

N° 88 AVRIL 2017

AUVERGNE

Sciences



LA COULEUR EN PRATIQUE

PRIVÉE DE DÉCOUVERTE DEPUIS 50 ANS LA SCIENCE EST-ELLE EN PANNE ?

RICHE DE SES DÉCOUVERTES DEPUIS 50 ANS, LA SCIENCE EST EN MARCHÉ !

LES MICRO-ORGANISMES DANS LE DÉVELOPPEMENT DES BIOTECHNOLOGIES.

L'AFFAIRE LYSENKO

LA CONSTRUCTION MÉTALLIQUE FRANÇAISE DU 21^e SIÈCLE

LE MYSTÉRIEUX PARFUM DES ROSES



Revue de l'ADASTA

Association pour le Développement
de l'Animation Scientifique et Technique en Auvergne



Notre Assemblée générale annuelle ordinaire statutaire 2017 tenue le 15 février dernier a été l'occasion d'un bilan de l'exercice 2016 encourageant et a donné, je crois, l'image du dynamisme de notre association. Soyez-en remerciés car vous en êtes les auteurs et les inspirateurs et je souhaite vous voir toujours plus nombreux à vous investir dans l'ADASTA : votre soutien, votre présence et votre participation sont autant d'encouragements pour ceux qui se mobilisent à divers titres, au sein du Conseil d'Administration mais pas seulement.

Aujourd'hui vous avez entre les mains la dernière livraison de notre revue. Comme d'habitude, vous y trouverez des articles sur des sujets très divers dont j'espère que vous les jugerez intéressants et les comptes-rendus de nos dernières conférences mensuelles. À ce sujet, je dois apporter quelques précisions concernant le compte-rendu de sa conférence par M. Christian MAGNAN. Cet article pour le moins engagé pourra vous surprendre car, s'il reflète bien la teneur de l'intervention, il ne correspond pas à ce que vous avez l'habitude de lire dans AUVERGNE Sciences. Au titre "Privée de découverte depuis 50 ans, la science est-elle en panne ?" la réponse du conférencier est évidemment oui, ce qui n'a pu que faire réagir quelques membres de l'ADASTA comme vous habitués à une terminologie plus feutrée qu'*imposture* en parlant d'un Prix Nobel, *arnaque médiatisée avec des moyens de propagande* à propos d'une hypothèse de travail et *vérité que cache encore la science officielle* pour qualifier des éléments de raisonnement.

Passons sur la forme, voyons le fond. Comme il est d'usage en matière de communication, nous publions bien sûr cet article *in extenso* et laissons à son auteur la responsabilité des termes qu'il emploie et des thèses qu'il soutient : nous savons tous que la Science est aussi confrontation d'idées et le débat ne nous fait pas peur. Par contre, après avoir proclamé haut et fort mon incompetence en cosmologie et astrophysique qui ne sont pas mes spécialités, je me demande si ledit débat nécessite de jeter l'opprobre

sur l'ensemble de la communauté scientifique internationale, à commencer par le Comité Nobel ? Personnellement j'ignore s'il existe réellement une "science officielle" comme M. MAGNAN en porte l'accusation. Dans le rappel historique ci-après sur "L'Affaire LYSENKO", on constate à quels errements cela peut conduire... Et *in fine*, dans l'article en question, après avoir critiqué les thèses et dénoncé les errements de cette "science officielle", que propose l'auteur à la place ?

Cet article a particulièrement fait réagir notre vice-Président Délégué Bruno RAKINSKI qui estime, comme la plupart d'entre nous, que la science ne s'est pas du tout arrêtée de progresser en 1966, bien au contraire. Nous publions donc sous sa plume un article très documenté qui soutient ce point de vue, évoquant des avancées scientifiques majeures réalisées dans la connaissance de l'univers depuis 50 ans.

Je vous laisse juges.

Enfin je ne voudrais pas terminer sans me réjouir avec vous de la distinction qui vient d'être décernée à nos amis Jean-Claude CAPELANI et Jean CHANDEZON, tous deux nommés Chevaliers dans l'Ordre des Palmes Académiques et récemment décorés par Annie VEYRE (*cf. 3^e de couverture*). L'honneur qui leur est fait constitue un hommage à leur carrière au service de la science ; cet honneur rejaille aussi sur l'ADASTA, tant ils se sont dévoués - et continuent de se dévouer - à notre association, l'un comme ancien Président, l'autre comme actuel vice-Président. Nous leur adressons nos chaleureuses et amicales félicitations.

Bonne lecture de ce numéro !

Jean-Philippe MOULIN
Président de l'ADASTA

MERCI À NOS SPONSORS



S O M M A I R E

LA COULEUR EN PRATIQUE.....	P1
PRIVÉE DE DÉCOUVERTE DEPUIS 50 ANS LA SCIENCE EST-ELLE EN PANNE ?....	P9
50 ANS DE SES DÉCOUVERTES DEPUIS 50 ANS, LA SCIENCE EST EN MARCHÉ !.....	P14
LES MICRO-ORGANISMES DANS LE DÉVELOPPEMENT DES BIOTECHNOLOGIES.....	P31
L'AFFAIRE LYSENKO UN DRAME POUR LA SCIENCE EN PLEIN XX ^{ème} SIÈCLE.....	P36
LA CONSTRUCTION MÉTALLIQUE FRANÇAISE DU 21 ^{ème} SIÈCLE.....	P44

Comité de rédaction de la Revue Auvergne-Sciences

Directeur de la publication : Jean-Philippe Moulin • Rédacteur en chef : Philippe Choisel

Membres : Georges Anton, Jean-Claude Capelani, Jean Chandezon, Roland Fustier, Michel Gendraud, Paul-Louis Hennequin, Bruno Rakinski, André Schneider



Photo: de couverture : galaxie M51 ou galaxie du Tourbillon (Whirlpool galaxy en anglais). M51 se trouve à une distance d'environ 30 millions d'a.l. La partie visible de sa masse représente plus de 160 milliards de fois la masse du soleil. Un trou noir de masse énorme se cache en son centre. Au milieu de la photo on voit la vaste structure de la galaxie spirale NGC 5194 et à sa droite la galaxie irrégulière NGC 5195 qui interagit avec le bras supérieur de NGC 5194. L'interaction gravitationnelle des deux galaxies est à l'origine de la naissance de nombreuses étoiles dans les zones de couleur bleue du cliché, significative de la présence d'un grand nombre d'étoiles jeunes, chaudes et de masse élevée. Ces étoiles de courte durée de vie s'éteindront après quelques millions d'années. En comparaison, notre soleil, âgé de 4,5 milliards d'années, n'est qu'à la moitié de sa vie. Dans cette galaxie le cycle de vie des étoiles est nettement plus rapide que dans la Voie Lactée. Pour preuve, l'observation depuis 1994 de 3 supernovas dans NGC 5194, c'est-à-dire l'effondrement d'une étoile suivi de son explosion.

Merci à Rolf Schlee (D) - Traduction par l'Adasta

© toute reproduction partielle ou totale interdite. Les articles publiés sont de la responsabilité exclusive de leurs auteurs.



LA COULEUR EN PRATIQUE

par **Gérard MOUILLAUD**

Membre ADESTA, Technicien Institut Gay-Lussac

En 2001 et 2012, «Auvergne Sciences» avait présenté des sujets sur la couleur. Dans cet article, qui reprend des éléments de notre mini-conférence du 19 octobre 2016 nous allons plus particulièrement nous intéresser à la nature, à la préparation et à la mise en œuvre des produits colorants que sont les pigments et les colorants proprement dits. Considérons les pigments comme des produits solides pulvérisés et dispersés dans une matrice liquide, pâteuse ou solide et les colorants comme des produits solubilisés dans une phase liquide.

AU CATALOGUE DES COULEURS HISTORIQUES

Il était d'usage de commencer une présentation scientifique par «Dès la plus haute antiquité ...» désormais il faut absolument passer à «Dès la plus haute préhistoire ...»



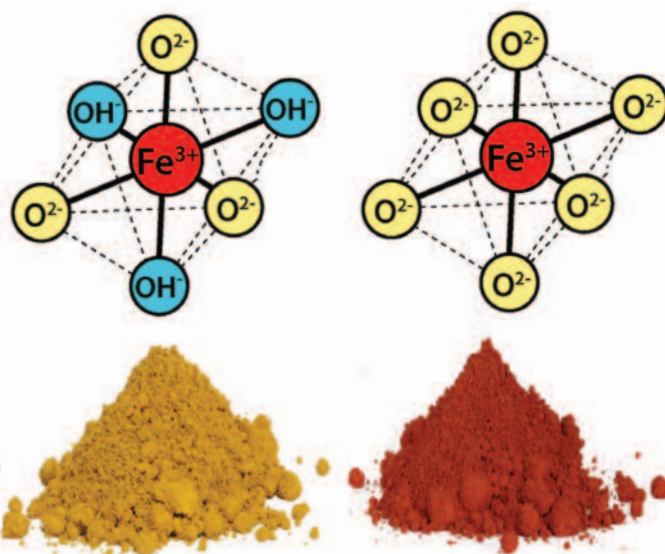
Chevaux de la grotte Chauvet 40 000 BP

En effet voici plus de 100 000 ans, les hommes ont découvert, dans leur environnement proche, le pouvoir colorant de certaines matières comme des résidus de bois brûlés, des terres naturelles et des poudres diverses (*oxydes métalliques*).



1- Charbons de bois, fusains 2- Oxyde de manganèse
3- Noirs de carbone modernes (le plus fin est le plus gris)

L'application des ces matières sur des supports divers, avec leurs doigts, leurs mains, des bâtons, conduisait à l'apparition de ces traces colorées que nous appelons aujourd'hui dessins.



Goethite (brun jaune) et Hématite (brun rouge)

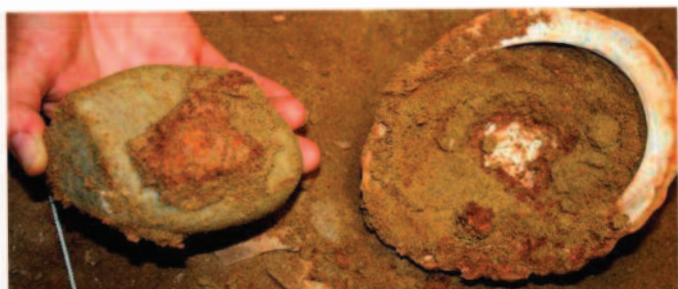
Par la suite, avec l'usage du feu, ils ont constaté le changement de couleur de certaines de ces terres, selon leur mélange et le temps de contact avec la chaleur élevée. De plus, le mélange de tous ces matériaux colorés avec des produits liquides divers, eau, graisses, fluides corporels, ... permettait de les amalgamer, de les contenir, de les manipuler et de les appliquer plus facilement. Ils venaient d'inventer les liants et diluants.



Bison de la grotte d'Altamira (Espagne) 15 000 BP

Les matières minérales n'étaient pas les seules concernées car des plantes et des animaux proposaient aussi des produits colorants dont la persistance n'était pas toujours bonne et il a fallu plus de temps pour les rendre résistants dans leur environnement.

La démarche de créer des figures diverses et colorées a été déclenchée - supposition - par des attrait divers, du plus futile (*tiens c'est amusant!*) aux plus ésotériques, le besoin de témoigner ou de répondre à des rites divers, dont les rites mortuaires sont les plus marquants. Le dessin pariétal était né. En quelle année ? 100 000 BP (*Before Present*) au moins puisque la découverte dans la grotte de Bomblos, en Afrique du Sud, montre une belle maîtrise dans la conception des pigments primitifs.



Les ormeaux de la grotte de Bomblos 100 000 BP

En tout cas c'était le début de la création d'un catalogue de couleurs toujours disponibles aujourd'hui. Même si certaines références ont été retirées pour des raisons de coût et, problème plus récent, d'hygiène et sécurité !

Les arts du feu, qui concernent les terres cuites, les terres vitrifiées, les terres émaillées, les verres opaques puis transparents, ont permis d'enrichir le catalogue. Avant de quitter les couleurs primitives (rouge-noire), voici l'exemple d'une technologie remarquable, mise en oeuvre 700BC (avant JC), qui a conduit à la décoration des célèbres poteries de Corynthe avec ses figures noires!



Figures noires et figures rouges

Dans le premier cas on peint les figures avec une solution d'argile. Une première cuisson à 900°C en atmosphère oxydante (four à événements) conduit à un vase entièrement rouge. On ferme les événements pour une deuxième cuisson à 950°C en atmosphère réductrice et fumée de bois verts. Le vase devient entièrement noir et les zones peintes se vitrifient.

Enfin on revient en atmosphère oxydante pour une troisième cuisson à 850°C où les figures vernies restent noires tandis que le vase devient rouge. Par la suite les figures rouges seront obtenues par une suite d'opérations inverses où le vase sera verni et les figures non protégées.

En 5000 ans, les chimistes ont progressivement découvert de bonnes formules minérales puis organiques permettant de couvrir la gamme du spectre visible, illustré par l'arc-en-ciel, quel que soit le système colorimétrique utilisé, trichromique (rouge-vert-bleu) ou quadrichromique (cyan-magenta-jaune-noir) pour les encres des imprimeurs.

VIOLET, INDIGO, BLEU

De toutes les couleurs il en est une qui a toujours fait l'objet d'une véritable obsession : le bleu.



1- Lazurite avec des traces d'or 2- Azurite 3- Lapis Lazuli

Du naturel et coûteux **lapis lazuli** au synthétique «bleu égyptien» il y a tout un monde technologique séparant ceux qui faisaient de la science sans le savoir, des savants modernes qui disposent d'outils extraordinaires pour expliquer, progressivement, le pourquoi des choses !

LE BLEU EGYPTIEN

Premier pigment synthétique
Mésopotamie 3700 BP - Egypte 3400 BP

On mélange :

du sable argileux (SiO_2)
du calcaire (CaCO_3)
des rognures de cuivre ou de bronze
du natron (carbonate de soude)

On porte à 900°C pendant 30 heures
jusqu'à naissance des cristaux de
Cuprorivaïte ($\text{Ca}^{2+}, \text{Cu}^{2+}, [\text{SiO}_4]^{4-}$)

*En réduisant la part de cuivre et
en augmentant la part de sodium
on obtient le vert égyptien*

La production du bleu égyptien, mis au point par les mésopotamiens, grands spécialistes des terres vernissées, vers 3700 BP avant de parvenir en Egypte, a demandé des centaines d'années pour atteindre sa qualité finale.

Dans le souci de trouver un bleu moins cher que le lapis lazuli, les recherches ont été continuées sur le bleu outre-mer. Ainsi, le bleu smalt, obtenu par broyage d'un verre teinté au cobalt, dérivé d'un procédé mésopotamien et égyptien mais surtout développé à la Renaissance a été beaucoup utilisé par les peintres flamants jusqu'à Murillo.

Hélas, les bleus peints par ce dernier ont souffert de

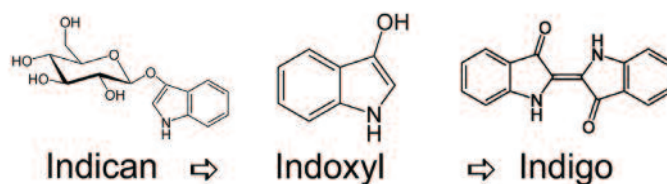
la réaction d'un mauvais smalt trop riche en potasse qui les a fait virer au gris : les ions K^+ du verre migrent et provoquent un changement de coordination de l'ion cobalt qui perd sa couleur bleue (par Synchrotron SOLEIL, labos CNRS et C2RMF).

Le **bleu de Prusse** voit le jour en 1706. C'est un ferrocyanure ferrique découvert par hasard par le berlinois Johan Jacob Diesbach. Celui-ci cherchait une laque carminée, quand une potasse polluée en a voulu autrement. Mais avec ce bleu (en fait un bleu-vert) de Berlin on est loin de la luminosité de l'outremer.

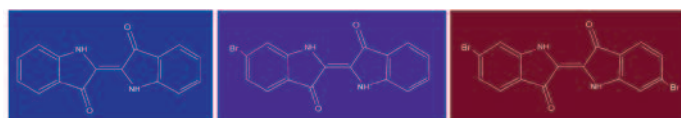
sécher une pièce imprégnée verte qui ne deviendra bleue qu'avec l'action de l'oxygène de l'air !



1 - *Indigofera heterantha* / 2- Extraction du pigment
3- Bloc d'indican / 4- Bain de trempage
5- Teinture de laine / 6- Batik / 7- Jean's (ici délavés !)



La couleur violette est généralement obtenue par modification des bleus précédents, ici par bromation.



La bromation de l'indigo conduit à la Pourpre de Tyr

Pendant une couleur violette pour la teinture de la laine est obtenue par l'orseille extraite de plusieurs lichens, dont le roccella fuciformis. L'orseille a été identifiée comme le colorant violet de la tapisserie de la Chaise-Dieu lors de sa restauration en 2014-2016.

2009 : LE DERNIER BLEU

Une découverte inattendue a été faite en 2009 avec l'obtention d'un bleu appelé **YInMn** car issu de la fusion vers 1100°C d'un mélange d'Yttrium, d'Indium et de Manganèse.

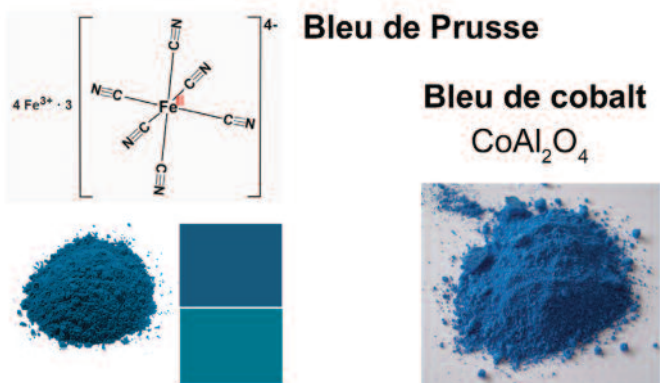


Du bleu égyptien au bleu YInMn : 6000 ans de recherche !

C'est en cherchant des produits pour l'informatique qu'une équipe du professeur Subramanina de l'Université d'Orégon a obtenu ce bleu, commercialisé en 2016 par la Shepherd Color Company.

DES VERTS

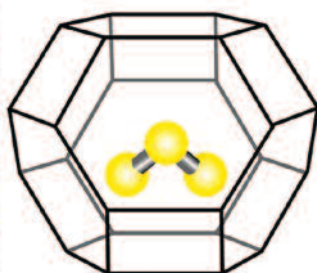
Nous avons vu que le vert égyptien, obtenu par une variante du bleu égyptien, était le premier vert synthétique, mais de nombreuses pierres ont donné des verts typés.



Il faudra attendre presque un siècle pour que Louis Jacques Thénard propose en 1802, un aluminat de cobalt dit **bleu de cobalt** bien plus satisfaisant. Van Gogh aurait écrit à son frère « Le bleu de cobalt est une couleur divine et il n'y a rien de plus beau pour installer une atmosphère ».

A noter que la substitution du cobalt par le magnésium (MgAl_2O_4) conduit au spinelle de couleur ... rouge !

Enfin, c'est en 1828 qu'apparaît le **bleu de JB Guimet**. Avec ses boules bleues, il a été bien connu des lavandières comme étant le premier azurant pour la lessive. C'est un thiosulfate d'aluminosilicate de sodium. En effet on associe généralement le bleu au cuivre et au cobalt mais on est loin du compte. Il faudra attendre 1970, grâce à la méthode



de résonance paramagnétique, pour que l'on prouve que le bleu outremer de la lazurite est dû à une structure disulfure emprisonnée dans un réseau de silicate d'aluminium !

Nous ne pouvons pas quitter les teintes de bleu sans citer le bleu indigo, un colorant d'origine végétale qui a conquis le monde par son utilisation dans la teinture d'une toile de coton et de lin immortalisée par un certain Levi Strauss et ses « jeans ». Les opérations qui conduisent de la feuille de l'indigotier (*indigofera heterantha*) à l'obtention d'un tissu bleu indigo sont une succession de réactions oxydation-réduction surprenantes dont la dernière consiste à mettre à



1- Malachites, carbonate de cuivre
 2- Chrysocolle, silicate d'hydroxyle de cuivre
 3- Turquoise, phosphate hydraté de cuivre et aluminium
 4- Émeraude
 5- Volkonskoïte (aluminosilicate de chrome, magnésium, fer)

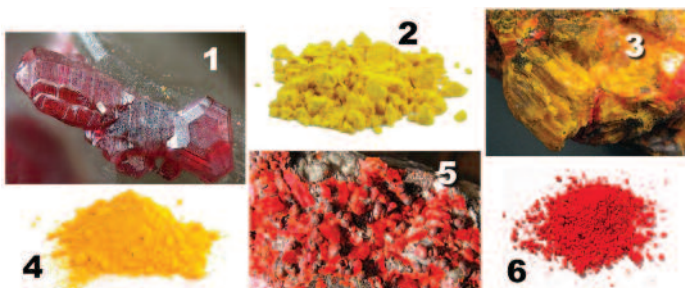
Cependant, comme souvent pour les verts, la pierre a donné son nom à une couleur mais pas à un pigment. Le vert dit **malachite** n'est pas obtenu par broyage de la pierre mais synthétiquement : c'est un vert d'aniline. Bon indicateur coloré de pH (jaune si acide, incolore si basique), il est aussi un précieux indicateur des sulfites. Mais il faut oublier son usage comme antiparasitaire en aquaculture, comme c'est malheureusement encore le cas en Asie extrême-orientale, car la molécule est toxique (tumeur du foie).

Le vert-bleu **turquoise** peut être approché par un oxyde de chrome et cobalt, mais ce nom couvre de fait un éventail allant du bleu-ciel « céruleum » (stannate de cobalt) au vert du sulfate de cuivre. Chaque marchand de couleur a sa formule.

Le **vert Véronèse**, ou vert émeraude, que le peintre n'a jamais utilisé, car nommé ainsi deux siècles après sa disparition, était un acéto-arséniate de cuivre. Cette couleur, aujourd'hui obtenue à partir de phtalocyanine, de monoazoïque et de charges diverses, est autrement moins toxique.

JAUNE, ORANGÉ, ROUGE

Avec cette gamme des couleurs vives et chaudes nous entrons dans le domaine des composés dérivés du mercure, du plomb, de l'arsenic et autre cadmium, c'est-à-dire de pigments particulièrement toxiques !



1- Cinabre, sulfure de mercure
 2- Jaune de cobalt, Hexacobaltonitrite de potassium
 3- Orpiment, trisulfure d'arsenic
 4- Sulfure de cadmium
 5- Realgar, sulfure d'arsenic
 6- Vermillon, sulfure de mercure préparé

Des taches blanches apparues sur des toiles de Van Gogh ont été identifiées comme l'action de l'oxygène sur le jaune du CdS (sulfure de cadmium) conduisant au CdSO₄ blanc. D'autres analyses ont révélé l'usage par le peintre du **jaune de Naples** qui est un antimoniate de plomb (SbOPb).

La majorité des pigments de cette gamme sont désormais d'origines synthétiques et de types azoïques.

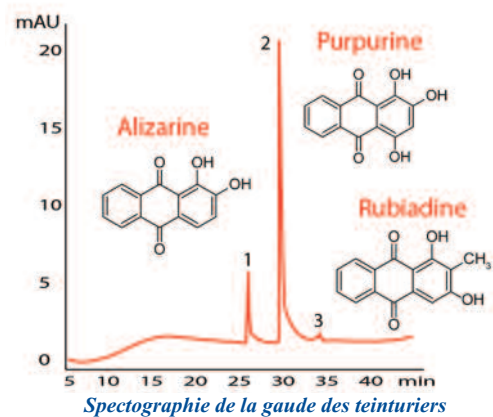


1- Gaude des teinturiers 2- Courou 3- Garance 4- Safran 5- Carthame

La nature propose des végétaux qui ont été utilisés dès l'antiquité pour teindre des tissus. Ainsi la **garance** des pantalons des soldats français de 1914 qui provient de la «rubia tinctoria» était déjà en usage chez les Égyptiens.

Les jaunes sont assurés par le safran ou la gaude des teinturiers.

Le rouge de la cire enveloppant certains fromages hollandais provient de la graine de «Bixa orellana» qui permet aussi de teindre avec des variantes de jaune orangé.



Les méthodes modernes d'analyses permettent d'identifier les molécules responsables des couleurs, comme celle donnée par la gaude des teinturiers, ou de plantes proches. Elle est due à la présence de trois dérivés de l'antraquinone : purpurine, alizarine et rubiadine. La répartition des ces composés est différente selon l'origine de la plante.



Cochenille et Murex trunculus ou hexaplex

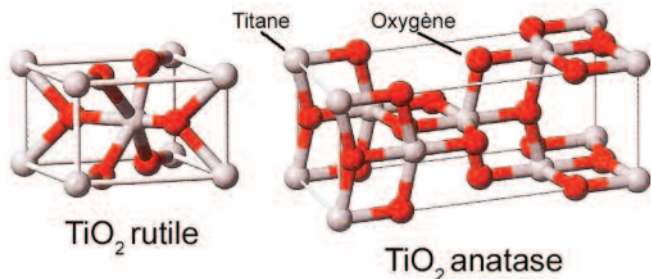
Côté animaux il faut retenir deux rouges très particuliers : celui venant de la **cochenille** qui a longtemps servi à colorer, entre autres, le sirop de grenadine, et le rouge, hors de prix, qui teignait la «toga picta» pourpre des notables romains extrait de coquillages de type **murex**.

La signature des colorants est aujourd'hui un outil pré-

cieux dans l'identification des oeuvres. Il est par exemple possible de différencier les rouges de cochenilles de pays différents !

Blancs

Les principaux pigments blancs utilisés sont : Blanc de Meudon (CaCO_3), Oxyde de zinc (ZnO), Blanc de Lithopone ($\text{BaSO}_4 + \text{ZnO}$), Blanc de Titane rutile ou anatase (TiO_2). Le blanc de Plomb (PbCO_3) ou blanc de Saturne, aussi connu sous le nom de céruse, est interdit dans les peintures depuis 1926.

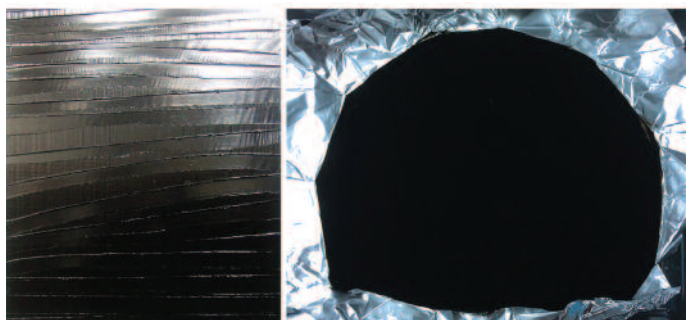


Les oxydes de titane ne sont jamais purs dans la nature. En 1923 un procédé français a permis de fabriquer de l'anatase pur et, en 1941, un procédé américain a conduit au rutile pur. En 1950, le rutile a été traité par un enrobage à l'alumine et à la silice pour réduire le farinage des peintures.

Ces dates se sont révélées précieuses pour la détection de faux tableaux lors d'expertises.

2012 : LE DERNIER NOIR OU LA COULEUR VIDE

Nous avons commencé le remplissage de notre armoire des couleurs par le noir, nous allons la compléter par une nouvelle matière noire : le «**Vantablack**» (Vertically Aligned NanoTube Arrays) inventé en 2012 par la société Surrey Nanosystems.



A gauche : le noir brillant selon Soulages - A droite : le noir absolu Ventablack

Cette matière est constituée d'un faisceau de nanotubes de carbone, « une forêt de trous noirs » qui offre un coefficient d'absorption de la lumière à 99,965 %. Le plasticien britannique Anish Kapoor en aurait obtenu la concession exclusive pour un usage artistique .

DE L'UTILISATION DES PIGMENTS

L'utilisation des pigments a constamment évolué depuis les peintures pariétales préhistoriques jusqu'aux peintures murales du XX^{ème} siècle, en passant par la réalisation des fresques, la colorisation des temples et des églises et la peinture sur chevalet. Nous rentrons dans le domaine de l'histoire de l'art, cependant la formulation des pigments a obéi à des règles très logiques.

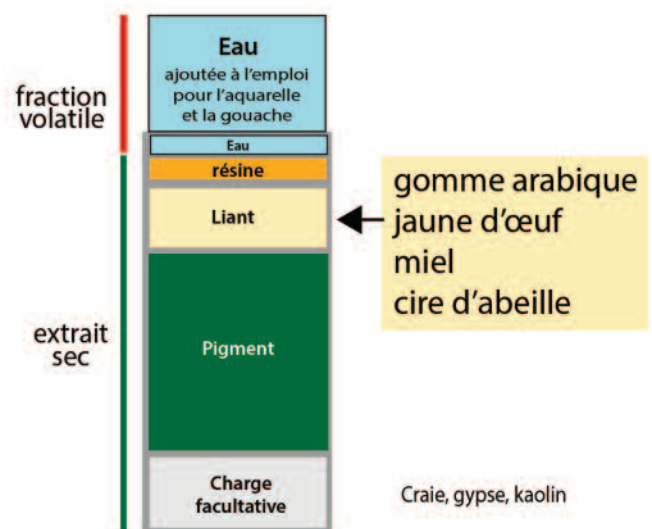
Première opération à réaliser : le broyage des pigments qui est un critère majeur pour la couleur finale. Plus les grains seront fins plus la couleur sera claire, puisque mieux dispersés sur la surface qui en sera plus réfléchissante.

Deuxième opération : agglomérer les poudres obtenues pour qu'elles soient manipulables et applicables. Elles seront dites « liées » et les liants les plus courants sont l'eau, le jaune d'oeuf, les huiles (de noix, de lin), les résines (gomme arabique, résine de pin, ...), les colles (de peau, de poisson).

Si l'on prend le cas du fusain moderne, guère différent du charbon de bois préhistorique, on peut l'appliquer directement: il va s'user selon la rugosité du support en laissant la trace désirée. Mais si on ne le protège pas par l'application d'un film protecteur (fixatif), la poudre va tomber et la durée de vie du dessin sera aléatoire. Des fusains modernes sont obtenus par compactage de grains légèrement encollés comme pour les pastels secs. Les mines des crayons noirs sont constituées par un alliage de graphite et d'argile dont la proportion détermine la dureté. Pour les mines de couleur on peut ajouter aux pigments du talc, du kaolin, de la cire ou de l'huile.

Le schéma ci-dessous donne la composition globale d'une peinture dite à l'eau. Les **tempera** (ou détrempe à l'oeuf), les **cera colla** (où l'oeuf est remplacé par un mélange de caséine et de cire), les aquarelles (sèches ou en pâtes) et les gouaches sont ainsi formulées. Pour les tempera à l'oeuf il faut ajouter un conservateur anti-ferment, comme le camphre.

Tempera - Aquarelle - Gouache - Craie - Pastel



Petite incursion dans l'histoire de l'art, en notant que ce type de peinture peut être déposé sur un enduit sec (secco), comme les hiéroglyphes peints des tombes égyptiennes, ou sur un enduit frais (fresco, fresque). Dans ce deuxième cas il y a pénétration dans le support et des modifications de couleurs par réaction avec les éléments des enduits. Le point commun pour ces peintures est que l'application se fait par couches successives peu riches en pigments (glacis) et que les retouches sont pratiquement impossibles.

Les œuvres réalisées avec ces formulations « à l'eau » sont la plupart du temps protégées (fixées) par un film de vernis

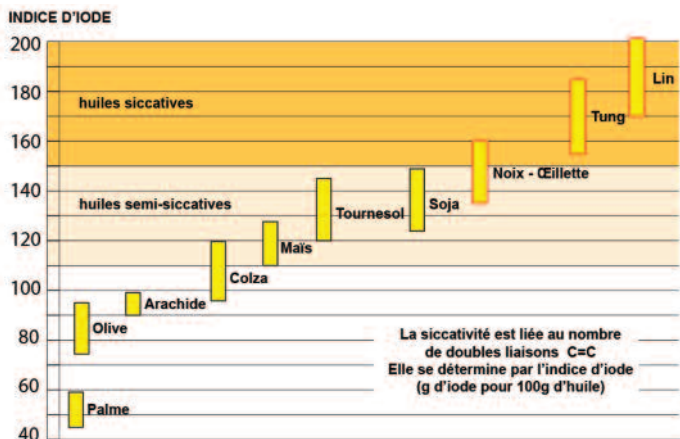
(résine, cire, huile) car elles sont sensibles à l'humidité, aux gaz (CO₂ et SO₂).

LES PEINTURES A L'HUILE

On arrive à une étape délicate de la formulation d'une peinture à l'huile en raison de sa « **siccativité** ». La siccativité, quantifiée par son indice d'iode, exprime le nombre de doubles liaisons de la chaîne moléculaire de l'huile.

Elle permet de prévoir son aptitude à « durcir », c'est-à-dire à former un réseau solide sous l'action de l'oxygène.

Encore faudra-t-il que ce durcissement intervienne après sa dépose sur le support et non dans le flacon ou sur la palette. Or des pigments, des essences ou des résines peuvent accélérer ce processus. Ainsi le temps de séchage peut aller de 2-4 jours pour le bleu de Prusse, à 4-8 jours pour l'outremer, le vert de chrome et le blanc de titane, à 6-10 jours pour les sels de cadmium et dépasser 15 jours pour le blanc de zinc, le noir d'ivoire et la laque de garance. Dans certains cas on peut réduire ce temps en ajoutant un **médium siccatif** léger tel un sel de calcium ou de zirconium ou plus actifs, mais toxique, comme l'oxyde de plomb (litharge) ou de manganèse.



Siccativité des huiles

La température, l'hygrométrie, l'exposition à la lumière vont également intervenir sur la réticulation de l'huile.

Pour les peintres flamands, la meilleure des huiles était l'huile de noix avant que l'huile de lin ne prenne l'avantage avec une siccativité plus forte et un coût moindre. Les huiles de carthame et d'oeillette jaunissent moins (pour les blancs) mais séchent très lentement.

Une précuison de l'huile présentait des avantages mais, selon les périodes, son usage n'a pas été prioritaire. On peut ajouter une standolie, une huile pré-polymérisée en absence d'air, qui « plastifie » la peinture ou un épaississant qui lui donne du corps.

Liant

Huile de lin crue Huile de lin cuite

Résine dure Ambre ou Copal

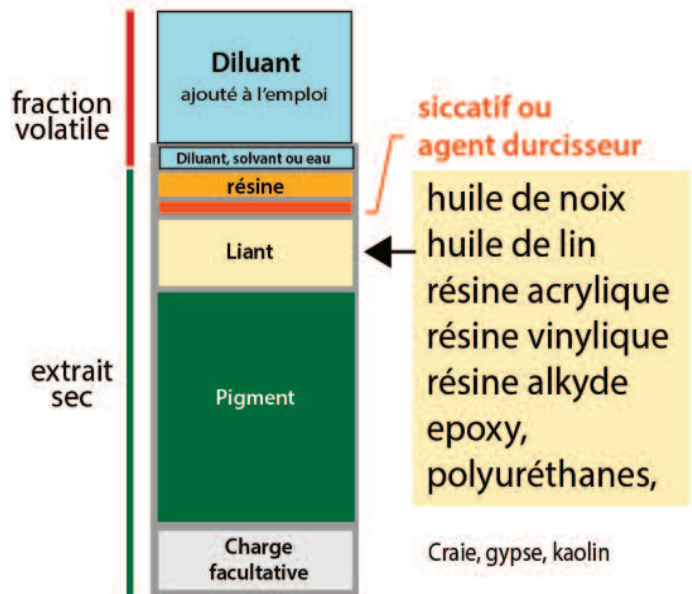
Diluant

Essence volatile Essence d'aspic

Résine tendre Baume de thérbentine de Venise

Le liant final sera celui restant après l'évaporation de l'essence d'aspic

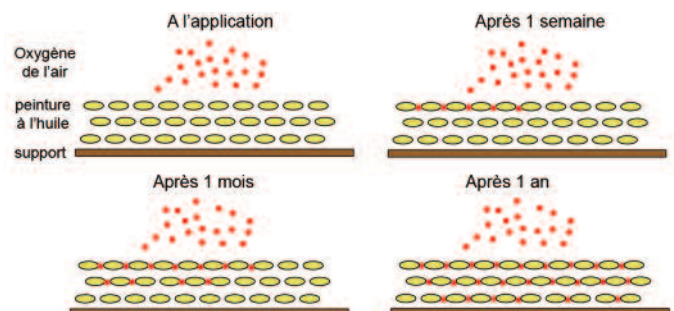
Peinture huile ou acrylique



L'invention en 1841 du **tube en étain**, ou en plomb, par l'Américain John Goffe Rand puis la commercialisation par Lefranc en 1859 du tube fermé par bouchon à vis, ont eu pour conséquence la préservation du mélange préparé du contact avec l'air. En histoire de l'art la peinture en tube est à l'origine de la peinture sur chevalet en plein air innovée par les impressionnistes.

Les couleurs ainsi préparées, que nous appellerons désormais peintures (!), doivent être diluées pour être utilisées à convenance. Mais le diluant ne participant pas au film coloré final, appelé **feuil**, doit être éliminé. Pour les peintures à l'eau il suffit d'attendre leur séchage pour que le travail soit manipulable.

Pour les peintures à l'huile le délai de séchage est bien plus long car l'évaporation du diluant (temps sec) ne suffit pas : la surface peinte reste collante et ne peut pas recevoir de couches supplémentaires, donc des retouches, avant plusieurs jours. Il faut attendre que l'oxygène ait provoqué le durcissement de la surface (**temps hors poussière**) puis le durcissement du feuil complet (temps dur). Ces étapes sont à respecter pour les applications artisanales ou industrielles mais les artistes jouent avec elles pour créer des effets. Le « sfumato » de Leonard de Vinci en est un bel exemple.



L'oxygène se combine avec la première couche d'huile puis pénètre progressivement dans le feuil jusqu'au durcissement complet

Le schéma ci-dessus montre qu'après un an il peut y avoir encore des zones non réticulées donc fragiles. En tout cas il faut veiller à ce que tous les diluants, les solvants lourds en particulier, se soit évaporés avant d'être piégés par le

durcissement des couches superficielles. Les phénomènes de craquelures s'expliquent par le durcissement et le retrait volumique du feuil lié à la perte des fractions volatiles de la peinture. Nous avons évoqué le cas des oxydes siccatifs qui accélèrent le durcissement par apport d'oxygène.

Il faudra attendre l'utilisation des résines vinyliques et acryliques pour que les délais de séchage et durcissement soient réduits à quelques dizaines de minutes. Ces formulations nouvelles ont trouvé un usage artistique avec les peintures murales de Rivera à Mexico dans les années 20.

LES SUPPORTS D'APPLICATION

Les supports ont une importance majeure dans l'aspect et le rendu des couleurs. Après les supports naturels que sont les parois calcaires (grottes, tombes égyptiennes) ou bâtis tels que les murs de briques enduits de plâtre (frais ou non), c'est le bois qui a été le plus utilisé en raison de la facilité de transport des réalisations. Le peuplier offre la meilleure qualité tandis que les résineux sont rejetés en raison des exsudations de résine venant altérer la peinture.



Le panneau peut être constitué de plusieurs pièces, voire de nature différentes, et contrecollées (ci-dessus à gauche, peinture du Fayoum, Egypte, II^{ème} siècle). Une préparation est nécessaire avant application qui consiste généralement en un enduit à base de plâtre (gypse) et de colle animale, appelé gesso (de gypsos). Cette technique reste toujours active pour la peinture des icones (levkas).

Par la suite le recouvrement du bois par une toile, enduite (illustration précédente à droite, Jean II le Bon par Girard d'Orléans en 1350, détrempe à l'oeuf sur toile enduite de plâtre, collée sur panneau de chêne), a précédé l'usage de la toile tendue sur un cadre. La toile de lin sur cadre souffre beaucoup moins des problèmes d'hygrométrie. Elle est généralement préparée avec un enduit de type gesso.

Pour les supports métalliques (cuivre, bronze, aluminium, fer) un traitement préalable de la surface (mécanique et chimique) est nécessaire pour permettre l'adhésion du feuil, limiter la corrosion et augmenter sa résistance à l'environnement. Ce sujet sera traité dans un prochain article.

PROBLÉMATIQUE DES VERNIS

La couche finale d'une peinture est directement en

contact avec l'air, ce qui est bien, mais une fois complètement sèche elle est exposée aux agressions (poussières, mouches, fumées, etc.). Par ailleurs, la brillance des couleurs n'est pas la même et la pose d'un vernis (mat ou semi-mat) est la solution pour uniformiser l'aspect final. Le problème est qu'un vernis s'oxyde dans le temps en jaunissant ce qui modifie et assombrit la peinture. Dévernissage et revernissage d'une peinture ? Ceci est une autre histoire.

CONSERVATION DES OUVRAGES PEINTS

Les conditions géophysiques et climatiques ont permis la conservation des oeuvres préhistoriques dans des grottes jusque là inaccessibles. Leur découverte et leur présentation au public ont rompu cette protection naturelle et les a placées en contact avec l'air extérieur, le gaz carbonique des visiteurs, l'augmentation de la température et les éclairages.

Les dégradations ne se sont pas fait attendre : maladie verte (algues), souches bactériennes, maladie blanche (voile de calcite) et taches noires dues à des champignons sont apparues et se sont développées. On doit retenir que dans les dégradations picturales ce ne sont jamais les pigments qui sont touchés mais les supports. Il a fallu procéder à des fermetures au public et à la réalisation de fac-similés.



Années 1960-70 : une visite dans la grotte d'Altamira, Espagne, 15000 BP

La photo ci-dessus illustre bien l'insouciance de l'époque où chacun pouvait toucher les peintures d'Altamira, découvertes en 1879. La grotte a été fermée de 1977 à 1982 (ré-ouverte avec 8000 visites/an !) mais définitivement en 2002. Pour les grottes de Lascaux et plus récemment Chauvet-Pont-d'Arc, les précautions ont été prises mais Lascaux est déjà fortement touchée. Pour le public «Lascaux 4» a ouvert son site au public le 15 décembre 2016.

