relie la vitesse  $V$  d'une galaxie lointaine à sa distance  $d$ .  $H_0$  s'appelle la constante de Hubble.

### Georges Lemaître et l'expansion cosmique

En 1927, Georges Lemaître livre une interprétation révolutionnaire des premières données du diagramme de Hubble. Il explique la fuite des galaxies comme une mesure directe de l'expansion cosmique. L'espace enflé, emportant les galaxies lointaines avec lui.

### Des étoiles moins lumineuses que prévu

Au cours des années, le développement des techniques d'observation a permis d'observer des étoiles plus lointaines. Il s'est alors avéré qu'il était nécessaire d'ajuster la loi linéaire de Hubble étant donné que ces étoiles semblaient toutes moins lumineuses que prévu pour un décalage vers le rouge fixé, ce qui se traduit par une vitesse d'éloignement supérieure à celle prévue par Hubble. Cette constatation constitue une première preuve de l'existence d'une accélération de l'expansion cosmique.

Les mesures modernes de l'expansion cosmique permettent ainsi de sonder l'Univers sur des distances bien plus grandes que celles atteintes par Hubble à l'époque. Ce progrès amena une nouvelle découverte: l'accélération de l'expansion cosmique...

## 6 Une relique du Big Bang : le rayonnement fossile



### De la friture sur la ligne

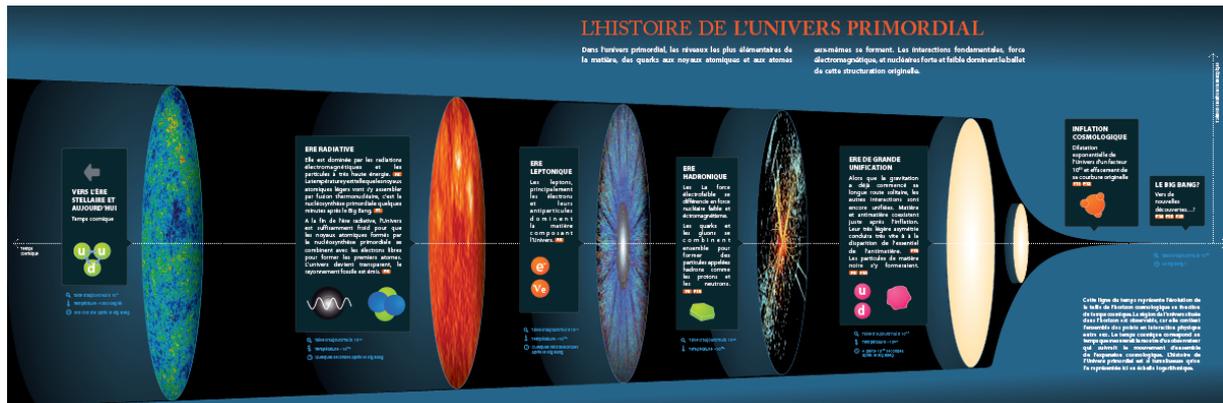
En 1965, deux scientifiques, Penzias et Wilson, effectuaient des mesures de radioastronomie pour le compte des laboratoires américains Bell. En tentant d'éliminer tous les signaux parasites, leur attention s'est portée sur une espèce de « bruit de fond » qu'ils observaient de manière persistante et identique dans toutes les directions: ils avaient en fait découvert le rayonnement fossile.

### L'origine du rayonnement fossile

Le rayonnement fossile s'explique naturellement par le modèle du Big Bang chaud. Lorsque l'Univers était encore jeune, toute la matière qu'il contenait était sous la forme d'une soupe extrêmement chaude, un plasma constitué de gaz ionisé comprenant des noyaux atomiques légers et des électrons libres. Ce plasma était tellement dense qu'il constituait un brouillard opaque: la lumière émise par les particules ne pouvait pas se propager bien loin avant d'être réabsorbée.

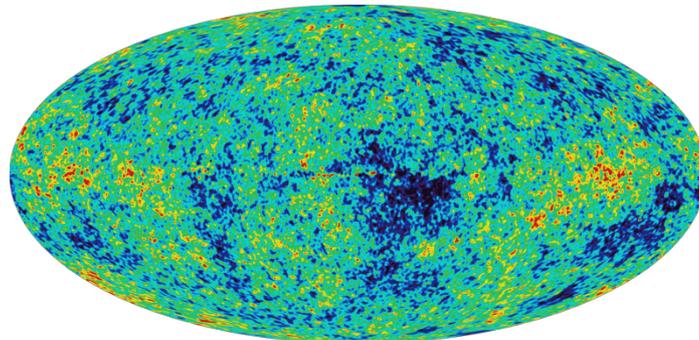


Alors que l'Univers grandissait et que sa température diminuait, les noyaux atomiques capturèrent de plus en plus d'électrons libres pour former des atomes, principalement d'hydrogène et d'hélium. Comme les atomes sont électriquement neutres, le brouillard qui maintenait la lumière captive se lève et l'Univers est alors devenu « transparent ». Cette lumière émergeant du brouillard nous est parvenue considérablement refroidie par l'expansion cosmique, sous la forme d'un rayonnement fossile d'ondes radio.



### Le message caché dans le bruit de fond

L'existence d'un rayonnement fossile avait déjà été envisagée différemment par Georges Lemaître et George Gamow. Mais sa découverte et son étude fine du rayonnement fossile ont confirmé avec succès le modèle du Big Bang chaud, à tel point que deux prix Nobel lui furent consacrés.



Pourtant, le rayonnement fossile est loin d'avoir encore livré tous ses secrets à tel point qu'il fait encore l'objet de nombreuses études. Son étude poussée a contribué à confirmer l'existence de la matière noire et de l'énergie sombre.

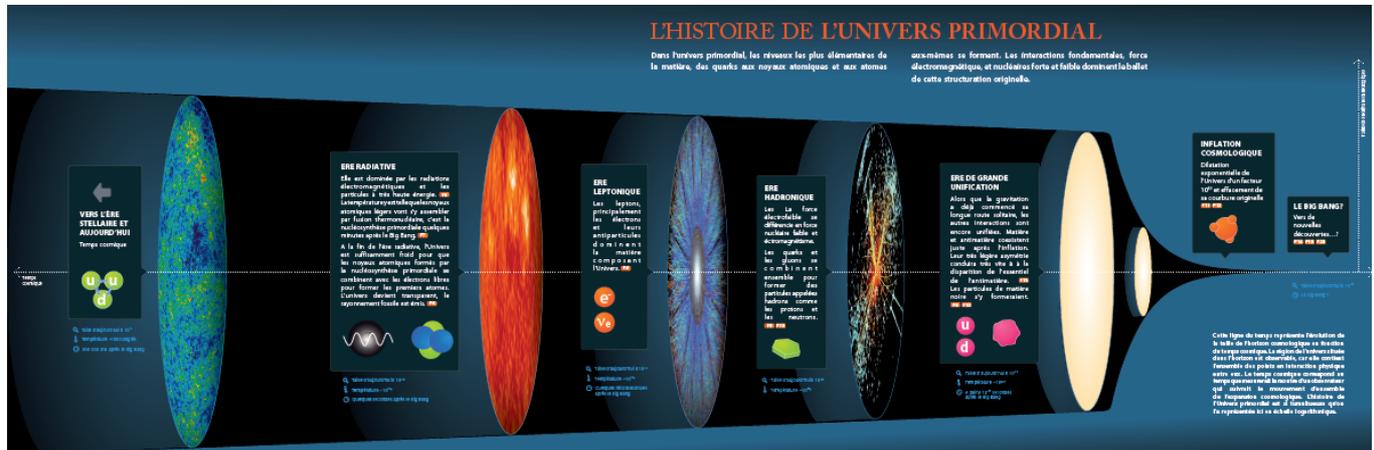


## 7 Une relique du Big Bang : la nucléosynthèse primordiale

Physique

Chimie

### L'origine des premiers noyaux atomiques légers



Au début de l'ère de radiation, avant l'émission du rayonnement fossile, on assiste à la formation des premiers noyaux atomiques des éléments chimiques légers. La température quelques minutes après le Big Bang, était de l'ordre de 10 milliards de degrés, ce qui était suffisamment chaud pour que des réactions de fusion nucléaire se déclenchent mais aussi suffisamment froid pour que les protons et les neutrons se collent entre eux. Ainsi, les protons et les neutrons s'assemblent entre eux pour former les noyaux atomiques des isotopes de l'hydrogène, de l'hélium et du lithium. Ce processus s'arrête très vite car l'expansion cosmique a tôt fait de refroidir l'Univers à une température où les éléments légers ne fusionnent plus. Des éléments chimiques plus lourds comme le carbone (6 protons) ou l'oxygène (8 protons) n'ont pas le temps de se former dans la fournaise de l'Univers primordial. Ces éléments chimiques ne se formeront que bien des millions d'années plus tard, au cœur des étoiles, après que celles-ci se soient elles-mêmes formées.

### Une autre preuve du Big Bang chaud

Dans le cadre du modèle du Big Bang chaud, on peut calculer avec grande précision la quantité d'éléments chimiques légers (hydrogène, hélium, lithium et certains de leurs isotopes) qui ont été fabriqués dans le four de l'Univers primordial. Notamment, on trouve qu'un atome d'hélium est formé pour 12 atomes d'hydrogène.

Or, cette proportion se retrouve dans les observations des atmosphères d'étoiles de notre galaxie: pour 1000 atomes pris au hasard, on trouvera environ 920 atomes d'hydrogène pour 80 atomes d'hélium et un seul atome de tous les autres éléments chimiques (carbone, oxygène, or, fer, etc.). En observant des astres très anciens, qui n'ont pas connu la formation d'autres éléments, on a pu également retrouver la proportion d'éléments chimiques rares comme l'hélium-3 ou de deutérium (des isotopes de l'hélium et de l'hydrogène) prédite par le modèle du Big Bang.



## 8 Le grand jeu des constituants de la matière



### Les pièces du jeu: Les trois familles de particules élémentaires !

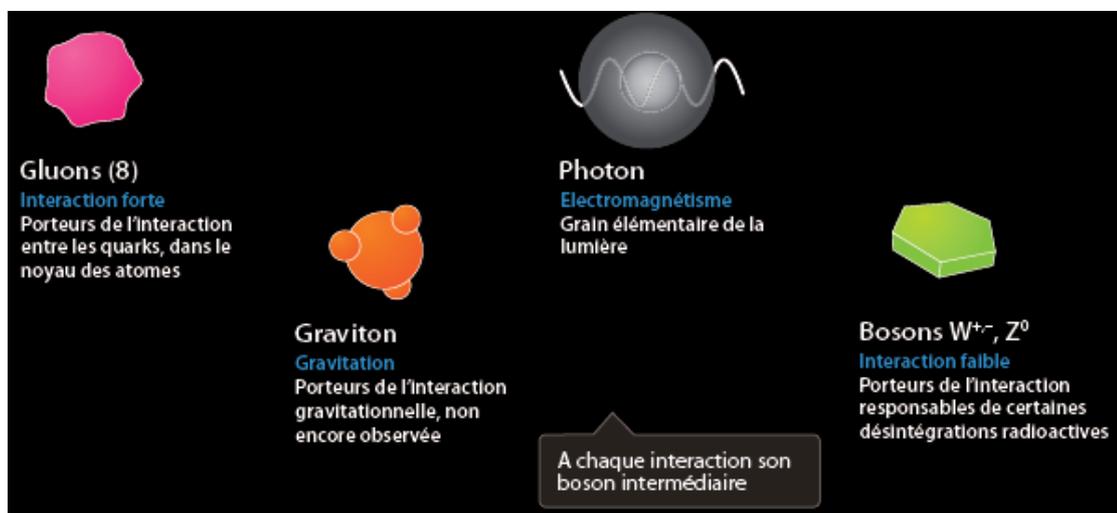
En tentant de comprendre la nature, les scientifiques ont pu identifier 3 familles de particules élémentaires appelées Fermions. Chaque famille comprend deux particules appelées quarks et deux particules appelées leptons. Seule la première famille compose la majorité de la matière ordinaire. Les quarks sont les constituants des particules lourdes comme les protons et les neutrons.

