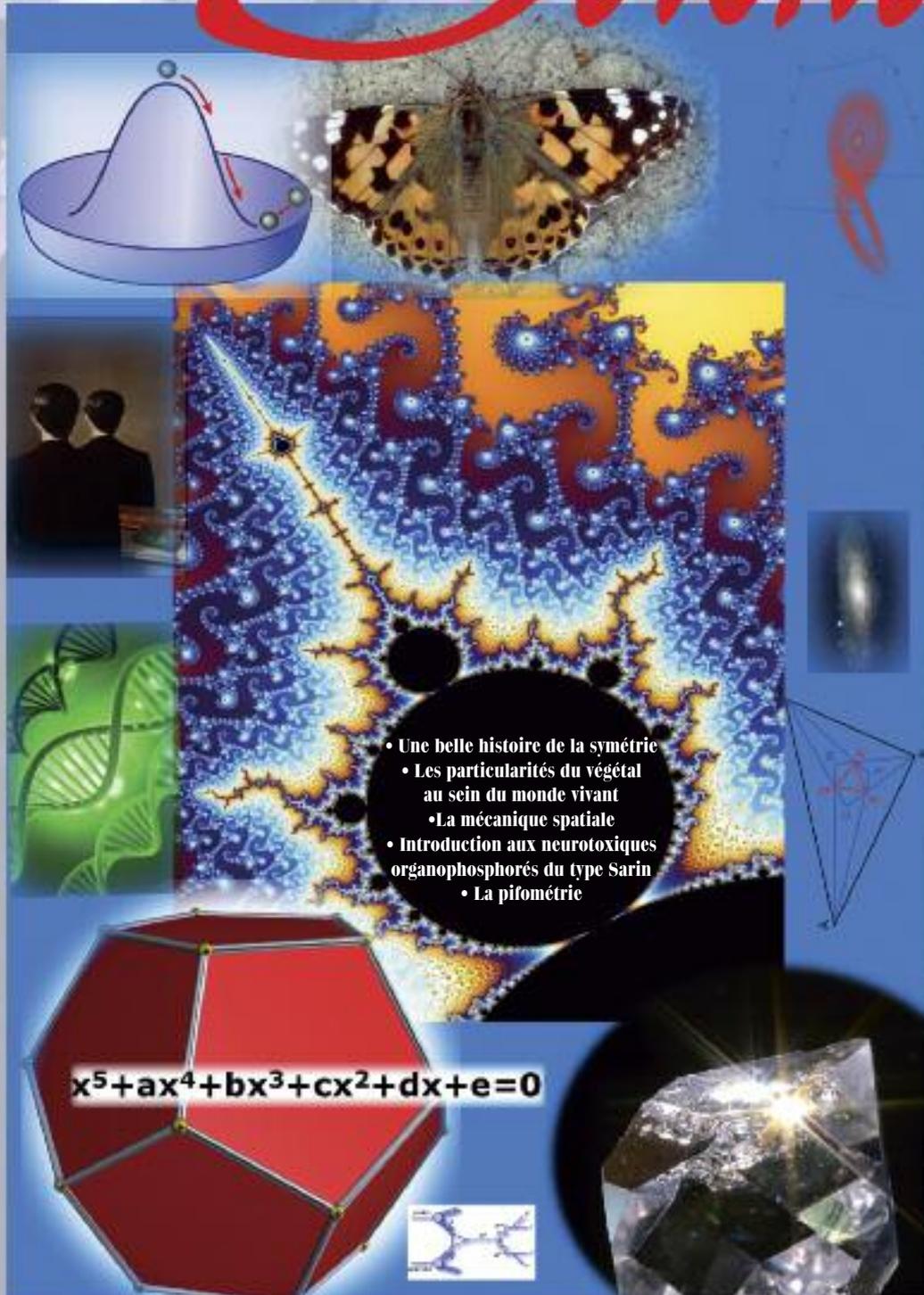


AUVERGNE

Sciences



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



EDITORIAL



L'Adasta est heureuse de vous faire part d'événements favorables pour notre Association :

- La Mairie de Chamalières, malgré le décès de son premier adjoint Alain Bresson, a confirmé sa décision de mettre en place un cadran solaire calculé et conçu par Gérard Baillet, ingénieur et spécialiste national de cette activité. Il s'agit d'un ensemble original, le seul en France, dont la partie acier inox sera fournie par Aubert et Duval et dont le socle, conçu par l'Adasta, sera réalisé par les services techniques de la Mairie de Chamalières. Sa mise en place est prévue fin 2014 dans le parc Montjoly. Une plaque sera apposée indiquant l'ADASTA et le nom du concepteur.

- Nous avons eu l'occasion de décerner deux prix ADASTA, le premier lors d'une manifestation au lycée polyvalent de Chamalières organisée par l'UDPPC et l'autre au lycée Albert Camus de Clermont-Fd où l'ADASTA a récompensé les actions scientifiques sur les risques naturels tels que : tsunamis, éruptions volcaniques, avalanches, tremblements de terre, cyclones...

- Une conférence «spéciale» est prévue 5 novembre au Pôle Commun POLYTECH / ISIMA (amphi 1) avec M. Jean-Marie MUS, Directeur Physique et Modélisation des Performances chez Michelin sur le sujet suivant : "Economie circulaire dans le pneumatique selon Michelin". Nous ferons le nécessaire pour que cet événement soit largement diffusé dans les médias, avant, pendant et après.

- La photo ci-dessous montre les 3 médailles que l'ADASTA a obtenues de la Mairie de Chamalières durant ces dernières années, récompensant ses actions.

- Nous étions présents, comme tous les ans, à différentes manifestations en Auvergne, entre autres le Forum des Associations à Clermont et à Chamalières, et à des événements scientifiques comme Expo-Sciences et la Fête de la Science à Clermont et Aurillac.

- En 2014, 180 adhésions individuelles et collectives ont été enregistrées, dépassant ainsi le niveau 2013.

- Le nombre moyen de participants à nos conférences s'est stabilisé à 70 soit le double d'il y a 3 ans. Toutes nos félicitations vont à notre responsable Georges ANTON qui a su dynamiser cette activité et fidéliser l'auditoire.

Bien d'autres activités sont prévues dont nous vous ferons part ultérieurement.

Très cordialement à vous tous.

Le Président Henri Bouffard



MERCI À NOS SPONSORS



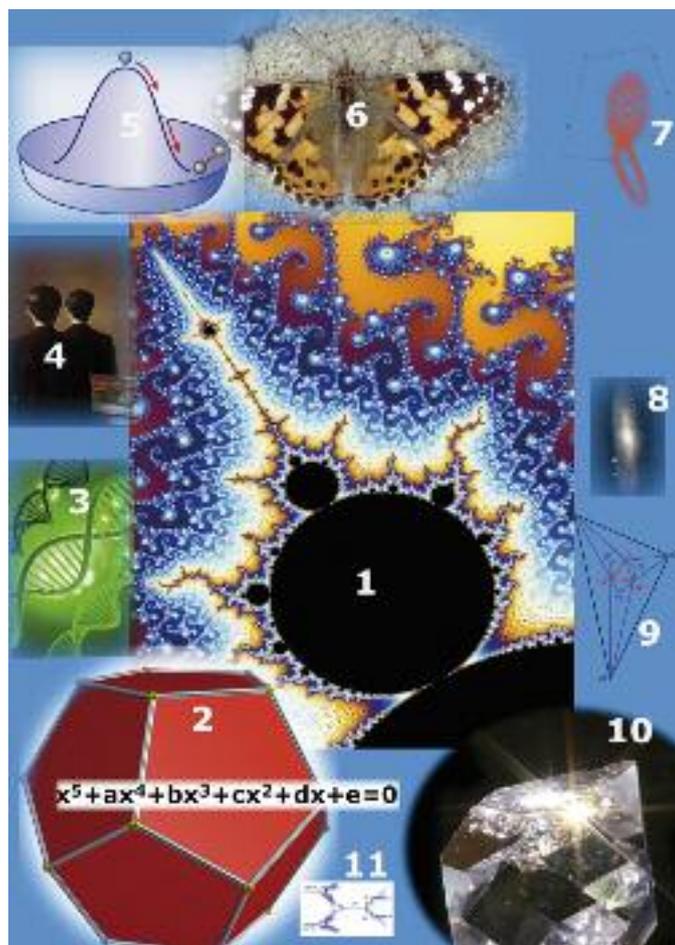
S O M M A I R E

Une belle histoire de la symétrie	01
Les particularités du végétal au sein du monde vivant	32
La mécanique spatiale	37
Introduction aux neurotoxiques organophosphorés du type Sarin	42
La pifométrie	49
Visite du Cern à Genève décembre 2013	54
Visite de la chaufferie bio-masse Clermont-Nord	57
Activités de l'Adasta	60

photo couverture : voir explication en avant dernière page.

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

LÉGENDE DES ILLUSTRATIONS DE LA PREMIÈRE DE COUVERTURE.



- 1 Structure fractale de l'ensemble de Mandelbrot illustrant la symétrie par invariance d'échelle.
- 2 L'équation polynomiale de degré cinq qui a entraîné Evariste Galois dans ses réflexions sur les permutations des sommets d'un dodécaèdre, point de départ de la théorie des groupes. Ce solide de Platon est aussi la base de l'espace dodécaédrique de Poincaré qui est un bon candidat pour la topologie de notre univers.
- 3 Double hélice d'ADN.
- 4 «La Reproduction Interdite» de Magritte illustre le comportement d'un vecteur axial dans une symétrie miroir.
- 5 Potentiel en chapeau mexicain montrant la brisure de symétrie dans les problèmes à solutions multiples.
- 6 Papillon.
- 7 Papillon de Lorenz illustrant le chaos déterministe et la génération de symétrie dans des processus chaotiques.
- 8 Galaxie d'Andromède.
- 9 Théorème de Morlet ; tout triangle quelconque contient un triangle équilatéral dont les sommets sont aux intersections des trisectrices du triangle quelconque.
- 10 Jeu de lumière sur les faces d'un cristal de quartz.
- 11 Diagramme de Feynman pour la création et l'annihilation d'un boson BEH.

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: **ADASTA, Centre Riche-Lieu**

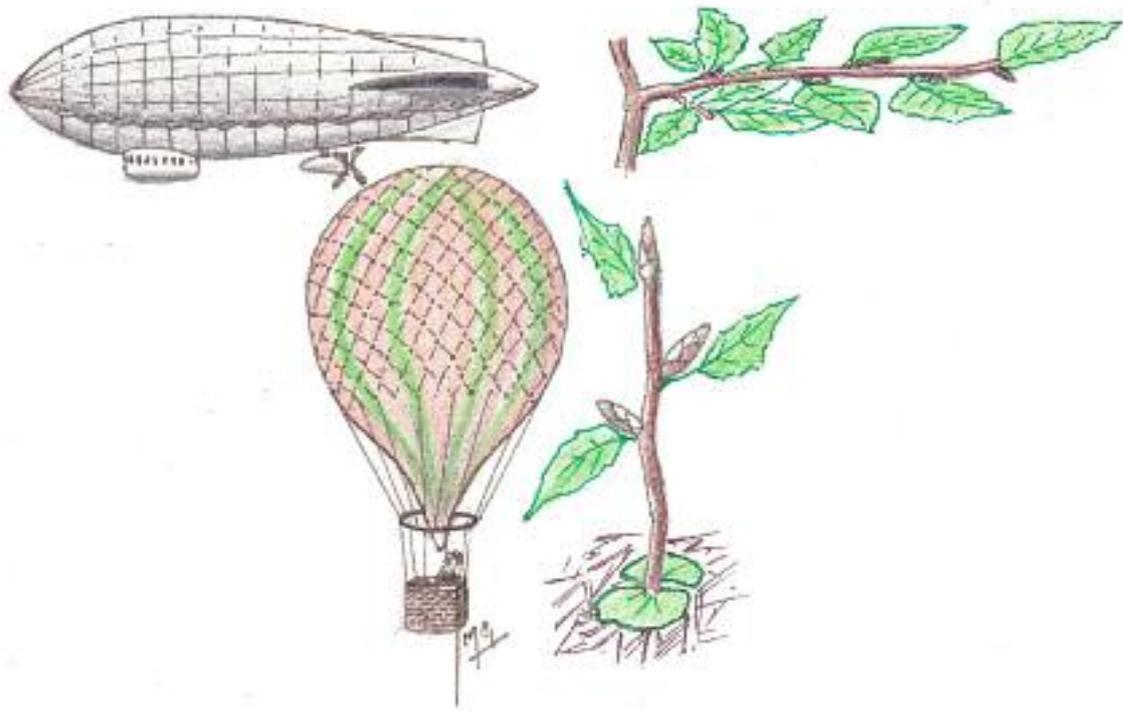
13 rue Richelieu - 63400 Chamalières

Siège social : 10 rue de Bien-Assis - 63000 Clermont-Ferrand

Tél. 04 73 92 12 24

E-mail : adasta@wanadoo.fr - Site internet : www.adasta.fr

Dépôt légal octobre 2014 - N° ISSN - 1166-5904



SYMETRIES ET POLARITES

Il suffit de vider deux sacs de lest pour que le ballon à gaz emporte la nacelle vers le firmament. Il suffit à la germination de vider ses deux cotylédons pour que le scion du jeune arbre s'élève vers le ciel. Il suffit à la jeune pousse et à l'aérostat d'avoir un haut et un bas, une polarité verticale, et une symétrie axiale pour effectuer leurs ascensions.

Quand le ballon, devenu dirigeable part à l'horizontale, il remplace la symétrie axiale par une polarité longitudinale, passerelle à l'avant, hélice à l'arrière et acquiert une symétrie bilatérale, bâbord à gauche, tribord à droite, comme le rameau horizontal surgi du scion, pointe en avant, qui étale ses feuilles sur sa droite et sur sa gauche.

Qu'il s'agisse du produit d'une faine ou d'une technologie, polarités et symétries sont les pactes à passer avec la pesanteur pour occuper l'espace.

Michel Gendraud (juillet 2014)



UNE BELLE HISTOIRE DE LA SYMÉTRIE

BRUNO RAKINSKI

Physicien et membre de l'ADASTA

INTRODUCTION

Les symétries dans la Nature nous fascinent depuis l'Antiquité grecque, mais ce n'est qu'au XIX^e siècle que le concept de Symétrie se détache des considérations mystiques, esthétiques et géométriques auxquelles il était associé.

Je dois l'intérêt porté à ce sujet à d'éminents professeurs rencontrés à Paris durant ma vie étudiante.

J'ai eu en effet l'immense chance

- d'apprendre avec **Hubert Curien** la théorie des groupes de symétrie appliquée à la cristallographie ;

- de me perdre dans les espaces de Riemann avec **Yvonne Choquet-Bruhat** présentant comme des évidences les symétries et invariances conduisant à la mal nommée relativité générale ;

- de m'émerveiller devant la mécanique quantique enseignée par **Claude Cohen-Tannoudji** et appliquée aux symétries internes dans les noyaux ;

- de voir l'universalité de phénomènes aussi différents que les transitions de phase dans les cristaux liquides ou les supraconducteurs, la percolation dans les polymères ou les spins de cristaux magnétiques avec **Pierre-Gilles de Gennes**.

J'espère être à la hauteur de leur enseignement pour faire partager l'importance de ce sujet dans l'évolution de la physique mais aussi plus généralement, de la démarche scientifique.

Derrière l'évolution du concept de Symétrie se cachent des notions simples et d'autres extrêmement complexes. Pour faciliter la lecture de cet article, nous avons fait le choix de renvoyer les notions complexes dans les parties II et III, même si pour les besoins de l'argumentation ou de la perspective historique elles ont été survolées dans la partie I. Bien que l'éclairage soit différent, certains thèmes abordés ici peuvent avoir des points communs avec ceux traités dans l'important travail de Louis Avan [1]. Nous avons fait le choix, pour éviter des redites, de ne pas traiter ces points ici et de renvoyer le lecteur vers les paragraphes correspondants dans son article. Il reste qu'avec les résultats expérimentaux d'une part et les réflexions théoriques d'autre part, ces articles doivent être considérés comme étant complémentaires.

Pour permettre au lecteur d'aller plus loin, des références bibliographiques sont données à la fin. Elles sont classées par difficulté croissante :

Niveau vulgarisation.

Niveau enseignement supérieur.

Niveau recherche.

Dans l'histoire humaine, la notion de Symétrie a considérablement évolué. La juste proportion, l'harmonie, l'ordre, l'unité par la réunion des opposés, définissaient la symétrie. La pensée scientifique a fait évoluer progressivement cette notion en la complétant par celle d'invariance [4]. Mais déjà pour Platon la symétrie est ce qui persiste au milieu du changement.

Nous présenterons au travers d'exemples en biologie, chimie, physique, mathématique et cosmologie, un vaste panorama sur les symétries, les lois de conservation associées, les brisures de symétries et les propriétés émergentes qui leur sont liées.

L'illustration, par les grandes découvertes qui ont jalonné ce chapitre de l'histoire des sciences, sera l'occasion d'honorer la contribution majeure des scientifiques français.

Nous tenterons de faire partager l'importance doublement fondamentale de ces réflexions.

- Fondamentale, car cette approche englobante se révèle extrêmement riche et porteuse de progrès dans les différentes sciences.

- Fondamentale, car le vivant avec ses molécules chirales entretient une relation particulière avec la Symétrie.

«Si les principes immédiats de la vie sont dissymétriques, c'est que, à leur élaboration, président des forces cosmiques dissymétriques. L'univers est dissymétrique. La vie est dominée par des actions dissymétriques...» (Louis Pasteur 1883)

Alice se demandait si le lait aurait le même goût dans le monde derrière le miroir, et si les notions de «gauche» et de «droite» ont vraiment une réalité physique. Pourquoi un miroir inverse-t-il la gauche et la droite et pas le haut et le bas ?

Nous tenterons de répondre à ces questions, et visiterons les propriétés d'autres miroirs inventés pour illustrer des symétries nouvelles et des invariances prévues ou observées dans les développements récents de la physique.

L'exposé sera organisé en trois parties :

- Les symétries et leurs brisures : observations et vocabulaire.
- Un mariage heureux des mathématiques et de la physique.
- La Symétrie, puissant moteur de découvertes.

I - LES SYMÉTRIES ET LEURS BRISURES : OBSERVATIONS ET VOCABULAIRE

I.1 - De l'Antiquité à Kepler : naissance du raisonnement «par symétrie».

Pour **Platon** (-427 -347), le monde se définit par cinq éléments : le Feu, l'Air, l'Eau, la Terre et l'Univers (ou l'éther). Il associe à chacun d'eux un polyèdre régulier inscriptible dans une sphère. Toutes les faces sont des polygones réguliers isométriques : leurs côtés sont égaux et leurs angles également. Il n'existe que cinq polyèdres réguliers possédant de telles propriétés : le tétraèdre, l'octaèdre, l'icosaèdre, le cube et le dodécaèdre. La perfection de ces polyèdres symbolise parfaitement les cinq éléments. Mais de façon très moderne, Platon présentait aussi la symétrie, comme ce qui reste invariant dans un changement. Cette notion d'invariance prendra dans l'histoire des sciences un poids croissant.

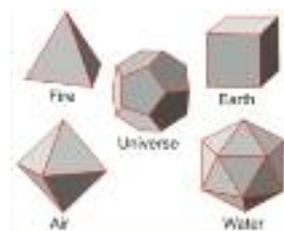


Fig I.1 Les solides de Platon

Aristote (-384 -322) dans son Traité du Ciel (livre II 13-15) nous dit «D'après la manière dont les astres se montrent à nous, il est prouvé que non seulement la Terre est ronde, mais même qu'elle n'est pas très grande, car il nous suffit de faire un léger déplacement, vers le sud ou vers l'Ourse, pour que le cercle de l'horizon devienne évidemment tout autre...»

Avec l'ombre circulaire de la Terre sur son satellite lors des éclipses de Lune et les navires qui semblent s'enfoncer dans les flots à l'approche de l'horizon, Aristote tient en trois arguments la preuve de la rotondité de notre planète. Mais il va plus loin. Il en donne une explication physique : « *Chaque portion d'élément terre qui constitue la planète possède une tendance à se mouvoir vers le centre de la Terre. Cette chute provoque une agglomération des différentes parties, tassement et compression, et impose que le volume total soit approximativement semblable sur chaque côté, autrement dit que la Terre ait sensiblement la forme régulière et symétrique de la sphère* ». C'est la première apparition de la notion de figure d'équilibre et de raisonnement par symétrie.

Aristote, s'appuie sur une loi générale de symétrie : en langage moderne nous dirions que pour lui, la Terre est sphérique parce que la loi de la gravitation doit être isotrope. Quand on utilise aujourd'hui massivement, et a priori, la Symétrie dans des raisonnements en physique quantique ou relativiste, deux des trois piliers de la physique moderne, on n'agit pas autrement. Mais avec Aristote, nous sommes deux mille ans avant Newton !

Kepler (1571-1630) considérait que la Symétrie est sous-jacente à la structure de la matière et de l'Univers. Il a associé chaque solide de Platon à une planète en remarquant que les sphères représentant les orbites des planètes pouvaient contenir les solides de Platon. Il considérait que les orbites des planètes autour du soleil sont structurées selon des proportions et des motifs très précis dans une harmonie divine absolument parfaite. Chaque polyèdre est inscrit dans une sphère et circonscrit dans une autre à la manière des poupées russes. A Saturne il associe le cube, à Jupiter le tétraèdre, à Mars le dodécaèdre, à Venus l'icosaèdre et à Mercure l'octaèdre. La terre qu'il présente comme l'image de Dieu, sert de séparation entre deux solides.

En 1611, il explique la symétrie hexagonale des flocons de neige à partir de l'assemblage compact d'hypothétiques sphères microscopiques. Pour la première fois, une symétrie macroscopique est interprétée par un modèle microscopique.



Fig I.2 Modèle de Kepler du cristal de neige.

Aujourd'hui, en météorologie et en climatologie, les modèles numériques globaux des flux atmosphériques emploient des grilles, des maillages, basées sur un icosaèdre à la place de la classique grille longitude/latitude. Ceci a l'avantage d'avoir une résolution spatiale également distribuée sans singularités (les pôles géographiques).

Les milieux ésotériques sont encore convaincus que « *les solides de Platon, émettent de puissantes ondes de formes qui nous aident dans notre démarche spirituelle en nous permettant d'accéder à d'autres niveaux de conscience* ».

I.2 Activité optique et substances organiques : Vers le carbone tétraédrique.

Jean-Baptiste Biot (1774-1862) avait observé que les cristaux de quartz font tourner le plan de polarisation de la lumière. En outre avec deux cristaux de quartz de forme asymétrique, il

constata que si l'un d'eux fait tourner le plan de la lumière polarisée dans le sens des aiguilles d'une montre, alors l'autre, son image dans un miroir, le fait tourner dans le sens inverse.

Sachant qu'après dissolution de ces cristaux de quartz la solution devenait optiquement inactive, J.B. Biot concluait que : le pouvoir rotatoire du quartz n'est pas lié à une asymétrie propre à la molécule, mais est une conséquence de l'organisation asymétrique de ces molécules dans une structure cristalline. Mais il trouva également que certaines solutions de composés organiques issus du monde vivant présentaient cette faculté de faire tourner le plan de polarisation malgré l'absence de structure cristalline. Il fit alors l'hypothèse, difficile à vérifier à l'époque, que l'activité optique de ces solutions devait être associée à une asymétrie interne propre aux molécules organiques dissoutes.

Un des étudiants de J.B. Biot se passionna pour cette hypothèse concernant des molécules organiques du monde vivant.



Fig I.3 Louis Pasteur

Louis Pasteur (1822-1895) savait que l'acide tartrique et l'acide racémique étaient des substances parfaitement identiques dans leurs propriétés chimiques. La seule différence entre les deux produits étant leur action sur la lumière polarisée. Le premier fait tourner le plan de polarisation alors que le second n'a pas d'action. Louis Pasteur est séduit par l'hypothèse de Biot et entreprend une patiente recherche pour mieux cerner une asymétrie gauche droite des molécules de ces substances. Sous microscope, les cristaux d'acide tartrique se révèlent asymétriques et tous de même sens, alors que les cristaux d'acide racémique se révèlent être un mélange en proportions égales de cristaux d'acide tartrique et de cristaux qui sont leur image dans un miroir (on parle d'énantiomorphe).

A partir du mélange de cristaux de l'acide racémique, sous microscope, il trie les deux types de cristaux, puis réalise deux solutions avant d'en étudier les pouvoirs rotatoires respectifs.

Une des solutions se comporte exactement comme la solution d'acide tartrique naturel alors que l'autre dévie le plan de polarisation de la lumière, mais en sens inverse et du même angle. Pasteur conclut à la justesse des prévisions de son professeur : les résultats des observations peuvent s'interpréter à partir d'une asymétrie droite-gauche au niveau des molécules, avec une rotation du plan de polarisation vers la droite (molécule dextrogyre notée (+)), ou vers la gauche (molécule levogyre notée (-)).

Quelques années après cette étape majeure, Louis Pasteur fait une autre découverte déterminante.

Une solution d'acide racémique, donc optiquement inactive, devient active après l'action de moisissures. Il démontre que ces microorganismes consomment une forme de molécule et laissent l'autre forme intacte. Les molécules des deux types n'étant plus en nombre égal, la rotation moyenne du plan de polarisation ne

peut plus être nulle et la solution devient donc optiquement active.

Louis Pasteur avait l'intuition que le monde vivant est construit fondamentalement à partir d'agents asymétriques. Sans avoir les moyens de le démontrer, il évoquait comme source de l'asymétrie moléculaire, des atomes arrangés selon une hélice ou un tétraèdre irrégulier ou, de toutes façons, suivant une organisation non superposable à son image dans un miroir.

Une solution d'acide racémique, donc optiquement inactive devient active après l'action de moisissures. Il démontre que ces microorganismes consomment une forme de molécule et laissent l'autre forme intacte. Les molécules des deux types n'étant plus en nombre égal, la rotation moyenne du plan de polarisation ne peut plus être nulle et la solution devient donc optiquement active.

Pasteur voyait une asymétrie dans le magnétisme et pensait que c'était une manifestation d'une dissymétrie cosmique. Les physiciens du XIX^{ème} siècle étaient dans cette logique. Ils considéraient que la déviation de l'aiguille aimantée d'**Oersted** (1777-1851) expliquée par **Ampère** (1775-1836) lors du passage d'un courant électrique dans un fil, expérience non symétrique dans un miroir, signalait une mystérieuse asymétrie des lois de la nature. **Ernst Mach** (1838- 1916) était choqué par ce résultat. [5], [6].

Les physiciens se trompaient, et Pasteur avec. Mais il restera une contribution essentielle dans la difficile définition de la Vie : une différence fondamentale entre le monde inerte et le monde vivant, est la capacité pour un organisme vivant de prélever dans son milieu des produits exclusivement droits (ou gauches) ou des composés symétriques afin de synthétiser et d'intégrer une forme exclusivement droite (ou gauche).

L'erreur de Mach, et de beaucoup de physiciens, est liée à des grandeurs vectorielles qui sont de nature profondément différentes. Cette différence de nature est révélée de façon spectaculaire quand on applique à ces grandeurs une symétrie miroir. Le résultat est alors totalement inversé.

Pour un vecteur ordinaire, tel qu'une vitesse, une force ou un champ électrique, un miroir conserve le sens du vecteur quand miroir et vecteur sont parallèles, alors qu'il inverse ce sens lorsque miroir et vecteur sont perpendiculaires.

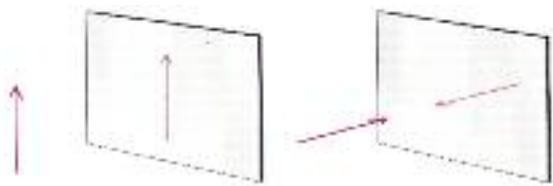


Fig I.4 Symétrie d'un vecteur dans un miroir.

C'est un comportement exactement inversé que l'on observe avec des «vecteurs» tels que moment cinétique, spin, champ magnétique. Le miroir inverse le sens du «vecteur» quand miroir et vecteur sont parallèles, alors qu'il conserve ce sens lorsque miroir et «vecteur» sont perpendiculaires.

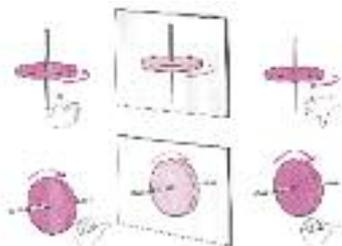


Fig I.5 Symétrie d'un «pseudo-vecteur» dans un miroir.

Ce type de «vecteur» se rencontre avec des rotations d'objets et nécessite une convention de sens pour fixer une définition cohérente, par exemple la règle de la main droite dans laquelle le pouce indique le sens du «vecteur».

Les physiciens parlent parfois de vecteur polaire pour désigner le vecteur classique, et de vecteur axial ou pseudo vecteur pour désigner le « vecteur » lié à une symétrie par rotation. Pour les mathématiciens, ces deux objets mathématiques fondamentalement différents sont nommés différemment : vecteur pour le premier et 2-forme ou tenseur antisymétrique d'ordre deux pour le second.

Il n'est donc pas étonnant que les premières expériences impliquant à la fois un champ électrique et un champ magnétique (donc les deux types) aient posé des problèmes de symétrie aux physiciens du XIX^{ème} siècle.

C'est en 1874 que **Joseph Achille Le Bel** et **Jacobus Henricus Van't Hoff** proposent une théorie sur l'asymétrie optique des substances organiques comme étant une conséquence de la structure tétraédrique de l'atome de carbone.

Pour Le Bel et Van't Hoff, l'atome de carbone est placé au centre d'un tétraèdre dont les quatre sommets sont occupés par des atomes ou des groupements d'atomes. Si ces atomes ou groupements sont différents, alors la molécule ne peut être superposable à son image dans un miroir et il peut exister une forme gauche et une forme droite (les formes énantiomorphes). Cette idée, avait été émise une dizaine d'année plus tôt mais sans être argumentée comme le firent indépendamment Le Bel et Van't Hoff, avec la notion de liaison chimique. Cette théorie fut mal acceptée au début : «*Une philosophie spéculative misérable*», avant que l'accumulation de preuves la valide définitivement.

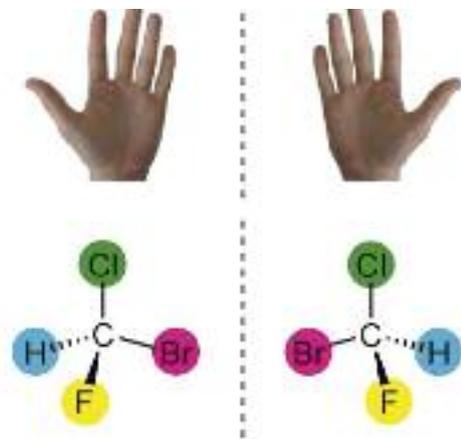


Fig I.6 Formes gauche et droite d'une molécule avec carbone asymétrique.

Le Bromo chloro fluoro méthane est un exemple de molécule présentant deux énantiomères qui sont comme les mains gauche et droite, images dans un miroir.

Lord Kelvin parle de chiralité au sujet de l'asymétrie fondamentale des composés du carbone de la matière vivante.

La chiralité n'est pas exclusivement liée à la structure tétraédrique. Alfred Werner (1866-1919) a postulé puis démontré la structure octaédrique des complexes de métaux de transition. Il a isolé des énantiomères purs de complexes métalliques et ne présentant aucun atome de carbone. Pour ces travaux, **Alfred Werner** a reçu le prix Nobel de Chimie en 1913.

I.3 La Symétrie et la Vie

Aujourd'hui, on sait que la vie est un phénomène basé sur la chiralité. Sa transmission est assurée par la machinerie génétique qui n'utilise dans le milieu naturel que les composés ayant la chiralité conforme aux récepteurs déjà chiraux. Le lait dans le miroir d'Alice contient la forme de l'acide lactique qui est présent dans les muscles après un effort.

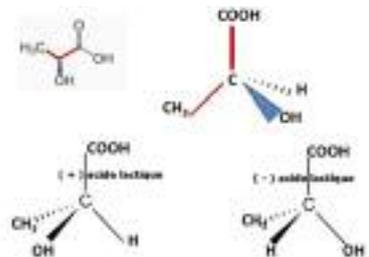


Fig I.7 Acide lactique, formes gauche et droite.

L'odeur des agrumes est due à une molécule chirale : le limonène. L'une des formes (+) est responsable de l'odeur d'orange, l'autre (-) de citron. Nos récepteurs olfactifs sont chiraux.

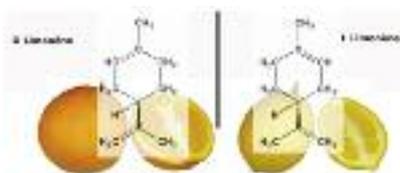


Fig I.8 Les deux formes du limonène.

La thalidomide présente une forme qui allège les nausées des femmes enceintes, mais l'autre qui induit des malformations graves du fœtus.

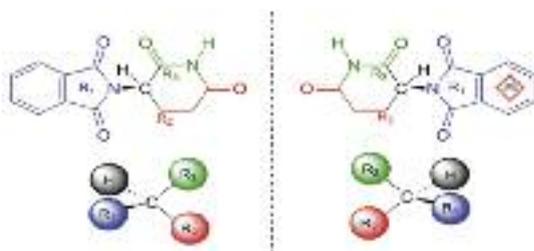


Fig I.9 Thalidomide forme thérapeutique, forme nocive.

Aujourd'hui les conséquences de la chiralité des molécules ne peut plus être ignorée. Des enjeux médicaux, industriels et économiques importants aiguillonnent les laboratoires pour la production de molécules stéréospécifiques par synthèse asymétrique ou catalyse asymétrique [7].

Les acides aminés (-) représentent la totalité des acides aminés de nos protéines. Les acides aminés (+) qui pourraient être fatals sont dégradés par des enzymes. Seul le glycofolle (qui ne possède pas de carbone asymétrique) est optiquement inactif. La fonction acide d'un acide aminé peut réagir avec l'amine d'un autre acide aminé pour former une liaison peptidique et donc des chaînes polypeptidiques, puis des protéines constituées d'une ou plusieurs chaînes.

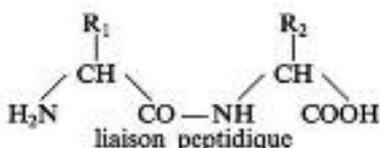


Fig I.10 Liaison de base des protéines.

Ces protéines contiennent des milliers d'unités d'acides aminés, dans un ordre rigoureusement déterminé. Leur structure

tridimensionnelle leur confère des propriétés très spécifiques (hormones, enzymes, anticorps, récepteurs). Les propriétés fonctionnelles d'une protéine donnée dépendent étroitement de sa structure spatiale ; toute variation de celle-ci peut entraîner d'importantes variations de sa fonction. La spécificité de la structure spatiale permet de faire émerger la reconnaissance moléculaire par complémentarité (système clé-serrure).

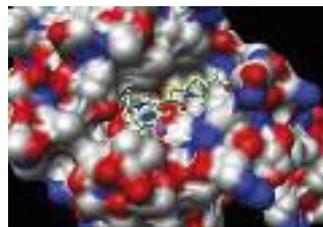


Fig I.11 Exemple de structure de protéine avec un site actif qui fonctionne à l'image du système clé-serrure.

Par exemple, sur un site actif, l'enzyme accepte la molécule gauche et refuse la molécule droite. Les chimistes utilisent des règles de nomenclature pour désigner les molécules chirales. Ces désignations sont sans correspondance avec les propriétés optiques de ces molécules (lévogyres ou dextrogyres) et n'ont donc pas de signification fondamentale. Elles ne sont pas utilisées ici, car inutiles dans l'esprit de cet article.

La question de l'origine de l'exclusivité de la forme lévogyre (-) des acides aminés pour l'ensemble du vivant est largement débattue [8]. Un modèle est privilégié aujourd'hui. Il fait intervenir une autocatalyse par les formes (-) et (+), suivie d'une consommation de ces formes (-) et (+) par réaction entre elles, avec apparition d'une brisure spontanée de la symétrie de la réaction. Cette brisure spontanée de symétrie est liée directement aux cinétiques des deux réactions, autocatalyse et consommation. L'écriture des équations des cinétiques montre que pour certaines concentrations initiales, le système est instable, il peut alors évoluer rapidement vers une forme plutôt que l'autre. Plus précisément, soient deux molécules non chirales A et B placées dans un volume d'eau et qui réagissent pour former une molécule chirale X qui existe donc sous les formes lévogyre, X₋ et dextrogyre, X₊.

$A+B \rightleftharpoons X_-$ ou X_+ . Si l'on accorde à X un rôle d'auto catalyseur, X réagit avec A et B pour produire une seconde molécule X₋ ou X₊ selon $A+B+X \rightleftharpoons 2X_-$ et $A+B+X \rightleftharpoons 2X_+$ c'est l'auto-catalyse. Les énantiomères peuvent aussi réagir ensemble pour former le produit C selon $X_- + X_+ \rightarrow C$ c'est la consommation. Sans autre considération ce système chimique est symétrique et ne devrait donc pas favoriser une forme par rapport à l'autre. Les concentrations respectives [X₋] et [X₊] devraient rester égales. C'est ce que l'on observe aussi longtemps que le produit des concentrations $\lambda = [X_-][X_+]$ reste inférieur à une valeur critique λ_c . Au delà, le système évolue vers un état où l'un des énantiomères prédomine.

Cette brisure de symétrie, ce basculement, a lieu au hasard. Pour l'étudier plus finement, il est nécessaire d'écrire les équations des cinétiques de réaction en suivant les valeurs de $\alpha = [X_+] - [X_-]$, qui est une mesure de la dissymétrie, en fonction de λ . C'est ce qui a été fait il y a vingt cinq ans par **Franck Moss** de l'université de St Louis par calcul numérique à partir des équations de cinétique.

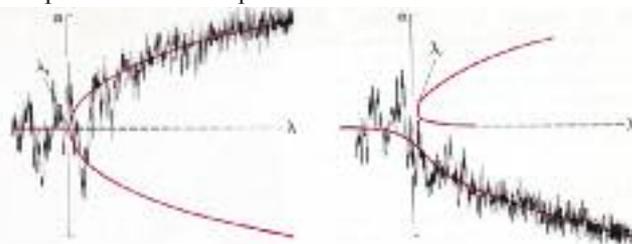


Fig I.12 Modèle de bifurcation et d'amplification de dissymétrie.