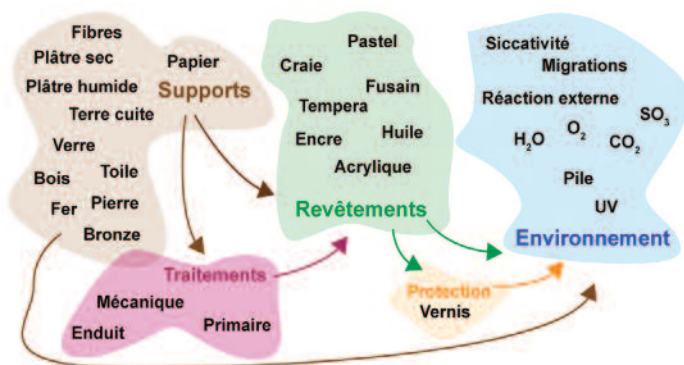
La problématique de conservation des peintures est la même pour les tombes égyptiennes enfouies dans un sol sec. En 1970, la vallée des rois et des reines offraient la visite d'une dizaine de tombes au public. Les protections étaient limitées et les visiteurs se comportaient bien, mais leur nombre étant de plus en plus important et la discipline en baisse ont eu les conséquences néfastes dues au gaz carbonique, à l'air ventilé, aux touchers de doigts, etc. Il ne reste que quelques tombes visitables.

En 2010, une mission de l'IFAO (Institut Français d'Archéologie Orientale) a découvert des tombes inviolées à proximité de Saqqarah (période 2300-2100 BC). Celles-ci

présentent des décors peints merveilleusement conservés car enterrés sous plusieurs mètres de sable. Après exploration et relevés, le sable est remplacé pour la protection des décors car c'est le meilleur isolant possible de l'humidité et des gaz. Aujourd'hui l'IFAO est associé avec la Suisse dans la Mission archéologique franco-suisse de Saqqâra.



Vassil Dobrev (IFAO) découverte de la tombe de Haou-Néfer en 2010 (photographie de Stéphane Compoint)



Le schéma ci-dessus résume les liens des éléments qui participent à la production d'un objet coloré jusqu'à son placement dans un milieu souvent hostile.

LA BONNE COULEUR

La couleur originale, celle que l'artiste a préparée sur sa palette est une chose, mais celle que nous voyons en est une autre. Les oeuvres peintes du patrimoine mondial ont été, le plus souvent, réalisées dans des conditions d'éclairage très faibles : torches, bougies, jeux de miroirs, ...

Nous sommes loin du spectre visible qui révèle les vraies couleurs.



Aujourd'hui, la présentation des oeuvres peintes dans les salles des musées est sujet à débat : température de couleur des **éclairages**, **fonds** colorés entraînant des dominantes qui viennent perturber les couleurs du tableau, **reflets** des vitrages de protection, surcharges des murs pour présenter le plus d'oeuvres possible... Un fond blanc généralisé comme celui du Centre Pompidou de Metz répond bien aux oeuvres modernes contrastées. Pour les oeuvres plus délicates, impressionnistes ou classiques et antérieures, le fond idéal est un gris neutre plus ou moins sombre mais qui n'a d'effet sur aucune teinte. Un éclairage distant, diffus, en lumière blanche (combinaison de LED) est préférable aux spots dont on devine la présence par reflet sur la toile. Certains grands musées du monde sont encore loin de la scénographie idéale.

CONCLUSION

Cette synthèse qui s'appuie sur de nombreux ouvrages, dont les principaux sont présentés en fond de page, propose un premier regard sur la problématique des couleurs dans l'art mais aussi dans leur utilisation en général. Du pigment original au feuil déposé sur un objet, nombreux sont les paramètres qui vont intervenir sur sa durée de vie.

Sur ce point, cet article peut-être considéré comme le préliminaire à une prochaine conférence sur « **Science et Patrimoine** ». En plus de la peinture, où nous passerons en revue les différentes anomalies constatées, nous verrons les problèmes et défis liés à la conservation et à la restauration des sculptures, des monuments, des vitraux, des oeuvres métalliques et des documents. Nous prendrons connaissance des principaux axes de la Charte de Venise de 1964 qui donne les directives pour la conservation et la restauration des monuments et oeuvres d'art. Nous verrons comment les accélérateurs de particules ont permis d'éclaircir des anomalies comme le vieillissement de certaines couleurs, comment les lasers permettent de traiter des surfaces extrêmement fragiles, pourquoi les vitraux se dégradent et surtout, pourquoi, quelquefois, il est urgent de ne rien faire !



Sélection pour les chimistes
« **La Chimie et l'art** » ouvrage collectif publié à la suite du colloque « Chimie et art, le génie au service de l'homme » qui s'est déroulé le 28 janvier 2009 à la Maison de la Chimie, edpsciences

2010 (24€).

Sélection pour les peintres
« **Traité pratique de la peinture artistique et sa technique** » par Amandine Gille (19,5 €)

Une bible pour les spécialistes
« **Dictionnaire des matériaux du peintre** » de François Perego, 2015, (71€).

Retrouvez la bibliographie complète sur le site www.adasta.fr



PRIVÉE DE DÉCOUVERTE DEPUIS 50 ANS LA SCIENCE EST-ELLE EN PANNE ?

par Christian MAGNAN
astrophysicien, Collège de France

Article transmis par le conférencier
suite à sa conférence ADASTA du 7 décembre 2016

Depuis l'année 1965 marquant la découverte du fond cosmologique diffus, laquelle apportait la preuve de la justesse du modèle du Big Bang, la cosmologie n'a plus produit aucun savoir et semble engagée dans des impasses intellectuelles profondes. L'aspect le plus inacceptable de la situation est l'absence de débat critique interne, comme le montre l'acceptation unanime et inconditionnelle de l'existence de ces substances fictives que sont la matière noire et l'énergie noire, à l'étude desquelles crédits et efforts sont consacrés en pure perte. S'ajoute une débauche de grands projets à un milliard d'euros l'unité sans résultats tangibles.

Pour faciliter l'étude des sujets traités dans cette conférence, permettre de les découvrir, de les approfondir et de les critiquer, Christian Magnan indique d'abord que seuls son ouvrage « Le théorème du jardin » (2011, réédité en 2014) et son site « lacosmo.com » les abordent. Ainsi les items de cet exposé ne se retrouvent nulle part ailleurs, une circonstance constituant une véritable aberration scientifique, comme le montrera la discussion finale. On peut citer comme exemple de vérité ignorée des discours scientifiques le fait que l'astrophysique est une science d'ordre de grandeur. Alors que les caractéristiques du système solaire (distance des objets qui le constituent, prédiction de lieu et d'heure des éclipses) et les données physiques des planètes (masse, taille) sont connues avec une grande précision, que l'on qualifie justement d'« astronomique », les données concernant les étoiles (distance, masse, taille, température) sont très incertaines bien que leur ordre de grandeur soit en général fiable.

Or ce trait important de l'astrophysique ne fait pas la une des publications, que ces dernières, d'ailleurs, soient professionnelles ou destinées au grand public. Ce manque de précision ne doit pas être pris comme un défaut dont la science devrait souffrir et avoir honte mais plutôt comme un élément du jeu de la découverte du monde avec lequel il faut bien composer.

Seule la science permet de découvrir la vérité des choses

Nous voyons le Soleil se lever à l'est, se coucher à l'ouest, et tous les astres, comme Lune et étoiles, suivre la même course dans le ciel. Nous savons aujourd'hui que ce mouvement est apparent. Il n'est pas dû à un déplacement propre des astres mais traduit en fait la rotation de la Terre sur elle-même. Comment se fait-il que les hommes aient mis tant de siècles à découvrir cette vérité ? Cette question appelle trois remarques.

1. Le mouvement propre de rotation de la Terre est très difficile à mettre en évidence pour des observateurs se trouvant sur Terre. Que ce soit en milieu scolaire ou universitaire, en laboratoire, au musée des sciences ou en tout autre endroit, il n'existe aucune expérience simple à mettre en oeuvre capable de fournir la preuve que notre planète

tourne sur elle-même. Cette difficulté profonde est une illustration éloquentes du *principe de relativité*, avancé déjà par Galilée (et pour cause : cette circonstance n'arrangeait pas ses affaires), et exploité par toute la physique, notamment par Einstein avec la théorie de la relativité restreinte qui en couronnera son usage. Ce principe énonce que le mouvement d'un mobile ne peut pas être mis en évidence de façon absolue par une expérience interne à ce mobile. Ainsi les voyageurs d'un engin spatial ayant coupé ses moteurs et fermé ses hublots ne peuvent pas savoir qu'ils avancent et à quelle vitesse ils le font s'ils n'effectuent que des expériences se déroulant à l'intérieur de leur habitacle. Plus tard la relativité générale stipulera que dans les mêmes conditions ils ne peuvent pas savoir non plus (sauf par des expériences d'une précision suffisamment grande) qu'ils s'approchent d'un astéroïde ou d'une planète massive.

2. La réalité du mouvement de rotation de la Terre a été révélée par la science, et seulement par la science. Bertrand Russell disait fort justement que « ce que la science ne peut pas découvrir, l'humanité ne peut pas le savoir ». Ainsi les discours des philosophes, les prétendues révélations de la religion, les conversations de salon ou de bistrot n'ont jamais conduit à la vérité des choses matérielles. La science occupe une place à part parmi les disciplines de la pensée.

3. L'histoire nous montre que la réussite de la science dans son entreprise de recherche de la vérité a résulté de la rencontre miraculeuse (un adjectif que nous précisons par la suite) entre des faits expérimentaux (en astronomie il s'agit essentiellement d'observations puisque le monde est inaccessible à une expérimentation le concernant ; on ne peut pas refaire une étoile) et des théories formelles, ne manipulant que des objets abstraits. Parallèlement la nécessité de s'appuyer sur des observations invalide, comme sortant du cadre de la physique, des idées telles que les multivers, autres univers par essence inobservables.

La naissance de la science moderne

La science moderne est née avec la Révolution Copernicienne. Cela ne signifie pas qu'il n'y avait rien « avant ». Quand un enfant est mis au monde par sa mère, la naissance s'est préparée depuis 9 mois. Pour la science, c'est pareil. Elle a eu besoin des mathématiques des Grecs et de l'algèbre des savants qui ont pris la suite mais on ne l'a vue naître et grandir qu'au dix-septième siècle.

De façon certes symbolique, mais hautement significative, on peut placer la naissance de la science moderne en août 1684. Au cours de ce mois l'astronome anglais Edmond Halley (celui de la comète !) rend visite à Isaac Newton et lui pose la question suivante :

- Monsieur, je viens vous demander ce que serait la trajectoire d'une planète si la force de gravité à laquelle elle est soumise de la part du Soleil diminuait comme l'inverse du carré de la distance à cet astre.

Newton répond :

- Monsieur, je sais : cette trajectoire serait une ellipse !

C'est à ces mots que naît la science moderne car c'est l'instant où l'ellipse théorique de Newton rejoint l'ellipse de Kepler, orbite autour du Soleil que l'astronome avait trouvée expérimentalement en analysant les observations minutieuses de Tycho Brahe concernant la planète Mars. Voilà l'essence de la science humaine que nous avons connue : la rencontre entre une théorie puissante et des observations significatives. Cette rencontre est miraculeuse pour au moins deux raisons.

D'abord chacun des termes de la relation est indépendant de l'autre. Newton ne cherchait pas à expliquer l'ellipse de Kepler, et Kepler ne connaissait pas la théorie de la gravitation universelle. Ensuite la fécondité de la relation est inexplicable. Pourquoi l'outil théorique permet-il d'établir un rapport avec le monde ? Nul ne pourra jamais répondre à cette interrogation. Nous connaissons le monde, nous expliquons comment nous le connaissons, mais pas *pourquoi* nous le connaissons (pourquoi ça marche).

Le miracle de la rencontre entre théorie et observation s'est reproduit une seconde fois au début du vingtième siècle et nous a conduits à la connaissance, que l'on peut considérer comme définitive dans ses grandes lignes, de la structure de l'Univers. Cette histoire, que je me propose de raconter maintenant, est celle de la découverte de l'expansion de l'Univers et du Big Bang, lequel est forcément associé à l'expansion. Les deux volets, théorique et observationnel, sont respectivement représentés par Einstein et Hubble mais nous verrons que d'autres savants comme Alexandre Friedmann et Georges Lemaître (pour la théorie) et Henrietta Leavitt (pour l'observation) ont joué un rôle majeur.

Un monde de galaxies

De quoi se compose l'Univers ? La question se pose avec acuité en 1920 parmi les astronomes qui organisent autour d'elle discussions et conférences. L'une d'entre elles, particulièrement célèbre et minutieusement préparée par les orateurs, sera désignée comme le « Grand Débat ». Elle est consacrée à la nature des nébuleuses spirales, objets du catalogue de Messier ayant l'apparence d'objets diffus montrant des bras spiraux, et son enjeu est prodigieux. Deux thèses opposées sont en présence. Shapley défend l'idée que ces nébuleuses spirales sont des nuages relativement proches, c'est-à-dire se situant à l'intérieur de notre Voie Lactée, disons à moins de 100 000 années de lumière de distance. Dans cette vision des choses, l'Univers se réduit à notre seule Voie Lactée. L'autre thèse est défendue par Curtis, selon qui les nébuleuses spirales sont d'autres galaxies semblables à la nôtre, c'est-à-dire semblables à notre Voie Lactée. Dans cette optique l'Univers est infiniment plus vaste puisqu'il est supposé contenir de nombreux « univers-îles », comme on les désignait à l'époque. Qui a raison, qui a tort ? Les nébuleuses spirales sont-elles à moins ou à plus de 100 000 années de lumière ? La réponse sera donnée par des mesures de distance.

Comment mesure-t-on la distance des étoiles ? Mis à part la détermination de la distance des étoiles relativement proches, faite par une mesure de triangulation géométrique utilisant l'orbite de la Terre autour du Soleil comme base, celle d'astres plus lointains repose sur la connaissance de la luminosité intrinsèque de l'étoile. Ainsi sur Terre serez-vous capable de mesurer la distance d'un objet lumineux vu de nuit si vous en connaissez la nature : lanterne, torche électrique de tant de watts, lampadaire, phare de voiture, etc. C'est en 1912 que Henrietta Leavitt, une astronome qui travaille dans l'équipe de Pickering au Harvard College Observatory et y analyse des centaines de clichés pris dans divers observatoires du monde, découvre le moyen de connaître la luminosité intrinsèque si précieuse de certaines étoiles particulières, les Céphéides. Les Céphéides sont des étoiles variables, dont l'éclat varie de façon régulière, périodique, en passant alternative-

ment par un maximum et un minimum. La période de ce phénomène va de la journée à quelques mois, selon les étoiles. Or Henrietta Leavitt montre qu'il existe une relation entre la période de variation et la luminosité de l'étoile, les étoiles dont la période est plus grande ayant un éclat plus grand. Comme la période est facile à déterminer (il suffit de mesurer l'intervalle de temps séparant deux maxima), il devient possible d'en déduire la luminosité intrinsèque voulue, à condition toutefois d'avoir pu calibrer la relation de Leavitt par des mesures trigonométriques sur des objets proches, ce qui fut réalisé tant bien que mal (avec une certaine marge d'incertitude bien entendu).

Grâce à la relation de Leavitt, Hubble détermine la distance de la nébuleuse d'Andromède ou M31, l'objet numéro 31 du catalogue de Messier, et de quelques autres nébuleuses proches et peut communiquer pour la première fois à l'humanité entière le verdict de la science. Dans le *New-York Times* du 23 novembre 1924, un article indique que Hubble confirme l'hypothèse selon laquelle les nébuleuses spirales sont des objets situés en dehors de notre Voie Lactée. Curtis avait raison, Shapley avait tort. Notre Voie Lactée est une galaxie parmi d'autres, ces dernières se trouvant sans doute en nombre considérable. L'Univers est constitué d'univers-îles situés à des distances mutuelles inouïes, de l'ordre de quelques millions d'années de lumière, chaque île contenant des dizaines ou des centaines de milliards d'étoiles. On peut noter que la distance de la nébuleuse d'Andromède, pourtant la plus proche des galaxies, n'est connue qu'avec une marge d'erreur non négligeable, de l'ordre de 20%, dans l'intervalle de 2,5 à 3 millions d'années de lumière. Cette incertitude sur les mesures de distance des étoiles est indéniable et n'est pas près de disparaître. Elle jette le doute sur les affirmations péremptoires contemporaines concernant la structure de l'Univers, nous y reviendrons. Mais peu importe cette incertitude, nous savons maintenant de façon définitive que l'Univers est constitué de galaxies distantes les unes des autres de millions d'années de lumière. Incidemment une unité courante de mesure de distance des galaxies est le mégaparsec, qui vaut 3,26 millions d'années de lumière et donne donc l'ordre de grandeur des distances mutuelles des galaxies. Précisons que de telles dimensions sont inconcevables, ce qui ne plaide pas en faveur de l'idée à la mode selon laquelle l'Univers aurait été conçu pour l'Homme.

L'autre immense découverte de Hubble est que toutes les galaxies (à l'exception d'ailleurs d'Andromède) s'éloignent de la nôtre. Il est intéressant de noter que la détermination de la vitesse radiale d'un astre (rapprochement ou éloignement) est la mesure la plus facile à réaliser en astrophysique. Il suffit pour cela de prendre le spectre de l'étoile et d'examiner les raies qui y sont présentes. Quand l'objet céleste s'éloigne les raies sont décalées vers les grandes longueurs d'onde, c'est-à-dire vers le rouge. C'est la manifestation de l'effet Doppler. Hubble constate en outre que plus la distance des galaxies est grande plus grande est la vitesse de fuite. C'est la fameuse « loi de Hubble ».

À l'époque de sa découverte, la fuite des galaxies est totalement inexplicable. Serions-nous le centre du monde ? Comment se fait-il que toutes les galaxies s'éloignent de la nôtre ? Les astronomes refusent d'imaginer que le mouvement détecté corresponde à une vraie vitesse de déplacement et parlent d'une « pseudo-vitesse ». Une fois encore l'histoire nous montre qu'une observation seule ne peut pas nous révéler la vérité des choses. Il faut un volet théorique pour comprendre la nature.

La validation du modèle du Big Bang

C'est Einstein qui va fournir la théorie permettant d'expliquer la fuite des galaxies. Vers les années 1915, après avoir développé la relativité restreinte, Einstein invente une nouvelle théorie de la gravitation, propre à parfaire celle de la gravitation universelle de Newton.

Or lorsqu'on applique les équations de la gravitation d'Einstein à l'Univers entier, leur solution conduit à un univers en expansion, une idée tout à fait invraisemblable à l'époque, au point qu'Einstein, conservateur en la matière, la rejette en trichant avec son formalisme, y introduisant un terme arbitraire adéquat propre à supprimer cette expansion à ses yeux inacceptable. Il regrettera plus tard son attitude en la qualifiant de plus grosse « ânerie » de sa carrière.

Si Einstein s'est révélé en cela mauvais cosmologiste, deux autres personnalités vont défendre la thèse de l'expansion de l'Univers et en montrer la valeur. Il s'agit de Friedmann et Lemaître. Friedmann est le premier à donner la solution des équations d'Einstein pour un univers homogène et isotrope, le plus simple que l'on puisse imaginer, et le seul pour lequel les équations sont solubles. Einstein prétendra d'abord que Friedmann s'était trompé en résolvant les équations mais il sera bien obligé de reconnaître au bout de quelques mois que c'est lui-même qui se trompait dans son jugement. L'univers de Friedmann est encore aujourd'hui le seul univers ayant un sens physique qui corresponde à la réalité (je ne dis pas qu'il rend compte de toute la réalité ou qu'il lui est identique).

Le mérite de Lemaître est d'avoir défendu la notion de Big Bang (que lui appelait *atome primitif*). L'idée de l'expansion de l'espace conduit naturellement à l'idée d'un état primordial extrêmement condensé qui en se dilatant a conduit à l'Univers actuel. Suivant en cela l'idée proposée dès 1948 par Gamow il insiste sur le paramètre « température », et souligne que si l'Univers était extrêmement condensé il devait être en même temps extrêmement chaud. Il prédit alors qu'on devrait voir de nos jours le résidu de l'intense rayonnement ayant accompagné la naissance du cosmos. Bingo ! C'est en 1965 que Penzias et Wilson découvrent le fameux « fond cosmologique diffus », lequel représente le reste, refroidi à 3 degrés Kelvin à cause de l'expansion, du rayonnement primitif.

Or depuis cette découverte majeure qui donnait raison à Lemaître (lequel est mort en paix en entendant la nouvelle) et qui a valu à ses auteurs un prix Nobel mérité en 1978 aucune avancée significative n'a été accomplie. Sur cet argument, et sur d'autres que je vais donner, on peut dire que la science fondamentale moderne, née en 1684, s'est éteinte en 1966, ayant donc vécu moins de trois siècles.

Où s'arrête l'Univers ?

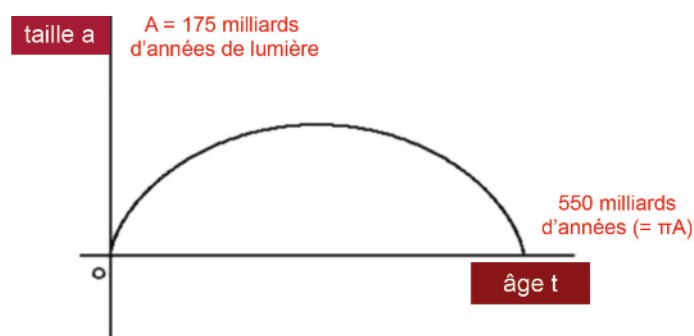
Si l'humanité découvrait en ce milieu de XX^e siècle de quoi l'Univers est constitué, elle apprendrait en même temps où se situait sa frontière. La révélation de la science à ce sujet est époustouflante. Elle nous dit en effet que l'univers de Friedmann est un milieu qui n'a pas d'extérieur et qui par conséquent n'a pas de limites. Mais pourtant cet univers est fini. Il n'existe aucune contradiction entre la finitude et l'absence de limites de l'espace dans la théorie de la gravitation d'Einstein. Notre univers est « courbe » et cela se traduit par cette caractéristique de n'avoir ni extérieur ni frontière. Si cette notion d'un univers fini et néanmoins sans limites apparaît difficile à concevoir, on peut regretter que cette découverte si extraordinaire ne soit pas enseignée dans les écoles et partagée plus largement auprès du grand public. On peut prendre comme illustration de la courbure d'un espace l'exemple de fourmis se déplaçant à la surface d'une terre supposée lisse et sans accidents. Si on leur laisse le temps voulu, les fourmis sont capables d'explorer tout l'espace à deux dimensions qui leur est dévolu sans rencontrer jamais de frontière. Elles sont bien dans un espace fini et sans frontière. Eh bien, la situation est analogue dans un univers courbe fermé : si nous disposions du temps nécessaire (ce qui n'est d'ailleurs pas le cas, mais il s'agit d'une expérience de pensée) nous pourrions rendre visite à toutes les galaxies sans rencontrer nulle part le moindre bord. Le monde serait le même partout. On peut saluer la puissance de la pensée humaine qui a réussi par son seul cerveau armé de mathéma-

tiques à inventer cette notion, évidemment impossible à saisir par l'observation.

On peut ajouter au chapitre de la compréhension du phénomène de courbure que l'absence de frontière est plus facile à imaginer que ne le serait la présence d'une limite entre l'Univers et un je-ne-sais quoi.

L'Univers ne nous est pas accessible dans sa totalité par l'observation. Il existe une frontière inéluctable séparant sa partie observable (la plus proche) de sa partie non encore observable (la plus lointaine). Cette frontière porte le nom d'*horizon cosmologique*, et sa présence tire son origine du fait que l'Univers a un âge fini, de l'ordre de la quinzaine de milliards d'années. Par conséquent la lumière issue d'une étoile n'a pas pu voyager plus de quinze milliards d'années. De ce fait les étoiles relativement proches sont visibles : ce sont celles pour lesquelles la lumière a mis moins de quinze milliards d'années pour nous parvenir. Les étoiles plus lointaines demeurent invisibles car il faudrait (on peut dire il faudrait, si on se place dans un futur de dizaines et de dizaines de milliards d'années) à leur lumière plus de quinze milliards d'années pour nous atteindre. À la limite entre la partie déjà visible et la partie encore invisible la lumière provenant des galaxies situées à l'horizon cosmologique a mis quinze milliards d'années pour arriver dans nos télescopes.

Dans le modèle de Friedmann la taille de l'Univers est caractérisée par ce que l'on appelle son *rayon*. Mais attention, l'Univers n'est pas une sphère ! Cependant comme il est fini il existe une galaxie plus lointaine que toutes les autres (on dit qu'elle est située à l'anticyentre, chaque galaxie a son anticyentre) et la théorie nous invite à définir le *rayon de l'Univers* comme la distance à l'anticyentre divisée par π . De même les fourmis sur Terre définissent le rayon de leur espace comme la distance pôle à pôle divisée par π . Toujours dans le modèle de Friedmann le rayon de l'Univers augmente avec le temps, puis l'expansion ralentissant (et non pas s'accélégrant, j'y viens à l'instant) passe par un maximum et décroît ensuite après avoir amorcé une phase de contraction conduisant l'Univers à son anéantissement dans la catastrophe du Big Crunch, phase symétrique du Big Bang.



Les cosmologistes disent à tort que ce modèle d'Univers peut « rebondir » et entamer une nouvelle phase d'expansion après sa disparition. Pourquoi cette idée de cycle est-elle fautive ? Parce que la relativité générale stipule qu'il n'existe ni temps absolu ni espace absolu. De ce fait la science ne peut pas parler d'un « après » le Big Crunch puisqu'à cette phase terminale tout aura disparu au même instant : temps, espace, matière, énergie. Autrement dit on ne peut pas tracer et décrire l'histoire de l'Univers dans un temps absolu qui lui serait extérieur. Pas de temps, pas d'après, pas de cycle. Lorsque nous parlons de l'évolution de l'Univers, nous la rapportons à un temps intérieur, mesuré par nos horloges, et non à un temps qui contiendrait le nôtre.

Grâce à ce modèle de Friedmann nous savons aujourd'hui de quoi se compose l'Univers, et ce de façon certaine en ordre de grandeur. Voici un tableau qui en rassemble les caractéristiques

DES NOMBRES QUI MESURENT L'UNIVERS	
Distance de la galaxie d'Andromède	2,4 à 3 millions d'années de lumière
Constante de Hubble	70 (km/s) par mégaparsec : c'est la vitesse de fuite d'une galaxie située à une distance de 1 Mpc (mégaparsec) ; cette vitesse augmente en proportion de la distance de la galaxie (loi de Hubble) ; comme la vitesse d'expansion ralentit cette constante de Hubble diminue au cours du temps (malgré son nom de "constante")
Âge actuel de l'Univers	≈ 15 milliards d'années
Distance actuelle instantanée à l'anticyentre	≈ 125 milliards d'années de lumière → "rayon" de 40 milliards d'années de lumière
Masse totale de l'Univers	$2 \text{ E}57 \text{ g} = \text{E}24 \text{ M}_\odot$ soit quelque chose comme cinq mille milliards de galaxies ; cette masse est constante
Volume actuel de l'Univers	$\text{E}87 \text{ cm}^3$
Densité actuelle de l'Univers	$\rho \approx 2 \text{ E-}30 \text{ g/cm}^3$ ce qui correspond à un atome par mètre cube : l'Univers est bien vide !
Durée totale d'existence du Big Bang au Big Crunch	550 milliards d'années

Les arnaques de la matière noire et de l'énergie noire

La cosmologie officielle nous cache une difficulté fondamentale dans l'interprétation des observations. L'expansion de l'espace est définie dans le modèle de Friedmann par l'augmentation de son rayon avec le temps. Bien ! Mais comment mesurer cette expansion ? Il est indéniable que ce que nous observons ce sont des galaxies, et leur vitesse de récession. La difficulté est que le modèle de Friedmann ne contient pas de galaxies. Il contient un fluide homogène composé d'atomes isolés à raison de 1 particule par mètre cube. Or la science ne sait pas passer des vitesses de fuite des galaxies à la vitesse d'expansion de l'espace, et cela à cause des vitesses particulières des galaxies, qui s'ajoutent on ne sait pas comment, faute de théorie, à la vitesse d'expansion. Techniquement on ne sait pas traiter la question du mouvement des galaxies dans un univers en expansion. Il suffit de consulter tous les ouvrages de cosmologie du monde (en ligne ou en version papier) pour s'assurer de ce manque. Les astronomes qui nous font croire qu'ils ont découvert que l'expansion est accélérée, et qui dans la foulée ont obtenu le prix Nobel de physique 2011, sont donc des imposteurs car l'expansion de l'espace, la théorie ne nous dit pas comment la mesurer proprement. L'attribution de ce prix Nobel de physique est injustifiée et relève d'une imposture scientifique constituant un indice supplémentaire du déclin de la science moderne. Ou pour ceux que ces affirmations choqueraient, ces points devraient au moins être discutés.

Du coup devant le manque de preuves concernant cette prétendue accélération de l'expansion de l'Univers, l'existence de l'extravagante énergie noire de nature inconnue invoquée par les cosmologistes pour expliquer (si on peut se permettre cette expression) cette accélération perd toute crédibilité. Pas d'accélération de l'expansion, pas d'énergie noire.

L'autre imposture des cosmologistes (d'ailleurs chronologiquement la première) réside dans l'affirmation de l'existence de la matière noire, encore une substance de nature inconnue et invisible quoique censée être potentiellement détectable par ses effets de gravitation. Ce matériau fantôme serait nécessaire pour expliquer les courbes de rotation des galaxies et les vitesses des galaxies dans les amas. Mais il s'agit aussi d'une arnaque, soigneusement médiatisée au point de convaincre tout le monde et avec des moyens de propagande si puissants que toute contestation est impossible.

Le premier argument invoqué en faveur de l'existence de la matière noire est le prétendu problème de la rotation des galaxies. Les étoiles tourneraient trop vite au bord des galaxies, ce qui indiquerait la présence d'une matière supplémentaire invisible pour les retenir.

Or il faut remarquer que l'analyse de la rotation est difficile et ne relève pas uniquement de la théorie de la gravitation universelle de Newton, pour la bonne raison que les galaxies contiennent d'autres constituants (gaz, poussières, particules, etc.) dont la dynamique globale dépend d'autres facteurs que la simple gravitation. De plus on sait très bien que les mouvements des composantes galactiques ne se réduisent pas à un mouvement de rotation et il faudrait tenir compte de tous les mouvements existants, dans tous les sens, à petite et grande échelle. Enfin, argument définitif, si vraiment la question des mouvements à l'intérieur des galaxies était en cause, il faudrait porter les efforts des chercheurs sur ce point et consacrer autant de temps et de crédits à la dynamique des galaxies qu'à l'étude de la matière noire. Ce n'est pas le cas. En bref la nécessité d'une autre physique inconnue n'est pas prouvée. Et surtout cette question n'est pas discutée comme elle le devrait. Un événement récent du monde cosmologique officiel illustre la situation. Une astrophysicienne, Françoise Combes, a été nommée professeure au Collège de France en 2014 dans une chaire qu'elle a intitulée « Galaxies et Cosmologie ». C'est une spécialiste reconnue de la dynamique des galaxies et on aurait pu s'attendre à ce qu'elle s'attache à développer dans le détail les moyens de mesurer et d'interpréter théoriquement les fameuses « courbes de rotation ». Or sa leçon inaugurale avait pour titre « La matière noire dans l'univers » et ne contenait aucune analyse de la dynamique interne des galaxies, s'y référant de façon globale en parlant de simulations numériques, comme si ces dernières pouvaient fabriquer une galaxie réelle. À quand la création au Collège de France d'une chaire de dynamique interne des galaxies ?

Le second argument invoqué par les tenants de la matière noire serait la distribution des vitesses des galaxies dans les amas, laquelle ne serait compatible, selon les lois de Newton, qu'avec la présence d'une masse invisible. Cet argument est nul et non avénu car, je le répète, on ne connaît pas les équations qui régissent le mouvement des galaxies dans un univers en expansion, une vérité que cache encore la science officielle. Lorsque F. Combes déclare dans sa leçon inaugurale que « la dynamique des galaxies, telle qu'elle est observée, ne peut résulter du seul jeu des forces newtoniennes de gravitation causées par la matière directement visible » elle oublie de dire que cette dynamique est inconnue, et hors de portée de nos théories actuelles.

Un autre point sur lequel aucun article de recherche ne se penche est que les amas de galaxies n'ont sans doute pas atteint un état d'équilibre (ou, de toute façon ce serait un point à discuter). De ce fait la distribution des vitesses dans cet amas est impossible à calculer car on ne connaît que des théorèmes, dont le fameux théorème du viriel, qui ne sont valables qu'à l'équilibre. Ici encore, argument définitif contre la matière noire, il faudrait travailler la question de la distribution des vitesses dans un espace en expansion, ce qui n'est pas fait. On agit comme si l'impossibilité de résoudre le problème des vitesses des galaxies à l'aide de la physique « ordinaire » était acquise, et cette position n'est pas honnête scientifiquement.

Enfin une question (liée directement aux précédentes) que la science ne sait pas résoudre, mais qu'elle ignore superbement, est celle de déterminer ce qui dans l'Univers est en expansion et ce qui ne l'est pas. La Terre, le Soleil, la Voie Lactée, et peut être dans une certaine mesure notre amas local de galaxies, ne sont pas en expansion. Plus loin les galaxies présentent une vitesse de fuite traduisant l'expansion universelle. Mais où se situe la limite de la « non-expansion » ? La science ne le sait pas, toujours pour la raison qu'elle ne sait pas quelles équations permettent de décrire la dynamique des galaxies dans un espace en expansion. La science ne sait pas ce que c'est qu'un amas et se permet pourtant d'en parler comme si elle le savait. On attend des recherches coordonnées sur la dynamique des galaxies dans un univers en expansion et on arrête de prétendre (ou de laisser penser) que ces questions sont résolues.

Ce que l'Univers n'est pas

Si nous avons vu plus haut de quoi se compose l'Univers, la science actuelle cherche à nous faire croire que son dernier modèle dit « de concordance » cerne les paramètres de ce que notre Univers serait.

Mais ce modèle est faux pour plusieurs raisons. D'abord la précision folle avec laquelle sont donnés les paramètres contredit le fait que l'astrophysique est une science d'ordre de grandeur. Ensuite le modèle de concordance contient matière noire et énergie noire, à proportion d'ailleurs de 96%, la matière « ordinaire » constituant le 4% restant, nous sommes priés de le croire (!) Enfin, le modèle de concordance est à exclure car il n'est ni fini ni infini, ce qui n'a aucun sens physique. À nouveau seul le modèle fini de Friedmann a un sens physique. Ce qui ne veut pas dire qu'il représente exactement la réalité, mais, au moins, lui est en rapport avec cette réalité.

Les paramètres erronés du modèle de concordance		
Parameter	Value	Description
t_0	$13.75 \pm 0.11 \times 10^9$ years	Age of the universe
H_0	$70.4^{+1.3}_{-1.4}$ km s ⁻¹ Mpc ⁻¹	Hubble constant
$\Omega_b h^2$	0.02260 ± 0.00053	Physical baryon density
$\Omega_c h^2$	0.1123 ± 0.0035	Physical dark matter density
Ω_b	0.0456 ± 0.0016	Baryon density
Ω_c	0.227 ± 0.014	Dark matter density
Ω_Λ	$0.728^{+0.015}_{-0.016}$	Dark energy density
Δ_R^2	$2.441^{+0.088}_{-0.092} \times 10^{-9}$, $k_0 = 0.002 \text{Mpc}^{-1}$	Curvature fluctuation amplitude
σ_8	0.809 ± 0.024	Fluctuation amplitude at $8h^{-1} \text{Mpc}$
n_s	0.963 ± 0.012	Scalar spectral index
z_*	$1090.89^{+0.68}_{-0.69}$	Redshift at decoupling
t_*	377730^{+3205}_{-3200} years	Age at decoupling
τ	0.087 ± 0.014	Reionization optical depth
z_{reion}	10.4 ± 1.2	Redshift of reionization

L'absence de débat critique

D'où vient la décadence de la science ? Elle résulte d'une débauche de projets sans base solide et d'un productivisme outrancier. Il faut publier, sous peine de voir disparaître les crédits. C'est le fameux « publish or perish ». La quantité passe avant la qualité. Or la stérilité de cette façon de faire est patente.

En astronomie, pour défendre de nouveaux projets on avance la plus grande taille des miroirs, la multiplication des moyens d'observation, mais ces projets ne savent pas ce qu'ils cherchent et n'ont fourni aucun résultat. Le dernier projet phare de la cosmologie, le satellite PLANCK, n'a rien apporté. Et on peut s'attendre à ce que d'autres projets comme GAIA soient aussi stériles. Ce dernier satellite est supposé fournir la distance des étoiles, mais, les étoiles proches mises à part, il ne pourra pas déterminer la distance des plus lointaines, tout simplement parce qu'on ne sait pas « reconnaître » une étoile, et en donner son éclat intrinsèque (comme on le dira dans la discussion).

Que faire ? D'abord cesser toute recherche sur la matière noire, l'énergie noire, la théorie des cordes (qui ne peut pas se développer sans observations), la théorie de l'origine du Big Bang (fait unique et inobservable, donc ne relevant pas d'une étude scientifique), etc. Ensuite ouvrir le débat sur la stérilité actuelle de l'astrophysique et des sciences « dures ».

La science fondamentale moderne est-elle morte ? Voici le triste résumé de la situation

- ✓ **arnaques de la matière noire et de l'énergie noire**
- ✓ **introduction de concepts étrangers à la physique (infini, multivers)**
- ✓ **aucune découverte majeure depuis 1966**
- ✓ **plus de paradoxe (comme le fut celui de l'âge du Soleil ou de la stabilité de la matière à l'aube du**

XX^{ème} siècle)

- ✓ **productivisme outrancier dopé à l'informatique**
- ✓ **instruments gigantesques sans découvertes d'importance**
- ✓ **grands relevés sans résultats tangibles**

Bref un gaspillage colossal d'argent et de travail de recherche

Et le pire : aucun débat

Discussion avec les auditeurs

On retiendra trois interventions.

Un auditeur met en garde le conférencier contre la tentation de prétendre que la science n'a plus rien à découvrir en se référant à une citation de la fin du XIX^e, d'ailleurs faussement attribuée à Lord Kelvin, selon laquelle « *Il n'y a plus rien à découvrir en physique aujourd'hui. Tout ce qui reste à faire, c'est d'améliorer la précision des mesures* ». A quoi Magnan répond que la situation présente est complètement différente de ce que la science a jamais vécu et souligne en particulier qu'il n'existe plus aucun paradoxe indiquant un problème à résoudre. Il rappelle qu'au début du vingtième siècle, au contraire, on n'expliquait pas comment la matière, formée d'atomes composés de charges positives et de charges négatives, pouvait être stable et qu'on ne savait pas expliquer non plus comment le Soleil avait pu émettre sa lumière pendant des milliards d'années. Il restait donc beaucoup à expliquer et comprendre. Maintenant il n'existe plus aucun problème fondamental ou contradiction de cette sorte. Par exemple si les processus à l'oeuvre dans les phénomènes les plus incroyablement énergétiques de l'Univers sont encore bien mystérieux, le bilan d'énergie, grâce à $E = mc^2$, est correct (le compte est bon).

Un autre auditeur demande au conférencier s'il est le seul astrophysicien à défendre les opinions qu'il a exprimées. La réponse est oui. Mais la leçon à en tirer est sévère. En effet, il est tout simplement anormal qu'aucun débat n'anime la science à l'heure actuelle et que les légitimes questions soulevées par Christian Magnan ne soit pas discutées en son sein. Cette absence de débat est consternante et constitue le symptôme le plus clair de la « panne » de la science. Mais suite à d'autres commentaires, le conférencier reconnaît que cette critique s'adresse en premier lieu à la science fondamentale et que les autres sciences, en lesquelles il n'est pas expert, sont peut-être encore saines (encore que, fait-il remarquer, l'impératif de production d'articles soit commun à toutes les disciplines).

Enfin intervient un cosmologiste professionnel qui va représenter la science faisant autorité. Il regrette que la conférence n'ait pas mis en avant les résultats selon lui significatifs que l'astrophysique a obtenus. Il cite en exemple la découverte de l'accélération de l'expansion de l'Univers, selon lui bien établie car bien vérifiée. Cependant son intervention manifeste elle aussi de la décadence de la science car dans une situation « normale » le débat aurait dû avoir lieu en interne et non lors d'une conférence pour grand public, lequel se voit désagréablement piégé dans une situation non désirée puisqu'il se retrouve comme arbitre (ou au moins spectateur) d'une querelle qu'il est incapable de juger. Christian Magnan indique à ce sujet que l'affirmation des cosmologistes selon laquelle la luminosité des supernovas de type Ia serait connue et identique pour tous ces objets (pouvant ainsi servir de « chandelle standard » et d'étalon de mesure de distance) est discutabile mais non discutée. Il rappelle que selon une affiche conçue à une fête de la science, placée dans le métro parisien et portant un texte particulièrement réussi, la propriété commune à toutes les étoiles est... qu'elles sont toutes différentes. On ne voit pas pourquoi les supernovas échapperaient à la règle. Cela se discute...

Conclusion de la discussion : hélas pas de débat et rien ne bouge.



RICHE DE SES DÉCOUVERTES DEPUIS 50 ANS, LA SCIENCE EST EN MARCHÉ !

Par Bruno RAKINSKI
Physicien et membre de l'ADASTA

Introduction

Depuis 1965, qui marque la découverte expérimentale du fond cosmologique diffus, la Science a produit un savoir considérable et ouvert de nouvelles portes ou champs d'investigation, qui sont autant de manifestations de l'intelligence humaine. La découverte de 1965 n'apportait pas la preuve de la justesse du modèle du Big Bang, mais en constituait un élément majeur. La preuve sera faite en 1992.

Si nous utilisons abusivement le mot Science dans toute sa généralité, nous nous limiterons en fait, dans cet article aux sciences dures, celles qui ont le plus d'interactions avec la cosmologie. C'est donc un choix assumé, d'exclure ici des domaines comme la biologie ou la technologie, bien que leur évolution depuis 50 ans ait été considérable, avec des impacts sur nos sociétés et des interrogations sur l'éthique.

Nous montrerons que si la Science est critiquée (et critiquable) elle n'en produit pas moins des résultats parfois modestes, parfois majeurs et parfois révolutionnaires, dans une continuité qui est en fait la signature du fonctionnement du cerveau humain.

Nous illustrerons cette dynamique en montrant les intenses débats critiques internes qui existent par exemple sur les sujets très médiatiques de la matière noire et de l'énergie sombre, hypothèses utilisées par de nombreux cosmologistes, mais pas tous.

Le cœur du présent article n'a pas vocation à défendre un point de vue. Ce n'est qu'une synthèse bibliographique guidée exclusivement par le respect de faits parfaitement documentés et vérifiables à partir des références annexées.