Fermions			
Famille			
Quarks	<b>u</b> Quark up	<b>s</b> Quark étrange	<b>t</b> Quark top
	<b>d</b> Quark down	<b>c</b> Quark charme	<b>b</b> Quark bottom
Leptons	<b>e<sup>-</sup></b> Electron	<b>μ</b> Muon	<b>τ</b> Tauon
	<b>ν<sub>e</sub></b> Neutrino électronique	<b>ν<sub>μ</sub></b> Neutrino muonique	<b>ν<sub>τ</sub></b> Neutrino tauonique

### Les règles du jeu : seulement 4 forces !

La vision actuelle du monde physique consiste à résumer l'ensemble des phénomènes que nous pouvons observer dans l'Univers à seulement 4 interactions.

On distingue les interactions Nucléaire Forte, Électromagnétique, Nucléaire Faible et Gravitationnelle. Si les trois premières de ces interactions se décrivent dans le cadre de la théorie quantique, l'interaction gravitationnelle ne peut être décrite que par la théorie de la relativité générale, qui est une approche complètement différente. Dans le grand jeu d'échec des particules, les trois premières interactions sont comme les règles de déplacement des pièces alors que la gravitation représente un échiquier déformé par le mouvement des pièces.



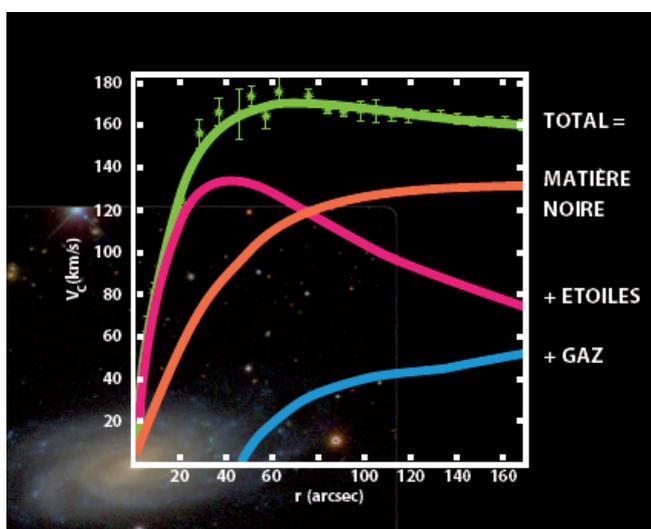
## 9 et 10 La face cachée de l'Univers

Physique

Math

### Des galaxies qui tournent trop vite sur elles-mêmes

Une galaxie est un ensemble de plusieurs centaines de milliards d'étoiles comme le Soleil et de nuages de gaz interstellaire où se formeront plus tard d'autres étoiles et planètes. Le tout est maintenu ensemble par la gravité, qui orchestre le mouvement de rotation de la galaxie sur elle-même. Les astronomes peuvent déduire la distribution de matière dans une galaxie de deux façons: soit directement en observant la distribution des étoiles et du gaz, soit indirectement en mesurant la vitesse des objets et en déduisant la masse qui les fait tourner par la force de gravité.



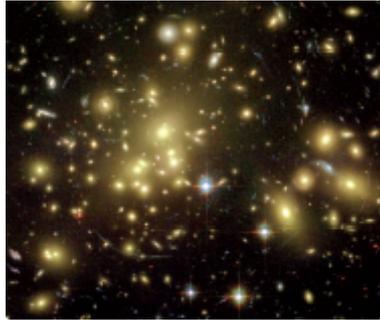
Le problème est que les deux méthodes ne concordent pas: les étoiles et le gaz tournent trop vite en périphérie galactique, si on ne tient compte dans la gravité que de la matière visible dans une galaxie.

### De la matière noire partout dans l'univers

Il y aurait donc beaucoup plus de matière invisible - car elle n'interagit pas avec la lumière - que de matière visible dans une galaxie.

Cette matière noire se révèle présente partout dans l'Univers. En effet, la lumière subit elle aussi la gravitation. On observe donc des déviations de la trajectoire des rayons lumineux : ce sont des mirages gravitationnels. Ceux-ci sont également trop forts que pour pouvoir être expliqués par la matière visible seulement. Le mouvement des galaxies dans les amas de galaxies, la distribution des galaxies dans l'Univers ainsi que l'existence de galaxies très anciennes, qui se sont formées très tôt dans l'Univers, n'est possible que si l'Univers comprend beaucoup plus de matière noire invisible que de matière ordinaire visible.





### Quelle est la nature de la matière noire ?

L'image ci-dessous montre la collision de deux amas de galaxies. On a représenté en rouge la répartition de la matière déduite par observation aux rayons X et en bleu la distribution de matière déduite du phénomène de mirage gravitationnel. La distribution en rouge est donc celle du gaz chaud constitué de matière ordinaire alors que celle en bleu est principalement celle de la matière noire. On constate que seule la matière ordinaire (celle détectable par rayons X) semble affectée par le choc de la collision. La matière noire doit donc être constituée de particules très discrètes qui interagissent très peu entre elles et avec la matière ordinaire. La nature exacte de ces particules reste encore un mystère.



### Une nouvelle force, sombre et mystérieuse est à l'œuvre

Les techniques modernes de l'astrophysique permettent de mesurer l'expansion de l'Univers sur des distances de plusieurs milliards d'années-lumière. On a constaté que des objets comme les supernovae lointaines apparaissaient beaucoup plus éloignées que prévu dans le modèle où l'expansion cosmique est freinée par la gravité des galaxies. Il semble que l'expansion de l'Univers se soit accélérée dans les derniers cinq milliards d'années de son histoire, ce qui n'est possible que si une force mystérieuse d'anti gravité est à l'œuvre aux confins du cosmos.

Cette nouvelle force répulsive a reçu le nom d'énergie sombre, car elle aussi ne peut être détectée qu'indirectement.

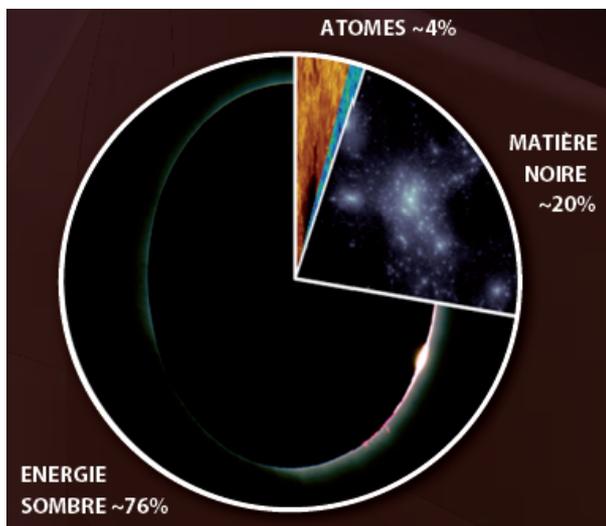


## L'invisible dans le rayonnement fossile

L'analyse des fluctuations du rayonnement fossile nous renseigne sur les conditions énergétiques de l'Univers primordial. Les données collectées ne sont pas compatibles avec la vision d'un Univers ne contenant que de la matière ordinaire. Elles prédisent au contraire l'existence de cinq fois plus de matière noire que de matière ordinaire, ainsi qu'un déficit d'énergie correspondant en fait à la quantité d'énergie sombre pouvant expliquer l'accélération cosmique.

## L'univers est principalement invisible

Les observations cosmologiques modernes sont si troublantes qu'elles ont relégué la matière ordinaire, faites d'atomes, à seulement 4% du contenu total en énergie de l'Univers. Les nouveaux ingrédients qu'on a dû introduire pour expliquer les mystères de l'infiniment grand constitueraient environ 96% du contenu de l'Univers. La nature intime de la matière noire et de l'énergie sombre est encore inconnue, et il est même envisageable qu'elles aient une origine commune.



## 11 La forme de l'Univers

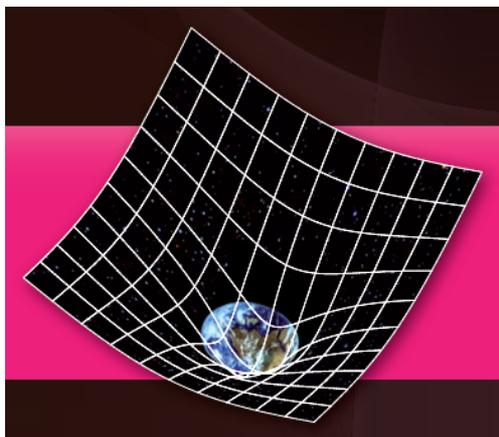


### La gravitation, ou la forme de l'espace et du temps

La cosmologie est la science qui étudie l'Univers et ce qu'il contient de façon globale. Ceci n'est devenu possible que grâce aux travaux d'Einstein qui ont permis de comprendre comment la gravitation est une manifestation de la forme géométrique de l'espace et du temps.

L'attraction mutuelle de deux corps par exemple, s'explique par le fait que le chemin le plus court entre deux points quelconques n'est plus une droite.

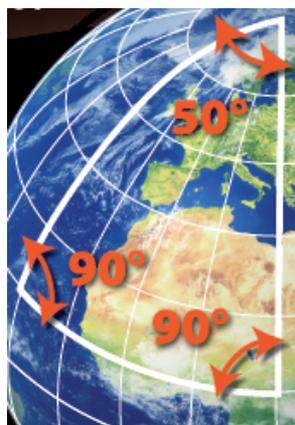




La figure ci-dessus illustre la déformation de l'espace autour de la Terre par la gravitation de celle-ci. Imaginez que vous êtes infiniment plat, comme la Terre au centre de cette image : lorsque vous vous baladez le long des lignes de plus court chemin (en blanc), vous tombez en fait vers la Terre !

### Les géométries non-euclidiennes

Pour beaucoup de gens, le mot « géométrie » évoque un ensemble de figures et de règles apprises à l'école primaire. Celles-ci sont toutes basées sur un petit groupe de principes simples, des axiomes, énoncés pour la première fois par Euclide aux alentours de 300 av J.C. Ces axiomes, comme celui qui explique qu'il n'existe qu'une seule droite parallèle à une droite donnée, passant par un point donné, régissent la géométrie de notre quotidien.



Il est cependant possible d'imaginer d'autres géométries basées sur des axiomes différents, qui représentent des géométries sur des espaces « courbés », alors que la géométrie euclidienne correspond à un espace plat. Par exemple, dans les géométries non-euclidiennes, la somme des angles intérieurs d'un triangle est différente de  $180^\circ$ , comme c'est le cas pour des triangles tracés à la surface de la Terre.

### Quelle forme a notre univers ?

En relativité générale, le contenu (la matière) est indissociable du contenant (l'espace-temps). Connaître l'un, c'est déterminer l'autre par la relativité générale d'Einstein. Souvent, le cosmologiste formule le problème en ces termes : **Etant donnée la forme observée de l'Univers, quel est son contenu ?**

Les données observationnelles favorisent un Univers globalement plat ou légèrement fermé qui se dilate uniformément au cours du temps. Une fois que l'on a pu déduire le contenu en énergie et la forme de l'Univers, on peut en déduire son destin. Celui-ci contient-il suffisamment d'énergie pour poursuivre son expansion indéfiniment ? Ou bien va-t-il finir par se contracter à nouveau ?