La dissymétrie, α est nulle pour $\lambda < \lambda_c$. Pour $\lambda = \lambda_c$ la courbe montre une bifurcation et pour $\lambda > \lambda_c$, une symétrie brisée où l'une des deux branches est choisie au hasard, ici la branche supérieure qui correspond à un enrichissement croissant de X_+ la forme dextrogyre. En agissant sur les paramètres de simulation, il est possible de privilégier la forme lévogyre dans les conditions initiales d'évolution du système. Un excès de l'ordre de seulement 1% pour $[X_-]$ conduit systématiquement au choix par le système de la branche inférieure à partir de la valeur critique λ_c . C'est un mécanisme d'amplification.

Ce comportement de sensibilité aux conditions initiales pour un système parfaitement déterministe et régi par une équation simple, est un exemple de chaos déterministe, domaine particulièrement étudié actuellement. En outre dans certains systèmes physiques complexes (la turbulence par exemple), un lien paradoxal entre chaos et symétrie a été observé et calculé avec des ordinateurs puissants [9]. Il est fascinant de constater qu'un système, même simple, décrit par une équation parfaitement déterministe, peut engendrer un comportement totalement imprévisible, chaotique, avant de laisser émerger de cette dynamique chaotique... une symétrie ! Cette remarque laisse entrevoir que la compréhension profonde du concept de symétrie, ou de sa brisure, est fondamentalement de nature mathématique. Ce sera l'objet du chapitre II.

Mais il est tout aussi fascinant de découvrir qu'à côté du mécanisme d'amplification qui permet de passer d'un excès en acide aminé lévogyre de 1% à 100%, la cause première du léger excédent est spatiale. En effet depuis une trentaine d'années, l'hypothèse fondée sur le rôle de la lumière stellaire polarisée sur les énantiomères d'acides aminés trouve des justifications expérimentales de plus en plus nombreuses et convaincantes. L'absorption et la dégradation irréversible d'un énantiomère par la lumière dépend de la polarisation de celle-ci. Mais en outre, la synthèse d'acides aminés dans l'espace est elle-même orientée par la polarisation de la lumière, de sorte que les deux processus [synthèse favorisée de (-) et dégradation favorisée de (+)] conduisent à l'excès initial de la forme lévogyre avant que le mécanisme d'amplification entre en jeu. Les spécialistes du domaine (**Laurent Nahon** en France) ne sont pas loin de conclure que l'homochiralité est à l'origine de la vie.

1.4 La genèse de la cristallographie

La Symétrie joue un rôle important dans l'étude des structures cristallines et de leur propriétés.

Une des études phares est la détermination de la structure cristalline de la double hélice d'ADN par **J. Watson** et **F. Crick** en 1953 (Nobel de Médecine 1962). Le livre qui relate cette découverte [10] est devenu un grand classique de la littérature scientifique.

La régularité d'aspect et de forme des cristaux dans la nature avait été observée de longue date. Dès le XVII^{ème} siècle, on remarque en laboratoire que quand un cristal croît dans un milieu stable, invariant, sa forme reste inchangée durant sa croissance, comme si les éléments constitutifs identiques étaient ajoutés de façon continue au cristal. Les observateurs émettent alors l'hypothèse qu'un cristal est formé de la répétition régulière de petits éléments identiques. Ce sujet d'étude est d'abord celui des naturalistes avant que les chimistes, les physiciens puis les mathématiciens s'y intéressent.

Au XVIII^{ème} siècle, les minéralogistes trouvent que les orientations des faces de tout cristal peuvent être définies par des nombres qui sont dans des rapports entiers. L'abbé **René Just**

Haüy (1743-1822) explique un grand nombre de formes naturelles de cristaux, la constance des angles des faces adjacentes et donc la notion de clivage ; il montre aussi l'impossibilité de construire un cristal avec des prismes pentagonaux et enfin fait passer à la postérité le terme de « maille élémentaire ». Son apport à la connaissance de la matière est considérable. Cependant, ses déductions ne sont pas suffisantes pour décrire l'ensemble des structures cristallographiques. Un cristal, et plus précisément un réseau cristallin, est la répétition d'une maille élémentaire dans les trois directions de l'espace, avec la notion de pavage : un cristal est un objet périodique.

Structure cristalline = réseau + base

En 1848, **Auguste Bravais** (1811-1853) à partir d'une étude purement mathématique sur la classification des cristaux, décrit l'ensemble des structures possédant des symétries d'orientation compatibles avec la triple périodicité des cristaux dans les trois directions de l'espace (symétrie de translation). Il trouve ainsi 32 classes de symétrie réparties en 14 types de réseaux, les réseaux de Bravais que l'on peut regrouper en 7 systèmes définissant la forme de la maille élémentaire. Bravais confirme l'impossibilité de la symétrie d'ordre 5. C'est le théorème de restriction cristallographique qui indique que les opérations de symétries rotationnelles d'un cristal sont limitées à des opérations d'ordre 1, 2, 3, 4 et 6.

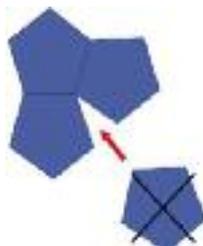


Fig I.13 Pavage du plan impossible avec des pentagones.

La figure I.13 illustre le théorème de restriction cristallographique. L'impossibilité de paver un plan avec des pentagones est directement liée à l'impossibilité d'une symétrie par rotation d'ordre 5, c'est à dire de $2\pi/5$.

Vers 1890, Fedorov et Schoenflies démontrent - indépendamment l'un de l'autre - l'existence de 230 groupes d'espace qui représentent toutes les combinaisons possibles de réseaux et d'opérations de symétrie. Le nombre total de combinaisons ($32 \times 14 = 448$) se réduit finalement à 230 groupes d'espace distincts. Il est tout à fait remarquable que tous ces groupes, à l'exception d'une dizaine, soient réalisés par des cristaux réels.

L'étude récente des quasi-cristaux fait apparaître d'autres groupes. Certains ayant le groupe de symétrie de l'icosaèdre.

Ce groupe contient des rotations d'ordre 5 incompatibles avec les réseaux à trois dimensions, mais qui sont possibles dans des réseaux de dimension supérieure.

La date la plus importante de l'histoire de la physique du solide est le 8 juin 1912, date de la communication intitulée « Effets d'interférences des rayons Roentgen ».



Fig I.14 Max Von Laue

Max Von Laue (1879-1960) y développe une théorie élémentaire de la diffraction des rayons X par un réseau périodique d'atomes et les premières observations expérimentales de diffraction des rayons par des cristaux. En démontrant la nature ondulatoire des rayons X par la possibilité de les diffracter et en prouvant définitivement que les cristaux sont formés d'un réseau périodique d'atomes, cet étudiant de **Max Planck** (1858-1947) reçoit le prix Nobel de Physique en 1914. Son travail est à l'origine de toutes les méthodes d'analyse par diffraction, à l'aide de neutrons, de rayons X, d'électrons ou de la lumière synchrotron. Ses deux ouvrages sont considérés, encore aujourd'hui, comme des références dans le domaine des rayons X. En 1915, le prix Nobel de Physique est accordé à **WH et WL Bragg** (père et fils) pour la méthode de détermination des structures cristallines et la notion de dislocations dans les cristaux.



Fig I.15 « Le » cliché historique de la diffraction de rayons X sur un cristal d'ADN. Signé de Rosalind Franklin (dite Rosy) qui démontre la structure hélicoïdale de la molécule. A son insu, ses travaux déterminants seront transmis à Watson et Crick qui obtiendront le prix Nobel pour cette découverte.

I.5 La symétrie interdite : une révolution conceptuelle et industrielle.

En 1984, une découverte fortuite dans un alliage Al-Mn met en émoi la communauté des cristallographes et des physiciens.

Des figures de diffraction électroniques caractérisées par des réflexions de Bragg, comme le sont celles des cristaux, révèlent des symétries interdites d'ordre 5. L'existence d'axes d'ordre 5 suffit à exclure l'hypothèse d'un arrangement périodique des atomes. Mais en outre, les intervalles entre les réflexions de Bragg sur les plans atomiques ne sont pas commensurables.

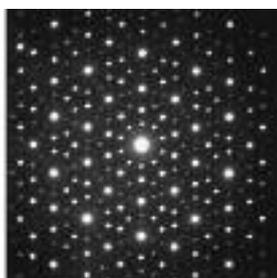


Fig I.16 diffraction électronique révélant une symétrie interdite.

En mathématiques, la commensurabilité traduit le fait que le rapport entre deux nombres est un nombre rationnel.

Les rapports des distances entre réflexions adjacentes font intervenir un nombre irrationnel $(1+\sqrt{5})/2 \approx 1,618\dots$, le « nombre d'or », caractéristique de la géométrie du pentagone et de l'icosaèdre.

La présence de réflexions de Bragg dans la diffraction d'une

structure non périodique est en réalité la signature d'un ordre «quasi périodique», ordre que l'on peut rapprocher de travaux mathématiques de 1930 sur les fonctions presque périodiques, ou encore des pavages de Penrose découverts en 1974. Une fonction presque périodique peut être décrite comme résultant de la coupe p-dimensionnelle selon une orientation irrationnelle d'une fonction périodique dans un espace de dimension $n > p$.

Par exemple, la fonction dans l'espace de dimension $n = 2$, $f(x,y)=\cos(x)+\cos(\sqrt{5}y)$ est périodique. La coupe à une dimension ($p=1$) la restreint à la fonction $f(x)=\cos(x)+\cos(\sqrt{5}x)$ qui est presque périodique.



Fig I.17 Modèle de pseudo périodicité en dimension 1.

Une illustration plus concrète de ce concept de pseudo périodicité est donnée à partir d'un réseau périodique de dimension 2 coupé par une droite (donc dimension 1) dont la pente est un nombre irrationnel ($\sqrt{5}$ par exemple).

La translation d'une maille le long de cette droite génère une bande qui contient une ligne brisée passant par les noeuds du réseau contenus dans la bande. La projection de cette ligne brisée sur la droite conduit à son « pavage » avec des segments courts S (pour short) et longs L (voir Fig I.17). La répartition des S et des L est manifestement non périodique et pourtant elle n'est pas aléatoire. Les segments se suivent selon la séquence LSLLSLSLSL... qui cache en fait la symétrie de la suite de Fibonacci. Pour le voir, il suffit par exemple de définir la règle de remplissage suivante : remplacer L par LS et S par L.

L	1
LS	2
LSL	3
LSLLS	5
LSLLSLSL	8
...	...

Fig I.18 Apparition de la suite de Fibonacci dans l'ordre pseudo périodique.

Cette suite de Fibonacci ($u_{n+1} = u_{n-1} + u_n$) se rencontre dans de nombreuses symétries dans la nature, lorsque des mécanismes de croissance sous contraintes entrent en jeu (spirales et hélices en biologie végétale, rayures et taches de pelage en zoologie).



Fig I.19 Roger Penrose

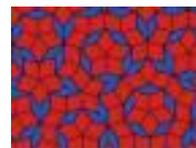


Fig I.20 Pavage de Penrose de symétrie 5

Le mathématicien Roger Penrose (1931-) utilise ces fonctions presque-périodiques pour générer des pavages du plan présentant des symétries d'ordre 5 (Fig I.20). Si un cristal 2D ne peut être construit (cf le théorème de restriction cristallographique) par absence de périodicité, une structure très régulière peut être obtenue à partir de deux formes et de règles d'assemblages (à la place d'une maille élémentaire qui est répétée à l'infini par translation).

Ces pavages ont été généralisés en pavages de l'espace à trois dimensions en utilisant seulement deux volumes élémentaires en forme de rhomboèdres. Là aussi, une décoration adéquate des rhomboèdres conduit à des règles d'assemblage qui permettent de remplir tout l'espace mais qui interdisent la périodicité et garantissent une symétrie de type icosaédrique.

Les modèles structuraux des quasi-cristaux icosaédriques rendent compte des symétries 5 et des spectres de diffraction observés grâce à une description dans un espace à six dimensions [46]. Les positions atomiques ainsi que les positions des réflexions de Bragg sont typiquement repérables par six coordonnées entières, contre trois pour les cristaux.

La découverte des quasi cristaux est une étape majeure dans l'histoire de la Physique du Solide, aussi bien sur le plan théorique : auto similarité avec un rapport d'échelle égal au nombre d'or, structures incommensurables, action à distance, que sur le plan pratique [11] : métal isolant, dureté et fragilité exceptionnelles, résistance à la corrosion et aux frottements. De nombreuses questions restent ouvertes, qui concernent en particulier l'origine de la stabilité de ces structures.



Fig I.21 Dan Shechtman

Dan Shechtman (1941-) a obtenu le prix Nobel de chimie 2011 pour cette découverte.

I.6 Symétrie et propriétés physiques. Introduction à la notion de Brisure de Symétrie

Les propriétés macroscopiques des cristaux sont étroitement liées à leurs symétries. Franz Neumann (1798-1859) énonce un Principe de Symétrie en 1833 selon lequel toute propriété d'un cristal a la même symétrie ponctuelle que le cristal lui-même. La prise en compte des éléments de symétrie dans la matière pour comprendre les symétries des propriétés macroscopiques sera croissante et conduira en particulier à une étape déterminante avec le Principe de Curie (1894), à sa version généralisée et à l'importante notion de brisure de symétrie qui est devenue centrale dans la physique contemporaine [6]. Pour souligner l'importance fondamentale de l'article de **Pierre Curie**, citons Georges Lochak : «*Ce serait une grave erreur de réduire l'article de Pierre Curie à une série d'analyses, car il s'agissait d'un revirement de la pensée : la symétrie passa du rang de simple conséquence des lois qui gouvernent les phénomènes à celui d'une grande loi de la physique, qui entre dans l'essence même des phénomènes et devient un instrument de découverte*» [2] et [12]. On trouvera au chapitre III des précisions sur cette contribution majeure de Pierre Curie.

Un exemple de relation entre symétrie et propriété est donné par le moment dipolaire électrique. La molécule d'hydrogène H_2 , avec son centre de symétrie, a un moment nul. La molécule d'eau lourde HDO possède un plan de symétrie donc le moment dipolaire électrique sera dans ce plan sans que sa direction puisse en être déduite. La molécule d'eau H_2O possède deux plans de symétrie perpendiculaires, son moment dipolaire électrique sera donc porté par l'intersection des plans et sa direction

est donc parfaitement déterminée. Le moment dipolaire électrique conditionne des propriétés de solvation, de cristallisation, de repliement de chaîne et plus généralement de réactivité chimique.

Dans certains cas l'effet (la propriété) a une symétrie inférieure à celle de la cause (l'objet). Il y a brisure de symétrie.

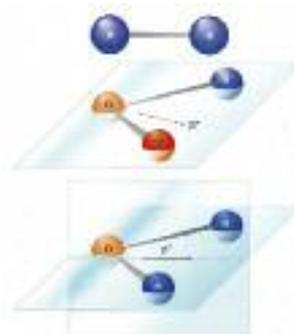


Fig I.22 Moment dipolaire électrique de l'eau et de l'eau lourde établis «par symétrie».

Un exemple de brisure de symétrie est fourni par **François Englert** (1932-) avec des ambidextres assis autour d'une table ronde ayant chacun un verre situé à la même distance de leur main droite ou gauche. Le système présente une symétrie de rotation qui est brisée lorsque le premier convive se saisit aléatoirement d'un verre plutôt que l'autre. Son choix impose en effet à toute l'assemblée sa solution particulière. Un tuyau d'arrosage en fonctionnement présente, pour le système tuyau eau, une symétrie cylindrique. Pourtant pour certaines valeurs du débit, le système se met à osciller latéralement ou à tourner autour d'un axe vertical. Il y a brisure de symétrie.

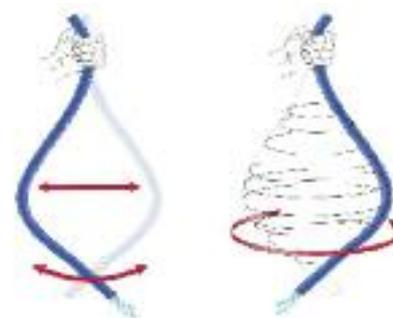


Fig I.23 Effet moins symétrique que la cause, la brisure de symétrie.

Cette notion de Brisure de Symétrie est récurrente quand on étudie les changements de phase. Le passage d'un état désordonné tel qu'un liquide à un état ordonné tel qu'un cristal s'accompagne d'une brisure de symétrie. Le liquide est invariant par n'importe quelle rotation ou translation ; le cristal est invariant par translation (rotation) de longueur (d'angles) qui sont des multiples entiers de valeurs très précises. De ce fait le cristal de glace est moins symétrique que l'eau (mais il est plus ordonné). Il y a souvent confusion entre ordre et symétrie ; nous verrons que Landau a bien précisé ce point.

Ce phénomène discontinu en température est d'autant plus surprenant que les interactions fondamentales entre les molécules, ne changent ni de nature ni d'intensité. L'explication repose sur le fait que l'équilibre thermodynamique d'un corps macroscopique résulte d'un compromis entre deux termes antagonistes.

- L'énergie de cohésion U des atomes qui ont tendance à se distribuer dans l'espace selon les configurations les plus favorables pour minimiser l'énergie.

- L'entropie, S , une mesure du désordre, fonction croissante de la température.

Au changement de phase, le problème est donc de trouver à maximiser l'entropie tout en minimisant l'énergie. Le système adopte l'état qui minimise la fonction d'énergie libre $F = U - TS$ où T désigne la température. C'est un problème d'extremum où l'étude des symétries joue un rôle crucial.

On trouve que dans une gamme de température (par exemple pour l'eau, $T > 0^\circ \text{C}$), le groupe de symétrie de la solution est toujours le même pour brutalement changer à partir d'une température précise et au-delà. C'est le phénomène de brisure de symétrie, signature d'une transition de phase du système. Ainsi, si une même substance se présente en fonction de la température sous deux groupes de symétrie différents, alors on sait que le passage d'un groupe à l'autre s'effectuera à une température donnée correspondant à une transition de phase. Au contraire, si les deux formes ont le même groupe de symétrie (par exemple, le passage du liquide à la vapeur), il existe des conditions expérimentales où l'on passe continûment d'une forme à l'autre, donc sans changement de phase

Lev Landau (1908-1968) est le premier en 1927, après le pionnier **Pierre Curie**, à souligner le rôle de la Symétrie dans les transitions de phases. Il montre qu'un changement de phase s'accompagne d'un changement de symétrie, auquel il associe la notion de paramètre d'ordre. Cette grandeur est nulle dans la phase la plus symétrique et non nulle dans l'autre. Ainsi, lors d'une transition paramagnétique-ferromagnétique, le paramètre d'ordre est l'aimantation, nulle dans la phase paramagnétique et non nulle dans la phase ferromagnétique. La première, isotrope, est plus symétrique que la phase ferromagnétique ; dans cette dernière, il existe une direction privilégiée. De manière générale un paramètre d'ordre ne peut être défini pour une transition que si il y a perte d'élément de symétrie. Ce paramètre mesure le degré de brisure de symétrie.

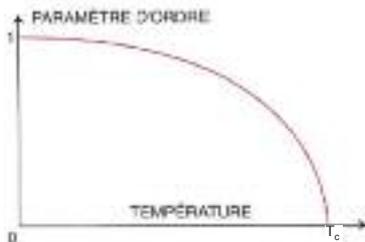


Fig I.24 Evolution du taux de brisure de symétrie avec la température.

Le paramètre d'ordre s'annule à une température critique T_c en suivant une loi de puissance du type $(T - T_c)^\beta$. Il a été démontré et vérifié que ce comportement est universel. Si la valeur change selon le système physique qui subit la transition (liquide-gaz, ferromagnétique, ferroélectrique, superfluide, supraconducteur...) la valeur de β est identique. β a un caractère d'universalité qui le rend indépendant de la nature des interactions.

À la valeur très particulière de la température critique, tout système subit à la fois des fluctuations géantes et microscopiques. Chaque partie est corrélée avec le tout quelle que soit la taille du système.

L'organisation du système étant la même à toute échelle d'observation, on parle alors d'invariance d'échelle. Elle se manifeste expérimentalement par exemple dans le cas d'un liquide par l'opalescence critique liée aux fluctuations de densité. Au voisinage de la température critique, le système réagit brutalement à la moindre perturbation.

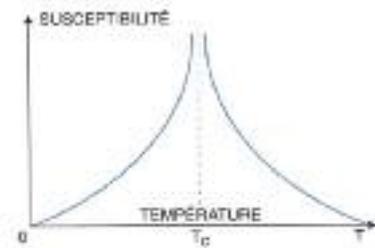


Fig I.25 Singularité de la susceptibilité autour de la température critique

On parle alors de susceptibilité autour de la brisure de symétrie. Un petit champ magnétique est suffisant pour aligner dans sa direction tous les spins d'un ferromagnétique. On dit que le nombre d'individus (ici les spins) susceptibles de réagir à la perturbation, devient infini. Autour de la température critique, la susceptibilité varie là aussi selon une loi de puissance universelle : $(T - T_c)^\gamma$. La valeur de γ est la même pour des systèmes physiques très différents. C'est un nouvel exposant critique.



Fig I.26 Lev Landau

Lev Landau a obtenu le Prix Nobel de Physique en 1968 pour ses travaux sur : • le lien entre symétrie et changement de phase • la première théorie de la supraconductivité (qui contient les germes du mécanisme de Brout, Englert, Higgs récompensés par le Prix Nobel de Physique de 2013) • la découverte des exposants critiques, de leur universalité et de l'invariance d'échelle associée

Ainsi dans des domaines de plus en plus nombreux et différents, le concept de Symétrie ou de Brisure de Symétrie se révèle être un concept profondément unificateur et à fort pouvoir heuristique.

I.7 La Symétrie et les interactions fondamentales.

«L'erreur» de **Ernst Mach** soulignait finalement la symétrie du magnétisme et plus généralement la symétrie fondamentale de la nature dans sa globalité. En effet jusqu'au «scandale» de 1956, la physique est symétrique.

C'est guidé par l'esthétique de ses équations et des considérations de symétrie que **Paul Dirac** (1902-1984) démontre en 1931 que l'existence de monopôles magnétiques est compatible avec les équations de Maxwell dans l'hypothèse de la quantification de la charge électrique. Ces monopôles magnétiques N et S impliqueraient l'existence de courants magnétiques qui fourniraient également une source au champ électrique. Cette particule, non encore observée, joue un rôle important dans plusieurs théories hors du modèle standard des particules élémentaires.

Selon la même logique, en associant les principes de la relativité restreinte et ceux de la théorie quantique, Paul Dirac établit l'équation relativiste de l'électron.

Elle introduit de nouvelles lois de symétrie de la nature et implique l'existence de l'antimatière : le positron (antiélectron). Cette particule sera observée quatre ans plus tard par C. D. Anderson, donnant une confirmation éclatante de cet extraordinaire et nouveau concept.

Paul Dirac reçoit le prix Nobel en 1933.

Depuis, toutes les prédictions théoriques concernant les propriétés associées aux principes de symétrie contenus dans l'équation de Dirac ont été vérifiées (spins, antiparticules...).



Fig I.27 Paul Dirac

Cette nouvelle symétrie, entre particule et antiparticule est appelée Conjugaison de Charge : **C**

Elle vient compléter la symétrie miroir souvent appelée Parité : **P**. Ce terme renvoie à la définition d'une fonction paire en mathématique, fonction f telle que $f(-x) = f(x)$.

La physique nucléaire et la physique des particules élémentaires élargissent les champs de réflexion sur les symétries. Nous verrons plus loin des utilisations importantes de ces symétries **P**, **C** et **T** (pour renversement du temps), mais aussi les symétries de jauge qui guident les développements de la physique actuelle.

En 1896, **Henri Becquerel** découvre la radioactivité, puis Rutherford montre que l'uranium émet deux sortes de rayonnements, alpha et bêta, avant qu'un troisième soit découvert. Ce dernier rayonnement est naturellement baptisé gamma.

Il s'avère que ces trois types de rayonnement sont liés respectivement aux trois interactions qui gouvernent la dynamique du noyau atomique :

- l'interaction forte pour le rayonnement alpha
- l'interaction faible pour le rayonnement bêta.
- l'interaction électromagnétique pour le rayonnement gamma.

L'étude précise de ces désintégrations radioactives montre alors que les rayons alpha emportent toute l'énergie disponible : il y a bien conservation de l'énergie lors de la réaction. Au contraire, les rayons bêta montrent un déficit d'énergie, comme si la loi de conservation de l'énergie n'était pas respectée, mais aussi un problème avec la «parité des noyaux» et les quantités de mouvement !

En 1930, **Wolfgang Pauli** suggère l'existence d'une nouvelle particule neutre sans masse pour expliquer les résultats expérimentaux et en 1934, **Enrico Fermi** (1901-1954) propose le nom de «neutrino» (le petit neutre) pour cette particule avec la première théorie quantitative de la désintégration bêta. Cette théorie explique la lenteur observée de la désintégration et prévoit (fig I.29) des interactions à quatre fermions (neutron, proton, électron et neutrino) au cours desquelles un couple électron-neutrino est émis lors de la transformation d'un neutron en un proton. Ce grand physicien italien obtient le prix Nobel de physique en 1938.



Fig I.28 Enrico Fermi

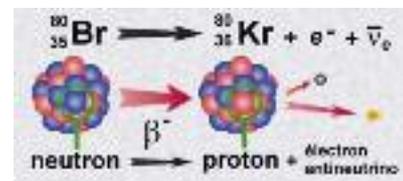


Fig I.29 Modèle de radioactivité bêta par désintégration du neutron.

La théorie de Fermi est le précurseur de la théorie actuelle des interactions faibles. C'est en fait **Murray Gell Mann** (le père des quarks) qui parle d'interaction faible, intervenant non seulement dans la radioactivité bêta, mais aussi dans les rares réactions que produisent les neutrinos et dans de nombreux processus de la physique des particules [13]. Le neutrino, cette hypothétique particule de Pauli et Fermi est découvert en 1956.

I.8 Vers la violation de la symétrie miroir (P)

La parité **P** est une symétrie discrète qui consiste à inverser les coordonnées spatiales, comme un miroir inverse l'image d'un objet. Cette loi de parité est respectée par la gravitation classique, l'électromagnétisme et l'interaction forte, et on la supposait universelle. Mais en 1956, deux théoriciens américains **Yang** et **Lee**, suggèrent, après des calculs de mécanique quantique, que l'interaction faible pourrait bien violer cette symétrie P. C'est en analysant les désintégrations de deux particules (des mésons) que l'on croyait distinctes, que le doute est apparu. Ce doute s'est confirmé après l'examen détaillée de tous les résultats expérimentaux impliquant l'interaction faible. Yang et Lee proposent dans leur article d'octobre 1956 des expériences pour savoir si l'interaction faible induit ou non une différence entre droite et gauche. Cet article a peu d'échos dans la communauté des physiciens qui considèrent comme hautement improbable cette violation de la parité.



Fig I.30 Chen Ning Yang et Tsung-Dao Lee

La physicienne sino américaine **Chien Shiung Wu** réalise rapidement une des expériences proposées. Elle étudie la désintégration du Co 60 à basse température et sous champ magnétique pour orienter les spins des noyaux. Elle observe que l'électron est toujours émis dans la direction opposée à celle du spin du noyau confirmant ainsi la violation de symétrie **P**. En 1957, la preuve est faite que la nature n'est pas fondamentalement symétrique dans un miroir. **Yang** et **Lee** reçoivent le Prix Nobel de physique la même année.

Après ce cadre théorique et cette expérience historique, le choc parmi les physiciens est considérable et déclenche un grand nombre d'études théoriques ou expérimentales. Comment se produit la violation de parité, quel est le mécanisme ? Rien dans le comportement habituel des électrons ne peut l'expliquer. En revanche, le résultat de l'expérience peut se comprendre si les neutrinos produits sont d'hélicité gauche (et inversement les antineutrinos d'hélicité droite). Mais jamais aucune particule avec une hélicité spécifique n'avait été identifiée.

Son existence est d'ailleurs impossible pour une particule massive en vertu de la théorie de la relativité restreinte .

En 1958, une expérience établit que tous les neutrinos produits sont d'hélicité gauche. L'interprétation est que le neutrino n'a qu'une seule orientation de spin, toujours dans la direction opposée à son mouvement : il est gauche, et la conservation de cette hélicité se traduit par une violation maximale de la parité dans l'interaction nucléaire faible. Pour la première fois dans l'histoire de la physique, une particule présente une structure asymétrique permanente : le couplage spin-déplacement.

I.9 Une interaction faible bien particulière

Cette interaction a une intensité dix millions de fois plus faible que l'interaction forte et sa portée est la plus courte de toutes: elle agit à 10^{-18} mètres c'est-à-dire pratiquement au contact de deux particules.

Cette interaction de contact si faible est pourtant fondamentale pour nous puisqu'elle régit les réactions thermonucléaires du Soleil donc la nucléosynthèse.

Rapidement, on découvre que la symétrie **C** est également violée, mais que, d'après Lev Landau, le produit **CP** est conservé ; il fait correspondre une particule gauche à une antiparticule droite. Concrètement, cela signifie que les particules (électron, neutrino) produites par interaction faible sont systématiquement dans un état de chiralité gauche alors que les antiparticules (positron, antineutrino) sont droites.

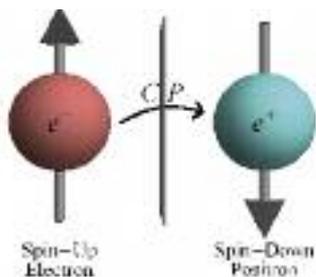


Fig I.31 Effet d'un «miroir» CP.

Il avait été démontré auparavant que toute théorie obéissant à la mécanique quantique et à la relativité devait également obéir à la "l'invariance **PCT**", ce théorème assure une symétrie globale des lois de la Nature, combinant la charge, la parité et le temps (voir en III.1 les enjeux de l'invariance **PCT**).

En 1964 la violation de **CP** apparaît dans des expériences impliquant l'interaction faible [14].

Les japonais **Kobayashi** et **Maskawa** proposent en 1972 un mécanisme de brisure de symétrie pour expliquer cette violation **CP**, mais pour cela au moins trois familles de quarks doivent exister. C'est la condition pour que le modèle standard, alors débutant, autorise la violation de **CP**. Depuis la découverte de la troisième génération de quarks (le quark bottom en 1977 et le quark top en 1995) nous savons qu'il en est ainsi [15]. Pour **Kobayashi** et **Maskawa**, cette brisure de symétrie est de nature intrinsèque, «explicite». En d'autres termes, il s'agit d'une propriété de la force faible qui viole les symétries miroir et de charge, en raison des interactions entre un nombre donné de quarks de masses différentes. La violation de la symétrie **CP** est une condition nécessaire pour expliquer comment la matière a pris le pas sur l'antimatière dans l'Univers primordial. L'américain **Nambu** a transposé le concept de Brisure Spontanée de symétrie qu'il étudiait en supraconductivité, à la physique des particules. La Brisure spontanée de Symétrie permet d'expliquer comment l'interaction électromagnétique, à portée infinie, a pu se dissocier, dans l'histoire de l'Univers, pour créer une force

sensible uniquement à l'échelle subatomique, telle la force faible.

Kobayashi, Maskawa et **Nambu** partagent le prix Nobel en 2008.

Ce prix Nobel de Physique 2008 est souvent appelé le «Nobel de la Symétrie» tant les travaux qu'il récompense mettent en avant le rôle fondamental des symétries ou de leur brisure.



Fig I.32
Makoto Kobayashi



Fig I.33
Toshihide Maskawa



Fig I.34
Yoichiro Nambu

I.10 Introduction à la notion de Symétrie de Jauge.

Les symétries utilisées massivement dans ces domaines des particules et des forces fondamentales sont d'une nature nouvelle. Ce sont des symétries à la fois locales et dites de jauge. Les symétries de jauge sont abstraites, non géométriques. L'expression «invariance de jauge» a été introduite vers 1919 par le mathématicien et physicien **Hermann Weyl** (1885-1955) lorsqu'il travaillait avec **Albert Einstein** sur une description géométrique unifiée de la gravitation et de la force électromagnétique. Bien que peu explicite dans son acceptation actuelle, le terme de jauge est devenu consacré. Pour illustrer cette notion de jauge avec un exemple classique nous dirons que dans un circuit électrique, l'énergie dépend de la différence de potentiel entre ses bornes et que cette énergie est invariante dans la modification du potentiel de chaque borne par une même quantité.



Fig I.35 Hermann Weyl

Dans le domaine quantique qui régit les particules élémentaires, les grandeurs mesurables dépendent de la fonction d'onde du système, mais bien que cette fonction s'exprime avec une amplitude, une fréquence et une phase, les grandeurs sont indépendantes de la phase. Il y a invariance par changement de phase.

Le potentiel et la phase sont des jauges. Autre exemple : supposons un écran défini par des pixels hexagonaux. Chaque pixel contient trois zones destinées à recevoir les couleurs Rouge, Vert et Bleu (Fig I.36). La couleur finale d'un pixel résulte de la combinaison RVB selon certains pourcentages de chaque couleur. L'image affichée ne permet pas de distinguer la structure d'un pixel. Une transformation qui ferait tourner toutes les zones des pixels d'un même angle n'affecterait pas l'image qui resterait donc invariante pour cette transformation. Mais il en serait de même pour des transformations plus complexes comportant des rotations différenciées selon la position des pixels, et pourquoi pas variables dans le temps.

On parlera dans le premier cas de jauge globale et dans le second de jauges locales. C'est ce type de jauge qui est utilisé pour théoriser l'interaction forte avec la charge de couleur.

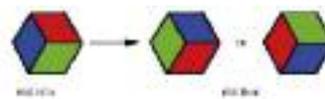


Fig I.36 Invariance de jauge par permutation de trois couleurs.

Le traitement moderne de la théorie de Maxwell de l'électromagnétisme conduit à ce que l'on appelle l'électrodynamique classique de Maxwell ; c'est le prototype le plus simple de théorie de jauge (voir [16] Le champ de Maxwell comme courbure de jauge). La relativité générale d'Einstein en est un autre exemple.

En 1949 l'électrodynamique quantique (QED) de Paul Dirac est achevée, c'est la théorie quantique et relativiste de l'interaction électromagnétique [18].

En 1954 **Chen-N Yang** et **Robert Mills** introduisent ce type d'approche mathématique pour décrire les interactions entre protons, neutrons, pions et autres hadrons. Depuis, on parle des théories de Yang-Mills en tant que famille de théories quantiques des champs basées sur la notion d'invariance de jauge.

En particulier pour décrire des champs de force, la forme la plus naturelle des équations décrivant ces champs doit être celle d'une théorie de Yang-Mills. Curieusement, les calculs génèrent des particules du type photons comme dans les équations de Maxwell.

I.11 La Symétrie comme trame du Modèle Standard

On trouvera sous la référence [1] I-23 LES QUATRE INTERACTIONS FONDAMENTALES, des compléments intéressants sous l'angle des résultats expérimentaux.

En 1961 **S.-L. Glashow** propose la première tentative d'unification des interactions faible et électromagnétique en une théorie électrofaible mais les nouvelles particules de type photon, nécessairement de masse nulle, et donc de portée infinie, sont en contradiction avec la portée des forces nucléaires faibles qui sont des forces de contact.

En 1964, **Brout, Englert** et **Higgs** découvrent un mécanisme théorique au cours duquel un champ scalaire, appelé champ de Higgs, initialement invariant par le groupe de jauge, acquiert dynamiquement une valeur moyenne non nulle. Dans ce processus, les bosons sans masse seraient continuellement absorbés par des bosons de Higgs puis réémis, leur conférant une inertie apparente matérialisée par une certaine masse. C'est un processus de brisure de symétrie. C'est aussi l'aboutissement du travail de nombreux théoriciens depuis 1950 : Landau, Ginzburg, Schwinger, Nambu... (voir partie II).

En 1967, **S. Weinberg** et **A. Salam** modifient le modèle de Glashow en y incorporant le boson de Higgs.

En 1970, **S.-L. Glashow**, intègre les quarks à la théorie électrofaible en prédisant l'existence du quatrième quark, le charme.

En 1974 la théorie unifiée des forces électromagnétique et nucléaire faible basée sur les équations de Yang-Mills est achevée. Dans cette théorie électrofaible les forces sont portées par des bosons intermédiaires : le photon pour l'interaction électromagnétique, et trois bosons W^+ , W^- et Z^0 pour l'interaction faible. Lors de la désintégration bêta, un neutron au sein du noyau se transforme en proton en émettant un W^- qui se désintègre en une paire électron antineutrino.

Sheldon Glashow, Abdus Salam et **Steven Weinberg** obtiennent le Prix Nobel de physique en 1979.

La Théorie électrofaible est parfaitement vérifiée par la découverte de l'interaction faible par courant neutre, où le vecteur de l'interaction est le Z^0 , par l'existence des courants chargés où les vecteurs de l'interaction sont les W^+ et W^- . Avec des masses cent fois plus élevées que celle d'un proton, ces particules ne peuvent véhiculer l'interaction qu'à très courte portée. Les W , à cause de leur charge électrique, engendrent un changement de nature de fermion avec lequel ils interagissent. Dans la désintégration bêta, le W^- émis par le neutron résulte en fait du chan-

gement d'un quark d en un quark u qui transforme le neutron en proton, le W^- se transformant ensuite en un électron et un antineutrino électronique (Fig 1.37).

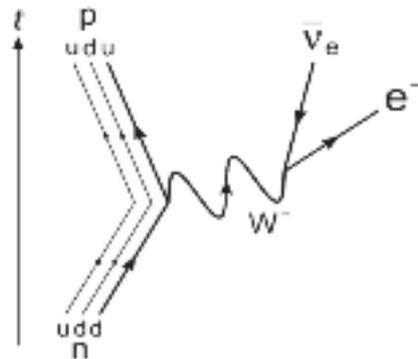


Fig 1.37 Diagramme de Feynman avec transformation de quark pour la désintégration bêta.

Au contraire, sans charge électrique, le Z^0 ne peut induire ces changements. Il se comporte comme un photon, mais à très courte portée.

Parallèlement au développement de cette unification électrofaible, l'interaction forte est expliquée par une théorie fondée également sur des symétries de jauge ; la Chromodynamique Quantique (QCD). Dans cette théorie la forte cohésion entre protons et neutrons au sein du noyau est expliquée par l'échange de bosons de jauge, les gluons entre les quarks qui constituent ces particules [5].

En plus de quarante ans de recherche internationale intense jalonnée de nombreux prix Nobel, la physique a produit le Modèle Standard des particules élémentaires et des interactions fondamentales (voir [16] Le modèle standard de la physique des particules) dont les composantes sont :

- La théorie électrofaible qui inclut l'électrodynamique quantique.
- La Chromodynamique.
- Le mécanisme de Higgs.
- La méthode de renormalisation des théories de jauge (qui supprime les divergences vers l'infini de certains calculs).