I - Expériences de pensée d'Albert Einstein

En physique, une expérience de pensée est un exercice d'imagination permettant d'établir la cohérence ou les limites de certaines idées lorsque l'expérimentation est impossible.

Einstein a souvent utilisé cette approche pour conduire ou illustrer ses réflexions. On trouve rapportés dans de nombreux livres de vulgarisation ses raisonnements avec des ascenseurs.

I.1 Le Principe d'Equivalence.

Supposons un ascenseur dans le vide, tiré vers le haut avec une accélération constante et soumis à aucune autre force.

Avec des parois opaques, un observateur situé dedans verrait tous les objets lâchés simultanément tomber simultanément, et ce, quelles que soient leurs masses. Connaissant la loi de la gravitation, il peut conclure que son ascenseur est immobile dans un champ de gravitation constant, comme à la surface de la Terre. Mais en toute rigueur, il admet aussi l'égalité entre la masse inertielle (celle de la relation $\mathbf{F} = m \boldsymbol{\gamma}$) et la masse gravifique (celle de la relation $\mathbf{P} = m \mathbf{g}$) car elle seule peut justifier la simultanéité

de la chute de corps de masses différentes par la force de gravitation.

Avec des parois transparentes, un observateur situé à l'extérieur verrait que des objets lâchés simultanément à l'intérieur, se déplaceraient à la même vitesse, dans la même direction que l'ascenseur, tout en conservant leur vitesse commune du fait du principe d'inertie. Le sol de l'ascenseur, qui est en accélération constante, rattraperait alors simultanément les objets.

Supposons maintenant l'ascenseur dans le vide, mais en chute libre dans un champ de gravitation.

Avec des parois opaques, un observateur à l'intérieur verrait tous les objets qui l'entourent dégagés de toute gravitation, en apesanteur, soumis à la seule loi de l'inertie. Le référentiel de l'ascenseur est donc un référentiel inertielle (on dit aussi galiléen), local. Au passage, Einstein, démontre qu'il existe des référentiels inertiels qui ne sont pas obligatoirement en translations à vitesse constante les uns par rapport aux autres.

Avec des parois transparentes, un observateur extérieur verrait tous les objets, ainsi que l'ascenseur, tomber à la même vitesse.

Einstein démontre ainsi que localement, la gravitation n'est pas distinguable de l'effet d'un référentiel accéléré. Il y a équivalence locale. La signification réelle de l'universalité de la chute libre n'est donc pas l'identité des masses graves et inertes, mais celle de la gravitation et de l'accélération : un changement de référentiel adéquat peut toujours supprimer en apparence l'effet d'un champ de gravitation.

Avec cette expérience de pensée, Einstein détenait deux éléments-clés de la future relativité générale :

1/ Après la relativité restreinte et ses référentiels galiléens, pour que le principe de relativité traite aussi des référentiels accélérés, il était inévitable de s'intéresser à la gravitation.

2/ Puisque gravitation et accélération ne peuvent, se compenser que localement, la relativité générale devait inévitablement être une théorie locale.

A ce jour, ce Principe d'Equivalence entre masse grave (liée à l'attraction des corps) et masse inerte (résistance au changement de vitesse), n'a été contredit par aucune expérience.

I.2 La gravitation et la lumière.

Einstein imagine un rayon lumineux se propageant à vitesse finie en ligne droite dans un référentiel galiléen, et entrant dans l'ascenseur par une petite ouverture : dans l'ascenseur (donc pour le référentiel accéléré par rapport au référentiel galiléen), le rayon lumineux est courbé comme le serait la trajectoire de n'importe quel projectile qui entrerait par cette ouverture. Pour un observateur dans l'ascenseur, qui se voit subir un effet de la gravitation, la courbure du rayon ne peut être qu'un effet de cette gravitation sur la lumière. Donc la gravitation courbe la lumière.

I.3 L'indétermination quantique et les fentes d'Young.

Dans sa querelle avec Bohr sur l'indéterminisme et le probabilisme de la mécanique quantique, Einstein imagine une expérience de pensée dans laquelle des photons ou des électrons ou des atomes ou des petites molécules sont envoyés sur deux fentes d'Young pour engendrer derrière un système d'interférences. Il imagine un système pour identifier par quelle fente une de ces particules était passée en utilisant une partie de sa quantité de mouvement longtemps après le passage à travers les deux fentes pour actionner le dispositif dans un sens ou dans l'autre selon la fente traversée..

De cette façon, on devait pouvoir déterminer par quelle fente la particule était passée tout en observant une figure d'interférence. Cette situation viole le principe d'incertitude de Heisenberg et Bohr répond que la connaissance de la quantité de mouvement lors du passage implique que la position ne peut être définie, et donc que les franges d'interférences disparaissent.

Cette expérience délicate ne pourra être réalisée avec toute la précision requise qu'en 2015 (voir § VII) .[1]

I.4 Le paradoxe EPR (Einstein, Podolski, Rosen)

Bien que faisant partie des fondateurs de la physique quantique, Albert Einstein s'est opposé aux développements conduisant à l'interprétation de Copenhague, due à Heisenberg et à Bohr.

Pour eux, il n'y a pas de réalité objective ; la réalité matérielle dépend en partie de la façon dont nous choisissons de l'observer. Parler des propriétés physiques d'un objet quantique sans spécifier par quel dispositif expérimental nous souhaitons le mesurer n'a pas de sens. En outre, la réalité quantique n'est pas certaine, elle est statistique ; le déterminisme classique n'y a plus sa place.

Pour Einstein le monde existe dans un état défini par son histoire en toute indépendance des conditions de son observation. C'est la réalité objective. Le monde est déterministe de par l'enchaînement de nombreuses relations cause-effet. Un principe de causalité locale interdit à des événements lointains d'agir instantanément sur des objets proches.

Dans leur article de 1935 [2], les trois auteurs montrent par une expérience de pensée que la théorie quantique viole le principe de causalité locale, ou est incomplète. Leur but est de montrer que les idées de Heisenberg et Bohr conduisent à des contradictions logiques.

Deux particules sont disposées en interaction l'une près de l'autre ; supposons que ces particules se déplacent. Le principe d'incertitude de Heisenberg empêche la mesure simultanée de leurs quantité de mouvement et position respectives, mais n'interdit pas la mesure de la somme des quantités de mouvement.

Une particule s'envole vers Londres alors que l'autre reste à New York. La distance entre ces deux villes est parfaitement connue et elles sont si éloignées qu'en vertu du principe de causalité locale ce que nous faisons à la particule restée à New York, n'a aucune influence sur la particule arrivée à Londres.

Puisque la quantité de mouvement totale est conservée lors de l'interaction, il suffit de mesurer la quantité de mouvement de la particule restée à New York, pour en déduire par soustraction à la quantité de mouvement totale, la valeur précise de la quantité de mouvement de la particule qui se trouve à Londres

Par ailleurs, en mesurant exactement la position de la particule de New York, nous pouvons en déduire la position de la particule de Londres par soustraction à la distance connue entre les deux particules

Ainsi, nous déduisons à la fois la quantité de mouvement et la position de la particule de Londres sans la limite de précision imposée par le principe de Heisenberg. Tout

se passe comme si la mesure sur la particule de New York influençait instantanément la particule de Londres.

Einstein concluait donc qu'il y a une forme d'action à distance non prévue par la mécanique quantique, ce qui la rend incomplète.

Il faudra attendre 30 ans pour que des développements mathématiques formalisent les conséquences d'une théorie quantique qui contiendrait des informations physiques supplémentaires sous la forme de variables cachées (voir § VII). Il faudra attendre encore 20 ans pour que des expériences incontestables apportent la réponse à la querelle historique opposant Einstein, Heisenberg et Bohr.

II Indicateurs de distances pour la cosmologie

Mesurer la distance des objets astronomiques est une grande difficulté pour les astronomes, alors que l'information est essentielle. C'est pour cette raison que les méthodes sont nombreuses, et que l'on parle souvent d'indicateurs de distance plutôt que de distance réelle. Seules les plus importantes sont présentées ci-dessous. Des calibrages entre méthodes sont fréquents afin d'assurer une cohérence des mesures pour un objet donné.

II.1 La parallaxe trigonométrique

Le mouvement de la Terre sur son orbite autour du Soleil conduit à un déplacement apparent d'une étoile proche par rapport à des étoiles lointaines, fixes, au cours d'une année. A partir de l'angle sous lequel est vu le déplacement apparent et la distance entre les positions de la terre à six mois d'intervalle, on peut calculer la distance de l'étoile, par de la géométrie élémentaire.

C'est ainsi qu'en 1838, le mathématicien allemand Bessel (1784-1846) détermine la distance de l'étoile 61 de la constellation du Cygne à la Terre, soit 10,4 années-lumière (la valeur réelle est 11,2). Cette mesure a été considérée à l'époque comme la plus grande réussite de tous les temps en astronomie pratique [3].

La principale limite de cette méthode est la présence de la turbulence atmosphérique qui déforme les images et réduit la précision de la mesure. La distance des étoiles n'est en fait mesurable ainsi que jusqu'à une centaine d'années-lumière. La solution est bien entendu de placer en orbite des observatoires spatiaux. C'est ce qui a été réalisé avec le satellite Hipparcos (**H**igh **P**recision **P**ARallax **C**ollecting **S**atellite) de l'Agence Spatiale Européenne, lancé en 1989. Il a permis d'améliorer de 50 fois la précision des mesures, sur un nombre d'étoiles multiplié par 80. La mesure de distance avec une précision acceptable est alors passée à 1500 années-lumière. Mais le résultat le plus spectaculaire, salué par la communauté des astronomes, a été la modification de toutes les distances dans l'Univers, à partir des distances d'étoiles situées à moins de 1500 années-lumière. Le succès d'Hipparcos a poussé l'Agence Spatiale Européenne à lancer un nouveau satellite astronomique : Gaia, en place depuis 2014. La collecte a commencé, qui permet de mesurer des distances jusqu'à 30000 années-lumière avec une précision sur la distance meilleure que 20 %. Cette précision de 20 % correspond à la limite que se donnent les astronomes avant de considérer qu'une autre méthode de mesure de distance serait plus appropriée.

II.2 Les Céphéides

sont des étoiles variables, dont la période est directement liée (par la loi de Henrietta Leavitt) à leur luminosité absolue. La luminosité apparente (la puissance reçue par l'instrument) est proportionnelle à la luminosité absolue (la puissance émise) et inversement proportionnelle au carré de la distance entre l'étoile et l'instrument.

On peut donc déduire leur distance à partir des mesures de la période et de la luminosité apparente. Les Céphéides sont très brillantes, elles permettent de ce fait de mesurer les distances des amas d'étoiles et des galaxies qui les contiennent. C'est sur leur étude que repose une part importante du système de mesure des distances dans l'Univers.

II.3 La Loi de Tully-Fisher

découverte en 1977, indique que la luminosité absolue d'une galaxie spirale est proportionnelle à la puissance quatrième de sa vitesse de rotation. A partir des décalages spectraux mesurés dans les bras de la galaxie, la vitesse de rotation est déduite, la luminosité absolue calculée, et la distance trouvée en comparant à la luminosité apparente.

II.4 La distance angulaire

est une autre méthode qui s'applique aux galaxies spirales. Sachant que leur taille est peu dispersée autour d'une valeur moyenne, l'angle sous lequel on voit une spirale, permet d'en déduire sa distance, avec une bonne approximation. Pour les galaxies spirales lointaines, une correction liée à l'expansion est obligatoire.

II.5 Les supernovae

sont des étoiles, très lumineuses, en fin de vie qui ont explosé en laissant derrière elles, nuage de gaz et matériaux interstellaires. Parmi elles, une classe particulière (Ia) intéresse les astronomes, celle des naines blanches, car ils considèrent que leur luminosité absolue varie peu, et qu'elles peuvent être utilisées comme des chandelles standards. La luminosité apparente étant proportionnelle à la luminosité absolue et inversement proportionnelle au carré de la distance entre l'étoile et l'instrument, il est aisé, après calibrage, de calculer cette distance.

II.6 La Loi de Hubble

indique que la vitesse de fuite d'un objet astronomique est proportionnelle à sa distance. Le coefficient de proportionnalité est la constante de Hubble H . Il suffit donc de mesurer le décalage spectral vers le rouge pour trouver la vitesse et d'en déduire la distance en divisant par H . La méthode n'est simple qu'en apparence. H représente le taux d'expansion de l'Univers ; ce n'est donc pas une constante mais une fonction du temps $H(t)$. Le calcul de distance pour des objets éloignés devra donc prendre en compte cette fonction qui est mal connue.

Pour les objets très lointains, l'indicateur de distance retenu sera en général le décalage spectral qui est une donnée expérimentale indépendante du modèle d'Univers

II.7 L'oscillation acoustique des baryons

prédite en 1970 par Sunyaev et Zeldovitch et observée en 1999 est devenue une méthode de mesure de distance précieuse appliquée pour l'étude des effets de l'inflation cosmique, de la gravitation et de l'expansion de l'univers.

Au moment du Big Bang, dans l'ensemble du plasma de l'Univers primitif, des ondes sphériques de densité se sont propagées avant de se figer quand le rayonnement fossile a été émis. Ces ondes sphériques dans un plasma sont analogues aux oscillations acoustiques que l'on connaît dans les gaz. Le rayonnement fossile a ainsi enregistré des sphères dont la surface présente un excès de densité de baryons (protons et neutrons). Le calcul de la taille de ces sphères fournit un étalon de longueur. Par ailleurs, l'étude des données de PLANCK sur le fond diffus, permet de mesurer la taille des sphères en fonction de cet étalon, à diverses distances dans l'univers.

On a ainsi une méthode de détermination de distance par mesure de taille apparente de l'étalon avec une date associée (grâce au décalage spectral).

III Les modèles cosmologiques

Dans leur démarche scientifique, les physiciens sont

conduits à construire des modèles qui s'appuient sur une théorie contenant les hypothèses et les développements mathématiques. Ces modèles sont une représentation simplifiée du monde, qui servent d'outils pour questionner la nature avec les instruments appropriés.

Le modèle idéal répond à plusieurs contraintes :

- Il doit être réaliste, au regard des connaissances du moment.
- Il doit être explicatif face aux phénomènes déjà observés
- Il doit être prédictif, devant des expériences non réalisées

Il doit être sobre en hypothèses et paramètres ajustables.

III.1 C'est quoi la cosmologie ?

La cosmologie est l'étude de la description et du fonctionnement de l'Univers dans son ensemble. Elle est aussi ancienne que le premier humain qui s'est posé la question de sa place sous un ciel étoilé et qui, n'acceptant pas l'absence de réponse à ses questions, s'est construit une représentation naïve de l'univers s'appuyant majoritairement sur des croyances. Les développements importants de la physique classique et des mathématiques ont peu modifié cette situation, même si les progrès de l'optique ont permis grâce aux observations, de donner des fondements scientifiques à l'astronomie, lui permettant de se dissocier de l'astrologie. Il faut attendre la révolution d'Einstein avec les théories de relativité restreinte puis surtout générale pour que l'on commence à avoir un cadre théorique rigoureux pour conduire des réflexions sur l'univers dans sa globalité. Il faut aussi rappeler que sans l'aide de mathématiciens, Einstein n'aurait pas produit la relativité générale en 1915. L'équation qui fait référence est d'une complexité extrême (malgré les travaux de nombreux mathématiciens, elle n'est toujours pas résolue dans le cas général aujourd'hui). La seule solution pour l'utiliser est de la simplifier. Pour ce faire, il faut ajouter des hypothèses (qui pourront toujours être contestées car la première priorité n'est pas de décrire la réalité, mais de trouver une équation avec laquelle on pourra travailler pour voir les conséquences des hypothèses). L'idée est bien entendu de pouvoir confronter des résultats calculés à partir de cette équation avec des données expérimentales. Et c'est seulement là, que la cosmologie acquiert un statut de science. Cette science dont on parle est donc récente, elle a moins d'un siècle. Face à des critiques excessives ou non fondées, ne faisons pas le procès d'une adolescente en lui reprochant de n'avoir pas la maturité d'une vieille dame.

III.2 Le Principe Cosmologique.

Depuis Copernic, les astronomes, astrophysiciens et cosmologistes refusent de placer notre planète, étoile ou galaxie au centre de l'univers. Nous ne sommes pas dans une région particulière de l'espace et à grande échelle, l'univers observable est homogène.

Ce principe est en fait assez naturel et correspond à l'image intuitive que l'on peut avoir du mouvement de la matière dans un espace en explosion. La découverte expérimentale de Hubble est finalement la confirmation d'une conséquence directe du Principe Cosmologique.

Un observateur dans une galaxie voit l'ensemble des autres galaxies se déplacer avec une distribution de vitesse qu'il retrouvera en changeant de galaxie, quelle que soit celle-ci. Un petit raisonnement mathématique permet alors de montrer que la vitesse relative de deux galaxies quelconques doit être proportionnelle à la distance qui les sépare. On peut également démontrer que c'est la seule distribution de vitesses qui soit compatible avec l'hypothèse d'homogénéité.

La vitesse d'éloignement des galaxies (donc le décalage spectral vers le rouge) proportionnelle à leur distance, établie par Hubble, a été assez rapidement et généralement acceptée, car conforme à une hypothèse simple et une mathématique évidente.

Il est intéressant de remarquer que homogénéité et isotropie ne sont pas tout à fait indépendantes. On démontre que si un espace est isotrope autour de deux points, alors il est également homogène (la réciproque n'est pas vraie).

A propos de cette expansion de l'Univers, une question intéressante est : «qu'est ce qui est en expansion et qu'est ce qui ne l'est pas» ? La Terre, le Soleil, la Voie Lactée, et notre amas local de galaxies, ne le sont pas. Suzy Collin-Zahn (Astronome Directeur de recherche CNRS) apporte la réponse :

«Les observations montrent que la plupart des galaxies et des amas de galaxies ne sont plus en expansion, car la contraction gravitationnelle qui leur a donné naissance a pris le pas sur l'expansion, et un équilibre entre l'énergie thermique et l'énergie gravitationnelle a été atteint. Par contre ce n'est pas le cas pour des amas extrêmement lointains qu'on observe alors dans leur période de formation».

III.3 Les modèles cosmologiques historiques

La Relativité Générale a fourni un cadre physique cohérent et élégant à la description de l'Univers: elle est la théorie sur laquelle se basent tous les modèles cosmologiques dans lesquels on interprète les observations [4].

Le modèle cosmologique d'Einstein s'appuie sur les hypothèses suivantes : univers homogène, isotrope, fermé, à courbure positive et sans rayonnement électromagnétique. On peut le trouver simpliste au regard de la réalité, mais en 1917, Einstein n'avait pas beaucoup d'autres solutions, sinon de s'extasier devant son admirable équation inutilisable en l'état.

Ce modèle est aujourd'hui abandonné car contraire à l'expansion observée.

Le modèle cosmologique de De Sitter s'appuie sur les hypothèses suivantes : univers homogène, isotrope, à courbure positive et vide de matière ordinaire, mais avec une constante cosmologique permettant «d'expliquer» l'expansion observée. Ce modèle a aussi été abandonné mais est, sous une forme modifiée, à la base de la description de la brève période d'expansion exponentielle de l'univers primordial (l'inflation cosmique, voir § V.1).

Le modèle cosmologique de Friedmann s'appuie sur les hypothèses suivantes : univers homogène, isotrope, à courbure constante avec une constante cosmologique et de la matière sous la forme d'un gaz parfait uniformément répandu. Ce mathématicien savait fort bien que la matière n'était pas un gaz parfait uniformément répandu, mais ces hypothèses, que l'on peut juger simplistes, ont permis d'aller beaucoup plus loin, et avec succès, dans la comparaison théorie/observation... dans les années trente. Les cosmologistes contemporains, n'utilisent pas ce modèle historique, mais des modèles plus élaborés qui en sont déduits ; il conserve cependant un intérêt historique et pédagogique.

III.4 Les modèles cosmologiques actuels

Par exemple dans la très grande famille des modèles de Friedman on trouve une classe de théories obtenues par perturbation linéaire des équations de Friedman. Ces théories abandonnent l'homogénéité qui était un point commun à tous les modèles cosmologiques historiques. La formation des structures à grande échelle est ainsi prise en compte.

Mais surtout, l'un d'eux s'impose aujourd'hui comme le plus apte à décrire notre univers observable, c'est un modèle de type Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker, de courbure nulle et comprenant une constante cosmologique Λ et de la matière noire. On parle de modèle Λ CDM (pour Λ Cold Dark Matter), ou de modèle standard de la cosmo-

logie, ou encore de modèle de concordance.

Mais c'est Martin Rees (prix Crafoord 2005 et prix Dirac 2013) qui résume le mieux ce que décrit ce modèle : «*Notre univers est en expansion depuis un big bang chaud qui a vu la synthèse des éléments légers. Il y eut une période d'inflation, qui conduisit à l'univers "plat" actuel. Les structures ont été engendrées par des irrégularités gaussiennes, reliques de fluctuations quantiques, et la dynamique des structures est dominée par la matière noire froide, mais la constante cosmologique (ou la quintessence) domine dynamiquement*».

Ce modèle est réaliste puisqu'il est en accord avec toutes les observations actuelles. Il est plus descriptif qu'explicatif avec une composition et une histoire, mais sans pourquoi. Enfin il est peu prédictif. Son incapacité à donner la nature de ce qui constituerait 96% de notre Univers en terme de masse-énergie montre qu'il est incomplet, mais c'est le meilleur outil, et presque le seul, qui permette aux cosmologistes de travailler sur cette grande question.

Comme on le fait avec la terre vue depuis la lune, quand on néglige les irrégularités terrestres à grande échelle, l'Univers peut être vu comme étant empli par un fluide de galaxies continu et homogène, au-delà de plusieurs centaines de millions d'années-lumière.

Néanmoins, en y regardant de plus près, la terre est un ellipsoïde de rotation, et n'est donc pas symétrique selon la direction de l'espace. Un espace en rotation, induit aussi des anisotropies dans les mouvements et la répartition des masses, à la manière des forces de Coriolis. En outre, dans un espace en expansion, si la vitesse change selon la direction, l'isotropie n'est plus conservée. Un modèle cosmologique isotrope peut donc devenir anisotrope avec le temps, et réciproquement.

Certains débats qui opposent les cosmologistes reposent sur les travaux du mathématicien Luigi Bianchi, qui par des raisonnements sur les symétries dans les groupe de Lie, identifie des solutions aux équations d'Einstein conduisant à des modèles d'univers homogènes et anisotropes.

Le modèle de Tolman-Bondi, décrit un univers inhomogène et postule que nous serions à l'intérieur d'une zone de sous-densité. La conséquence en serait une expansion accélérée. Les calculs montrent un accord avec les observations des supernovae SN Ia, la cartographie du fond diffus et les données de la nucléosynthèse primordiale. Mais en faisant jouer à l'observateur un rôle particulier, il oblige à abandonner le Principe Cosmologique.

Même si le modèle Λ CDM semble s'imposer progressivement, les débats dans ce domaine sont nombreux et très ouverts, puisque même le Principe Cosmologique peut y être remis en question au travers de ses deux piliers que sont l'homogénéité et l'isotropie de l'Univers. Les observations du rayonnement fossile par les satellites astronomiques sont déterminantes pour tester ces modèles. Le résultat début 2017 est que, si l'univers observable est anisotrope, ce ne peut être qu'à des niveaux négligeables.

En conclusion, pour le centenaire de la Relativité Générale, le Principe Cosmologique sort renforcé.

IV Matière noire, cachée, transparente, sombre, non baryonique... ?

IV.1 Neptune et Vulcain : la démarche scientifique des astronomes

Après une histoire longue et mouvementée pour les astronomes (nous ne la rappellerons pas ici), l'apparente complexité du mouvement des planètes s'est trouvée simplifiée en des trajectoires simples, des ellipses, selon la première loi de Kepler.

Cette forme simple est bien expliquée par la loi de la gravitation universelle de Newton agissant sur une planète liée au Soleil. L'excellent accord entre l'observation et la théorie, pour la plupart des planètes, valide cette approche et permet aussi de comprendre et prévoir comment les trajectoires sont perturbées par la présence d'autres planètes dans des systèmes moins simples qu'avec deux corps en interaction. C'est ainsi que devant les anomalies observées pour Uranus, Le Verrier a envisagé qu'une nouvelle planète pouvait en être la cause, et c'est le calcul de sa position précise qui a permis de découvrir Neptune en 1846. Superbe réussite du calcul et de l'observation astronomique.

Une autre anomalie de gravitation est observée par Le Verrier pour Mercure : son point le plus proche du Soleil tourne légèrement plus vite autour du Soleil que les calculs ne le prévoient. On parle «d'avance du périhélie de Mercure». Le Verrier applique la même méthode, supposant l'existence d'une planète non encore observée, en calcule l'orbite, mais les observations ne confirment pas la prévision. Pour les besoins de communication entre astronomes, l'objet invisible perturbant le mouvement de Mercure a été nommé. Il aurait pu s'appeler «planète noire», les astronomes de l'époque (1856) ont préféré «Vulcain». Cet objet invisible a suscité de nombreux débats (poussières diffuses, gaz dense, astéroïdes?) jusqu'à ce que Albert Einstein démontre qu'il n'y a pas de masse invisible, mais que c'est la loi de Newton qui doit être mise en cause, et que l'avance de périhélie concerne toutes les planètes. Les calculs de relativité générale fournissent les valeurs exactes de cette avance pour Mercure, Vénus, Terre et Mars.

Ce bref rappel d'une belle page de l'histoire de l'astronomie, illustre bien le «dialogue» théorie-expérience. C'est aussi un exemple de compétition acharnée entre explications données pour justifier des résultats expérimentaux non conformes à l'attendu. C'est enfin un exemple de changement de paradigme parfaitement orthodoxe dans le cadre de la démarche scientifique formalisée par Karl Popper.

Nous montrerons dans la suite que la situation ainsi que la démarche actuelles ne sont pas fondamentalement différentes.

IV.2 Données expérimentales

/ observationnelles troublantes

Véra Rubin, élève des prix Nobel Richard Feynman (Nobel 1965), Hans Bethe (Nobel 1967) et thésarde de George Gamow, s'est éteinte le 25 décembre 2016. Elle avait établi de façon magistrale que des mouvements d'amas galactiques, de galaxies et d'étoiles étaient inexplicables par la loi de Newton. Aux vitesses mesurées, la force centrifuge aurait dû éjecter ces objets. Il fallait donc soit modifier cette loi, soit faire appel à une hypothétique matière noire. Son résultat expérimental est incontesté. Avant elle, la découverte de cette anomalie vers 1930, par l'astronome Zwicky n'avait pas fait l'unanimité, à cause d'imprécisions sur la valeur de H (la constante de Hubble), de la personnalité de Zwicky et du caractère dérangeant du résultat. Les travaux de Véra Rubin avaient été cités un mois avant sa mort parmi les grandes découvertes en lice pour le Nobel de physique.

Nous présentons ci-après les nombreuses données accumulées par des techniques indépendantes, reposant sur des principes différents, conduites par des équipes variées (parfois internationales) obtenues depuis près d'un siècle. Pour plus de précisions, on pourra lire aussi le livre de Jérôme Perez [5] qui est un spécialiste de la dynamique des systèmes auto-gravitants des galaxies à l'Univers primordial. Il a en charge le cours "Gravitation" du master d'astronomie et astrophysique d'Ile de France.

IV.2.1 Le théorème du viriel et la dynamique des galaxies

Les progrès de la thermodynamique et de la théorie ci-

nétique des gaz, au milieu du XIX^{ème} siècle, ont ouvert un nouveau champ d'étude : l'équilibre entre forces autogravitacionnelles et pression d'un gaz. Après le travail des physiciens sur la relation entre pression du gaz, énergie thermique macroscopique et énergie cinétique des particules constituantes, les mathématiciens se sont emparés du problème et l'ont évidemment généralisé pour aboutir à un résultat important : le théorème du viriel.

Dans un système contenant N corps en mouvement et en interactions mutuelles selon un potentiel attractif en $1/r$, l'énergie cinétique interne du système est une fonction de l'énergie potentielle d'attraction.

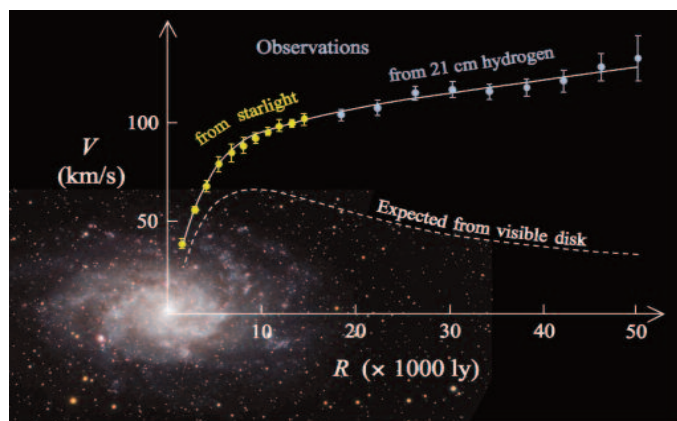
Plusieurs mathématiciens ont travaillé à son établissement, mais c'est Henri Poincaré qui en a donné la forme la plus aboutie et la plus simple.

Le théorème peut parfaitement s'appliquer hors équilibre (sous condition) et les corps peuvent être des atomes, des planètes, des étoiles, des galaxies ou des amas de galaxies.

Pour cette raison il est très utilisé en astronomie. Il permet entre autres de relier la vitesse de rotation d'un corps à la masse responsable de l'attraction.

IV.2.2 La rotation des galaxies spirales

De même que la vitesse de rotation des planètes est fixée par la masse du Soleil et la distance qui les en sépare, à une distance donnée du centre de la galaxie, la vitesse de rotation des étoiles est reliée à la gravitation en cet endroit, et donc à la distribution de masse dans la galaxie. On mesure la vitesse de rotation grâce au décalage spectral, vers le rouge ou le bleu, de la lumière (effet Doppler) pour chaque distance au centre galactique ; on obtient une courbe de rotation, déterminée par la distribution de masse (voir fig 1).



© Wikipédia, DP

Figure 1 En pointillés, la courbe des vitesses de rotation des étoiles dans une galaxie, déduite du théorème du viriel, à partir de la répartition des masses connues. Les observations ne valident pas cette déduction. Les étoiles détectées dans le visible tournent plus vite, tout comme les nuages d'hydrogène repérés grâce à la raie à 21 cm. Les vitesses sont ici en km/s et les distances en milliers d'années-lumière (ly).

Or, si on calcule la courbe de rotation due à toute la masse observée dans les galaxies (étoiles, gaz interstellaire, nuages moléculaires, poussières), on trouve que la vitesse de rotation calculée est inférieure à celle observée, en particulier dans les régions externes des galaxies. Les calculs indiquent que la courbe de rotation devrait décroître aux grandes distances, alors qu'on observe qu'elle est constante dans la plupart des galaxies observées [6]. Dès 1933 puis 1939 [7], cette anomalie avait été identifiée. Mais loin de leur périphérie, là où il n'y a plus d'étoiles, mais d'immenses nuages d'hydrogène neutre, Louise Volkers montre en 1959, à partir du décalage de la raie à 21 cm, que les nuages de M33 et M101, eux aussi, tournent beaucoup trop vite [8]. La même année, Kahn et Woltjer mettent en évidence un important défaut de masse dans le Groupe Local [9].

En 1975, Roberts et Whitehurst étudient les nuages d'hydrogène neutre de M31, et arrivent à la même conclusion: la courbe de rotation reste constante au lieu de décroître ; preuve qu'il y a bien une anomalie de gravitation [10] (voir fig 2).

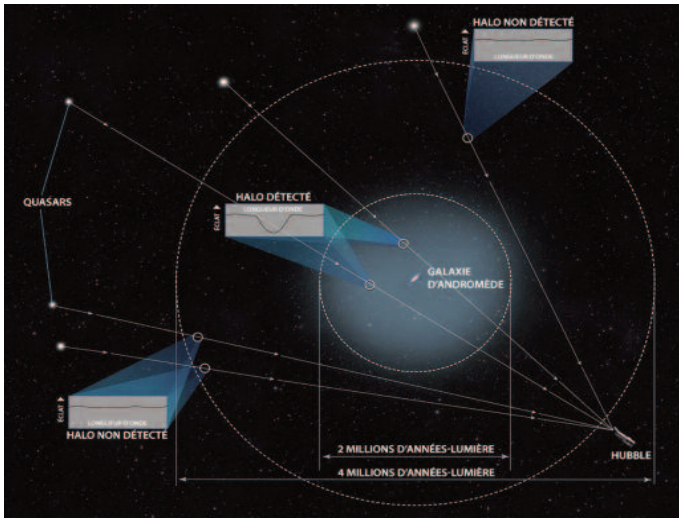


Figure 2 Confirmation (2015) de la présence d'un gigantesque halo de gaz autour de la galaxie spirale M31 à partir de l'observation de quasars très lointains. A certaines longueurs d'onde, le spectre de 18 quasars a montré une variation d'éclat induite par le passage au travers du gaz du halo. Il aurait ainsi un diamètre de pratiquement 2 millions d'années-lumière. Le gaz détecté, est bien lié gravitationnellement au disque de M31 et tourne avec des vitesses présentant l'anomalie.

Notre propre galaxie étant spirale, il est intéressant d'étudier le comportement d'objets voisins pour estimer la masse de la galaxie. C'est ce que fait Arrigo Finzi, en 1963 à partir des mouvements des amas globulaires autour de notre galaxie. Le résultat donne une valeur 3 fois plus grande que la masse de la partie centrale. Elle propose alors une modification de la loi de Newton à grande distance [11]. Les progrès de l'informatique ont permis de conduire des simulations, en partant des équations physiques déjà utilisées dans les précédentes études. Ainsi Ostriker et Peebles montrent en 1973 que les disques galactiques seraient instables en présence de la seule matière observée [12]. Pourtant, si une galaxie est stable c'est que la force centrifuge liée à la vitesse de rotation des étoiles est exactement compensée par une force d'attraction !

Les simulations modernes permettent de prendre le problème dans l'autre sens et de déterminer quelle distribution de masse il faudrait avoir pour obtenir le résultat des observations. Ce que l'on obtient alors, en utilisant la loi de Newton, c'est un ensemble d'étoiles concentrées dans le bulbe, des étoiles de moins en moins nombreuses en s'éloignant du centre, un gaz occupant l'espace interstellaire et se déployant bien au delà des dernières étoiles visibles, mais aussi un halo de nature inconnue s'étendant encore plus loin (jusqu'à quatre fois le rayon de la galaxie).

IV.2.3 Les vitesses des étoiles dans les galaxies elliptiques

Dès 1940, une rotation anormalement importante de galaxies elliptiques est rapportée (NGC 3115, NGC 4494) [13]. L'analyse précise montre que l'on est confronté au même problème que dans les galaxies spirales. Cette observation et cette analyse ont ensuite été généralisées.

IV.2.4 Les mouvements des galaxies dans les amas

Les amas de galaxies sont les plus grandes structures gravitationnellement liées c'est à dire découplées de l'expansion. Dans la formation des structures, ils sont donc nécessairement les objets les plus précocement formés. Ils contiennent de ce fait un maximum d'information sur l'histoire de leur évolution, ce qui en fait des sondes co-

mologiques privilégiées.

L'analyse de la lumière émise par les galaxies permet de mesurer précisément leur vitesse. Les mouvements étant déterminés par les forces de gravitation auxquelles elles sont soumises, le calcul de la masse responsable de ces forces est possible (voir § IV.2.1).

En 1933 : Fritz Zwicky (1898-1974) mesure la distribution des vitesses des galaxies de l'amas de Coma, et trouve des vitesses excessivement élevées. Si élevées qu'une grande quantité de masse doit être présente dans l'amas si on veut expliquer que l'amas ne se soit pas dissocié depuis très longtemps [14].

Trois ans plus tard, Smith Sinclair fait une mesure similaire dans un autre amas (Virgo) et arrive aux mêmes conclusions [15]

Depuis, ces observations ont été largement confirmées dans la plupart des amas galactiques.

IV.2.5 L'émission en X du gaz chaud des amas galactiques

Depuis 1972 (R. Giacconi prix Nobel de physique 2002), on sait que la plupart des amas de galaxies sont des sources de rayons X très brillantes et non variables. L'étude du spectre d'émission a permis de l'identifier au rayonnement de freinage issu du gaz intra-amas porté à une température de l'ordre de 108 K.

A cette température, on parle de plasma, car le gaz est totalement ionisé. Ce gaz est composé d'hydrogène et d'hélium en proportions 75/25, c'est-à-dire les proportions primordiales. Il est très étendu en volume, et constitue la première contribution à la masse totale visible des amas, la seconde contribution étant celle des galaxies elles-mêmes.

La décomposition en longueurs d'onde des rayons X émis révèle la température du gaz, alors que l'intensité du rayonnement permet de remonter à sa densité. A partir de cette température et de cette densité, on peut calculer une pression et en déduire, avec quelques hypothèses, la pesanteur locale. Les détecteurs embarqués dans les satellites d'observation en X offrent maintenant une résolution suffisante pour produire des cartes détaillées de température et de densité dans les amas, et donc de répartition de la masse à l'intérieur.

Le résultat est que la masse visible (gaz + galaxies) ne constitue que 10 % de la masse totale des amas.

IV.2.6 L'effet de lentilles gravitationnelles produit par les amas (fig 3)

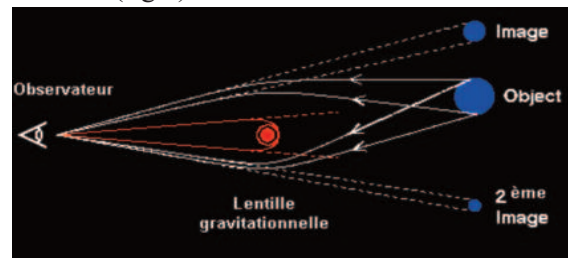


Figure 3 principe de l'effet de lentille gravitationnelle

Les objets massifs, tels que les amas de galaxies, distordent les images des autres objets situés en arrière plan. Cet effet de lentille gravitationnelle est caractérisé par la présence d'arcs gravitationnels centrés sur la distribution de masse dans l'objet massif. La déviation des rayons lumineux par un objet massif, peut aussi se traduire par des images dédoublées, une seule source apparaissant sous l'aspect de plusieurs arcs, lorsque l'objet est particulièrement massif.

L'effet étant sensible à l'ensemble des masses présentes, indépendamment de leur nature, il constitue un excellent outil pour sonder par exemple les amas de galaxie.

Les amas Abell 2218 et Abell 1649 [16], particulièrement étudiés, conduisent à la conclusion que les arcs ne peuvent être produits que par une quantité de matière bien plus importante que celle mesurée en faisant la somme des masses des galaxies et de la masse du gaz (fig 4).

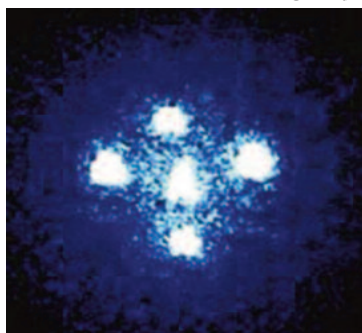


Figure 4 La croix d'Einstein. Mirage gravitationnel produisant cinq images d'un quasar unique

L'observation de l'effet de lentille gravitationnelle par les amas est une preuve de la présence d'une autre composante gravitationnelle. En outre le déficit de matière observé est du même ordre que celui déterminé à partir du spectre de rayonnement X.

IV.2.7 L'effet Sunyaev-Zeldovitch dans les plasmas galactiques.

Dans les années soixante dix, deux cosmologistes russes étudient l'interaction entre photons et électrons et théorisent un effet Compton inverse dans le cas d'électrons portés à très haute température soumis à un rayonnement de photons micro ondes. Ils prévoient une distorsion du spectre du corps noir (fig 5) avec un décalage vers les hautes fréquences. Les photons du fond diffus cosmologique sont de bons candidats, de même que les électrons des plasmas internes aux amas galactiques.

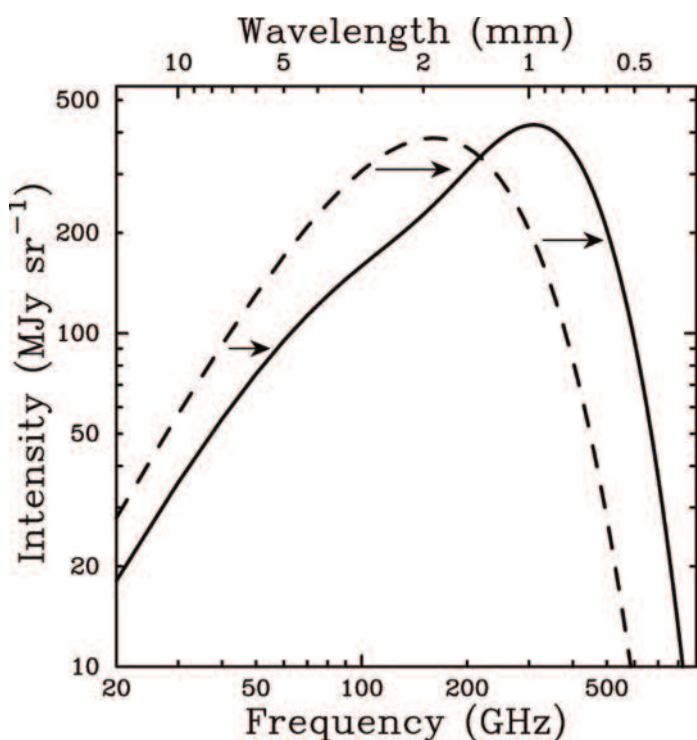


Figure 5 Intensité du rayonnement de fond diffus en fonction de sa fréquence et de sa longueur d'onde en abscisse, on voit clairement l'influence de l'effet Sunyaev-Zeldovitch. La courbe initiale de corps noir du rayonnement fossile est distordue et déplacée vers les hautes fréquences, pour donner l'intensité du rayonnement de fond diffus en traits pleins

Lors des collisions avec les électrons du plasma, les photons sont portés à des énergies plus élevées. Par rapport au rayonnement incident, il doit donc y avoir un enrichissement en photons de hautes énergies et un appauvrissement en photons de basses énergies. L'observation du spectre du corps noir du fond diffus cosmologique au travers du plasma d'un amas galactique doit donc être décalé vers les hautes fréquences (voir fig 5).

C'est effectivement ce qui a été observé en 1983. On parle de l'effet SZ [17]. Aujourd'hui, cet effet SZ est devenu un outil pour la cosmologie. Son utilisation, avec le satellite Planck, a permis la découverte de plus de 1600 amas. Mais surtout, il permet par l'analyse fine de la distorsion du spectre, de remonter à la densité d'électrons et à la température, puis à la gravité locale, donc à la masse responsable. Là encore, comme avec l'étude de l'émission X du gaz chaud, les premiers amas étudiés par effet SZ affichent un important déficit de masse.