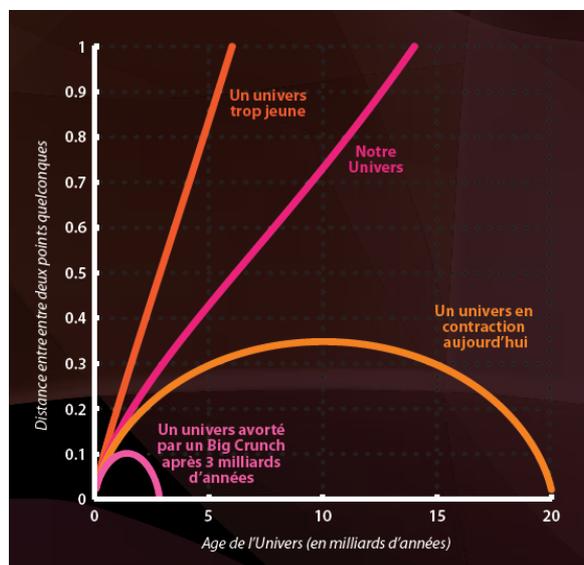
## 12 Vivons-nous dans le meilleur des mondes ?



Le modèle du Big Bang chaud, comme tous les modèles, comprend un ensemble de paramètres libres, que l'on estime à l'aide des observations. Par exemple, l'intensité du rayonnement fossile, la vitesse de l'expansion cosmique ou la proportion de matière aujourd'hui sont autant de paramètres qui permettent de caractériser l'Univers dans lequel nous vivons. Or, il semble que plusieurs de ces paramètres sont extrêmement sensibles: ils doivent avoir été ajustés avec une précision extrême pour expliquer l'Univers tel que nous l'observons.

### Notre Univers est plat et susceptible

Notre Univers nous apparaît très plat, c'est-à-dire que sa géométrie globale correspond à celle d'Euclide que nous apprenons à l'école. Malheureusement, la platitude est un cas particulier en cosmologie, qui est difficile à justifier. De plus, l'Univers a dû être encore plus proche d'un Univers plat par le passé. Dans la figure ci-dessous, on a représenté quatre modèles d'univers: le nôtre et trois autres qui diffèrent du nôtre seulement par une déviation à la platitude d'une part pour 100 millions lorsque l'univers était âgé d'un an. Cette infime déviation dans l'Univers primordial a des conséquences dramatiques plusieurs milliards d'années plus tard: les autres univers présentés sont stériles car la Terre n'a pas pu s'y former. Comment expliquer naturellement cet ajustement si précis de la géométrie de l'Univers?



### L'inflation cosmologique

Pour apporter une réponse scientifique au problème de la platitude de l'Univers, les cosmologistes ont inventé le mécanisme de l'expansion inflationnaire. Selon cette théorie, l'Univers a subi une dilatation colossale, exponentielle, quelques infimes fractions de secondes après le Big Bang.



Pendant cet intervalle de temps, la taille de l'Univers a été multipliée d'un facteur  $10^{50}$  alors que, dans les quelques 13 milliards d'années qui suivent, l'Univers n'a grandi que d'un facteur 1000. La platitude s'explique alors naturellement par le fait que l'Univers que nous observons ne correspond en fait qu'à une microscopique région de l'Univers primordial qui était de géométrie quelconque. Avec l'inflation, cette région a subi un énorme agrandissement de sorte que nous ne puissions pas observer la courbure de l'Univers.

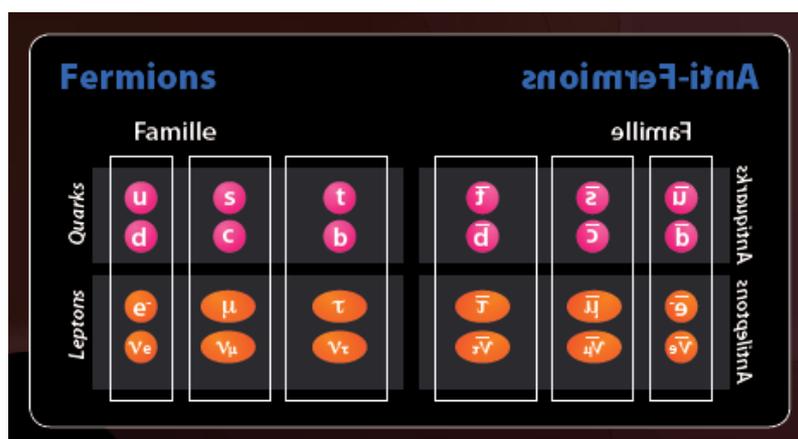
Ce mécanisme explique en même temps l'extrême homogénéité de l'Univers à l'époque de l'émission du rayonnement fossile. L'étude de ce rayonnement a également permis de valider certaines prédictions du modèle inflationnaire. Toutefois, bien des mystères demeurent au sujet de l'inflation. Quel processus physique exact se cache-t-il derrière ? Comment l'inflation s'est-elle arrêtée à temps ? Comment les fluctuations de matière sont-elles apparues au terme de l'inflation ? Enfin, y a-t-il une relation entre l'inflation et l'accélération récente de l'expansion cosmique ?

### 13 Quelques autres mystères sur l'origine du monde



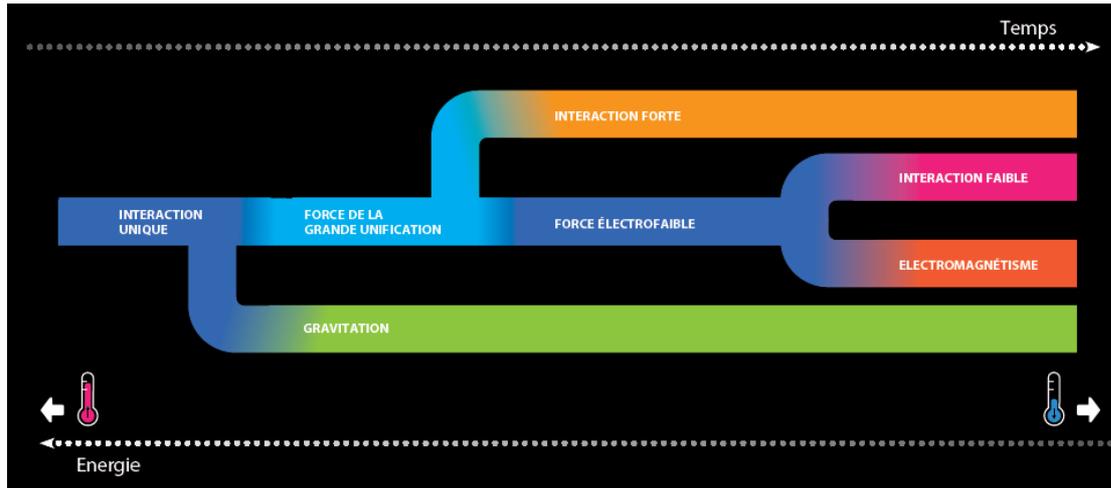
#### D'où provient la suprématie de la matière ?

L'antimatière est comme l'image dans un miroir de la matière ordinaire, la plupart des propriétés physiques de l'une, comme la charge électrique, étant inversée chez l'autre. Matière et antimatière se désintègrent mutuellement lorsqu'elles se rencontrent, pour former d'autres paires particule-antiparticule. Au tout début de l'Univers, elles coexistaient en quantités égales. Mais dans l'Univers d'aujourd'hui, l'antimatière n'existe plus et n'apparaît que très rarement, produite dans des phénomènes à très haute énergie. On peut expliquer l'origine de la suprématie de la matière sur l'antimatière par une infime asymétrie entre les deux: une particule de matière survivrait sur un milliard de désintégrations de paires particule-antiparticule. L'origine de cette asymétrie demeure encore mystérieuse.



## Des forces unifiées dans l'univers primordial ?

Les interactions fondamentales comme les forces nucléaires forte et faible et l'électromagnétisme se ressemblent sur plusieurs aspects. On peut montrer notamment que la force faible et l'électromagnétisme ne forment plus qu'une seule interaction à très haute énergie: la force électrofaible. Certaines théories avancées de la physique envisagent que la force électrofaible et la force forte s'unifieraient à encore plus haute énergie. Les physiciens espèrent enfin que la gravitation, pourtant si différente, puisse s'unifier également aux autres interactions. L'Univers primordial pourrait alors avoir été régi par une seule force fondamentale, et la séparation de celle-ci dans les différentes interactions pourrait expliquer des mécanismes comme celui de l'inflation cosmologique.



## 14 C'est quoi le Big Bang ?



### Une blague qui tourne mal...

Le Big Bang désigne dans le modèle éponyme, l'instant où la distance entre n'importe quel point dans l'Univers est exactement nulle. Cet instant s'appelle une singularité dans la théorie, un endroit où les prédictions physiques ne tiennent plus car la densité d'énergie et le taux d'expansion deviennent infinis. A l'origine, le terme « Big Bang » a été donné au modèle par dérision par l'astrophysicien Fred Hoyle (1915-2001) qui en était un des plus farouches détracteurs pour des raisons philosophiques. Fred Hoyle lui opposait la théorie concurrente de l'état quasi-stationnaire, dans laquelle il y avait expansion cosmologique mais sans Big Bang.

Pour réussir cette prouesse, il fallait créer en continu de la matière. La théorie de Hoyle a finalement échoué dans son explication des observations cosmologiques et a cédé toute la place à celle dénommée « le Grand Pan » (Big Bang).



Image : Fred Hoyle et Georges Lemaître

### La fin de la physique conventionnelle

La singularité du Big Bang est une pathologie de la théorie de la relativité générale car celle-ci prédit ainsi sa propre limite! De plus, ce problème est profond car les physiciens ont montré que cette singularité arrive dans une multitude de modèles d'univers différents, même dans ceux qui n'obéissent pas au principe cosmologique. Cet instant où la physique actuelle s'arrête ne pourrait être évité qu'au prix de l'introduction dans l'Univers primordial d'un ingrédient semblable à l'énergie sombre. Ceci trahit le fait que la singularité du Big Bang est une pathologie de la gravitation, force exclusivement attractive qui produit des densités infinies si aucune force répulsive ne s'y oppose. Mais décrire le tout début de l'Univers implique également de tenir compte des effets quantiques, liés à la physique de l'infiniment petit, en plus de la gravitation.



L'espoir des physiciens est que la théorie quantique de la gravitation éliminera la singularité du Big Bang et permettra à la physique de décrire l'Univers encore plus loin dans le passé. Une telle théorie de la gravitation quantique fait encore l'objet d'intenses recherches.

## 15 La foire aux questions du Big Bang



### Qu'y avait-il avant le Big Bang ?

Comme nous l'avons expliqué auparavant, l'instant du Big Bang est une pathologie de la théorie actuelle: le temps comme l'espace d'ailleurs cessent d'y être définis. En fait, cette question n'a aucun sens. En effet, les solutions des modèles d'Univers n'existent qu'après l'instant du Big Bang dans le cadre du modèle actuel, basé sur la relativité générale. Et si, un jour, une meilleure théorie la remplace, la question de l'avant aura un sens mais le Big Bang comme singularité n'existera plus.

### L'Univers est-il infini ?

Cette question est aussi vieille que pertinente et délicate. Délicate car nous ne pourrions jamais observer qu'une portion finie de l'Univers, qu'on appelle l'univers observable: c'est la région de l'espace comprenant tous les endroits d'où la lumière a pu nous parvenir depuis le début de l'Univers. La cosmologie moderne peut toutefois répondre à la question de la finitude de l'Univers en extrapolant les propriétés de la région observable. Si celle-ci a une courbure positive comme celle d'un ballon, l'Univers est fini mais sans bord. On peut en effet parcourir un tel univers sans jamais rencontrer de frontière, et repasser au même endroit sans avoir jamais fait de demi-tour. Si la courbure n'est pas positive, l'Univers serait alors infini. Les données actuelles semblent favoriser un Univers fini mais de taille gigantesque par rapport à l'Univers observable qui fait déjà près de 14 milliards d'années-lumière de rayon.