C'est l'ensemble de ces quatre composantes indissociables qui constitue le Modèle Standard. La composante essentielle qu'est le groupe de renormalisation sera abordée dans le chapitre suivant :

	1.6 MeV 1/3 charge 1/3	2.25 GeV 2/3 charge 2/3	17.3 GeV 2/3 charge 2/3	9.1 GeV 1 charge 1
	u	c	t	γ
Quarks	1.8 MeV 1/3 charge 1/3	1.9 GeV 1/3 charge 1/3	4.2 GeV 1/3 charge 1/3	8.3 GeV 1 charge 1
	d	s	b	g
Leptons	0.5 MeV 1 charge 1	105 MeV 1 charge 1	1.78 GeV 1 charge 1	91.2 GeV 0 charge 0
	ν_e	ν_μ	ν_τ	Z^0
	e	μ	τ	W^\pm
				Gauge Bosons

Fig 1.38 Les particules du Modèle Standard

La façon dont les quarks réagissent aux interactions EM, faible et forte conduit à penser qu'à très haute température il y a unification des interactions «électrofaible et forte (voir [1] Fig II-3 diagramme schématique des temps, énergies et interactions).

Un petit livre passionnant, écrit par **Steven Weinberg** (Nobel 1979) raconte ce scénario primordial [17]. Bien que n'intégrant pas les données les plus récentes, il demeure un grand classique de la littérature scientifique.

II UN MARIAGE HEUREUX DES MATHÉMATIQUES ET DE LA PHYSIQUE

Avant de survoler le panorama historique du mariage de ces deux disciplines, montrons sur un exemple simple, celui de la réflexion miroir, comment s'est opéré un glissement sémantique depuis la géométrie vers la fonction d'onde.

Dans un miroir, un objet symétrique (tel qu'un ballon) se transforme en sa propre image superposable. Au contraire un objet asymétrique (telle qu'une main droite) se transforme en une image (une main gauche) non superposable. Un deuxième miroir correctement orienté produira une seconde réflexion qui maintiendra inchangée l'image de l'objet symétrique, mais qui «redressera» celle de l'objet asymétrique. La main gauche redonne une main gauche après double réflexion. Une troisième réflexion donnerait une main droite. Cette simple observation directe est facile à décrire dans un espace 3D en considérant qu'à chaque miroir est associé un plan dont la normale est portée par un axe x , y ou z . Donner un point commun O qu'on appellera l'origine des axes, n'affecte pas la généralité du raisonnement. Une réflexion dans l'un des miroirs (x y par exemple) est alors équivalente pour l'image à un changement de signe de l'objet selon l'axe perpendiculaire (z dans l'exemple). Pour les propriétés liées à la droite et la gauche, l'objet (le système) même asymétrique, n'est pas modifié par un nombre pair de réflexions (de changements de signes). Ceci reste vrai dans des espaces abstraits de dimension supérieure à trois.

On dira qu'un système est symétrique ou de parité paire s'il reste identique, que le nombre de changements de signe soit pair ou impair.

On dira qu'un système est asymétrique ou de parité impaire s'il reste identique après un nombre pair de changements de signe et s'il est modifié après un nombre impair.

Ceci appliqué aux fonctions d'onde conduit à leur affecter un nombre quantique $+1$ ou -1 selon qu'elles sont paires ou impaires (en relation avec leur comportement devant des changements de signes de leurs variables). L'intérêt est que la parité d'une particule est une quantité qui se conserve et qu'elle est donc précieuse dans l'étude des réactions. Si par exemple une particule de parité $+1$ se désintègre en deux particules, celles-ci seront obligatoirement toutes deux paires ou toutes deux impaires en vertu de la loi de conservation de la parité [et de la multiplication $+1=(+1)x(+1)$ ou $+1=(-1)x(-1)$]

Là on ne raisonne plus sur des figures géométriques simples de l'espace 3D, mais sur des formules complexes et abstraites de la mécanique quantique. Ce concept de parité s'est révélé et se révèle d'une grande utilité en théorie quantique. Il s'appuie sur le théorème de Wigner qui a démontré en 1927 que dans un espace où il n'y a pas de différence gauche droite dans les interactions qui s'exercent entre particules, la parité est conservée. La réciproque étant vraie.

Ce théorème, général, s'applique pour toutes les forces, sauf pour l'interaction faible qui justement viole la parité. Ce qui précède n'est bien entendu pas un simple glissement sémantique. L'évolution du vocabulaire cache en fait un changement profond qui fait passer du constat, de l'observation directe, à la conceptualisation de la Symétrie en tant qu'outil et méthode de prédiction et compréhension du monde physique.

II. 1 Vers la Théorie des Groupes

Dès la fin du XIX^{ème} siècle, la symétrie joue un rôle central en physique relativiste ou quantique grâce à la théorie des groupes.

Les origines de cette théorie sont liées aux travaux de **Legendre** (1752-1833) en géométrie et de **Vandermonde** (1735- 1796) en algèbre avec ses travaux sur des fonctions symétriques. Ces fonctions sont du type $f(x,y,z) = xy+yz+zx$ où une permutation des variables laisse la fonction inchangée.

Avec **Louis Lagrange** (1736-1813) et **Cauchy** (1789-1857) les permutations de coefficients dans les équations polynomiales deviennent un sujet essentiel pour la mise en place de la future théorie des groupes. Mais c'est **Evariste Galois** (1811-1832) qui, poursuivant les travaux de **Abel** (1802-1829), crée une véritable révolution méthodologique avec la théorie des groupes finis qui va placer la symétrie au coeur de la physique. Galois développe la notion de permutation des racines (solutions) d'équations polynomiales (on dit aussi équations algébriques).

Pour l'équation du second degré que nous connaissons tous, $ax^2+bx+c=0$, il est possible de calculer la somme S et le produit P des racines x_1 et x_2 sans résoudre l'équation. Ces deux grandeurs $S = x_1 + x_2$ et $P = x_1 \cdot x_2$ sont invariantes si on permute les racines et ne nécessitent donc pas l'identification de chacune d'elles. L'équation initiale peut s'écrire $x^2 - Sx + P = 0$ ou encore $(x - x_1)(x - x_2) = 0$. $(x - x_1)$ et $(x - x_2)$ sont les radicaux de l'équation. Quand le degré de l'équation augmente, le nombre de radicaux augmente et il y a davantage de fonctions calculables sans résolution de l'équation. Par ailleurs, il y a plus de manières de permuer les racines. Cette méthode de résolution d'équations algébriques a été appliquée pour des polynômes de degré 2, 3 et 4, mais depuis plus de deux siècles les mathématiciens butaient sur la résolution de l'équation de degré 5 ou supérieur. Une réflexion sur les rotations qui laissent globalement invariant le dodécaèdre conduit à faire une analogie entre la permutation des 5 sommets d'un pentagone (face du dodécaèdre) et la permutation des racines d'une équation du cinquième degré.

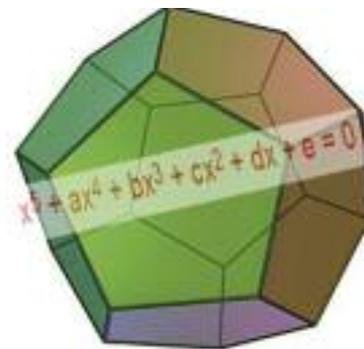


Fig II.1

Evariste Galois perçoit qu'il existe une structure mathématique universelle derrière ces permutations, indépendante des objets permutés. Cette structure reçoit le nom de Groupe.

Comme le montre l'exemple des permutations dans le triangle RVB (Fig II.2), le groupe reste un concept simple : c'est un ensemble de transformations caractérisé par trois propriétés :

- une invariance (locale ou globale)
- le fait que toute transformation doit permettre de retrouver l'état initial du système
- deux transformations consécutives doivent être équivalentes à une transformation unique.

Un mathématicien dirait que c'est un ensemble muni d'une loi de composition interne associative admettant un élément neutre et, pour chaque élément de l'ensemble, un élément symétrique. La loi de composition peut être commutative, on parle alors de groupe abélien.

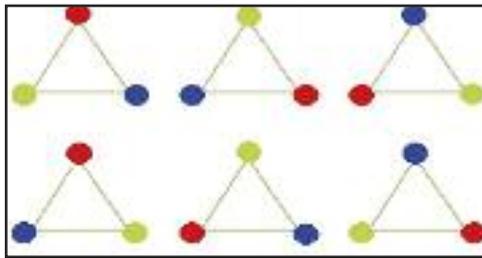


Fig II.2 Les six éléments du groupe de permutation de trois couleurs

Le groupe de permutation de trois objets (racines d'équations, lettres, chiffres, couleurs, ...) comporte six éléments ($3!$).

Le groupe des rotations du dodécaèdre comporte 60 éléments qui correspondent chacun aux cinq positions de chacune des douze faces du dodécaèdre. Le résultat final dépendant de l'ordre des rotations, le groupe est non commutatif.

Le système constitué des entiers (positifs ou négatifs) et de leur addition est un groupe.

Les rationnels non nuls avec la multiplication également.

Galois donne une méthode pour trouver le groupe d'une équation donnée et les sous-groupes successifs [19]. C'est un objet mathématique à part entière dont on peut étudier les propriétés et la structure. Il montre que chaque propriété d'une équation se traduit par une propriété du groupe correspondant et inversement. Cette démarche lui permet de formuler un critère de résolubilité d'une équation et de démontrer au passage l'impossibilité de résoudre les équations du cinquième degré, ou plus, par radicaux.

D'une compréhension difficile, ses travaux ne seront repris que quatorze années plus tard, après des présentations de son œuvre par **Joseph Liouville** (1809-1882) et surtout **Camille Jordan** (1838-1922) qui complètera la théorie.

La contribution d'**Auguste Bravais** (1811-1863) est fondamentale dans l'application des groupes finis à la structure de la matière.

C'est en effet la première fois qu'un physicien utilise la théorie des Groupes, en l'associant à la notion de symétrie géométrique. Au lieu de travailler sur des fonctions algébriques ou des ensembles abstraits, Bravais remplace les opérations mathématiques, par des opérations classiques de symétrie. A partir de ce moment la notion de symétrie change profondément de nature. Il ne s'agit plus seulement de constater, mais aussi d'utiliser la symétrie comme outil d'investigation et de prédictions. Par exemple, une fois démontré qu'il n'existe que 32 classes de symétrie, toute structure cristalline existante doit nécessairement appartenir à l'une d'elles. Ce que l'expérience confirme. Bravais démontre avec Camille Jordan que le Groupe correspond à l'invariance de la structure par rotation et translation de ses composantes. Si les réflexions des mathématiciens pouvaient paraître très formelles, l'ouverture vers la physique initiée par Bravais, inaugure un mariage qui va donner à la physique des outils et des méthodes de plus en plus puissants, et aux mathématiciens des sources de questionnement.

Enfin, **Sophus Lie** (1842-1899) et **Élie Cartan** (1869-1951) recensent tous les objets capables de changement (par translation, rotation, torsion, etc.) pour en extraire des structures communes. La théorie des Groupes de Lie aboutit à une classification systématique des symétries, unifiant de nombreux domaines des mathématiques, et aux travaux de **Hermann Weyl**. C'est sous cette forme mathématique définitive que la théorie moderne des Groupes devient d'un emploi universel dans les sciences de la matière.

II.2 Principes de conservation et invariances

Les lois de la physique dérivent de quelques principes de conservation qui reflètent en réalité l'invariance de certaines grandeurs physiques sous l'action de certaines transformations. L'étude des groupes de symétrie de ces grandeurs conduit à leur donner les expressions mathématiques qui satisfont les invariances [41].

Même pour des objets non géométriques les permutations sont un outil puissant dans l'étude des symétries. Par exemple (Fig II.3) la surface d'équation $f(x,y) = z = xy$ présente des symétries faciles à étudier avec des permutations portant sur les coordonnées x , $-x$, y , et $-y$.

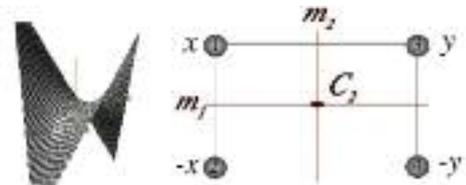


Fig II.3 Invariances par permutations. Simplification déduites des symétries associées

Le produit xy demeure invariant par l'échange de x avec y ou encore par la transformation de x en $-x$ et simultanément de y en $-y$.

L'examen des permutations possibles révèle alors les éléments de symétrie d'un simple rectangle. La surface et le rectangle sont équivalents du point de vue de la symétrie. La résolution des problèmes concernant cette surface peut donc être considérablement simplifiée.

De façon générale, les propriétés de symétries sont liées uniquement à la notion d'invariance. Elles possèdent des structures universelles indépendantes de la nature des objets étudiés. Le lien entre ces notions de symétrie et d'invariance ne doit pas conduire à la confusion. Les éléments de symétrie agissent sur les directions des grandeurs vectorielles, tandis que les invariances agissent sur les variables dont dépendent ces grandeurs.

Un autre exemple de la puissance simplificatrice de cette approche montre les contraintes mathématiques imposées aux équations décrivant les phénomènes naturels.

Si une grandeur F , dépendant de deux variables x et y , est invariante par changements de signe simultanés de x et y alors ($F(x, y) = F(-x, -y)$). La solution la plus simple est du type $F(x, y) = ax^2 + by^2 + cxy$. a, b et c sont des constantes quelconques.

Si une contrainte physique impose en plus l'invariance de F par échange entre les variables x et y , alors $F(x, y) = F(y, x)$ ce qui impose $a = b$. La fonction F devient du type $F(x, y) = a(x^2 + y^2) + cxy$.

Si, enfin, le phénomène étudié est tel que les signes de x et de y peuvent être inversés indépendamment en laissant F invariant, alors $F(x, y) = F(x, -y)$, et donc $c = 0$ conduisant à la forme simplifiée $F(x, y) = a(x^2 + y^2)$.

II.3 Les invariances géométriques de la physique

L'espace étant considéré comme homogène et isotrope, il doit être invariant par translation et rotation.

L'équation fondamentale de la dynamique newtonienne :

$$\mathbf{F} = m\boldsymbol{\gamma} = m \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} = m \frac{d\mathbf{v}}{dt}$$

reste bien invariante par les changements de coordonnées correspondant à des rotations (les deux vecteurs \mathbf{F} et $\boldsymbol{\gamma}$ restant colinéaires) ou à des translations $\mathbf{r} \rightarrow \mathbf{r} - \mathbf{a}$. C'est l'*invariance euclidienne*.

En effet $d(\mathbf{r}-\mathbf{a})/dt = d\mathbf{r}/dt = \mathbf{v}$

Si les lois de la physique ne se modifient pas au cours du temps, l'équation fondamentale de la dynamique newtonienne doit rester invariante par translation dans le temps $t \rightarrow t-t_0$. C'est l'*invariance temporelle*.

C'est en effet le cas puisque $d(t-t_0) = dt$

Pour Galilée, «*Les lois de la mécanique sont les mêmes pour deux observateurs en mouvement uniforme (\mathbf{v}_0 constante) l'un par rapport à l'autre*». L'équation fondamentale de la dynamique newtonienne doit donc rester invariante par les transformations galiléennes : $\mathbf{r} \rightarrow \mathbf{r} - \mathbf{v}_0 t$. C'est l'*invariance galiléenne*.

C'est en effet le cas puisque $d(\mathbf{r} - \mathbf{v}_0 t)/dt = d\mathbf{r}/dt - \mathbf{v}_0$

et donc $d^2(\mathbf{r} - \mathbf{v}_0 t)/dt^2 = d^2\mathbf{r}/dt^2$

Les fondements de la théorie de l'électromagnétisme de Maxwell reposent sur des équations qui ne sont pas invariantes par les transformations galiléennes ; elles se trouvent donc en conflit avec les lois de la mécanique. En 1904, Lorentz montre que la transformation galiléenne doit être remplacée par les transformations :

$$\mathbf{r}' = \beta(\mathbf{r} - \mathbf{v}_0 t) \quad \text{et} \quad t' = \beta(t - \mathbf{v}_0 \mathbf{r}/c^2) \quad \text{avec} \quad \beta = 1/\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}$$

C'est l'*invariance relativiste*.

En 1905, **Henri Poincaré** montre que les transformations de Lorentz, avec les translations d'espace, de temps et les rotations, forment un groupe P_0 . On parle aujourd'hui du groupe de Poincaré [20]. La même année, Einstein, par la théorie de la relativité restreinte, transforme la dynamique qui devient aussi invariante par P_0 . La dynamique newtonienne reste valable pour les vitesses faibles par rapport à c . C'est une approximation de la dynamique relativiste.

Au centre de l'évolution du concept de Symétrie, on trouve aussi celui d'opérateur. Il s'agit d'une sorte de généralisation des opérations symboliques introduites par Leibniz telles que la différentielle : $\partial / \partial x$ et l'intégrale : $\int dx$.

Ensuite les opérateurs nommés gradient, divergence, rotationnel, laplacien, lagrangien et hamiltonien sont inventés en mécanique classique. Ils permettent de résumer à l'aide d'équations très générales une évolution de la mécanique portant sur des siècles. Une fois le formalisme épuré construit, de nouvelles analogies surgissent avec d'autres domaines basés sur des faits expérimentaux très différents, dont le formalisme est voisin quant à sa structure mathématique. De ces analogies naissent des traitements unifiés et des généralisations qui ne seraient pas apparus sans cette démarche unificatrice. C'est ainsi par exemple que le formalisme hamiltonien sert de base à l'équation de Schrödinger en mécanique quantique (voir [16] lagrangiens et hamiltoniens).

Ensuite les opérateurs de symétrie classiques sont étendus à l'algèbre des opérateurs abstraits. L'opérateur qui permet de mesurer un invariant doit lui-même être invariant dans toutes les opérations qui transforment le repère en tout autre repère équivalent. De ces conditions dérivent des contraintes considérables portant sur la forme mathématique de l'opérateur. C'est un jalon décisif qui donne aux théoriciens une méthode générale rigoureuse permettant de créer les outils mathématiques de la physique sans que ceux-ci ne dérivent directement de l'observation mais de la seule pensée.

Trois exemples majeurs illustrent cette méthode :

1) C'est pour rendre compte de l'invariance des équations de Maxwell pour des observateurs en mouvement relatif uniforme que Lorentz a trouvé ses transformations de coordonnées à la place de l'invariance galiléenne. Poincaré et Einstein les ont ensuite utilisées pour bâtir la relativité restreinte.

2) C'est la même démarche qui conduit à la relativité générale (plutôt nommée aujourd'hui à juste raison : "Théorie géométrique de la gravitation" comme le souligne **Yvonne Choquet-Bruhat**), et au modèle standard du Big Bang, en partant du principe que la physique doit être invariante en tout lieu et de tout temps. C'est le principe d'équivalence (localement, champ gravitationnel et champ d'accélération ont le même effet) avec une invariance par un groupe de transformations généralisé aux changements entre référentiels accélérés.

3) Une des applications les plus spectaculaires des opérateurs de permutation d'indices est fournie par la classification des particules en fermions et bosons.

Chaque particule d'un ensemble de particules élémentaires identiques indiscernables les unes des autres est décrite par une fonction d'onde φ telle que le produit $\varphi^2 dv$ mesure la probabilité de trouver la particule considérée dans l'élément de volume dv . Chaque fonction individuelle φ_i contient toutes les informations permettant de caractériser la particule considérée. La fonction d'onde totale ψ , qui décrit le comportement collectif s'écrit sous la forme d'un produit : $\psi = \varphi_i \varphi_j$ de toutes les fonctions d'onde individuelles. Les particules étant indiscernables, l'effet de l'opérateur de permutation $P(i,j)$ de deux indices ne doit pas changer l'ensemble. Donc ψ^2 , la seule quantité observable, doit rester inchangée.

Deux solutions permettent d'arriver à ce résultat :

$$P(i,j) \psi = (\varphi_j \varphi_i) \quad \text{et} \quad P(i,j) \psi = - (\varphi_j \varphi_i)$$

elles correspondent à des particules réelles et donc à une séparation fondamentale en deux familles de particules élémentaires :

La famille qui voit le signe de la fonction d'onde conservé lors de la permutation d'indice est la famille des bosons (particules qui obéissent à la statistique de Bose Einstein tels que photons, W^+ , W^- , Z^0 , gluons...).

La famille qui voit le changement de signe de la fonction d'onde quand on permute deux indices est la famille des fermions (particules qui obéissent à la statistique de Fermi Dirac tels que électrons, protons neutrons, quarks...).

Depuis Lavoisier et son principe de conservation de la masse, les principes de conservation de certaines grandeurs physiques ont été un moteur de découverte essentiel. Pensons par exemple que de nombreuses particules ont été prévues avant d'être recherchées, puis découvertes en partant de considérations théoriques impliquant des principes de conservation.

Le principe de conservation de la masse, à la base de la chimie, a été amélioré en prenant en compte les effets relativistes et l'énergie de masse, et maintenant inclus dans le principe de conservation de l'énergie. Ainsi, les principes de conservation suivants n'ont jamais été mis en défaut :

- conservation de l'énergie (y compris l'énergie de masse) ;
- conservation de la quantité de mouvement ;
- conservation du moment cinétique ;
- conservation de la charge électrique ;

- conservation de la charge de couleur (R, V ou B pour les quarks et gluons);
- conservation du flux magnétique ;
- conservation du nombre baryonique (tiers de la différence entre nombre de quarks et d'anti-quarks) ;
- conservation du nombre leptonique (+1 pour un lepton, -1 pour un antilepton et 0 pour toute autre particule) ;
- conservation du produit des symétries PCT.

II.4 Quand les principes de conservation deviennent des théorèmes

Pendant la première guerre mondiale, une mathématicienne, **Emmy Noether** (1882-1935) qui travaille sur les invariants, s'apprête à révolutionner la physique mathématique en démontrant deux théorèmes qui passeront d'abord inaperçus. Ils seront ensuite qualifiés par **Albert Einstein** de «*monument de la pensée mathématique*» [21].

Le premier concerne l'invariance d'un problème variationnel sous l'action d'un groupe de Lie. E. Noether démontre en toute généralité la correspondance entre la symétrie du problème et les lois de conservation pour l'équation aux variations associées. Ce qui est fondamental en mécanique classique et en relativité restreinte.

Par exemple :

- si le groupe de symétrie est le groupe des translations, continu à trois paramètres, on peut trouver trois constantes du mouvement, ce sont les trois composantes de la quantité de mouvement
- si le groupe de symétrie est celui des rotations continues à trois paramètres, on peut trouver trois constantes du mouvement : ce sont les trois composantes du moment cinétique
- si le groupe de symétrie est celui des translations dans le temps, continu à un paramètre, on peut trouver une constante du mouvement : c'est l'énergie
- si le groupe est le groupe de Galilée d'invariance de la mécanique newtonienne à sept paramètres (regroupant les invariances précédentes) on peut trouver sept constantes du mouvement.

Le second théorème porte sur l'invariance d'une intégrale d'action sous l'effet d'un groupe de Lie de dimension infinie, ce qui est fondamental en relativité générale et dans les théories de jauge.



Fig II.4 Emmy Noether

Le premier théorème, en trois lignes, qui énonce en particulier les lois de conservation de l'énergie, de l'impulsion et du moment cinétique, fonde la mécanique classique et même en épuise le contenu !

Les théorèmes de Noether sont devenus un outil fondamental de la physique théorique, de par l'éclairage qu'ils apportent aux lois de conservation, mais aussi comme une méthode de calcul effective. Ils facilitent l'étude de nouvelles théories. Si une théorie possède une symétrie, alors l'existence d'un invariant est garanti, lequel doit être expérimentalement observable.

Les théorèmes de Noether sont abondamment utilisés aujourd'hui par la physique théorique, où tout phénomène est abordé, en termes de symétrie d'espace, de charges, et même de temps.

C'est le grand mathématicien **Hermann Weyl** qui s'est aperçu que la notion d'invariance de jauge, décrite au moyen des groupes de Lie, était profonde en théorie quantique. Il s'en est aperçu lors d'une tentative intéressante mais infructueuse de description géométrique unifiée de la gravitation et de la force électromagnétique vers 1920 ; mais aussi dans une description de l'électrodynamique quantique dans le cadre de la théorie des groupes.

En généralisant, on peut dire avec E. Noether et H. Weyl, que les lois physiques émergent de la symétrie mathématique. Les théories de jauge reposent en effet sur les théorèmes de E. Noether. Hermann Weyl montre que la conservation de la charge électrique est la manifestation de l'invariance des lois physiques lorsqu'on fait agir certaines transformations abstraites sur les champs classiques. Vers 1930, il applique aux fonctions d'ondes des électrons, une multiplication par une phase e^{iaQ} où Q est l'opérateur «charge électrique». L'ensemble des multiplications par les facteurs e^{iaQ} ayant la structure d'un groupe appelé $U(1)$ par les mathématiciens (c'est le groupe des rotations du cercle), on parle d'invariance de jauge $U(1)$. L'électrodynamique quantique peut alors se construire comme la théorie minimale qui soit invariante lors des multiplications des fonctions d'onde des électrons par une phase variable avec le point de l'espace-temps, c'est-à-dire par un facteur $e^{ia(x,t)Q}$. L'existence du photon n'est alors qu'une conséquence du respect de la symétrie abstraite décrite plus haut. On dit que le photon est le champ de jauge associé à la symétrie $U(1)$.

Toutes les lois de l'électromagnétisme se déduisent de cette propriété géométrique. L'électromagnétisme admet les mêmes symétries qu'un cercle ! La dualité fondamentale entre électromagnétisme et symétries du cercle établie par H. Weyl de façon aussi simple que convaincante, associée aux travaux de E. Noether a révolutionné la manière d'envisager la physique.

Comme le dit **Georges Lochak**, un des élèves de **Louis De Broglie**, «*le passage du concept de symétrie émanant des lois physiques à celui des lois physiques émanant de la symétrie, constitue la grande rupture entre la physique de notre siècle et la physique passée.*» [2]

Aujourd'hui, la réalité physique révélée par des centaines de résultats expérimentaux de sources variées, ne peut se comprendre sans admettre la nécessité théorique des symétries, des champs et des théories de jauge.

II.5 Vous avez dit champ ?

Le concept de champ, déjà connu à l'époque de Newton, n'était alors considéré que comme une astuce mathématique pratique. Tout devait s'expliquer en terme d'action à distance entre particules, le champ n'étant là que pour retrouver les forces qui agissaient sur une particule. Pour Maxwell au contraire, le champ était une réalité. Mais c'est probablement **Heinrich Hertz** (1857-1894) qui a le plus rendu accessible ce concept de champ en s'appuyant sur les équations de Maxwell, en les confirmant et en améliorant la définition du champ.



Fig II.5 Heinrich Hertz

C'est à lui en effet que l'on doit l'appellation "champ électromagnétique". Constatant que l'électricité et le magnétisme produisaient les mêmes effets, que les termes pouvaient donc être échangés, que l'arrêt brusque d'un champ produit une étincelle et que donc ce champ contient de l'énergie, H. Hertz, dans les années 1890 convainc les physiciens de l'importance fondamentale de cette notion [22].

Ainsi, quelques années plus tard, la Théorie Quantique des Champs est devenue le principal édifice conceptuel et opérationnel de la Physique Théorique [44]. Pour que les équations qui décrivent les lois physiques soient invariantes lors des changements des coordonnées, des vitesses, des phases, d'énergie, de la permutation de certaines particules etc... , il faut immuniser ces équations contre tout changement arbitraire de variables il faut donc les symétriser. Ce qui signifie rendre la structure générale des équations totalement indépendante du choix des coordonnées externes et internes. C'est à dire, obtenir des équations invariantes par rapport à des changements de jauge locale. C'est dans ce cadre de Théorie Quantique des Champs et de groupes de Lie [23], que Yang et Mills généralisent les équations de Maxwell et offrent aux théoriciens actuels des outils pour bâtir les théories de Grande Unification, de supersymétrie, de cordes etc... Les théories de jauge sont en effet toujours au coeur de nombreux travaux en physique théorique, et en mathématique pure [24]. Parmi les nombreux groupes définis par les mathématiciens, seuls quelques un semblent pertinents pour le monde réel.

II.6 Recherche des groupes de jauge pertinents

- La théorie de jauge classique $U(1)$, où $U(1)$ désigne le groupe des transformations d'une phase, c'est à dire le groupe des rotations d'un vecteur dans un cercle de diamètre unité. Ce groupe s'identifie à la théorie électromagnétique de Maxwell. C'est cette théorie de jauge qui admet des extensions non-abéliennes appelées *théories de Yang-Mills*, basées sur les groupes non-abéliens $SU(n)$. Les plus connus étant : $SU(2)$ et $SU(3)$

- Le modèle électro-faible basé sur le groupe $U(1) \otimes SU(2)$. $SU(2)$ désigne le groupe des symétries qui peuvent être représentées par des matrices 2×2 , unitaires (symbole U) et de déterminant égal à 1 (symbole S).

Le groupe $U(1) \otimes SU(2)$ contient quatre quanta médiateurs (γ, Z^0, W^+, W^-). Le mécanisme de Higgs brise cette symétrie en d'une part $U(1)$ avec associé le photon γ de masse nulle et d'autre part $SU(2)$ avec associés les trois bosons intermédiaires Z^0, W^+, W^- qui acquièrent une masse au passage.

- La chromodynamique quantique basée sur le groupe $SU(3)$. $SU(3)$ est le groupe multiplicatif des matrices 3×3 complexes unitaires. Nous avons vu au paragraphe 1.10 l'exemple de symétrie de jauge avec trois couleurs définissant la couleur globale de pixels hexagonaux. C'est cette symétrie qui est représentée par le groupe $SU(3)$ décrivant l'interaction forte avec huit quanta, les gluons. Il n'y a pas de brisure de symétrie et les gluons sont de masse nulle.

C'est à partir des symétries du groupe $SU(3)$ que **Murray Gell Mann** et indépendamment **George Zweig**, prédisent l'existence de nouvelles particules, les quarks, constituants de toutes les particules massives appelées hadrons. En 1961 une classification de toutes les particules découvertes est réalisée sur les critères de symétrie de $SU(3)$. Comme avec le tableau de Mendeleev pour les éléments chimiques, cette classification laisse des places vides invitant à la recherche de nouvelles particules. La découverte, deux ans plus tard, de la particule Ω^- , prévue dans cette classification, confirme la théorie de

Gell-Mann et la pertinence de la théorie du groupe de symétrie $SU(3)$.

Gell Mann obtient le prix Nobel de Physique en 1969.



Fig II.6 Murray Gell Mann

- Enfin, le Modèle Standard, dans sa globalité relève du groupe de jauge $U(1) \otimes SU(2) \otimes SU(3)$.

II.7 $SU(5)$ ou l'espoir déçu de la Grande Unification (GUT) (voir entre autres [25])

En 1974 **Howard Georgi** et **Sheldon Glashow** proposent une magnifique théorie sur le plan mathématique, la Grande Unification (GUT) pour unifier interaction électrofaible et interaction forte. En suivant la même logique que celle de la théorie électrofaible, ils partent du groupe $SU(5)$, le plus simple répondant aux exigences minimum pour l'unification et ajoutent un mécanisme de brisure de symétrie de type Higgs pour retrouver à basse énergie / température les groupes de symétries $SU(3)$, $SU(2)$ et $U(1)$ des différentes interactions différenciées en trois forces à partir de la brisure de la force précédente [47].

Cette nouvelle théorie s'appuyant sur une symétrie de jauge est particulièrement esthétique. Elle est séduisante sur quelques points :

- l'égalité des charges entre proton et électron est une conséquence de la théorie

- plusieurs paramètres libres du Modèle Standard se voient expliqués et leur valeurs fixées

- l'évolution avec la température / énergie des constantes de couplage des interactions forte, faible et électromagnétique montre une convergence vers une valeur unique à une énergie de 10^{14} GeV

- la désintégration du proton en un positron et un pion se transformant immédiatement en deux photons est prévue avec une demi-vie de 10^{29} ans.

Malheureusement cette théorie nécessite aussi huit nouveaux bosons baptisés bosons X, et elle n'explique pas les 13 ordres de grandeur au-delà de l'échelle du Modèle Standard. Mais surtout elle n'est pas pertinente dans l'explication des symétries de la nature, car contredite par l'expérience :

- les trois constantes de couplage ne convergent pas vers un point comme on s'y attendait quand l'énergie augmente, mais se croisent en formant un triangle.

- aucune désintégration de proton n'a été observée et d'après le détecteur Super-Kamiokande au Japon, sa demi-vie, si elle est finie, est d'au moins 10^{33} années ! beaucoup plus que l'âge de l'Univers.

II.8 Du calcul des perturbations au Groupe de renormalisation

Le terme barbare de renormalisation est issu de travaux d'hydrodynamique au XIX^{ème} siècle. La mise en équation du mouvement d'un corps solide dans un fluide nécessite d'introduire le concept physique de masse renormalisée, c'est à dire de masse apparente ou effective. Cette masse correspond à la masse inertielle modifiée par la présence du fluide. Le solide entraîne le fluide, qui en retour augmente l'inertie du corps. La cause est donc modifiée par l'effet dont elle est à l'origine.

Cette situation simple et classique se retrouve en électrodynamique quantique où la charge de l'électron crée un champ qui agit à son tour sur la particule et modifie ainsi sa charge.

La charge observée est donc la contribution de la charge de la particule nue et de la charge due à l'interaction de l'électron avec le champ électrique qu'il a lui-même créé. La prise en compte de ces interactions vers 1930 conduit rapidement à des calculs complexes et des résultats absurdes qui font douter de la mécanique quantique. Le problème était lié à la génération lors de l'interaction, des multiples paires de particules-antiparticules de longévité très brève, les particules virtuelles. Le problème à un électron devenait un problème autrement complexe relevant en fait d'une multitude de particules. Pour le traiter, **Tomonaga**, **Schwinger** et **Feynman** développent alors une méthode extrêmement ingénieuse dans laquelle le calcul par perturbation qui portait sur les équations complexes est abandonné.



Fig II.7 Richard Feynman



Fig II.8 Diagramme de Feynman avec vertex

Le calcul par perturbation est fondé sur la théorie mathématique des développements en série. Il est souvent utilisé lorsque les équations présentent des difficultés de résolution, et consiste à raffiner un résultat par des approximations successives [24]. L'exemple simple en apparence de deux électrons qui interagissent en se repoussant demande en fait, dans un traitement complet en mécanique quantique, de tenir compte de l'émission d'un photon, de son absorption par l'autre électron, puis de sa réémission ou encore de l'absorption immédiatement après son émission par le même électron, ou encore de la création de paire électron positron par excitation du vide entre les deux électrons en interaction. Le calcul avec un seul photon médiateur conduit à un résultat qui est affiné ensuite en prenant en compte deux puis trois photons etc... Le calcul est dit perturbatif car chaque amélioration peut être considérée comme une petite perturbation ajoutée au résultat précédent. **Richard Feynman** (1918-1988) a inventé une représentation imagée de cette méthode de calcul. Les diagrammes de Feynman représentent les électrons et les photons par des lignes, et les processus d'émission ou d'absorption par des vertex raccordant ces lignes. Ces diagrammes sont toujours utilisés en 2014. Le calcul par perturbation permet en principe d'obtenir une précision qui croît à chaque étape et donc un résultat qui converge vers la valeur finale. Malheureusement, dans certains calculs, les théoriciens ont rencontré une difficulté majeure : les corrections, au lieu d'être petites se révélaient grandes et croissantes conduisant vers une valeur finale divergeant vers l'infini.

La méthode qui a conduit **Tomonaga**, **Schwinger** et **Feynman** au Prix Nobel en 1965, consiste à négliger les paires particule-antiparticule et les photons médiateurs pris individuellement, pour ne considérer qu'un nuage de particules écrantant la particule centrale initiale, et lui conférant une nouvelle charge et une nouvelle masse. Par cette méthode la théorie de l'électrodynamique quantique a été renormée. La comparaison avec les résultats expérimentaux a été spectaculaire. De toutes les théories physiques, c'est aujourd'hui celle qui prévoit les valeurs numériques de grandeurs mesurables avec le plus de précision (accord jusqu'à la dixième décimale pour certaines grandeurs concernant l'électron).

De la même façon, vingt ans plus tard, la théorie de l'interaction électrofaible qualitativement satisfaisante, se heurtait à des divergences lors de calculs précis des propriétés des nouvelles particules W et Z. La méthode de renormalisation de

Richard Feynman se trouvant inopérante sur cette théorie électrofaible. Sur le plan mathématique, la différence fondamentale entre les deux théories repose sur leurs symétries. L'électrodynamique quantique repose sur une symétrie de jauge commutative (abélienne) alors que la théorie de l'interaction électrofaible repose sur une symétrie de jauge non commutative (non abélienne). En 1971, **Martinus Veltman** et **Gerard 't Hooft** publient une méthode de renormalisation applicable à cette théorie puis calculent des grandeurs physiques liées aux propriétés de W et Z. Les comparaisons entre mesures et calculs montrent une grande concordance.

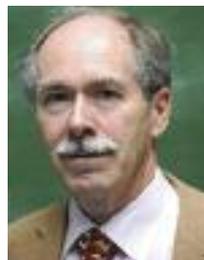


Fig II.9 Gerard 't Hooft

La méthode est aussi utilisée pour calculer la masse de l'hypothétique quark top. Après sa découverte en 1995, puis la mesure de sa masse, la prédiction se révèle excellente.

Martinus Veltman et **Gerard 't Hooft** obtiennent le prix Nobel de physique en 1999 pour ces travaux sur la renormalisation.

Depuis la fin des années 1960, un élève de Gell-Mann, **Kenneth Wilson** (1936-2013) travaille sur les symétries dans les particules élémentaires et les techniques de renormalisation. Il établit précisément une relation entre théorie quantique des champs et théorie des phénomènes critiques. Son intérêt pour les transitions de phase et sa connaissance des techniques de renormalisation le conduisent à la compréhension fondamentale et au rapprochement de nombreux phénomènes physiques. Reprenant les résultats de **Lev Landau**, il comprend pourquoi des comportements d'invariance d'échelle et d'universalité avaient été empiriquement observés dans diverses situations physiques. En effet si la théorie de Landau avait marqué une étape importante dans la compréhension des changements de phase, elle se révélait insuffisante pour expliquer quantitativement les résultats obtenus avec les moyens expérimentaux modernes. Kenneth Wilson étudie l'invariance d'échelle sur des systèmes autosimilaires du type fractal. L'invariance d'échelle est un prolongement du principe de similitude de Fourier qui énonce que deux systèmes géométriquement homothétiques ont les mêmes propriétés. Le principe de Fourier trouve évidemment sa limite inférieure de validité dans le monde nanométrique. Là, un système physique peut présenter des propriétés différentes selon l'échelle d'observation. La notion d'échelle caractéristique d'un phénomène permet de créer une hiérarchie entre les structures observées, les interactions, les corrélations, et les effets extérieurs. La difficulté est de comprendre pourquoi des interactions à courte portée engendrent des phénomènes à grande échelle. Kenneth Wilson sépare les interactions entre différentes échelles imbriquées et démontre que c'est l'existence de comportements collectifs hiérarchisés depuis les échelles microscopiques jusqu'aux échelles macroscopiques qui est responsable des phénomènes critiques. La hiérarchie impose donc de ne s'intéresser qu'à la manière dont les constituants microscopiques coopèrent et non aux détails de leur constitution. La méthode trouve de nombreuses utilisations dans diverses branches de la physique : la percolation, la physique des polymères, la physique des particules élémentaires, la théorie de la mesure, la turbulence, la cosmologie, les transitions de phases et les phénomènes critiques. Le grand intérêt des méthodes de renormalisation est leur capacité à traiter des problèmes où différentes échelles

interagissent, c'est-à-dire des problèmes où des phénomènes modélisés à une échelle élémentaire et ayant des interactions à courtes portées sont susceptibles de créer des phénomènes perceptibles à grande échelle. Le prix Nobel de physique est décerné à Kenneth Wilson en 1982.