IV.2.8 La Formation des amas galactiques.

Les amas galactiques se sont formés après le Big Bang, à partir d'inhomogénéités du fluide primordial qui ont servi d'attracteur pour initier localement des effondrements gravitationnels. Les détails de cet effondrement dépendent fortement de la composition de l'Univers. Les modélisations de formation des amas y sont donc très sensibles. Là encore, aucun scénario cosmologique ne conduit à la formation de ces amas avec les données connues sur la masse-énergie de l'Univers. Il faut ajouter artificiellement une masse dans les modèles pour obtenir un résultat réaliste.

IV.2.9 La formation des grandes structures de l'Univers

est également issue de cet effondrement. Si dans la modélisation, on considère que l'Univers est constitué uniquement de la matière visible, alors on trouve qu'il ne s'est pas écoulé assez de temps entre la création des atomes et aujourd'hui, pour que les fluctuations du fond diffus aient pu s'effondrer et donner des galaxies. Le défaut de masse trouvé est par ailleurs le même que celui estimé dans l'étude de l'expansion de l'Univers.

IV.2.10 La géométrie de l'Univers

L'observation d'objets de plus en plus lointains permet de déterminer la courbure de l'Univers. Les résultats convergent aujourd'hui pour conclure qu'elle est globalement nulle, et que l'espace est donc plat. Or dans tous les modèles de Friedman la courbure est reliée à la densité totale de matière-énergie. Un espace plat correspond à la densité critique (environ 6 atomes d'hydrogène par m³). Or, la densité que l'on observe est très inférieure, et l'on retombe sur le problème de la masse manquante.

IV.2.11 La nucléosynthèse primordiale

est la condensation des protons et neutrons en noyaux légers, 380000 ans après le Big Bang. Avant cette formation des noyaux légers, la température était trop élevée, et les photons très énergétiques étaient alors capables de dissocier les éventuels noyaux formés en protons et neutrons [18]. D'après la physique des particules, la quantité des différents noyaux légers ainsi produits ne dépend que de trois paramètres :

- Le nombre de photons par nucléon dans l'Univers (inconnu)
- Le temps de vie du neutron (environ 886 secondes dans le vide)
- Le nombre de familles de neutrinos (3 : électronique, muonique et tauique)

La comparaison entre l'abondance des éléments légers prédite par le modèle cosmologique et l'abondance réellement observée dans l'Univers, est un test puissant et sévère du modèle.

L'abondance de l'hydrogène est expliquée, avec une valeur de $1,68 \cdot 10^9$ pour le paramètre inconnu.

L'abondance du deutérium est expliquée, avec une valeur de $1,62 \cdot 10^9$ pour le paramètre inconnu.

L'abondance de l'hélium 3 est expliquée, avec une valeur de $1,55 \cdot 10^9$ pour le paramètre inconnu.

L'abondance de l'hélium 4 est expliquée, avec une valeur de $1,79 \cdot 10^9$ pour le paramètre inconnu.

L'abondance du lithium 7 est expliquée, avec une valeur de $1,56 \cdot 10^9$ pour le paramètre inconnu.

On trouve ainsi que l'Univers contient $1,64 \cdot 10^9$ photons par nucléon.

La plupart de ces photons appartiennent au fond diffus cosmologique dont les mesures indiquent une densité de photons précise de 410 photons/cm^3 .

En divisant cette densité de photons par le nombre de nucléons par photon on en déduit la densité de nucléons dans l'Univers. On trouve que la densité de nucléons vaut environ 4 % de la densité critique, c'est à dire de la densité de l'univers. Donc 96% de la densité de l'Univers est constituée d'autre chose que des protons et neutrons que nous connaissons !

Conclusion :

Il n'y a pas que les courbes de rotation des étoiles et galaxies. On a des évidences aussi via les structures à grande échelle, les lentilles gravitationnelles, l'abondance des éléments légers et la courbe spectrale du fond diffus cosmologique. Il est assez rassurant de voir que ces multiples données expérimentales, d'origines différentes, convergent vers la même conclusion.

Il est tentant de conclure, au moins provisoirement, comme l'ont fait tous les astronomes de l'histoire devant ce type de problème, que l'Univers contient une masse sous une forme que l'on ne voit pas. Mais cela soulève la question de la nature de cette matière noire.

On ne sait que peu de chose sur cette composante, en dehors du fait qu'elle n'interagit que par interaction faible (le contraire la rendrait visible) et qu'elle est non-relativiste (on parle alors de matière noire froide ou CDM pour Cold Dark Matter).

IV.3 La démarche scientifique des astrophysiciens

Devant l'évidence expérimentale, ils se posent la question de la nature de cette matière que l'on ne voit pas. Une des premières actions est de nommer ce sur quoi on va travailler, échanger entre spécialistes et communiquer vers un cercle plus large. Faire de la Science, n'est pas "jouer avec les noms". Les objets physiques sont discutés en fonction de ce qu'on en sait et pas d'un nom attribué au départ parfois pour des raisons historiques. En l'occurrence «dark matter» par un astronome néerlandais (Jacobus Kapteyn en 1922), mais surtout utilisé par Vera Rubin dans les années 70.

Si le terme matière noire est regrettable (*peut être vaudrait il mieux parler de matière transparente*), son usage s'est imposé pendant les derniers 50 ans.

Devant l'ampleur du problème qui se pose aujourd'hui,

on peut mesurer l'inadaptation de ce vocabulaire (surtout vis à vis de la sphère médiatique). Le corps noir, connu de tous les physiciens, n'est pas de couleur noire. La «matière noire» n'est peut-être même pas de la matière.

Comme le rapporte Françoise Combes qui cite Confucius : «Il est très difficile de chercher un chat noir dans l'obscurité, surtout s'il n'y a pas de chat».

Mais pour autant, la question posée n'est pas qu'une question de sémantique. Elle interroge l'intelligence des physiciens et des mathématiciens pour la création d'une théorie probablement très novatrice, mais bien sûr réfutable dans le sens défini par Karl Popper (1902-1994) dans son livre référence : *Logique de la découverte scientifique* [19].

En particulier : «*Des idées audacieuses, des anticipations injustifiées et des spéculations constituent notre seul moyen d'interpréter la nature, notre seul outil, notre seul instrument pour la saisir. Nous devons nous risquer à les utiliser pour remporter le prix. Cependant, ne participent vraiment au jeu de la science que ceux qui exposent leurs idées et prennent le risque de la réfutation*».

Karl Popper, professeur de logique et de méthodologie des sciences à Londres, s'est intéressé à divers problèmes scientifiques contemporains. Toute sa vie il a entretenu des discussions passionnées avec les grands physiciens sur les problèmes de l'axiomatique en géométrie, du déterminisme et de l'indéterminisme dans la physique quantique des problèmes liés à l'entropie et du concept de «flèche du temps».

Une des questions centrales auxquelles Popper s'est trouvé confronté, lorsqu'il a rencontré les théories d'Einstein est : Comment distinguer, la science véritable des pseudo-sciences : mythologies, gnosés, idéologies, métaphysiques ?

Pour lui la «testabilité» constitue la marque de la scientificité des énoncés comme des théories. «Ce qui m'a impressionné le plus, note Popper à propos d'Einstein, est qu'il considérait sa théorie comme insoutenable si elle ne résistait pas à l'épreuve de certains tests». La démarche de la science se présente ainsi comme «une méthode de conjectures audacieuses et de tentatives ingénieuses et sévères pour réfuter celles-ci» [20]

Après hésitation et débats, plus aucun astrophysicien ne remet en cause l'existence d'une grave anomalie dans la mesure de la masse-énergie de l'Univers. Les débats se portent ensuite naturellement sur son origine. On trouvera, en particulier sous la référence [21] l'illustration par Marc Lachièze-Rey des tentatives pour expliquer de façon «classique» le défaut de masse observé.

IV.3.1 Des objets astrophysiques classiques ?

La plupart des objets qui nous entourent dans la vie quotidienne n'émettent pas de lumière, on ne les voit que parce qu'ils sont éclairés par des sources externes. L'idée de matière noire baryonique (constituée des classiques neutrons et protons) est donc assez naturelle. On peut imaginer qu'il existe dans l'Univers de la matière qui n'émet pas suffisamment de lumière pour être vue directement. De nombreuses hypothèses réfutables ont ainsi été envisagées.

Les nuages d'hydrogène moléculaire produisent un rayonnement gamma quand ils sont traversés par les rayons cosmiques de haute énergie, et ils peuvent aussi absorber une partie de ces rayons quand on regarde un objet placé derrière.

Les poussières ont tendance à absorber, diffuser et rougir la lumière qui les traverse, une grande quantité serait donc indirectement visible.

Les naines blanches contrairement aux autres astres peuvent se refroidir et s'éteindre, l'Univers pourrait-il en contenir beaucoup sous forme éteinte et donc peu visibles ? Le télescope spatial Hubble est en mesure de détecter les moins brillantes de notre Galaxie. Elles ne peuvent se cacher, et le calcul de leur contribution à la masse cachée s'avère négligeable dans le bilan.

Les naines brunes, et les étoiles à neutrons bien qu'invisibles, émettent du rayonnement dans certaines longueurs d'onde.

Les trous noirs de masse stellaire, peuvent être détectés directement, ou indirectement par le phénomène de lentille gravitationnelle. Les trous noirs supérieurs à quelques millions de masses solaires sont exclus car ils auraient un effet destructeur sur les galaxies.

Aucun des ces objets n'est donc parfaitement invisible. Les tentatives d'en détecter un surplus ont échoué et en outre, l'étude du gaz primordial d'hydrogène (par absorption du rayonnement issu de quasars très éloignés) révèle que l'on détecte bien la totalité des baryons (protons et neutrons) de l'Univers primordial, il n'y a donc pas de problème de matière noire baryonique aux grandes échelles.

IV.3.2 Des particules exotiques ?

Dans les années 1980 l'hypothèse d'un neutrino électronique massif (quelques dizaines d'électronvolts) était la plus retenue. Cette particule est très abondante dans l'Univers, et l'on est de plus en plus convaincu que sa masse n'est pas nulle (mais elle n'est pas encore déterminée) [22]. Ces particules très légères et en grand nombre, peuvent-elles expliquer le défaut de masse ? Malheureusement non, il a été démontré que le neutrino électronique ne pouvait pas contribuer à plus de 20% de la masse manquante. Peut-être un autre type de neutrino (muonique ou tauique) ? Les autres particules candidates ne peuvent être qu'hypothétiques [23].

Les physiciens ont montré depuis longtemps l'importance des raisonnements sur les symétries pour comprendre les propriétés du monde qui nous entoure [24]. C'est ce type d'approche qui les a conduit au Modèle Standard de la Physique des Particules, avec une unification de l'électricité du magnétisme, de l'interaction faible et de l'interaction forte.

A côté de ses succès incontestables, ce modèle semble incomplet, car ne répondant pas à plusieurs questions fondamentales. C'est ce qui justifie la recherche d'une nouvelle physique au delà du modèle standard. De façon théorique, des extensions ont été proposées :

Les théories supersymétriques (SUSY), prévoient l'existence d'une particule supersymétrique, le neutralino, légère, stable et électriquement neutre, qui ne peut interagir que faiblement avec les particules du Modèle standard. Ce sont exactement les caractéristiques attendues pour des particules de matière noire [25], [28].

Les transformations supersymétriques associent à chaque particule un superpartenaire dont le spin lui est inférieur d'une demi-unité. Donc, un boson aura comme superpartenaire un fermion et inversement. De cette manière, particules matérielles (fermions) et particules médiatrices

(bosons) sont intimement liées. Aujourd'hui aucune superparticule n'a été identifiée que ce soit dans les rayons cosmiques ou dans les accélérateurs. Mais les études continuent car l'enjeu est important. La supersymétrie permet en effet d'introduire des interactions gravitationnelles dans une théorie générique qui est dite de supergravitation. Ce qui est remarquable, c'est que cette théorie contient la relativité générale d'Einstein un peu comme cette dernière englobait la théorie de la gravitation de Newton [26], [27].

Les théories des supercordes (qui reposent aussi sur la supersymétrie), dans lesquelles les différentes particules ne seraient que les excitations différentes d'un même objet fondamental (corde), et les réactions entre particules seraient les passages d'un mode de vibration à un autre. Certaines peuvent fournir une description quantique de la gravité, et donc réconcilier la mécanique quantique avec la relativité générale d'Einstein. Dans la théorie des cordes, chaque particule est un état spécifique de vibration de la corde. Or, un des modes de vibration correspond au médiateur de la gravité que l'on recherche en physique quantique, c'est-à-dire une particule de masse nulle et de spin deux : le graviton. De la même façon, la théorie des cordes offre une particule de masse nulle et de spin un, le photon, ce qui caractérise une théorie quantique de l'électromagnétisme. Ces théories sont peu réfutables au sens de Karl Popper et doivent donc plutôt être considérées comme des développements mathématiques prometteurs que comme de véritables théories physiques.

Il y a un intérêt commun entre astrophysiciens et physiciens des particules à découvrir de nouvelles astroparticules qui pourraient alors constituer la matière noire. Parmi les nombreuses particules issues de ces modèles, l'une d'entre elles a la faveur des astrophysiciens : le neutralino.

Les cosmologistes ont privilégié l'hypothèse «matière noire» plutôt que de mettre en cause la théorie de la gravitation car la relativité générale est un édifice solide, validé par de nombreux faits expérimentaux [29]. Mais devant l'absence des nouvelles particules attendues, ils sont de plus en plus nombreux à prendre au sérieux l'idée d'une refonte de la gravitation. La recherche de solutions alternatives à la matière noire est donc un défi pour de nombreux physiciens théoriciens.

IV.3.3 Une révision fondamentale de la gravitation ?

MOND : une approche phénoménologique

Déjà en 1963, Arrigo Finzi, propose de modifier la loi de Newton à grande distance [11].

Mais c'est en 1983 qu'une approche empirique nommée MOND, acronyme de Modified Newtonian Dynamics, est proposée avec quelques succès par Milgrom. L'idée de départ est de trouver la forme que devrait avoir une force d'attraction gravitationnelle pour expliquer les mouvements internes des galaxies, sans faire appel à de la matière noire.

MOND fait l'hypothèse qu'il existe deux régimes d'accélération : celui des très faibles accélérations dans les zones très éloignées des masses qui génèrent l'accélération de pesanteur, et celui des fortes accélérations (le régime habituel) près de ces masses.

La loi fondamentale de la dynamique est modifiée en faisant intervenir une constante notée a_0 qui correspond à l'accélération limite des deux régimes. En conséquence, on retrouve la dépendance en $1/r^2$ pour la force d'attraction dans le régime normal, mais une dépendance en $1/r$ pour l'autre régime loin du centre. L'accélération a_0 serait une nouvelle constante fondamentale de la nature dont la valeur 10^{-10} m/s^2 a été déterminée numériquement à partir des courbes de rotations galactiques. Elle est proche numériquement de la quantité cH , qui est le produit de la vitesse de la lumière par la constante de Hubble.

Cette approche, sans aucun doute, «explique» la rotation trop rapide des galaxies spirales. La relation de Milgrom prédit aussi le comportement de certaines galaxies, toujours mal compris aujourd'hui, même avec de la matière noire. Un autre atout de la relation de Milgrom est qu'elle permet de prédire la forme et la valeur des constantes présentes dans une relation qui relie la magnitude absolue d'une galaxie spirale à sa vitesse maximale de rotation. Ce que ne permet pas l'hypothèse de la matière noire [30].

En revanche, MOND peine à expliquer les anomalies du fond diffus ou celles des grandes structures en général. Mais quand on ajoute que certaines distributions de matière noire permettent de retrouver un comportement en $1/r$, on peut imaginer que les deux approches concurrentes sont peut être compatibles et complémentaires.

En conclusion, on ne peut pas exclure qu'il soit nécessaire de s'appuyer à la fois sur des nouvelles particules ET sur une nouvelle loi de la gravitation.

Au-delà de la Relativité Générale

Pour Erik Verlinde de l'Université d'Amsterdam «*au niveau microscopique, les lois de Newton ne s'appliquent pas, mais elles s'appliquent aux pommes et aux planètes. Vous pouvez comparer ceci à la pression des gaz. Les molécules n'ont pas de pression par elles-mêmes, mais un baril de gaz oui*». Il faut aussi souligner que dans l'étude des quatre interactions fondamentales, la gravitation se présente de façon singulière. Elle est en général soupçonnée d'être d'une autre nature que les trois autres. La gravitation ne fait pas partie du modèle standard. Elle est d'intensité si faible comparée aux autres interactions (environ 10^{39} fois) qu'elle relève certainement d'une théorie radicalement différente.

Dans la théorie de Erik Verlinde, la gravitation n'est pas une force fondamentale de la nature, mais plutôt un phénomène émergent qui découle de l'entropie de l'Univers. Une équipe de chercheurs dirigée par Margot Brouwer [31] a testé cette théorie en mesurant la répartition des forces gravitationnelles dans un échantillon de 33000 galaxies, par effet de lentille gravitationnelle. En conclusion, la gravité émergente de Verlinde, parvient aux mêmes résultats sans avoir à recourir à l'idée de matière noire. Ainsi, la théorie de la relativité générale d'Einstein et celle de Verlinde ont la même pertinence, du moins dans ces mesures. Ce résultat autorise un certain optimisme de sa part «*Nos idées actuelles sur l'espace, le temps et la gravité ont un besoin urgent d'être repensées. Nous savons depuis longtemps que la théorie d'Einstein sur la gravité ne peut cohabiter avec la mécanique quantique. Nos résultats sont en train de changer radicalement notre point de vue sur la nature même de l'espace, du temps et de la gravité, et je pense que nous sommes à la veille d'une révolution scientifique*».

V Énergie sombre

Ce terme recouvre à la fois un vocable et une hypothèse

utilisés pour expliquer un fait observationnel : l'accélération de l'expansion de l'Univers. Mais l'interprétation en terme d'énergie répulsive, ne fait pas l'unanimité parmi les théoriciens.

Certains soupçonnaient depuis plusieurs années qu'il fallait réintroduire en cosmologie la fameuse constante d'Einstein : Λ . Mais pour mieux comprendre une situation qui depuis 1998 peut être qualifiée de douteuse, d'absurde, ou pire d'imposture, il est utile de revenir quelques années en arrière.

V.1 L'inflation cosmique, une énergie répulsive.

La preuve de l'existence du Big Bang avec l'expansion de l'Univers associée soulève des questions fondamentales. La température de l'Univers primordial est identique dans toutes les directions avec une grande précision (10^{-5}). L'Univers primordial était à l'équilibre thermique (rayonnement de corps noir parfait). D'après le second principe de la thermodynamique, l'équilibre résulte de la mise en communication (par des chocs par exemple) de toutes les parties du système. Les rayonnements provenant de deux régions différentes ne peuvent être identiques que si elles ont été causalement liées à une certaine époque. Il y a donc nécessairement eu à un moment donné un échange d'information qui s'est fait au maximum à la vitesse de la lumière. Comment, avec la vitesse d'expansion que l'on connaît, les photons provenant de deux régions opposées du ciel peuvent ils être aussi identiques ? Ou dit autrement, par quel mécanisme le rayonnement fossile peut-il être aussi isotrope. Ce questionnement est connu sous le terme de «problème de l'horizon».

Les données recueillies par les observatoires spatiaux montrent que le fond diffus est invariant par translation donc que l'Univers est homogène ; sa masse est répartie de façon uniforme ; sa densité est la même partout. Comment expliquer cette homogénéité entre régions distantes qui n'ont jamais été en contact si on considère la vitesse d'expansion de l'Univers ? Ce questionnement est connu sous le terme de «problème de l'homogénéité».

La valeur de la densité est extrêmement proche ou égale à la densité critique qui définit un univers de courbure nulle, c'est-à-dire un univers plat. Pour les cosmologistes, cette situation est hautement improbable. La densité actuelle de l'Univers est liée directement à sa densité primordiale et pour que la densité actuellement observée soit proche de la valeur critique à 10^{-1} près, il faudrait que juste après le Big Bang elle le soit à 10^{-60} près ! [32] Par quel mécanisme l'Univers primordial aurait-il pu être aussi plat ? Ce questionnement est connu sous le terme de «problème de la platitude».

Alan Guth, physicien des particules, travaillait sur l'unification des forces fondamentales durant les années 1970. A très haute température (seulement disponibles très tôt dans l'univers) il est envisagé que les quatre interactions n'en forment plus qu'une [33], [24].

Dans ses réflexions, il étudie une brisure spontanée de symétrie associée à un champ scalaire (comme le champ de Higgs) et à un changement de phase qui conduit à un refroidissement très rapide du système étudié.

L'intérêt de ses études n'échappe pas aux cosmologistes et Alan Guth applique alors ses idées au début du Big Bang ce qui le conduit à proposer la théorie de l'inflation cosmique, largement acceptée aujourd'hui. Sans entrer dans une description précise du scénario proposé par A. Guth, [34] et indépendamment par A. Linde [35] et A. Starobinsky, [36] nous en donnons ici les principales étapes.

Le vide est en fait peuplé, au niveau quantique, de particules virtuelles qui se forment et s'annihilent et engendrent une énergie du vide.

Pendant un court instant, un champ scalaire, l'inflaton, est porté à un niveau d'énergie anormal à cause d'une fluctuation quantique. Un changement de phase se produit qui induit à la fois refroidissement très rapide et expansion exponentielle de l'Univers pendant un temps court.

A la température de 10^{27} degrés, c'est à dire vers 10^{-35} seconde, la gravitation se détache de la «super force», puis c'est le tour de l'interaction forte qui laisse l'interaction électrofaible, (celle-ci engendrera, plus tard, lorsque la température aura baissé, la force électromagnétique et la force faible).

Pour Alan Guth, l'énergie du vide est représentée dans les équations d'Einstein par la constante cosmologique Λ . Pour illustrer ce mécanisme, une analogie est souvent faite avec la surfusion de l'eau qui voit l'eau refroidie à moins de 0°C sans geler. Au fur et à mesure que se poursuit le refroidissement, l'eau finit pas geler soudainement et libère ensuite sa chaleur latente de fusion dans le processus.

C'est au cours de la très courte inflation que des zones préalablement en contact se retrouvent projetées à des distances prodigieuses tout en conservant des caractéristiques de leur passé commun. C'est aussi à cause de l'augmentation considérable de volume que la courbure initiale est gommée pour devenir nulle, signature d'un Univers plat.

L'inflation cosmique résout les trois problèmes d'horizon, d'homogénéité et de platitude, donne un mécanisme pour les premières étapes du Big Bang, fournit une interprétation physique à la constante cosmologique et donne avec l'inflaton à la fois les germes des ondes gravitationnelles et des faibles hétérogénéités responsables de la formation des grandes structures sous l'effet de la gravitation. [34], [37].

Plus de trente ans après, ce modèle reste d'actualité. Différentes observations n'ont fait que le confirmer, sans que des données puissent vraiment le remettre en cause. Le consensus n'exclut pourtant pas d'en montrer les limites.

Le modèle ne résout pas le problème de l'entropie en relation avec la gravitation. Paul Steinhardt propose une autre explication pour la phase quantique du scénario. Mais nous retiendrons, pour ce qui nous intéresse ici, que le concept d'inflation s'avère très fructueux, et que les cosmologistes ont alors à leur disposition, pour comprendre la dynamique de l'Univers, des mécanismes antagonistes : une énergie répulsive et une énergie attractive (la gravitation).

C'est dans ce contexte que les observations de S. Perlmutter, B. Schmidt et A. Riess font l'effet d'une bombe en 1998. Leur découverte allait révolutionner la cosmologie et déclencher d'intenses débats dans le milieu de la physique théorique, notamment dans le domaine spéculatif de la théorie des supercordes. Alors que tout le monde prévoyait un ralentissement de l'expansion de l'Univers à cause de l'effet de la gravitation, c'est exactement l'inverse que ces chercheurs montraient.

V.2 Données expérimentales/ observationnelles troublantes.

L'observation de supernovae de type Ia présente une anomalie. Alors qu'elles sont supposées être des chandelles standardisées de l'Univers, elles apparaissent plus faiblement lumineuses qu'attendu. La mesure indépendante de leur distance (voir § II.5) et de leur vitesse (*par décalage vers le rouge*) conduit à des valeurs que l'on peut interpréter comme liées à une accélération de l'expansion. L'expansion a commencé à accélérer à une époque située il y a entre 4 et 8 milliards d'années.

C'est la confirmation du phénomène en 2011, par deux méthodes indépendantes qui ne font pas appel aux supernovae, qui conduira à récompenser cette découverte par le prix Nobel.

L'oscillation acoustique des baryons confirme de manière magistrale que l'expansion de l'Univers ne se fait pas à un taux constant. La technique peut s'avérer d'une précision extrême dans la détermination d'étalons de longueur (§II.7). Ainsi certains diamètres de sphères étalons sont définis avec une précision statistique de 7 écart-types (on considère en général en physique que cinq écart-types suffisent pour établir la certitude d'un résultat issu de mesures bruitées, ce qui signifie que le niveau de confiance dans le résultat est alors de 99,9999%).

Les mesures montrent très clairement qu'après la phase d'inflation cosmique il y a 13,7 milliards d'années, l'expansion a été constante puis a ralenti il y a 11 milliards d'années, sans doute du fait de l'attraction mutuelle de toutes les galaxies. Le taux d'expansion est ensuite redevenu constant avant d'accélérer il y a environ 5 milliards d'années.[38].

L'effet de lentille gravitationnelle est une technique également sensible à l'histoire de l'expansion de l'univers. En 2010, elle confirme son accélération [39].

A partir du relevé par Hubble de la position de 194 000 galaxies lointaines et de leur distance correspondante (par décalage vers le rouge), une collaboration européenne a établi une carte tridimensionnelle de toute la matière (y compris la matière noire par effet de lentille) contenue dans la portion du ciel examinée.

La formation des structures cosmiques dépend des influences antagonistes de la gravitation, qui tend à concentrer la matière, et de l'expansion qui tend à la diluer. Retracer avec précision la distribution de matière à différentes époques permet donc de mesurer l'expansion de l'Univers, et en particulier de déterminer si son rythme augmente ou non. En comparant structures lointaines et structures proches, l'équipe a donc ensuite analysé l'effet de l'expansion sur la distribution de la matière. Le résultat obtenu est une croissance des amas de galaxie ralentie, et des galaxies d'autant plus déformées qu'elles sont plus lointaines.

Par une méthode différente (sur des quasars), mais utilisant le même effet de lentille gravitationnelle, l'accélération vient d'être confirmée à nouveau. Cette méthode, par effet de lentille gravitationnelle, est la plus directe. Reposant sur peu d'hypothèses et donc de sources d'erreurs possibles à prendre en compte, elle est la plus robuste.

D'où la conclusion : l'accélération de l'expansion est confirmée à l'aide du seul effet de lentille gravitationnelle, et sans contraintes fortes sur le modèle cosmologique.

Le jury Nobel a donc attendu treize années et la confirmation par d'autres mesures, plus précises, ainsi que par des observations par des méthodes indépendantes pour attribuer le prestigieux prix aux trois chercheurs. Il est important aussi de souligner que le jury n'a pas récompensé la découverte d'une hypothétique énergie sombre, mais la qualité d'une observation dont le résultat présente une importance majeure pour des pans entiers des sciences dures avec probablement des remises en cause importantes.

La nature du moteur de l'expansion accélérée reste une question totalement ouverte.

V.3 La démarche scientifique des astrophysiciens

D'après Françoise Combes, professeur au Collège de France, en charge du cours Galaxies et cosmologie, [40].

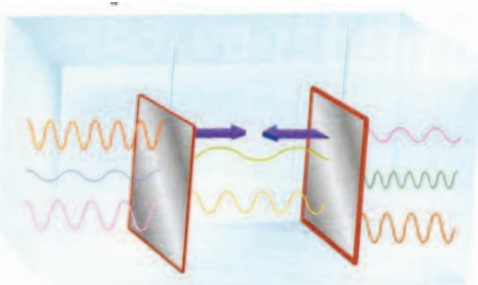
Les observateurs précisent actuellement les mesures et recherchent des méthodes nouvelles et indépendantes pour à la fois confirmer les résultats antérieurs et contraindre les théories en présence, voire en éliminer. Ce dialogue permanent entre observateurs et théoriciens autorise un classement des principales pistes explorées pour relever le défi théorique.

V.3.1 Des nouvelles composantes ?

La constante cosmologique introduite initialement par Einstein, permet de «régler» le comportement de l'équation sur l'expansion observée. Ce n'est pas très satisfaisant car le procédé ne fait que déplacer le problème en masquant la cause réelle. Cette constante n'a pas aujourd'hui de justification physique. Un des cas les plus intéressants est celui d'une constante cosmologique légèrement supérieure à la valeur initialement utilisée par Einstein. Dans ce cas, l'Univers serait né dans le Big Bang et aurait suivi une expansion ralentie par la gravité, mais l'effet de cette dernière aurait finalement été surmonté par une force de répulsion à grande échelle et l'Univers serait entré dans une phase d'expansion accélérée.

Une justification physique tentante est **l'énergie du vide quantique**.

En physique classique, la notion de vide est simple : c'est ce qui reste quand un récipient est dépouillé de toutes ses particules et la température abaissée jusqu'au zéro absolu. Si donc on dispose deux plaques métalliques conductrices parallèles, plongées dans le vide, il ne doit rien se passer. Le physicien Hendrik Casimir prétend le contraire. Il démontre que les processus de création annihilation engendrent une énergie résiduelle qui en moyenne n'est pas nulle. La théorie de Casimir prévoit que cette énergie doit exercer une force répulsive du vide sur l'extérieur du système, donc un rapprochement des plaques (voir fig 6).



Pour La Science Belin

Figure 6 L'énergie due aux fluctuations des champs quantiques du vide est mise en évidence par l'effet Casimir. Dans le vide, deux plaques parallèles, électriquement neutres et parfaitement conductrices s'attirent faiblement. Dans la cavité, des particules virtuelles émergent spontanément du vide. Le spectre des fréquences associé est continu mais du fait que la cavité est fermée, la plupart sont destructives et finalement seules quelques fréquences particulières (les modes de résonance) vont subsister dans la cavité. Les modes de résonance sont caractérisés par le fait que la longueur d'onde du mode est un sous-multiple entier de la distance qui sépare les faces de la cavité. Le nombre de modes autorisés est donc proportionnel à la distance qui sépare les faces. On montre que, entre les plaques métalliques, seules les petites longueurs d'onde peuvent exister et que la pression de radiation des autres longueurs d'onde pousse l'une contre l'autre les plaques

La force s'exerçant sur les plaques est prévue inversement proportionnelle à la puissance 4 de leur espacement. C'était en 1948, et il faudra près de 50 ans pour obtenir une confirmation expérimentale avec un bon niveau de précision (1%). Le calcul montre que cette force est très faible, mais pour des distances inférieures au micron, la force de Casimir est en fait la force prépondérante entre deux objets électriquement neutres. Aujourd'hui, cet effet Casimir trouve des applications avec les MEMS (Microelectromechanical systems) dans beaucoup de domaines, notamment dans celui des nanotechnologies [41].

Mais à côté des développements technologiques, l'effet Casimir fait aussi l'objet d'intenses recherches dans plusieurs domaines. Conséquence des fluctuations du champ électromagnétique, il est décrit par la théorie de l'électrodynamique quantique et se trouve à l'interface des problèmes ouverts de la physique fondamentale comme le problème de l'énergie du vide ou les tests de la loi de gravité à courte distance.

Plusieurs physiciens (Brian Greene et Janna Levin par exemple) tentent de transposer cet effet (qui concerne l'électromagnétisme) au domaine de la gravitation. Ils y parviennent sur le plan théorique, et qualitatif pour la constante cosmologique, mais le désaccord avec la réalité physique sur plusieurs ordres de grandeurs discrédite la théorie pour le moment.

Une nouvelle force : la Quintessence pourrait dériver d'un champ scalaire (*cousin du champ de Higgs*) comme celui dont l'existence a été supposée dans le cadre de l'inflation cosmique des premiers instants de l'Univers observable.

Cette cinquième force conduirait à une énergie répulsive avec une densité fonction du temps. Elle ne modifierait pas la relativité générale. Cette théorie, bien que très spéculative est réfutable, elle propose de nombreux tests qui permettent de contraindre son domaine d'application ou même de la rejeter [40] :

- Sa variation avec le temps, à l'opposé de Λ , doit laisser une trace sur les observables cosmologiques (expansion cosmique, formation des grandes structures, etc.).
- La possibilité de détecter la particule de quintessence (le cosmon) en laboratoire.
- Le couplage direct ou indirect avec la matière ordinaire.
- La violation du principe d'équivalence et la variation des constantes fondamentales.

V.3.2 Des théories fausses ou incomplètes ?

La gravitation est bien connue dans des échelles qui vont du mm à la taille du système solaire. Mais en dehors ? La **modification de la loi de la gravitation** est une voie très étudiée. Une piste consiste à ajouter au potentiel gravitationnel une perturbation qui a la forme d'un potentiel de Yukawa (*que l'on rencontre dans le domaine des particules*). Il correspond à l'échange d'un boson intermédiaire générant l'interaction de gravitation. Le boson a déjà un nom : le graviton. Par cette approche qui a fait le succès de la construction du modèle standard des particules, il est possible de prédire des comportements et donc de tester la pertinence de la piste. Par exemple si ce graviton existe, il devrait avoir une masse extrêmement faible ($< 2 \cdot 10^{-56}$ kg).

Si le principe d'équivalence est faux, alors **la relativité générale ne fonctionne plus**. Ceci justifie les efforts soutenus pour tester ce principe. Une expérience est en cours dans l'espace, elle devrait donner en 2018 une comparaison entre masse inerte et masse pesante avec une précision de 10^{-15} .

Par ailleurs des recherches sont conduites qui remplacent la métrique d'Einstein par une autre (métriques de Lemaitre-Tolman-Bondi par exemple). Comme pour la gravitation quantique, elles ne se développent que lentement car elles font intervenir des mathématiques qui sont elles-mêmes à la limite de la connaissance.

Le principe cosmologique est une approximation très grossière à petite échelle, et qui ne prend sens qu'à des échelles de l'ordre de plusieurs centaines de millions d'années-lumière. Ceci justifie des réflexions sur des modèles anisotropes ou/et hétérogènes.

Il faut toujours garder à l'esprit que l'accélération repose non seulement sur l'observation, mais aussi sur l'utilisation du modèle standard de Big Bang. Si par hasard celui-ci n'était pas parfaitement exact, l'accélération de l'expansion n'aurait plus de base...

Notre Univers observable serait donc constitué de plus de 25% d'une masse invisible et de 70% d'une énergie répulsive d'origine inconnue. Quels que soient les termes utilisés, ces 95% mesurent d'abord notre niveau d'ignorance. Les physiciens et les cosmologistes le savent, et la plupart s'en réjouissent car pour défier cette ignorance, il faudra sans doute bouleverser les concepts les plus fondamentaux de la physique.

VI Fin du XIX^{ème} siècle : La Science est finie.

Avant de conclure de façon péremptoire que la Science est finie, il est bon de comprendre la dynamique de cette activité intellectuelle. C'est Thomas Kuhn (1922 - 1996), qui a le mieux expliqué ce sujet dans son livre qui fait toujours référence : « *La Structure des révolutions scientifiques* ». Thomas Kuhn est un physicien professeur aux universités de Berkeley, de Princeton, puis au M.I.T. Il s'est tourné vers l'histoire et la philosophie des sciences au point d'en devenir un des plus grands spécialistes [42].

Il introduit la notion de paradigme dans l'évolution des sciences, et montre que le progrès scientifique procède à la fois en évolution continue et en changements brutaux de paradigmes.

L'évolution continue constitue la science normale qui voit apparaître des phénomènes inexpliqués ou des anomalies qui finiront à terme par déclencher une crise, puis une révolution lorsqu'un nouveau paradigme sera présenté.

L'histoire des sciences, et de la physique en particulier, est jalonnée de telles conclusions définitives : « la Science est finie ». Elles émanent en général de scientifiques en fin de carrière, qui parfois soutiennent des thèses qui relèvent plutôt de la « provocation » que d'un raisonnement bien fondé.

Au cours du XIX^{ème} siècle, les progrès considérables en mathématique et physique ont pu donner l'impression que tout avait été découvert. « *Il n'y a plus rien à découvrir en physique aujourd'hui. Tout ce qui reste à faire, c'est d'améliorer la précision des mesures* ». « *La science physique forme aujourd'hui, pour l'essentiel, un ensemble parfaitement harmonieux, un ensemble pratiquement achevé* ». et « *La connaissance en physique est semblable à un grand ciel bleu, à l'horizon duquel subsistent seulement deux petits nuages d'incompréhension* ». Ces propos ont été tenus fin du XIX^{ème} par Lord Kelvin (1824 - 1907), éminent physicien qui a laissé son nom à l'échelle de température absolue, et à des théorèmes en électricité et thermodynamique (sous son nom de naissance William Thomson). Mais les

« deux petits nuages d'incompréhension » qu'il évoquait se sont révélés être annonciateurs d'énormes orages.

L'expérience négative de Michelson-Morley et l'incompréhension du rayonnement émis par les corps à une température donnée, étaient les germes des deux révolutions scientifiques : la relativité et la physique quantique.

Henri Poincaré [43] évoque une dilatation du cadre de la science ; les nouvelles théories englobant les précédentes, même dans les ruptures de pensées. Il présente une liste des principes remis en cause dans leur fondements à la fin du XIX^{ème} siècle : le principe de relativité ; le principe de Lavoisier ; le principe de conservation de l'énergie. La physique n'était pas finie, mais la crise de ses principes était la promesse de formidables révolutions (relativiste, quantique, statistique).

Pour Edouard Brézin, membre de l'Académie des sciences, [44] : les technologies les plus innovantes du XX^{ème} siècle sont issues de progrès a priori conceptuels comme la mécanique quantique (lasers semi conducteurs...), la relativité (GPS), ou la structure en double hélice de la molécule d'ADN. Rien ne permet de penser qu'il n'en sera pas ainsi au XXI^{ème} siècle.

« *Quand on aura répondu aux questions qui se posent on aura ouvert le monde plutôt que de le fermer vers une fin de la science : concept absurde, de gens qui n'ont pas compris le monde dans lequel nous sommes* ».

Aujourd'hui, comme il y a cent ans, la science est loin d'être arrivée à une fin. Les découvertes ont permis de répondre à certaines questions, mais en ont engendré de nouvelles, plus précises et plus complexes encore. Et, comme il y a un siècle, ces grands mystères actuels constituent le moteur de la recherche scientifique : loin de décourager les chercheurs, ils leur donnent une motivation et une direction pour avancer. C'est à cette frontière entre le savoir et l'ignorance que se joue le progrès scientifique.

« *Sans une conscience profonde de notre ignorance, il ne peut y avoir de réelle avancée en science* », James Clerk Maxwell, (l'un des plus grands physiciens du XIX^{ème} siècle).

VII Découvertes majeures expérimentales ou fondamentales

Ne nous trompons pas en oubliant ce que nous apprennent l'histoire des sciences et l'épistémologie.

Des révolutions de la pensée humaine qui impactent durablement la structuration de la connaissance sont rares, il n'y en a pas une par siècle et donc en effet dans les derniers 50 ans, il n'y a pas eu un analogue au changement de paradigme de Newton, ou d'Einstein. Mais si l'on peut jalonner ces révolutions de quelques noms célèbres, il y a toujours eu auparavant des travaux et des résultats théoriques fondamentaux ainsi que des expériences décisives qui ont permis ces révolutions. Par exemple les théories de la relativité d'Einstein sont certes géniales, mais on ne peut pas oublier qu'elles s'appuient sur un socle de travaux fondamentaux signés Michelson, Poincaré, Lorentz, Mach, Minkovsky, Riemann. Ce sont les travaux fondamentaux dans les sciences dures qui permettent la maturation de ces révolutions.

Nous défendons l'idée que nous sommes dans une période de maturation et qu'il y a bien des découvertes fondamentales, mais que bien entendu il est difficile de les inscrire dans le schéma précis qui conduira à la prochaine conception géniale du Monde. Le recul est insuffisant, et il est plus facile d'écrire l'histoire d'une révolution après, qu'avant.

Les ondes gravitationnelles ne sont pas vraiment une surprise car Einstein les avait entrevues comme conséquences possibles de ses équations, mais à ces équations extrêmement riches on peut faire dire beaucoup de choses (cf les modèles de cosmologie) sans qu'il y ait obligatoirement une réalité physique à la conclusion (on parle alors d'artefact mathématique). Une mise à l'épreuve était donc indispensable, et ce d'autant plus qu'il y a derrière des enjeux fondamentaux.

Un signe encourageant a été obtenu en 1993. L'émission périodique très régulière d'un pulsar binaire en rotation autour d'une étoile à neutrons avait été étudiée sur une longue période et avait mis en évidence une décroissance régulière de la période de rotation. Cette décroissance correspond à une perte d'énergie radiative. Son calcul et la comparaison avec le résultat que donnerait l'équation d'Einstein dans l'hypothèse d'un processus avec onde gravitationnelle donne un accord excellent, récompensé par un prix Nobel pour ses auteurs. Il s'agit d'une preuve indirecte, et jusque fin 2015 la seule.

La détection directe, incontestable est faite par deux interféromètres de type Michelson.

Les ondes gravitationnelles n'ont en effet pas grand chose à voir avec les ondes électromagnétiques. Les premières correspondent à un rayonnement quadrupolaire, une polarisation linéaire double et une symétrie tensorielle ; les secondes à un rayonnement dipolaire, une polarisation linéaire simple et une symétrie vectorielle. Une question fondamentale se pose alors en relation avec la différence de symétrie : à l'onde électromagnétique est associée la particule photon (spin 1). A l'onde gravitationnelle est-il associé la particule graviton (spin 2) ? Des théories de gravité quantique le prévoient. Il n'y a probablement pas de questions plus fondamentales aujourd'hui que celles qui posent la question du rapprochement des deux théories majeures que sont la physique relativiste et la physique quantique. Mais en outre, autre aspect fondamental, elles ouvrent la possibilité de les utiliser pour observer l'univers entre le Big Bang et le mur des 380000 ans qu'aucun rayonnement électromagnétique ne peut franchir.