### Si l'Univers est en expansion, dans quoi s'étend-il ?

La théorie de la relativité générale à la base de la cosmologie décrit tout l'espace-temps ainsi que la matière au sein de celui-ci depuis l'intérieur. L'Univers décrit par la cosmologie comprend donc tout l'espace dont a besoin la matière. On peut évidemment toujours imaginer des dimensions supplémentaires pour représenter l'Univers vu de l'extérieur mais la matière, jusqu'à preuve du contraire, est piégée dans les quatre dimensions de l'espace-temps de sorte que ces dimensions supplémentaires n'ont aucun sens physique puisque nous ne pouvons pas les observer. Ce serait une pure commodité de représentation.

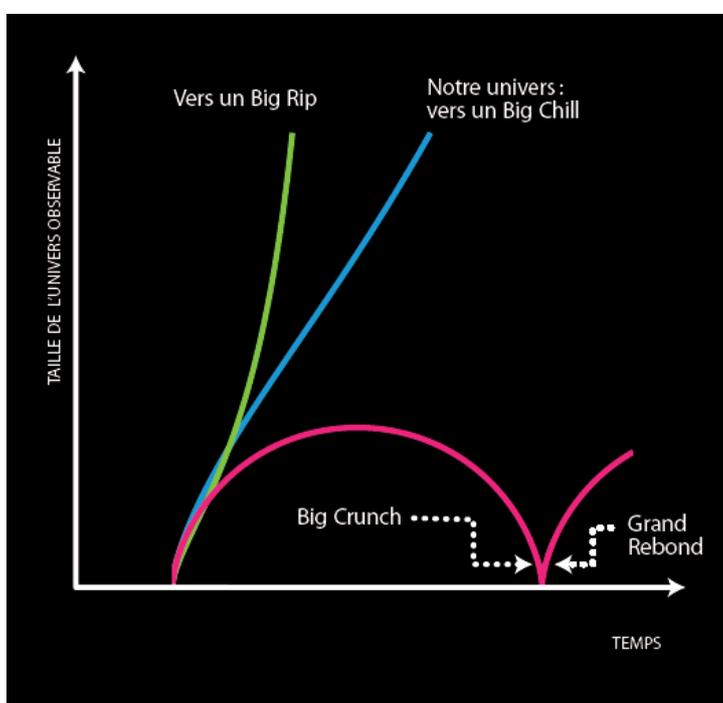


## 16 La foire aux questions du Big Bang, la suite



### L'Univers aura-t-il une fin ?

Les modèles cosmologiques ne décrivent pas seulement le passé de l'Univers mais aussi son évolution dans l'avenir. Ainsi, on peut distinguer plusieurs types de destins possibles. Si l'expansion continue sans arrêt et à un rythme exponentiel, l'Univers connaîtra un Grand Froid, ou Big Chill. Toutes les étoiles se consumeront sans être remplacées par de nouvelles et toute l'énergie disponible dans l'Univers sera sans cesse diluée et inexploitable. Ce Grand Froid est le scénario prédit par le meilleur modèle cosmologique actuel. Les autres fins possibles sont la Grande Déchirure ou Big Rip où l'expansion devient infiniment puissante lorsque l'Univers atteint un certain âge et le Big Crunch, processus inverse du Big Bang où toute la matière se condense en un état de densité infinie.



Mais si le Big Crunch peut être évité comme le Big Bang grâce à la gravitation quantique, alors la singularité ne peut pas être atteinte à nouveau et l'Univers peut rebondir en une nouvelle phase d'expansion : c'est le Grand Rebond (ou Big Bounce).



## Les galaxies, le système solaire, les étoiles sont-elles en expansion également ?

Lors de leur formation, les galaxies s'isolent de l'expansion cosmique par la force d'attraction générée par leur propre poids. L'expansion cosmique n'apparaît qu'à des échelles de plusieurs millions d'années-lumière, où la force d'attraction entre galaxies est bien trop faible pour la contrecarrer. A l'intérieur des galaxies par contre, c'est une force indétectable. Entre le Soleil et la Terre, elle est 40 ordres de grandeur ( $10^{-40}$  fois) plus faible que la force d'attraction du Soleil sur la Terre.

## 17 La théorie du Big Bang peut-elle tout expliquer ?



### La réalité pour le physicien

Le physicien cherche à comprendre les phénomènes, c'est-à-dire des faits résultant d'une expérience ou d'une observation. L'objectivité de ces faits provient de ce qu'ils se reproduisent à un autre moment, en d'autres lieux, d'autres circonstances ou pour d'autres observateurs. L'occurrence d'un phénomène physique peut donc également être prédite.

Un modèle physique est un outil scientifique, basé sur des hypothèses physiques et des lois mathématiques, qui permet non seulement d'expliquer les observations existantes à partir d'un nombre réduit de principes mais également de les reproduire. Mais un modèle doit aussi être réfutable: on doit pouvoir l'utiliser pour prédire des faits nouveaux dont l'observation permettra alors d'infirmer ou de confirmer le modèle.

### La fin de la physique avec une théorie du Tout ?

La perspective d'unifier les quatre interactions fondamentales en une seule qui aurait régi l'Univers primordial a fait espérer certains physiciens que cette interaction unique serait à la base d'une « théorie du Tout ». L'avènement de cette dernière constituerait alors la fin de la physique: les principes ultimes seraient alors découverts et la physique ne serait plus dès lors qu'une science appliquée et non plus fondamentale. Toutefois, nous sommes encore loin d'une telle théorie unifiée, réconciliant notamment relativité générale et mécanique quantique. De plus, une telle « théorie du Tout » aurait un nom bien mal choisi car elle n'expliquerait pas les hypothèses fondamentales ni les valeurs des paramètres libres du modèle soi-disant « ultime ». Enfin, le mot « Tout » se réfère dans ce cas aux phénomènes physiques, mais peut-on affirmer que la nature du Monde est exclusivement physique ?



## 18 Le monde est-il mathématique ?



### Les mathématiques : le langage de la nature

Les mathématiques forment une branche indépendante de la science, qui étudie des objets abstraits comme les nombres, les constructions géométriques, les fonctions ou les espaces en établissant par la seule force du raisonnement un réseau de relations et de propriétés extrêmement riche. Mais les mathématiques ne forment pas une discipline isolée uniquement guidée par ses propres préoccupations : elles trouvent des applications dans toutes les autres disciplines scientifiques, de l'économie à la physique en passant par la chimie, la biologie ou la médecine. Les mathématiques ont une portée universelle: la plupart des résultats mathématiques ont un écho dans plusieurs disciplines scientifiques différentes. Mais pourquoi les mathématiques sont-elles aussi efficaces et universelles?

### La déraisonnable efficacité des mathématiques

Une tentative de réponse pourrait être dans la similitude entre l'approche physique et mathématique de la réalité. Les résultats mathématiques sont des théorèmes établis sur base d'axiomes (propositions fondamentales) que l'on établit par raisonnement. Les théorèmes restent donc vrais partout et toujours, puisqu'un raisonnement correct restera toujours valable. De plus, les théorèmes servent également à déduire de nouveaux résultats, tant en mathématiques que dans les autres disciplines. Mais les mathématiques ne se réfutent pas comme les modèles, elles se vérifient et restent vraies lorsqu'elles sont correctes. Toutefois, les mathématiques évoluent également par généralisation ou changement des axiomes de base d'une construction mathématique.

### Les mathématiques sont-elles inventées ou découvertes ?

Les résultats mathématiques abstraits comme les théorèmes existent-ils avant que nous ne les construisions? Pour beaucoup, les mathématiques sont des outils abstraits qui sont inventées par l'esprit humain. Toutefois, certaines mathématiques trouvent une correspondance si forte dans la réalité physique qu'elle en est troublante. Une des propriétés la plus productive en mathématiques est la notion d'invariance qui qualifie un objet qui ne change pas lorsqu'on lui applique une opération. Ceci ressemble étrangement à l'approche du réel par le physicien: quelque chose de reproductible et d'universel pour tous les observateurs.



## 19 L'universalité des mathématiques

Math

Philo

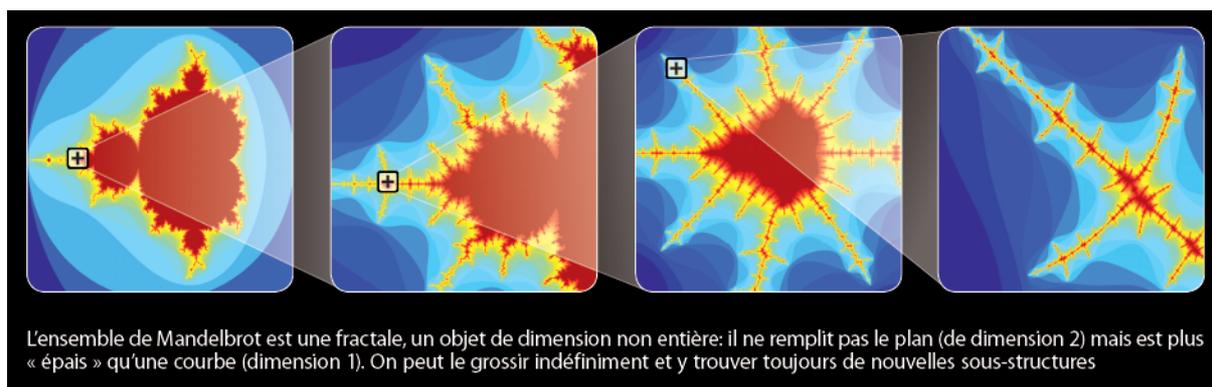
### De l'ordre dans le chaos

Les lois de la physique permettent aux scientifiques de réaliser des prédictions sur les résultats d'une expérience. Mais la nature contient également une grande part d'indéterminé auquel le déterminisme scientifique a dû s'adapter. Par exemple, les phénomènes aléatoires s'appréhendent par les lois mathématiques du hasard. Ou le chaos mathématique qui impose une limite dans la prédiction à long terme de certains phénomènes pourtant régis par des équations déterministes.

La mécanique quantique, enfin, nous apprend qu'il est impossible de prédire avec certitude les résultats d'une seule expérience microscopique, mais permet de calculer les probabilités de résultat d'un ensemble d'expériences impliquant des particules quantiques. Ce sont les mathématiques qui ont permis de comprendre ces phénomènes, bien qu'ils ne soient pas complètement déterminés, en mettant un certain ordre dans le chaos.

### L'invisible réalité des mathématiques

Les mathématiques sont un projet scientifique visant au départ une modélisation du réel dans son entièreté. Mais ce projet s'est très vite heurté à la nécessité de dépasser les apparences, car la description du réel nécessite notamment des concepts dont on peut démontrer l'existence mais dont la construction demanderait un nombre infini d'étapes. Bien qu'elles soient omniprésentes dans les sciences, les mathématiques ont leur existence propre, avec des règles logiques de construction qui permettent d'inventer (ou de découvrir?) des concepts extraordinairement féconds comme les nombres réels, imaginaires, les fractales, les géométries non-euclidiennes, etc. La création mathématique est proprement artistique, et se retrouve d'ailleurs dans les arts comme la musique ou la peinture.



## Les mathématiques, une aventure de l'intelligence

Certains nombres réels comme pi contiennent une infinité de décimales qui ne se répètent pas. On ne peut donc pas les écrire simplement et on ne peut les approximer que par une suite infinie de nombres écrits sous forme de fractions. Les mathématiques permettent pourtant d'étudier des nombres aussi utiles que pi sans en connaître toutes les décimales.

## 20 Big Bang ou Genèse ?



La théorie du Big Bang est un modèle physique du commencement du monde. Elle ne traite pas de sa création. Alors que la cosmologie est la science qui étudie la structure et l'évolution de l'Univers, la cosmogonie, elle, est le récit mythique ou religieux de la création du Monde et vise également à placer l'Homme au sein de la création. Est-il possible, et approprié, de concilier cosmologie et cosmogonie? Et, plus généralement, science et foi ? Cette question délicate fait l'objet de nombreuses discussions dont certaines ont conduit à deux positions radicalement opposées : le concordisme et le discordisme.