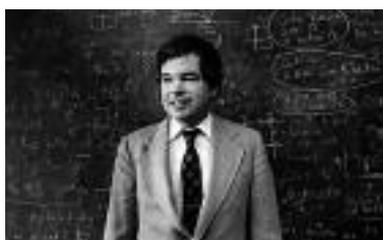


Fig II.10 Kenneth Wilson.

C'est en s'appuyant sur les travaux de **Kenneth Wilson** que **Pierre Gilles De Gennes** (1932 - 2007) fait avancer la compréhension des relations entre structure et propriétés dans les cristaux liquides et les polymères. Il obtient le prix Nobel de physique en 1991.



Fig II.11 Pierre Gilles De Gennes

Enfin, La théorie mathématique complète de la renormalisation est seulement achevée par **Alain Connes** en 2000.



Fig II.12 Alain Connes

II.9 De la supraconductivité au mécanisme de Higgs, la brisure de symétrie à l'oeuvre

Certains métaux ou alliages voient leur résistance s'annuler au dessous d'une température critique. Lev Landau, après avoir élaboré sa théorie des transitions de phase avec brisure spontanée de la symétrie dans les années 1930, s'intéresse à cette transition de supraconductivité si particulière et si difficile à expliquer par les meilleurs théoriciens qui se sont penchés sur le sujet. Il n'explique pas d'où vient le condensat responsable du phénomène, mais décrit comment celui-ci se comporte quand on change la température du matériau autour du changement de phase. Pour ce faire, en 1950, il construit avec son compatriote **Vitaly Ginzburg** (Prix Nobel de Physique 2003) un improbable lagrangien portant sur une fonction d'onde quantique spatialement variable qui est en réalité le paramètre d'ordre de Landau (voir Fonctions de Green et matrice S dans [24]). Considérant qu'un supraconducteur est plus ordonné, mais moins symétrique, qu'un matériau classique, et que la fonction d'onde décrit ce nouvel ordre, ils trouvent les équations auxquelles cette fonction d'onde doit obéir. Ils en déduisent alors les propriétés des supraconducteurs en fonction de la température et du champ magnétique. Cette étonnante théorie de Ginzburg Landau, qui n'explique pas l'origine du phénomène, permet

de comprendre les observations faites sur ces matériaux, mais aussi prévoit, sous l'effet de la pénétration d'un champ magnétique, l'existence d'un réseau quantifié macroscopique de tubes de flux magnétique, les vortex. Ces structures seront découvertes par **Abrikosov** quelques années plus tard, puis étudiées par **Pierre Gilles de Gennes**. Mais le plus extraordinaire, c'est qu'en incorporant dans le lagrangien de Ginzburg-Landau des champs quantiques décrivant les particules et en remplaçant la symétrie de jauge de l'électromagnétisme par celle de la jauge électrofaible, on obtient le lagrangien du modèle standard de la Physique des Particules ! Le champ scalaire de Ginzburg-Landau joue donc le même rôle que le champ scalaire de Higgs.

La compréhension de l'origine de la supraconductivité à basse température viendra en 1957 avec les travaux de **Bardeen, Cooper et Schrieffer** (Prix Nobel de Physique 1972).

Jean Matricon [29] décrit simplement cette théorie BCS qui s'appuie sur un imposant formalisme mathématique pour décrire une interaction attractive électron-phonon.

« *L'idée force de la théorie de BCS est de montrer que la condensation associée à la transition de phase vers l'état supraconducteur traduit l'apparition d'un ordre dans l'espace des moments et non dans celui des positions. La « paire de Cooper » est formée par l'union temporaire de deux électrons dont les moments sont égaux et opposés, ce qui donne à cet objet un moment résultant nul. Cette union résulte de l'interaction des électrons avec les ions métalliques au milieu desquels ils circulent: chaque électron laisse derrière lui une sorte de sillage formé par les ions positifs qu'il a attirés et qui se sont ainsi légèrement rapprochés. Un autre électron venant en sens inverse est alors comme piégé dans ce sillage et se trouve ainsi « couplé » au premier électron. Bien qu'éphémère, cette paire d'électrons forme un état quantique parfaitement déterminé auquel son moment nul impose une délocalisation très grande. L'état supraconducteur résulte de la superposition de toutes ces « paires de Cooper ». Le fait que le moment de la paire de Cooper soit nul suggère pour celle-ci un comportement de boson et donc un rapprochement entre la supraconductivité et la superfluidité de l'hélium, dont la relation à la condensation de Bose avait fini, après de violentes controverses, par être admise. »*

A la fin des années 50 la théorie BCS devient clairement une base de réflexion pour comprendre les mécanismes qui agissent en physique des particules élémentaires dans les domaines de brisure de symétrie et de champ associé faisant émerger la masse. **Yoichiro Nambu** comprend que la théorie BCS constitue un exemple de brisure spontanée de symétrie appliquée au champ de jauge de l'électromagnétisme. La symétrie de $U(1)$ est brisée par la présence d'un autre champ quantique dont les quanta sont les paires de Cooper. Les lois décrivant la dynamique des électrons du matériau restent invariantes par rapport à la symétrie de jauge locale $U(1)$ mais pas le point zéro. Le potentiel prend alors la forme d'un chapeau mexicain.

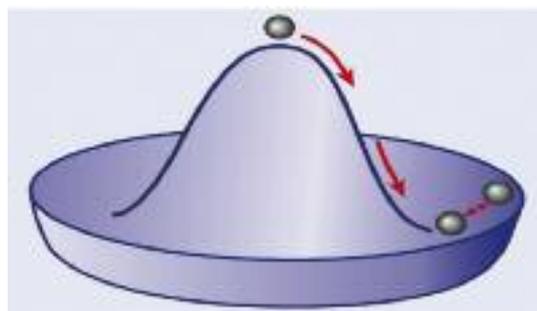


Fig II. 13 Potentiel en chapeau mexicain expliquant la brisure de symétrie

La minimisation de l'énergie du système est donc un problème à solution multiple typique des brisures de symétrie comme l'avait montré pour la première fois **Pierre Curie** dans son article historique. Pour **Nambu**, puisque les paires existent dans un état de plus basse énergie, il est nécessaire de leur fournir de l'énergie pour les découpler. Les électrons libres créés ainsi possèdent alors une énergie supplémentaire égale à la moitié de l'énergie requise pour séparer les paires. Ce surcoût d'énergie se manifeste comme une masse supplémentaire.

C'est ce que présente Nambu à la *Conference on Theoretical Physics* de Purdue en 1960, sous le titre « *A superconductor model of elementary particles and its consequences* » ; et **Julian Schwinger** [26] dans son article « *Gauge Invariance and Mass* ».

C'est dans ce contexte qu'interviennent les travaux de **Brout** (1928-2011), **Englert** (1932-) et **Higgs** (1929 -) conduisant aux articles de 1964 : [27], [28] et au Prix Nobel pour **Englert** et **Higgs** après la découverte du boson BEH au CERN.



Fig II. 14 Brout, Englert et Higgs

Alexander Kieft de l'Institut de Physique Théorique d'Amsterdam a publié en juin 2012 : « Higgs and BCS Theory : A Dynamical Breaking of Symmetry » qui présente une bonne synthèse du sujet.

La clé de voute du Modèle Standard est donc d'abord une extraordinaire aventure intellectuelle ayant impliqué de nombreux physiciens de premier plan, même si l'histoire ne retiendra qu'un nom.

III LA SYMÉTRIE, PUISSANT MOTEUR DE DÉCOUVERTE

La théorie quantique des champs - synthèse des concepts relativistes et quantiques - s'est développée avec la renormalisation, tout au long du XX^{ème} siècle jusqu'à devenir le cadre de la compréhension des interactions nucléaires et de leur possible unification à l'électromagnétisme. Ses remarquables succès qualitatifs et quantitatifs dans la description du rayonnement électromagnétique, de l'atome, du noyau atomique et des particules élémentaires en font un des meilleurs exemples de la pertinence de la description mathématique des phénomènes physiques. L'adéquation de sa formulation mathématique avec les outils issus de la théorie des Groupes a permis d'exploiter les propriétés de symétrie manifestes ou cachées des systèmes physiques. Parmi celles-ci, les symétries abstraites déduites de l'invariance de jauge présumée des interactions nucléaires se sont révélées cruciales pour l'établissement du modèle standard des interactions et pour l'unification des forces fondamentales.

C'est depuis plus d'un siècle que les raisonnements s'appuyant sur des considérations de symétrie gouvernent les développements de la physique, des sciences associées et d'une partie des mathématiques. Bien que le concept soit d'origine mathématique, il a des conséquences profondes en physique, en donnant à toutes les forces fondamentales de la nature une origine géométrique.

En mécanique classique aussi, où l'on retrouve les lois de conservation à partir de quelques symétries géométriques.

Ces symétries seront qualifiées d'externes car elles s'expriment à l'aide d'un système de coordonnées extérieur à l'objet étudié. En physique des particules, il est nécessaire de les compléter avec des symétries internes qui se traduisent par la conservation de quantités qui sont des caractéristiques intrinsèques des particules, comme la charge électrique ou la charge de couleur. Ces symétries internes sont définies par les transformations de jauge. Ce sont des opérations abstraites dont il est difficile de donner une image intuitive. Elles sont globales ou locales et agissent sur les champs qui, dans les théories quantiques relativistes, représentent les particules. Ces champs sont des êtres mathématiques définis en chaque point de l'espace et du temps. Une transformation de jauge globale s'effectue partout de la même manière, en chaque point de l'espace et du temps, et agit donc bien de façon globale sur les champs. Au contraire, dans une transformation de jauge locale, les champs peuvent être modifiés localement et de façon indépendante en chaque point de l'espace-temps. Les contraintes imposées par ce dernier type d'opération sont donc beaucoup plus fortes, et les conséquences remarquables.

Pour assurer l'invariance des équations dans une transformation de jauge locale, il faut en effet introduire un nouveau champ, appelé « champ de jauge », qui s'identifie avec celui d'une force physique fondamentale. L'existence même des forces fondamentales peut ainsi être déduite d'un concept de symétrie, purement géométrique.

La symétrie en tant que moteur de découverte se voit aussi très clairement, même en physique classique, lorsqu'on place certains travaux de recherche dans une perspective historique. Pierre Curie l'affirme clairement en 1880 : « *La symétrie est un guide pour la recherche de nouveaux phénomènes* ».

Nous avons vu que pour **Franz Neumann** en 1833, toute propriété d'un cristal a la même symétrie ponctuelle que le cristal lui-même. En 1894, dans son article historique, Pierre Curie (1859-1906) va plus loin. En intégrant les notions de cause et effet il rend le principe opérationnel et universel.

III.1 « Un guide pour la recherche de nouveaux phénomènes »

Les réflexions théoriques de Pierre Curie ont abouti à deux contributions majeures dans le domaine de la symétrie, de ses brisures et des transitions de phases magnétiques : son article historique de 1894 et sa thèse de 1895. L'année de sa thèse, il épouse **Marie Skłodowska** et l'accompagne dans ses recherches sur la radioactivité. C'est pour les résultats dans ce domaine qu'il partagera avec elle et **Henri Becquerel**, le Prix Nobel de Physique de 1903. Sur les sujets symétrie, magnétisme et radioactivité Pierre Curie est l'auteur d'environ 70 publications, malgré une courte vie scientifique.

Pierre Curie a compris l'importance primordiale de bien distinguer la nature des grandeurs manipulées en physique (grandeurs polaires ou grandeurs axiales). Il a massivement utilisé l'influence des symétries sur ces grandeurs comme fil conducteur de ses raisonnements, comme nous le montrons ci-dessous avec quelques exemples. Dans son enseignement il insistait sur ce point et regrettait que l'on ne souligne pas assez la nature différente des champs électrique et magnétique représentés indistinctement par des vecteurs.

Nous avons vu rapidement au paragraphe I.2 la différence de comportement entre un vecteur axial et un vecteur polaire lors d'une réflexion miroir. Mais pour sentir toute la puissance et la subtilité des raisonnements de Pierre Curie, il nous paraît nécessaire de préciser ici cette notion.

- Les grandeurs polaires, (ou vraies grandeurs), portent un signe (pour un scalaire) ou un sens (pour un vecteur) qui est

une propriété intrinsèque, une donnée de la nature indépendante de toute convention d'orientation d'espace.

Longueur, volume, angle, masse, énergie $W = \mathbf{F} \cdot \mathbf{l}$, charge électrique, sont des exemples de scalaires polaires.

Position \mathbf{r} , vitesse \mathbf{v} , accélération $\boldsymbol{\gamma}$, force \mathbf{F} , champ électrique \mathbf{E} , sont des exemples de vecteurs polaires.

- Les grandeurs axiales (ou pseudo-grandeurs) portent un signe (pour un scalaire) ou un sens (pour un vecteur) qui est sans signification physique et est arbitraire ; il est fixé par convention d'orientation de l'espace et change avec cette convention.

Surfaces et angles orientés sont des exemples de scalaires axiaux.

Vitesse angulaire, moment cinétique, champ magnétique, moment magnétique, sont des exemples de vecteurs axiaux.

Les grandeurs axiales sont des grandeurs qui font intervenir, directement ou indirectement une rotation comme par exemple le vecteur rotation d'un solide autour d'un axe, dirigé suivant l'axe de rotation et dont le sens est donné par la règle de Maxwell, ou règle de la main droite ou encore du tire bouchon.



Fig III.1 Règle de la main droite définissant l'orientation d'un vecteur axial.

La règle est utilisée en particulier dans le produit vectoriel souvent noté « \wedge ».

Si \mathbf{A} désigne le type vecteur axial et \mathbf{P} le type vecteur polaire, on a les correspondances suivantes :

$$\mathbf{A} \wedge \mathbf{A} \rightarrow \mathbf{A} \quad \mathbf{P} \wedge \mathbf{P} \rightarrow \mathbf{A} \quad \mathbf{P} \wedge \mathbf{A} \rightarrow \mathbf{P}$$

Un exemple bien connu est celui de la force de Lorentz \mathbf{F}_l qui agit sur une charge q en mouvement à la vitesse \mathbf{v} dans un champ magnétique \mathbf{B} . On a $\mathbf{F}_l = q\mathbf{v} \wedge \mathbf{B}$.

\mathbf{F}_l et \mathbf{v} étant des vecteurs polaires, \mathbf{B} est nécessairement un vecteur axial. Dans la symétrie par rapport à un plan, le champ magnétique se transforme en son antisymétrique, c'est-à-dire en l'opposé de son symétrique.

Comme dans le cas de l'analyse dimensionnelle, lorsqu'on vérifie que les deux membres d'une équation sont bien homogènes en dimension (qu'on n'a pas une longueur égale à un temps par exemple), la réflexion sur la nature des grandeurs est à la fois un guide et un moyen de vérification.

Ainsi, Pierre Curie et son frère prévoient la possibilité pour un cristal de développer une tension électrique lorsqu'il est soumis à une pression. C'est le phénomène de piézoélectricité qu'ils découvrent et confirment ensuite expérimentalement, guidés par des considérations de symétrie. En effet, si les deux extrémités d'un axe de symétrie sont identiques, il n'y a pas de raison qu'une extrémité de cet axe plutôt que l'autre soit privilégiée. La compression selon cet axe ne devrait donc pas avoir d'effet électrique. Un cristal centrosymétrique, soumis à un champ de contraintes, représenté par un ellipsoïde centrosymétrique, conserve son centre de symétrie : aucune tension électrique ne peut apparaître. Un tel cristal n'est donc pas piézoélectrique. Un cristal non centrosymétrique ne sera piézoélectrique que s'il est polaire ou si, sous l'effet d'un champ de contraintes, il le devient.

Les cristaux ferroélectriques doivent être piézoélectriques de par leur symétrie : c'est ce que l'on observe en effet, une pression hydrostatique appliquée à ces cristaux modifie la polarisation spontanée.

III.1.1 «Sur la symétrie dans les phénomènes physiques, symétrie d'un champ électrique et d'un champ magnétique» 1894.

La relation entre la symétrie des causes et celle des effets peut sembler évidente et banale, mais un examen attentif du principe de Curie en révèle toute la profondeur.

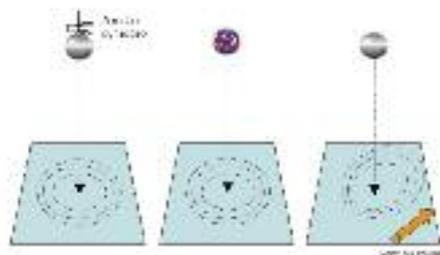


Fig III.2 Principe de Curie : les symétries des causes se retrouvent dans les effets. © R. Moret.

L'impact dans l'eau de la chute d'une bille crée des ondes en forme de cercles concentriques à la surface. L'ensemble formé par la bille, sa trajectoire verticale et l'eau horizontale est «la cause» et présente une symétrie axiale (axe vertical). Les ondes circulaires sont «l'effet» ; elles aussi sont symétriques autour de cet axe, perpendiculaire à la surface. C'est une illustration simple du principe de Curie : «*lorsque certaines causes produisent certains effets, les éléments de symétrie des causes se retrouvent dans les effets produits*».

Il est important de souligner que cette formulation autorise que les effets puissent être moins symétriques que les causes. Dans notre exemple, on peut faire perdre à la bille sa symétrie axiale sans aucune conséquence sur la symétrie de l'effet.

Pierre Curie donne un énoncé équivalent du principe de symétrie : «*lorsque certains effets révèlent une certaine dissymétrie, cette dissymétrie doit se retrouver dans les causes qui leur ont donné naissance*».

Dans l'exemple (Fig III.2), si les ondes ne sont plus circulaires mais ovales, à cause du vent ou du courant, la dissymétrie des ondes doit être recherchée dans celle des causes (vent ou courant).

Ce second énoncé permet de comprendre pourquoi une trop grande symétrie des causes peut interdire un phénomène. Ce principe de symétrie ou de dissymétrie donne des conditions nécessaires, auxquelles doivent satisfaire les causes, pour que les phénomènes soient possibles, mais elles ne sont pas suffisantes pour qu'ils se produisent avec certitude. [2].

Le cas le plus simple est celui où une cause de dissymétrie exerce une action trop faible pour être observable. Comme nous l'avons vu au paragraphe I.2, Louis Pasteur envisageait pour le magnétisme un rôle dans l'apparition de molécules chirales, et tentait des synthèses asymétriques sous champ magnétique, mais sans succès. Pierre Curie montre en effet qu'un tel champ possède un plan de symétrie (qui lui est perpendiculaire) et ne permet donc pas de séparer les énantiomères. Les expériences de Louis Pasteur sur le magnétisme étaient vouées à l'échec.

C'est avec ce type de raisonnement que Pierre Curie prévoit des effets ou les explique de façon élégante. Nous l'avons vu avec la piézoélectricité, mais il faut aussi citer les effets suivants :

-Effet Hall.

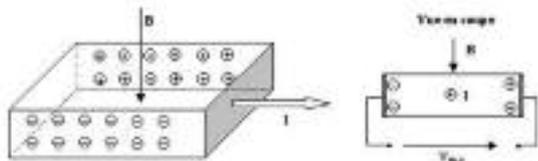


Fig III.3 Illustration de l'effet Hall.

Un ruban conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique perpendiculaire à son plan, voit se développer une tension électrique entre ses bords (la tension de Hall).

- Effet Wiedemann.

Quand le courant passe dans un fil linéaire aimanté dans le sens de sa longueur, le fil se tord. La densité de courant et l'aimantation ont seulement en commun l'axe d'ordre infini. Pour que le fil reste dans un plan, ce plan devrait être à la fois un miroir et un antimiroir, ce qui est impossible.

- Effet Einstein - de Haas.

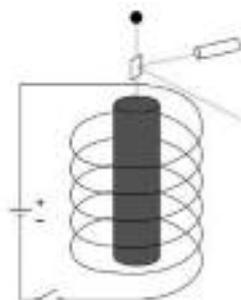


Fig III.4 Illustration de l'effet Einstein - de Haas et de l'effet Barnett.

Un cylindre d'un matériau ferromagnétique suspendu par un fil sans torsion tourne sur lui-même quand on l'aimante dans le sens de sa longueur. Albert Einstein démontrera en 1915 que cet effet établit la relation entre magnétisme, moment angulaire, et spin de l'électron. Cette expérience de physique classique qui conduit à un résultat double de celui attendu pour le moment magnétique (anomalie gyromagnétique), souligne le rôle du spin, propriété purement quantique. Pour Einstein, le spin est effectivement de même nature que le moment cinétique des solides en rotation.

- Effet Barnett.

Il s'agit en fait de l'effet réciproque. Si le cylindre est mis en rotation, il s'aimante.

L'aimantation est proportionnelle au moment cinétique d'une particule chargée en mouvement orbital. La charge électrique étant une grandeur polaire, l'aimantation est bien axiale. L'expérience confirme également que champ magnétique et vitesse de rotation sont des grandeurs de même nature (axiale).

Enfin, ces raisonnements «par symétrie» conduisent Pierre Curie à prévoir avant Paul Dirac, l'existence de monopôles magnétiques. Bien qu'ils n'aient jamais été observés, aucune loi physique n'en interdit l'existence.

Le principe de Curie n'a pas été accepté unanimement par les physiciens dès le début. En effet il semblait ne pas pouvoir s'appliquer dans un certain nombre de cas. Or un principe doit avoir un caractère général.

La difficulté peut être illustrée par l'exemple du flambage. Si l'on appuie sur l'extrémité d'une tige cylindrique élastique elle se déforme en conservant la symétrie axiale puis, à partir

d'une certaine force, se courbe, au hasard, dans une direction latérale.

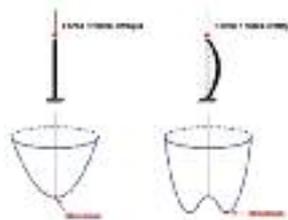


Fig III.5 Evolution du potentiel lors du flambage montrant la brisure de symétrie.

L'effet (la tige flambée) semble moins symétrique que la cause, ce qui signerait pour certains physiciens une violation du principe. L'étude des transitions de phase dans les cristaux liquides fournit un beau sujet pour approcher les conditions de cette éventuelle violation.

Considérons un liquide isotrope où les molécules ayant une forme proche de bâtonnet sont disposées et orientées aléatoirement dans les trois directions de l'espace. En baissant la température, nous allons observer des transitions de phase et préciser les symétries associées.

- Le liquide isotrope possède toutes les symétries continues de translation et de rotation possibles.

- En dessous d'une certaine température apparaît une phase cristal liquide dite nématique caractérisée par une direction privilégiée des molécules (le paramètre d'ordre est le facteur d'orientation $S = (1/2) (3 \cos^2 \theta - 1)$ où θ est l'angle que fait une molécule individuelle avec un axe privilégié ou directeur). Les symétries continues de translation ne sont pas modifiées. Mais le cristal liquide nématique ne possède plus que les symétries de rotation autour de cet axe. Des symétries ont disparu lors de la transition ; phénomène identique au choix de la direction de l'aimantation dans un matériau ferromagnétique.

- En continuant le refroidissement, une nouvelle transition apparaît, entre cristal liquide nématique et smectique A. Dans cette nouvelle phase, les molécules sont organisées en couches parallèles. Le paramètre d'ordre de la transition est l'amplitude de la modulation sinusoidale de la densité dans la direction perpendiculaire aux couches, la symétrie continue de translation le long de l'axe nématique a maintenant disparu, et est remplacée par la symétrie périodique cristalline due à la présence des couches, c'est-à-dire d'une modulation sinusoidale de la densité, donnée par une équation du type : $\rho(z) = \rho_0 \cos((2\pi/e)z + \varphi)$ où e est l'épaisseur des couches. La phase φ qui définit la position des couches est quelconque. **Pierre Gilles de Gennes** a montré que cette transition nématique - smectique est fondamentalement équivalente à celle de l'état liquide vers l'état superfluide où φ représente la phase de la fonction d'onde macroscopique associée aux porteurs de charge dans l'état condensé.

- A basse température, nouvelle transition dans le cristal liquide ; depuis smectique A vers smectique C caractérisée par un basculement des molécules par rapport à la normale aux couches, le paramètre d'ordre de cette nouvelle transition est l'angle de basculement. La symétrie de rotation autour de l'axe normal aux couches est perdue.

- Enfin la transition smectique C - cristal met en place une organisation tridimensionnelle classique de l'état solide cristallin.

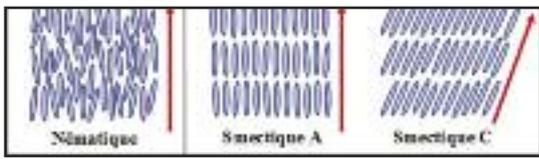


Fig III.6 Organisation moléculaire dans différents types de cristaux liquides.

Tout au long de cette séquence liquide - nématique - smectique A - smectique C - cristal, alors que la symétrie des causes est restée constante, on a assisté à une perte systématique lors de chaque transition, d'éléments de symétrie. Ce sont ces brisures de symétrie qui ont fait douter un temps de la validité du principe de Curie et ont conduit à son principe généralisé.

Dans le principe généralisé de Curie, on tient compte de l'ensemble des solutions possibles pour l'effet et non seulement de l'unique mode observé. Si on recommence l'expérience de flambage (Fig III.5) plusieurs fois, il se produira à chaque fois dans une direction différente. C'est l'ensemble de ces flambages qui constitue en réalité la symétrie de l'effet : puisque les directions sont aléatoires celui-ci présente effectivement une symétrie axiale. Mais chacun des modes de flambage a bien une symétrie plus basse que celle de la cause. Dans le cas des transitions de phase liquide - cristal liquide - cristal, le principe généralisé de Curie invite à prendre en compte :

- toutes les orientations possibles dans l'espace du directeur pour le nématique ;
- toutes les valeurs de la phase ϕ , c'est-à-dire de la position des plans de couches pour la phase smectique A ;
- toutes les directions de plans de basculements des molécules par rapport à la normale au plan des couches, en phase smectique C.

Les brisures de symétrie ne violent donc pas le principe de Curie, dans sa version généralisée : lorsque les problèmes sont à solutions multiples c'est la symétrie de l'ensemble des solutions qu'il faut considérer. Cette situation est très courante et elle intervient quand un système devient instable par suite d'un changement des conditions extérieures. Le principe de Curie généralisé est alors très utile pour prévoir et comprendre l'évolution d'un tel système.

III.1.2 «Sur les propriétés magnétiques des corps à diverses températures, pressions et intensités de champ magnétique» 1895

est le titre de la thèse soutenue par Pierre Curie. Il y montre que le diamagnétisme est indépendant de la température, que la susceptibilité paramagnétique est inversement proportionnelle à la température absolue (loi de Curie), et qu'au-dessus d'une certaine température (point de Curie) le ferromagnétisme se transforme en paramagnétisme.

Ces importants travaux servent de base à la théorie atomique des différentes formes du magnétisme (dia-, para-, ferro-), dont il établira un premier état en 1905 avec son élève **Paul Langevin**.

Ainsi, un matériau magnétique n'a pas de moment magnétique permanent au-dessus de sa température de Curie. Au-dessous de cette température, il possède une aimantation permanente orientée dans une certaine direction (état ferromagnétique). La symétrie a été brisée à la transition : en dessous de la température de Curie, le matériau n'est invariant que par rotation autour d'un axe orienté dans la direction de l'aimantation. Il a donc perdu de nombreux éléments de symétrie. Ce sont les premières réflexions sur le rôle majeur de la symétrie et de ses brisures dans la compréhension des phénomènes de transitions de phases. Elles seront reprises par Landau (cf paragraphe

I.6). Le décès brutal de Pierre Curie interdira à ce grand physicien de laisser son nom dans l'essor considérable que va connaître la symétrie comme moteur du raisonnement dans les théories quantique et relativiste naissantes.

III.1.3 Le déploiement intellectuel de la symétrie.

Contemporain de Landau, Wigner en 1927 démontre que dans un espace sans différence gauche droite dans les interactions, la parité est conservée et réciproquement.

Mais plus globalement, mathématiciens et physiciens rencontrés dans les chapitres précédents font progressivement changer le statut de la Symétrie.

Paul Dirac, Élie Cartan, Yang et Lee, Henri Poincaré, Albert Einstein, Hermann Weyl, Emmy Noether, Alain Connes, Kobayashi, Maskawa, Yoichiro Nambu, Glashow, Salam, Weinberg, Theodor Kaluza, Kenneth Wilson, Brout, Englert, Higgs, Vitaly Ginzburg, souvent récompensés par des médailles fields ou des prix Nobel, jalonnent ce déploiement. L'idée centrale est que l'invariance de propriétés physiques pilote les symétries du système qui imposent la forme des opérateurs, des équations et donc la structure même des théories. Guidée par cette méthode, la recherche offre des résultats théoriques inattendus qui sont autant de propositions pour des validations expérimentales. L'un des sommets de cet édifice est constitué des deux théorèmes de Emmy Noether qui dans leur application embrassent la totalité des lois de conservation de la physique classique, relativiste ou quantique.

+++++

Application des théorèmes de Emmy Noether

Grandeurs non observables	Invariance	Conservation
position absolue	translation	impulsion
temps absolu	déplacement dans le temps	énergie
direction absolue	rotation	moment cinétique
phase relative entre particules chargées	transformation de jauge de charge	charge électrique
phase relative des quarks et des autres particules	transformation de jauge baryonique	nombre (charge) baryonique
phase relative des électrons, muons, tau et des autres particules	transformation de jauge électronique, muonique, tauique	nombre leptonique (électronique, muonique, tauique)

+++++

La symétrie et ses brisures se trouvent maintenant au coeur de la physique théorique et d'une partie des mathématiques.

Elle constitue un véritable réservoir de concepts.

Le concept d'invariance, qui est associé, est devenu tellement central, qu'il constitue aujourd'hui la base de la plupart des constructions mathématiques.

Nous allons voir que l'étude de la symétrie PCT est un véritable aiguillon à la fois pour la physique théorique et la physique expérimentale.

III.2 Les enjeux de la symétrie PCT.

Durant une vingtaine d'année, autour de 1960, de nombreux théoriciens se sont penchés sur la signification profonde de la symétrie **PCT**. Progressivement, ce qui était un Principe de physicien est devenu un théorème démontré rigoureusement et indépendamment par plusieurs d'entre-eux (**John Bell** par exemple). Aujourd'hui on parle couramment du Théorème **PCT** :

«*Toute théorie quantique des champs, locale invariante au sens de Lorentz, avec un hamiltonien hermitien doit posséder une symétrie PCT*».

Bien entendu ce théorème ne restera valide que dans la mesure où ses fondements ne seront pas remis en cause.

III.2.1 Mais justement à propos du problème de localité.

Une des difficultés majeures pour réconcilier relativité restreinte et mécanique quantique est que la première est une théorie locale alors que la seconde est non locale. Mais que dit la Nature ? La confrontation avec l'expérience valide chaque fois un peu plus chacune de ces théories... mais dans leur champ respectif.

Le principe de localité, issu de la relativité restreinte, indique qu'un objet ne peut être influencé que par son environnement immédiat. La naissance de ce principe renvoie à la querelle historique entre Einstein et les tenants de l'interprétation classique de la mécanique quantique (dite interprétation de Copenhague). Période fascinante de l'histoire de la physique, durant laquelle les plus grands physiciens de l'époque se sont vigoureusement opposés en utilisant par exemple des expériences de pensée (spécialité d'**Albert Einstein**) lorsque les moyens ne permettaient pas de conduire des expériences réelles. C'est dans ce cadre qu'Einstein a proposé une réflexion sur la mesure de l'état de polarisation d'une paire de photons suffisamment éloignés l'un de l'autre pour qu'aucune information ne puisse passer de l'un à l'autre pendant la réalisation de la mesure. La conclusion, connue sous le terme de paradoxe EPR (pour Einstein Podolsky Rosen) apportait une contradiction dans la mécanique quantique (voir [16] le paradoxe de la mesure).

Il fallut attendre 1964 pour que **John Bell** produise son théorème portant sur des inégalités impliquées par le paradoxe, et que l'on puisse envisager de transformer l'expérience de pensée d'Einstein en expérience réelle. C'est en 1981 qu'**Alain Aspect**, à Orsay, réalise l'expérience qui établit qu'il n'y a pas de variables cachées qui rendraient la mécanique quantique incomplète, et que par ailleurs son caractère non local est confirmé. Depuis, ces résultats ont été largement précisés et de nombreuses fois reproduits. Les phénomènes d'intrication quantique, massivement observés aujourd'hui, renforcent cette conclusion (voir [16] Imbroglgio quantique et inégalités de Bell).

III.2.2 Et à propos de l'invariance de Lorentz ?

Oscar Greenberg, (un des pionniers pour la charge de couleur des quarks), a démontré en 2002 un théorème qui porte son nom : Toute brisure de symétrie **PCT** induit une violation de l'invariance de Lorentz et réciproquement. Sous cet angle, la symétrie **PCT** est donc directement liée à la relativité restreinte [43].

III.2.3 Les Conséquences de la symétrie PCT

permettent de mieux comprendre les enjeux et donc les extraordinaires moyens théoriques et expérimentaux déployés pour mettre en évidence, expliquer ou prévoir d'éventuelles violations (voir [1] Lois de conservation -Invariance CPT ou PCT). Le théorème **PCT** exprime en fait le principe de causalité dans un contexte quantique et relativiste.

Ce théorème, implique qu'une brisure de symétrie ne peut pas porter sur **P**, sur **C** ou sur **T** isolément. Il doit y avoir compensation avec une autre brisure de symétrie. Par exemple la conservation des symétries **PC**, **CT** ou **PT** avec brisure de symétrie pour chaque membre du couple, est autorisée. Seule la brisure simultanée de **P** et **C** a été observée.

La brisure de symétrie **PC** doit aussi être compensée par une brisure portant sur **T**, afin de conserver **PCT**. C'est ce qui a été observé en 1998 dans l'expérience CPLEAR au CERN; cette expérience a révélé une asymétrie dans les oscillations entre kaon neutre et antikaon neutre, avec, en parallèle, une brisure de symétrie **PC** permettant la conservation du produit **PCT**.

D'autres conséquences de la symétrie **PCT** concernent l'égalité des charges, des temps de vie et des masses entre une particule et son antiparticule.

La démonstration de l'égalité des masses est simple, c'est un exercice souvent proposé aux étudiants [42]:

Soient une particule de masse m_p et son antiparticule de masse m_a , considérées libres et au repos. Les énergies associées sont donc respectivement $E_p = m_p \cdot c^2$ et $E_a = m_a \cdot c^2$.

Soit ψ_p la fonction d'onde de la particule et ψ_a celle de son antiparticule. L'action sur une particule des trois symétries **P**, **C** et **T** dans un ordre quelconque conduit à l'antiparticule avec des variables d'espace et de temps inversées. \mathbf{r} devient $-\mathbf{r}$ et t devient $-t$. La transformation de la fonction d'onde sous l'action de **PCT** sera donc notée :

$$[\text{PCT}] \psi_p(\mathbf{r}, t) = \psi_a(-\mathbf{r}, -t)$$

Notons \mathcal{H} l'opérateur de Hamilton. Dans sa forme la plus compacte, l'équation de Schrödinger s'écrit $\mathcal{H} \psi = E \psi$.

Donc dans le cas qui nous intéresse,

$$\mathcal{H} \psi_p(\mathbf{r}, t) = E_p \cdot \psi_p(\mathbf{r}, t) = m_p \cdot c^2 \cdot \psi_p(\mathbf{r}, t)$$

L'application de la transformation **PCT** à cette équation de Schrödinger conduit alors à

$$[\text{PCT}] \mathcal{H} \psi_p(\mathbf{r}, t) = [\text{PCT}] m_p \cdot c^2 \cdot \psi_p(\mathbf{r}, t) = m_p \cdot c^2 \cdot [\text{PCT}] \psi_p(\mathbf{r}, t)$$

S'il y a symétrie **PCT**, alors la transformation du hamiltonien est égale au hamiltonien de la transformation et donc

$$[\text{PCT}] \mathcal{H} \psi_p(\mathbf{r}, t) = \mathcal{H} [\text{PCT}] \psi_p(\mathbf{r}, t).$$

Donc

$$\mathcal{H} [\text{PCT}] \psi_p(\mathbf{r}, t) = m_p \cdot c^2 \cdot [\text{PCT}] \psi_p(\mathbf{r}, t)$$

$$\mathcal{H} \psi_a(-\mathbf{r}, -t) = m_p \cdot c^2 \cdot \psi_a(-\mathbf{r}, -t)$$

$$m_a \cdot c^2 \cdot \psi_a(-\mathbf{r}, -t) = m_p \cdot c^2 \cdot \psi_a(-\mathbf{r}, -t) \text{ donc } m_a = m_p$$

Si les hypothèses sont justes, les masses des particules et de leur antiparticule doivent donc être rigoureusement égales. L'oscillation des neutrinos est un processus intéressant pour tester cette égalité car il fait intervenir les différences entre les carrés des masses. Au Fermilab, les expériences MINOS (pour Main Injector Neutrino Oscillation Search) et BooNE (pour Booster Neutrino Experiment) recherchent une éventuelle non nullité pour cette différence.

Ce point théorique et expérimental à propos des masses comparées des particules et antiparticules illustre de nombreuses démarches actuelles de recherche en physique avec comme point commun l'identification de nouvelles brisures de symétrie ou l'étude des mécanismes des brisures connues, même dans les domaines aussi robustes que la relativité et la physique quantique (voir [16] les problèmes de la brisure de symétrie de l'univers primordial et l'asymétrie du temps cosmologique).

En août 2014 aucun résultat expérimental n'est venu contredire, même dans un domaine restreint, le théorème **PCT** ou l'invariance de Lorentz.