C'est un peu la même histoire qu'avec les mirages gravitationnels envisageables dans les équations d'Einstein, soupçonnés dans les années 70, observés dans les années 80, confirmés de façon spectaculaire par le télescope spatial Hubble (qui ne sert pas qu'à faire de jolis photos très coûteuses) dans les années 90. La déviation de la lumière par la gravitation conduit à des phénomènes bien connus en optique classique, qui permettent de parler d'un **effet de lentille gravitationnelle**. Aujourd'hui ces lentilles sont en train de devenir un outil puissant pour l'étude de l'Univers qui se trouve derrière. Les données accumulées ainsi sur la répartition des masses dans l'Univers, permettent d'envisager à court terme d'en calculer la courbure avec une précision inégalée. La connaissance de cette courbure est fondamentale pour faire les choix parmi les modèles cosmologiques en compétition.

Une autre découverte majeure récente dont l'enjeu est fondamental : **l'oscillation des neutrinos**.

Dans les réactions nucléaires (par exemple au sein des étoiles) des neutrinos accompagnent les électrons. Ces particules sont très difficiles à détecter car de charge nulle et de masse nulle. Lorsque des détecteurs ont pu être construits, les astrophysiciens ont tenté de mesurer le flux de neutrinos issus du soleil. Pendant plus de 20 ans, malgré l'augmentation des performances des détecteurs, seulement le tiers des particules attendues étaient enregistrées, sans que l'on puisse incriminer une insuffisance dans la connaissance des réactions nucléaires au sein du soleil. On a alors parlé de «l'énigme des neutrinos solaires». Quelques années auparavant, un théoricien avait démontré que pour des raisons de symétrie, rien ne s'opposait à ce qu'il y ait trois types de neutrinos : l'un associé à l'électron, l'autre associé au tau, et enfin le dernier au muon, trois particules légères (leptons). A partir de 1998 un phénomène d'oscillation entre les trois types de neutrinos est observé puis confirmé plusieurs fois de manière indépendante. Cela signifie qu'un neutrino électronique qui se déplace dans l'espace va changer de type. Les détecteurs de neutrinos solaires ne recherchaient que les neutrinos de type électronique et donc n'enregistraient qu'un tiers du flux émis par le soleil. L'énigme des neutrinos solaires était résolue. Mais au delà de ce résultat très important, les théoriciens sont maintenant confrontés à deux questions fondamentales : une particule qui change d'état a nécessairement une masse. Donc le neutrino a une masse très faible mais non nulle. En cosmologie, cette composante de la masse de l'Univers ne peut pas être négligée, car le neutrino est la particule la plus abondante (néanmoins cette masse totale resterait trop faible pour être la solution unique à l'anomalie gravitationnelle observée).

En Physique des Particules, l'existence d'une masse pour le neutrino n'est pas prévue par le Modèle Standard. C'est probablement le premier exemple de physique au delà du MS tellement recherché par les physiciens du domaine.

Ces résultats sur l'oscillation des neutrinos ont été récompensés par les prix Nobel 2002 et 2015.

En 1979, Yakov Zel'dovich fait la prévision théorique d'un effet Compton inverse entre photons et électrons énergétiques d'un plasma chaud. Les collisions avec les électrons énergétiques du plasma chaud doivent porter les photons à des énergies plus élevées, donc appauvrir en photons de basses énergies le spectre du rayonnement des photons incident, et au contraire enrichir celui-ci de photons de plus hautes énergies. On devrait donc observer un décalage de la courbe du spectre du corps noir vers les hautes fréquences.

En 1983, cette prévision est confirmée lors d'observations radioastronomiques du plasma contenu dans des amas de galaxies. On parle de **l'effet Sunyaev-Zel'dovich** ou effet SD. L'effet est utilisé pour étudier la distorsion du spectre du rayonnement diffus cosmologique lors de la traversée du plasma chaud contenu dans des objets astronomiques (voir §IV.2.7). Cet effet devient progressivement une nouvelle sonde pour la cosmologie, avec de beaux succès comme la découverte de nouveaux amas confirmée ensuite par les observations en rayonnement X, ou encore comme méthode indépendante pour repérer et mesurer des défauts de masse visible (exploitation des données du satellite Planck depuis 2011).

La découverte du boson de Higgs est une découverte majeure en ce sens qu'elle valide un édifice théorique considérable permettant de comprendre et de prévoir le comportement des particules. Mais le Nobel 2013 récompense aussi l'audace qui est derrière la conception du mécanisme qui a permis de prévoir cette particule.

C'est aussi ce mécanisme qui permet de progresser dans la compréhension de la supraconductivité (théorie BCS nobélisée en 1972). C'est aussi ce mécanisme qui peut être utilisé pour expliquer une brisure de symétrie conduisant au changement de phase moteur de l'inflation cosmique.

Et nous pouvons rappeler bien d'autres exemples de découvertes majeures expérimentales ou théoriques :

Le prix Nobel 1970 a été attribué à Louis Néel «pour ses travaux fondamentaux et ses découvertes sur l'**antiferromagnétisme et le ferrimagnétisme**, qui ont conduit à des applications importantes en physique du solide».

La théorie unifiée des interactions faible et électromagnétique entre particules élémentaires, avec prédiction du courant neutre, observé ensuite.

La théorie des phénomènes critiques en liaison avec les transitions de phase, par utilisation du groupe de renormalisation. Cette méthode mathématique est largement utilisée dans de nombreux domaines de la physique pour faire disparaître des grandeurs infinies qui pourraient apparaître dans des calculs. L'infini est la hantise du physicien.

La découverte du fond cosmologique de rayonnement micro-ondes a été suivie de deux autres découvertes majeures grâce au satellite COBE :

La découverte en 1965 par Penzias et Wilson (Nobel 1978) d'un rayonnement micro-ondes isotrope, pour majeure qu'elle soit, était insuffisante pour conclure qu'il s'agissait du reste, refroidi à 3 K, du rayonnement primitif. Pour arriver à cette conclusion il faut en effet démontrer que la distribution en longueur d'onde de l'énergie rayonnée est décrite par la loi de Planck (dite du corps noir). Une seule longueur d'onde avait été utilisée (73,5 cm) par les découvreurs du rayonnement isotrope. Ensuite, de nombreuses contributions, à des longueurs d'onde plus faibles (jusqu'à 1 mm), sont venues renforcer l'idée que le rayonnement observé était bien celui d'un corps noir, mais il manquait toutes les données relatives aux courtes longueurs d'onde, c'est-à-dire au domaine de l'astronomie infrarouge dont l'accès est impossible depuis le sol à cause de l'atmosphère. C'est ce qui a justifié le financement, certes coûteux, de missions astronomiques spatiales, avec pour premier résultat en 1992, que la distribution en longueur d'onde de l'énergie rayonnée est parfaitement décrite par la courbe spectrale du corps noir (voir fig 7).

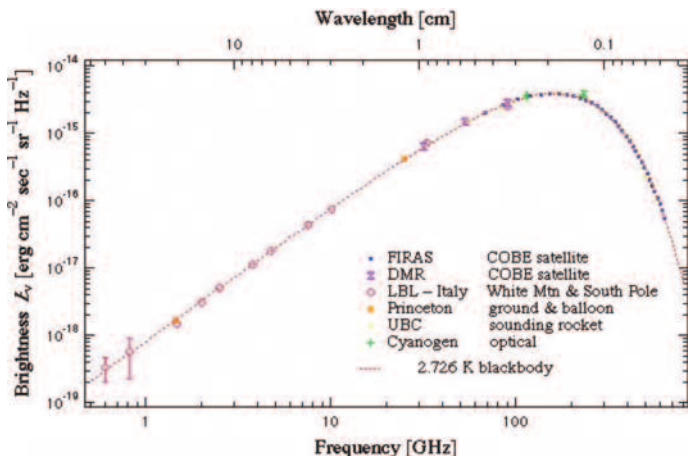


Figure 7 Points expérimentaux issus de différentes observations du rayonnement diffus. Le point historique de Penzias et Wilson n'est pas porté sur cet ensemble de données. Il serait à la longueur d'onde 73,5 cm. Coordonnées en échelles logarithmiques pour intégrer la vaste gamme de mesures. L'accord entre les points expérimentaux et la courbe en pointillés qui correspond à la courbe de Planck pour le rayonnement d'un corps noir à 2,726 K est remarquable. C'est cet accord qui, en 1992, apporte la preuve de l'existence du Big Bang.

Le fond isotrope, à 2,7 K, correspond donc rigoureusement à la relique d'un corps très chaud en équilibre thermique, c'est enfin **la preuve de l'existence du Big Bang**. En outre, COBE montre que, à petite échelle (0,001 %), ce fond n'est pas rigoureusement isotrope ; les anisotropies deviennent un sujet d'étude pour la mise en place des structures de l'univers. La richesse de l'apport des fluctuations du fond cosmologique a justifié l'attribution du Nobel 2006 et le lancement d'autres missions spatiales afin de compléter l'étude de ces anisotropies : WMAP, puis, PLANCK. Ce dernier satellite livre des résultats impressionnants avec une cartographie à haute résolution du fond diffus micro onde et du fond diffus infrarouge et une confirmation des valeurs des paramètres du modèle cosmologique standard. L'Univers primordial est plat et présente un défaut de masse visible qui est du même ordre de grandeur que celui déterminé à partir des anomalies de gravitation de l'Univers actuel.

La théorie élucidant **le mécanisme de brisure spontanée de symétrie** conduit à comprendre les origines de la brisure de symétrie qui prédit l'existence d'au moins trois familles de quarks dans la nature. Le caractère fondamental de cette découverte sera récompensé par le prix Nobel 2008.

La compréhension des phénomènes irréversibles a connu une évolution déterminante. La thermodynamique des processus hors équilibre, applicable à de nombreux domaines de la physique (astrophysique en particulier), a été formalisée dans le cadre de la théorie des structures dissipatives. Cette avancée fondamentale a été jalonnée par deux prix Nobel : Onsager (1968) et Ilya Prigogine (1977).

La résolution et la conclusion du paradoxe EPR (pour Einstein, Podolsky et Rosen) est l'une des plus grandes avancées fondamentales. Einstein, opposé à certains développements de la mécanique quantique, avait imaginé une expérience de pensée sensée confondre l'indéterminisme par la mise en évidence de contradictions supposées (voir § I.4). La qualité, le niveau et la passion des échanges entre les grands physiciens de la fin des années trente a conduit en 1964, le mathématicien physicien Bell à transformer l'expérience de pensée en un développement mathématique conduisant au théorème de Bell et aux inégalités de Bell. Ces inégalités offrent un cadre théorique pour tester expérimentalement les trois hypothèses du théorème :

1/ les particules sont indépendantes et véhiculent leurs propriétés propres

2/ deux objets distants ne peuvent avoir une influence instantanée l'un sur l'autre. C'est le fameux principe de localité

3/ seuls l'état initial et les interactions passées subies par une particule, en déterminent l'état présent. C'est le principe de causalité.

Grâce à ces travaux théoriques des expériences ont été conçues ; c'est celle d'Alain Aspect de l'université d'Orsay qui a été décisive en 1982. Le retentissement a été mondial. La violation massive des inégalités de Bell démontre que le principe de localité doit être abandonné. C'est choquant pour le sens commun, **le monde quantique est non local**, mais les fondements de la physique quantique en sortent renforcés. Einstein avait tort. En 1990 Bell était nommé pour le prix Nobel, mais il est mort juste avant l'attribution.

Ces travaux ont ouvert une nouvelle discipline : l'information quantique, et l'on trouve ainsi de plus en plus de

publications traitant de cryptographie quantique, de téléportation quantique, d'ordinateur quantique et d'intrication quantique. Mais il aura fallu plus de 50 ans entre l'expérience de pensée et l'expérience réelle.

La querelle Einstein Bohr de 1927 vient d'être expérimentalement arbitrée [1] (voir § I.3).

L'équivalent des deux fentes de l'expérience d'Einstein-Bohr est constitué des atomes d'une molécule de dioxygène. Cette molécule est excitée par des photons de rayons X. Parmi les processus de désexcitation, celui qui conduit à la dissociation de la molécule en deux atomes avec émission d'un électron rapide qui transfère une quantité de mouvement à son atome émetteur (*c'est l'effet Auger*), représente l'expérience d'Einstein-Bohr. A partir d'une population de molécules de dioxygène, on a ainsi la possibilité d'identifier l'atome d'oxygène émetteur et d'étudier la formation (ou non) des franges d'interférence des électrons Auger produits.

Le résultat est que chaque fois que les trajectoires de ces électrons Auger ont été repérées, les franges ont disparu. Bohr et Heisenberg avaient raison, **le monde quantique est indéterministe**.

«*L'infiniment grand et l'infiniment petit se rejoignent dans la description de l'univers global. C'est une des avancées majeures de la physique des cinquante dernières années. Il existe ainsi un dialogue permanent entre physique de l'infiniment petit et cosmologie*». Philippe Brax astrophysicien CEA.

Ces derniers exemples montrent bien qu'il ne faut pas condamner la pensée spéculative, comme le disait Karl Popper. Si la supersymétrie n'a pas encore été observée, souvenons nous que le neutrino a été théorisé trente ans avant sa découverte. Entre la théorie de l'émission stimulée et le laser, il s'est écoulé 50 ans

VIII Les défis.

Devant de tels résultats se pose évidemment la question de la cohérence de la description du Monde. Le physicien ne peut rester inactif devant une théorie, la relativité qui est fondamentalement locale, alors qu'une autre, tout aussi validée, indique que le Monde est indéterministe et non local. En outre ces deux théories majeures établissent des faits expérimentalement vérifiés qui sont choquants pour le sens commun qui s'appuie évidemment sur la physique classique. La question des ponts entre les domaines classique - relativiste - quantique est donc posée et fait l'objet de recherches actuelles.

Par exemple le pont classique - quantique est étudié par la théorie de la décohérence quantique. Elle apporte une réponse au paradoxe du chat de Schrödinger (qui peut être à la fois mort et vivant). Sur le plan pratique, elle est un cadre pour la conception d'expériences conduisant à l'élaboration de systèmes quantiques de taille macroscopique. Sur ces sujets le français Serge Haroche a reçu la médaille d'or du CNRS (2009) et le prix Nobel (2012).

Il y a un siècle, le physicien Victor Hess découvrait les rayons cosmiques, particules à haute énergie bombardant constamment la Terre. Une science nouvelle en est née : la physique des particules. Avant la construction des grands accélérateurs, elle a permis en 1932 la découverte du positron (particule d'antimatière prévue par Paul Dirac), du muon (un électron 200 fois plus lourd), des pions et les particules étranges (durée de vie anormalement longue compte tenu de leur masse). En 1938, Pierre Auger met en évidence

l'existence des gerbes atmosphériques, véritables pluies de particules induites par l'arrivée dans l'atmosphère d'un rayon cosmique unique, particulièrement énergétique. D'après ses estimations, les particules les plus énergétiques auraient des énergies supérieures à plus de mille fois ce que le LHC du CERN peut produire aujourd'hui [45].

Avec la mise en service des grands accélérateurs, les physiciens des particules se sont éloignés des rayons cosmiques, mais ceux-ci sont devenus des objets d'étude pour eux mêmes. Des détecteurs sophistiqués détectent maintenant des protons relativistes porteurs d'une énergie de 10 millions de TeV (pour 13 TeV pour le LHC du CERN).

Ces particules fascinent les astrophysiciens. Comment et où ont-elles acquis une énergie aussi invraisemblable ? Des progrès considérables dans la science des rayons cosmiques ont été enregistrés au cours des dernières décennies. Un mécanisme des plus efficaces est envisagé avec l'accélération par les ondes de choc produites lors des explosions de supernovae. Mais par ailleurs, les désintégrations de ces particules produisent plus de muons que ce que prédisent les modèles théoriques utilisés au LHC. Cette anomalie pourrait être une manifestation d'une physique des interactions fortes différente aux énergies très supérieures à celles testées au LHC [46].

Il reste beaucoup de travail pour identifier les sources des rayons cosmiques hautement énergétiques, leur mode de production, d'accélération et d'amplification. Plus notre connaissance des rayons cosmiques progresse, plus notre compréhension des phénomènes associés est défiée.

La gravitation est mal comprise. L'égalité entre masse inerte et masse grave remarquablement bien vérifiée par l'expérience, ne repose néanmoins sur aucune justification théorique et est posée de ce fait en tant que principe (c'est le Principe d'Equivalence). Pourtant il y a une différence de nature entre force d'inertie et force gravitationnelle ; un changement de repère opportun permet de faire disparaître l'une mais pas l'autre. A très grande distance d'une masse, le champ gravitationnel devient nul et la force gravitationnelle aussi, alors que la force d'inertie ne s'annule pas. La relativité générale, malgré ses succès n'est qu'une théorie locale. Elle souligne déjà le caractère très particulier de la gravitation par rapport aux autres interactions en établissant qu'elle est en fait une propriété de la géométrie de l'espace-temps. Est-elle une propriété émergente qui découle de l'entropie de l'Univers et pas une interaction fondamentale ? Si l'on considère l'Univers comme un système isolé, son entropie ne peut que croître. Le second principe de la thermodynamique semble alors contredit par les observations cosmologiques.

Certains physiciens, avec le prix Nobel Hannes Alfvén, pensent que la gravité des phénomènes liés aux plasmas sont la clé de la compréhension de la structure et de l'évolution de l'Univers, sans besoin de masse noire ni d'énergie sombre.

Quant à la future grande révolution conceptuelle sur notre univers, peut-être viendra-t-elle des développements prometteurs de la géométrie non commutative d'Alain Connes qui a obtenu toutes les grandes distinctions dont la médaille Field en 1982.

Son modèle d'espace intègre à la fois la physique relativiste et la physique quantique à un niveau de précision suffisant pour être capable de prévoir l'existence et la masse du boson de Higgs avant sa découverte, et avec moins de paramètres ajustables que dans le Modèle Standard !

En tout état de cause, toute future théorie «géniale» devra avoir un fort pouvoir intégrateur :

Comme la théorie des interactions fondamentales qui explique l'électricité, magnétisme, optique, interactions faible et forte.

Comme la relativité, qui intègre la mécanique classique et qui permet de retrouver les équations classiques quand la vitesse v est très faible devant la vitesse de la lumière c et que donc le rapport v^2/c^2 tend vers 0.

Comme dans la physique quantique où la constante de Planck est si faible qu'elle peut être oubliée dans des systèmes de taille très supérieure à celle des atomes et conduire à des équations classiques.

Notre niveau d'ignorance, l'intense activité de recherche et les vifs débats entre chercheurs sont les éléments des défis et peut être l'annonce d'une nouvelle révolution, aussi spectaculaire que celle de la physique quantique et relativiste d'il y a cent ans.

Conclusion

La science n'est pas en panne, elle progresse à la fois sur le plan théorique et expérimental, elle ouvre de nouveaux champs et perspectives. Elle est bien évidemment aidée en cela par les progrès de la technologie, mais inversement elle est le moteur de ce progrès. Comme toute activité humaine elle n'est pas parfaite et mérite d'être critiquée (honnêtement). L'éthique en biologie, la répartition des moyens entre grands instruments et projets modestes, la qualité de l'information grand public fuyant des labos, le rapport qualité/quantité de publications, l'organisation de la diffusion (revues à comité de lecture, ArXiv...), les abus de la simulation numérique dans des conditions mal maîtrisées etc... Chacun de ces sujets mériterait un développement, mais ce n'était pas l'objet de cet article.

La connaissance scientifique, particulièrement en cosmologie, est le résultat d'un consensus fragile, remis en cause de façon permanente au sein d'une communauté, fruit du savant équilibre entre observations et opinions des théoriciens.

Nous avons montré comment l'accumulation de faits expérimentaux avait établi l'évidence d'une grave anomalie de la gravitation et comment les astrophysiciens fidèles à une démarche à la fois scientifique et historique, ont été conduits à émettre l'hypothèse de la présence d'une masse cachée souvent appelée matière noire. Mais bien loin du fantasme d'une science officielle imposant ce concept en bloquant les débats, le foisonnement d'idées et la compétition entre théories alternatives ambitionnant d'expliquer ce qui est un fait expérimental a été illustré. C'est ainsi que des remises en cause profondes de la gravitation voient le jour et animent les échanges dans la communauté.

Si à toute époque (particulièrement fin dix neuvième siècle) des voix ont pu annoncer la fin de la Science, les cinquante dernières années se sont révélées particulièrement fertiles en théories, découvertes et réalisations allant même jusqu'à modifier le fonctionnement de nos sociétés et l'interroger sur sa morale et son devenir. Comme dans toute l'histoire du développement scientifique, la résolution de problèmes a généré d'autres questions qui sont autant de défis pour les chercheurs et les moteurs des futures découvertes. Ces défis sont les aiguillons de la pensée mais aussi la source d'immenses satisfactions intellectuelles qui soulignent que la Science est belle, qu'elle reste jeune malgré ses trois siècles... et bien loin d'être morte.

Bibliographie

- [1] Einstein-Bohr recoiling double-slit gedanken experiment performed at the molecular level Nature Photonics 9, (2015)
- [2] Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen - Phys. Rev. 47, May 1935
- [3] d'après article de James Lequeux Encyclopaedia Universalis.
- [4] Les trois étapes de la cosmologie. J. Merleau-Ponty et B. Morando. Sciences Nouvelles
- [F] cosmologie inflationnaire de Penrose
- [5] Gravitation classique. Problème à N corps, de 2 à l'infini. Jérôme Perez Les presses de ENSTA.
- [6] Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions. Vera Rubin and W. Ford Jr. The Astrophysical Journal, 159 (1970)
- [7] The rotation of the Andromeda Nebula H.W. Babcock Lick Observatory bulletin ; 1939
- [8] Neutral hydrogen in M 33 and M 101. Louise Volders. Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands 14 (1959).
- [9] Intergalactic Matter and the Galaxy. F. Kahn & L. Woltjer. The Astrophysical Journal, (1959)
- [10] The rotation curve and geometry of M 31 at large galactocentric distances M.S. Roberts & R.N. Whitehurst. The Astrophysical Journal, (1975)
- [11] On the validity of Newton's law at a long distance. A. Finzi. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, (1963)
- [12] A Numerical Study of the Stability of Flattened Galaxies: or, can Cold Galaxies Survive? Ostriker & Peebles. The Astrophysical Journal, (1973).
- [13]. Some Problems Concerning the Structure and Dynamics of the Galactic System and the Elliptical Nebulae NGC 3115 and 4494. J.H. Oort. The Astrophysical Journal, (1940).
- [14] On the Masses of Nebulae and of Clusters of Nebulae. F. Zwicky. The Astrophysical Journal, (1937)
- [15] The Mass of the Virgo Cluster. S. Sinclair Astrophysical Journal. Vol. 83.
- [16] Detection of systematic gravitational lens galaxy image alignments - Mapping dark matter in galaxy clusters. J. A. Tyson ; R. A. Wenk ; F. Valdes Astrophysical Journal Letters, (1990).
- [17] Zel'dovich, Ya. B. & Sunyaev, R. A. Astrophysics and Space Science, 1969
- [18] Les trois premières minutes de l'Univers Steven Weinberg. Point Sciences
- [19] Logique de la découverte scientifique. Karl Popper 1973 traduit chez Payot.
- [20] D'après article de Françoise ARMENGAUD. Encyclopaedia Universalis.
- [21] «La Masse cachée dans l'Univers». Marc Lachieze-Rey , in J. Audouze, P. Musset, M. Paty dir., Les Particules et l'Univers. Nouvelle Encyclopédie Diderot. P.U.F. Paris 1990.
- [22] The Evolution of Galaxies and Stellar Populations. Rees. ed. B. M. Tinsley & R. B. Larson (New Haven: Yale Univ. Obs.). 1977.
- [23] Hot Dark Matter in Cosmology. J. Primack, M. Gross. Astro-ph/0007165. 2000.
- [24] Une belle histoire de la symétrie. B. Rakinski Auvergne Sciences 84. 2014
- [25] Softly broken supersymmetry and SU(5). Howard Georgi, Savas Dimopoulos. Nuclear Physics (1981)
- [26] Supersymmetry, Cosmology, and New Physics at Teraelectronvolt Energies. Heinz Pagels, Joel R. Primack. Physical Review Letters. (1982)
- [27] Supersymmetric relics from the Big Bang. John Ellis et al. Nuclear Physics (1984).
- [28] Detectability of certain dark-matter candidates. Mark W. Goodman ; Edward Witten. Physical Review 1985.
- [29] Bright Galaxies Dark Matters. V. C. Rubin. Springer Verlag. New York, 1999
- [30] Empirical Tests of MOND in Galaxies. Stacy McGaugh. University of Maryland 2010
- [31] First test of Verlinde's theory of Emergent Gravity using Weak Gravitational Lensing measurements. Margot Brouwer et al. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (2016).
- [32] Courbure spatiale, platitude, âge et horizon. Cours de cosmologie. Edward Wright 2009
- [33] Enfance de l'Univers : de la physique des particules à la cosmologie. L. Avan. Auvergne Sciences 83. 2014
- [34]. The Inflationary Universe : A Possible Solution to the Horizon and Flatness Problems .A. Guth. Phys. Rev. 1981.
- [35] A New Inflationary Universe Scenario : A Possible Solution of the Horizon, Flatness, Homogeneity, Isotropy and Primordial Monopole Problems. A. Linde. Phys. Lett. 1982
- [36] Dynamics of Phase Transition in the New Inflationary Universe Scenario and Generation of Perturbations. A Starobinsky. Phys. Lett. 1982
- [37] Particle Physics and Inflationary Cosmology. Andrei Linde. Physics Today. 1987
- [38] Baryon acoustic oscillations in the Lyman α forest of BOSS DR11 quasars - BOSS Collaboration (Delubac, Timothée et al.) Astron. Astrophys. 2015.
- [39] Evidence for the accelerated expansion of the Universe from weak lensing tomography with COSMOS. Tim Schrabback et al. Astronomy & Astrophysics avril 2010.
- [40] Cours en ligne de Françoise Combes professeur au Collège de France.
- [41] La force qui vient du vide. Astrid Lambrecht. La Recherche juin 2004.
- [42] d'après Alexis Bienvenu. Encyclopaedia Universalis.
- [43] La Science et l'Hypothèse (1902) et La Valeur de la Science (1905) Henri Poincaré.
- [44] Cours en ligne de Edouard Brézin Laboratoire de physique théorique de l'Ecole normale supérieure de Paris.
- [45] Rayons cosmiques et rayonnement du cosmos. Etienne Parizot, Institut de physique nucléaire, CNRS, Orsay. 2005
- [46] Testing hadronic interactions at ultrahigh energies with air showers measured by the Pierre Auger Observatory. A. Aab et al. (Pierre Auger Collaboration). Phys. Rev. Lett. 2016.



LES MICRO-ORGANISMES DANS LE DÉVELOPPEMENT DES BIOTECHNOLOGIES. LA PÉNICILLINE EN RÉFÉRENCE.

Georges JEMINET

Directeur de recherche CNRS honoraire, Université de Clermont Auvergne
Membre de l'ADASTA

Le monde des micro-organismes

Les micro-organismes (ou microbes) sont des organismes vivants souvent invisibles à l'oeil nu (0,01- 10 microns). Certains peuvent être cultivés, selon les techniques de la microbiologie, du tube à essai au fermenteur, en passant par la boîte de Pétri bien connue ; mais une forte majorité n'est pas cultivable. Ils se recrutent dans les trois domaines du vivant : les bactéries, les archées et les eucaryotes (Fig.1) (Fig.2), on pense qu'ils dérivent d'un ancêtre commun non encore isolé. Les virus nécessitant pour se répliquer un hôte, souvent une cellule, sont classés comme des acaryotes.

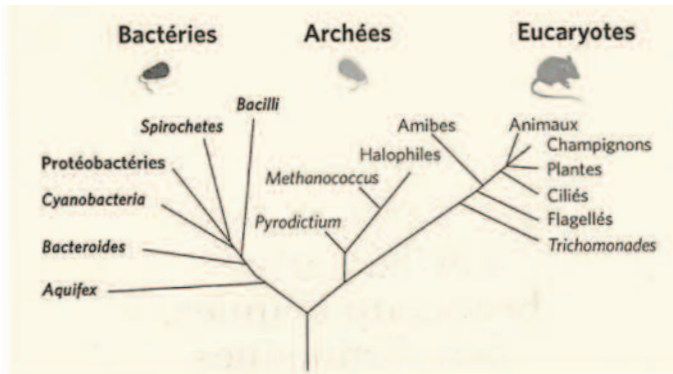
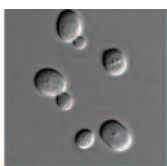


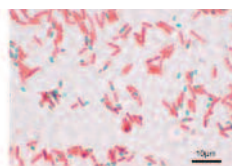
Fig 1. Les trois grands domaines du vivant (d'après ref.1a).

Les bactéries et les archées avec une cellule unique sans noyau différencié, un seul chromosome, ADN pur, une même apparence, sont rassemblés sous le type cellulaire des procaryotes. Les eucaryotes présentent un noyau différencié avec chromosomes et ADN, ils sont uni- ou pluricellulaires et incluent notamment les animaux et l'homme. Enfin, le terme acaryotes désigne les organismes dépourvus de noyaux, d'organites et de métabolisme. Ils possèdent cependant une information génétique, sous forme d'ADN ou ARN et des transcriptases inverses permettant d'être exploitées par une cellule, dans le cas des virus.

La microbiologie qui se consacre à l'identification et à la caractérisation des micro-organismes est un vaste domaine scientifique qui s'est enrichi à la fin du XIX^{ème} siècle grâce aux travaux de Louis Pasteur, Robert Koch et de nombreux autres chercheurs. Son développement est lié notamment à l'étude des maladies induites sur les humains, les animaux et les plantes par certains virus, bactéries, protozoaires ou champignons pathogènes. Mais au-delà, certains de ces systèmes vivants sont utilisés depuis longtemps dans les secteurs du vin, de la bière, des fromages ..., puis plus récemment des vaccins, des antibiotiques qui constituent les fondements des biotechnologies.



Saccharomyces cerevisiae
Champignon



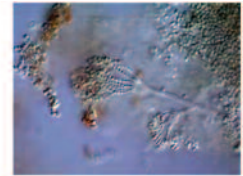
Bacillus subtilis
Bactérie G+



Halobium salinarum
Archée



Escherichia coli
Bactérie G-



Penicillium chrysogenum
Champignon

Fig.2 Exemples de micro-organismes très étudiés et utilisés (microscopie)

Dans les connaissances qui se sont accumulées au fil du temps concernant la science des micro-organismes : biotopes, croissance, métabolisme ... on peut noter la mise en évidence d'un métabolisme dit secondaire (Fig.3) qui ne participe pas directement à la croissance cellulaire. Différentes étapes biosynthétiques dérivées mènent à la production de molécules aux structures souvent complexes, dont certaines trouvent des applications importantes en thérapie humaine. Il est admis que ce métabolisme secondaire retrouvé également chez les végétaux a une fonction écologique pour l'organisme concerné.

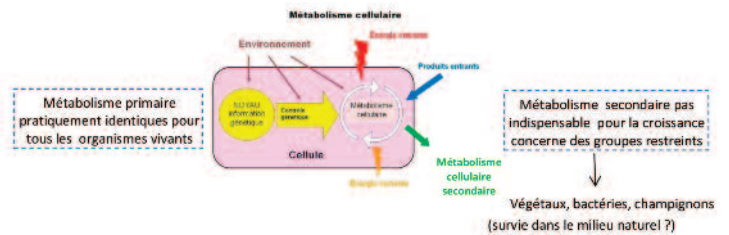


Fig. 3

Dans ce début du XXI^{ème} siècle, on considère que les micro-organismes jouent un rôle central dans tous les écosystèmes et dans l'histoire et l'évolution du vivant^{1,2}. Les techniques de séquençage de l'ADN à haut débit, liées à l'apport de la bio-informatique permettent maintenant d'analyser le génome d'une souche isolée et purifiée, mais également de mélanges de souches issues d'environnements complexes grâce à la métagénomique^{1,3a}. L'exemple le plus fréquemment cité est celui du microbiote de l'intestin qui est devenu un sujet mondial d'investigations^{1b}.

Les biotechnologies

Il est difficile de définir d'une manière simple les biotechnologies, elles résultent d'un mariage entre les disciplines incluses dans la science des êtres vivants : la biologie, et un ensemble d'autres disciplines telles que : la chimie, les ingénieries et l'informatique (Fig.4).

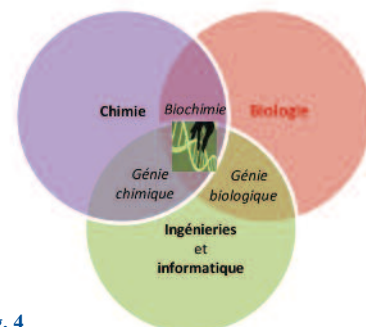


Fig. 4

Cette partie de la science comporte l'étude et l'utilisation des techniques du vivant dans un but déterminé qui va de l'obtention de molécules plus ou moins complexes à intérêt thérapeutique jusqu'au traitement et l'élimination de pollutions en passant par des productions industrielles liées notamment à la chimie de synthèse, l'agro-alimentaire, l'utilisation de la biodiversité marine ...

Nous avons choisi d'approfondir un exemple qui peut être considéré comme le point de départ des biotechnologies industrielles modernes, il s'agit de l'isolement et de la production de la pénicilline*. A lui seul cet événement emblématique permet de comprendre l'importance que peut prendre un procédé biotechnologique mené à grande échelle, ce cas historique ne semble pourtant connu que d'une manière incomplète. Pour des raisons circonstancielles liées à la période de guerre^{4, 5}, seule la découverte de cet antibiotique par Alexander Fleming a été retenue comme une étape marquante dans l'histoire de l'humanité. Mais comment est-on arrivé à produire cette molécule à l'état pur et en quantité proche de la tonne pour le D-Day (6 juin 1944) ?

I - Les grandes étapes de l'avènement de la pénicilline :

Parmi les articles traitant de l'histoire scientifique de ce métabolite secondaire issu d'un *Penicillium*, il existe un document de base rédigé en commun par la Société Américaine de Chimie (ACS) et la Société Royale de Chimie (RSC) (Fig.5a) qui scelle la réunion des deux pays pour l'accomplissement de cette œuvre⁶. Sa présentation date du 19 novembre 1999 simultanément à l'inauguration d'une plaque au St-Mary's Hospital à Londres, par Norman Heatley encore vivant (Fig.5b).

Dans un livre plus récent très documenté⁵ Robert Bud, spécialiste de l'histoire de cet antibiotique, précise les étapes de sa découverte, sa production et son utilisation dans le contexte social et culturel de l'époque. Il mène une analyse sur l'organisation des laboratoires, la démarche des chercheurs, la participation parfois conflictuelle des décideurs scientifiques ou politiques en place dans cette période troublée...



a)



b)

Fig. 5

A partir de ces documents on peut distinguer quatre grandes étapes qui marquent l'avènement et la production de la pénicilline qualifiée dès la fin de la guerre de « wonder drug ».

Première étape : 28 septembre 1928, Alexander Fleming (1881-1955) (Fig. 6), docteur en médecine, chercheur en bactériologie au St-Mary's Hospital à Londres, rentre de vacances. Dans son laboratoire, une des boîtes de Pétri où il faisait pousser des staphylocoques, laissée ouverte, a été envahie par des colonies cotonneuses d'un blanc verdâtre. Elle a été contaminée par les souches d'un champignon microscopique, identifié ensuite comme du *Penicillium notatum*. Fleming y jette un coup d'œil (Fig.6) et s'aperçoit qu'autour des colonies, le staphylocoque ne pousse pas (Fig.7)⁷. Il émet alors l'hypothèse qu'une substance sécrétée par le champignon en est responsable. Il appelle le jus d'extraction «pénicilline»⁷. Après de nombreux tests bactériologiques Fleming publie sa découverte en 1928⁸.



Fig. 6

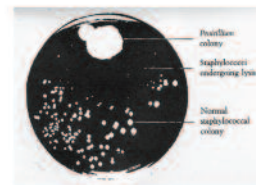


Fig. 7

Entre 1929 et 1932 il effectue des essais de filtrats sur des plaies ou par injection, note la grande instabilité chimique du jus conduisant à une inactivation. Fleming qui n'est pas chimiste n'arrive pas à extraire le substrat actif avec deux collaborateurs étudiants. Il range finalement ses flacons sur une étagère après une deuxième publication⁹. Cet épisode déterminant, très connu, se trouve résumé ici.

Deuxième étape : celle-ci se déroule à l'Université d'Oxford. On trouve près du jardin botanique de la ville, une stèle entourée de roses, inaugurée il y a plus d'un demi-siècle où figurent dix noms gravés avec la mention en anglais : «*Cette roseraie a été créée en l'honneur des chercheurs de cette Université qui ont découvert l'importance clinique de la pénicilline. Toute l'humanité leur est redevable pour avoir sauvé des vies, soulagé des souffrances et constitué une source d'inspiration pour la recherche*». Alexander Fleming n'y figure pas, ce qui ne manque pas d'intriguer un visiteur non averti.

En 1938, Howard Walter Florey (1898-1968) (Fig.8), médecin australien qui a fait des études à Oxford, nouveau professeur de pathologie, constitue une équipe accueillie dans le bâtiment Sir William Dunn School of Pathology (Fig.9). Il recrute des docteurs dont Ernst Boris Chain (1906-1968) (Fig.10) comme son assistant, c'est un biochimiste allemand d'une grande compétence qui a fui son pays et Norman George Heatley (1911-2004) (Fig. 11) sur contrat, jeune biochimiste formé à Oxford et Cambridge.



Fig. 8



Fig. 9



Fig. 10



Fig. 11

Ces trois chercheurs vont jouer un rôle important, mais Florey souhaite constituer une équipe pluridisciplinaire plus large impliquant des chimistes, des bactériologistes et des épidémiologistes. Ceci est très novateur à l'époque. La liste des dix noms évoqués ci-dessus comprend donc également : Edward Penley Abraham (1913-1999), Charles Montague Fletcher (1911-1995), Mary Ethel Florey (1900-1966), Arthur Duncan Gardner (1884-1977), Margaret Augusta Jennings (1904-1994), Jean Orr-Ewing (1897-1944) et Arthur Gordon Sanders (1908-1980).

Le domaine de recherche prédéfini est la lutte contre les infections. Une étude bibliographique approfondie de Chain le conduit finalement à proposer de reprendre les travaux inachevés de Fleming. Heatley va se concentrer sur la produc-

tion des cultures, Chain et Abraham l'extraction, la purification et la structure chimique, Sanders le système d'extraction en grande quantité, Florey et Jennings les tests sur animaux, Gardner et Orr-Ewing la bactériologie, enfin Mary Florey et Fletcher le traitement des patients au Radcliffe Infirmary.

Après un travail de laboratoire intense, au début de 1940 le groupe d'Oxford sépare une poudre biologiquement active par lyophilisation qui contient en fait environ 1% de pénicilline, l'aventure commence^{10,11}. Des essais sur souris infectées par des streptocoques montrent une grande activité antibactérienne de ce lyophilisat et une très faible toxicité. Le 12 février 1941 un policier, Albert Alexander (43 ans), atteint de septicémie (blessure à la face par un rosier) est traité, une amélioration impressionnante de son état est observé, mais le manque de pénicilline s'avère finalement dramatique, il décède.

La culture du *Penicillium notatum* se fait en surface non agitée, dans des centaines de curieux récipients stérilisables en porcelaine (Fig. 12) obtenus à bas prix et contenant 1 l de milieu. Les « demoiselles de la pénicilline » (Fig. 13) recrutées spécialement et chargées des nombreuses manipulations nécessaires participent historiquement à cette aventure.



Fig. 12



Fig. 13

Certains des malades traités se rétablissent et les nouveaux arrivants commencent à affluer de tout le pays. Il apparaît évident à Florey que la production va devenir dramatiquement insuffisante. En Angleterre toute l'industrie est mobilisée pour la guerre. Aucun brevet n'a été pris. Après des discussions difficiles avec Chain qui n'est pas d'accord, Florey et Heatley décident de se rendre aux Etats-Unis pour bénéficier de l'expérience en fermentation de certaines firmes du pays. Le 27 juin 1941, Florey et Heatley effectuent le périlleux voyage Londres - New-York en Dakota via l'Espagne, avec la précieuse moisissure.

Troisième étape : centre NRRL (Northern Regional Research Laboratory), Peoria, Illinois. Avec l'aide de ses relations universitaires Florey va parcourir le pays pour essayer de convaincre, notamment les industriels, de l'intérêt d'une production de l'antibiotique. Heatley est orienté vers un centre du département de l'agriculture (USDA) à Peoria spécialisé dans les fermentations en relation avec l'agriculture. Il y reste 7 mois et travaille sur le milieu de production avec Andrew J. Moyer pour essayer de produire le métabolite en quantités importantes. L'utilisation bénéfique de l'eau de lavage du maïs (corn steep liquor) dans le milieu, peu onéreuse, est une amélioration notoire. Puis il va passer 6 mois à Rah-

way dans le New-Jersey dans les laboratoires de la société Merck. Il rentre à Oxford en juillet 1942. L'attaque de Pearl Harbor le 7 décembre 1941 signe l'entrée en guerre des Etats-Unis et assez rapidement la pénicilline, d'abord sujet de recherche des laboratoires, va devenir une cause nationale.

Quatrième étape : la production en masse. Là encore, notre présentation ne rapporte que les très grandes lignes.

Il apparaît clairement que la production en surface peu efficace est à écarter, le défi considérable est alors : comment obtenir un produit purifié dans des « bioréacteurs » en culture submergée, à une échelle industrielle avec des rendements exploitables? La souche d'Oxford produit environ 2 mg/l, c'est réhhibitoire, un appel national est lancé pour trouver une moisissure de plus grand intérêt et c'est finalement une ménagère de Peoria, Mary Hunt, qui apporte un melon moisi porteur d'un *Penicillium chrysogenum* dont la production atteint 100 mg/l répertoriée sous le numéro historique NRRL-1951B 25. Mais ses « performances » sont insuffisantes. Un microbiologiste émigré allemand : Alexander Hollaender (1898-1986), spécialiste de la mutagenèse induite par les radiations sur les micro-organismes va créer à l'automne 1942 un consortium réunissant le centre NRRL de Peoria, les Universités du Minnesota et du Wisconsin et les laboratoires Eli Lilly qui vont effectuer un travail gigantesque de mutations aléatoires de la souche et tris sélectifs avec différents mutagènes : rayons X (1x), UV(3x), moutarde azotée (11x) et des mutations spontanées (6x), pour arriver à la souche E-15-1 produisant 7g/l¹².