### Le concordisme : la science comme écho de la religion

Cette approche consiste à interpréter les textes sacrés de manière à les mettre en accord, en concordance, avec les découvertes scientifiques. Elle voudrait montrer que la science ne contredit en rien la religion, au contraire, elle révélerait les vérités scientifiques cachées dans les textes sacrés. Cette position dangereuse est d'ailleurs souvent utilisée à des fins de prosélytisme comme dans le créationnisme. En effet, elle peut conduire également à réduire le divin au monde physique ou à diviniser la nature (panthéisme) voire à en nier l'existence (athéisme) puisque la science ne traite pas du divin. Le concordisme amène ainsi soit à rejeter la science soit la religion alors que c'est l'interprétation religieuse du fait scientifique qui est incorrecte. Un exemple de position concordiste en cosmologie est d'interpréter le rayonnement de fond diffus cosmologique comme l'écho physique du verset de la Genèse: « Et la lumière fut ».

### Le discordisme : chacun chez soi !

Cette position part du principe que science et théologie traitent de deux niveaux différents de la réalité (double vérité), et que ces deux discours sont complètement disjoints sinon incompatibles. Pour reprendre l'exemple concordiste ci-dessus, il est faux de croire que le rayonnement fossile correspondrait à la création de la lumière puisque celle-ci existait bien avant cette époque. Ce rayonnement correspond à la libération de la lumière de l'étreinte du plasma primordial, mais pas à sa création. Le discordisme est parfois adopté par les scientifiques croyants pour éluder les critiques des athées comme des croyants. Mais si cette option résout le conflit entre science et religion en les séparant définitivement, elle ne laisse aucune question en commun.



## La place de l'Homme dans l'Univers

L'Univers recèle encore bien des mystères: l'accélération récente de l'expansion cosmique, l'attraction irrésistible de la matière noire, la formidable poussée primordiale de l'inflation, etc. Ces mystères vont probablement nécessiter d'étendre la physique conventionnelle, d'écrire de nouvelles équations dans le grand livre de la nature, de redessiner notre ébauche du monde. Mais, quand on y pense bien, c'est une bonne nouvelle. La nuit n'est pas hermétique à nos questions. Nous y trouvons un écho à nos interrogations les plus profondes. Même si nous cherchons parfois encore nos mots dans ce dialogue, l'Univers renouvelle sans cesse l'invitation à la découverte à tous ceux qui veulent sonder l'apparente opacité de la nuit. Les sciences fondamentales comme la cosmologie nous parlent aussi de l'Homme, au travers du sens qu'il découvre en dialoguant avec la Nature. L'Univers est un miroir qui nous renvoie perpétuellement à nos questionnements, tout en nous instillant un profond sentiment d'humilité devant les merveilles de l'intelligible. La science n'est pas un monologue plein d'autosuffisance. La nature sait se dévoiler comme elle sait se jouer parfois de nos hypothèses. Même s'il est mystérieux, le monde reste intelligible, silencieux, peut-être, mais pas déraisonnable. L'Univers est en expansion et, de ce fait, inachevé: il y reste beaucoup de place pour notre contribution.



## Liens aux programmes

Voici un récapitulatif des compétences et des savoirs abordés au cours de l'exposition. Ils sont classés par niveau et par matière. Vous trouverez dans la troisième colonne, les panneaux auxquels on fait référence.

Pictogramme	Compétence ou savoir	Panneaux correspondants
 <p>Eveil</p>	<p><b>L'énergie</b>  <b>La lumière et le son</b>            La couleur : une caractéristique de la lumière            Propagation de la lumière et du son</p> <p><b>Les forces</b>            Mise en évidence d'une force par ses effets perceptibles            La pression : relation force/surface</p> <p><b>La chaleur</b>            Transformation de différentes formes d'énergie en énergie thermique            Transfert de la chaleur dans les différents états de la matière            Dilatation et contraction</p> <p><b>La matière</b>  <b>Propriétés et changements</b>            Les états de la matière            Relation entre apport ou dégagement de chaleur et changement d'état</p> <p><b>Histoire de la vie et des sciences</b>            Aspect temporaire et évolutif des théories scientifiques            Approche critique des conséquences des recherches scientifiques et des applications technologiques</p> <p><b>L'énergie</b>  <b>La lumière et le son</b>            La couleur : une caractéristique de la lumière</p>	<p>P4</p> <p>P8</p> <p>P14, P15, P16</p> <p>P14, P15, P16</p> <p>P1, P2, P3, P8, P17</p>



<p>Sciences</p>	<p>Propagation de la lumière et du son</p> <p><b>Les forces</b> Mise en évidence d'une force par ses effets perceptibles La pression : relation force/surface</p> <p><b>La chaleur</b> Transformation de différentes formes d'énergie en énergie thermique Transfert de la chaleur dans les différents états de la matière Dilatation et contraction</p> <p><b>La matière</b> <b>Propriétés et changements</b> Les états de la matière Relation entre apport ou dégagement de chaleur et changement d'état</p> <p><b>Histoire de la vie et des sciences</b> Formation de L'Univers Aspect temporaire et évolutif des théories scientifiques Approche critique des conséquences des recherches scientifiques et des applications technologiques</p>	<p>P4, P5, P6</p> <p>P8, P5, P6</p> <p>P5, P6, P14, P15, P16</p> <p>P5, P6, P14, P15, P16</p> <p>P1, P2, P3, P8, P17, P20</p>
<p>Math</p>	<p><b>Traitement de données</b> Lire un graphique, un tableau, un diagramme</p> <p><b>Solides et figures</b> Reconnaître, comparer des solides, les différencier et les classer Reconnaître et construire des agrandissements et des réductions de figures</p> <p><b>Sciences de base</b> Décrire la structure, le fonctionnement, l'origine et l'évolution de l'univers à la lumière de modèles.</p> <p><b>L'Univers et la Terre</b> Faire un récit argumenté de l'histoire de l'Univers</p>	<p>P5</p> <p>P3, P11</p>



<p>Maîtriser les ordres de grandeur spatiaux et temporels</p> <p>Décrire qualitativement le rôle de la gravitation en cosmologie</p> <p><b>Structure et propriétés de la matière</b></p> <p>Relier des phénomènes macroscopiques aux théories microscopiques</p> <p>Expliquer la stabilité des atomes et des molécules par les interactions électromagnétiques</p> <p>Situer, dans leur contexte historique et scientifique, quelques grandes étapes du développement de la physique</p> <p><b>Forces, mouvements, pressions</b></p> <p>Associer l'analyse d'un mouvement au choix d'un système de référence</p> <p>Exploiter un graphique de position, vitesse ou accélération en fonction du temps</p> <p>Analyser des exemples simples de propulsion, d'explosion ou de collision</p> <p><b>L'énergie</b></p> <p>Comparer les ordres de grandeur des énergies mises en jeu</p> <p>Expliquer que la masse est une forme d'énergie</p> <p><b>Phénomènes optiques</b></p> <p>Lentilles, instruments d'optiques</p> <p>Emission et absorption de lumière, dispersion et spectre</p> <p><b>Ondes et communications</b></p> <p>Vibrations et sons</p> <p>Effet Doppler</p> <p><b>La matière à l'échelle atomique et moléculaire</b></p> <p>Modèle corpusculaire de la matière</p> <p>Concept d'élément</p>	<p>Toute l'expo</p> <p>Toute l'expo</p> <p>P6, P7, P8</p> <p>P3, P4, P5, P9, P10, P12, P13</p> <p>P6, P7, P9, P10</p> <p>P9, P10</p>	<p>Toute l'expo</p> <p>Toute l'expo</p> <p>P6, P7, P8</p> <p>P3, P4, P5, P9, P10, P12, P13</p> <p>P6, P7, P9, P10</p> <p>P9, P10</p>
---	--	--



<p>Chimie</p> <p>Math</p>	<p>Masse atomique Classification des éléments <b>Le modèle ionique</b> <b>Cohésion de la matière</b></p> <p><b>Etude des fonctions</b> <b>Représenter, modéliser</b> Interpréter un graphique en le reliant au problème qu'il modélise <b>Résumer, organiser les savoirs, synthétiser, généraliser</b> Analyser les cas limites (extension, comportement asymptotique, comportement localement linéaire) <b>Géométrie</b> Les affinités dans le plan Reconnaître comme des modèles mutuels, les notions et les relations de base de la géométrie et certaines propriétés de l'espace physique (mouvement, forces) <b>Philosophie des mathématiques</b> La place des mathématiques dans l'univers ? L'universalité des mathématiques</p> <p>Question de la place de l'Homme dans l'Univers Science vs Religion ? La place des mathématiques dans l'Univers ?</p> <p>Représentation de l'Univers pendant l'Antiquité Découvertes et avancement des techniques Sciences vs religion ?</p>	<p>P4, P6</p> <p>P6, P7, P8</p> <p>P6, P7, P8</p> <p>P5, P9, P10, P12, P16</p> <p>P3, P11</p> <p>P18, P19</p>
---------------------------	--	---



<p>Philo</p>		<p>P2, P18, P19, P20</p>
<p>Histoire</p>		<p>P2, P3, P5, P14, P20</p>



# Dossier de l'élève

Cette partie contient 3 questionnaires correspondant aux 3 niveaux de lecture de l'exposition, ainsi que des pistes de réflexion à-propos des thèmes abordés.

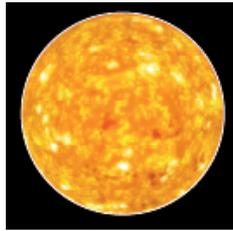
## Questionnaire rose – niveau basique

1) Numérote les objets suivants de 1 à 14, du plus petit au plus grand.

Les cellules sanguines



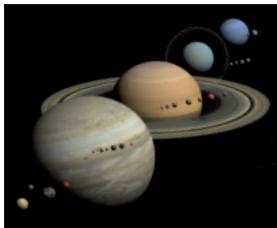
Le Soleil



L'ADN



Le système solaire



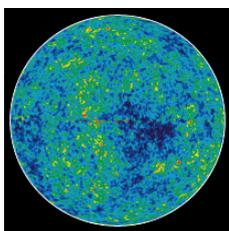
L'atome



La tour Eiffel



L'Univers observable



La mouche



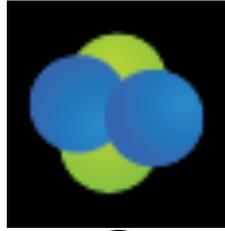
Le mont Everest



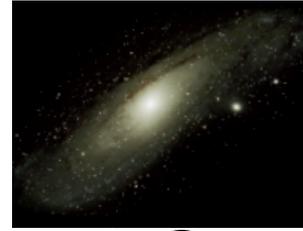
La Terre



Le noyau de l'atome



Une galaxie



Les quarks



L'être humain



2) Il y a un siècle, on pensait que toutes les nébuleuses que l'on pouvait observer appartenaient à notre galaxie. Pourquoi ?

3) Pourquoi pense-t-on que l'Univers a commencé avec un « Big Bang »? Qu'est-ce que ça veut dire ?

4) Cite une des fins possibles de l'Univers.



## 5) Vrai ou Faux ?

- L'expansion cosmique, ça veut dire que l'Univers grandit.
- Au fur et à mesure que notre univers grandit, il y en a un autre qui rétrécit.
- On ne peut pas sortir de l'Univers pour l'observer de l'extérieur.
- La Terre se trouve au centre de l'Univers.
- Pour échauder une théorie, le scientifique tape au hasard et vérifie en observant.
- L'Univers n'est pas infini. Si on va au bout on se cogne à un mur.



## Questionnaire bleu – niveau intermédiaire

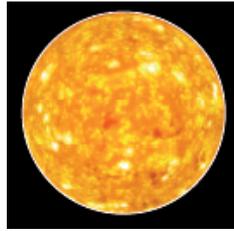
- 1) Indique l'échelle de chacun des éléments suivants.  
Échelle subatomique, atomique, microscopique, humaine, astrophysique ou cosmologique ?