Mais comme le souligne Louis Avan, (voir [1] Pour une nouvelle physique !?) la recherche d'une nouvelle physique justifie ces investigations, et également une grande prudence.

La communication de résultats sensationnels est parfois un peu précipitée ; que l'on songe à la récente affaire des neutrinos transluminiques de l'expérience OPERA !

Malgré les succès extraordinaires de la physique de ces dernières années, de nombreuses questions restent en suspens.

Quelles symétries mettre en jeu pour décrire dans une même théorie l'interaction électrofaible et l'interaction forte ?

Nous avons vu (recherche des groupes de jauge pertinents) que la théorie GUT de Sheldon Glashow et Howard Georgi considérant le groupe de symétrie du Modèle Standard comme un sous-groupe de SU(5), ne pouvait, malgré l'élégance mathématique du modèle, répondre à la question d'unification. Des recherches sur des groupes plus gros SO(10) ou E₆ sont en cours. A partir des symétries de SO(10), le modèle a des conséquences expérimentales vérifiables (une masse non nulle pour les neutrinos par exemple).

III.2.4 Où est l'antimatière ?

Elle est rare dans l'univers. L'asymétrie matière-antimatière, n'est pas expliquée par le Modèle Standard. Les trois conditions de **Sakharov** (1967) pour construire un univers composé de matière à partir d'un univers initialement symétrique, restent un sujet d'étude (voir [30] The conditions needed to develop an Imbalance):

- 1 non-conservation du nombre baryonique
- 2 violation de **C** et de **PC**
- 3 non-équilibre thermique de l'univers

Les deux Modèles Standards, celui des particules et celui du Big Bang, sont concernés par ce sujet car les violations de **PC** observées sont insuffisantes pour expliquer les observations.

III.2.5 Les paramètres libres du Modèle Standard

Les 19 paramètres libres laissent au physicien une impression d'incomplétude de la théorie.

Selon Alain Connes, «*personne ne pense que le modèle standard soit le fin mot de l'histoire surtout à cause du très-grand nombre de paramètres libres qu'il contient.*» [31]

III.2.6 Et la gravitation ?

C'est probablement avec l'antimatière, la matière noire et l'énergie sombre le sujet qui mobilise le plus notre réflexion à toutes les échelles d'espace et de temps.

Les défis sont énormes, ils justifient les efforts considérables des physiciens et mathématiciens dans les domaines de la physique quantique, de la cosmologie et de la topologie de l'univers.

Pour donner un bref aperçu de ce qui mobilise aujourd'hui les théoriciens, nous survolons dans le paragraphe suivant les principaux axes de recherches impliquant de manière essentielle le concept de symétrie au sens large.

III.3 Des théories en compétition ou une intelligence humaine bouillonnante.

La gravitation ne fait pas partie du modèle standard. Elle est d'intensité si faible comparée aux autres interactions (rappelez-vous que $\alpha_s / \alpha_g \approx 10^{39}$) qu'elle relève certainement d'une théorie radicalement différente.

Une des premières tentatives est due à **Bryce Dewitt** (1923 - 2004) avec la formulation de la fonction d'onde de l'Univers, l'équation de "Wheeler-de Witt". La complexité de l'équation est telle qu'elle s'est montrée inutilisable dans le cas de la gra-

vation quantique et présente aujourd'hui un intérêt historique, comme la théorie de Kaluza Klein (voir [32] Vers la cosmologie quantique par Marc Lachieze-Rey et Etat de l'art en cosmologie physique par Julien Lesgourgues). Dans un autre contexte, celui de la cosmologie, des simplifications de la fonction d'onde de "Wheeler-de Witt" sont utilisées par **Stephen Hawking** d'une part et **Andrei Linde** d'autre part.

Aujourd'hui, on sait que pour les spécialistes, quantifier la relativité générale n'est pas d'une grande difficulté, soit par quantification directe du champ de gravité soit en utilisant les symétries de jauge.

Malheureusement, la théorie quantique de jauge ainsi obtenue est non renormalisable, de nombreuses divergences apparaissent liées au spin 2 du graviton. Il est maintenant connu que toute théorie des champs incluant un boson de spin 2 est non renormalisable. Il faut donc mettre en oeuvre d'autres approches. Un nombre croissant de physiciens pense que la gravitation n'est peut être pas une force fondamentale de la nature au même titre que les trois autres, mais plutôt un phénomène émergent de la structure même, de la géométrie de l'espace-temps.

III.3.1 Les théories dites supersymétriques (SUSY)

Depuis la généralisation des nombres complexes par Hamilton (les quaternions), les mathématiciens ont développé des algèbres de nombres hypercomplexes [16] permettant d'étendre les symétries à des espaces de dimension quelconque (les algèbres de Clifford et Grassmann par exemple). De nouveaux êtres mathématiques viennent remplacer les vecteurs : les spineurs. **Julius Wess** (1934-2007) jouera un rôle essentiel dans l'approfondissement du rôle de ces spineurs dans les théories quantiques des champs relativistes et dans les succès théoriques des SUSY. En effet, elles rendent possible l'unification des forces nucléaires fortes avec l'interaction électrofaible à haute énergie en un point unique, où les constantes de couplage deviennent égales. Elles suppriment certains problèmes rencontrés dans les théories de Grande Unification (GUT). Elles 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.

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 et particules médiatrices d'interaction sont intimement liées. Aujourd'hui aucune superparticule n'a été identifiée que ce soit dans les rayons cosmiques ou dans les accélérateurs, pourtant le sélectron, de même masse que l'électron aurait dû l'être. Peut être faut-il, après l'introduction de la supersymétrie, la briser par un mécanisme de Higgs faisant disparaître les sélectrons aux énergies attendues? C'est une voie de recherche actuelle [33].

La supersymétrie permet d'introduire des interactions gravitationnelles, par le «produit» de deux transformations supersymétriques. Dans un espace à n dimensions (nd), on crée l'équivalent d'une translation et d'une rotation. Si l'on impose en outre une symétrie de jauge locale (les paramètres dépendent de la position dans l'espace) et que l'on prend comme espace nd particulier, l'espace-temps (n=4), on obtient une théorie générique 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.

Il existe de nombreuses théories de super gravité, l'une d'elle dite «sans échelle», résout le problème des 13 ordres de grandeur entre l'échelle de Planck et celle du Modèle Standard. Une autre propose une supergravité dans un espace temps à 11 dimensions, qui aurait pu être candidate pour décrire la gravitation quantique unifiée avec les autres interactions. Malheureusement ces théories ne sont pas renormalisables et donc le calcul des grandeurs physiques prévues pour la confrontation à l'expérience est rendu particulièrement incertain.

Un coup presque fatal a été porté à ces théories avec le succès de la théorie des cordes et des supercordes au milieu des années 80 (voir § suivant). Il reste de cette magnifique aventure de la supergravité des méthodes mathématiques éprouvées parfaitement transposables dans d'autres contextes, et un petit espoir que les retombées des supercordes et l'évolution de l'outil mathématique permettent de remettre la supergravité sur le devant de la scène.

Un exemple historique illustre parfaitement cette situation : la théorie de Kaluza–Klein (KK). Albert Einstein tentait d'unifier les deux seules interactions connues gravitation et électromagnétisme. On parlait alors de la recherche de la théorie unitaire. **Theodor Kaluza** propose d'étendre la relativité générale au cas d'un espace temps à 5 dimensions, mais surtout **Oskar Klein** donne à cette cinquième dimension une forme enroulée et une longueur extrêmement petite pour expliquer qu'on ne la perçoive pas directement.

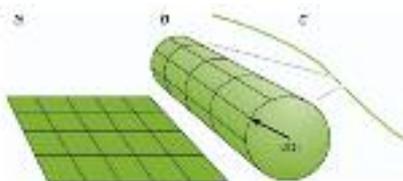


Fig III.7 Modèle d'Univers à 5 dimensions de Kaluza Klein avec enroulement et compactification (Crédit : physicsweb)

La conservation de l'impulsion d'une particule le long de cette dimension compacte résulte de l'invariance par rotation des équations selon le cercle. Cette loi de conservation en 5 dimensions se traduit par la conservation de la charge électrique en 4 dimensions associée au groupe de symétrie $U(1)$. De ce fait, les équations de Maxwell (et donc le photon) émergent naturellement de cette extension de la relativité générale dans l'espace 5d. Cette théorie KK a enthousiasmé la communauté des physiciens avant que la découverte des interactions forte et faible fasse douter de l'utilité d'unifier les interactions gravitationnelle et électromagnétique. Mais surtout la théorie KK initiale souffre de nombreux problèmes tels que la non renormalisation. Cette théorie est, avant tout, analogue à la relativité générale. Elle décrit donc aussi un champ de spin deux, ce qui la rend fondamentalement non renormalisable. Les théories des cordes s'avèrent nettement plus prometteuses. Ces théories reposent aussi sur des dimensions supplémentaires et le mécanisme de compactification est basé sur celui d'Oskar Klein. Bien que la compactification des dimensions supérieures en théorie des cordes y soit plus complexe, on parle de compactification à la KK. Il y a bien eu transposition de méthode mathématique [34].

III.3.2 Les théories des cordes

La première théorie (voir [16] Théorie originale des cordes hadroniques) est née avant la chromodynamique quantique. **Gabriele Veneziano**, un des pionniers explique : «*Loin d'être une spéculation pure, cette idée résulte d'un processus parti de l'observation. Au milieu des années 1960, en étudiant les interactions nucléaires entre protons et neutrons, nous avons élaboré des modèles mathématiques pour décrire les données expérimentales. L'analyse fine de ces modèles a*

montré qu'ils décrivaient non pas des particules sans dimension (des points), ayant chacune une masse propre, mais des entités à extension finie, des cordes, caractérisées par un seul paramètre : la tension universelle de la corde (quantité d'énergie par unité de longueur).

Rétrospectivement, ce modèle n'est pas apparu par hasard. Nous avons appris plus tard que les protons et les neutrons ne sont pas élémentaires : ils sont constitués de quarks, liés entre eux par l'interaction forte. L'intensité de celle-ci augmente lorsque les quarks s'éloignent l'un de l'autre, précisément comme s'ils étaient attachés par une corde, un ressort.

Malgré tout, l'ancienne théorie des cordes était très approximative et, pendant une dizaine d'années, de 1974 à 1984, elle est tombée dans l'oubli. On s'est ensuite rendu compte, en changeant considérablement la valeur de la tension, qu'elle pouvait fournir une description quantique de la gravité, et donc réconcilier la mécanique quantique avec la relativité générale d'Einstein. C'est ce qui a marqué le véritable début de son succès. 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 moment cinétique (ou spin) deux : le graviton. De la même façon, la théorie des cordes nous offre une particule de masse nulle et de spin un, le photon, ce qui caractérise une théorie quantique de l'électromagnétisme ».

Mais le véritable succès auprès des mathématiciens et physiciens viendra après l'incorporation du concept de supersymétrie avec compactification des dimensions supplémentaires à la KK. C'est la «révolution des cordes». On parle de théories des supercordes. **Michael Green** (1946-) en est l'un des pionniers. Il occupe la chaire de professeur de mathématiques de l'université de Cambridge succédant ainsi à Stephen Hawking. Il vient de recevoir le Breakthrough Prize in Fundamental Physics pour ses travaux sur une théorie unifiée des interactions, et sur la gravitation quantique. Sous la référence [35] il présente une vulgarisation de qualité sur un sujet traditionnellement inaccessible à cause des notions, outils et formalisme mathématique utilisés.

En fait cinq théories des supercordes avec en commun un espace à 10 dimensions (9 spatiales et une temporelle) résume la situation en 1990. C'est alors que le physicien **Edouard Witten** de l'*Institute for Advanced Study* de Princeton montre que ces cinq théories sont des limites d'une théorie unique les englobant et reposant sur un espace à 11 dimensions (10 spatiales et une temporelle). Les dimensions supplémentaires contiennent les symétries des groupes de jauge associés aux forces et aux particules. E. Witten est le premier physicien à obtenir la médaille fields (1990). Cinq ans plus tard, il présente sa théorie M couplée à la supergravité à 11 dimensions. Cette théorie unificatrice définit un cadre très riche qui en particulier permet de retrouver, à basse énergie, la première théorie de supergravité. Un nouvel objet apparaît à côté des cordes, les branes qui portent les extrémités de cordes ouvertes (voir [16] Magiques espaces de Calabi Yau ; théorie M). Beaucoup de physiciens ou mathématiciens travaillent sur les supercordes. Les groupes de symétrie impliqués sont parmi les groupes les plus gros qui existent [$SO(32)$, E_6 , E_8] ; E_6 possède 78 dimensions et E_8 248. Les traitements mathématiques associés, particulièrement complexes, sont à la pointe de la recherche (voir [16] Groupes de symétries). Environ cent mille articles ont été écrits en trente ans selon **Lee Smolin**.

Un arsenal mathématique impressionnant a été développé qui laisse entrevoir d'immenses possibilités dans la compréhension de la physique à toutes les échelles. Mais la théorie est critiquée pour son manque de prédictions, sa trop grande adaptabilité pour recevoir n'importe quelle observation grâce à un grand nombre de paramètres libres et de son manque de validation expérimentale.

III.3.3 La gravitation quantique à boucle [36]

est une théorie récente. En 1987, **Abhay Ashtekar** et Lee Smolin montrent que l'équation de Wheeler-DeWitt, admet des solutions associées à une courbe fermée dans l'espace, ce qu'on appellera plus tard les boucles. **Carlo Rovelli** montre ensuite qu'elles sont les lignes individuelles du champ gravitationnel et que ces boucles doivent être croisées, formant des tresses, des noeuds ou des structures plus complexes en réseaux dans une formulation explicitement indépendante de la géométrie de fond (voir [16]) La voie ouverte par Einstein et les variables de boucles). Pour Carlo Rovelli (Centre de physique théorique, CNRS / Univ. Aix-Marseille) : *«L'impressionnant succès empirique de la Relativité Générale d'Einstein rend crédible son idée centrale : la géométrie de l'espace-temps dans lequel nous avons l'impression de vivre n'est rien d'autre qu'une manifestation d'un champ physique qui est le champ gravitationnel. Il s'ensuit immédiatement que les propriétés quantiques du champ gravitationnel sont des propriétés quantiques de l'espace-temps lui-même... Les fluctuations quantiques du champ gravitationnel sont des fluctuations de l'espace-temps. Ces fluctuations augmentent lorsque l'échelle diminue... On s'attend à une structure granulaire («quantique») de l'espace-temps même, à l'échelle $L \approx 10^{-33}$ cm, analogue à la granularité d'une onde électrique manifestée par l'existence des photons... Or une physique qui comporte la possibilité de «quanta d'espace» et de superposition quantique de géométries différentes exige une révision profonde des notions élémentaires d'espace et de temps utilisées habituellement en physique. La focalisation sur ces aspects conceptuels difficiles du problème rend la théorie singulière et ardue, mais lui donne son aspect le plus fascinant, et son goût particulier. La théorie des boucles fait face directement à ces problèmes et offre une possible réponse assez claire au problème de la description cohérente des propriétés quantiques de l'espace-temps... C'est cette «quantification» de la géométrie qui est responsable des phénomènes les plus caractéristiques de la théorie des boucles : la structure granulaire de l'espace à l'échelle de Planck, l'absence de longueurs d'onde arbitrairement petites. La conséquence la plus importante est la finitude ultraviolette de la théorie, c'est-à-dire la disparition du problème des infinis qui minent la théorie quantique des champs ordinaire quand on néglige les propriétés quantiques de l'espace... Finalement, la théorie des boucles est formulée en quatre dimensions physiques, donc cohérente avec le monde que nous observons. Son couplage avec le reste du modèle standard, en particulier avec les champs fermionique et les champs de Yang-Mills a été défini récemment. La théorie inclut de façon naturelle une petite constante cosmologique positive (nécessaire pour éliminer les divergences infrarouges). La théorie est localement invariante de Lorentz (dans le même sens que la Relativité Générale). Elle n'a pas besoin de la supersymétrie, ni de dimensions supplémentaires pour être cohérente. La théorie est donc bien compatible avec le reste de notre connaissance du monde, et avec les indications expérimentales plus récentes qui, pour le moment, semblent pointer vers l'absence de brisure de l'invariance de Lorentz à haute échelle, l'absence de supersymétrie au moins à*

basse échelle, et la présence d'une petite constante cosmologique Λ positive, révélée par l'observation récente de l'accélération cosmique reconnue par les derniers Prix Nobel en physique...»

Un théorème, établi par **Roger Penrose**, montre qu'à chaque noeud d'un graphe correspondant aux états de la gravitation quantique à boucle, peut être associé un polyèdre (qui constitue le quantum d'espace). Les petits polyèdres sont collés les uns aux autres, pour «construire» l'espace physique. L'observation la plus importante est que les états quantiques ne sont pas des états «dans l'espace», mais des états «de» l'espace.

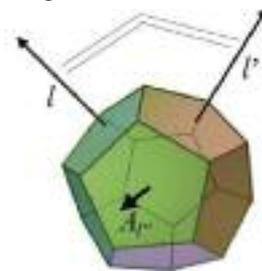


Fig III.8

Les quantités qui définissent la géométrie de chaque polyèdre (par exemple l'angle entre deux normales des faces et l'aire d'une face, ne commutent pas entre elles (tout comme la position et l'impulsion d'une particule quantique ou plus généralement les variables conjuguées dans les équations d'Heisenberg ou encore dans les théorèmes d'invariance de E. Noether), et donc ne peuvent pas être toutes bien définies au même temps. Donc la géométrie de chaque polyèdre est «fluctuante». Dans ce sens, le noeud d'un réseau est un polyèdre seulement, comme une particule quantique avec spin (dont les composants du moment angulaire ne commutent pas non plus) est un objet en rotation. (D'après Carlo Rovelli).

Dans ce contexte, les fondements de l'Univers sont régis par le principe d'incertitude qui s'applique non seulement aux particules, mais également à l'espace et au temps.

Lee Smolin précise : *«Soit un réseau constitué de 3 noeuds reliés entre eux. Soit le phénomène qui consiste à les faire fusionner en un seul. Les trois noeuds vont se rapprocher de plus en plus de manière continue. Seulement, en gravitation quantique à boucles seul le fait qu'il y ait des noeuds et des liaisons entre ces noeuds est pris en compte. On ne se soucie pas de la taille des segments. Ainsi, le temps se comporte comme une horloge qui fait "tic, tac" : à "tic", il y a trois noeuds, à "tac" il n'y en a plus qu'un. C'est la disparition d'un quanta d'espace qui "définit" le temps. On peut donc parler de quantum de temps : la plus petite unité de temps vaut 10^{-43} s, et a été baptisée temps de Planck.»*

Avec cette quantification de l'espace à $L \approx 10^{-35}$ m, mais aussi du temps à $t \approx 10^{-43}$ s, cette théorie en construction a obtenu des succès considérables et fait apparaître une certaine convergence avec les théories des cordes. Bien que spéculative, elle a le mérite de prédire les caractéristiques discontinues de l'espace et du temps sans qu'on ait à les introduire manuellement de manière ad hoc [37].

III.3.4 Retour vers la symétrie d'ordre 5 et Henri Poincaré, ou un étonnant moteur pour la cosmologie / topologie.

L'objet de la topologie est de mettre en évidence des invariants qui rendent compte de propriétés de symétrie des objets qu'elle étudie. Des objets qui nous apparaissent très différents seront alors considérés comme étant topologiquement équivalents. Le premier invariant historique est la caractéristique d'Euler-Poincaré : dans tout polyèdre convexe, le nombre de faces et sommets, diminué du nombre d'arêtes, est constant (toujours égal à 2). Henri Poincaré est considéré comme l'un des fondateurs de la topologie algébrique. En travaillant sur des invariants il énonce la «conjecture de Poincaré», classée parmi les sept «problèmes du millénaire» du Clay Mathematics Institute.

Un siècle après, **Grigori Perelman** (médaille fields 2006) met un point final à l'un des plus vieux problèmes de topologie en démontrant cette conjecture.

L'intérêt pour les physiciens de se tourner vers cette branche des mathématiques tient en trois points :

1 La gravitation quantique à boucles fait appel à des structures enchevêtrées (noeuds, tresses...) qui nécessitent d'identifier des symétries et des invariants. Or la théorie des noeuds, une branche de la topologie qui étudie les différentes configurations que peut prendre une boucle dans l'espace, apporte justement ces nouveaux invariants.

2 La théorie des cordes, introduit des objets géométriques topologiquement compliqués. En outre, avec ses multiples dimensions invisibles, elle invite à envisager notre espace-temps comme une partie d'un espace-temps multidimensionnel et topologiquement multiconnexe qui serait entré en expansion aux dépens d'autres dimensions qui, elles, seraient restées microscopiques.

3 Pour Stephen Hawking, notre univers est probablement clos et à courbure positive [45].

Henri Poincaré a étudié la topologie d'un espace dodécaédrique (PDS en anglais) dans lequel chaque pentagone est connecté à la face opposée grâce à une rotation de 36° (lié à la symétrie d'ordre 5, $\pi/5 = 36^\circ$). Quand on sort de cet espace par une face, en fait, on y rentre par la face opposée tournée de 36° .

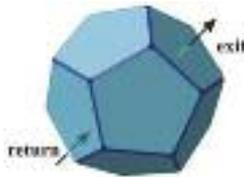


Fig III.9 Espace dodécaédrique de Poincaré.

Cet espace est un des candidats potentiels à la forme globale de notre univers. Plusieurs équipes internationales travaillent sur ce modèle mais le principal spécialiste est **Jean-Pierre Luminet** du Laboratoire Univers et Théories de l'Observatoire de Paris Meudon.

L'hypothèse de départ est que le fluide de particules des premiers instants de l'univers observable était animé de modes de vibrations dépendant à la fois de sa géométrie, de sa composition et de sa topologie. Avec cette hypothèse, classique en cosmologie, J.-P. Luminet calcule les modes propres d'oscillations de l'espace dodécaédrique de Poincaré, pour simuler la forme précise du spectre du rayonnement fossile. Le modèle Λ CDM permet de reproduire ce spectre obtenu à partir des données des observatoires spatiaux WMAP puis de PLANCK (voir [1] fig VI.6), sauf dans le domaine des grandes échelles angulaires du ciel où les données expérimentales sont significativement inférieures aux valeurs théoriques prévues. Le modèle PDS de J.-P. Luminet est plus en accord avec les données de WMAP que le modèle Λ CDM. Celles de PLANCK, récentes, confirment, en l'amplifiant, cet accord entre le modèle PDS et les données.

Les grandes échelles angulaires correspondant aux grandes longueur d'onde, J.-P. Luminet y voit la preuve que l'espace est fini. En effet la plus grande longueur d'onde ne peut être supérieure au double de la taille de l'Univers. Ce modèle très spéculatif prévoit l'existence de structures spatiales très particulières qui correspondraient aux multiples images d'un objet réel unique. Nous serions victimes d'une gigantesque illusion d'optique, de mirages, à cause de la topologie particulière qui entraîne des réflexions multiples comme dans un jeu de miroirs. Dans un contexte un peu différent nous connaissons déjà

des images multiples créées par un effet de lentilles gravitationnelles à partir d'un objet spatial unique. Avec le modèle PDS le problème est plus complexe car l'histoire des différentes images est différente. Le traitement des images du fond diffus cosmologique de la mission PLANCK s'avère particulièrement délicat, mais c'est un test important pour la théorie défendue par J.-P. Luminet [38].

III.3.5 Le renversement du temps.

Avec les conséquences de la symétrie PCT présentées au paragraphe III.2.3, il est difficile d'éluider cette question. Le théorème PCT nous dit que nos lois physiques sont identiques à celles d'un monde d'antimatière observé dans un miroir et où le temps s'écoulerait à l'envers. Ce théorème PCT est fondamentalement lié au principe de causalité. Observé en 1998 dans l'expérience CPLEAR, la dissymétrie par rapport au temps renvoie aux interrogations les plus fondamentales sur la notion de temps et de sens d'écoulement. L'origine profonde de cette brisure de symétrie T observée au CERN demeure mystérieuse. Les développements récents en mathématiques sont trop techniques pour être résumés ici. Nous ne donnerons, bien modestement que quelques avancées théoriques qui ont jalonné la réflexion de physiciens et mathématiciens depuis deux siècles sur ce problème extrêmement complexe.

Pour la plus grande part de la physique, l'expression des théories ne demande pas au temps d'être irréversible. Dans les équations, la variable t peut être changée en $-t$ sans effet majeur sur le résultat final autre que l'inversion d'un mouvement. Newton puis Laplace ont fortement marqué l'histoire d'un déterminisme total des lois de la physique, allant jusqu'à prévoir la possibilité de décrire le passé et le futur d'un système mécanique en évolution : le temps n'a pas de sens d'écoulement en mécanique, le temps et l'espace y sont définis comme un cadre absolu. **Albert Einstein** fera voter en éclat cet absolu, mais considèrera pendant un moment que : «*pour nous autres physiciens convaincus, la distinction entre passé, présent et futur n'est qu'une illusion, même si elle est tenace*». Et pourtant le bon sens quotidien nous impose de considérer le temps comme étant irréversible ; nous avons tous une très mauvaise mémoire de notre futur. Tout se passe comme si mathématique et physique au niveau du point ou de la particule voyaient un temps réversible, alors qu'un temps irréversible s'imposait aux systèmes complexes étudiés en biologie, sociologie, histoire... Le temps est-il une illusion ou un phénomène émergeant de la complexité? D'où vient la dissymétrie observée dans la dynamique de certains systèmes, alors que les équations qui la décrivent n'en prévoient aucune ? Une des difficultés évidentes est l'imprécision du vocabulaire pour porter la réflexion ; un signe d'immaturité du sujet ? L'expression «renversement du temps» bien que consacrée, porte déjà en elle l'ambiguïté ; en effet il ne faut pas confondre la dissymétrie des processus physiques au cours du temps et celle du cours du temps lui même.

Dès le XVIII^e siècle, des critiques sur l'approche mécaniste de la physique voient le jour. Comment expliquer que la chaleur se transmet toujours du corps chaud au corps froid, tant que les températures ne sont pas égales, et qu'il est impossible de transformer cette chaleur en travail alors que l'inverse est facile ? (principe de **Carnot Clausius**). C'est le second principe de la thermodynamique, qui introduit la notion d'entropie, une nouvelle fonction d'état mesurant le désordre d'un système. Ce second principe est un principe d'évolution précisant que toute transformation réelle s'effectue avec création d'entropie. Il donne donc une loi physique non symétrique par rapport au temps.

Ludwig Boltzmann tente d'expliquer comment des phénomènes réversibles par rapport au temps à l'échelle microscopique peuvent conduire à une flèche du temps évidente à l'échelle macroscopique. Des calculs mathématiques audacieux en probabilité le conduisent ainsi à développer la physique statistique, ce qui est une véritable révolution. En donnant à l'entropie une signification physique, il établit un pont entre l'échelle microscopique et l'échelle macroscopique. La définition de l'entropie issue de ses calculs est gravée sur sa tombe : $S = k \ln W$ où W désigne le nombre de micro-états différents observables dans un macro-état donné. Il faut souligner que W est gigantesque : son logarithme, multiplié par k , soit $1.38 \cdot 10^{-23}$ joule/kelvin, doit donner une entropie de quelques joule/kelvin ; le logarithme de W est donc de l'ordre du nombre d'Avogadro ($6 \cdot 10^{23}$). Des paradoxes et de vives polémiques s'en sont suivis. Les mathématiques utilisées par Boltzmann ont été qualifiées par certains de mathématiques douteuses. Des échanges très riches avec J.-C. Maxwell ont fait progresser les fondements de cette physique statistique, en particulier à partir de l'expérience de pensée de Maxwell illustrée par le fameux Démon de Maxwell.

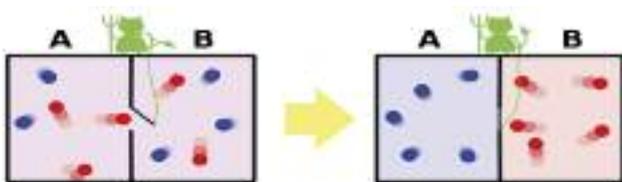


Fig III.10 Le démon de Maxwell, expérience de pensée tentant d'invalider le second principe

Le démon actionne, sans dépenser d'énergie, une porte moléculaire. Il est capable de déterminer la vitesse des molécules, et commande l'ouverture ou la fermeture de la porte en fonction de cette vitesse. Supposons que la température de B soit supérieure à celle de A. Sachant que la température est en fait proportionnelle à la vitesse quadratique moyenne des molécules, si le démon sélectionne les molécules pour que les plus rapides aillent en B et les plus lentes en A, alors il aura réussi à refroidir une source froide à partir d'une source chaude, ce que le second principe interdit.

Parmi toutes les tentatives pour résoudre ce paradoxe, la plus convaincante et la plus riche en prolongements est celle de **Léon Brillouin** (1889-1969). Brillouin fait remarquer que le démon ne peut réaliser ses tris sans information (identification des vitesses des molécules et comparaison aux vitesses moyennes dans chaque compartiment pour prise de décision). Or, **Claude Shannon** (1916-2001) a montré dans sa théorie de l'information que le manque d'information peut être mesuré quantitativement par :

$$\Delta I = - C \sum_1^N p_i \cdot \ln p_i$$

où C est une constante positive quelconque, les p_i les probabilités d'occurrence des événements i et \ln le logarithme népérien. Les probabilités p_i étant toutes inférieures à 1, leur logarithme est négatif, et donc ΔI toujours positif. Quand tous les événements sont équiprobables, les p_i sont tous égaux à $1/N$, et le manque d'information ΔI devient :

$$\Delta I = C \ln N$$

C'est la valeur maximum pour ΔI qui correspond bien au fait que le manque d'informations est maximum quand aucun événement n'est privilégié par rapport aux autres.

L'analogie avec l'équation de Boltzmann est flagrante. Brillouin en déduit le « principe de néguentropie de l'information » et généralise le principe de Carnot : dans un système isolé, toute information supplémentaire acquise par l'observation ou la mesure, équivaut à une baisse de l'entropie, mais l'information ac-

quise génère une hausse globale d'entropie non compensée. Le démon de Maxwell ne contredit pas le second principe de la thermodynamique. Si l'entropie macroscopique d'un système isolé ne peut que croître c'est parce qu'elle modélise l'écart entre la quantité maximale d'information censée être accessible à l'observateur (qui fait partie du système) et la quantité d'information qui serait nécessaire pour décrire parfaitement l'état microphysique de ce système.

Donc $dS/dt > 0$, le système évolue vers l'état le plus probable, c'est-à-dire un désordre qui ne peut que s'accroître. La création d'un ordre local, par exemple l'organisation associée à des processus biologiques, s'accompagne toujours d'un accroissement du désordre global, ce dernier pouvant être rapporté à l'ensemble de l'Univers.

En 1973, le mathématicien américain **Oscar Lanford** (1940-2013), démontre le théorème qui porte son nom et valide la démonstration et la formule de Boltzmann. On sait donc aujourd'hui que les mathématiques de Boltzmann ne sont pas douteuses.

Cédric Villani (1973 -) médaille Fields 2010 précise la notion de séparation d'échelles. L'irréversibilité macroscopique n'est pas contradictoire avec la réversibilité microscopique, elle lui est intimement liée. C'est la préservation du volume $dqdp$ microscopique dans l'espace des phases (théorème de Liouville) qui garantit la non-décroissance de l'entropie. [48,49,50]. L'évolution du système est vue comme une trajectoire dans l'espace des phases qui vérifie cette invariance, et tant qu'il en est ainsi l'irréversibilité est une notion liée à l'ignorance des détails des comportements microphysiques sous grand nombre de degré de liberté. Plus précisément, elle est liée au fait que les conditions initiales sont toujours affectées d'une incertitude, donc que les extensions $dqdp$ ont toujours une mesure non nulle.

Enfin, de plus en plus de chercheurs considèrent que la séparation d'échelles (aussi appelée limite thermodynamique) qui est le résultat de l'effet du tout sur la partie et le début de l'orientation de la flèche du temps, a pour moteur l'expansion de l'Univers [51]. Cette relation entre sens du temps et cosmologie confirme la vision qu'avait **Olivier Costa de Beauregard** (1911 - 2007) il y a quarante ans.

Pour être complet sur ce sujet il faudrait aussi citer les travaux de **Ilya Prigogine** (1917 - 2003) qui ont le plus contribué à mettre au défi la physique contemporaine d'intégrer la flèche du temps dans ses concepts de base. Ses travaux sur la thermodynamique hors équilibre, et particulièrement la théorie sur les structures dissipatives et l'autoorganisation des systèmes lui valent le prix Nobel de Chimie en 1977.

Prigogine, tout en respectant le théorème de Liouville, refuse les solutions de type trajectoires dans l'espace des phases ; l'irréversibilité apparaît dans les systèmes microphysiques comme un principe essentiel, et non lié à notre position d'observateur. Pour lui, la symétrie temporelle est bien brisée par toute simulation ou expérimentation d'un système. Mais notre difficulté à concevoir qu'une variable réversible puisse conduire à l'irréversibilité provient du fait qu'en physique nous sommes habitués à traiter de systèmes intégrables, à l'équilibre. Or aussi bien l'Univers dans son ensemble que les phénomènes liés à la vie en général correspondent à des systèmes hors équilibre, traversés en permanence par des flux de matière, de rayonnement, d'énergie. La situation d'équilibre pour un organisme est la mort.

Et pour terminer, il serait injuste de ne pas rappeler la contribution fondamentale d'Henri Poincaré dans la théorie du chaos et plus particulièrement dans le domaine de la sensibilité aux conditions initiales.

Sur le plan mathématique, cette sensibilité se traduit par l'hyperbolicité d'une partie de l'espace des phases. Les trajectoires possibles divergent très rapidement, ce qui se traduit par une irréversibilité de l'évolution du système.

III.4 En guise de conclusion

Ce bouillonnement créatif avec en trame un concept de symétrie ou d'invariance de plus en plus abstrait, conduit donc à un domaine très fertile.

Il aurait fallu pour être complet présenter aussi la théorie des twisteurs de Penrose [16] ou les géométries non commutatives d'Alain Connes [39], mais ces théories très difficiles d'accès n'auraient pas apporté d'éléments supplémentaires dans le cadre de ce chapitre consacré au rôle moteur de la symétrie.

Comme l'écrit Lee Smolin, «*La suite de cette aventure intellectuelle s'écrit actuellement dans les accélérateurs de particules et sur les écrans d'ordinateurs des chercheurs*».

Mais en absence de résultats expérimentaux, ces tentatives ne sont aujourd'hui que de beaux poèmes mathématiques et un hymne au concept de symétrie.

L'idée de la conservation des objets ou de leurs propriétés, qu'ils relèvent de l'expérience ou de créations théoriques ramène au thème central de Platon : *la symétrie est ce qui persiste au milieu du changement*.

Poser comme axiome l'invariance des lois dans l'espace et le temps, ne présume pas de leur formulation mathématique, mais leur impose d'être invariantes sous toutes les transformations qui transforment un élément de l'espace-temps en un autre.

Cet axiome avait déjà été formulé par Galilée pour un phénomène observé sur la terre avec une loi donnée. Le phénomène ne doit pas être différent pour des observateurs se trouvant dans des systèmes d'axes de référence différents.

Ce principe d'équivalence de Galilée est le premier énoncé de la relativité et la première application du concept de symétrie associé à l'invariance.

Il sera suivi par le principe d'équivalence de Poincaré-Lorentz pour la relativité restreinte, puis par le principe d'Einstein Minkovski pour les référentiels accélérés de la relativité générale [40].

Deux autres types de symétries se sont avérées de puissants moteurs de découverte ; ce sont les symétries par transformations d'échange ou par transformations de jauge de la physique quantique.

CONCLUSIONS

Le concept de symétrie a fortement évolué, en passant progressivement par la description des systèmes naturels puis leur classification ; la prédiction des propriétés physiques ; l'étude de la symétrie des équations, des opérateurs et des lois ; les postulats d'invariances avec la déduction des équations décrivant les phénomènes.

Ce concept est central dans l'articulation des deux principes d'unification : unification des forces ; recherche des

constituants ultimes de la matière ; et de relativité : les lois de la physique sont indépendantes du référentiel de l'observateur.

En physique des perspectives considérables ont été ouvertes :

Extension de la notion de transformation au point de poser les fondements de la notion quantique de particule élémentaire ; de contraindre tout en unifiant l'élaboration de modèles en physique théorique ; de dégager des propriétés universelles en physique statistique ; de résoudre certaines équations dynamiques en identifiant les contraintes et les règles de sélection sur l'évolution du système ; d'établir des passerelles entre régularité et chaos, notamment celles liées aux lois de conservation ; de démontrer l'équivalence directe entre symétrie et lois de conservation (de l'énergie de la masse du spin etc..) ; de dégager le concept de symétrie de jauge locale, déterminant dans l'élaboration du Modèle Standard des particules élémentaires.

Les deux modèles standards, celui des particules et de leurs interactions et celui du Big Bang peuvent être rapprochés. Le prisme des symétries permet en effet de combiner les échelles subatomique et cosmologique fournissant ainsi un modèle pour notre Univers.

Dans ce modèle, les intensités des interactions dépendent du temps cosmologique. Au départ, à très haute température, une force unifiée rassemblant toutes les symétries existait et agissait sur des particules de masse nulle.

La température diminuant, des brisures spontanées de symétrie ont donné une masse à certaines particules puis ont séparé, en plusieurs étapes, les différentes interactions connues aujourd'hui.

Ceci étant parfois accompagné de changements de phase qui conduisent à des nouvelles structures et états de la matière, à de la complexité et à l'émergence de propriétés nouvelles, en particulier dans le domaine du Vivant.

Il a fallu une série de brisures de symétrie pour que la forme actuelle, intrinsèquement asymétrique de l'Univers émerge de conditions parfaitement symétriques. Cet enchaînement extraordinaire, hautement improbable, invite à s'interroger sur le principe anthropique.

Si la symétrie est un formidable moteur de découverte, les mécanismes de brisure de symétrie le sont tout autant. Et là se situe l'origine cosmique de notre existence.

Si l'univers était resté parfaitement symétrique, il aurait empêché l'apparition de toute vie susceptible de le comprendre.

Le propos de Louis Pasteur de 1883 cité partiellement en introduction «*Si les principes immédiats de la vie sont dissymétriques, c'est que, à leur élaboration, président des forces cosmiques dissymétriques. L'univers est dissymétrique. La vie est dominée par des actions dissymétriques...*» est d'une étonnante actualité et peut être, en conclusion de notre article, complété par la seconde partie de son propos: «*...Je pressens même que toutes les espèces vivantes sont, primordialement, dans leur structure, dans leurs formes extérieures, des fonctions de la dissymétrie cosmique*».