Après des hésitations, les laboratoires Merck, Pfizer, Squib et Lederle commencent à envisager la production, mais voici l'avis d'un responsable de Pfizer formulé à l'époque : « la moisissure est capricieuse comme un chanteur d'opéra, les rendements sont faibles, l'isolement est difficile, l'extraction infernale, la purification conduit au désastre, et les essais peu satisfaisants »⁶. D'innombrables problèmes vont se poser pour une production en masse dans des fermenteurs (Fig. 14), concernant : la composition du milieu, la stérilisation à tous les niveaux avant ensemencement, l'agitation, l'aération, le contrôle de pH, la température, le temps de production, devenus des domaines du génie biologique. Les industriels vont réussir, c'est le début de l'ascension vers les sommets pour les sociétés impliquées. On trouve les chiffres suivants pour la progression de la production nationale : 1943 : 12 kg de pénicilline pure; 1944 : 1 t; 1945 : 4 t ...obtenue par « l'effort de guerre »⁵.

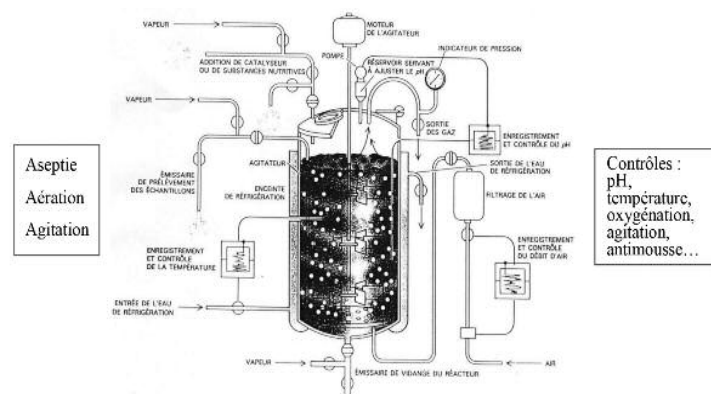
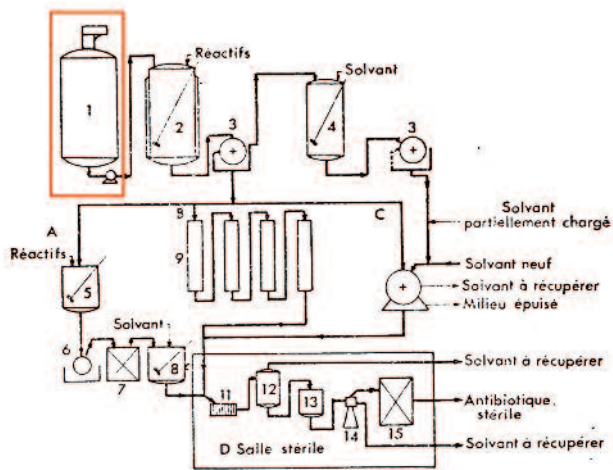


Fig. 14 schéma d'un fermenteur

La production depuis le fermenteur (dont la taille ne va pas cesser de croître), l'extraction et la purification sont conduites suivant le principe général représenté sur la fig. 15. L'extracteur de Podbielniak à contre-courant (étape C) schématisé Fig. 16, avec un rotor muni de canaux en spirales a été conçu dans les premiers temps de la pénicilline, il est encore commercialisé. Nous sommes dans le domaine du génie chimique.



1, fermenteur; 2, cuve de stockage; 3, filtre rotatif; 4, cuve d'extraction du mycélium (éventuellement).
 A. Traitement par précipitation : 5, cuve de précipitation; 6, filtre ou essoreuse; 7, séchage; 8, cuve pour dissolution.
 B. Traitement par adsorption : 9, colonnes d'adsorption.
 C. Traitement par extraction liquide-liquide : 10, extracteur continu à contre-courant.
 D. Finition stérile : 11, filtration stérile; 12, concentrateur; 13, cuve de cristallisation; 14, essoreuse; 15, séchage.

Fig. 15

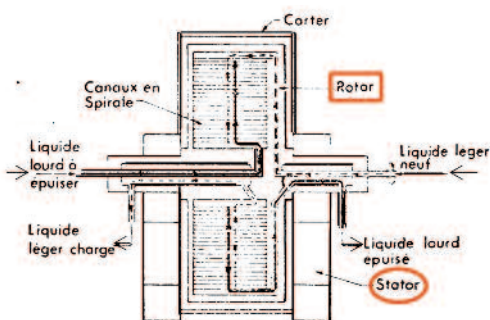


Fig. 16

Ainsi, dès le milieu du XX^{ème} siècle, l'aventure unique de la pénicilline montre qu'il est possible : de développer industriellement la culture d'une souche pure d'un micro-organisme, d'extraire sélectivement un métabolite secondaire de structure moléculaire complexe, peu stable chimiquement, avec une production rentabilisée. La voie des biotechnologies industrielles s'ouvre portée par une évolution exponentielle des connaissances et des techniques où le numérique va être d'un apport incommensurable.

Ernst Chain, Alexander Fleming et Howard Florey reçoivent le prix Nobel en 1945, mais l'effort mené pour arriver jusqu'à une production de masse n'est pas porté à la connaissance générale et finalement c'est Alexander Fleming qui reçoit tous les honneurs sur la planète, dans la décennie qui suit. La créativité scientifique de Norman Heatley pour obtenir les premiers échantillons de pénicilline est curieusement oubliée.

II – La production des enzymes

La connaissance et la maîtrise des fermentations va s'étendre à la production des enzymes ou à l'obtention de molécules spécifiques du métabolisme primaire.

La machinerie catalytique enzymatique constituée par des protéines à structure globulaire, agit en abaissant l'énergie d'activation des réactions biochimiques, ce qui accroît considérablement la vitesse de celles-ci, avec une totale énantiosélectivité indispensable dans les étapes du vivant. Cette synthèse asymétrique est très difficile à atteindre par la synthèse chimique pure, c'est pourquoi les performances de la biosynthèse passionnent les chimistes depuis des décennies. De nouvelles industries n'ont vu le jour que grâce à la mise sur le marché d'enzymes purifiées ; il en est de même pour des techniques de détection et d'analyses dont le principe utilise la sensibilité et la spécificité enzymatique.

Les méthodes de production vont de l'extraction de tissus végétaux ou animaux, aux techniques fermentaires très majoritaires. Le procédé industriel classique utilise une culture en profondeur dans un schéma du type pénicilline, en milieu aérobie, avec un micro-organisme produisant une grande quantité d'une enzyme extra-cellulaire.

La taille des fermenteurs utilisés va de 50 à 450 m³. La matière première est généralement bon marché et la conception de mutants hyperproducteurs par des manipulations génétiques de plus en plus précises favorise cette approche.

Il existe aussi des procédés en milieu solide plus particulièrement adaptés aux aliments fermentés.

Les micro-organismes utilisés sont des eucaryotes (champignons ou levures, dont particulièrement *Saccharomyces cerevisiae*) ou des procaryotes (bactéries G⁺ ou G⁻), avec un statut d'innocuité reconnue.

Le tableau ci-dessous répertorie quelques utilisations des enzymes dans leurs applications industrielles, sans précision sur les procédés spécifiques à chaque cas.

Application industrielle	Enzymes employées	Utilisations
Industrie des biocarburants	Cellulases	Dégradation de la cellulose en glucides simples qui peuvent être fermentés pour produire de l'éthanol cellulosique.
	Ligninases	Prétraitement de la biomasse pour la production de biocarburants.
Lessive biologique	Peptidases, amylases, lipases	Élimine les protéines, l'amidon, les taches de graisse ou d'huile du linge.
	β-Glucanases	Amélioration des propriétés de filtration du moût et de la bière.
Brassage	Amylases et pullulanases	Production de bières basse calories et ajustement des caractéristiques de fermentation.
	Acétylactate décarboxylase (ALDC)	Efficacité accrue de la fermentation en réduisant la formation de diacétyle.
Cuisson des aliments	Papaine	Attendeur pour favoriser la tendreté de la viande en cuisson.
Industrie laitière	Rennine	Hydrolyse des protéines lors de la production de fromages.
	Lipases	Production des camemberts et des bleus tels que le roquefort.
Processus agroalimentaires	Amylases	Production de sucres à partir d'amidon, par exemple pour produire du sirop de maïs à haute teneur en fructose.
	Protéases	Réduction de la teneur en protéines de la farine (ex: biscuits).
	Trypsine	Production de nourriture hypoallergénique pour bébés.
	Cellulases, oxgénases	Amélioration de la clarté des jus de fruits.
Biologie moléculaire	Nucléases, ADN ligase et ADN polymérase	Utilisation d'enzymes de restriction et réaction en chaîne par polymérase afin de créer des ADN recombinants.
Industrie papetière	Xylanases, hémicellulases et lignine peroxydases	Élimination de la lignine du papier kraft.
Hygiène	Peptidases	Nettoyage des protéines des lentilles de contact afin de prévenir les infections.
Traitement de l'amidon	Amylases	Conversion de l'amidon en glucose et divers sirops à sucre inverti.

Des entreprises se spécialisent maintenant dans la recherche sur les enzymes issues de micro-organismes dits extrêmophiles qui vivent dans des conditions extrêmes comme les fonds sous-marins, les sources d'eau chaude à travers la planète, mais aussi le fond du lac Pavin en Auvergne pour citer un exemple régional.

Ces enzymes sont intéressantes pour leur stabilité dans des conditions difficiles de pH, de température, de concentration saline que l'on retrouve souvent dans les procédés industriels dédiés à la synthèse d'intermédiaires ou de produits pharmaceutiques chiraux par exemple.

Ce très court chapitre n'est qu'une introduction à un domaine qui prend actuellement une importance considérable en liaison avec le développement de la génomique et de la protéomique notamment.

III - Quelques orientations actuelles

Les grands secteurs d'activité de nos jours sont résumés dans la figure 17. Pour gagner en lisibilité, on distingue cinq « classes » de biotechnologies à l'aide de couleurs qui apparaissent dans le diagramme. L'utilisation des micro-organismes est particulièrement marquée pour les biotechnologies blanches, rouges et jaunes. Mais, même en se restreignant à celles-ci, dans ce court exposé il n'est pas possible d'aborder l'ensemble des bioprocédés déjà développés ou en cours, il faudrait pour cela y consacrer un important volume.

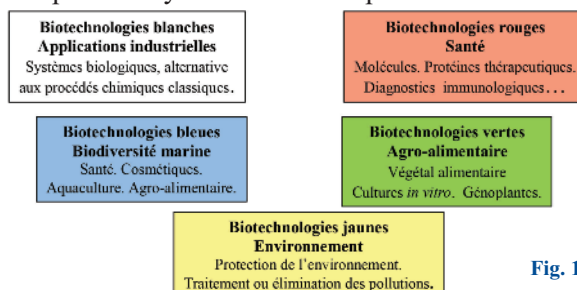


Fig. 17

Dans un ouvrage collectif récent intitulé : « Biotechnologies. Les promesses du vivant »³, les différents auteurs, tous spécialistes dans leur domaine, dressent un panorama général des transformations en cours, ils proposent des solutions à de nombreux défis et s'enflamment sur les possibilités offertes par les nouvelles biotechnologies. Nous sommes loin de la pénicilline.

Le chapitre 2 de ce livre est consacré aux domaines en émergence : le biomimétisme, la biologie de synthèse, la bio-production, le clonage, la bio-informatique, le séquençage, les nanotechnologies, ce qui situe les centres d'intérêt actuels.

Le séquençage est rédigé par Jean Weissenbach^{3a} qui est considéré comme l'un des pionniers mondiaux de l'exploration et de l'analyse des génomes. Après avoir défini ce domaine comme « une analyse chimique de l'ADN », il répond à différentes questions passionnantes. Retenons seulement quelques courts extraits choisis arbitrairement :

- .../ du fait de l'effondrement du coût, on commence à envisager de séquencer le génome de tous les individus et la production de ces données va générer une grande activité économique ...

- .../ le séquençage de micro-organismes, par exemple, a permis de détecter de nombreuses traces de transfert horizontal de segment d'ADN comportant des gènes provenant de micro-organismes. Ce transfert horizontal constitue un mécanisme très général d'évolution des bactéries...

- .../ le séquençage haut débit offre une nouvelle grille de lecture du vivant...

L'auteur montre que la connaissance du génome et les approches qui en dérivent constituent une révolution scientifique exploitable dans tous les domaines des biotechnologies.

Dans le fil de cette remarque, l'une des grandes découvertes de ces dix dernières années est certainement la technique révolutionnaire CRISPR-Cas9. Les origines de la découverte de celle-ci remontent à 1987, lorsque des chercheurs japonais découvrent chez la bactérie *Escherichia coli* des séquences d'ADN dont l'enchaînement des bases (A, C, T, G) se lit de la même manière dans les deux sens : on parle de palindromes. Le rôle de ces fragments, baptisés CRISPR, pour « *clustered regularly inter-spaced short palindromic repeats* »^{1d}, ne sera finalement mis en lumière que vingt ans plus tard : d'une part quand on constatera que les morceaux d'ADN intercalés entre les palindromes sont souvent des séquences d'ADN de virus, d'autre part quand on montrera que les bactéries porteuses de ces séquences résistent mieux aux infections. L'ARN d'un complexe CRISPR-Cas9 lui permet ainsi de reconnaître et se lier à l'ADN viral présent dans la bactérie, pour ensuite le détruire. Dès 2012, les chercheuses Emmanuelle Charpentier et Jennifer Doudna vont s'inspirer de cette réaction immunitaire bactérienne et la détourner pour en faire un véritable outil biotechnologique à la portée de tous¹³. Contrairement aux méthodes antérieures pour modifier le génome, qui nécessite des enzymes spécifiques à chaque situation, l'outil CRISPR-Cas9 utilise une même protéine, l'enzyme Cas9, pour toutes les situations. Le seul élément spécifique à construire est un ARN qui guide l'enzyme Cas9 à l'endroit du génome à couper. Et les ARN sont plus simples à synthétiser que les protéines¹⁴. Le schéma de la figure 18 résume les étapes du processus.¹⁴

Gageons qu'un très grand nombre de chercheurs à travers le monde travaillent fébrilement, dans leur domaine, à l'aide de cette nouvelle technique.

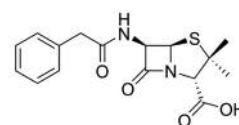
Il est évident que cette découverte relègue très loin le travail gigantesque de mutations aléatoires effectuées sur le *Penicillium chrysogenum* de la pénicilline au début des années 1940. Le génome de cette souche est maintenant connu depuis 2008¹⁵, ainsi que toutes les étapes de la biosynthèse, la création de mutants hyperproducteurs devient un travail de précision. D'une façon plus générale, la programmation génétique des micro-organismes industriels¹⁶ qui demandait un long travail de mise au point, se trouve formidablement relancée.

Conclusion

L'utilisation outrancière de l'antibiothérapie sur l'homme (déjà anticipée par Fleming⁷) et les animaux, a fait que la pénicilline et beaucoup des antibiotiques du type « bêta-lactamines » isolés par la suite ou conçus par semi-synthèse (première, deuxième, troisième, quatrième génération) ou bien encore d'autres familles (aminosides, cyclines, glycopeptides, macrolides, polypeptides ...) sont en train de devenir inefficaces car les micro-organismes infectieux ont trouvé des mécanismes de défense¹⁷. Il est maintenant urgent de mettre au point d'autres parades thérapeutiques ; on peut raisonnablement rester optimiste si l'on considère la formidable boîte à innovations qu'apportent les biotechnologies modernes et les connaissances récentes apportées par la génomique.

Mais un autre problème émerge d'une grande importance qui est notamment soulevé par Pascale Cossart^{1d} : « ... la technologie CRISPR/Cas9 fait l'objet de nombreux travaux, mais pose aussi des problèmes d'ordre éthique. Peut-on s'aventurer dès aujourd'hui dans des thérapies géniques ? ... ». Finalement, jusqu'où peut-on aller dans ces manipulations génétiques qui apparaissent de plus en plus précises et efficaces^{3b,18} ? Le débat va, à n'en pas douter, s'amplifier.

* Dans tout le texte, « la pénicilline » fait référence à la pénicilline G ou benzylpénicilline. Lorsqu'elle n'est pas encore purifiée, c'est un mélange de différents analogues proches du type « bêta-lactames », mais où la G prédomine.



Pénicilline G ou benzylpénicilline

Références

- 1) Pascale Cossart, La nouvelle microbiologie. Editions Odile Jacob. 2016
- a) p.20, b) p.92, c) p.50, d) p.47.
- 2) le nouveau monde des microbes. *Pour la Science*, n°469, Novembre 2016.
- 3) Biotechnologies. Les promesses du vivant. FYP Editions. 2015.
- a) Jean Weissenbach, « le séquençage ». pp.94-101; b) Hervé Chneiweiss, « La bioéthique ». pp. 246-254.
- 4) Robert Bud, Penicillin. Triumph and Tragedy. Oxford University Press. 2007.
- 5) Robert Bud, les enjeux de la découverte de la pénicilline. *a recherche*. Décembre 1997, 76-79.
- 6) The discovery and development of penicillin. 1928-1945. An International Historic Chemical Landmark. November 19, 1999. Ed. American Chemical Society and Royal Society of Chemistry.
- 7) Alexander Fleming Nobel Lecture. December 11, 1945. Accessible sur internet.
- 8) Alexander Fleming, An antibacterial action of cultures of *Penicillium*, with special reference to their use in isolation of *B. influenza*. *British Journal of Experimental Pathology*, 10, 226-236 (1929).
- 9) Alexander Fleming, On the specific antibacterial properties of penicillin and potassium tellurite. *Journal of pathology and bacteriology*, 35, 831- 842 (1932).
- 10) Ernst Chain, Howard W. Florey, Arthur D. Gardner, Norman G. Heatley, Margaret A. Jennings, Jean Orr-Ewing, and Arthur G. Sanders, Penicillin as a chemotherapeutic agent, *Lancet*, 1940, 226-228.
- 11) Edward. P. Abraham, Ernst Chain, Charles M. Fletcher, Howard W. Florey, Arthur D. Gardner, Norman G. Heatley, and Margaret A. Jennings, Further observations on penicillin, *ibid.*, 1941, 177-188.
- 12) Yair Aharonowitz et Gerald Cohen, Les micro-organismes et l'industrie pharmaceutique, *Pour la Science*, novembre 1981, 93-105.
- 13) Léa Galanopoulou, Des ciseaux génétiques pour le cerveau , *CNRS Le Journal*, 03/05/2016.
- 14) Emmanuelle Charpentier et Pierre Kaldy, CRISPR-Cas9 l'outil qui révolutionne la génétique, *Pour la Science*. Octobre 2015, pp.24-32.
- 15) Marco A van den Berg et al. Genome sequencing and analysis of the filamentous fungus *Penicillium chrysogenum*. *Nature Biotechnology*, 26, 1161-1168 (2008).
- 16) David Hopwood, La programmation génétique des micro-organismes industriels , *Pour la Science*, Novembre, 1981, 40-55.
- 17) Julian E. Davies, Grandeur et décadence des antibiotiques, *La recherche*. Décembre 1993, 1354-1351.
- 18) Léa Galanopoulou, Quelle éthique pour les ciseaux génétiques ? , *CNRS Le Journal*, 20.06.2016.

Fig.18 (référence 14)



L'AFFAIRE LYSENKO UN DRAME POUR LA SCIENCE EN PLEIN XX^{ème} SIÈCLE

Par Jean-Philippe MOULIN

Ingenieur agronome, Président de l'ADASTA

Malheureusement, les dossiers qui font l'actualité et passent à la postérité pour diverses raisons portent souvent le nom des "méchants", rarement des "bons". En témoignent les affaires LANDRU, STAVISKY, PETIOT, DOMINICI, etc. du nom des coupables ou jugés tels. Plus rares sont les affaires CALAS, DREYFUS ou LINDBERGH, éponymes des innocents. Balayons tout de suite le doute ! L'"Affaire LYSENKO" porte le nom d'un homme à l'origine, au XX^{ème} siècle, d'une effroyable machination au plus haut niveau d'un État, qui causa un épouvantable gâchis scientifique et même plus, puisqu'il y eut mort d'homme. Voici les faits qui se déroulèrent en Union soviétique et en Russie pendant presque 50 ans, en gros de 1927 à 1967, y marquant durablement la génétique, en particulier végétale, dans tous ses aspects : la recherche et l'expérimentation scientifiques, la technique et la production agricoles. L'auteur se gardera néanmoins ici des termes excessifs que l'on peut trouver dans la littérature -y compris scientifique- car l'affaire LYSENKO résulte essentiellement d'une déplorable collusion entre la science et la politique : on verra ci-après que certaines thèses du mis en cause n'étaient pas totalement dépourvues -au moins au départ- de fondement et pouvaient -au moins un moment- retenir l'attention de scientifiques. Cependant en 1970 l'Américain David JORAVSKY écrivait cruellement dans *The Lysenko Affair* : "Toute ressemblance du lysenkisme avec une pensée authentiquement scientifique est purement accidentelle"...

1.- VAVILOV, DE 1887 À 1930 : ASCENSION D'UN SAVANT

1.1.- Les débuts

Nicolas VAVILOV -pour les Russes : Николай Иванович ВАВИЛОВ, Nikolai Ivanovitch VAVILOV- est né le 25 -pour les Russes, dans le calendrier julien : le 13- novembre 1887 à Moscou, alors dans l'Empire russe. Diplômé de l'Institut agronomique de cette ville en 1911, il y travaille la botanique (étudiant, il avait participé à une expédition botanique dans le Caucase), la mycologie et la phytopathologie jusqu'en 1912. Il voyage ensuite en Europe les deux années suivantes, travaillant notamment les techniques de sélection végétale les plus modernes de l'époque chez VILMORIN en France et s'initiant aux théories de DARWIN (voir encadré) auprès de leur promoteur en Allemagne Ernst HÆCKEL.



Nicolas VAVILOV

DARWIN - L'évolutionnisme (1859)



Charles DARWIN

L'homme – Le biologiste anglais Charles DARWIN (1809-1882) reçoit une formation initiale en histoire naturelle -après l'abandon rapide d'études médicales amorcées à l'Université d'Édimbourg- influencée par la théorie du transformisme de LAMARCK (voir encart) et les travaux de son adepte Robert GRANT sur l'homologie (observation d'une analogie entre les organes de beaucoup d'animaux, en dépit de leurs degrés de complexité divers, suggérant une ascendance commune).

À l'origine des idées de DARWIN se trouvent nombre d'observations qu'il fait au cours de ses voyages dans plusieurs îles (Galápagos, Australie, Terre de Feu) où les espèces animales évoluent de façon indépendante des autres territoires insulaires ou continentaux, du fait de leur isolement.

Sa pensée est également significativement influencée par l'Essai sur le Principe de Population de Thomas MALTHUS : la régulation de l'inéluctable croissance démographique par la maladie, la guerre et la famine professée par ce dernier (malthusianisme) s'accommode trop bien du conflit entre les espèces végétales déjà observé par de CANDOLLE et la lutte pour la vie (struggle for life) qui stabilisent numériquement les espèces sauvages. Intérêt de la réflexion : au temps de DARWIN, l'origine des espèces est encore qualifiée de "mystère des mystères"...

L'évolutionnisme - DARWIN fait paraître en 1859 son ouvrage fondamental "De l'origine des espèces" (titre complet "De l'origine des espèces au travers de la sélection naturelle, ou la préservation des races favorisées dans la lutte pour la vie"), théorie scientifique révolutionnaire pour l'époque : élaborée à partir d'observations géologiques (il a auparavant fait beaucoup de terrain), elle fait descendre toutes les espèces vivantes d'un ancêtre unique ou de quelques ancêtres communs, par le jeu de la sélection naturelle. Sa théorie de l'évolution traduit une forte influence des thèses de BUFFON (voir encadré).

Deux ouvrages suivent :

- l'un consacré à l'Homme : "La Filiation de l'Homme et la sélection liée au sexe" (1871) ;

- l'autre aux êtres vivants en général : "De la variation des animaux et des plantes à l'état domestique" (1868).

Sa théorie : pour des espèces en croissance continue, c'est la raréfaction des ressources disponibles qui sélectionne les individus les mieux préparés à les exploiter, favorisant leur descendance et entraînant la dominance de ces nouvelles espèces.

Dans la formulation de ses idées, DARWIN n'est pas exempt de préoccupations religieuses :

1.- il ne publie qu'en 1859 son livre *De l'origine des espèces* par crainte d'être accusé d'hérésie par rapport à la thèse officielle du créationnisme (Dieu a à l'avance ordonné la vie selon des lois naturelles, sans procéder à des créations miraculeuses), alors que l'idée en est dans sa tête depuis 1837, ainsi que la première esquisse d'un arbre phylogénétique dans son *First Notebook on Transmutation of Species* (cf. en fig. 5 celui du promoteur de ses idées en Allemagne HÆCKEL) ;

2.- rappelons que le jeune DARWIN fit sa scolarité dans des écoles religieuses (son père était unitarien, sa mère anglicane) et que son père ambitionnait de le voir un jour pasteur anglican ; de plus, à 18 ans, il suivit les cours de botanique et d'entomologie du Révérend John HENSLOW et se passionna pour la *Théologie naturelle* et la conception divine de la nature de William PALEY (*adaptationnisme*) qui figuraient au programme ; par la suite, il suivit également les cours de géologie d'un autre Révérend : Adam SEDGWICK ;

3.- de fait, ce n'est qu'après sa rencontre avec Alfred RUSSEL WALLACE qui professe une théorie semblable à la sienne qu'il se risque à publier -avec lui- sa théorie de l'évolution qui est acceptée dès sa publication, alors que la *sélection naturelle* n'est adoptée que 70 ans plus tard, d'autres explications à l'évolution étant avancées...

4.- contre le transformisme de LAMARCK, son maître Charles LYELL argumente -au mépris des textes bibliques- que la distribution des espèces s'explique par le fait que la création divine se serait exprimée en plusieurs actions successives séparées par des catastrophes naturelles : c'est la théorie des "centres de création", opposée à la création unique (*créationnisme religieux*).

Les thèses de DARWIN mettent donc en évidence l'existence d'importantes variations individuelles au sein d'une même espèce et leur rôle-clé dans le processus évolutif. Reste une grosse énigme pour lui : comment ces variations apparaissent-elles et de quelle nature sont-elles ? Le hasard fait que, bien qu'ils soient contemporains et que DARWIN ait connaissance des travaux de MENDEL (voir encadré), il n'établit pas le lien à l'époque et personne ne voit pendant plusieurs décennies que la théorie mendélienne de la génétique apporte la réponse et complète celle darwinienne de l'évolution.

Citons pour finir un malheureux avatar des idées de DARWIN au XIX^{ème} siècle, qu'il combattit vigoureusement : le "darwinisme social" ou *spencérisme*, du nom de son théoricien Herbert SPENCER qui les appliqua aux sociétés humaines sans ménagement, prônant l'abandon de toute protection sociale et de toute attitude charitable, l'eugénisme et la domination des élites, de façon à faire émerger "les plus aptes" (sic). C'est l'une des justifications des régimes totalitaires.

Il n'est pas inutile de relever que ce dernier donna son premier cours magistral à l'Université d'Iéna sur l'origine des espèces, rencontra Charles DARWIN à plusieurs reprises et passa -à tort semble-t-il- pour un défenseur de l'eugénisme. Il aurait créé le terme *œcologie* et, convaincu d'une origine commune à tous les organismes, introduit l'arbre phylogénétique à des fins pédagogiques (cf. fig. 5). D'ailleurs en 1940, VAVILOV publie une *Théorie de l'origine des plantes cultivées d'après DARWIN*.

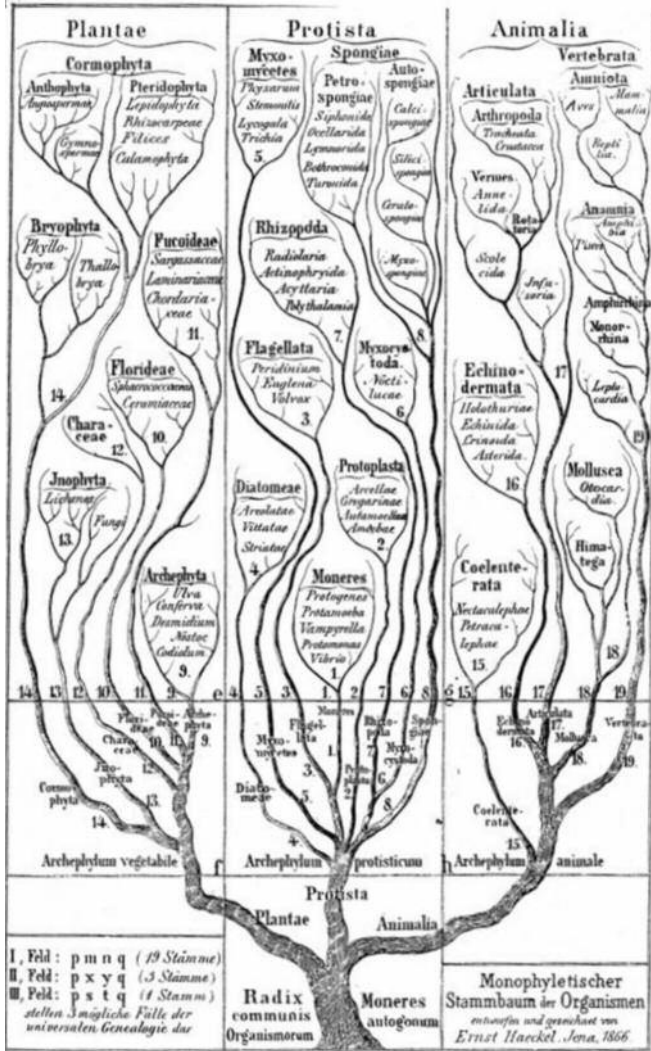


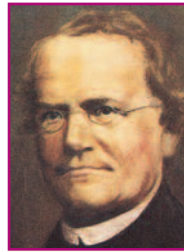
Fig. 5

Arbre phylogénétique d'HÆCKEL

Les mammifères sont la dernière ramification en haut à droite.
(source bioinfo.uqam.ca)

Séjournant en Angleterre, il s'initie au système immunitaire des végétaux auprès de William BATESON, l'un des diffuseurs des travaux de MENDEL (voir encadré en Grande-Bretagne (et inventeur du terme *génétique*) : nous verrons que cela aura des conséquences plus tard (cf. § 1.2.4). De 1917 à 1921, VAVILOV est Professeur d'agronomie au Département éponyme de l'Université de Saratov.

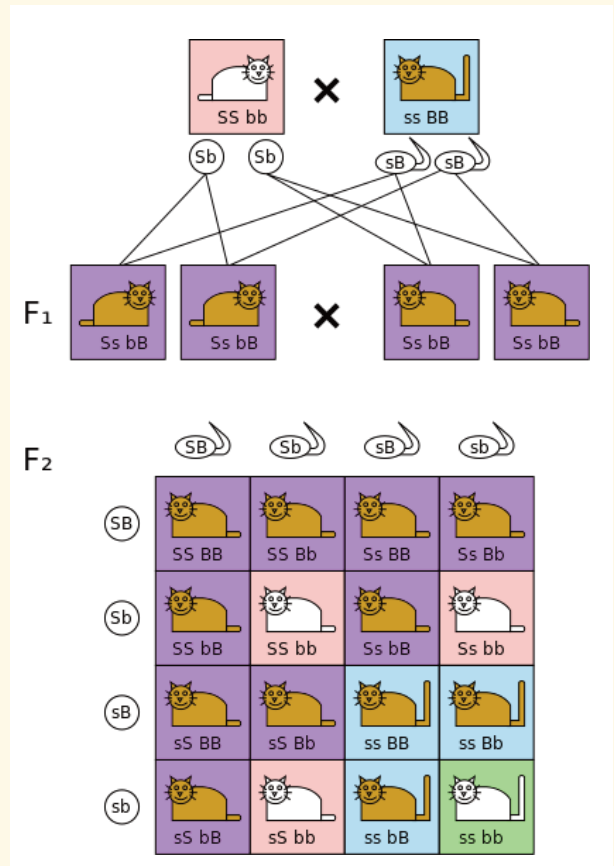
À 33 ans, il devient directeur de l'Institut fédéral de Botanique appliquée et des Nouvelles Cultures de Pétrograd (Saint-Petersbourg jusqu'en 1914, Léninegrad à partir de 1924). Il lance une série d'expéditions botaniques à travers le monde (65 pays visités en 20 ans !), afin d'étayer sa première grande théorie (cf. § 1.2.1).



MENDEL Les lois de l'hérédité (1866)

L'homme Johann (à son baptême), puis Gregor (dans les Ordres) MENDEL (1822-1884) est moine catholique à Brünn dans l'Empire austro-hongrois (aujourd'hui Brno en République tchèque) qu'il ne quittera que deux ans pour étudier dans la capitale. Initié aux techniques de greffage dans le verger paternel, il se passionne pour la botanique : il doit renoncer à des études à l'Université faute de moyens financiers -il n'y entrera jamais par la suite- et intègre le monastère des Augustins de Brno en Moravie, dans la perspective de devenir enseignant. Situé dans une région d'élevage de moutons et de production de laine, ce monastère est également un centre de recherche en sélection animale et génétique ovine. En 1851 il part à Vienne étudier pendant deux ans diverses disciplines des sciences naturelles ; il y acquiert les techniques de l'expérimentation et s'y passionne pour l'apparition de caractères nouveaux chez les végétaux au cours des générations successives, ce qui l'amène à se pencher sur la fécondation et les croisements chez les plantes. C'est ainsi qu'ayant définitivement regagné son monastère, il décide d'étudier :

- l'hybridation végétale chez le pois en créant un jardin expérimental et une serre ;
- l'hybridation animale chez la souris en installant un élevage ... dans sa chambre !



Rapport : 9 / 3 / 3 / 1

Légende :
S = queue courte (majuscule = dominant)
s = queue longue (minuscule = récessif)
B = poil brun (dominant)
b = poil blanc (récessif)

Fig. 7 - Échiquier de PUNNETT : 3^{ème} loi de MENDEL (ségrégation)

Source : Internet, fr.wikipedia.org

Cette dernière activité est interrompue sur ordre de l'évêque, mais la première, démarrée en 1856, débouche dix ans plus tard sur la publication d'un mémoire : "Recherche sur les hybrides végétaux". En 1868, il est élu supérieur du couvent, ce qui le libère de sa fonction d'enseignant mais lui laisse beaucoup moins de temps pour celle de chercheur. Dès sa disparition, son successeur brûle toutes ses archives (pourquoi ?), ce qui compromet la bonne connaissance du personnage et de certains de ses travaux.

Les lois de l'hérédité MENDEL définit la manière dont les gènes se transmettent de génération en génération à travers trois lois :

- **1^{ère} loi**, dite d'uniformité des hybrides de première génération : quand les parents sont de souche pure, aucune forme intermédiaire n'apparaît en première génération (NDLA : 1^{ère} génération dénommée conventionnellement F1) ;

- **2^{ème} loi**, dite de pureté des gamètes : les facteurs héréditaires se séparent dans les gamètes et un gamète ne contient qu'un facteur de chaque caractère (NDLA : il y a disjonction des allèles, notion de caractères dominants/récessifs) ;

- **3^{ème} loi**, dite de ségrégation : il y a dispersion indépendante des caractères héréditaires (NDLA : obtention d'individus homozygotes/hétérozygotes, cf. fig. 7).

Grande nouveauté : MENDEL déclare que les caractères sont transmis par quelque chose -un support ?- qu'il ne peut désigner autrement que par le terme vague de facteurs ("Faktoren" en allemand, sa langue maternelle) et que l'on identifia ultérieurement comme étant les *gènes* dont on ne put affirmer l'existence que 45 années plus tard : cf. *infra*. Autant dire que ses travaux, pourtant largement diffusés, ne suscitèrent qu'un intérêt poli, tant les connaissances cytologiques de l'époque étaient insuffisantes et l'on ne put valider ses conclusions qu'à la découverte de la méiose par VAN BENEDEN (1884), de la disjonction des allèles et de leur recombinaison aléatoire.

En attendant, c'est la théorie de l'hérédité par mélange qui continue de prévaloir, à savoir : le phénotype d'un individu provient du mélange des influences parentales dans des proportions variables.

Ainsi fallut-il attendre :

- 1902 pour que SUTTON et BOVERI formulent la théorie des chromosomes, supports de l'hérédité (cf. fig. 8) ;

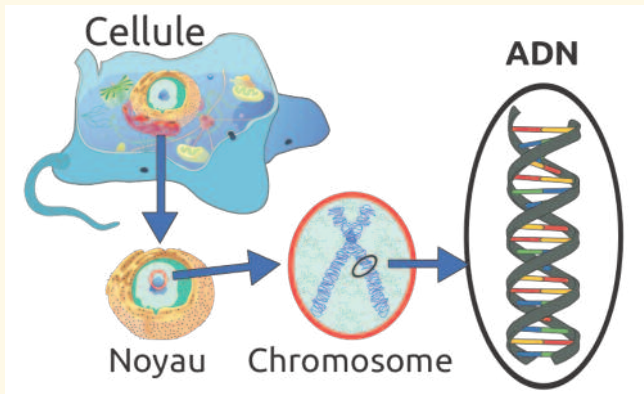


Fig. 8 - Le chromosome, support de l'hérédité

- 1903 pour que CUÉNOT (qui procéda néanmoins à une analyse fine de l'adaptationnisme, considérant comme facteur déterminant de l'apparition des espèces vivantes leur adaptation à des pressions de sélection) et CASTLE montrent l'applicabilité des lois de MENDEL au règne animal ;

- 1910 pour que MORGAN établisse que les fameux facteurs de MENDEL sont les gènes, éléments matériels qui contrôlent les caractères ("codent pour une fonction") et sont portés par les chromosomes (cf. fig. 9) ;

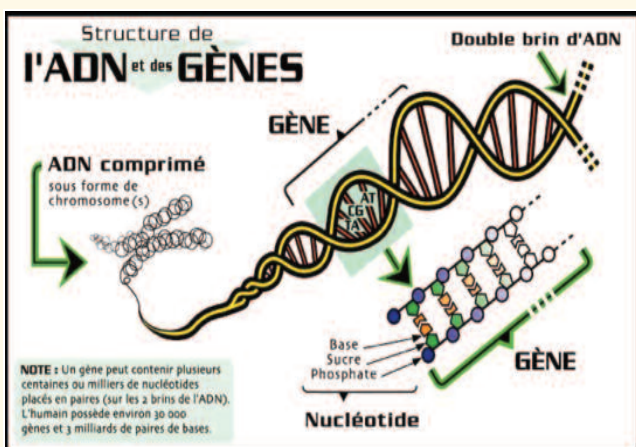


Fig. 9 - L'ADN, support des gènes

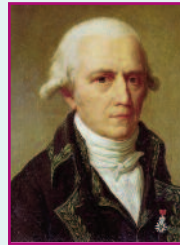
- 1911 pour que ce même MORGAN observe sur la drosophile des mutations qui, lorsqu'elles sont héréditaires, expliquent la biodiversité dans l'évolution des espèces et complètent ainsi la théorie de DARWIN (avec aussi la notion d'avantages comparatifs : les individus qui bénéficient par mutation génétique de caractères qui les avantagent par rapport à leurs congénères dans la lutte pour survivre deviennent dominants, c'est la porte ouverte à l'élimination des moins aptes) ;

- 1944 pour qu'AVERY identifie l'ADN (Acide DésoxyriboNucléique), molécule constitutive du chromosome, et 1953 pour que WATSON & CRICK établissent la structure moléculaire complexe de l'ADN, élucidant l'énigme du code génétique.

Pour la petite histoire, mais ce détail renvoie opportunément -et tristement- au § 3.2 sur LYSSENKO dans le corps principal du présent article : une statue de MENDEL est érigée devant son monastère en 1910, le gouvernement tchécoslovaque prosoviétique la relègue en 1950 et elle retrouve son emplacement initial prestigieux à la chute de KHROUCHTCHEV en 1964...

LAMARCK

Transformisme et caractères acquis (1809)



Jean-Baptiste de LAMARCK

L'homme - Jean-Baptiste de MONET, chevalier de LAMARCK (1744-1829), naturaliste français, premier utilisateur du terme *biologie*, réalise une classification des invertébrés regroupant 80 % des animaux.

Également botaniste, auteur d'une *Flore française* qui inaugure la méthode binaire de classification dichotomique des plantes par genre et par espèce, il faut noter qu'il est élu à l'Académie des Sciences en 1780 avec l'appui de BUFFON (voir encart).

La préoccupation initiale de LAMARCK est la caractérisation des êtres vivants par rapport aux objets inertes : où réside la différence ? (on ne manquera pas de se remémorer son contemporain Alphonse de LAMARTINE : "*Objets inanimés, avez-vous donc une âme ?*"...). Tout théologien de quelque croyance que ce soit -pour rappel : LAMARCK a été élevé chez les Jésuites d'Amiens- peut apporter une réponse religieuse.

Mais sa conclusion est que la matière vivante est composée :

- de tissus pour la contenir ;
- de fluides contenus (les humeurs de la médecine ancienne) : c'est la circulation de ces fluides qui provoque la différenciation des tissus, l'*organogénèse* ;
- d'une cause excitatrice -la *force vitale*- entraînant les mouvements des précédents, en fait élément déterminant de la construction de LAMARCK en ce qu'il autorise une souplesse, donc une potentialité d'organisation qui n'est pas sans rappeler l'*embryogénèse* de DESCARTES et annonce le *milieu intérieur* de Claude BERNARD.

Le problème est que jamais cette *force vitale*, cause mystérieuse et unique, ne sera appréhendée et que WÖHLER l'enterra en 1828

Transformisme et caractères acquis - LAMARCK est le premier à admettre que les espèces vivantes évoluent et à proposer une théorie matérialiste et mécaniste de leur devenir, le transformisme, fondé sur deux principes développés dans sa *Philosophie zoologique* publiée en 1809 et complétés dans son *Histoire naturelle des animaux sans vertèbres* (1815-1822) :

- le métabolisme des êtres vivants entraîne une complexification croissante de leur organisation (ce qui le distingue de DARWIN) ;
- ils s'adaptent au milieu dans lequel ils évoluent en se diversifiant sous forme d'espèces spécialisées.

C'est la *force vitale* qui est censée permettre l'adaptation de l'être vivant, i.e. de ses organes, au milieu environnant. D'où le développement de certains organes répondant à une exigence de l'environnement et la régression de ceux sans utilité fonctionnelle, induisant la notion de "caractères acquis".