Les cellules sanguines



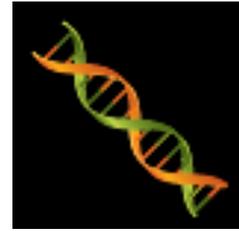
.....

Le Soleil



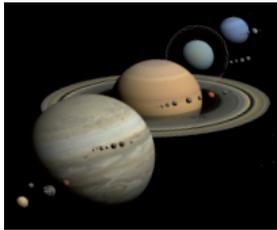
.....

L'ADN



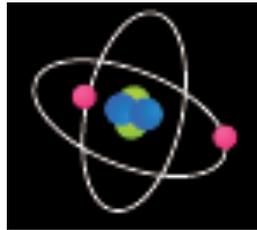
.....

Le système solaire



.....

L'atome



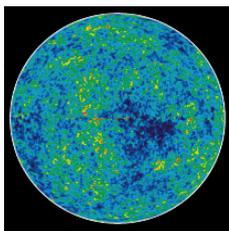
.....

La tour Eiffel



.....

L'Univers observable



.....

La mouche



.....

Le mont Everest



.....

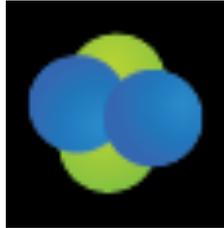


La Terre



.....

Le noyau de l'atome



.....

Une galaxie



.....

Les quarks



.....

L'être humain



.....

2) Pourquoi pense-t-on que l'Univers a commencé avec un « Big Bang »?

3) Cite 3 preuves de l'expansion cosmique.



4) Edwin Hubble a établi une relation entre la distance des galaxies et leur vitesse d'éloignement. Quelle est-elle ? Qu'en déduit-il ?

5) Explique la technique de détermination des distances des étoiles lointaines.

6) Quelles sont les 3 fins possibles de l'Univers ?

7) Vrai ou faux ?

- L'expansion cosmique, ça veut dire que l'Univers grandit.
- L'inflation est un autre mot pour expansion cosmique.
- Au fur et à mesure du temps, l'Univers se réchauffe.
- A la base, le nom «Big Bang » était une blague !
- On ne peut pas sortir de l'Univers pour l'observer de l'extérieur.
- Pour échafauder une théorie, le scientifique tape au hasard et vérifie en observant.
- Au fur et à mesure que notre univers grandit, il y en a un autre qui rétrécit.
- L'Univers n'est pas infini. Si on va au bout on est retenu par un champ magnétique.



## Questionnaire orange – niveau avancé

1) Donne un exemple pour chaque ordre de grandeur.

- $10^{-10}$  : .....
- $10^{-6}$  : .....
- 1 : .....
- $10^4$  : .....
- $10^7$  : .....
- $10^{21}$  : .....

2) Qu'est-ce que le principe cosmologique ? Comment en a-t-on déduit l'expansion cosmique ?

3) Edwin Hubble a établi une relation entre la distance des galaxies et leur vitesse d'éloignement. Quelle est-elle ? Qu'en déduit-il ?

4) Cite les 3 preuves de l'expansion cosmique.

5) Combien y a-t-il de forces fondamentales ? Lesquelles ? Vers quoi le physicien voudrait-il arriver à propos de celles-ci ?



**6) Que peux-tu dire à propos de la matière noire ?**

**7) Selon la relativité générale, la gravitation est en fait une déformation de l'espace-temps. Explique.**

**8) Le Big Bang est-il physiquement possible ? Explique.**

**9) Que pourrait apporter la mécanique quantique à la théorie actuelle du Big Bang ?**

**10) A quelle température la nucléosynthèse primordiale a-t-elle eu lieu ?**



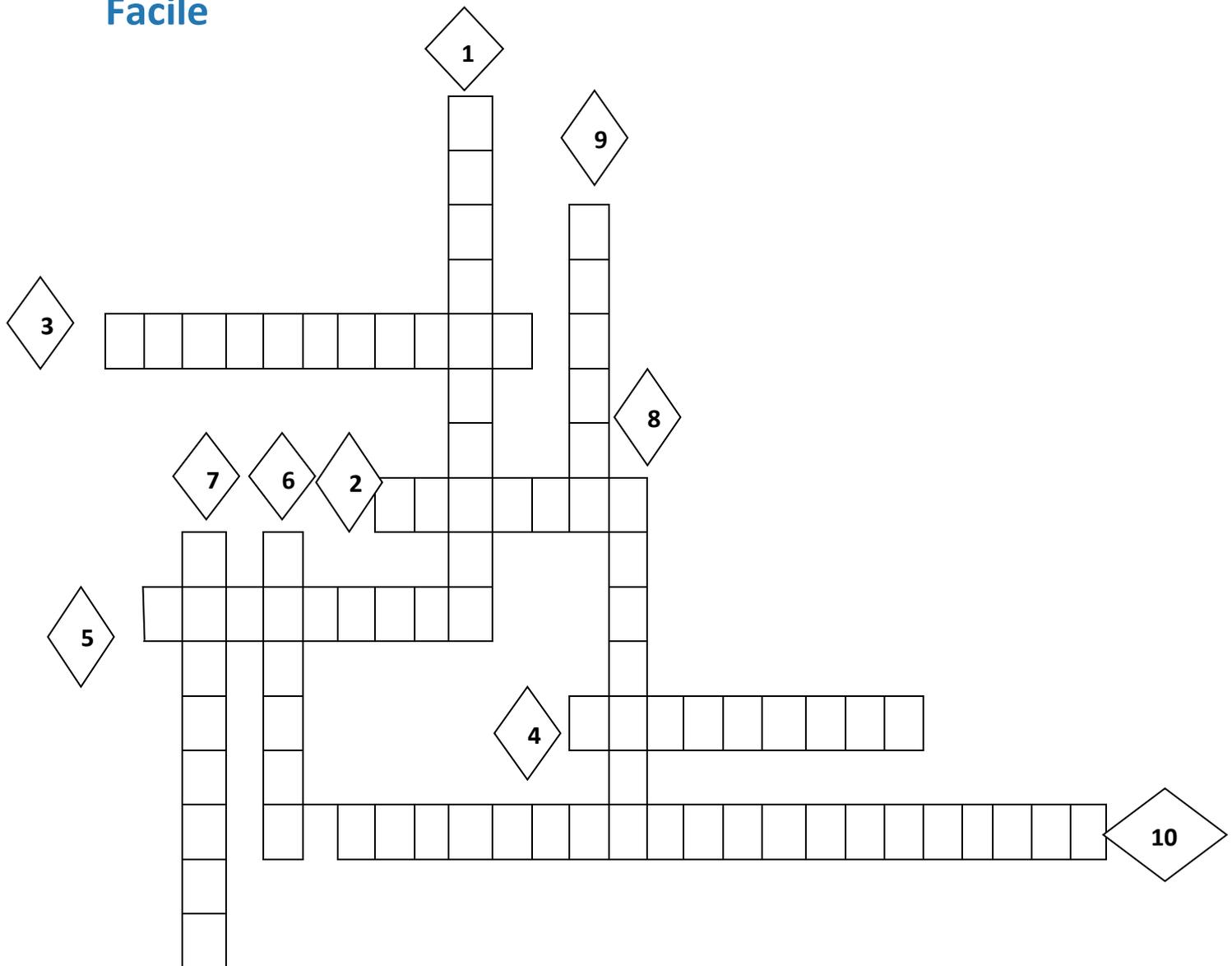
## Pistes de réflexion

- **Occupons-nous une place privilégiée dans l'Univers ?**
- **Qu'est-ce qu'une théorie scientifique ? D'après Karl Popper, une théorie scientifique doit être réfutable.**
- **Les mathématiques seraient-elles si efficaces qu'elles feraient partie intégrante du réel ? Les mathématiques sont-elles inventées ou découvertes par l'Homme?**
- **Big Bang ou Genèse ? Science vs Religion ? Discordisme ou concordisme ? Quelle est l'intersection –si elle existe- entre les deux ?**
- **On ne connaît actuellement que 4% de l'Univers...**



# Mots croisés

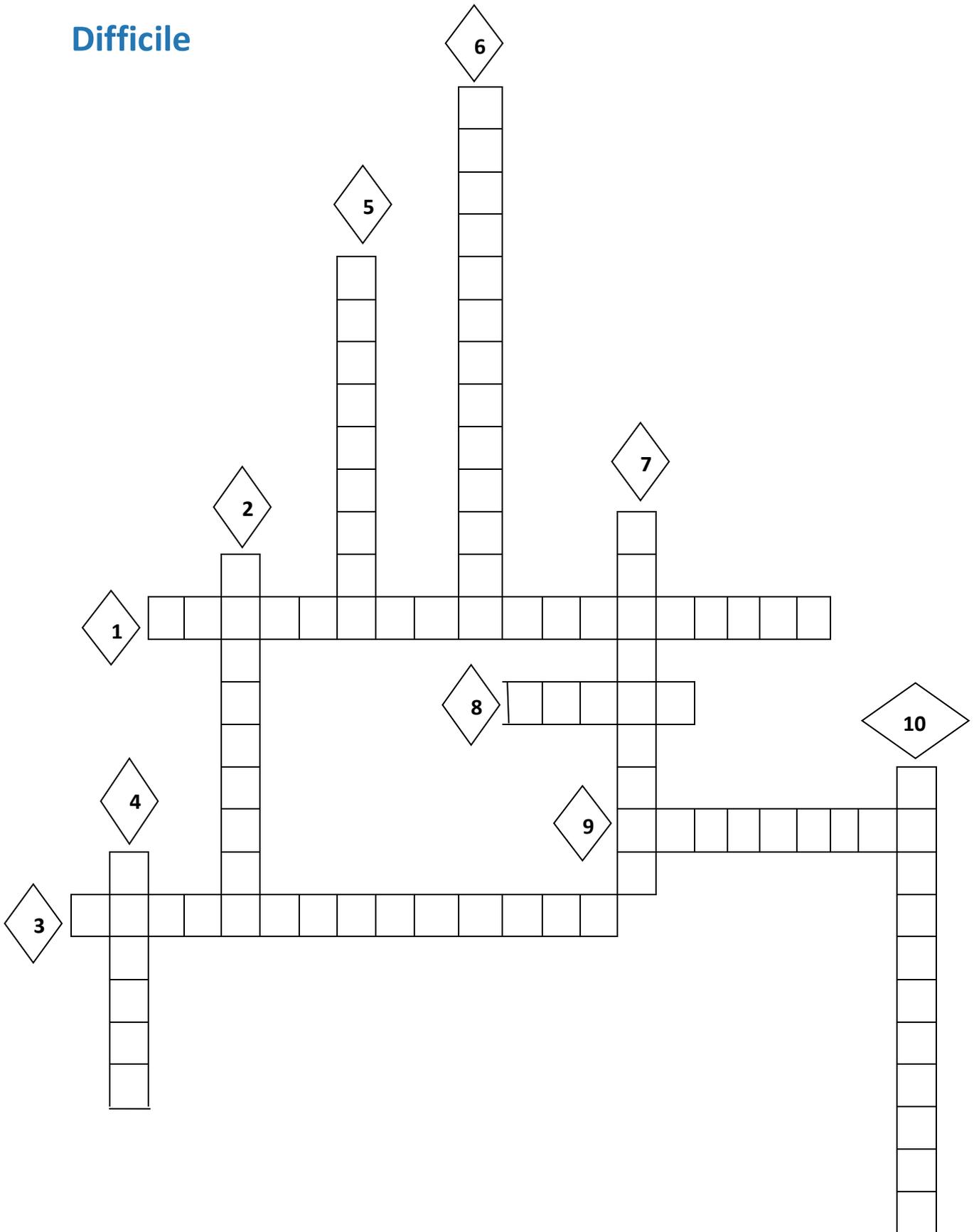
## Facile



1. Étude de l'Univers.
2. Phénomène qui serait à l'origine de l'Univers.
3. Force qui fait que les corps s'attirent entre eux.
4. Phénomène déduit du fait que les galaxies s'éloignent les unes des autres.
5. Nuages de poussière interstellaire et de gaz.
6. Celui qui a découvert que les galaxies s'éloignaient en accélérant grâce aux observations de son célèbre télescope.
7. Celui qui est à la base de la théorie du Big Bang.
8. La Voie Lactée en est une.
9. Particule de lumière.
10. Principe qui dit que la Terre n'a pas une place privilégiée dans l'Univers et qu'il est comme une grosse soupe homogène.