Niveau vulgarisation

- [1] *Enfance de l'Univers: De la physique des particules à la cosmologie* par Louis Avan Auvergne-Sciences
- [2] *La géométrisation de la physique* Georges Lochak Champs Flammarion
- [3] *L'élégante efficacité des symétries.* Amaury Mouchet Universciences Dunod
- [4] *Symmetries in Physics: philosophical reflections* par K. Brading, E. Castellani Cambridge University Press, (2003)
- [5] *Asymétrie: la beauté du diable : où se cache la symétrie de l'Univers?* Par Frank Close EDP Sciences, (2001)
- [6] *L'univers ambidextre. Les miroirs de l'espace-temps* par Martin Gardner Seuil (1985)
- [7] *La catalyse asymétrique* par Henri Kagan Pour La Science n°172 (1992)
- [8] *L'Univers asymétrique* par Roger Hegstrom, Dilip Kondepudi Pour La Science n°149 (1990)
- [9] *Chaos et symétrie* par Pascal Chossat Pour La Science n°182 (1992)
- [10] *La double hélice* par James D. Watson R. Laffont, (2003)
- [11] *Les propriétés des quasicristaux* par Jean-Marie Dubois Pour La Science n°226 (1996)
- [12] *Pierre Curie et la symétrie* par Georges Lochak Pour La Science n°209 (1995)
- [17] *Les trois premières minutes de l'Univers* par Steven Weinberg Points Sciences Éditions du seuil (1988)
- [18] *QED and the Men who Made it : Dyson, Feynman, Schwinger, and Tomonaga.* Par Silvan S. Schweber Princeton University Press
- [19] *Un météore des mathématiques Evariste Galois* par Tony Rothman Pour La Science n°56 (1982)
- [22] *Henrich Hertz* Pour La Science n°197.(1994)
- [29] *La supraconductivité : un siècle d'une science en société* par Jean Matricon, Georges Waysand, Christian Joas Images de la physique (2011) CNRS
- [30] *The Mystery of the Missing Antimatter* Par Helen R. Quinn, Yossi Nir Princeton University Press, (2010)
- [31] *Triangle de pensées* par Alain Connes, André Lichnerowicz et Marcel P. Schützenberger Odile Jacob (2000)
- [32] *Forme et origine de l'Univers, Regards philosophiques sur la cosmologie* Par Aurélien Barrau, Daniel Parrochia Universciences Dunod (2010)
- [35] *Les supercordes* par Michael Green Pour La Science n°109 (1986)
- [39] *Le facteur temps ne sonne jamais deux fois.* Par Etienne Klein Flammarion (2007)
- [45] *L'Univers dans une coquille de noix* Par Stephen Hawking Odile Jacob
- [46] *La structure des quasicristaux* par Peter Stephens, Alan Goldman Pour La Science n°164 (1991)
- [47] *Histoire de la physique moderne* Par Michel BIEZUNSKI

Niveau enseignement supérieur second et troisième cycle

- [13] *Edification de la théorie des interactions électrofaibles* Johann Collot Cours de physique des particules (Université de Grenoble)

- [16] *A la découverte des lois de l'Univers.* Roger Penrose Odile Jacob
- [20] *Relativité restreinte: Des particules à l'astrophysique* Par Ericourgoulhon EDP Sciences CNRS Editions
- [21] *Les théorèmes de Noether: invariance et lois de conservation au XX^e siècle...* Par Yvette Kosmann-Schwarzbach Les Editions de l'Ecole Polytechnique
- [23] *Quantum Mechanics and symmetries* Walter Greiner Berndt Muller Springer Verlag
- [24] *Des phénomènes critiques aux champs de jauge - Une introduction aux méthodes et aux applications de la théorie quantique des champs* Par Michel Le Bellac EDP Sciences CNRS Editions
- [25] *Grand Unified Theories*, Stuart. Raby 2nd World Summit on Physics Beyond the Standard Model, 2006
- [33] *Interactions électrofaibles et introduction à la supersymétrie.* Aldo Deandrea Institut de Physique Nucléaire de Lyon, in2p3 Université Claude Bernard Lyon.
- [36] *Loop Quantum Gravity: the first twenty five years* par Rovelli Carlo Class. Quantum Grav., 28, (2011)
- [40] *Histoire du principe de relativité* par Marie Antoinette Tonnelat, Flammarion, 1971.
- [41] *La symétrie en mathématiques, physique et chimie* par Jean Sivaridière Presses Universitaires de Grenoble, (1995)
- [42] *Mécanique Quantique* par Claude Cohen-Tannoudji, Bernard Diu, Franck Laloë Hermann, (1973)
- [44] *Théorie quantique des champs* Par Jean-Pierre Derendinger Presses polytechniques et universitaires romandes.
- [48] *Villani, Cédric. :A review of mathematical topics in collisional kinetic theory.* In Handbook of Mathematical Fluid Dynamics I, 71, S. Friedlander et D. Serre, Eds, North-Holland, Amsterdam, 2002
- [49] *Villani, Cédric. : Entropy production and convergence to equilibrium..* In Entropy methods for the Boltzmann equation 1-70, Lecture Notes in Math., Vol. 1916, Springer, Berlin, 2008
- [50] *Villani, Cédric. : Is there any backward solution of the Boltzmann equation ?* www.math.univlyon1.fr/villani
- [51] *H.D.Zeh, The Physical Basis of the Direction of Time,* Springer-Verlag, 1989

Niveau recherche

- [15] *A Pedagogical Review of Electroweak Symmetry Breaking Scenarios* by Gautam Bhattacharyya Saha Institute of Nuclear Physics India
- [26] *Gauge Invariance and Mass* Julian Schwinger Phys. Rev. 125, 397 (1962)
- [27] *Broken Symmetry and the Mass of Gauge Vector Mesons,* F. Englert et E. Brout, Phys. Rev. Lett. 13, 321-323 (1964)
- [28] *Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons,* Peter W. Higgs, Phys. Rev. Lett. 13, 508-509 (1964)
- [34] *Search for a realistic Kaluza-Klein theory* Edward Witten Nucl. Phys. B186, 412 (1981)
- [37] *Loop Quantum Gravity and the Meaning of Diffeomorphism Invariance* by Marcus Gaul, Carlo Rovelli Lectures given at the 35th Karpacz Winter School on Theoretical Physics: From Cosmology to Quantum Gravity Lect.Notes Phys. 541 (2000)
- [38] *Cosmic microwave background anisotropies in multi-connected flat spaces.* Par Alain Riazuelo, Jeffrey Weeks, Jean-Philippe Uzan,

Les jalons de la Symétrie ; une contribution française déterminante

- Platon (-427 -347) Les polyèdres réguliers et les 5 éléments. La symétrie est ce qui reste invariant dans un changement.
- Kepler (1571-1630) associe dans une harmonie divine, les 5 solides de Platon aux 6 planètes connues. Première interprétation d'une symétrie macroscopique par un modèle microscopique pour les flocons de neige.
- Pierre Marie Ampère (1775-1836) apport capital dans la synthèse de l'électricité, du magnétisme et de l'optique
- Jean Baptiste Biot (1774-1862)
l'activité optique est liée à l'asymétrie interne des molécules
- Louis Pasteur (1822-1895)
La Vie prélève ou synthétise des molécules asymétriques
- Ernst Mach (1838-1916)
L'erreur sur l'asymétrie fondamentale de l'électromagnétisme
- Joseph Achille Le Bel (1847-1930)
Le carbone tétraédrique, cause de l'activité optique 1874
- René Just Haüy (1743-1822)
morphologie et lois structurales des cristaux
- Auguste Bravais (1811-1853) 7 systèmes cristallins, 14 types de réseaux, 32 groupes ponctuels de symétrie
- Fedorov et Schoenflies 1890
démonstration des 230 groupes d'espace à 3D
- Franz Neumann (1798-1859)
les propriétés d'un cristal ont la même symétrie que lui
- Pierre Curie (1859-1906) Nobel de Physique 1903
Principes de symétrie, piézoélectricité
- Evariste Galois (1811-1832)
permutation des racines, théorie des groupes
- Legendre (1752-1833) groupe des racines de polynômes
- Louis Lagrange (1736-1813) théorie des groupes
- Louis Cauchy (1789-1857) permutations et théorie des groupes
- Camille Jordan (1838-1922) symétries et théorie de Galois
- Sophus Lie (1842-1899)
théorie des symétries continues, groupes du modèle standard.
- Élie Cartan (1869-1951) groupes et algèbres de Lie, cadre conceptuel du spin
- Lorentz (1853-1928) Nobel Physique 1902 compatibilité entre mécanique et équations de Maxwell
- Henri Poincaré (1854-1912)
relativité restreinte, groupe de symétrie de l'invariance de Lorentz
- Albert Einstein (1879-1955) Nobel de Physique 1921
La symétrie comme principe unificateur, relativité restreinte, théorie géométrique de la gravitation...
- Emmy Noether (1882-1935)
Théorèmes d'équivalence entre Symétrie et lois de conservation
- Yang et Lee Nobel Physique 1957
Symétrie de parité dans les particules élémentaires
- Paul Dirac (1902-1984) Nobel Physique 1933
équation relativiste de l'électron, monopôles magnétiques, antimatière
- Hermann Weil (1885-1955) Groupes de symétrie en physique quantique. Concept de symétrie de jauge
- Max Von Laue (1879-1960) Nobel physique 1914 Nature ondulatoire des rayons X et identification des éléments de symétrie des cristaux par diffraction X
- Alfred Werner (1866-1919). Nobel Chimie 1913, chiralité sans carbone asymétrique
- Bragg (père et fils) Nobel physique 1915 méthode de détermination des structures cristallines. Notion de dislocations dans les cristaux.
- Roger Penrose (1931-) Symétrie 5, fonctions presque périodiques et structures incommensurables.
- James Watson, Francis Crick Nobel Médecine 1962
structure double hélice de l'ADN et symétries par RX
- Dan Shechtman (1941-) Nobel Chimie 2011
découverte et modélisation des quasi cristaux
- Alain Connes (1947-...) Médaille Fields 1982 théorie du Groupe de renormalisation, géométries non abéliennes, gravitation quantique
- Lev Landau (1908-1968) Nobel Physique 1968 Symétrie, changement de phase, et invariance d'échelle
- Murray Gell Mann (1929-...), George Zweig (1937-...) Nobel Physique 1969 symétries SU(3) et prédiction des quarks et de la particule Ω -
- Vitaly Ginzburg (1916 – 2009) Nobel Physique 2003 champs scalaire pour la théorie BCS et le futur mécanisme de Higgs
- Pierre Gilles De Gennes Nobel Physique 1991 renormalisation dans les cristaux liquides et les polymères
- Kobayashi Maskawa Nambu Nobel Physique 2008, brisure de symétrie intrinsèque, spontanée
- Glashow, Salam, Weinberg Nobel Physique 1979,
Théorie électrofaible
- James Clerk Maxwell (1831-1879)
Symétrie magnétisme-électricité, notion de champs
- Brout, Englert et Higgs Nobel Physique 2013 mécanisme de brisure de symétrie permettant l'émergence de la masse des bosons intermédiaires.
- John Bell (1928-1990) Théorème PCT : invariance de Lorentz, et symétrie PCT sont liées.
- Oscar Greenberg (1932-...) la symétrie PCT est directement liée à la relativité restreinte.
- Theodor Kaluza (1885-1954) Oskar Klein.(1894-1977) mécanisme de compactification des dimensions supplémentaires à la KK dans les théories supersymétriques
- Kenneth Wilson (1936-2013) Nobel physique 1982, renormalisation, phénomènes critiques, invariance d'échelle et universalité.
- Howard Georgi, Sheldon Glashow Théorie de Grande Unification (GUT) à partir du groupe de symétrie SU(5).
- Veltman et 't Hooft Nobel physique 1999 Groupe de renormalisation pour l'interaction électrofaible.



LES PARTICULARITÉS DU VÉGÉTAL AU SEIN DU MONDE VIVANT

MICHEL GENDRAUD

Agrégé de Physiologie-Biochimie

Professeur honoraire de Physiologie végétale de l'Université Blaise Pascal

Membre de l'ADASTA

INTRODUCTION

Quand, voilà probablement plus d'un milliard d'années, une cellule eucaryote (à noyau différencié) domestiqua une cyanobactérie pour en faire son chloroplaste, naquit le règne végétal. Au fil du temps, les végétaux accumulèrent des particularités qui les distinguent aujourd'hui des animaux et des champignons qui n'ont pas cette domestication. Nés Algues, microscopiques puis macroscopiques, dans les lagunes et les océans de la Terre juvénile, ils émergeront en Mousses, Fougères, Conifères et Plantes à fleurs. Pour la clarté de l'exposé, l'accent sera mis sur les particularités du végétal dont les conséquences sont facilement tangibles.

LES PARTICULARITÉS COMMUNES A TOUS LES VÉGÉTAUX

Les conséquences de la présence de chloroplastes, verts par définition.

Tous les végétaux font la photosynthèse. Une photosynthèse est un processus par lequel, grâce à l'énergie lumineuse et en présence d'un donneur d'hydrogène, un être vivant réduit le CO₂ en composé organique, sucre le plus souvent. Voilà 3 milliards 500 millions d'années, les Cyanobactéries réussirent à utiliser l'eau, partout présente dans le monde vivant, comme donneur d'hydrogène. Cette photosynthèse est aujourd'hui nommée «photosynthèse végétale».



Il s'agit d'une prouesse thermodynamique, l'eau étant un très mauvais réducteur. Utilisant deux photosystèmes collecteurs d'énergie montés en série, elles purent faire leur photosynthèse dans tous les lieux un peu humides de la surface de la planète et dans des organismes de plus en plus complexes. A la suite de quoi le dioxygène envahit l'atmosphère et permet la respiration aérobie. Plus tard, voilà peut-être 2 milliards d'années, une cyanobactérie fut capturée par une cellule eucaryote hétérotrophe et, domestiquée, vécut en symbiose dans cette cellule devenue par le fait végétale et autotrophe (figure 1).

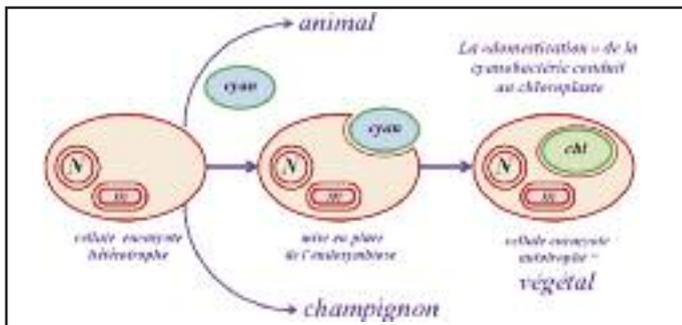


Fig. 1. - L'origine des chloroplastes, l'endosymbiose. Les végétaux apparaissent après la «domestication» d'une cyanobactérie, capable de faire la photosynthèse végétale, par une cellule eucaryote, dotée d'un noyau différencié (N), et d'une mitochondrie (M). Conservant une part de son hérité (ADN) et sa capacité photosynthétique, la cyanobactérie devint chloroplaste (chl) et confia sa destinée à la cellule, maintenant végétale. La cellule réceptrice ne pouvait être qu'hétérotrophe se nourrissant de matière organique, la cellule végétale résultante par son chloroplaste devint autotrophe capable de vivre de matière minérale et d'énergie lumineuse.

La place des chloroplastes dans les plantes actuelles est schématisée à la figure 2. Les algues microscopiques comme la Chlorelle ont souvent un seul chloroplaste volumineux, alors que les cellules des plantes terrestres macroscopiques en possèdent de plus petits en grand nombre.

Les chloroplastes appartiennent à la lignée plastidiale qui prend sa source dans les proplastides des tissus en prolifération cellulaire (méristèmes) des extrémités des tiges et des racines. Ils apparaissent suite à la division de proplastides préexistants et évoluent différemment en fonction du destin de la cellule qui les héberge (figure 3). Par le chloroplaste, le végétal fait la photosynthèse des sucres et, par l'ensemble de ses plastides, verts ou non, il s'édifie à partir de matière uniquement minérale, et se signale à l'animal.

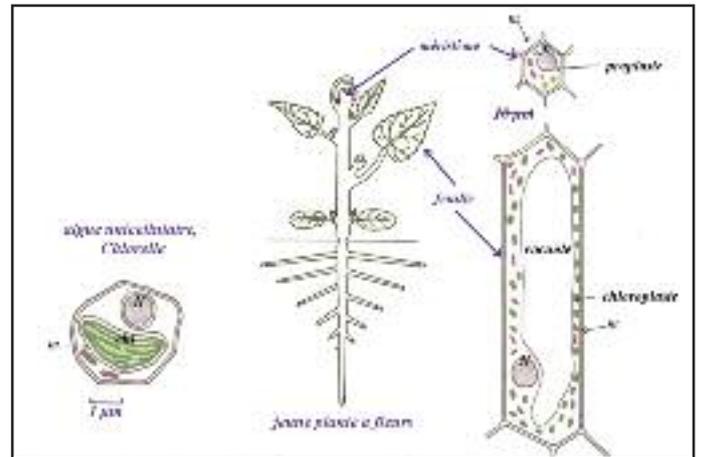


Fig. 2.-La place des chloroplastes dans la cellule végétale. La Chlorelle, unicellulaire, possède un seul chloroplaste volumineux. Dans la plante à fleur, les tissus adultes (ex. la feuille), les chloroplastes, en grand nombre, proviennent de la différenciation de proplastides des cellules méristématiques.

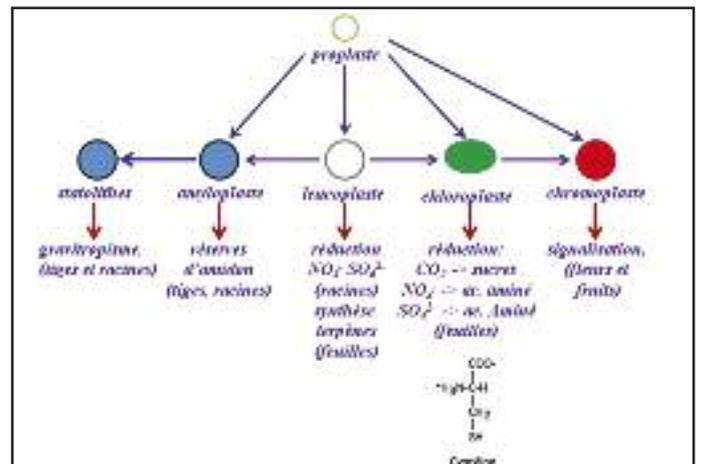


Fig. 3.-La lignée des plastides chez les plantes à fleurs. Le proplaste indifférencié des cellules méristématiques devient, dans les cellules adultes des différents organes de la plante, plaste spécialisé dans telle ou telle fonction rappelée sur la figure. La cystéine est l'exemple de molécule dont le chloroplaste permet la synthèse puisqu'il est à même de réduire CO₂, NO₃⁻ (à partir de l'étape nitrite), et SO₄²⁻.

La reproduction sexuée par alternance de générations.

La reproduction sexuée implique la fusion d'un gamète mâle et d'un gamète femelle, tous deux haploïdes pour donner un individu diploïde, lequel produira, par réduction chromatique de nouveaux gamètes... Chez l'animal, la réduction chromatique (RC ou méiose) au niveau des organes reproducteurs conduit **directement** à un gamète mâle (spermatozoïde) et à un gamète femelle (ovule) qui fusionnent par fécondation (figure 4). Chez le végétal, la réduction chromatique produit des **spores** haploïdes qui se développent en **gamétophytes** haploïdes (g), produisant à terme gamètes mâle et femelle. Ceux-ci fusionnent alors pour constituer un individu diploïde, **sporophyte** (s) producteur de spores par réduction chromatique. Selon le végétal, les phases gamétophytiques et sporophytiques peuvent être morphologiquement et physiologiquement semblables (l'Ulve, figure 4). Mais, dans la plupart des cas, une phase ou l'autre subit une miniaturisation, simplifiée sa morphologie et sa physiologie jusqu'à abandonner sa capacité de photosynthèse. Chez les Conifères et Plantes à fleurs, le pollen est le gamétophyte mâle, l'arbre ou l'herbe sont les sporophytes. Chez les Mousses, au contraire, la partie feuillée est gamétophyte, le sporophyte étant l'ensemble soie-capsule.



Fig. 4.- Alternance des générations chez le végétal. Chez l'animal (en rouge), la réduction chromatique RC (méiose) conduit immédiatement à deux gamètes haploïdes, qui, par fécondation (F) donnent un nouvel individu diploïde. Chez le végétal (en vert), la réduction chromatique produit des spores haploïdes qui se développent en gamétophytes haploïdes, produisant à terme gamètes mâle et femelle. Ceux-ci fusionnent alors pour constituer un individu diploïde, sporophyte producteur de spores par réduction chromatique. Chez l'Ulve, gamétophyte et sporophyte sont semblables. A, sporophyte (Hêtre) ; B, gamétophyte mâle (pollen, sur les bords d'une flaque) ; C, Mousse (partie feuillée = gamétophyte, soie et capsule = sporophyte). D, capsule.

LE CAS DES FORMES TERRESTRES FIXÉES A LEUR SUPPORT (ex. L'ARBRE)

Quelques généralités.

Un exemple de forme végétale terrestre macroscopique fixée à son support est l'arbre. L'arbre est fait de racines, ancrées dans le sol, d'un tronc vertical et de branches, et d'un houppier, ensemble de rameaux et de feuilles pouvant porter, le moment venu, fleurs, fruits et graines. Par ses racines il s'alimente à la solution du sol, laquelle, par le tronc et le houppier rejoint l'atmosphère suivant un continuum sol-plante-atmosphère. Le houppier, par ailleurs, assure la photosynthèse et donc, la production de molécules carbonées qui deviennent la matière de l'arbre.

Le continuum sol-plante-atmosphère.

Par lui, l'eau du sol traverse la plante en irriguant les tissus et rejoint l'atmosphère par le processus terminal d'évapotranspiration.

Ce faisant, l'eau suit la voie de la thermodynamique qui lui impose d'aller spontanément vers des potentiels hydriques (voir encadré) de plus en plus faibles. La figure 5 montre cette migration et les valeurs du potentiel hydrique qu'elle accompagne.

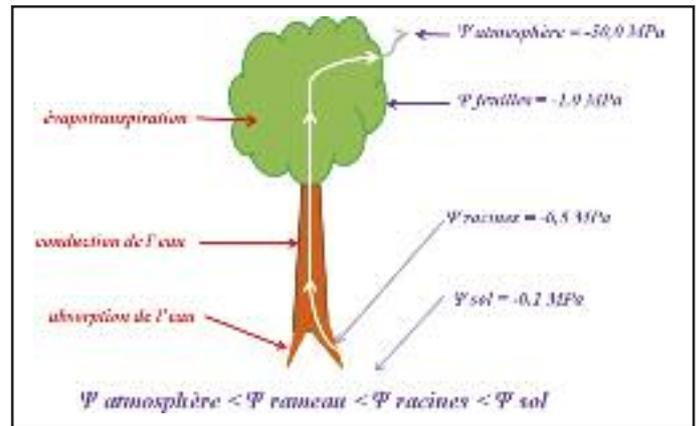


Fig. 5.- Continuum sol-plante-atmosphère. Allant spontanément vers des potentiels hydriques décroissants, l'eau quitte le sol pour gagner les racines, le tronc, le houppier, l'atmosphère. Le potentiel hydrique ψ a les dimensions d'une pression.

La circulation des sèves brute et élaborée.

Chacun sait que la sève brute est celle qui monte dans la plante, alors que la sève élaborée redistribue les assimilats, produits de la photosynthèse, aux parties qui en dépendent pour leur métabolisme et leur croissance. L'une et l'autre suivent des chemins différents.

Pour que l'eau, composant majeur de la sève brute, atteigne leur sommet, qu'il soit à 1, 10 ou 100 mètres du sol et des racines, les plantes élaborent les vaisseaux du bois (ou xylème). Pour ce faire, en certains points de la circonférence de la tige et de la racine, sont établies, dès la mise en place de l'organe, des files de cellules (figure 6, genèse d'un vaisseau du bois). Le moment venu, ces cellules excrètent latéralement des précurseurs qui se polymérisent en lignine sur la face externe de la paroi, formant caparaçon. La cloison transversale, qui n'est pas touchée par cette lignification, finit par disparaître, dégageant ainsi la lumière du vaisseau. Le diamètre des vaisseaux formé au printemps est plus grand que celui des vaisseaux de l'automne d'où l'édification de cernes, bases de la dendrochronologie (figure 6).

La majorité de l'eau quitte la feuille par évapotranspiration, mais par flux de masse, une petite partie se charge d'assimilats et redescend en sève élaborée par les vaisseaux du liber (figure 6). Le fonctionnement du liber est complexe et sensible aux inhibiteurs métaboliques.

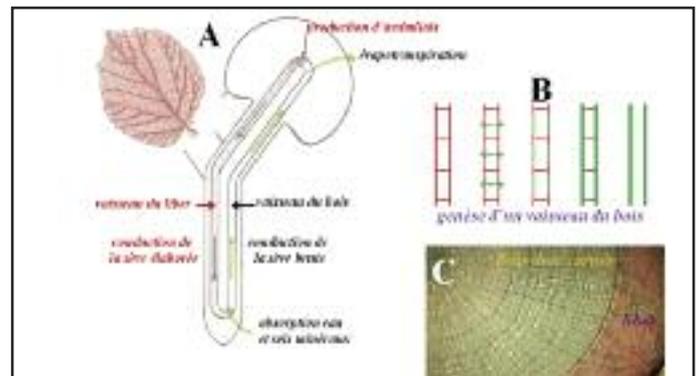


Fig. 6.- La circulation des sèves brute et élaborée. A, la sève brute, solution aqueuse diluée, monte par les vaisseaux du bois, obtenus par lignification latérale (B, en vert) de files de cellules et perte des cloisons transversales. Une petite partie de l'eau se charge d'assimilats et redescend en sève élaborée par les vaisseaux du liber (A). C, coupe d'un tronc montrant les positions relatives du bois et du liber, et les cernes du bois.

La paroi cellulaire végétale.

Chaque cellule végétale s'entoure d'une paroi à base de cellulose, matériau composite qu'elle sécrète. Cette sécrétion s'effectue à travers le plasmalemme, membrane qui entoure la cellule (figure 7). Un complexe enzymatique «cellulose synthétase», inclus dans cette membrane prélève, sur du saccharose, des unités glucose qu'il enchaîne pour en faire la cellulose. Par leur structure, les chaînes de cellulose s'alignent en microfibrilles stabilisées par des liaisons hydrogène. Au long du plasmalemme, et sur sa face externe, les microfibrilles rencontrent un agent de surface, les hémicelluloses, elles-mêmes excrétées, et un gel de pectines, ce qui fait de l'ensemble un matériau composite. Pour rendre un panorama complet de la situation, il convient de préciser que la cellulose synthétase «flotte» dans le plasmalemme, guidée par des microtubules, éléments du cytosquelette, le produit de l'ensemble, s'enroule en hélice autour de la cellule, d'où l'étonnement des premiers biophysiciens qui l'étudièrent, qui voyaient des fibres se croiser.

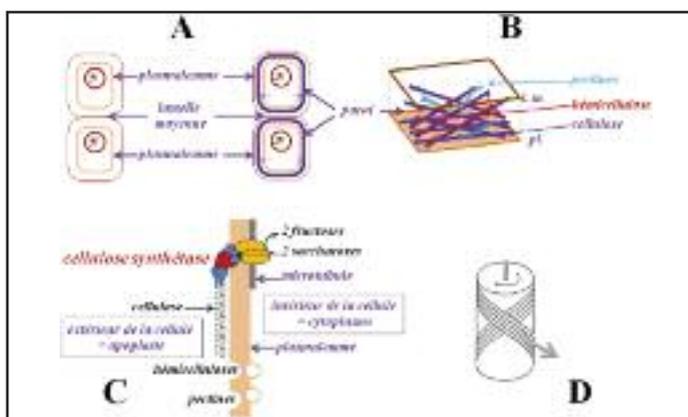


Fig. 7.- Synthèse et composition de la paroi végétale. A, suite à une division des cellules filles sont apparues, séparées par la lamelle moyenne. Chacune d'elle, limitée par son plasmalemme, va excréter à travers cette membrane le matériel nécessaire à la confection de la paroi, extérieure à la cellule. B, la paroi est composée de fibrilles de cellulose enveloppées d'hémicellulose, et tout baignant dans un gel de pectines. C, au plasmalemme, la cellulose synthétase prend son glucose au saccharose pour en faire la cellulose qui rencontre son traitement de surface, hémicelluloses, et se noie dans un gel de pectines. D, du fait du mouvement hélicoïdal de la cellulose synthétase imposé par les microtubules, la paroi entoure la cellule à la manière d'un pansement.

Les cellules végétales ont une vacuole.

Si la cellule végétale est entourée du plasmalemme qui borde son cytoplasme, avec noyau, mitochondries et chloroplastes, elle présente en son milieu un énorme organite, la vacuole, sorte de réservoir interne, lui-même limité par une membrane, le tonoplaste (figure 8). La vacuole, au pH très inférieur à celui du cytoplasme (jusqu'à 3,5 contre 7,5) emmagasine de nombreux solutés (sucres, pigments hydrosolubles, tannins, ions divers, déchets toxiques) et la traversée du tonoplaste, du fait de la différence de pH, est énergétique.

De plus, la vacuole, par son volume relatif, est le moteur de la croissance cellulaire. Qu'une hormone de croissance vienne à frapper une cellule, celle-ci disposera de plus de solutés (obtenus par hydrolyse de réserves), c sera augmenté et $\psi_{\pi} = -c RT$, potentiel osmotique, sera diminué. Il se trouve que l'hormone en question va aussi diminuer ψ_p , potentiel de turgescence, et induire une plasticité de la paroi. Au total le potentiel hydrique de la cellule $\psi = \psi_{\pi} + \psi_p$ diminue, l'eau entre dans la cellule et, du fait de la plasticité de la paroi, provoque le grandissement cellulaire.

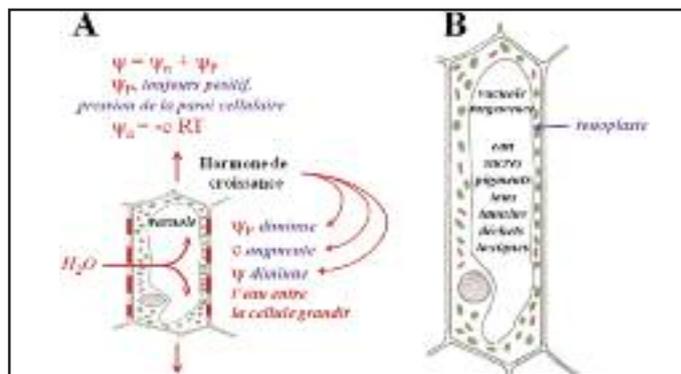


Fig. 8.- Rôle de la vacuole dans la cellule végétale. A, effet d'une hormone de croissance sur les paramètres hydriques de la cellule ; au final, l'eau entre et provoque la croissance de la cellule. B, la place de la vacuole dans la cellule végétale.

Le gravitropisme impose les directions de croissance des tiges et des racines.

Les tiges et racines des végétaux terrestres se développent en fonction de la pesanteur en raison de leur gravitropisme. Un tropisme est la direction de croissance d'un organe végétal en réaction à l'anisotropie du milieu (figure 9). Lorsque le sommet d'un organe en croissance détecte une anisotropie du milieu, il envoie un message à la zone de croissance, toujours sous-jacente. A la réception du message, cette zone réagit de manière différentielle, une face croissant plus que l'autre, de sorte que l'organe s'oriente dans l'anisotropie. L'espace où vivent les végétaux est anisotrope sur bien des paramètres, seule la gravité sera évoquée ici. Alors que les tiges sont dotées d'un gravitropisme négatif qui leur fait «fuir» la gravité, les racines ont un gravitropisme positif. Les récepteurs de la gravité sont des statolithes, amyloplastes capables de sédimenter dans les cellules qui les contiennent, cellules de la coiffe pour les racines (figure 9) et manchon de cellules au long de la tige. Les exemples ne manquent pas dans la nature, d'arbres couchés par accident qui se redressent par gravitropisme, le «coude» est encore visible des décennies plus tard. Sur un mode plus éphémère, les pédoncules de *Myosotis* sont capables de croissance après récolte, et donc, le cas échéant de gravitropisme : voilà donc pourquoi des fleurs de *Myosotis* couchés sur un plat se redressent en quelques heures.

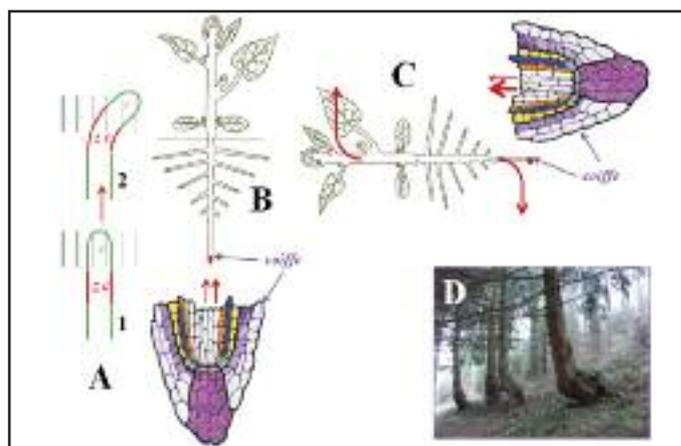


Fig. 9.- Tropisme et gravitropisme. A, quand le sommet d'un organe (1) rencontre un milieu anisotrope, le sommet transmet l'information à la zone de croissance (zc) qui réagit par une croissance différentielle (2) réorientant l'organe. B, zone sensible à la gravité : la coiffe, à l'extrémité de la racine, en points bleus dans la coiffe, les statolithes récepteurs de la gravité ; la coiffe verticale envoie un signal homogène (flèches rouges) vers la zone de croissance. C, Après changement de position de la plante, changement de position des statolithes ; la coiffe horizontale envoie un signal hétérogène vers les zones de croissance qui répondent en réorientant l'organe. Dans la tige il existe un manchon de cellules sensibles à la gravité, non représenté ici. D, redressement de Conifères couchés voilà 30 ans par le passage d'un bulldozer ouvrant un chemin.

Plagiotropisme imposé et plagiotropisme auto-entretenu

Le plagiotropisme est la direction de croissance, proche de l'horizontale, des ramifications émanant des axes verticaux de la plante, tiges et racines. Pour des raisons évidentes, il a surtout été étudié sur les parties aériennes. Le plagiotropisme est le résultat, dans le champ de gravité, de l'influence du sommet de la plante, sur le développement d'un bourgeon en rameau (figure 10), il est imposé par le sommet de la plante. L'ablation du sommet restaure l'expression du gravitropisme négatif propre à la tige, à moins que l'influence du sommet ne se soit trop prolongée, auquel cas, le plagiotropisme s'auto-entretient, le rameau, même isolé, ne croissant plus qu'à l'horizontale. La durée d'exposition requise pour arriver à cet état est très variable (quelques jours à quelques années) et dépend de l'espèce végétale considérée. Chez certaines herbacées, installé en quelques semaines, il est «guérissable» par le froid hivernal, chez les arbres, il est définitif.

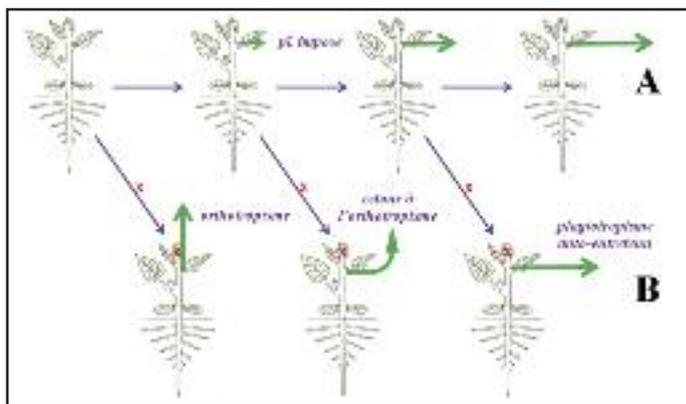


Fig. 10.- Plagiotropisme imposé et mise en place d'un plagiotropisme auto-entretenu. En A est représentée la manifestation du plagiotropisme imposé: le rameau qui croît en présence du sommet de la plante ne le fait qu'à l'horizontale. En B, l'ablation du sommet permet de distinguer entre plagiotropisme imposé et plagiotropisme auto-entretenu, ce dernier se manifestant même après l'ablation du sommet.

Totipotence cellulaire végétale, marcottage, bouturage, drageonnage.

Ces trois opérations traditionnelles de multiplication végétative de la plante, de clonage comme on dit maintenant, n'existent que par la totipotence cellulaire inhérente à la plante. Ceci revient à dire que, dans chaque cas, des cellules différenciées, en cellules de tige par exemple, vont se dédifférencier pour se redifférencier en cellules de racines, ou inversement.

Le marcottage assure le clonage par l'induction de racines sur une tige aérienne : la Ronce se marcotte naturellement (figure 11A), mais il peut être appliqué à de nombreux végétaux ligneux. Le bouturage s'effectue à partir d'un fragment de tige porteur d'un nœud (et donc d'un bourgeon) : à l'extrémité du fragment initialement la plus proche des racines, une rhizogénèse adventive se manifeste avant que ne croisse le bourgeon, le tout redonnant une plante (figure 11B).

Il est possible de fragmenter la tige néoformée en autant de futures boutures qu'elle a de bourgeons, et de recommencer le processus. Quand les boutures sont suffisamment réduites pour croître en tube à essai, on parle de micropropagation. Voici quelques décennies, un laboratoire angevin de micropropagation eut à fournir un clone de 1000 plants de Saule pleureur. La bouture tête de clone mise en culture au jour 0, forma une tige à 10 nœuds qui atteignit le sommet du tube en 40 jours. Avec ces 10 nœuds, 10 nouvelles boutures furent préparées qui, 40 jours plus tard, atteignirent le sommet des tubes avec chacune 10 nœuds... et le processus continua, pour combien de temps ?

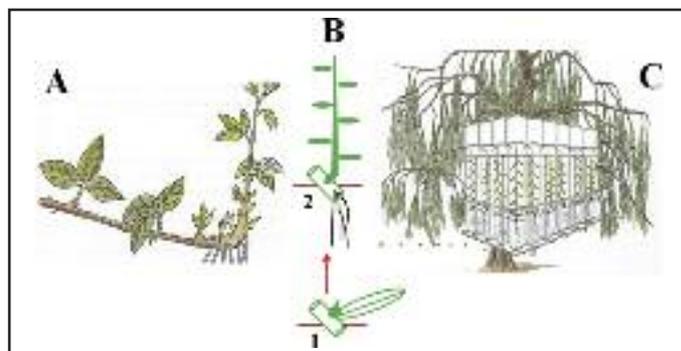


Fig. 11.- Conséquences de la totipotence cellulaire végétale. A, marcottage naturel de la Ronce ; des racines adventives apparaissent sur la zone subapicale de la tige, qui alors se redresse, une nouvelle plante peut être isolée par section de la tige originelle en amont des racines. B, bouturage classique. C, micropropagation par bouturage en tube à essais : rien n'empêche en B2, de couper la nouvelle tige en autant de fragments qu'il y a de bourgeons, de bouturer chacun d'un et de recommencer...