Dans le débat qui nous occupe, ceci n'a d'intérêt que si lesdits caractères acquis sont héréditaires et peuvent donc rendre possible une modification du génotype sous l'effet d'influences extérieures, conduisant ainsi à la création d'espèces nouvelles, ce que prévoyait déjà ARISTOTE -sans le démontrer- mais fut jeté aux orties par August WEISMANN -sans plus de raisonnement rigoureux- à la fin du XIX^{ème} siècle. Là-dessus, LAMARCK ne se livre à aucune démonstration digne de ce nom -comme ses illustres prédécesseurs- et considère l'hérédité des caractères acquis comme certaine, à l'instar des savants de son temps, ce que l'on ne manquera pas de lui reprocher. Ainsi les girafes ont un jour acquis un long cou pour mieux brouter les bourgeons haut placés et ce caractère physique s'est transmis de génération en génération, de même les taupes ont perdu l'usage de leurs yeux puisqu'ils sont inutiles dans l'obscurité souterraine.

Tout ceci nécessite l'explication du premier être vivant, nécessairement très simple, que LAMARCK reconnaît dans les infusoires -organismes eucaryotes unicellulaires primitifs (30-300 µ)- qui ne peuvent être nées que par *génération spontanée* : c'est-à-dire sous l'action des lois physiques sur de simples tissus gélatineux et des fluides, excluant toute intervention divine (à la différence des Ciliés -dont la fameuse paramecète chère aux jeunes scolaires- qui compte parmi les organismes unicellulaires les plus complexes, leur cellule étant polarisée et organisée en zones fonctionnelles assurant la nutrition, la motricité, l'excrétion, etc.).

Son œuvre reçut un accueil tiède de ses contemporains (mépris de l'Empereur, hostilité farouche de CUVIER), peut-être plus occupés ailleurs par les événements historiques de la Révolution.

BUFFON Transformisme et dégénérescence (1749)



Georges de BUFFON

L'homme -Georges-Louis LECLERC, comte de BUFFON (1707-1788), scientifique éclectique (mathématicien, biologiste, botaniste, géologue, cosmologue). On retiendra ici la qualité de naturaliste de BUFFON, sans doute la plus connue. À ce titre se charge-t-il des sciences de la nature dans la rédaction de l'*Encyclopédie*, en plein siècle des Lumières, charge qu'il abandonne d'ailleurs finalement sans avoir rédigé l'article "Nature" promis...

Partisan affiché de la science fondée sur l'expérimentation et l'observation, il s'oppose à la science cartésienne issue du raisonnement. Ainsi établit-il une classification des êtres vivants -discutable- d'après l'intérêt supposé de ceux-ci pour l'Homme, à l'encontre de celle de son contemporain suédois Carl von LINNÉ, binominale et méthodique ; les deux savants ont un autre motif de divergence, LINNÉ ayant établi sa classification à partir des fleurs et BUFFON en considérant presque exclusivement les animaux. Il est aidé en cela par son collaborateur DAUBENTON, précurseur et grand praticien de l'anatomie comparée.

Considération latente chez BUFFON : les variations entre espèces sont dues à des dégénérescences. Il condamne les travaux battant en brèche la notion aristotélicienne de génération spontanée et notamment le "tir groupé" de :

- SPALLANZANI mettant en évidence la reproduction animale sexuée et la régénération d'éléments corporels amputés ;
- BONNET sur la parthénogénèse et la préexistence des germes : la production d'un nouvel être vivant ne peut être due qu'à l'évolution d'un germe préexistant ;
- TREMBLEY sur la régénération animale complète, la reproduction animale par bourgeonnement et la division cellulaire chez les protozoaires.

Bien qu'élevé chez les Jésuites, entretenant un chapelain personnel, mettant une chapelle à la disposition des ouvriers de ses forges et ardent monarchiste, BUFFON affiche un scepticisme religieux et un matérialisme de bon ton chez les philosophes des Lumières, qui le conduisent au déisme. Il n'échappe à la censure qu'au prix d'une rétractation, ayant imprudemment prétendu dans ses *Époques de la Nature* (entre 1774 et 1789) :

- que la Terre s'était détachée du Soleil à la suite de l'impact d'une comète ;
- que la vie y était apparue à partir de molécules organiques ;
- que les animaux disposaient d'un "sens intérieur matériel".

Transformisme et dégénérescence Son œuvre maîtresse est son "Histoire naturelle" (Titre complet : "Histoire naturelle, générale et particulière, avec la description du Cabinet du Roy)", 44 volumes parus à partir de 1749.

Il réfute toute interférence des croyances religieuses avec la recherche, celle-ci devant traduire de manière rigoureuse en conclusions concrètes les observations et expériences réalisées : ainsi n'hésite-t-il pas, au vu de sédiments calcaires, à mettre en cause l'âge de la Terre d'après la Bible (6 000 ans), la faisant naître il y a plus de 3 millions d'années !

Il est à l'origine du *transformisme*, selon lequel toutes les espèces contemporaines sont issues d'un tronc commun initial, théorie reprise par DARWIN (ce n'est qu'en 1994 que l'on parlera de LUCA : *Last Universal Common Ancestor* !).

Mais il explique l'évolution ultérieure à partir de ce tronc par une théorie de la dégénérescence (le cheval étant ainsi devenu un âne) qui l'éloigne de DARWIN. Curieusement cette dégénérescence, due à l'influence de conditions adverses dans lesquelles seraient placés les individus d'une espèce, est réversible si le cadre de vie s'améliore. Sur la méthode, on a beaucoup reproché à BUFFON de ne s'être soucié que des animaux -sa théorie est zoologique- et d'avoir fait preuve d'un anthropomorphisme excessif.

Ne voulant pas non plus faire œuvre systématique (cf. différence avec LINNÉ), il élude les classifications scientifiques et fait l'impasse sur certains groupes animaux, conduisant à des lacunes méthodologiques qui lui furent vivement reprochées au XIX^{ème} siècle...

Il reste par ailleurs de cette œuvre de superbes illustrations et de précieuses descriptions du mode de vie et de l'anatomie des animaux.

1.2.- Les travaux

1 - Son *Étude sur l'origine des plantes cultivées* publiée en 1926 identifie dix "centres de diversité".

Théorie sur l'origine des plantes cultivées : les végétaux sur la Terre sont issus de huit "berceaux" ou centres d'origine, qui ont donné l'ensemble des plantes cultivées.

En fait, VAVILOV considère l'Amérique du Sud comme un berceau unique subdivisé en trois sous-zones, ce qui correspond effectivement au total à dix zones (cf. fig. 10).

En 1968, JOUKOVSKY, élève de VAVILOV, ajoutera quatre autres berceaux (cf. fig. 11).

THÉORIE SUR L'ORIGINE DES PLANTES CULTIVÉES

in "Étude sur l'origine des plantes cultivées", N. VAVILOV

CENTRES DE DIVERSITÉ	BERCEAUX DES VÉGÉTAUX DANS LE MONDE	ESPÈCES
1	CHINE	Laitue Rhubarbe Soja Navet
2	INDE	Concombre Riz Manguier Coton asiatique
3	INDOCHINE	Bananier Cocotier Riz
4	ASIE CENTRALE	Amandier Lin Lentille
5	PROCHE-ORIENT	Luzerne Pomme Chou Seigle
6	CÔTES MÉDITERRANÉENNES	Céleri Pois chiche Blé dur
7	ÉTHIOPIE	Caféier Sorgho à grain Millet perle
8	SUD DU MEXIQUE & AMÉRIQUE CENTRALE	Mais Haricot de Lima Papayer Coton mexicain
9 (8 a)	ÎLES DU CHILI	Pomme de terre
10 (8 b)	NORD-OUEST DE L'AMÉRIQUE DU SUD	Pomme de terre Tomate Coton égyptien

Fig. 10

ORIGINE DES PLANTES CULTIVÉES DANS LE MONDE (JOUKOVSKY, 1968)

CENTRES	BERCEAUX DES VÉGÉTAUX	ESPÈCES
1	MÉDITERRANÉE	Chou Laitue Féverole
2	ABYSSINIE	Blé dur Orge
3	PROCHE-ORIENT	Melon Orge à 2 rangs Luzerne Seigle Blés dur et tendre Cognassier Figuier Noyer Cerisier Vigne
4	EURO-SIBÉRIE	Houblon Pissenlit Cresson Groseille Abricotier Pomme
5	ASIE CENTRALE	Orge Blé tendre Carotte Lentille Lin Pomme Pois Poirier Radis Vigne
6	INDE SUBTROPICALE	Nombreuses espèces subtropicales (2 ^{ème} plus important centre mondial)
7	INDONÉSIE, INDE & CHINE TROPICALE	Nombreuses espèces fruitières tropicales
8	CHINE MÉRIDIIONALE	Pomme Abricotier Pêcheur Poirier Soja
9	AUSTRALIE & NOUVELLE-ZÉLANDE	Eucalyptus
10	AMÉRIQUE DU NORD	Tournesol Topinambour Myrtille Rhododendron Bruyères Azalées Noyer
11	SUD DU MEXIQUE & AMÉRIQUE CENTRALE	Mais Courges Haricot
12	NORD-OUEST DE L'AMÉRIQUE DU SUD (Pérou, Bolivie, Équateur)	Pomme de terre Tomate Tabac Haricot Quinoa Oxalis Cannas
13	ÎLE DE CHILOÉ (Chili)	Pomme de terre
14	EST DE L'AMÉRIQUE DU SUD (Brésil, Paraguay)	Nombreuses espèces tropicales

En bleu : berceaux ajoutés par rapport à la théorie de VAVILOV

in "Nouveaux centres d'origine et nouveaux centres génétiques des plantes cultivées, y compris les microcentres endémiques spécifiques des espèces étroitement liés aux espèces cultivées" - JOUKOVSKY P.

Fig. 11

L'originalité de VAVILOV en la matière est d'élaborer une théorie planétaire pluri-espèces prenant en compte l'érosion des ressources génétiques, mais il a de nombreux précurseurs dans des domaines circonscrits : les Français Antoine DUCHESNE (sur l'origine des fraisiers et des courges, dès le XVIII^{ème} siècle) et Charles NAUDIN (courges et melons, au XIX^{ème}), le Suisse Alphonse de CANDOLLE (*Origine des plantes cultivées*, 1882), le Français Henry de VILMORIN (blés, XIX^{ème}),...

Pour originale et novatrice qu'elle soit, cette théorie lui attire néanmoins quelques critiques :

- VAVILOV prend en compte des civilisations anciennes qui peuvent être nomades ou déplacées, suite à des invasions par exemple ;
- certaines espèces ont été largement propagées et peuvent se retrouver dans plusieurs centres.

Aussi certains auteurs postérieurs à VAVILOV ont-ils avancé les notions de *centres de domestication* à des fins agricoles et de centres de diffusion à partir des premiers.

Le botaniste britannique John HAWKES -qui a rencontré VAVILOV en 1938- propose un autre système en 1983 dans *The diversity of crop plants* et *A bibliography of crop genetic resources* :

- des *centres nucléaires* datant de l'origine de l'agriculture, à partir de la cueillette de plantes sauvages : Chine du Nord, Proche-Orient, Sud-Mexique, Centre et Sud du Pérou ;
- des *régions de diversité* apparues par la suite lorsque l'agriculture a débordé des centres nucléaires, suite à une dispersion des pratiques agricoles : Chine, Inde, Asie du Sud-Est, Asie centrale, Proche-Orient, Méditerranée, Éthiopie, Afrique de l'Ouest, Amérique centrale, Nord de la zone andine (de la Bolivie au Venezuela) ;
- des *centres mineurs* d'origine récente, sources d'une grande diversité des plantes cultivées : Japon, Nouvelle-Guinée, Îles du Pacifique-Sud, Nord-Ouest de l'Europe, États-Unis, Canada, Caraïbes, Sud du Chili, Brésil.

Parallèlement VAVILOV constitue méthodiquement une très importante collection de semences, comportant en particulier nombre d'espèces sauvages.

2 - Une deuxième théorie va naître de son étude approfondie de l'évolution du seigle à travers l'Histoire, immortalisée par l'expression *mimétisme vavilovien*.

Théorie du mimétisme des plantes cultivées : plusieurs générations de sélection font qu'une adventice en vient à partager certaines caractéristiques de plantes cultivées.

À noter : ceci vaut, que la sélection soit naturelle ou non. Ainsi une sélection involontairement pratiquée par les agriculteurs (sélection phénotypique *de visu*) ou la pression de sélection exercée par des traitements antibiotiques ou herbicides peuvent conduire à ce résultat.

Dans la théorie, celui-ci suppose trois intervenants :

- un modèle : la plante cultivée ;
- un imitateur : l'adventice ;
- un agent discriminant effectuant la sélection sur un critère de tri.

Pour preuve établie par VAVILOV : le seigle sauvage vivace *Secale montanum* devenu, par mimétisme avec le blé et l'orge, le seigle cultivé annuel *Secale cereale*.

Ce phénomène n'est pas sans occasionner quelques difficultés pour l'agriculteur, en particulier au moment de la récolte, du fait de la présence de graines de la plante cultivée et de l'adventice quasi identiques, mais ceci est une

autre histoire...

3 - Par la suite, VAVILOV émet en 1920 une loi de variabilité génétique qui établit un parallèle entre les mutations génétiques d'espèces proches.

Loi des séries homologues dans les mutations génétiques (1922) : la probabilité est grande de retrouver tout une série de caractères d'une espèce dans d'autres espèces ou genres voisins.

Selon VAVILOV, il existe en effet une similitude dans les mutations génétiques -qu'elles soient animales ou végétales- qui fait que des portions de génotypes se retrouvent communes à différents taxons génétiquement proches.

4 - Enfin VAVILOV s'intéresse à l'immunité des plantes cultivées face aux maladies infectieuses et rassemble ses idées dans une théorie.

Théorie sur l'immunité des végétaux (1919)

VAVILOV rencontre son compatriote zoologiste Élie METCHNIKOFF qui est le découvreur en 1884 d'un phénomène biologique fondamental, la phagocytose (ce qui lui vaut le Prix Nobel), et le père d'une théorie cellulaire de l'immunité chez les animaux (qui met du temps à s'imposer).

Concernant les plantes cultivées, VAVILOV distingue :

- l'immunité *passive* (ou mécanique) résultant de particularités structurelles (rigidité, imperméabilité, configuration des organes) ou de spécificités de croissance ;
- l'immunité *active* (ou physiologique) expliquée par la chimie (teneur en certaines molécules) ; il admet que cette immunité physiologique dépend d'interrelations entre le protoplasme des cellules-hôtes et celui du parasite, dans une espèce d'association symbiotique.

1.3.- VAVILOV en 1930

VAVILOV, expert reconnu, se présente comme un ardent défenseur de la génétique. Il réunit la plus grande collection de semences connue à l'époque dans son institut, qui deviendra l'Institut des Plantes cultivées d'URSS, le mondialement connu VIR.

On dit que, durant le tragique blocus de Leningrad pendant la Seconde Guerre mondiale (872 jours de siège...), une soixantaine de chercheurs préféra endurer la faim plutôt que de toucher aux collections du maître...

Les honneurs pleuvent sur lui :

- en 1921, il est nommé président de la Section de Sélection et de Botanique appliquées de Pétrograd, transformée en 1924 en Institut fédéral de Botanique appliquée et des nouvelles cultures de l'Union, puis en 1930 en Institut des Productions végétales de l'Union, dont il prend la direction ;
- lauréat du Prix Lénine en 1926 ;
- en 1930, il prend la direction des laboratoires de génétique de Moscou, plus tard réorganisés en Institut de Génétique de l'Académie des Sciences d'URSS ;
- président de la Société géographique d'URSS en 1931 ;
- membre de l'Académie des Sciences d'URSS ;
- membre du Soviet suprême ;
- fondateur en 1929, puis président de l'Académie Lénine des Sciences agronomiques de l'Union soviétique (VASKH-NIL) jusqu'en 1935.

Détail non négligeable dans l'environnement sociopolitique de son pays et de son temps : il est soutenu par LÉNINE, mais celui-ci décède en 1924 et les attaques de LYSSSENKO contre la génétique "officielle" vont commencer...

2.- LYSENKO, DE 1898 À 1930 : IRRUPTION D'UN DOCTRINAIRE



2.1.- Les débuts

Trofim LYSENKO

Trofim LYSENKO -pour les Russes : Трофим Денисович ЛЫСЕНКО, Trofim Denissovitch LYSENKO- est né le 29 septembre 1898 à Karliva en Ukraine ; il est donc de 11 ans le cadet de VAVILOV. Ayant reçu une formation agronomique de base correcte, il s'intéresse tôt à la physiologie végétale (influence de la température sur les plantes, amélioration des sols) et s'oriente vers la recherche. Pénétré de l'idée que la nature des plantes peut être déterminée par les conditions du milieu, avec toute la communauté scientifique soviétique de l'époque, il rejette fondamentalement les thèses de MENDEL et fonde en 1934 un magazine ouvertement antimendélien.

LYSENKO connaît une ascension remarquable :

- 1930 : Héros de l'Union soviétique ;
- 1934 : membre de l'Académie des Sciences d'Ukraine ;
- 1935 : membre de l'Académie Lénine des Sciences agronomiques d'URSS (VASKhNIL) ;
- 1935 : membre du Soviet suprême ;
- 1936 : membre de l'Académie des Sciences d'URSS.

Là aussi, détail non négligeable dans l'environnement sociopolitique de son pays et de son temps : il est soutenu par STALINE.

2.2.- Les travaux

Malheureusement LYSENKO, revendiquant le "mitchourinisme" comme sa doctrine, s'entiche d'idées de MITCHOURINE qui s'avéreront des impasses (voir encart) :

- modification du génotype sous des influences externes ;
- possibilité de produire des hybrides végétatifs distincts des hybrides naturels ;
- etc.

C'est ainsi qu'avec MITCHOURINE, LYSENKO en vient à rejeter des travaux pourtant reconnus par la communauté scientifique, suivi en cela par la propagande officielle soviétique qui en interdit la diffusion et l'enseignement :

- ceux de MENDEL (1822-1884), auteur des lois qui portent son nom sur la transmission intergénérationnelle des caractères (petits pois verts et lisses, jaunes et ridés) ;
- ceux de WEISMANN (1834-1914) excluant que les caractères acquis puissent se transmettre héréditairement (souris à la queue systématiquement coupée) ;
- ceux du Prix Nobel MORGAN (1866-1945), attribuant au chromosome un rôle déterminant dans l'hérédité (début de carrière de la drosophile !).

Malheureusement encore, MITCHOURINE mêle politique et science, jusqu'à affirmer que la génétique -qui plus est occidentale- des trois susnommés n'est qu'une "pseudoscience bourgeoise incompatible avec le communisme" et qu'elle sera heureusement refondue grâce à MARX, ENGELS, LÉNINE et STALINE,... Ce qui fait penser à la possible création d'un néo-lamarckisme soviétique.

Enfin on s'apercevra peu à peu que LYSENKO fait état dans ses publications (Yarovizatsiia = vernalisation) de ses expériences qui ont réussi, pas des autres... Le plus grave en sera les conséquences scientifiques et humaines (envoi au goulag des meilleurs généticiens classiques russes, dont VAVILOV).

2.3.- LYSENKO en 1930

Réussissant à entraîner les autorités soviétiques dans son sillage, LYSENKO place de grands espoirs dans un phénomène découvert aux États-Unis en 1857, la *vernalisation* (période de froid nécessaire chez certaines espèces pour faire passer une plante ou plus souvent une graine du stade végétatif au stade reproductif, c'est-à-dire provoquer sa floraison ou sa germination).

MITCHOURINE Le « mitchourinisme » (1911 et s.)



L'homme - Ivan MITCHOURINE (1855-1935) -en russe : Иван Владимирович МИЧУРИН- est un autodidacte pépiniériste et arboriculteur, ce qui ne l'empêchera pas de devenir l'année de sa mort membre honoraire de l'Académie des Sciences d'URSS et de l'Académie Lénine des Sciences agronomiques d'URSS (VASKhNIL). Employé des chemins de fer jusqu'en 1898, il se passionne très tôt pour les

plantes et commence dès ses 20 ans à établir une collection de plantes et à s'intéresser à la génétique. En 1905, il propose au Ministère de l'Agriculture (impérial) de nouvelles variétés de fruits "pour améliorer la production nationale", ce qui débouche en 1919 sur la décision du Commissariat du Peuple (soviétique) de nationaliser sa pépinière sur laquelle il effectue essentiellement un grand nombre de multiplications de variétés nouvelles.

Deux ans avant sa mort, LÉNINE s'intéresse aux réalisations de MITCHOURINE qu'il soutient : celui-ci voit ainsi son établissement transformé en institut de recherche scientifique sur les cultures fruitières et est récompensé par plusieurs hautes distinctions honorifiques. À sa mort, sa pépinière est devenue le "Laboratoire central de Génétique de l'Académie d'Agriculture d'URSS".

Le « mitchourinisme » - N'étant ni chercheur ni enseignant, MITCHOURINE diffuse des éléments de doctrine plutôt qu'il n'énonce une théorie. D'ailleurs, de quelle expertise peut-il se prévaloir (mis à part, certes, de nombreuses observations de terrain) pour se permettre de réfuter la génétique mendélienne ?

C'est pourtant ce qu'il fait, ses idées reposant sur l'influence déterminante à 90 % de l'environnement sur la nature de tous les êtres vivants et leur hérédité (Homme compris), alors que le patrimoine génétique n'intervient selon lui qu'à hauteur de 10 % !

En cela, il est en quelque sorte disciple de LAMARCK et peut-être un précurseur de Joël de ROSNAY dans l'étude des mécanismes moléculaires qui modulent l'expression du patrimoine génétique en fonction du contexte, ce que l'on appelle aujourd'hui l'épigénétique (2011). La base du raisonnement est que des informations complémentaires exogènes peuvent définir comment des traits de caractère sont acquis, utilisés ou non, transmis ou non, voire perdus.

Quelques illustrations à l'appui :

- on observe que les œufs des tortues donnent soit des femelles, soit des mâles en fonction de la température à laquelle ils sont placés ;

- de même, en fonction de son alimentation, un même œuf d'abeille donnera soit une reine, soit une ouvrière ;

- l'épigénétique explique également le polyphénisme de nombre d'espèces animales, tel que le changement de couleur des animaux à fourrure. Ainsi MITCHOURINE pratique-t-il l'ontogénie en vue d'étudier les influences externes sur les individus.

Cependant il effectue de très nombreux croisements de plantes d'origines éloignées -dont des hybridations et des greffes- tout particulièrement en pomologie, en faisant intervenir des stimulants physico-chimiques afin d'accélérer le processus.

Cette activité le conduit à créer plus de trois cents variétés nouvelles de fruits, mais une seulement peut être inscrite au catalogue des variétés commercialisables. Là où le bât blesse, c'est que MITCHOURINE affirme l'hérédité des caractères acquis par les plantes greffées.

Il faut néanmoins mettre à son crédit les expérimentations récentes montrant que certaines informations héréditaires d'organismes vivants peuvent être influencées par le milieu extérieur : il a ainsi été mis en évidence en 2012 que la stimulation des défenses naturelles d'une plante induisait une plus grande capacité de résistance chez ses descendantes.

MITCHOURINE, et LYSENKO avec lui, se fit donc le pionnier de l'hérédité cytoplasmique et de la transmissibilité de changements liés au milieu.

Malgré quelques succès apparents sur les céréales en 1929, ces espoirs sont déçus, l'application se révélant peu efficace.

De même prône-t-il la plantation des arbres "en nids" (équivalent du semis en poquets pratiqué pour les potagers), de façon à créer une compétition sélective : maigres résultats et difficultés techniques sont au rendez-vous (racines entremêlées, arbres en concurrence létale, etc.).

D'autres thèses se révèlent tout aussi hasardeuses, telles la possibilité de mutations interspécifiques (par exemple : transformation de blé en seigle) et les espoirs mis dans les blés "ramifiés" ou "branchus".

Son mentor MITCHOURINE est-il véritablement un "scientifique" ? Peut-on parler de "mitchourinisme" ? En fait il propose ses services à une période où le nouveau régime en Russie est empêtré dans la question agricole : énorme décalage entre avancées scientifiques et techniques agricoles, incompatibilité de la collectivisation avec la réforme agraire, rancœurs moujiks-koulaks, désertification des campagnes en raison d'une industrialisation à outrance, rendements faibles (en particulier des céréales), afforestation des steppes laborieuse, mauvaises récoltes successives, famines, etc. On le croit donc, sans mesurer le risque encouru à réfuter la génétique mendélienne. Ainsi certaines positions dogmatiques seront-elles lourdes de conséquences : par exemple, l'opposition au maïs hybride, pilier de l'agriculture américaine avant qu'il ne transforme celle de l'Europe après la 2^{ème} Guerre mondiale.

Les Grandes Purgés staliniennes de 1930 commencent à cibler plusieurs biologistes en désaccord avec LYSSSENKO, accusés de trahison ou pire de trotskisme. C'est en 1931 que les attaques de LYSSSENKO contre VAVILOV commencent...

3.- QUAND LE COCKTAIL EXPLOSE...

3.1.- VAVILOV

LÉNINE, son soutien, décède en 1924. En 1935, VAVILOV, fondateur de l'Académie Lénine des Sciences agronomiques d'URSS (VASKhNIL), doit en abandonner la présidence le jour même où LYSSSENKO en est élu membre. VAVILOV continue en effet de défendre la génétique, en opposition à la doctrine officielle, le "lyssenkisme". LYSSSENKO occupe la présidence de cette Académie de 1938 à 1956, puis en 1961 et 1962.

En 1940, VAVILOV perd coup sur coup :

- en août : la direction de l'Institut des Productions végétales de l'Union ;
- la direction de l'Institut de Génétique de l'Académie des Sciences d'URSS ;
- la présidence de la Société géographique d'URSS.

Avec MITCHOURINE qu'il a rencontré dès 1921, VAVILOV entretient des relations cordiales, il a même accueilli des collaborateurs du pépiniériste dans son institut pour des travaux sur les hybrides. Mais à partir de 1923 VAVILOV procède à un examen des travaux de MITCHOURINE sur lesquels il émet plusieurs critiques ajoutées à celles formulées à l'encontre des thèses de LYSSSENKO (anthropomorphisme excessif), ce qui vraisemblablement le perd et renforce les motifs de son arrestation le 6 août 1940.

Déjà ses nombreux voyages de prospection et de contact scientifiques dans d'autres États l'avaient rendu suspect aux yeux des pouvoirs publics de son pays qui supprimèrent ses expéditions botaniques à l'étranger et il ne quitta plus l'URSS à partir de 1933, tandis que les autorités lui occasionnaient des difficultés croissantes dans la poursuite de ses recherches.

Le 9 juillet 1941, le Collège militaire de la Cour suprême de l'Union soviétique le condamne à mort pour "participation à une organisation antisoviétique, sabotage et espionnage", sentence commuée le 23 juin 1942 en vingt années de détention par décision du Præsidium du Soviet suprême, dont il était membre. La lecture des travaux de VAVILOV est prohibée dans le pays, interdiction est même faite de citer son nom.



Fig. 13 1940 :
Nicolas
VAVILOV
en prison

Détenu à la prison de Saratov dans des conditions inhumaines (cf. fig. 13), il y décède le 26 janvier 1943 de dystrophie consécutive à une sous-alimentation. Les lecteurs physiiciens se souviendront que leur illustre collègue anglais Stephen HAWKING est atteint d'une dystrophie (neuromusculaire) et les lecteurs médecins comprendront l'horrible réalité : VAVILOV est mort de faim.

Consolations dérisoires :

- il est réhabilité en 1955 et son pays donne son nom à l'institut VIR à titre posthume ;
- l'Académie des Sciences d'URSS refusa toujours de lui retirer son titre d'académicien ;
- elle fonde le Prix VAVILOV en 1965 et la Médaille VAVILOV en 1968.

3.2.- LYSSSENKO

Lui et son modèle MITCHOURINE sont soutenus par STALINE qui y voit le moyen de résoudre les graves difficultés agricoles que connaît toujours le pays et qui, par principe, accorde davantage de crédit aux praticiens de terrain qu'aux savants de laboratoires : pour le pragmatique "Père des Peuples", un bon résultat -ce que promet LYSSSENKO- vaut plus que toutes les théories et l'état déplorable de l'agriculture soviétique ne peut provenir que de saboteurs dont LYSSSENKO va le délivrer. L'ascension de ce dernier, amorcée après 1927, se poursuit donc inexorablement jusqu'à atteindre son apogée juste après la 2^{ème} Guerre mondiale, vers 1945-1952. On peut se demander, avec l'historien Dominique LECOURT (1976), si STALINE n'entrevoit pas le lyssenkisme en agriculture comme il a lancé le stakhanovisme dans l'industrie en 1935...

Dès 1936 débute une véritable répression contre certains généticiens accusés d'être des "ennemis de l'intérieur" selon une rhétorique bien connue, au point que le VII^{ème} Congrès international de Génétique ne peut se tenir à Moscou en 1937 comme prévu.

C'est aussi l'année où, en désaccord avec LYSSSENKO, le généticien américain MULLER, directeur du laboratoire de génétique à l'Institut de Botanique appliquée de Leningrad et futur Prix Nobel, l'attaque violemment puis quitte le pays.

Ambiance :

- MULLER s'était installé en URSS en 1931 pour fuir les États-Unis ...qui l'accusaient de "sympathies communistes" !
- VAVILOV réussit à faire sortir MULLER du pays dans un convoi de volontaires pour la guerre d'Espagne ;
- le traducteur des œuvres de l'Américain est exécuté.

Une opposition fondamentale s'établit entre VAVILOV et LYSSSENKO qui nie le concept vavilovien de berceau d'origine et l'intérêt de ressources génétiques lointaines donc coûteuses à collecter -qui plus est étrangères- alors que selon lui les variétés locales peuvent être améliorées *in situ*. En effet, comme le proclame MITCHOURINE, "Nous ne pouvons attendre de bienfaits de la nature, notre devoir est de les lui arracher". L'ouvrage principal de LYSSSENKO, *Agrobiologie*, paraît en 1943.

Pourtant les déconvenues persistent : en 1947, LYSSSENKO affirme disposer d'une variété de blé aux rendements exceptionnels, un blé aux épis ramifiés dont STALINE, Géorgien, lui a transmis quelques graines en provenance de son pays : cette variété pourrait donner des rendements cinq fois supérieurs à ceux des blés habituels ! En fait, ce blé ramifié ou branchu était connu des botanistes bien avant LYSSSENKO, sous le nom de *Triticum turgidum* L. var. *mirabile* KÖRN dit "blé miracle" et apparenté au blé d'Égypte des anciens pharaons. Or il n'accomplit pas le "miracle" officiellement attendu. LYSSSENKO, qui estime Henry de VILMORIN, aurait dû se rappeler le jugement de celui-ci en 1880 dans son livre "Les meilleurs blés" : "*Les blés à épis rameux ont toujours eu le don de frapper vivement l'imagination des ignorants et des cultivateurs novices qui s'imaginent en obtenir des rendements prodigieux, tandis qu'ils ne donnent en général qu'un produit assez médiocre, surtout au point de vue de la qualité*".

Néanmoins le 31 juillet 1948, LYSSSENKO déclare triomphant devant l'Académie Lénine des Sciences agronomiques que c'en est fini de la "génétique réactionnaire" et que "l'hérédité n'est pas commandée par de mystérieux facteurs" (les gènes, fameux «Faktoren» de Mendel) : à dater de ce jour, la "génétique mitchourinienne" devient la thèse officielle exclusive en Union soviétique, LYSSSENKO proclame la "biologie de classe" et l'"agrogénétique prolétarienne" !

Dès cette date, des voix s'élèvent dans la communauté scientifique internationale pour mettre en doute ses méthodes, ses résultats et ses arguments (les Britanniques HUXLEY, biologiste fondateur du WWF, et HALDANE, généticien cofondateur de la génétique des populations, pourtant lui-même sympathisant communiste). Qu'importe, nommé Héros du Travail socialiste en 1945, il est décoré huit fois de l'Ordre de Lénine !

À partir de 1952, les temps changent, mais provisoirement : quelques critiques encouragées par le décès de STALINE en 1953 sont émises contre LYSSSENKO -notamment par Andreï SAKHAROV en 1955- qui lui font alors de l'ombre mais, soutenu par le pouvoir de KHROUCHTCHEV, il bénéficie d'un retour en grâce en 1958 après un passage à vide dû à une bienveillance passagère de KHROUCHTCHEV à l'égard de la recherche scientifique : il est ainsi associé à la Campagne des Terres vierges en 1953 (mises en culture en Sibérie, dans le Caucase et au Kazakhstan) et reçoit le Prix Lénine en 1963. En 1958, il est interdit aux généticiens soviétiques de se rendre au Congrès international de Génétique à Montréal. Sous BREJNEV encore, le biologiste dissident Jaurès MEDVEDEV qui met en cause le lyssenkisme est accusé de démence, interné en hôpital psychiatrique et doit par la suite s'exiler d'URSS. C'est sans doute l'un des derniers cas du genre.

En 1964, juste avant la chute de KHROUCHTCHEV, Andreï SAKHAROV se manifeste à nouveau en suscitant une fronde à l'Académie des Sciences d'URSS contre l'élection d'un allié de LYSSSENKO, NOUJDINE : 120 contre sur 150 votants. Il faut dire que les fameux résultats attendus de l'action de LYSSSENKO ne se manifestent toujours pas dans les cultures de pomme de terre et de fourrages, ni surtout de maïs dont les hybrides connaissent un énorme succès à l'Ouest !

Le discrédit atteint finalement LYSSSENKO à la chute de KHROUCHTCHEV en 1964, date à laquelle se produit un retour à l'enseignement de la génétique classique. Il n'est cependant jamais officiellement condamné ni chassé des trois académies où il siège ni destitué de la direction de la ferme-modèle de Léninskié Gorki, bien qu'il continue à nier l'existence des gènes ! À partir de ce moment-là, le pouvoir s'évertue à éviter le scandale en étouffant les condamnations des thèses lyssenkistes qui se font jour dans les milieux scientifiques dès la chute de KHROUCHTCHEV.

Retraité paisible, il s'éteint en 1976.

Épilogue

Le titre même de cet article en suggère les conclusions.

1.- Dans les sciences de la vie, le facteur temps joue un rôle important : on y compte souvent en générations. Ainsi l'impact négatif de LYSSSENKO sur la génétique russe ne se limite-t-il pas à la période pendant laquelle il eut des responsabilités, en gros de 1927 à 1967, soit quarante longues années ; l'affaire LYSSSENKO marqua profondément ces quarante ans qu'elle dura et bien au-delà sous BREJNEV, successeur de KHROUCHTCHEV, au moins jusqu'à la mort de BREJNEV en 1982. Si l'on compte avec l'inertie des systèmes, le délai nécessaire au rétablissement des compétences et la réticence des personnels installés, on peut admettre que les effets s'en sont fait sentir bien après la disparition de l'URSS, indubitablement jusqu'à la fin du XXème siècle. L'auteur peut affirmer qu'à l'époque où il parcourut l'URSS -de 1977 à 1989- les conséquences des errements passés étaient bien palpables chez les professionnels, aussi bien chercheurs en laboratoires que producteurs aux champs.

Ce fut donc un drame dans le temps pour la Recherche.

2.- Par ailleurs il faut garder présent à l'esprit que l'Union soviétique fut l'inspiratrice et l'animatrice d'une vaste zone soumise à son influence à tous points de vue : les Républiques socialistes soviétiques et en particulier l'Europe de l'Est. Le "modèle" mitchourinien y fut donc exporté et imposé, comme l'auteur a pu également en constater les effets bien après la disparition de l'URSS en 1991. Souvent privés d'accès aux publications et aux congrès extérieurs à cette zone d'influence, de nombreux professionnels de la sélection furent empêchés d'exercer efficacement et rationnellement pendant de longues années. Le régime fut moins sévère en Allemagne de l'Est où les traditions scientifiques étaient peut-être mieux ancrées qu'ailleurs, mais il fut plus rigoureux dans la Pologne d'après-guerre qui commençait à peine à se rétablir de l'épuration des milieux intellectuels par les nazis et les bolchéviques.

L'affaire LYSSSENKO fut donc aussi un drame dans l'espace pour la Recherche.

3.- Enfin la période dont il est question ci-dessus n'est pas si éloignée de nous dans le passé, on ne parle pas du Moyen-Âge : lorsque LYSSSENKO mourut, l'auteur avait 26 ans et se trouvait à la veille de son premier voyage en URSS ! La conclusion est donc qu'il faut que nous restions vigilants. Pour preuve : l'accueil bienveillant, voire enthousiaste, du lyssenkisme dans un premier temps, au sein de plusieurs pays occidentaux dont la France, la Belgique et la Grande-Bretagne. Jacques MONOD, Prix Nobel de biologie français, analysa l'affaire LYSSSENKO comme "*l'épisode le plus étrange et le plus navrant de toute l'histoire de la Science*". Puisse cet épisode nous faire réfléchir sur la vulnérabilité de celle-ci et ses rapports à la politique ! Peut-être le mot de la fin revient-il au biologiste français Jean ROSTAND, de l'Académie française : "*Ne tombons pas dans le ridicule de politiser les chromosomes !*" ?

Nicolas VAVILOV est aujourd'hui considéré comme le plus grand généticien de son temps.

Curieusement, il aimait à répéter :

"Жизнь коротка, надо спешить" (*La vie est courte, il faut se dépêcher*)...



LA CONSTRUCTION MÉTALLIQUE FRANÇAISE DU 21^e SIÈCLE

par Jean-Pierre MUZEAU

Professeur Honoraire de Polytech Clermont-Ferrand (ex CUST)

Directeur scientifique du CHEC (Centre des Hautes Études de la Construction)

Président de l'APK (Association pour la Promotion de l'Enseignement de la Construction Acier)

Conférence de Jean-Pierre MUZEAU à l'ADASTA, le 17 janvier 2017

Résumé : Plusieurs structures en acier particulièrement intéressantes viennent d'être livrées en France très récemment. Certaines, choisies pour être présentées ici, illustrent trois types d'ouvrages : bâtiments, tribunes de stades et ouvrages d'art. Toutes démontrent les multiples possibilités de la construction métallique, la vitalité et la qualité de l'industrie française mais aussi la réalité européenne au travers d'ouvrages quelquefois conçus, calculés ou fabriqués, en partie, dans d'autres pays de l'UE.

1. Introduction

Plusieurs constructions métalliques « hors normes » et particulièrement enthousiasmantes ont vu le jour récemment en France [1],[2]. Certaines ont été choisies pour être présentées ici. Il s'agit de deux bâtiments : la Canopée des Halles à Paris et le musée des Confluences à Lyon, de deux stades : le stade Pierre Mauroy à Lille et le stade de Bordeaux Atlantique, et de deux ponts : le pont Chaban Delmas à Bordeaux et le pont Raymond Barre à Lyon. Ces structures ont été choisies en raison de leur complexité ou de leur originalité. Même si les parties en béton mériteraient également d'être examinées, ce travail voulant mettre en exergue les possibilités de l'acier, seules les parties en acier de ces ouvrages sont décrites.

2. Bâtiments

2.1. La Canopée des Halles de Paris

A Paris, en 2015, quatre constructions considérées parmi les plus importantes de la dernière décennie, viennent d'être achevées. Il s'agit du réaménagement du 1er étage de la Tour Eiffel, de la Fondation Louis Vuitton, de la réhabilitation du Zoo de Vincennes et de la Canopée des Halles. Ne pouvant les présenter toutes, nous avons décidé de nous focaliser sur la Canopée des Halles mais nous invitons vivement les lecteurs intéressés à examiner l'ensemble de ces ouvrages.

Depuis les années 1970, le quartier des Halles de Paris est devenu une zone névralgique de la capitale. C'est en effet une plaque tournante fondamentale pour le réseau de transport parisien avec une moyenne quotidienne d'environ 750 000 passagers. C'est aussi une immense zone commerciale et un lieu d'activités sportives et culturelles. C'est enfin un accès piéton vers le Centre national d'art et de culture Georges Pompidou.

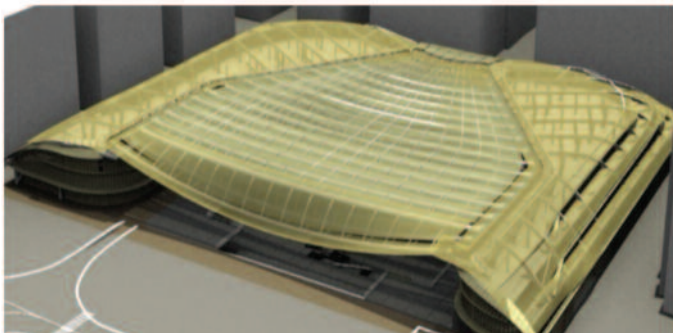


Figure 1 Maquette architecturale (©P. Berger & J. Anziutti)

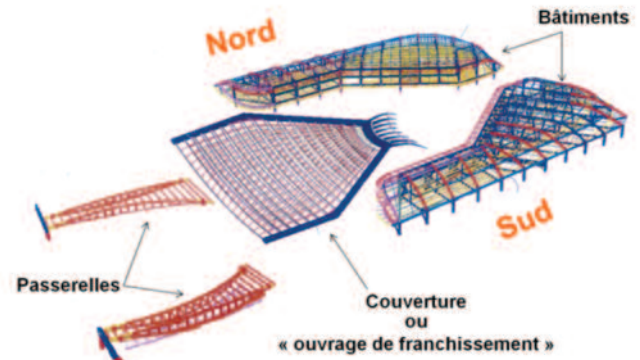


Figure 2 Décomposition de l'ouvrage

Recouvrir cette zone par une structure en acier a représenté un véritable challenge. La structure proposée par les architectes Patrick Berger et Jacques Anziutti, est illustrée à la figure 1.

Du fait de son fonctionnement mécanique, le projet peut être décomposé en trois types de structures distinctes : deux bâtiments principaux, deux passerelles et la couverture (figure 2). Cette dernière, baptisée « ouvrage de franchissement », est en fait un véritable voile de verre et d'acier. L'ouvrage, particulièrement complexe en raison de ses dimensions, a été réalisé par des entreprises du groupe Fayat, le plus grand groupe français de construction métallique : Castel and Fromaget pour les bâtiments, Barbot pour les passerelles et Viry pour la couverture. Ingérop et le CTICM ont assurés un très grand nombre de calculs spécifiques.

Parmi les contraintes imposées au projet, notons que cette structure devait être érigée sans provoquer aucune gêne pour les activités du centre commercial ni pour le réseau de transport. De plus, comme les structures souterraines étaient préexistantes, elles ne pouvaient accepter aucun accroissement de charges significatif. C'est pourquoi, afin d'installer une structure porteuse de faible poids propre, les concepteurs du projet ont tout naturellement proposé d'utiliser l'acier. Ils ont notamment décidé de réduire les portées des poutres principales de deux bâtiments en utilisant des poteaux inclinés et en ayant recours à la construction mixte acier-béton pour les planchers, tout ceci afin d'optimiser autant que possible les matériaux de structure.