Difficile



1. Preuve de la théorie du Big Bang que deux ingénieurs ont captée avec leur antenne.
2. Élément le plus léger du tableau périodique.
3. Formation des noyaux des éléments légers.
4. Celui qui, à partir des observations de son télescope, a déduit l'accélération de l'expansion cosmique.
5. Phénomène déduit du fait que les galaxies s'éloignent les unes des autres.
6. Energie inconnue qui agirait contre la gravitation pour accélérer l'expansion de l'Univers.
7. Propriété de l'Univers qui dit que quelle que soit la direction dans laquelle on regarde, les propriétés de celui-ci seront les mêmes.
8. Particule élémentaire.
9. Grand espoir des physiciens.



## Correctif

Vous trouverez ci-dessous, les correctifs des trois questionnaires et des mots-croisés.

### Questionnaire rose – niveau basique

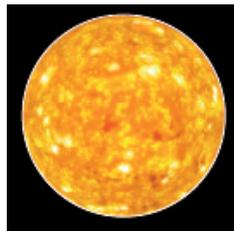
6) Numérote les objets suivants de 1 à 14, du plus petit au plus grand.

Les cellules sanguines



5

Le Soleil



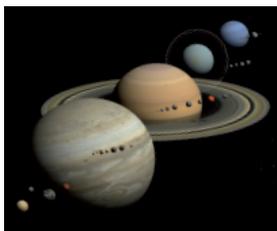
11

L'ADN



4

Le système solaire



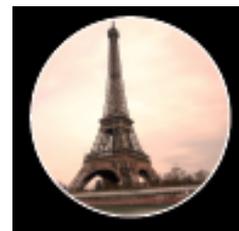
12

L'atome



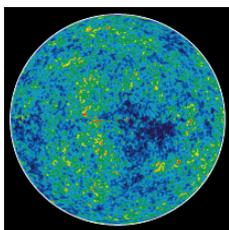
3

La tour Eiffel



8

L'Univers observable



14

La mouche



6

Le mont Everest



9



La Terre



10

Le noyau de l'atome



2

Une galaxie



13

Les quarks



1

L'être humain



7

**7) Il y a un siècle, on pensait que toutes les nébuleuses que l'on pouvait observer appartenaient à notre galaxie. Pourquoi ?**

On n'avait pas les techniques actuelles d'observation du ciel. A cause de l'effet de perspective, les autres galaxies que l'on observait paraissaient semblables aux nébuleuses de notre galaxie.

**8) Pourquoi pense-t-on que l'Univers a commencé avec un « Big Bang »? Qu'est-ce que ça veut dire ?**

En observant le mouvement des galaxies, on constate qu'elles s'éloignent les unes des autres, c'est l'expansion cosmique. Si l'Univers grandit plus on avance dans le temps, si on va dans l'autre sens et qu'on remonte le temps, les galaxies devraient se rapprocher toutes vers un même point. On appelle ce moment où la matière est toute concentrée en un point et qu'elle commence à s'étendre, le Big Bang.

**9) Cite une des fins possibles de l'Univers.**

3 fins possibles : le Big Crunch (grand écrasement), le Big Rip (grande déchirure), ou le Big Chill (grand froid)



## 10) Vrai ou Faux ?

- L'expansion cosmique, ça veut dire que l'Univers grandit. V
- Au fur et à mesure que notre univers grandit, il y en a un autre qui rétrécit. F
- On ne peut pas sortir de l'Univers pour l'observer de l'extérieur. V
- La Terre se trouve au centre de l'Univers. F
- Pour échauffer une théorie, le scientifique tape au hasard et vérifie en observant. F
- L'Univers n'est pas infini. Si on va au bout on se cogne à un mur. F

## Questionnaire bleu – niveau intermédiaire

### 8) Indique l'échelle de chacun des éléments suivants.

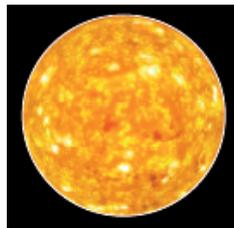
Echelle subatomique, atomique, microscopique, humaine, astrophysique ou cosmologique ?

Les cellules sanguines



microscopique

Le Soleil



astrophysique

L'ADN



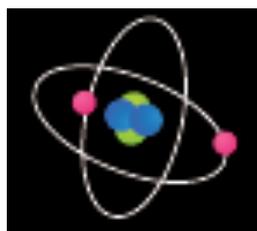
microscopique

Le système solaire



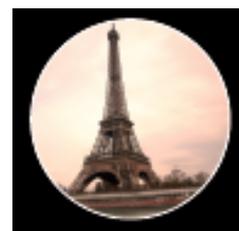
astrophysique

L'atome



atomique

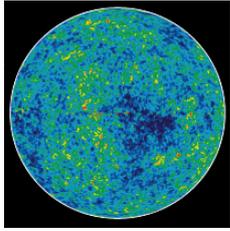
La tour Eiffel



humaine



L'Univers observable



cosmologique

La mouche



humaine

Le mont Everest



humaine

La Terre



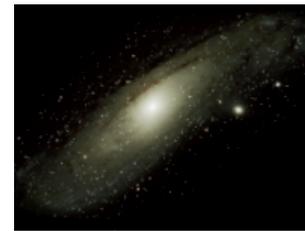
astrophysique

Le noyau de l'atome



atomique

Une galaxie



cosmologique

Les quarks



subatomique

L'être humain



humaine

## 9) Pourquoi pense-t-on que l'Univers a commencé avec un « Big Bang »?

En observant les galaxies, on a constaté qu'elles s'éloignaient les unes des autres. On en a déduit qu'à l'origine, elles devaient être concentrées en un point. Le terme Big Bang désigne le moment où elles auraient commencé à s'étendre.

## 10) Cite 3 preuves de l'expansion cosmique.

La fuite des galaxies, le rayonnement fossile et l'abondance des éléments légers.



**11) Edwin Hubble a établi une relation entre la distance des galaxies et leur vitesse d'éloignement. Quelle est-elle ? Qu'en déduit-il ?**

$V=H_0d$  où  $V$  est la vitesse d'éloignement des galaxies,  $d$  est la distance à laquelle elles se trouvent et  $H_0$  est la constante de Hubble.

Hubble en déduit que l'Univers enflé : c'est l'expansion cosmique.

**12) Explique la technique de détermination des distances des étoiles lointaines.**

Il y a certaines étoiles lointaines dont on connaît la puissance lumineuse. Nous savons que la puissance émise diminue proportionnellement à  $1/d^2$  où  $r$  est la distance qui nous sépare de l'étoile. Comme on peut mesurer la puissance que l'on reçoit sur Terre, on peut isoler la distance et en connaître la valeur.

**13) Quelles sont les 3 fins possibles de l'Univers ?**

Le Big Crunch (grand écrasement), le Big Rip (grande déchirure) et le Big Chill (grand froid).

**14) Vrai ou faux ?**

- **L'expansion cosmique, ça veut dire que l'Univers grandit.**  
V
- **L'inflation est un autre mot pour expansion cosmique.** F
- **Au fur et à mesure du temps, l'Univers se réchauffe.** F
- **A la base, le nom «Big Bang » était une blague !** V
- **On ne peut pas sortir de l'Univers pour l'observer de l'extérieur.** V
- **Pour échafauder une théorie, le scientifique tape au hasard et vérifie en observant.** F
- **Au fur et à mesure que notre univers grandit, il y en a un autre qui rétrécit.** F
- **L'Univers n'est pas infini. Si on va au bout on est retenu par un champ magnétique.** F



## Questionnaire orange – niveau avancé

11) **Donne un exemple pour chaque ordre de grandeur.**

- $10^{-10}$  : l'atome
- $10^{-6}$  : une cellule
- 1 : l'être humain
- $10^4$  : l'Everest
- $10^7$  : la Terre
- $10^{21}$  : une galaxie

12) **Qu'est-ce que le principe cosmologique ? Comment en a-t-on déduit l'expansion cosmique ?**

Le principe cosmologique fait référence au principe copernicien qui dit qu'il n'existe pas une place privilégiée dans l'Univers. Il énonce 2 propriétés de l'Univers. L'homogénéité et l'isotropie : la première signifie que quelle que soit notre position, on observera toujours la même chose, la seconde que quelle que soit la direction dans laquelle on regarde, l'Univers a les mêmes propriétés.

13) **Edwin Hubble a établi une relation entre la distance des galaxies et leur vitesse d'éloignement. Quelle est-elle ? Qu'en déduit-il ?**

$V=H_0 d$  où  $V$  est la vitesse d'éloignement des galaxies,  $d$  est la distance à laquelle elles se trouvent et  $H_0$  est la constante de Hubble. Hubble en déduit que l'Univers enflé : c'est l'expansion cosmique.

14) **Cite les 3 preuves de l'expansion cosmique.**

La fuite des galaxies, le rayonnement fossile et l'abondance des éléments légers.

15) **Combien y a-t-il de forces fondamentales ? Lesquelles ? Vers quoi le physicien voudrait-il arriver à propos de celles-ci ?**

Il y a quatre forces fondamentales : l'interaction faible, l'interaction forte, l'électromagnétisme et la gravitation. Le physicien rêve de pouvoir les unifier en une même interaction à très haute énergie.



**16) Que peux-tu dire à propos de la matière noire ?**

Elle a été détectée grâce à la mesure de la vitesse de rotation des galaxies. En effet, celles-ci tournaient trop vite pour la quantité de matière visible. On en déduit donc qu'il y a une grande quantité de matière invisible, c'est pourquoi on l'appelle la matière noire. Une autre preuve de son existence est les mirages gravitationnels. On estime sa présence à 20% dans l'Univers.

**17) Selon la relativité générale, la gravitation est en fait une déformation de l'espace-temps. Explique.**

La théorie de la relativité générale est une théorie géométrique de la gravitation. Selon ce formalisme, la présence de masse/énergie déformerait l'espace-temps au point que le plus court chemin entre deux points ne serait plus systématiquement un segment de droite. Cela explique qu'on tombe vers les objets massifs.

**18) Le Big Bang est-il physiquement possible ? Explique.**

Non, le Big Bang n'est pas physiquement possible. C'est une singularité, une asymptote. Un état de la matière infiniment dense est impossible.

**19) Que pourrait apporter la mécanique quantique à la théorie actuelle du Big Bang ?**

La mécanique quantique est la physique de l'infiniment petit. Des avancées dans cette branche pourraient nous apporter une solution au problème de la singularité du Big Bang mais tout cela est encore au stade de la recherche.