Quand les arbres, matures, ne se bouturent plus.

Toute plante issue de la germination d'une graine, se développe à travers une phase juvénile suivie d'une phase mature (figure 12). C'est à la maturité que la plante deviendra apte à se reproduire sexuellement et à faire des graines. De durée très différente selon la plante, la phase juvénile peut durer de quelques heures à quelques décennies, dans le cas des arbres forestiers. A noter que la fleur, la graine se développent en phase mature pour donner au cœur de la graine l'embryon pourvu de tous les attributs de la juvénilité (figure 12A).

La micropropagation implique que la tête de clone se bouture aisément. Bien des arbres forestiers ne se révèlent sujets d'élite intéressants à reproduire à l'identique que passée leur maturité, vers cent ans pour un Séquoia géant. Or, à ce stade de leur développement, ces arbres ne se bouturent plus, par manque de rhizogénèse adventive.

D'où l'idée de rajeunir des bourgeons du sujet d'élite pour obtenir une tête de clone capable de se bouturer. L'aspect fondamental de ce processus fut largement étudié aux Etats-Unis par W.P. Hackett, notamment sur le Lierre et en France par A. Franclet sur le Séquoia (figure 12B et C). Il apparaît que la maturité envahit progressivement la plante, mais que les zones proches des racines conservent toujours une certaine juvénilité.

La simple observation donne à penser que la greffe d'un bourgeon mature dans une zone juvénile peut induire le rajeunissement recherché (figure 12D). Dans la pratique, des greffes «en cascade» sont effectuées (figure 12E 1, 2, 3) de telle sorte qu'à chaque opération, la tête de clone réacquière un supplément de juvénilité.

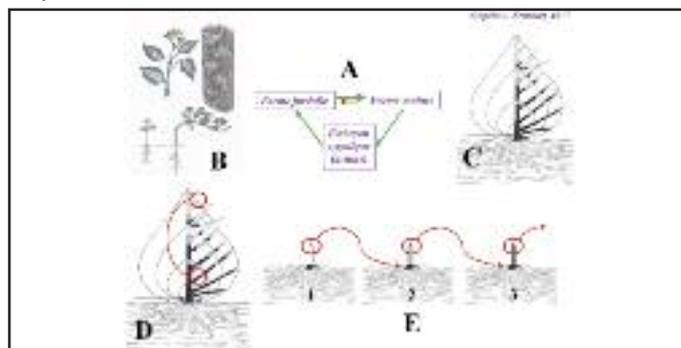


Fig. 12.- Juvénilité et maturité, rajeunissement. A, flèches vertes, le cycle juvénilité maturité chez les plantes ; flèche rouge, rajeunissement. B, juvénilité (feuilles découpées), maturité (feuilles ovales et fructifications) chez le Lierre. C, cartographie de la juvénilité (en noir) et de la maturité (en blanc) chez un arbre. D, possibilité de greffer un bourgeon mature en zone juvénile pour le rajeunir. E, greffes en cascade d'une tête de clone initialement mature sur des porte-greffes juvéniles ; de 1 à 2 à 3, le greffon devient de plus en plus juvénile.

A l'échelle planétaire, la forme dominante des arbres d'un lieu, est liée à la latitude du lieu.

Pour s'en convaincre, il suffit de comparer trois photographies, celle d'un Acacia de la savane (figure 13, latitude 5°), celle d'un Hêtre du bocage européen (figure 13, latitude 45°) et celle d'une Epinette de la taïga canadienne (figure 13, latitude 67°). Le feuillage du premier se déploie en parasol, celui du deuxième est globalement hémisphérique alors que celui de la troisième privilégie le développement en hauteur. La première particularité des plantes fut, par leur chloroplaste, d'exploiter l'énergie solaire. La figure 13 montre que les formes des arbres actuels, replacées à la latitude où elles se développent, sont optimales pour la bonne réception de cette énergie lumineuse.

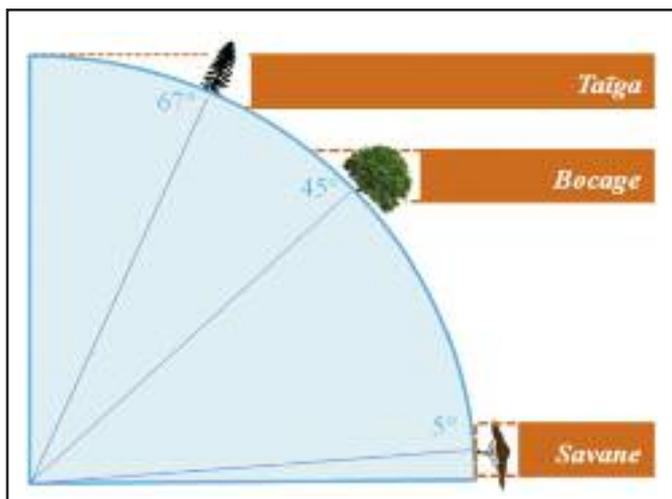


Fig. 13. Forme des arbres et latitude. En parasol dans la savane, en hémisphère dans le bocage européen, en hauteur dans la taïga, la forme de l'arbre correspond en chaque lieu à la forme optimale pour capter l'énergie solaire.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

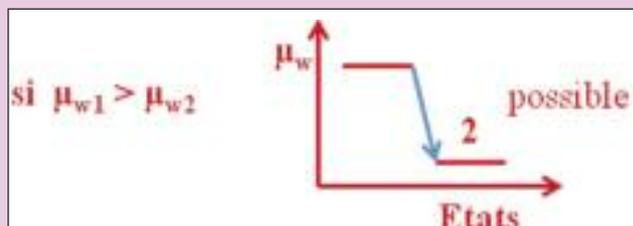
- Barnola P., 1971
Recherches sur le déterminisme du marcottage de l'extrémité apicale des tiges de la Ronce (*Rubus fruticosus* L.). Rev. gén. Bot. 78.
- Boullard B., 1992
Petite encyclopédie de la forêt, Ellipses, Ed. Marketing.
- Francllet A., 1980
Manipulation des pieds-mères et amélioration de la qualité des boutures. AFOCEL.
- Hackett W.P., 1985
Juvenility, Maturation and Rejuvenation in Woody Plants. Hort. Rev., 7.
- Monteuuis O., 1897
In vitro meristem culture of juvenile and mature *Sequoiadendron giganteum*. Tree Physiol., 3.
- Moreau E., 1960
Botanique. Encyclopédie de la Pléiade. Ed. Gallimard.
- Nozeran R, 1978
Réflexions sur les enchaînements de fonctionnements au cours du cycle des végétaux supérieurs. Bull. Soc. Bot. Fr., 125.
- Raven P.H., Evert R.F. et Eichhorn S. E., 2000
Biologie végétale, 6^e édition. De Boeck Université.
- Robert D. et Roland J.-C., 1989
Biologie végétale, caractéristiques et stratégie évolutive des plantes, tome I, organisation cellulaire. Ed. Doin.

Potentiel chimique de l'eau, potentiel hydrique

L'eau pure a un potentiel chimique μ_w^0 (en J.mole⁻¹)

L'eau solvant a un potentiel chimique plus faible et plus la solution sera concentrée, moins l'eau aura de degrés de liberté et plus son potentiel chimique sera bas.

L'eau se déplace toujours vers les potentiels chimiques les plus faibles.



μ_w^0 n'est pas aisément accessible, alors a été introduite la notion de **potentiel hydrique** :

$$\Psi = \mu_w - \mu_w^0 / V_w$$

V_w , volume molaire partiel de l'eau (en m³.mole⁻¹)

μ_w^0 potentiel chimique de l'eau pure (en J.mole⁻¹)

μ_w , potentiel chimique de l'eau étudiée (en J.mole⁻¹)

$$\Psi = \text{J. mole}^{-1} / \text{m}^3 \cdot \text{mole}^{-1} = \text{J. m}^{-3} = \text{N. m. m}^{-3} = \text{N. m}^{-2} = \text{Pa}$$

En pratique et dans le cas du végétal

L'eau cellulaire a pour potentiel hydrique Ψ la somme suivante : $\Psi = \Psi_\pi + \Psi_p$

$\Psi_\pi = -c RT$, potentiel osmotique

c, concentration du soluté en mole.m⁻³

T, température absolue en °K

R, constante d'état des gaz parfaits, en J.mole⁻¹. K⁻¹

$$\Psi_\pi = \text{mole. m}^{-3} \cdot \text{J. mole}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{K} = \text{J. m}^{-3} = \text{N. m. m}^{-3} = \text{N. m}^{-2} = \text{Pa}$$

Ψ_p , potentiel de turgescence, en Pa, toujours positif, dû à la pression de la paroi cellulaire

Ψ est mesuré par psychrométrie à point de rosée. c mesuré par cryoscopie, donne accès à Ψ_π , Ψ_p est calculé par différence

Pour la vapeur d'eau

$$\Psi = RT/V_w \cdot \ln p/P(T)$$

p, tension de vapeur d'eau à la température T (K)

P(T), tension de vapeur d'eau saturante à la température T (K)

Si $p = P(T)$, alors $\Psi = 0$

$$\Psi = \text{J. mole}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{K} / \text{m}^3 \cdot \text{mole}^{-1} = \text{J. m}^{-3} = \text{Pa}$$



LA MÉCANIQUE SPATIALE DE KOUROU À PROXIMA DU CENTAURE

FRANCIS ASPORD

*Ancien élève de l'École Centrale de Paris, Membre de l'ADASTA,
Retraité SNCF, Ingénieur Conseil*

INTRODUCTION

La mécanique spatiale peut surprendre. Exemple ? Pour doubler il faut freiner ! Le frottement atmosphérique augmente la vitesse du véhicule spatial ! L'astronautique est la technique qui permet à l'homme de s'élever au-dessus de l'atmosphère terrestre. Elle est née le 4 octobre 1957 avec le lancement de Spoutnik-1 [01]. La Terre tourne autour du Soleil à 30 km/s. Pour nous terriens, soumis au frottement de l'air, c'est colossal, mais c'est négligeable par rapport à la vitesse de la lumière (300 000 km/s). La mécanique de Newton suffit donc à faire les calculs de trajectoire ! La théorie, difficile, d'Einstein n'est pas nécessaire, sauf cas très particuliers (c'est d'ailleurs à cause de ces anomalies que la théorie de Newton a été remise en question, cf. avance du périhélie de Mercure). Une fois passée la barrière de l'atmosphère, les frottements ont quasiment disparu. Le mouvement perpétuel est presque atteint !

Rappels de mécanique newtonienne

Nous vivons dans un monde à 4 dimensions : 3 d'espace et 1 de temps indépendante des 3 premières. Cela signifie que pour fixer un rendez-vous il suffit d'indiquer 4 nombres : latitude, longitude, altitude et heure GMT du rendez-vous. Les notions de position, vitesse, accélération ne sont pas toujours bien assimilées. Il est utile d'en donner un exemple limité à un plan, donc seulement 2 coordonnées d'espace. Le jour J ma position est (0,0). Le jour J+1 je suis arrivé à (4 Est, 3 Nord). Quelle est ma vitesse ? Attention une vitesse est un vecteur, c'est-à-dire qu'elle a une intensité mais aussi, et surtout, une direction. Des calculs simples permettent de répondre à cette question en utilisant astucieusement les deux nombres 4 et 3.

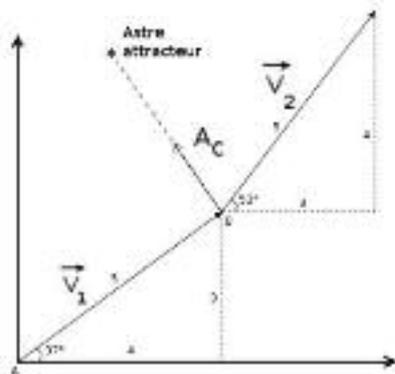


Fig 1

Le théorème de Pythagore nous dit que l'intensité de la vitesse est $\sqrt{4^2 + 3^2}$. La trigonométrie nous dit que la tangente de l'angle entre l'Est et ma vitesse est 3/4 ce qui correspond à un angle de 37° [fig.01].

Le jour J+2 j'ai encore avancé, mais de (3,4) cette fois-ci, je suis donc arrivé à (7,7). Ma nouvelle vitesse est donc $\sqrt{7^2 + 4^2} = 5$ et la direction l'angle de 53° dont la tangente vaut 4/3. On constate donc que l'intensité est la même mais pas la direction. Sur une voiture «l'indicateur de vitesse» ne donne, en fait, que l'intensité de la vitesse. Il faut en plus une boussole pour avoir la direction. L'accélération est une notion peu intuitive pour le commun des mortels.

C'est la différence entre 2 vecteurs vitesse successifs. On obtient donc $(3,4) - (4,3) = (-1,1)$. Mon accélération est donc d'intensité $\sqrt{(-1)^2 + 1^2} = 1,4142$ et sa direction 135° à partir de l'Est dans le sens anti-horaire, angle dont la tangente vaut $1/(-1) = -1$, c'est-à-dire la direction exactement Nord-Ouest. D'après la loi de Newton $f = m.a$ cette accélération est créée par une force dirigée dans la même direction en astronomie, celle de l'astre attracteur.

En résumé : avec 1 point on calcule une position, avec 2 points une vitesse, avec 3 points une accélération donc une force, avec 4 points 2 forces qui se recoupent à l'endroit où se situe le centre attracteur.

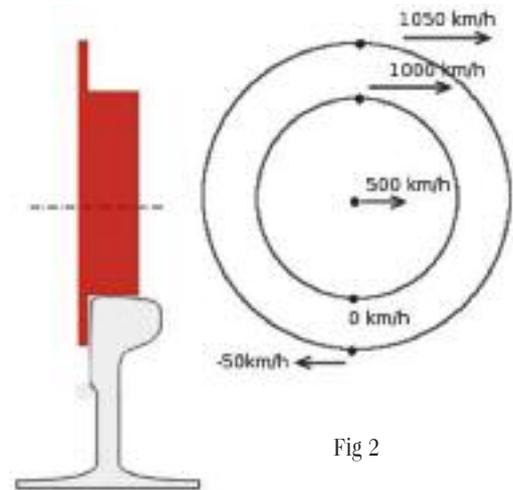


Fig 2

Petite anecdote sur la notion de vitesse qui risque de vous étonner!

Sur une roue de TGV filant à 500 km/h, il y a, à chaque instant, des points qui reculent ! De prime abord surprenant non ? [fig.02]

Les particularités de la force de Newton en $1/r^2$:

Je me suis longtemps demandé ce qui se passerait si la force de gravitation était en $1/r^3$, ou en $1/r$, ou indépendante de la distance. Grâce aux simulations sur ordinateur la réponse peut être trouvée assez facilement :

- en $1/r^3$ le système est instable.
- en $1/r$ l'orbite ne boucle pas sur elle-même après une rotation de 360°.
- à force constante il n'y aurait aucun moyen d'échapper à l'attraction du corps central.

Moralité le choix de Newton correspond exactement à l'expérience des astronomes : le système solaire est stable [02], les orbites bouclent sur elles-mêmes [03] et il existe une vitesse de libération, calculée par Tsiolkovski (cf. ci-dessous) et vérifiée par la sortie du système solaire des deux sondes **Voyager 1 et 2** qui voguent vers une autre étoile !

Pourquoi la force entre deux corps matériels est-elle en $1/r^2$

Jean Chandezon

22 juin 2014

La loi newtonienne d'attraction qui s'exerce entre deux particules massiques placées dans le vide, situées à la distance r l'une de l'autre, s'écrit :

$$\vec{F} = -\frac{k}{r^2} \vec{u} \quad \text{avec } \vec{u} = \frac{\vec{r}}{r}$$

où k est une constante et \vec{u} le vecteur unitaire porté par r . Cette interaction, semble être un cas particulier d'une loi plus générale :

$$\vec{F} = -\frac{k}{r^\alpha} \vec{u}$$

La question que l'on se pose, comme Francis se l'est posée, est la suivante : pourquoi $\alpha = 2$, et non pas, par exemple, $\alpha = 1.96$. À mon avis la réponse réside dans les propriétés du vide. Le vide ne peut ni créer ni absorber de l'énergie. Si de l'énergie est rayonnée de façon isotrope par une source ponctuelle, à une distance r de la source, l'énergie est uniformément répartie sur la sphère de rayon r de surface $S = 4\pi r^2$. Pour que l'énergie totale reste constante la densité d'énergie doit donc diminuer en $1/r^2$. (L'énergie est proportionnelle à la force puisqu'une énergie est le produit d'une force par un déplacement).

Pour un raisonnement complet et rigoureux on utilise une astile particule source à laquelle on associe un champ \vec{E} qui s'écrit en $1/r$, c'est son carré qui correspond à la densité d'énergie.

Conclusion

- $\alpha > 2$ le vide est absorbant, dans le cas d'un satellite il retombe sur la planète source,
- $\alpha < 2$ le vide est amplificateur la solution diverge,
- $\alpha = 2$ est la seule solution possible pour avoir un univers stable. (si l'univers n'était pas stable nous ne serions pas là pour le voir)

Constantin Edouardovitch Tsiolkovski (1857-1935) :

Dur d'oreille après une scarlatine infantile, il va tout apprendre par lui-même en fréquentant la bibliothèque de sa petite ville, perdue au fin fond de la Russie. Son livre «L'exploration de l'espace cosmique par des engins à réaction» est incompris de son vivant. C'est pourtant lui qui va donner à l'URSS une avance considérable sur le reste du monde, USA compris !

Il a tout inventé seul : les satellites artificiels, le moteur à réaction à hydrogène – oxygène, les stations orbitales, la gravité artificielle par rotation, l'ascenseur spatial, la voile solaire. Il a aussi fait des calculs précis et a découvert les trois vitesses cosmiques :

- pour tourner autour de la Terre il faut acquérir une vitesse de 8 km/s.
- pour quitter la Terre il faut 11 km/s.
- pour quitter le Soleil il faut 17 km/s.

Trop en avance sur son temps, il a été pris pour un fou ! Il est quand même entré à l'Académie des Sciences russe en 1918. Un cratère lunaire porte son nom. Voici sa devise : «La Terre est le berceau de l'humanité mais on ne passe pas toute sa vie dans son berceau».

Les technologies moteur :

La loi physique sous-jacente est toujours la même : action-réaction par l'expulsion d'une masse dans la direction opposée au mouvement souhaité. La force ainsi générée est le produit du débit en masse par la vitesse d'éjection [04].

La technologie la plus puissante actuellement concerne les propulseurs à poudre (en anglais booster). Vitesse d'éjection faible (2 500 m/s) mais gros débit. Aucune pièce en mouvement. Impossible à éteindre. C'est un très gros pétard, indispensable pour soulever la masse au décollage. Exemple : les 3 000 tonnes de la fusée lunaire Saturn V. Fonctionnement de quelques minutes car ensuite toute la poudre a été brûlée.

La technologie la plus souple est à base du couple hydrogène-oxygène. Vitesse d'éjection 4 500 m/s. Pompes tournant à 30 000 tr/mn à -250° C, quel défi ! Utilisée pour les manœuvres car "réallumable" à volonté. Fonctionnement de quelques minutes car ensuite l'échauffement devient ingérable.

La technologie la plus futuriste est à base d'ions accélérés par un champ électrique. Vitesse d'éjection 30 000 km/s mais débit faible d'où une force de quelques newtons seulement. Fonctionnement continu. Etudes en laboratoire, non opérationnelle à ce jour.

Autre solution à l'étude : la voile solaire consiste à se faire pousser par le «vent solaire» constitué de photons. Même caractéristiques que le système ionique mais sans aucune perte de masse. Nécessite de déployer une surface d'un km², ce qui représente un vrai défi !

Heureusement il n'y a pas de vent dans l'espace pour déchirer la voile.

Contrairement aux technologies à forte poussée «percussive» (cf. ci-dessous) qui permettent de modifier franchement une trajectoire, les technologies à faible poussée continue ne peuvent que modifier lentement une orbite. La différence se comprend nettement sur un trajet Terre-Lune. Dans le premier cas on part directement vers la Lune sur une orbite elliptique. Dans le deuxième cas on tourne autour de la Terre des centaines de fois en suivant une spirale qui augmente lentement et finit par rejoindre l'orbite de la Lune. Aucun essai réel des technologies à faible poussée continue n'a encore été fait.

Poussée percussive ou poussée continue ? Critères de choix :

Tout le monde comprend ce qu'est une poussée continue : elle est faible mais dure longtemps, ce qui finit par donner un résultat. Exemple : pousser une voiture en panne. En insistant elle va finir par rouler un peu.

La poussée «percussive» est bien plus délicate à comprendre. Cette notion a été introduite en premier par les physiciens, ce qui a conduit à la «fonction de Dirac» (Paul Dirac 1902 - 1984) [05] qui simplifie grandement de nombreux calculs et est, somme toute, assez facile à appréhender. Ensuite le mathématicien Laurent Schwartz (1915 - 2002) a inventé la théorie des distributions qui en est une belle généralisation mais...réservée aux spécialistes, comme la théorie d'Einstein !

Une poussée «percussive» est due à l'action d'une «grande» force pendant un temps «court» vis-à-vis du phénomène étudié, ce qui se traduit par un changement de vitesse important sans changement de position. Exemples : le carreau à la pétanque, le billard, le tir à l'arme à feu. En astronautique cela se traduit par une poussée phénoménale des moteurs fusées pendant quelques dizaines de secondes seulement.

Le critère principal d'utilisation d'une poussée «percussive» c'est qu'elle correspond à la dépense minimale de carburant pour un trajet donné (cf. ci-dessous «ellipse de Hohmann»). En critères secondaires on trouve une raison technologique. Un moteur fusée qui peut développer des forces colossales ne sait pas tourner au ralenti. Idem pour une chaudière à gaz, une montgolfière ou un moteur thermique (par contre un moteur électrique de traction ferroviaire développe son couple maximum à vitesse nulle ce qui rend inutile la boîte de vitesse). Ensuite vient un critère de calcul dans les avant-projets de mission spatiale. C'est bien pratique de pouvoir changer de vitesse comme on veut sans changer de position. Autrement dit si on se trouve au bon endroit on pourra toujours rattraper un écart de vitesse intempestif. Par contre si vous avez la bonne vitesse mais que vous n'êtes pas au bon endroit, vous n'y arriverez pas !

C'est l'équivalent astronautique du coup d'accélérateur salvateur d'une voiture puissante si vous avez mal calculé le dépassement d'un camion sur une route à double sens. C'est pourquoi en tirant une remorque avec une voiture peu puissante il faut rester très prudent !

L'application la plus connue de ce principe est l'ellipse de Hohmann.

Décollage de Kourou :

Cette position, à seulement 5° de latitude Nord, est absolument idéale ! En effet elle répond à tous les critères pour réussir un lancement :



Fig3

C'est la raison pour laquelle la fusée russe Soyouz est venue s'y implanter, complétant ainsi la gamme Ariane.

Pourquoi partir à la verticale ? Pour la même raison qui fait que les colonnes d'un édifice sont verticales. Parce que le matériau utilisé est calculé au plus juste pour résister à la compression mais se casserait immédiatement en flexion à l'horizontale [fig.04]. 90% de la masse d'une fusée au décollage est constituée de réservoirs, très minces, bourrés de carburant, qu'on va se dépêcher de larguer dès qu'ils sont vides. En plus on est aussi pressé de traverser l'atmosphère dense qui freine énormément et dépense inutilement les réserves de carburant.

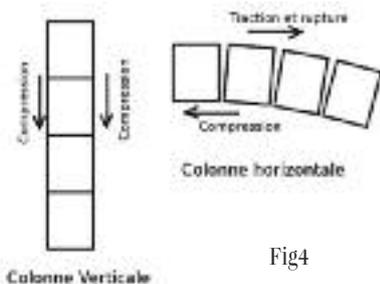


Fig4

La satellisation :

Elle consiste à acquérir une vitesse de rotation suffisante pour ne plus retomber sur Terre. Exactement comme la Lune. Son calcul en orbite circulaire est simple.

La force de gravitation de Newton vaut GMm/r^2 , dirigée vers l'intérieur. La force centrifuge vaut mv^2/r dirigée vers l'extérieur. Si on arrive à équilibrer ces deux forces on est satellisé. On constate que la masse m du satellite n'intervient pas et on trouve $v = \sqrt{GM/r}$ [fig.05].

Reste à déterminer à quelle altitude on souhaite se satelliser et combien de temps on veut s'y maintenir. Une première réponse est due à l'atmosphère terrestre.

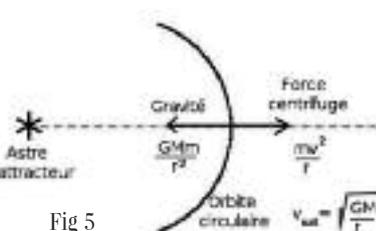


Fig 5

Sa limite officielle pour obtenir un diplôme d'astronaute est de 80 km. Voici le temps de vol, suivant l'altitude, avant la retombée finale :

- 200 km = 1 jour
- 300 km = 1 semaine
- 400 km = 1 mois (spoutnik 1)
- 500 km = 1 an (l'ISS doit être remontée tous les 6 mois)
- 700 km = 1 siècle
- 1 000 km = temps quasi infini.

On choisit donc une satellisation temporaire basse à 200 km. On vérifie que la situation est conforme au plan de vol et on repart au bout de quelques heures vers l'orbite définitive. La précision de la manœuvre joue aussi. En effet, le rayon de la Terre étant de 6378,137 km à l'équateur (donnée GPS), à 200 km d'altitude vous ne volez qu'à 3% du rayon terrestre au-dessus de la surface de la Terre, à la vitesse folle de 8 km/s. Vous n'avez donc pas droit à une grosse erreur de pilotage !

J'ai mis de nombreuses années à essayer de comprendre simplement comment on calcule une trajectoire de satellisation. Et puis, un jour, j'ai compris que c'était exactement comme un «service de tennis» :

- on traverse les 20 premiers km de l'atmosphère à faible vitesse, à cause du frottement de l'air.
- on pousse alors fortement verticalement pour atteindre l'altitude de 200 km que l'on rejoint à vitesse nulle.
- on pousse alors très fort horizontalement pour donner au satellite, quasi instantanément, la fameuse vitesse de 8 km/s qui permet de rester en l'air.

Voilà la théorie simplifiée, pour bien comprendre ce qui se passe. En réalité la trajectoire est plus progressive pour limiter les effets de l'accélération. Le lancement ne dure que 10 minutes et se déroule sur quelques milliers de km au-dessus de l'Atlantique, afin de pouvoir faire exploser la fusée sans grand risque en cas de problème.

La rentrée atmosphérique :

C'est la phase la plus dangereuse du vol. Elle nécessite un bouclier thermique qui s'abrase progressivement. Elle commence à 120 km d'altitude sous un angle de rentrée très précis de 2°. Si l'angle est trop grand l'engin spatial se transforme en étoile filante. Si l'angle est trop faible il ricoche et repart dans l'espace définitivement pour peu qu'il n'y ait plus assez de carburant pour refaire un autre essai.

Malheureusement cette phase dangereuse est irremplaçable car elle fait économiser une grande quantité de carburant qui serait nécessaire dans le cas d'une rentrée freinée par rétrofusée, sur un astre sans atmosphère (exemple : la Lune mais, dans ce cas, la gravité est faible).

La gestion astucieuse de la portance et de la traînée permet d'atterrir en vol plané sans aucune aide moteur. C'est une véritable prouesse de pilotage !

Les différents types de satellites et leurs orbites :

Il y a, en fait, assez peu d'orbites intéressantes, ce qui explique que beaucoup de satellites se concentrent aux mêmes endroits.

Les satellites les plus connus sont les géostationnaires, placés sur une orbite unique à 36 000 km d'altitude. Ils tournent à la même vitesse angulaire que la terre : 1 tour en 24 h [06]. Rigoureusement fixes par rapport à tout point de la terre, ils sont très pratiques pour les télécommunications car le réglage précis des antennes d'émission et de réception se fait une fois pour toutes. Les satellites géostationnaires sont espacés de 3° sur leur orbite, ce qui ne permet que $360 / 3 = 120$ postes très disputés. Pour atteindre cette orbite haute il faut beaucoup de carburant.

Il n'y a donc pas de satellite au-delà sauf pour quelques missions spéciales, cartographie de la Lune ou surveillance du Soleil sur un des points de Lagrange (cf. ci-dessous). Circulant dans une zone sans atmosphère, ils seraient, en théorie, là pour l'éternité. En fait il faut faire des manœuvres incessantes pour les maintenir à poste avec une précision de $\pm 1^\circ$.

Lorsqu'au bout de quelques années ils sont à court de carburant, il faut les décrocher pour libérer la place tant convoitée. Mais pourquoi ces géostationnaires n'arrêtent-ils pas de bouger ? Pour deux raisons :

- des astres essaient continuellement de les attirer, Soleil, Lune, autres planètes.

- l'équateur terrestre n'est pas un cercle mais une ellipse. Parmi les 120 postes, il y en a donc des stables (très cotés) à 75°Est ou 105°Ouest et d'autres instables (moins cotés).

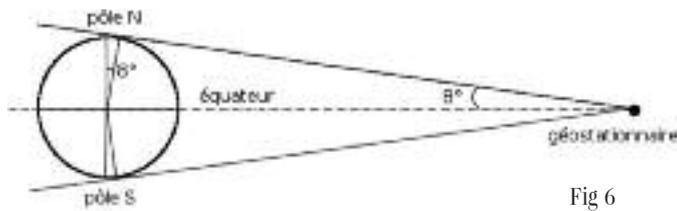


Fig 6

L'inconvénient des géostationnaires c'est qu'ils doivent absolument être sur l'équateur et donc, ne voient jamais les pôles [fig.06]. Pour découper la Terre en tranches d'orange il faut donc lancer aussi des satellites polaires. Ce que Kourou fait tout aussi bien !

Les autres satellites (météorologiques, communication, observation, scientifiques, militaires etc) se trouvent sur des orbites diverses et en général plus basses, en fonction du service attendu.

A 20 000 km se trouvent les satellites GPS qui, eux, tournent en 12 h et ne sont donc pas fixes pour un randonneur, ce qui explique que la géométrie du système GPS évolue constamment et peut donc se dégrader fortement.

Entre 2 000 et 200 km on trouve tous les autres satellites pour la surveillance globale de la Terre et du climat (SPOT 800 km), ISS à 500 km, militaires au plus près de la Terre pour avoir la meilleure précision possible en échange d'une durée de vol de quelques jours seulement.

Le rendez-vous spatial :

Cette manœuvre délicate est indispensable pour ravitailler une station orbitale. Elle a donc été testée dès les débuts de l'astronautique. Pour ne pas fracasser les deux véhicules l'un sur l'autre il faut rester très prudent sur le degré de précision atteint par la technologie de tir. Voici les différentes phases :

- l'ISS tourne depuis des mois, en orbite circulaire, à 500 km d'altitude.
- le vaisseau ravitailleur est positionné sur la même orbite à 100 km derrière.
- on le freine légèrement, il prend donc une orbite elliptique de même apogée mais de périégée un peu moindre. De ce fait il fait un tour complet en un peu moins de temps que l'ISS.
- à chaque tour, qui dure 1h30', il se rapproche donc lentement de l'ISS. La distance passe progressivement à 10 km, puis 1 km.
- on le remet en orbite circulaire par une impulsion vers l'avant.
- si les deux orbites sont bien stabilisées, on donne une faible impulsion avant pour se rapprocher lentement de l'ISS. Mais si on ne fait que ça le ravitailleur va prendre une apogée supérieure donc tourner moins vite que l'ISS et donc... s'en éloigner !
- pour éviter ça il faut donc mettre une poussée continue vers la Terre, à l'aide d'une fusée latérale à gaz froid, pour contrebalancer sans arrêt la force centrifuge qui est légèrement trop forte puisque notre vitesse est légèrement trop grande pour l'altitude de 500 km. On reste ainsi sur l'orbite circulaire à 500 km d'altitude, tout en ayant une légère vitesse d'approche.
- la distance passe alors progressivement de 1 km à 100 m, 10 m, 1 m, puis contact. A notre époque le vaisseau ravitailleur européen PROGRESS fait tout ça en autonomie complète.

L'ellipse de Hohmann (1880-1945) :

La consommation de carburant est un obstacle majeur à toute mission spatiale. Il en était de même pour Lindberg qui ne voyait devant lui qu'à travers un périscope car il avait placé un réservoir supplémentaire à l'avant de son avion !

Hohmann a donc cherché la meilleure trajectoire pour changer d'orbite circulaire.

Exemple : vous tournez autour d'une masse attractive sur un cercle de rayon R1, donc à la vitesse $\sqrt{gR_1}$ (cf. formule ci-dessus). Vous voulez finir par tourner autour de la même masse sur un cercle de rayon R2, donc à la vitesse $1/\sqrt{gR_2}$. Quelle est la trajectoire de transfert qui nécessite le minimum de carburant ? Dans ce cas la douceur ne paye pas ! Il faut mettre une percussion vers l'avant ce qui vous fait monter sur une ellipse de périégée R1 et d'apogée R2 que vous atteignez après un demi-tour. Si vous ne faites rien vous allez redescendre. Il faut donc une deuxième percussion avant qui vous donne la bonne vitesse de rotation pour se tenir à la distance R2. Comme vous le constatez pendant tout le transfert les moteurs sont arrêtés, sauf en début et en fin où ils donnent à fond. Vous voyez l'intérêt vital d'un moteur «réallumable» et... fiable !

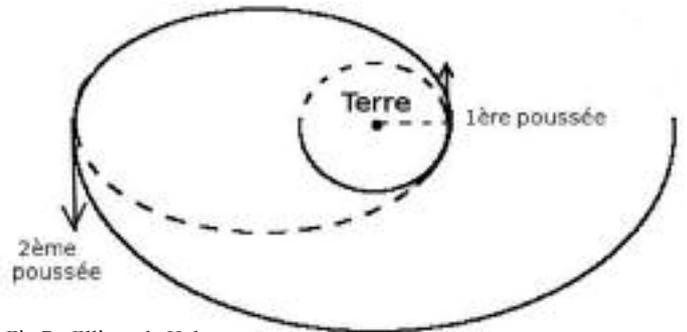


Fig 7 - Ellipse de Hohmann

Ceci explique pourquoi les satellites géostationnaires nécessitent un moteur d'apogée. En effet la fusée les place à 200 km d'altitude mais ils doivent ensuite monter à 36.000 km par leurs propres moyens. Ce moteur est alors largué et il ne reste plus que des petits moteurs de maintien à poste pendant une dizaine d'années.

Le calcul de Hohmann montre aussi qu'il y a une durée optimale de transfert, ni trop courte ni trop longue. Ceci explique que pour aller de la Terre à Mars on n'a pas le choix de la durée de parcours... sauf à consommer plus. Tant qu'on sera tributaire des technologies moteur actuelles il faudra 9 mois pour aller sur Mars !

Après mûre réflexion j'ai fini par comprendre l'origine de cette durée de transfert optimale :

- si vous voulez aller trop vite, il vous faut une forte accélération suivie d'une forte décélération, ce qui consomme, c'est évident.

- mais si vous voulez aller trop lentement pourquoi est-ce aussi mauvais ? Parce que votre faible vitesse implique une faible force centrifuge et donc que vous devez porter le poids de votre fusée à «bout de bras» pendant longtemps.

Les points de Lagrange (1736-1813) :

Lagrange s'est demandé s'il y avait des positions stables dans le champ de gravité du Soleil et d'une planète.

Le problème comporte trois forces : attraction du Soleil, attraction de la planète qui tourne autour et... force centrifuge due à cette rotation. Le résultat ce sont les 5 points de Lagrange L1 à L5 [fig.08]. Trois sont alignés avec les corps attracteurs. Chacun des deux autres forme un triangle équilatéral avec le soleil et la planète.

La seule application actuelle est le satellite SOHO d'étude du Soleil qui reste toujours aligné entre le Soleil et la Terre au point L1. On peut envisager à l'avenir des relais télécom avec la Lune ou Mars. En astronomie les astéroïdes troyens et grecs sont sur les points L4 et L5 de Jupiter.

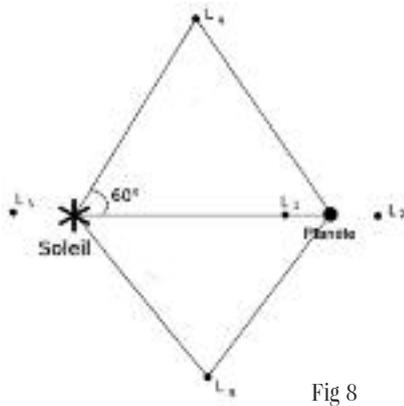


Fig 8

La mission vers la Lune :

La Lune ne s'éloigne jamais beaucoup de la Terre. On peut donc s'y rendre quand on veut. Ce n'est pas le cas avec les planètes. Les différentes phases sont bien connues depuis 1969 [fig.09] :

- satellisation terrestre
- quelques jours de transfert
- satellisation lunaire
- descente au sol
- retour.



Fig 9

La fronde planétaire :

C'est une technique astucieuse pour augmenter la vitesse d'une sonde interplanétaire sans aucune consommation de carburant. Elle consiste à viser une planète légèrement en arrière de sa trajectoire.

La sonde se fait alors « aspirer » par la gravité de la planète et sa vitesse est augmentée tout en changeant de direction. Certaines missions ont ainsi utilisé successivement Mars, Jupiter, Saturne pour finir par atteindre la vitesse de libération du Soleil et partir vers une autre étoile (sondes Voyager).

Evidemment il faut attendre que les planètes soient positionnées au bon endroit pour « réceptionner » successivement la sonde. Beau calcul informatique en vue ! [fig 10].

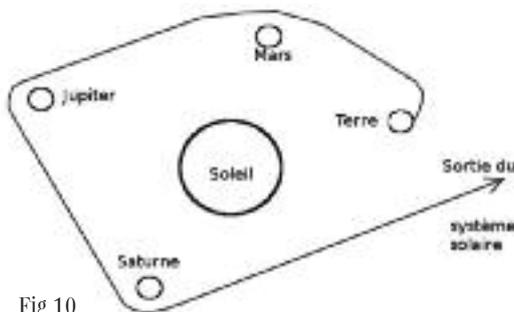


Fig 10

La visite des planètes :

Le gros problème c'est que la distance avec la Terre varie énormément et qu'à certaines époques la planète est carrément derrière le Soleil d'où un problème de liaison télécom [fig.11].