Un autre aspect délicat de ce projet a été la conception de l'ouvrage de franchissement. Sa portée maximale est de 96 m dans le sens Nord-Sud pour une longueur d'environ 102 m d'Est en Ouest. Ce gigantesque réseau de poutres Vierendeel extrêmement élancées (figure 3) se traduit par l'installation d'une couverture constituée de panneaux de verre installés sur une structure flexible. Il a donc fallu s'assurer que les déplacements restent limités et contrôlés pour éviter tout risque d'augmentation de contrainte dans le verre. Cette résille est supportée par deux caissons eux mêmes supportés par les deux bâtiments (figure 4).

Parmi les exigences importantes au niveau du calcul, les flèches ont dû être déterminées très précisément à chaque étape de l'installation pour s'assurer du respect de la forme géométrique finale voulue par l'architecte après enlèvement des appuis temporaires. Du fait de la forme relativement plate de la structure et de son comportement élastoplastique fortement non-linéaire géométriquement, des calculs pas-à-pas tenant compte de l'histoire du montage et donc du chargement, ont été nécessaires. Ils ont été réalisés par le CTICM.

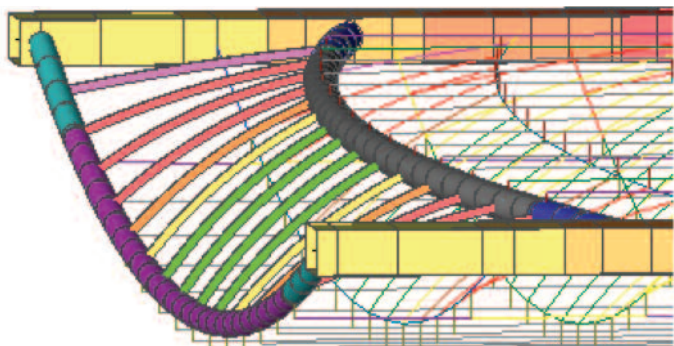


Figure 3 Détail de la structure de la couverture



Figure 4 Phase de chantier (©H.Peter)

Le poids total de la structure est de 70 MN* : 2x18 MN pour les bâtiments, 2x3 MN pour les passerelles, 24 MN pour l'ouvrage de franchissement et 4 MN pour les planchers. Les études ont débuté en novembre 2011, la structure métallique a été terminée fin 2013 et la pose du verre au début de l'année 2014.

2.2. Le musée des Confluences à Lyon

Lyon est la deuxième zone urbaine la plus peuplée en France. Dans cette ville, très importante au plan historique, un grand site de 1,5 km², appelé « Lyon Confluence » (il se trouve à l'endroit où la Saône vient se jeter dans le Rhône) a été entièrement reconfiguré et réhabilité avec l'objectif de doubler le centre ville lyonnais. De nouveaux immeubles de bureaux, de nouveaux bâtiments d'habitation, de nouveaux ouvrages administratifs et publics, de nouveaux commerces et pôles de loisirs y ont été récemment construits. Enfin, un musée très moderne a été érigé pour abriter l'une des collections d'histoire naturelle et des sociétés parmi les plus riches de France. Il a été baptisé « Musée des Confluences ».

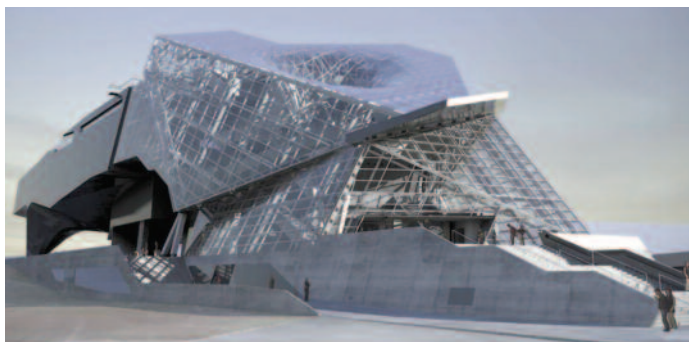


Figure 5 Maquette du projet (©Coop Himmelb(l)au)



Figure 6 . Phase de construction (©J.P. Muzéau)

Ce bâtiment très original a été conçu par « Coop Himmelb(l)au », un cabinet d'architecture de Vienne en Autriche (figure 5). Les calculs généraux du bâtiment ont été menés par la société B+G Ingenieure (Bollinger und Grohmann GmbH) de Frankfurt en Allemagne. Les calculs de la structure métallique et de son montage (figure 6) ont été réalisés par Renaudat & SMB, deux entreprises françaises de construction métallique avec l'aide de Jaillet Rouby, un bureau d'ingénierie basé à Orléans.

Comme l'explique l'architecte : *Ce qui est connu et ce qui doit être exploré est présenté au Musée des Confluences dans un ensemble spatial expérimental conçu pour stimuler la curiosité du public. Le nuage flotte sur ses piles pour donner la flexibilité maximale nécessaire à la conception des expositions. Par contraste, le cristal, s'élevant en direction de la cité, fonctionne comme un forum urbain transparent. Il fait face à la ville et accueille les visiteurs.*

Ces deux éléments (nuage et cristal) sont interconnectés. Le nuage, recouvert d'écailles en acier inoxydable, «flotte» à une hauteur de 8 mètres (figure 7). Le cristal est une structure métallique « transparente » recouverte de panneaux de verre.

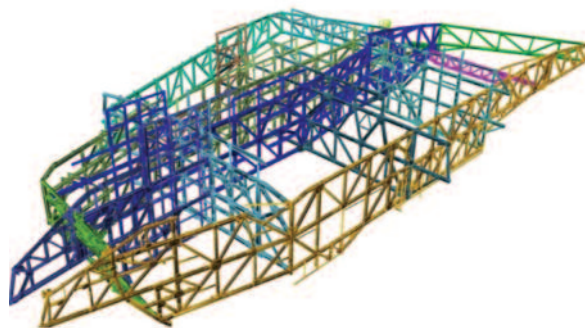


Figure 7 . Structure principale

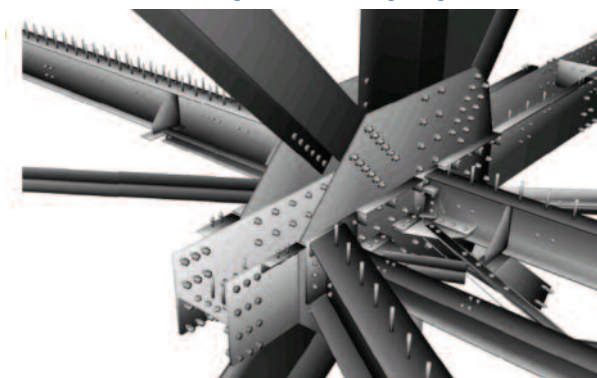


Figure 8 Détail d'assemblage

Les caractéristiques principales du bâtiment sont les suivantes : 46 476 m² pour la surface de plancher hors œuvre brute (SHOB) et environ 29 700 m² pour la surface hors œuvre nette (SHON). Les données spécifiques à la structure métallique sont : un poids de 66 MN et une quantité d'heures de travail énorme (170 000 h pour la fabrication et le montage, 20 000 h pour le calcul, 70 000 h pour les

* MN = méganewton, le MN étant l'unité légale de poids. On rappelle que 10MN correspondent à peu près à une masse de 1000 tonnes.

plans, 30 000 h pour le suivi de chantier). Cette structure est constituée de 650 000 éléments en acier attachés avec 350 000 boulons (figure 8), principalement des HRC.

3. Stades

Pour accueillir l'Euro'2016 en France, quatre stades ont été construits (Lyon, Lille, Bordeaux et Nice) et quatre ont été réhabilités (Marseille, Saint-Etienne, Lens et Toulouse). Deux seulement sont présentés ici : Lille et Bordeaux. Ils ont été choisis en raison de leurs spécificités et de leur forme globale : le premier présente la forme classique d'une arène mais avec un toit mobile, le second est de forme parallélépipédique.

3.1. Le stade Pierre Mauroy de Lille

Les architectes de ce stade sont Valode & Pistre associés à Pierre Ferret. Le calcul et la construction de la structure métallique ont été confiés à Eiffage Métal. Egis a analysé le comportement sismique de l'ouvrage et le Bureau Greisch de Liège en Belgique mené les calculs de la toiture : calculs de la structure porteuse et calculs détaillés des phases d'exécution.

Ce stade est très spécial pour plusieurs raisons. Pour commencer, il est capable d'accueillir environ 50 000 spectateurs pour un match de football et cela sous un toit qui peut s'ouvrir ou se fermer en 30 minutes (figure 9), selon les conditions atmosphériques ou selon son utilisation. Il peut notamment être fermé pendant un spectacle pour réduire les nuisances sonores subies par le voisinage. Il peut ensuite être transformé en une salle de concert de 29 500 places, une moitié de la pelouse (3 960 m²) se positionnant sur l'autre moitié afin de délimiter une petite «boîte de concert».



Figure 9 Vue aérienne (©Eiffage)

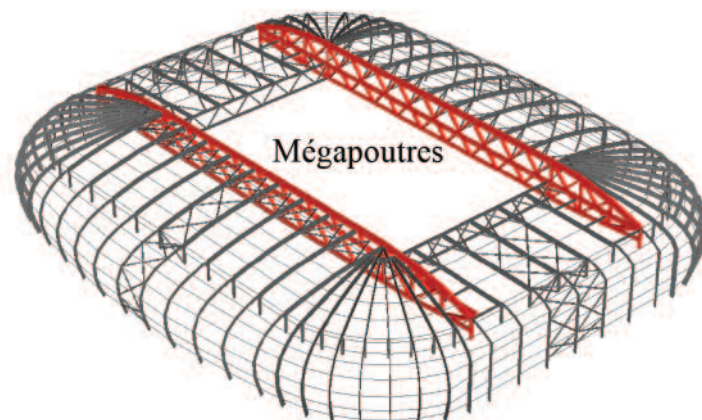


Figure 10 Principe structural (©B.E. Greisch)

L'un des aspects structuraux intéressants de ce stade particulièrement sophistiqué réside dans les deux mégapoutres en treillis qui supportent la toiture (figure 10). D'une part, elles sont conçues de telle manière que leurs mem-

brures inférieures accueillent des câbles de précontrainte en traction limitée pour diminuer les efforts dans les barres tendues permettant ainsi d'en diminuer la section. Grâce à cette technique, le Bureau Greisch a montré qu'il était possible de réduire la hauteur des méga-poutres de 20 m à 16,5 m ce qui conduit à une réduction du poids propre et améliore la visibilité pour les spectateurs. D'autre part, les éléments de la membrure supérieure comprimée transmettent les efforts de compression par simple contact. Bien sûr, tous les nœuds en traction du treillis sont conçus pour représenter des conditions d'articulations parfaites, ceux de la membrure inférieure avec de gros axes allant de 250 à 300 mm de diamètre (figure 11). Notons enfin que les méthodes de construction définies par le Bureau Greisch ont permis d'éviter pratiquement toutes les soudures sur chantier, ce qui a permis de réduire le temps nécessaire au montage de la structure.



Figure 11 Nœud de la membrure inférieure (©J.P. Muzeau)



Figure 12 Levage de la toiture (©G. Tordjman & M. Lerouge)

Les deux méga-poutres, réalisées en acier S460SL, sont d'une longueur de l'ordre de 200 m pour 16,5 m de haut. Le poids de chacune d'entre elles est de 18 MN. Elles ont été assemblées sur site, leur plan principal étant positionné horizontalement. Après assemblage, elles ont subi une rotation d'environ 90° à l'aide de 4 grues mobiles et ont ainsi été amenées en position verticale. Les quatre parties du toit mobile (80 x 35 m) ont alors été installées sur leurs rails et l'ensemble de la couverture (70 MN) a été levé en position finale, à une hauteur de 20 m (figure 12). Le levage a été réalisé en utilisant des câbles installés dans des méga-poutres disposés aux extrémités des poutres puis démontés.

Le poids total de la structure métallique est d'environ 100 MN. Ce stade a été terminé en août 2012.

3.2. Le stade de Bordeaux Atlantique

Les architectes du stade « Bordeaux Atlantique » sont Herzog et De Meuron. Le calcul et la construction de la structure métallique ont été réalisés par le groupe Fayat avec l'aide du Cabinet Jaillat Rouby d'Orléans.

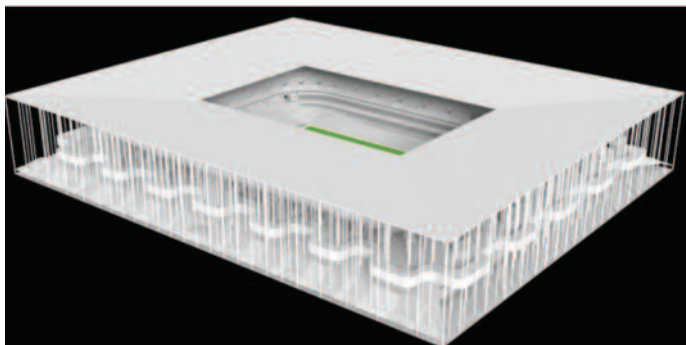


Figure 13 Vue du projet (©Herzog & De Meuron)



Figure 14 Structure des tribunes (©J.P. Muzeau)

Ce stade diffère des stades classiques dont la forme traditionnelle est celle d'un anneau. Celui-ci possède en effet une allure générale de parallélépipède (figure 13). Conçu pour accueillir environ 42 000 spectateurs, il mesure 210 m de large, 233 m de long et 43 m de haut. Sa structure met en évidence un très grand nombre de tubes métalliques (de l'ordre de 900) qui remplissent plusieurs fonctions (figure 14). Environ 300 d'entre eux sont des poteaux destinés à supporter les charges de la couverture, 300 autres sont en traction pour équilibrer le porte-à-faux (figure 15) et les 300 derniers sont principalement décoratifs pour créer, en association avec les précédents, l'illusion d'un ensemble de cylindres rappelant la forêt de pins des Landes, typique de cette région du Sud-Ouest de la France. Bien sûr, quelques-uns des 300 derniers tubes sont utilisés pour dissimuler des équipements ou des services (câbles, gaines, etc.).

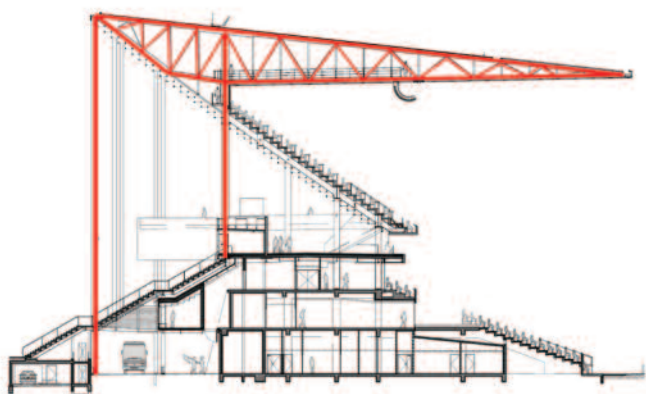


Figure 15 Coupe de l'ouvrage

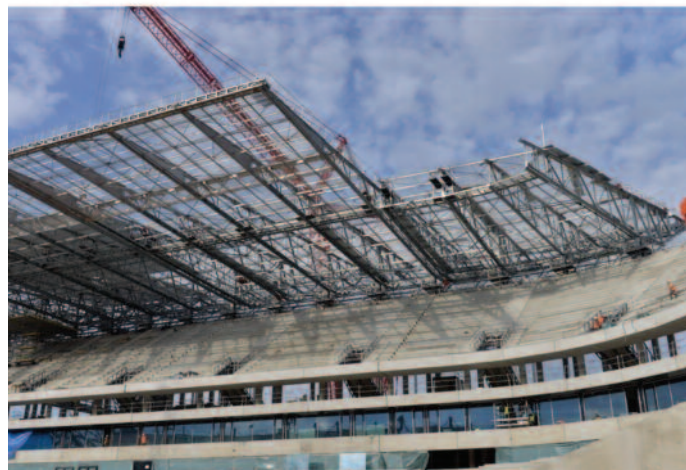


Figure 16 Montage de l'auvent (©J.P. Muzeau)

Parmi les caractéristiques intéressantes de l'ouvrage, signalons que le constructeur métallique se devait de respecter les exigences des architectes, à savoir qu'hormis les tubes, aucun élément structural ne devait être visible. Tous les systèmes de stabilité et les contreventements ont donc été conçus en portiques rigides pour éviter d'avoir recours à des diagonales. Les joints de dilatation ont notamment été réalisés en appuis simples reposant sur la structure voisine pour ne pas avoir à doubler la structure porteuse dans cette zone.

La structure métallique a été fabriquée, galvanisée et peinte dans plusieurs sites du groupe Fayat.

Les 900 tubes ont été réalisés dans une usine située à environ 150 km de Bordeaux.

D'une longueur individuelle de l'ordre de 36 m (35 km de tubes au total), il a fallu avoir recours à des convois exceptionnels pour les amener sur le lieu du chantier. Notons également qu'une grue mobile de très grande capacité (6 MN) a été utilisée pour installer les éléments de l'auvent (figure 16).

La structure porteuse des gradins (figures 14 à 16) est en acier et elle supporte des dalles en béton sur lesquelles les sièges sont installés.

Une étude d'ingénierie incendie a montré que seuls 47 000 m² de l'ouvrage devaient être protégés contre l'incendie sur un total de 200 000 m², conduisant ainsi à une économie de 25 %. Le poids d'acier est de 122 MN.

Il représente 80 000 h d'études, 150 000 h de fabrication et 100 000 h de montage.

Signalons qu'habituellement, en France, pour un stade, la quantité relative béton/acier est de l'ordre de 60/40. Ici, du fait que les tribunes sont portées par une structure métallique, elle est inversée, c'est-à-dire que le ratio est sensiblement de 40/60. Cette conception a ainsi permis au stade de Bordeaux d'être le moins cher des stades construits pour l'Euro'2016 et cela malgré les 300 tubes «décoratifs».

4. Ponts

4.1. Le pont Chaban Delmas de Bordeaux

Un nouveau pont sur la Garonne a été ouvert à Bordeaux en mars 2014. Ses concepteurs sont les architectes Christophe Cheron, Charles Lavigne et Thomas Lavigne (figure 17).

Il a été calculé par Egis avec l'aide de Michel Virlogeux et fabriqué à Venise, en Italie, par la société Cimolai.



Figure 17 Maquette architecturale (©C. Cheron, C. Lavigne & T. Lavigne)



Figure 18 Ouvrage en position basse (©ConstruirAcier)



Figure 19 Le pont en position haute (©C.J. Rouaux)



Figure 20 Installation de la travée centrale (©Cimolaï)

C'est un pont à cinq travées dont la travée centrale (117 m) se lève grâce à quatre pylônes de levage constitués de tours en béton de 77 m de haut (figure 18). Les autres travées latérales (81,3 et 78,5 m sur la rive droite et 62,5 et 71,2 m sur la rive gauche) sont fixes. La travée centrale a été calculée pour pouvoir être levée 60 fois par an et libérer ainsi un gabarit de 106 m de large et 53 m de haut (figure 19).

La travée centrale est constituée d'un caisson orthotope en acier fabriqué en Italie. Pour réduire l'impact environnemental, il a été réalisé en un seul élément (longueur 117 m, largeur 45,3 m et hauteur 3,75 m pour un poids total de 26 MN) et transporté sur barge jusqu'à sa destination finale (figure 20) à 5 500 km du lieu de fabrication. Les autres travées sont constituées de trois PRS en acier assemblés partiellement sur site. Si la travée centrale est entièrement en acier, les autres sont des structures mixtes : poutres en acier connectées à une dalle de béton de 22 cm d'épaisseur.

Le pont Chaban Delmas a été inauguré en mars 2013.

4.2. Le pont Raymond Barre à Lyon

Ce bel ouvrage est situé à Lyon, à proximité du Musée des Confluences. Il traverse le Rhône et il est dû à l'architecte Alain Spielmann (figure 21).

Il a été fabriqué par deux sociétés : l'entreprise Matière basée en France et l'autre Zwahlen & Mayr située à Aigle, en Suisse.

Si elles se sont partagées la fabrication à 50 % chacune, l'entreprise Matière seule a réalisé le montage. Les calculs généraux et ceux des phases de montage ont été effectués par le CTICM.

La plupart des ponts de Lyon étant des ponts en arc, le pont Raymond Barre possède une forme similaire (figure 24) mais avec un seul appui dans le fleuve. Ses caractéristiques principales sont les suivantes : longueur totale de 262 m sur trois travées : 72 m, 152 m et 38 m. Les deux travées de rive sont isostatiques.

Le pont est conçu pour pouvoir supporter deux voies de tramway, des pistes cyclables et des trottoirs piétons.

Du fait de sa proximité avec le Musée des Confluences, il a été prévu pour être une plateforme d'observation et même pour accueillir des équipements (bancs notamment) permettant aux visiteurs de s'installer confortablement en ayant de belles vues sur le musée (figure 21).



Figure 21 Modèle architectural (©A. Spielmann)



Figure 22 Phase de construction (©C. Cheron, C. Lavigne & T. Lavigne)



Figure 23 Transport de l'ouvrage (©Spielmann)



Figure 24 Pont en fonctionnement (©J.P. Muzeau)

La travée principale fonctionne comme la combinaison d'un bow-string et d'un pont en arc classique. Elle est constituée de deux arcs inclinés extérieurement à 10° par rapport à la verticale. Le tablier est supporté partiellement par les arcs : d'un côté, au niveau de la pile, il est relié aux arcs alors qu'il est simplement appuyé à l'autre extrémité. Du côté de l'appui dans le Rhône, il se prolonge par une partie en porte-à-faux d'environ 20 m. Sur la pile, les arcs passent donc sous le tablier pour s'élever par-dessus et le rejoindre harmonieusement à l'autre extrémité. La hauteur des arcs est de 17,5 m. La partie en porte-à-faux et la travée centrale ont été montées et assemblées sur un chantier situé au bord du fleuve à quelques centaines de mètres de la position finale (figure 22), puis transportées à l'aide de deux barges flottantes (figure 23).

Le tablier est un tablier orthotrope raidi par des dia-
phragmes espacés de 4 m et il se complète de part et d'autre par des éléments en console destinés à supporter les voies

cyclistes et piétonnes.

La fabrication ayant été assurée par deux entreprises différentes situées dans des pays différents, il a fallu s'appuyer sur des normes communes. C'est pourquoi cet ouvrage a été réalisé en respect des exigences techniques de la nouvelle norme exécution européenne NF EN 1090-2 [3].

Des renforts spécifiques ont dû être mis en place pour le montage et le transport. Ils ont été installés dans le sens vertical mais aussi horizontal du fait de l'inclinaison des arcs à 10° .

Le poids total d'acier est de 33 MN : respectivement 5 et 3 MN pour les travées de rive et 25 MN pour la travée centrale.

Ce pont a demandé 12 300 heures de soudage correspondant à un poids de soudures de 82 kN.

5. Conclusion

Toutes ces structures démontrent que l'industrie de la construction métallique française continue de prolonger l'œuvre de Gustave Eiffel en offrant au public des ouvrages fantastiques et attractifs même si leurs utilisateurs ne réalisent pas toujours l'importance de l'acier dans ces constructions. Ces projets soulignent également le fait que l'Europe est une réalité puisque certaines de ces structures ont été conçues ou fabriquées en partie dans d'autres pays européens.

Elles démontrent également qu'avec l'aide d'outils de calcul efficaces et particulièrement sophistiqués (logiciels de calcul non linéaires, modélisation 3D, etc.), les structures en acier peuvent sans cesse se complexifier, permettant ainsi aux ingénieurs structure, en association avec les architectes, de développer leurs talents de concepteurs. Elles mettent aussi en évidence le fait que des économies substantielles sont toujours réalisables si l'on peut prouver par le calcul que la sécurité ou la fiabilité ne sont pas affectées en optimisant les matériaux de structure. Elles concrétisent enfin la réalité de l'ingénierie incendie qui autorise aujourd'hui une évaluation précise du comportement au feu des ouvrages et par voie de conséquence une meilleure gestion des mesures de protection.

Pour terminer, soulignons, que la plupart de ces projets ont été conçus en s'appuyant sur le concept BIM sans lequel la gestion des interactions entre les entreprises auraient probablement été trop complexe pour obtenir des structures en acier aussi spectaculaires.

6. Bibliographie et sites internet

- [1] Muzeau Jean-Pierre - Recent steel construction in France. Presentation of some of the most spectacular projects. Conférence EUROSTEEL'2014, Naples, Italie, pp. 21-30
- [2] Muzeau Jean-Pierre - La construction métallique française du 21e siècle, CICOMM'2015, octobre 2015, Tlemcen, Algérie.
- [3] AFNOR - Exécutions des structures en acier et des structures en aluminium - Partie 2: Exigences techniques pour les structures en acier. Norme NF-EN1090-2.
- [4] <http://travaux.forumdeshalles.com>
- [5] <http://www.parishalles.fr/le-projet/la-canoepc-0027>
- [6] <http://www.coop-himmelblau.at/architecture/projects/musee-des-confluences>
- [7] <http://structurae.info/ouvrages/musee-des-confluences>
- [8] http://www.greisch.com/projet_grand_stade_lille_couverture_stade.html
- [9] <http://www.eiffage.com/cms/le-groupe-eiffage/realisations/projets-acheves/gslm.html>
- [10] <http://www.fayat.com/Realisations/Nouveau-Stade-de-Bordeaux/>
- [11] <http://pontchabandelmas.lacub.fr/un-nouveau-pont-sur-la-garonne/>
- [12] <http://www.construiraacier.fr/familles-douvrages/ponts-et-passerelles/le-pont-chaban-delmas-a-bordeaux/>
- [13] <http://www.construiraacier.fr/familles-douvrages/ponts-et-passerelles/le-pont-raymond-barre-a-lyon/>

7. Remerciements

L'auteur tient à remercier très chaleureusement toutes les personnes qui l'ont aidé en lui fournissant les éléments et informations techniques nécessaires à la rédaction de cet article. Il s'agit plus particulièrement de Francis Keledjian et Pierre Engel (ArcelorMittal), Jean-Marie Cremer & Vincent de Ville de Goyet (B.E. Greisch), Sébastien Brun (Castel & Fromaget), Laure Delaporte (ConstruirAcier), Valérie Boniface & Hannah Cocagne (Eiffage Branche métal), Florent Millot (Jaillet Roubay), Fabien Vabre (Matière), Olivier Laizeau (Renaudat), Dominique Dhier (SMB) et Jean-Pierre Tahay (Viry).



LE MYSTÉRIEUX PARFUM DES ROSES

par **Jean-Claude CAISSARD**

Enseignant - Chercheur

Laboratoire de Biotechnologies Végétales appliquées aux Plantes Aromatiques et Médicinales. FRE CNRS 3727. Université Jean Monnet 42023 Saint-Etienne

Compte-rendu de la conférence de Jean-Claude CAISSARD

12 octobre 2016

Dans sa conférence fascinante M. Caissard a décrit un travail de recherche en biotechnologie végétale qui est en cours. Présenter d'une manière détaillée le contenu riche de son exposé nécessiterait un long développement. Pour être exhaustif, il faudrait puiser dans les articles publiés par son laboratoire, ce qui reviendrait à une forme de mise au point. Nous avons choisi plus simplement d'enrichir son résumé de présentation à l'ADASTA avec les premières pages de cinq publications remises par le conférencier et qui jalonnent ce travail, en ajoutant quelques commentaires allégés de non spécialiste.

Résumé de la conférence

La rose est la reine des fleurs et son parfum enchante l'homme depuis l'antiquité grecque. Les fleurs de la plupart des espèces botaniques du genre *Rosa* sont parfumées et à tous les stades de leur domestication, le parfum a constitué un caractère extrêmement important.

Cependant, les sélections modernes de roses à longue tenue en vase ont conduit à la mise sur le marché de roses non-parfumées sans qu'on connaisse la cause de cette perte de parfum. Malgré de nombreuses études chimiques du parfum des roses, les voies de biosynthèse des principaux composés du parfum sont encore mal connues chez cette plante.

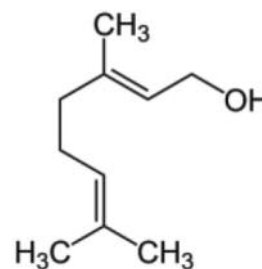
Nous étudions actuellement plusieurs gènes qui interviennent dans la biosynthèse du parfum chez la rose. Par une combinaison d'approches transcriptomiques, nous avons récemment montré que les terpènes, composés responsables de l'odeur typique de rose, sont produits par une voie de synthèse originale qui n'avait jusqu'à présent jamais été décrite chez les plantes. La découverte d'un gène particulier, *RhNUDX1*, permet d'envisager son utilisation comme marqueur durant la sélection des rosiers, de manière à pouvoir, dans un avenir proche, acheter chez le fleuriste des bouquets de roses parfumées.

Commentaire

Ce résumé situe les grands points qui marquent le programme ambitieux abordé. L'idée centrale est de mieux cerner « **les voies de biosynthèse des principaux composés du parfum** » qui passent par l'étude du génome et des protéines enzymatiques impliquées constituant les catalyseurs de synthèse des molécules odorantes dont la majorité est connue, avec une finalité bien définie.

« Les molécules odorantes émises par les roses se classent en trois familles biochimiques. La première, celle des oxylipides, contient des molécules volatiles dérivées des acides gras. On y trouve par exemple des hexénols, aussi présents dans l'herbe coupée. La deuxième famille contient des molécules dérivées de la phénylalanine, un acide

aminé. Parmi elles, on peut citer l'eugénol, majoritaire dans l'odeur des clous de girofle ainsi que l'alcool phényléthylique, présent en grande quantité dans l'eau de rose après distillation. La dernière famille, celle des terpènes, rassemble les produits de la polymérisation de deux molécules à cinq carbones. On retrouve cette famille de molécules dans toutes les plantes. Chez la rose, certains terpènes apportent une finesse olfactive qui permet aux parfumeurs de distinguer les extraits naturels des produits artificiels. C'est cette famille de molécules qui nous a intéressés. Plus spécifiquement, nous avons travaillé sur le géraniol, un terpène de structure acyclique qui participe au parfum particulier de la rose et que l'on retrouve dans d'autres essences comme celles du géranium odorant ou du basilic. Pas une seule voie de biosynthèse des composés odorants de la rose n'était connue lorsque nous avons débuté notre travail, il y a une dizaine d'années. » (citation de J.-C. Caissard, La Recherche : référence 3, p.72)



Géraniol

L'approche transcriptomique est l'étude des ARN messagers produits lors du processus de transcription d'un génome. Elle repose sur la quantification de ces ARNm, ce qui permet d'avoir une indication relative du taux de transcription de différents gènes dans des conditions données. Plusieurs techniques permettent d'avoir accès à cette information, en particulier celle de la PCR quantitative.

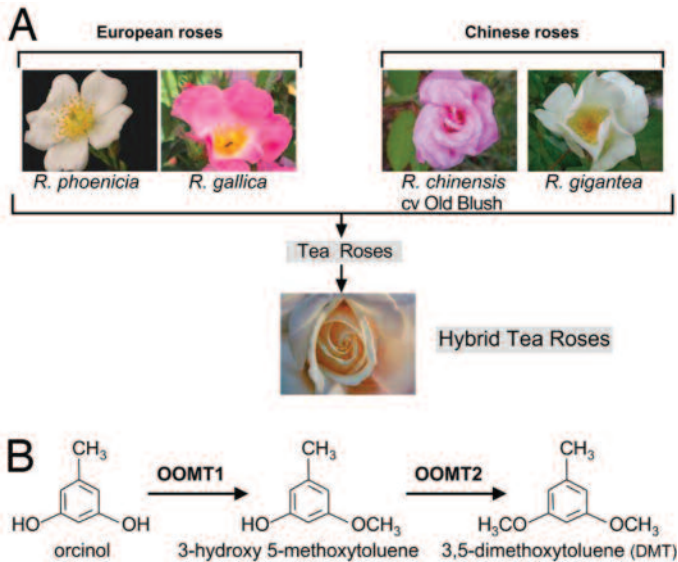
Différents laboratoires avec des spécificités marquées en particulier dans les techniques pratiquées participent au programme de recherche. Ce type de collaborations est devenu nécessaire, il conduit à un ensemble de résultats qu'un laboratoire seul ne pourrait pas obtenir.

Publications

Les trois premières publications proposées peuvent être avantageusement consultées par les lecteurs intéressés. Ces revues bien connues s'efforcent de rendre accessibles aux non spécialistes les travaux en cours des chercheurs. Leur graphisme est élaboré, cela est particulièrement possible avec les innombrables types de roses dont le laboratoire de Biotechnologies Végétales de l'Université de Saint-Etienne est le dépositaire.

Commentaire

La biosynthèse du 3,5-diméthoxytoluène (DMT), responsable de l'odeur de thé de la rose de Chine à l'origine et son évolution dans les variétés actuelles, est examinée en profondeur depuis l'approche génétique jusqu'à la modélisation moléculaire des enzymes impliquées (OOMT) dans les réactions de méthylation pour le substrat à partir de l'orcinol (3,5-dihydroxytoluène).



5. Science



Biosynthesis of monoterpene scent compounds in roses

Jean-Louis Magnard, Aymeric Rocchia, Jean-Claude Caissard, Philippe Vergne, Pulu Sun, Romain Hecquet, Annick Dubois, Laurence Hibrand-Saint Oyant, Frédéric Julien, Florence Nicolè, Olivier Raymond, Stéphanie Huguet, Raymonde Baltenweck, Sophie Meyer, Patricia Claudel, Julien Jauffre, Michel Rohmer, Fabrice Foucher, Philippe Huguency,* Mohammed Bendahmane,* Sylvie Baudino*, 349, 81, (2015)

Résumé (traduction) : L'odeur des roses (*Rosa x hybrida*) est composée de centaines de molécules volatiles. Les monoterpènes représentent jusqu'à 70% du contenu du parfum dans certains cultivars, tel que la rose Papa Meiland. La biosynthèse des monoterpènes dans les plantes est reliée à des terpènes synthases localisées dans le plaste.

En combinant les approches transcriptomiques et génétiques, nous montrons que la Nudix hydrolase RhNUDX1, localisée dans le cytoplasme, constitue une partie du chemin dans la biosynthèse des alcools monoterpéniques libres qui contribue au parfum des roses. La protéine RhNUDX1 montre une activité géranyl diphosphate diphospho hydrolase in vitro en faveur de la biosynthèse du géraniol dans les plantes.

Conclusion

Depuis quelques décennies les revues scientifiques sont classées suivant leur « impact factor » qui situe le niveau d'importance de celles-ci dans le monde de la recherche. Sans entrer dans les détails on peut affirmer que « Science » figure au premier rang.

Le conférencier a décrit la difficulté rencontrée pour faire accepter les travaux « sur la biosynthèse des parfums monoterpéniques dans les roses » par le comité de lecture composé de spécialistes très exigeants demandant sans cesse des compléments.

Finalement, c'est en **page de couverture du tome 349** que l'article s'est retrouvé, comme événement scientifique marquant.

La conférence de Jean-Claude Caissard constitue à bien des égards un modèle qui montre comment la recherche fondamentale en amont d'une application très bien définie est indispensable, si l'on veut arriver à une réponse précise et conduit à des publications scientifiques de haut niveau. Elle illustre la démarche qui est menée actuellement dans le domaine des biotechnologies appliquées à un système vivant à partir du génome.

Gageons que Georges Delbard (1906 - 1999), originaire de Malicorne proche de Commentry (Allier), pépiniériste et grand rosieriste français qui a effectué des recherches sur les origines des roses jusqu'en Chine et en Syrie, auteur du « Grand Livre de la rose », et créateur de nombreuses roses, aurait été passionné par ce travail qui s'approche de la possibilité donnée au rosieriste de créer une merveilleuse rose ayant retrouvé son parfum d'antan.



PROGRAMME DES CONFÉRENCES 2017

MERCREDI 19 AVRIL - 17h45

Thème abordé : *La Science et le Patrimoine Artistique*

Auteur **Gérard MOUILLAUD**

Spécialiste des couleurs Membre de l'ADASTA

MERCREDI 10 MAI - 17h30

Thème abordé : *Archéologie Aérienne*

Auteur : **Jean-Claude CLAVAL**

Président du CERAA

(centre d'études et de recherches d'archéologie aérienne)

MERCREDI 14 JUIN - 17h30

Thème abordé : *Mouvement de la Terre ou Connaissances Nouvelles sur Pluton*

Auteur : **Luc DETTWILLER**

Professeur de Physique et observateur

associé à l'observatoire du Pic du Midi, Membre de l'ADASTA

MERCREDI 20 SEPTEMBRE - 17h30

Thème abordé :

Des bactéries dans des nuages bien vivants

Auteur : **Pierre AMATO**

Chargé de recherches CNRS Institut de Chimie Clermont-Ferrand

MERCREDI 11 OCTOBRE - 17H30

Thème abordé : *Les mammifères sauvage en Auvergne*

Auteur **Charles LEMARCHAND**

Chargé de missions Faune Sauvage et Habitats

Gérant de Catiche Productions

MARDI 14 NOVEMBRE - 17H30

Thème abordé :

Les eaux souterraines : spécificités de l'Auvergne et de l'impluvium de Volvic, impacts du changement global

Auteur **Patrick LACHASSAGNE**

Responsable Environnement et Ressources en Eau

Water Institute by Evian

MERCREDI 13 DÉCEMBRE - 17h30

Thème abordé :

Cartographie du cerveau humain et stéréotaxie : principes et applications médicales

Auteur **Jean-Jacques LEMAIRE**

Neurochirurgien CHU Clermont-Ferrand

PROGRAMME DES SORTIES-VISITES 2017

26 AVRIL - 3 MAI

Visite botanique du Jardin des plantes
Clermont-Ferrand

4 MAI

Sur les pas des mineurs du XIX^{ème} siècle :

Mine d'antimoine de La Rodde

Eoliennes + anciens moulins

Christian VIALARON

Guide auprès du plateau d'Ally (Haute-Loire)

21 JUIN

Excursion en Livradois :

- Mus'Energie

- Musée de la Radio et Jeux électroniques

Ambert - Saint-Victor sur Arlanc

15 SEPTEMBRE

Centre de Technologie Michelin Europe

Site de Ladoux - Clermont-Ferrand

AUTOMNE (2 JOURS)

Laser Mégajoules

A programmer en partenariat avec la SFEN Auvergne

Site CESTA à Barp (Gironde)

A PROGRAMMER

CETIM

(Centre d'Etudes Techniques des Industries Mécaniques)

Saint-Etienne

- **TRELLEBORG** - Clermont-Fd

- **Musée de la mine** - Brassac-Les-Mines

- **Carrière et industrie des diatomées** - Murat

Cité Internationale de la Tapisserie

tapisserie inscrite au patrimoine de l'UNESCO

Aubusson

Fabrication codeurs optiques

Codéchamp à Champagnat (23)



Remise des Palmes académiques
à Jean-Claude Capelani et Jean Chandezon
par Annie Veyre le 22 février 2017

ADASTA

Adhésions et Abonnements

Adhésions à titre individuel : 30 €

Adhésions à titre collectif : 80 €

L'adhésion donne droit à la revue Auvergne-Sciences, à des invitations aux conférences et aux visites d'entreprises (une participation aux frais peut être demandée lors de certaines visites).

Permanences :

elles sont assurées par les bénévoles : lundi de 14h à 17h, mercredi de 9h à 12h

En cas d'absence laisser un message sur répondeur ou E-mail.

Adresser le courrier à :

ADASTA

POLYTECH Clermont-Ferrand

Campus Universitaire des Cézeaux

2 avenue Blaise Pascal - TSA 60206 - CS 60026 - 63178 AUBIÈRE CEDEX

Siège social : 10 rue de Bien-Assis - 63100 Clermont-Ferrand

Tél. 04 73 40 51 83

E-mail : adasta3@gmail.com

Site internet : www.adasta.fr



Dépôt légal Avril 2017

N° ISSN - 1166-5904

Histoires de Plantes et autres...

Par Michel Gendraud (dessins et textes)

DONS DU SOLEIL



Quand les étoiles furent allumées au cosmos, elles firent en leurs cœurs le carbone, l'oxygène, et le fer, si stable qu'il abonda. La Terre reçut un lot de ces éléments et le fer, alors ferreux, fut dissous dans l'océan primitif. Il eût fallu le soleil d'un marais salant pour le récupérer.

Le soleil intervint, avec la bactérie bleue. Elle proliféra par l'énergie qu'il lui céda, en libérant l'oxygène de l'eau. Avec ce gaz, le fer s'oxyda en hématite insoluble qui tomba au fond de l'océan, pigment et futur minéral.

Des bactéries bleues, domestiquées en chloroplastes, alimentèrent les plantes en énergie et l'oxygène toujours plus abondant, permit la respiration. Prairies et forêts s'installèrent, et les animaux qui les habitent et s'en nourrissent. Le soleil les entretenait tous.

L'Homme vint et domestiqua le feu. Avec l'hématite dégagée par la tectonique des plaques et le charbon de bois donné par ses foyers, il orna les parois des cavernes de bisons, et de biches, le charbon faisant contour, le pigment devenant corps.

Plus tard, mélangeant charbon et pigment, il y mit le feu et obtint le fer à forger. Avec deux produits, dons du soleil acquis par la photosynthèse, l'Homme touchait à l'Art et à la Technologie

HELICES ET ESCALIERS

L'escalier du phare allie trois polarités à la géométrie de l'hélice. Il est doté d'un bas et d'un haut, édifié du bas vers le haut, et le gardien l'aborde en le montant. Si, à la lanterne, il fait demi-tour, il annule une polarité, sauf à descendre par un autre escalier, comme il le pourrait à Chambord. Antiparallèles, ces escaliers en double hélice le seraient par usage comme les brins de l'ADN, autre double hélice connue, le sont par nature.

A Chambord, pour mimer l'ADN dès la construction, il fallait assembler l'escalier montant de bas en haut et l'escalier descendant de haut en bas, et produire les deux dans un chantier unique allant vers le haut.

Ce chantier aurait fait en continu l'escalier montant et, dans l'autre sens, de courts fragments de l'escalier descendant. De longueur limitée par la course même du chantier, ces fragments se seraient ensuite raboutés. Pour l'ADN, ces fragments ont été vus en 1968 par Reiji et Tsuneko Okazaki et portent leur nom.