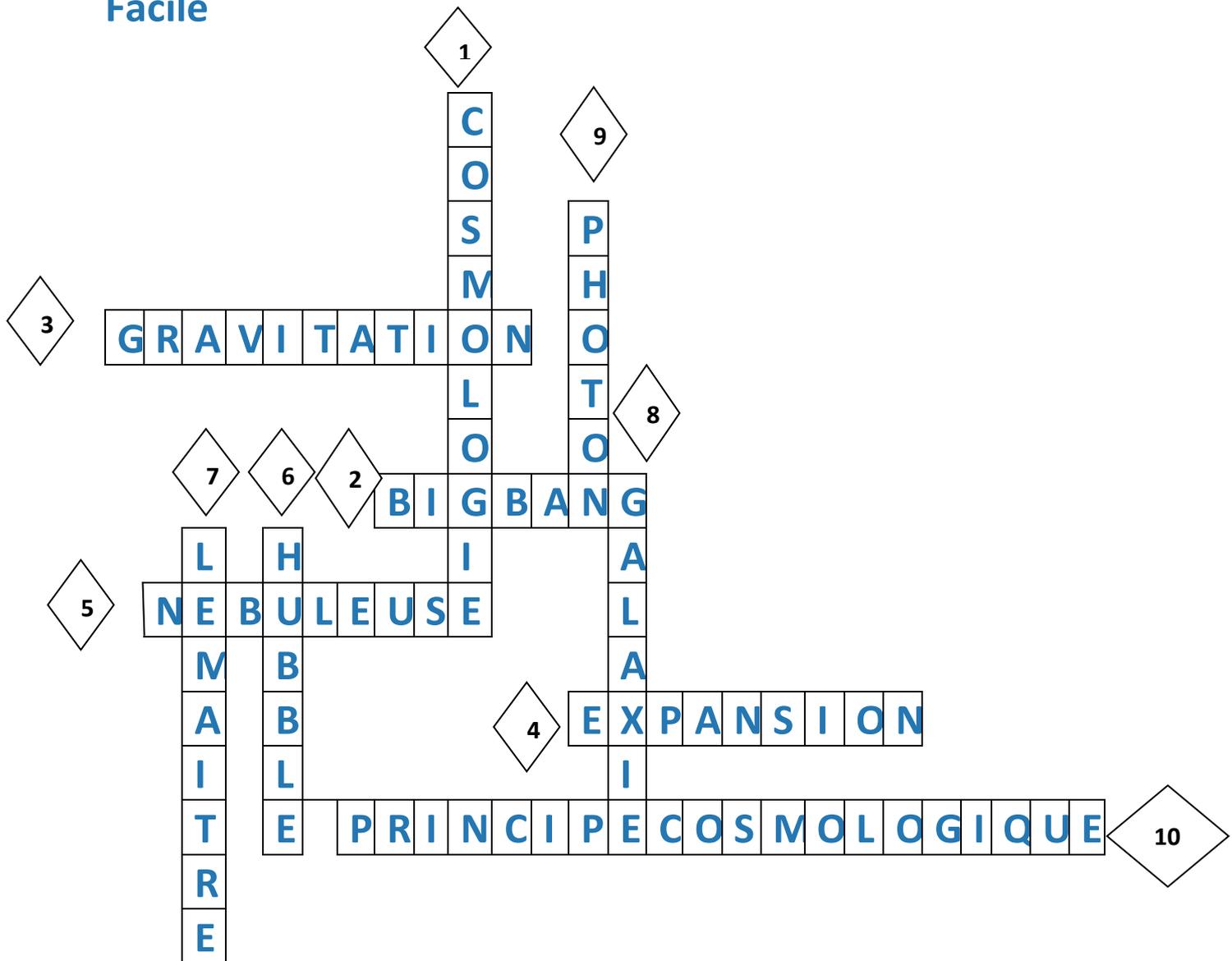
**20) A quelle température la nucléosynthèse primordiale a-t-elle eu lieu ?**

De l'ordre de 10 milliards de degrés.



# Mots croisés

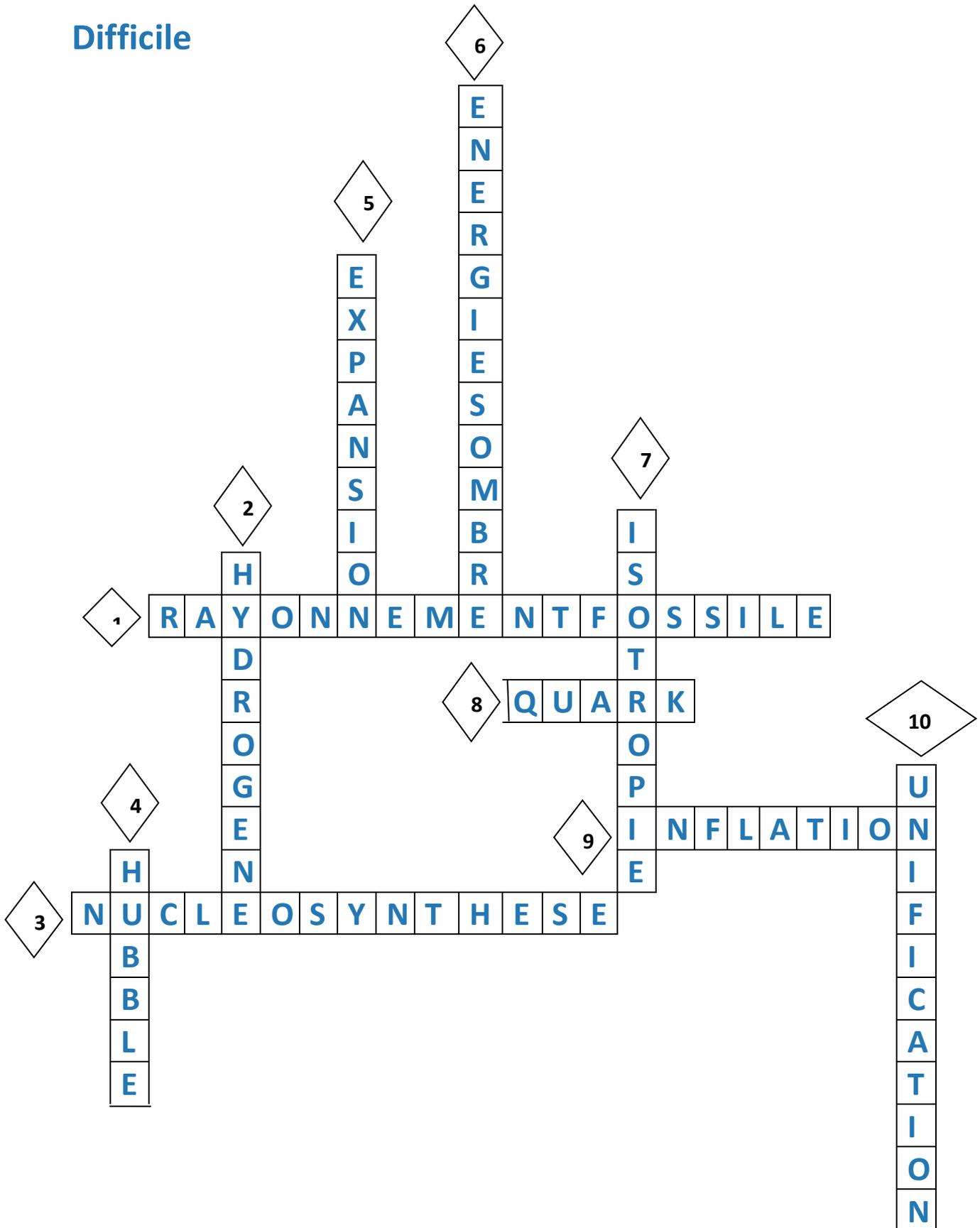
## Facile



11. Etude de l'Univers.
12. Phénomène qui serait à l'origine de l'Univers.
13. Force qui fait que les corps s'attirent entre eux.
14. Phénomène déduit du fait que les galaxies s'éloignent les unes des autres.
15. Nuages de poussière interstellaire et de gaz.
16. Celui qui a découvert que les galaxies s'éloignaient en accélérant grâce aux observations de son célèbre télescope.
17. Celui qui est à la base de la théorie du Big Bang.
18. La Voie Lactée en est une.
19. Particule de lumière.
20. Principe qui dit que la Terre n'a pas une place privilégiée dans l'Univers et qu'il est comme une grosse soupe homogène.



# Difficile



11. Preuve de la théorie du Big Bang que deux ingénieurs ont captée avec leur antenne.
12. Élément le plus léger du tableau périodique.
13. Formation des noyaux des éléments légers.
14. Celui qui, à partir des observations de son télescope, a déduit l'accélération de l'expansion cosmique.
15. Phénomène déduit du fait que les galaxies s'éloignent les unes des autres.
16. Energie inconnue qui agirait contre la gravitation pour accélérer l'expansion de l'Univers.
17. Propriété de l'Univers qui dit que quelle que soit la direction dans laquelle on regarde, les propriétés de celui-ci seront les mêmes.
18. Particule élémentaire.
19. Grand espoir des physiciens.



# Visiter l'exposition

## Où ?

### **Confluent des Savoirs – Business & Learning Centre (Université de Namur)**

5, rue Godefroid à 5000 Namur

Au cœur de la ville, près de la gare, à proximité des bus, du train et des commerces.

## Quand ?

Du 2 septembre au 20 décembre 2019

### **Horaires d'ouverture de l'exposition**

Du lundi au vendredi de 9h00 à 16h00 (hors jours fériés)

## Pour qui ?

- **Exposition** : pour les élèves à partir de 12 ans.  
Vous souhaitez venir visiter l'exposition avec votre classe ; prenez contact avec l'équipe du Confluent des Savoirs afin que nous vous réservions un accueil sur mesure.  
Les visites des expositions sont libres, l'équipe du CDS ne prévoit pas de visites guidées de celles-ci.
- **Ateliers** : les ateliers scolaires sur la thématique de l'astronomie sont organisés par le Confluent des Savoirs pour les classes de 5<sup>ème</sup> et 6<sup>ème</sup> primaire de septembre à décembre.  
Plus d'informations sur les ateliers via : [cds.unamur.be/scolaires/apprentisastro](http://cds.unamur.be/scolaires/apprentisastro)

## Tarif ?

- **Exposition** : entrée gratuite, visite libre
- **Ateliers** : 3€/enfant - Plus d'informations sur les ateliers via : [cds.unamur.be/scolaires/apprentisastro](http://cds.unamur.be/scolaires/apprentisastro)

## Contacts

### **Confluent des Savoirs (UNamur)**

5, rue Godefroid B-5000 Namur

081/72.55.30

[cds@unamur.be](mailto:cds@unamur.be)

[cds.unamur.be](http://cds.unamur.be)



## Les crédits

Cette exposition est une réalisation du département de Mathématique de l'Université de Namur, en collaboration avec Atout Sciences (cellule de diffusion des Sciences et Techniques de l'Université de Namur), le Cercle Astronomique Mosan, le département de Physique de l'Université de Namur et le centre de Cosmologie, de Physique des Particules et de Phénoménologie (CP3) de l'Université Catholique de Louvain (UCLouvain).

Elle a vu le jour grâce au programme d'Action de Recherche Concertée qui finance le projet ARCCOS, une collaboration scientifique entre le centre namurois de systèmes complexes (naXys) de l'Université de Namur et le centre CP3 de l'UCLouvain.

Le projet ARCCOS contribue à établir un pôle d'excellence de recherche en cosmologie. Il regroupe une dizaine de chercheurs des deux universités, sous la direction des professeurs André Füzfa (UNamur) et Christophe Ringeval (UCLouvain), autour d'un projet commun investiguant une possible physique commune à l'inflation primordiale et à l'énergie noire.



**Commissaire d'exposition**

André Füzfa

**Textes et présentation**

André Füzfa, Jérémy Requier et Marie Botman

**Comité scientifique**

André Füzfa, Christophe Ringeval et Jérémy Requier

**Graphisme et mise en page**

Véronique Geubelle

**Communication**

Hélène Muys et Sébastien Zaghdane

**Images d'Astronomie**

Cercle Astronomique Mosan

**Ouvrages anciens**

Réserve précieuse de la Bibliothèque universitaire Moretus Plantin

**Remerciements**

Matthieu Dontaine, Fernande Frising, Bertrand Hespel, Marcel Rémon, Joseph Trémoureux (UTAN) et Jean-Pol Vandijck, le personnel de la BUMP

**Soutien Financier**

FRFC, Fédération Wallonie-Bruxelles, La Wallonie - Service Public de Wallonie (DG06, département du Développement Technologique)