Ceci implique que le départ de la Terre ne peut se faire que dans une étroite « fenêtre de tir », avec un délai de transfert qui se compte en mois (en jours pour la Lune). Les succès sont cependant nombreux :

- visite de toutes les planètes et de leurs principaux satellites.
- atterrissage sur un astéroïde et une comète.

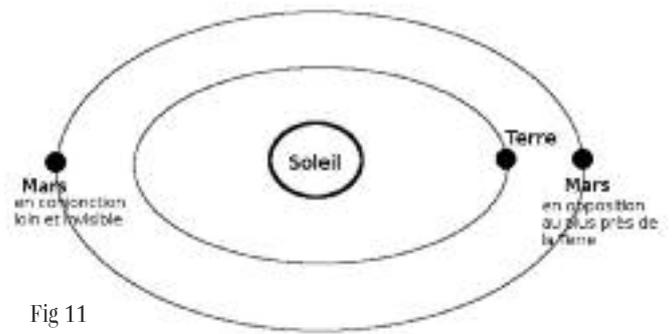


Fig 11

Actuellement l'effort de la NASA et des Russes se porte sur Mars. Le délai de transfert de 9 mois justifie l'envoi de sondes de plus en plus sophistiquées. Le voyage humain n'a pas de date prévisible. Ce sera incontestablement le début d'une nouvelle ère spatiale.

Départ vers Proxima du Centaure :

C'est l'étoile la plus proche de notre Soleil. Elle se trouve à « seulement » 4 années-lumière. Mais comme nos sondes ne volent qu'à 30 km/s cela prendra quand même... 40.000 ans ! Longue traversée du désert car il n'y a rien entre les deux étoiles si ce n'est un peu de gaz ténu. Je vous rappelle que notre galaxie et celle d'Andromède vont se croiser (dans un sacré bout de temps !) et que pourtant il n'y aura pratiquement aucune collision d'étoiles tellement celles-ci sont isolées les unes des autres par du vide. L'astronomie donne facilement le vertige !

CONCLUSION :

Nous n'en sommes qu'au début de l'ère spatiale. Pour le moment nos fusées ont la puissance d'un vélo Solex ! Il va falloir installer un ascenseur spatial reliant la Terre à une station orbitale d'un km de diamètre, en rotation lente sur elle-même pour créer une gravité artificielle sur son pourtour. De là on ira en une heure sur la Lune et en une semaine (durée du trajet ferroviaire en transsibérien) sur Mars à qui on aura redonné une atmosphère respirable.

Il ne fait jamais bon d'avoir une civilisation en retard d'une technologie. Voir l'histoire des Indiens d'Amérique aussi bien du Nord que du Sud !

Mais comment les Russes ont-ils pu lancer des torpilles supersoniques dans l'eau ? En les isolant par une couche de vapeur !

Mais comment, en 1900, Blériot aurait-il pu penser voler à Mach 2 en Concorde ?

Mais comment peut-on expliquer aux indiens Yanomami ou à l'inventeur du télégraphe Chappe que les ondes radio couvrent toute la Terre ?

N'avait-on pas donné aux radioamateurs les ondes courtes pour qu'ils puissent faire joujou sur de courtes distances avant de découvrir qu'elles seules se réfléchissent sur l'ionosphère et couvrent, de ce fait, la Terre entière ?

Les trous de vers dans l'espace-temps existent-ils vraiment ? D'après la théorie d'Einstein rien ne s'y oppose !

Comment passe-t-on d'un étage à l'autre dans un immeuble de 100 m de long muni d'un seul escalier du côté opposé à votre appartement ? En marchant pendant 200 m... ou en montant de 2,5 m par un escalier en colimaçon, après avoir percé le plafond ! C'est peut-être pareil pour les trous d'espace-temps ?

A l'évidence il reste encore des zones à explorer ! ...et c'est tant mieux !

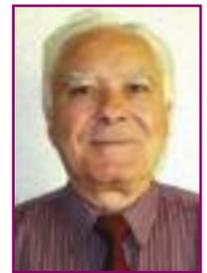
Remarques

- [01] En russe « compagnon ».
- [02] Henri Poincaré a démontré que c'est faux à très long terme.
- [03] En fait les orbites ne bouclent pas à cause des perturbations luni-solaires pour les satellites hauts et de l'aplatissement équatorial de la Terre pour les satellites bas. De ce fait le périhélie et le plan de l'orbite tournent lentement.
- [04] $\text{kg/s} \times \text{m/s} = \text{kg} \times \text{m/s}^2 = \text{masse} \times \text{accélération} = \text{force}$
- [05] La fonction de Dirac est la limite, lorsque ϵ tend vers zéro, d'une fonction nulle partout sauf pendant un temps ϵ où elle vaut $1/\epsilon$. Sa surface est donc constante et égale à 1 quel que soit ϵ .
- [06] en fait 23h56m4s, rotation sidérale de la Terre.



INTRODUCTION AUX NEUROTOXIQUES ORGANOPHOSPHORÉS DU TYPE SARIN.

ASPECTS BIOLOGIQUES ET CHIMIQUES



MICHEL GENDRAUD

*Agrégé de Physiologie-Biochimie
Professeur honoraire de Physiologie végétale de l'Université Blaise Pascal
Membre de l'ADASTA*

GEORGES JEMINET

*Ingénieur ENSCCF
Directeur de recherche honoraire C.N.R.S.
Université Blaise Pascal
Membre de l'ADASTA*

Introduction :

Les armes chimiques de guerre constituent une menace concrète et sérieuse dont l'arsenal n'a pas cessé de s'élargir. Ainsi, l'apparition du Tabun puis du Sarin pendant la seconde guerre mondiale, appartenant à la catégorie des neurotoxiques organophosphorés (NOP), a-t-elle créé une nouvelle classe chimique redoutable dont le nombre de représentants s'est accru. Ces composés sont devenus un danger constamment envisagé dans les conflits militaires ou lors d'attentats.

Parallèlement, dans le domaine agricole, l'utilisation de pesticides du type organophosphorés, bien que règlementée, provoque des intoxications accidentelles en nombres importants au plan mondial.

C'est une enzyme clé de la neurotransmission : l'acétylcholinestérase (AChE), qui est la cible des NOP. De nombreux travaux de recherche sont consacrés à l'étude approfondie de leur mécanisme d'action dans le but, notamment, de trouver des molécules antidotes efficaces pour lever l'inhibition irréversible de l'AChE induite par ces composés.

Les grandes étapes qui marquent la transmission de l'influx nerveux sont présentées dans cet article pour situer l'importance de l'AChE. Puis, après avoir défini la famille chimique des organophosphorés, les éléments historiques qui ont conduit à la préparation des premiers NOP en Allemagne sont abordés. L'étude des principales structures chimiques met en évidence le rôle central joué par l'atome de phosphore. L'exemple du Sarin dont quelques propriétés physico-chimiques sont explicitées, montre qu'il s'agit d'un liquide, comme tous les autres NOP, dont la dispersion se fait sous la forme d'un aérosol. Pour terminer le mécanisme d'action au niveau moléculaire est discuté, il permet de comprendre l'extrême toxicité de ces armes chimiques et les symptômes redoutables qui apparaissent dès qu'ils sont présents à l'air libre.

La transmission de l'influx nerveux

Le système nerveux des vertébrés, dont les humains, est constitué du système nerveux central, cerveau et moelle épinière, et du système nerveux autonome (figure 1). Le premier contrôle les muscles squelettiques et reçoit de la périphérie de multiples entrées sensorielles. Le second, en relation avec le premier, reçoit lui aussi des rétroactions sensorielles et contrôle les muscles lisses et le muscle cardiaque. Ceci revient à dire que l'ensemble est le siège d'échanges continus d'informations selon des sens déterminés par construction, via les cellules nerveuses, les neurones.

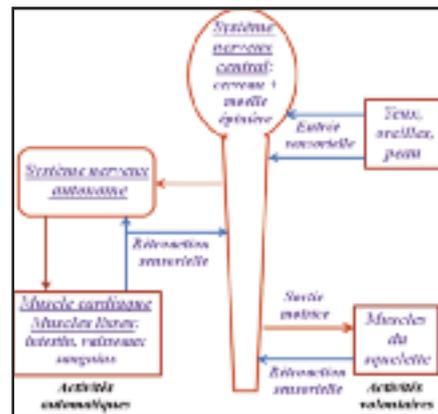


Fig. 1. - Le système nerveux des vertébrés. Les flèches rouges figurent les neurones efférents, qui envoient une information vers la périphérie, les flèches bleues figurent les neurones afférents qui conduisent une information de la périphérie vers le système contrôleur.

Le neurone (figure 2) est composé d'un corps cellulaire possédant tous les composants d'une cellule (noyau, mitochondries...). Celui-ci est entouré d'un ensemble de ramifications, les dendrites et prolongé par l'axone pouvant atteindre jusqu'à 1 mètre de longueur. L'information transmise par le neurone va toujours des dendrites vers l'arborisation terminale.

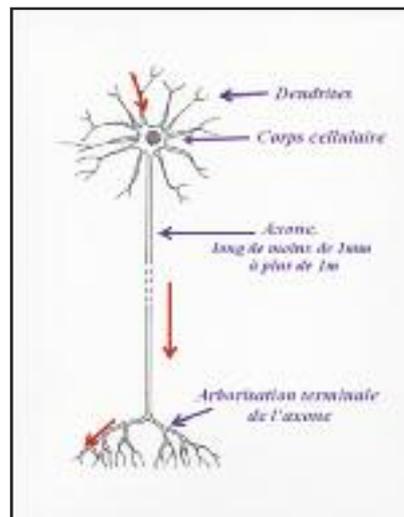


Fig. 2. - Le neurone. L'information qui traverse le neurone, cellule nerveuse, est figurée par des flèches rouges. Elle aborde le neurone par les dendrites, traverse le corps cellulaire et parcourt l'axone jusqu'à son arborisation terminale.

L'information transportée par le neurone n'est autre que le potentiel d'action, naguère nommé influx nerveux. La figure 3 le présente au niveau de l'axone. A l'équilibre, la différence de potentiel transmembranaire ($\Delta\Psi$ ou ddp) est donnée par l'équation de Goldman qui prend en compte les concentrations de tous les ions mis en cause et leurs perméabilités relatives. Dans le cas présent, $\Delta\Psi$ est égale à -60mV , potentiel de repos de l'axone. L'équation de Nernst indique que K^+ est très proche de son potentiel d'équilibre alors que Na^+ en est très éloigné ($+53\text{mV}$). Une ATPase Na^+/K^+ , placée sur la membrane, est là pour excréter Na^+ et absorber K^+ le moment venu.

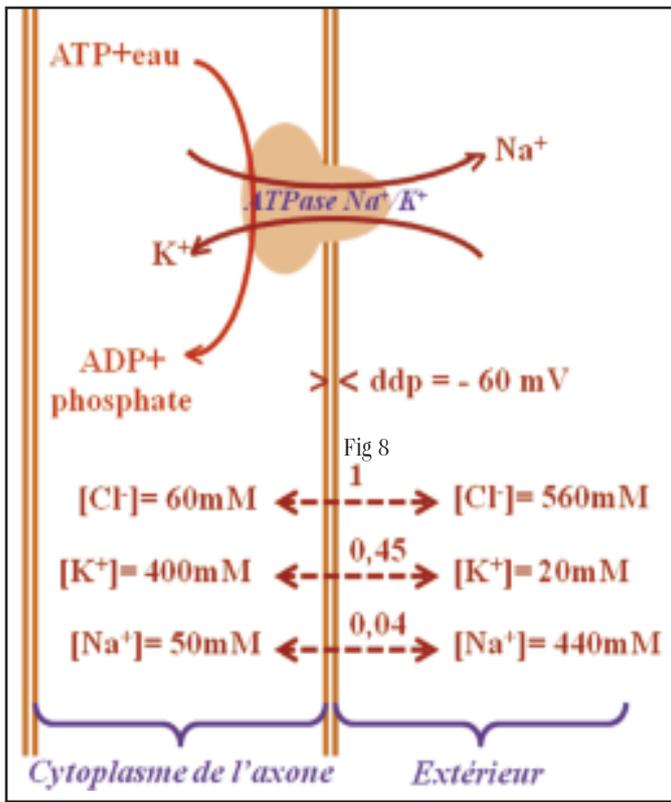


Fig. 3. - Les conditions du potentiel d'action (influx nerveux) au niveau de l'axone. Entre crochets, les concentrations des divers ions mis en cause. Matérialisées par des flèches à double sens pointillées, leurs perméabilités relatives. L'ATPase Na⁺/K⁺ permet l'excrétion de Na⁺ et l'absorption de K⁺.

Le déroulement du potentiel d'action est représenté à la figure 4. Le cytoplasme de l'axone au repos étant négatif par rapport au milieu extérieur, le schéma est simplifié.

Quand une stimulation ramène $\Delta\psi$ vers -20 mV, des canaux Na⁺ voltage dépendants s'ouvrent et l'ion Na⁺ entre, localement, en masse dans la cellule, faisant monter $\Delta\psi$ jusqu'à +40 mV, au voisinage du potentiel d'équilibre de Na⁺.

Alors l'influx de Na⁺ cesse et les canaux Na⁺ se ferment, temporairement insensibles au voltage. S'ouvrent alors des canaux K⁺ par lesquels sort cet ion, ramenant ainsi $\Delta\psi$ à une valeur négative.

Les équilibres ioniques sont restaurés par l'ATPase Na⁺/K⁺. Le potentiel d'action se propage de proche en proche, dans un seul sens.

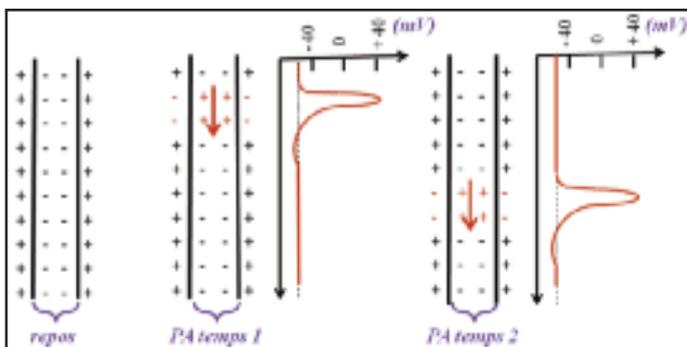


Fig. 4. - Déroulement d'un potentiel d'action (en rouge) En un point donné, l'entrée de Na⁺ provoque une augmentation de $\Delta\psi$ jusque vers +40mV. La sortie de K⁺ ramène $\Delta\psi$ à une valeur négative. L'ATPase Na⁺/K⁺ restaure les équilibres ioniques. Le potentiel d'action se propage de proche en proche.

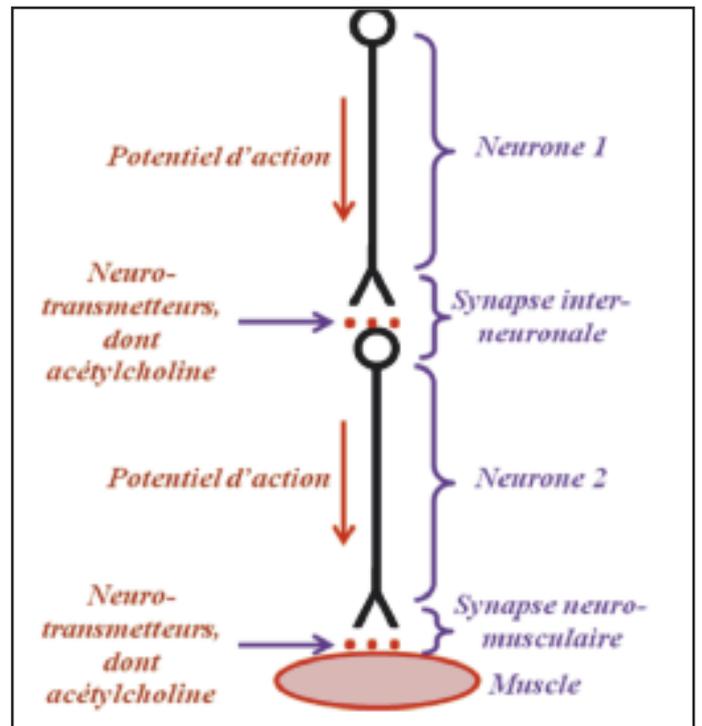


Fig. 5. - Position des synapses. Arrivé à l'extrémité de l'arborisation de l'axone, le potentiel d'action provoque la libération de neurotransmetteurs qui, au niveau du neurone suivant induisent un nouveau potentiel d'action ou la réponse musculaire.

La synapse (figure 5) est le lieu où le neurone transmet un signal (une information) à une cellule, autre neurone ou cellule musculaire par des neurotransmetteurs, en général molécules de petites tailles comme l'acétylcholine. La figure 6 monte le détail du processus et la figure 7 sa réalité chimique.

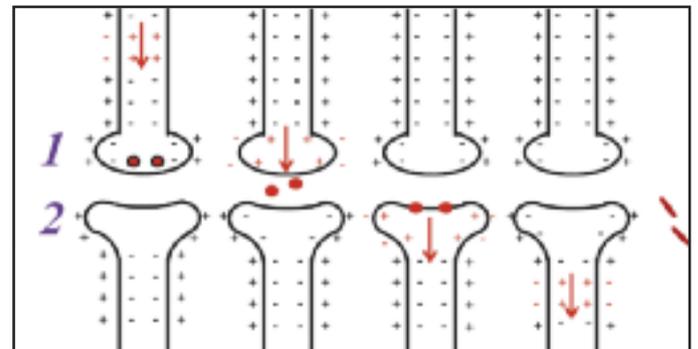


Fig. 6. - Détail du fonctionnement d'une synapse. L'arrivée du potentiel d'action à l'extrémité du neurone 1 libère le neurotransmetteur (acétylcholine). Arrivé sur le neurone 2, le neurotransmetteur induit un nouveau potentiel d'action. La nécessaire brièveté du signal (comme le trait ou le point de l'alphabet morse) est assurée par la destruction rapide du neurotransmetteur.

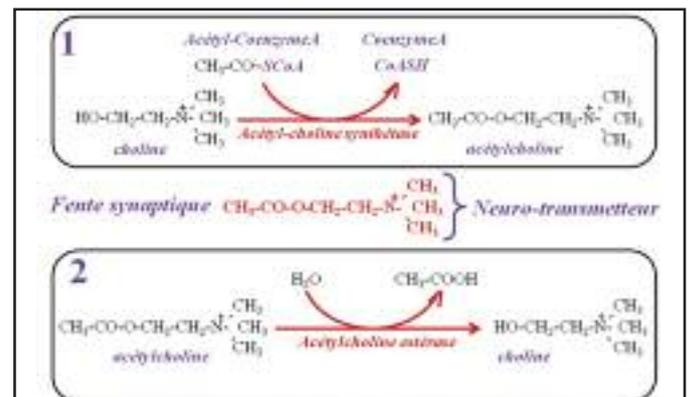


Fig. 7. - La brièveté du signal transmis par l'acétylcholine au niveau de la fente synaptique est liée à la durée de vie de cette molécule qui doit être rapidement éliminée par l'acétylcholine esterase.

Chimie organique et organophosphorés

La chimie organique s'intéresse aux molécules contenant au moins une liaison C-H. Le carbone ($Z = 6$) a une configuration électronique à six électrons ($1s^2 2s^2 2p^2$). Ses propriétés chimiques sont déterminées par l'arrangement de ses quatre électrons de la couche périphérique. L'hydrogène ($Z = 1$) dispose seulement d'un électron $1s$. Ainsi, pour la molécule de méthane CH_4 , quatre liaisons covalentes C-H vont s'établir suivant les directions d'un tétraèdre (Figure 8) avec mise en commun de deux électrons par liaison.

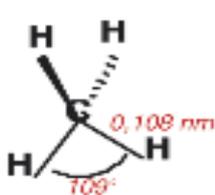


Fig. 8 Méthane

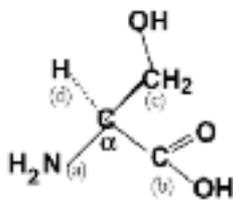


Fig. 9 L-Sérine ou (S)-Sérine

Les molécules organiques contiennent souvent d'autres atomes tels que O, N, S, ... Par ailleurs, le carbone a la capacité de former des liaisons covalentes avec lui-même pour constituer des chaînes, des cycles de différentes tailles. Les combinaisons possibles sont donc infinies et la bibliographie incommensurable en chimie organique l'atteste.

Ces remarques générales s'appliquent à la structure des molécules participant aux processus du vivant, en particulier pour les acides α -aminés. Ainsi la Sérine (Figure 9), est construite autour d'un atome de carbone (α) central lié à quatre substituants portant des fonctions différentes ; (a) : amine, (b) : acide carboxylique, (c) : « bras » CH_2OH , (d) : hydrogène. Ceux-ci sont classés en suivant la règle séquentielle de Cahn, Ingold et Prelog. La molécule peut exister sous deux formes énantiomorphes (paire d'images miroirs). Cette notion de stéréochimie est d'une grande importance, notamment en biologie. La L-Sérine naturelle dévie la lumière polarisée (polarimètre) à gauche (Lévogyre \leftrightarrow Dextrogyre) et sa configuration absolue autour du C(α) est (S) (Sinister \leftrightarrow Rectus) déterminée par la rotation (a) \rightarrow (b) \rightarrow (c) en sens inverse des aiguilles avec (d) à l'arrière. Les deux indications donnent une information différente pour l'énantiomère considéré. Les 20 acides aminés naturels sont de la série (S), sauf la Glycine qui, avec son substituant (c) = H, n'a pas de C asymétrique. Les variations structurales portent uniquement sur le bras (c). Les macromolécules issues des combinaisons entre ces acides aminés : les protéines, sont essentielles dans la construction des systèmes vivants (structure, métabolisme, transport).

Le phosphore ($Z = 15$) de symbole chimique P présente une configuration électronique à quinze électrons ($1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^3$). Dans une chimie riche en représentants, ses combinaisons avec les autres atomes utilisent trois ou cinq des électrons de sa couche externe, elles sont classées suivant une nomenclature spécifique et complexe non discutée.

Un exemple de phosphore trivalent est celui de la phosphine PH_3 (gaz dangereux) (Figure 10) dont la structure est représentée ci-dessous. Les liaisons constituent une pyramide à base triangulaire surmontée d'un doublet électronique. La triphénylphosphine où chaque H est remplacé par un groupe benzénique C_6H_5 est un intermédiaire en synthèse organique d'une grande importance.

Pour le phosphore pentavalent, la molécule PH_5 n'a pas été isolée, mais les molécules comme PF_5 (Figure 11), PCl_5 , PBr_5 existent... Parmi les composés du phosphore avec un ou plusieurs oxygènes, l'acide phosphorique H_3PO_4 (Figure 12) occupe une position centrale.

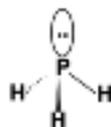


Fig. 10.
Phosphine

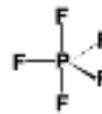


Fig. 11.
Pentafluorophosphore

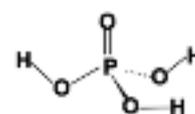


Fig. 12.
Acide Phosphorique

Un très grand nombre de structures dérivent de celle de l'acide phosphorique et notamment en ce qui concerne les insecticides ou les neurotoxiques « organophosphorés ». Mais dans ce cas, au moins une liaison Phosphore-Carbone est présente dans l'édifice moléculaire d'où le terme utilisé en français. Les anglosaxons privilégient la nomenclature « organophosphates » plus générale et qui englobe mieux toutes les possibilités structurales de la Figure 13, mais le terme « organophosphorus » existe aussi. Quoi qu'il en soit, ce type de composés est une création des chimistes.

Remarque importante :

Le phosphore constitue 1% du poids du corps humain, c'est donc un élément clé de la vie, mais il intervient strictement sous la forme de structures chimiques contenant l'ossature phosphate de l'acide phosphorique : ADN, ARN, ATP..., phospholipides, phosphate de calcium des os et des dents.

Développement historique des NOP

Dans la terrible guerre chimique qui débute en 1915⁷ au cours du premier conflit mondial du XX^{ème} siècle, un consortium chimique allemand va se trouver impliqué c'est l'IG-Farben AG (Interessensgemeinschaft Farbenindustrie Aktien Gesellschaft).

Entre 1905 et 1925 la « petite IG-Farben » réunit les firmes Agfa-BASF-Bayer., ses chimistes participent à la guerre des gaz avec des universitaires dont Fritz Haber (Nobel 1918 !) qui est à l'origine, le 22 avril 1915, de l'utilisation du gaz chlore. Un sommet de l'horreur est atteint avec l'ypérite (aérosol) en 1917.

La « grande IG-Farben » est constituée en 1925 avec l'entrée des sociétés Hoechst et Dynamit Nobel dans le consortium. C'est alors la plus importante concentration industrielle mondiale dans le domaine de la chimie.

L'IG-Farben est dissoute officiellement en 1952 à la suite du jugement du tribunal de Nuremberg en 1947. Mais cette décision va être longue à entrer dans les faits. Les cinq firmes vont connaître des destins différents, on peut noter que la BASF (Badische Anilin & Soda Fabrik) est le leader mondial actuel de l'industrie chimique et la firme Bayer AG occupe le 11^{ème} rang.

La chronologie des principaux événements qui ont conduit à l'existence des NOP est présentée dans ce qui suit^{1,4,5}. A cette époque, il faut avoir présent à l'esprit que la chimie repose sur une recherche expérimentale de laboratoire déterminante.

1854 : Parmi les premiers travaux bien identifiés sur la chimie du phosphore, citons ceux de Philippe de Clermont (La Sorbonne) qui prépare le tétraéthylpyrophosphate. D'autres études dans le même domaine vont bien évidemment être entreprises par la suite, dans les grandes universités européennes.

1932 : Après avoir effectué la synthèse de monofluorophosphates dans un cadre universitaire, Willy Lange (Pr.) et Gerda von Krueger (étudiante) (Université de Berlin) testent sur eux-mêmes les dangereux effets de ces composés par inhalation accidentelle. Les symptômes observés conduisent à considérer que l'activité toxique s'exerce sur le système nerveux cholinergique, connu dans son principe.

Willy Lange envisage une application dans le domaine des insecticides (!), il rencontre des experts de l'IG-Farben qui ne se montrent pas intéressés.

Pourtant, peu de temps après, Gerhard Schrader (IG-Farben, Leverkusen) va étudier ces composés et des analogues dans le but de créer de nouveaux insecticides.

1933 : Le gouvernement nazi arrive au pouvoir (30 janvier). La potentialité comme agent de guerre chimique de ces molécules est assez rapidement envisagée par l'armée et celle-ci ordonne alors à G. Schrader et son groupe de développer le domaine. C'est ainsi que va naître la série des agents G (*German*).

1936 : le Tabun (GA)

1938 : le Sarin (GB)

1939 : le Cyclosarin (GF). Étudié à nouveau par les militaires anglais dans les années 1950.

1942 : L'Allemagne lance la production industrielle du tabun au camp de concentration de Dyhernfurth/Oder (Pologne actuelle).

1944 : Synthèse du Soman (GD) (R. Kuhn).

Les NOP n'ont pas été utilisés par les Allemands pendant la seconde guerre mondiale

1945 : On note la première tentative de commercialisation d'un insecticide organophosphoré : le parathion provenant des travaux de l'IG-Farben. Les brevets saisis par les Alliés sont repris par différentes entreprises. Ce composé va se révéler très toxique, peu à peu interdit dans tous les pays. Mais l'utilisation de 13 pesticides organophosphorés mis au point par la suite, est autorisée dans la réglementation européenne actuelle⁶.

Le scénario sur l'apparition des agents V (*Venymous ?*) en Angleterre au début des années 1950 est assez similaire à celui des agents G. Un élément géopolitique nouveau est à prendre en considération : la décennie correspond au développement de la « guerre froide ».

Ranjit Ghosh, un chimiste travaillant pour l'importante firme I.C.I. (Imperial Chemical Industries) étudie des esters d'organophosphates substitués par des aminoéthanethiols, il découvre que ce sont des insecticides extraordinaires. En 1954, I.C.I. commercialise même l'un de ces composés sous le nom de Amiton ou Tetram, il est rapidement retiré du fait de sa toxicité.

L'armée britannique va alors étudier son activité comme neurotoxique de guerre. Il est répertorié sous le code VG. D'autres analogues structuraux dont le VX entrent dans l'évaluation des militaires, ceci correspond à la naissance de la deuxième génération des NOP.

Le gouvernement britannique va vendre la technologie de cette série V au gouvernement américain en échange d'informations sur les armes thermonucléaires. La production en grandes quantités du VX aux Etats-Unis est entreprise en 1961¹.

Des travaux similaires vont être menés en parallèle en U.R.S.S. et poursuivis jusque dans les années 1990. Une troisième génération de NOP venant de ce pays porte le nom de *Novichok* (nouveaux venus), mais n'est pas présentée par manque d'informations véritables⁸.

La communauté internationale est fortement mobilisée depuis longtemps pour interdire l'utilisation des armes chimiques dont l'origine est très ancienne, il faut le préciser. Seulement quelques faits récents sont mentionnés. Le Protocole concernant la prohibition d'emploi à la guerre de gaz asphyxiants, toxiques ou similaires et de moyens bactériologiques (aussi appelé Protocole de Genève) est le premier texte international à interdire l'utilisation des armes chimiques et des armes biologiques. Le Protocole a été ouvert à la signature le 17 juin 1925 lors de la Conférence sur le contrôle du commerce international des

armes et des munitions à Genève, il est entré en vigueur le 8 février 1928.

1993 : La Convention sur l'Interdiction des Armes Chimiques (CIAC) est signée à cette époque par 143 états membres des Nations Unies et ce nombre atteint 181 actuellement (sauf : Corée du nord, Egypte, Syrie, ...).

1997 : La CIAC entre en vigueur

2013 : L'OIAC, organisation des pays signataires qui veille à ce que la convention soit appliquée obtient le prix Nobel de la Paix.

Le résumé présenté n'a pas la prétention de constituer un travail historique approfondi, il souhaite simplement situer dans les grandes lignes comment est apparu ce domaine des neurotoxiques organophosphorés dont le développement recouvre bizarrement des armes chimiques de guerre et une famille d'insecticides.

Le domaine chimique des NOP

A - Structures

L'architecture des molécules organophosphorées neurotoxiques peut être rassemblée sous une formule générale construite autour d'un atome de phosphore (Figure 13) :

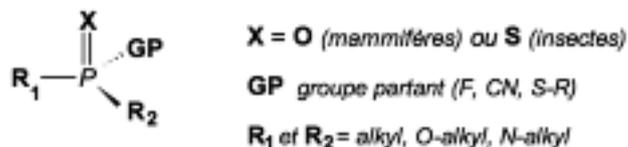


Fig. 13. Formule générale des NOP

La toxicité apparaît sélective sur les mammifères avec $X = O$ et sur les insectes avec $X = S$.

Le groupe partant dont la signification est précisée dans le mode d'action, correspond à la coupure de la liaison P-GP, le doublet de celle-ci migre sur GP. L'activité des NOP est liée au rôle clé de GP. Les substituants R_1 et R_2 sont constitués par des chaînes courtes totalement hydrocarbonées liées directement au phosphore ou par l'intermédiaire d'un oxygène ou d'un azote.

Les principales structures connues dans le cas des neurotoxiques de guerre entrent dans cette définition structurale, comme cela apparaît dans les formules topologiques présentées Figure 14, les atomes de carbone et d'hydrogène ne sont pas mentionnés, les liaisons sont constituées par des traits. Cette liste n'est pas exhaustive.

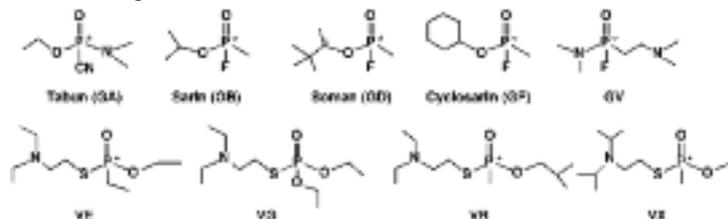


Fig. 14.- Formules topologiques des agents G et V. Les centres chiraux sont notés* (configurations absolues non représentées).

Sans entrer dans une longue discussion, quelques caractéristiques structurales émergent. Dans la série G, le Tabun fait exception par son groupe partant (CN) comparé aux autres (F). Le Soman et le Cyclosarin contiennent sept atomes de carbone. La série V est homogène avec un groupe partant S-éthylamino, par ailleurs les variations structurales sont faibles, enfin le VX (russe) et le VX (anglais) sont des isomères très hydrocarbonés avec onze atomes de carbone.

B – Propriétés physico-chimiques

Quelques-unes des propriétés du sarin, le plus connu des NOP, sont rassemblées dans le tableau 1 à titre d'exemple¹. La configuration absolue des deux structures énantiomorphes est représentée, cette notion de stéréochimie vaut pour tous les organophosphorés présentant quatre substituants différents sur le P. A noter que le Soman possède aussi un C asymétrique, il existe quatre diastéréoisomères dans ce cas.

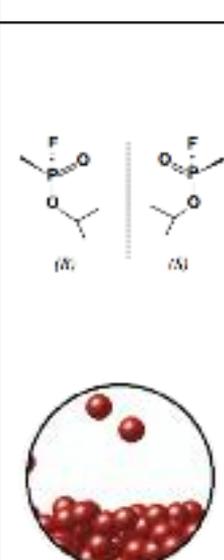
Le Sarin est indiscutablement un liquide dans les conditions habituelles (T°, Pression), le terme gaz utilisé couramment ne s'applique donc pas vraiment, mais en réalité les moyens utilisés pour le propager (obus, bombe, missile...) font que lors de la diffusion du toxique il y a création d'un aérosol, encore plus efficace qu'un gaz si on s'arrête sur l'aspect « technique destructrice » : dépôt sur la peau, imprégnation des vêtements ...

Les doses létales ou DL₅₀ (oral, rat), causant la mort de 50% d'une population animale donnée, sont mentionnées à titre indicatif et comparées à deux cyanures (10 fois moins toxiques). Les caractéristiques de toxicité s'appuient en fait sur beaucoup plus de données mises au point notamment par les spécialistes militaires.

Le sarin est considéré comme peu persistant répandu sur une cible, par opposition à tous les agents de la série V qui sont des huiles à hauts points d'ébullitions extrêmement persistantes.

Les différences de propriétés générales comme toxiques de guerre pour les deux séries sont résumées dans le tableau 2⁵.

Tableau 1 : Propriétés du sarin

 <p>Le Sarin est peu persistant</p>	Nom IUPAC	(R,S)-O-isopropylméthylphosphonofluoridate
	Famille chimique	Composés : organophosphorés fluorés
	N° CAS	107- 44 - 8
	Apparence	Liquide incolore à brun-jaune, inodore
	Formule brute	C ₄ H ₁₀ FO ₂ P
	Masse molaire	140,0932 g/mol
	Propriétés physiques	T° fusion : - 57 °C T° ébullition : 147 °C Solubilité dans l'eau : complète Masse volumique : 1,0887 (liquide, 25°C) Pression de vapeur saturante : 1,973 mbar (20°C)
	Toxicologie : DL ₅₀ (rat, oral) Sarin (KCN ; NaCN)	0,55 mg/kg (7,48 mg/kg ; 5,00 mg/kg)
Découverte	Gerhard Schrader, Ambrose, Rüdiger, Van der Linde (1937)	



Tenue militaire dans une zone à risque

Tableau 2 : Comparaison G/V

Propriétés	Agents G	Agents V
Volatilité	+++	+
Persistance	+	+++
Pénétration respiratoire	+++	++
Pénétration cutanée	+	+++
Moyens de dispersion	aérosols	aérosols

+ peu ++ moyen +++ fort

Les différences assez marquées qui apparaissent sont liées aux propriétés de volatilité (G : pénétration respiratoire) ou aux squelettes fortement hydrocarbonés (V : persistance et pénétration cutanée).

C – Synthèses

Beaucoup d'informations sont accessibles sur internet concernant les synthèses des principaux NOP, notamment dans les versions anglaises des articles. Un certain niveau de connaissances en chimie est nécessaire, les risques au cours des différentes opérations apparaissent importants pour les expérimentateurs sauf s'ils disposent d'équipements spécifiques, de laboratoires ou usines de sécurité maximale.

La méthode utilisée au camp de concentration de Dyhernfurth¹ (Pologne actuelle) de 1942 à 1945 qui est seule présentée ici a conduit à préparer pour la première fois à grande échelle au moins 12000 tonnes de Tabun. Les malheureux opérateurs mis d'autorité à cette tâche ou à celle du remplissage des obus ou des bombes effectué sur le même site étaient très exposés malgré des tenues isolantes à base de caoutchouc synthétique de première génération.

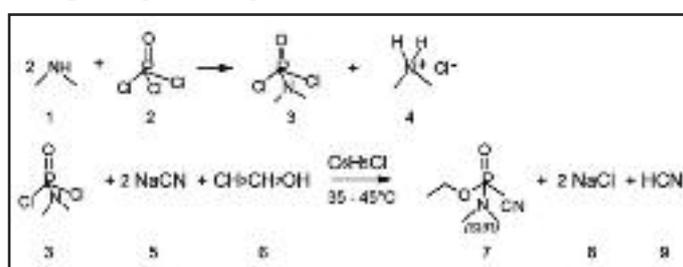


Fig. 15.- Schéma de préparation du Tabun

Le mode opératoire précis n'est pas discuté. Quelques remarques peuvent être faites : les composés 1 et 2 sont courants, 3 est distillé sous vide dans la phase de purification. La deuxième étape, en fait scindée en deux sous-étapes, utilise le chlorobenzène comme solvant. Lors de l'obtention du Tabun 7, il y a formation d'acide cyanhydrique 9, gaz violemment toxique.

Les synthèses pour les autres agents G ou V sont plus complexes mais ne comportent cependant que quelques étapes. Le nombre d'analogues structuraux envisageables par les procédés décrits est considérable.

Mécanisme d'action sur l'AcHe

L'acétylcholinestérase est une protéine à fonction enzymatique appartenant à la classe 3 des hydrolases.

C'est un biopolymère constitué à partir des 20 acides aminés (S) (notés a.a.) qui sont liés par des fonctions peptidiques -C(O)-N(H)- de stéréochimie trans (Figure 16). L'enchaînement des a.a. donne la séquence primaire de l'édifice construit depuis l'ADN *via* les ARN et le ribosome, le repliement s'effectue ensuite avec une extraordinaire précision.

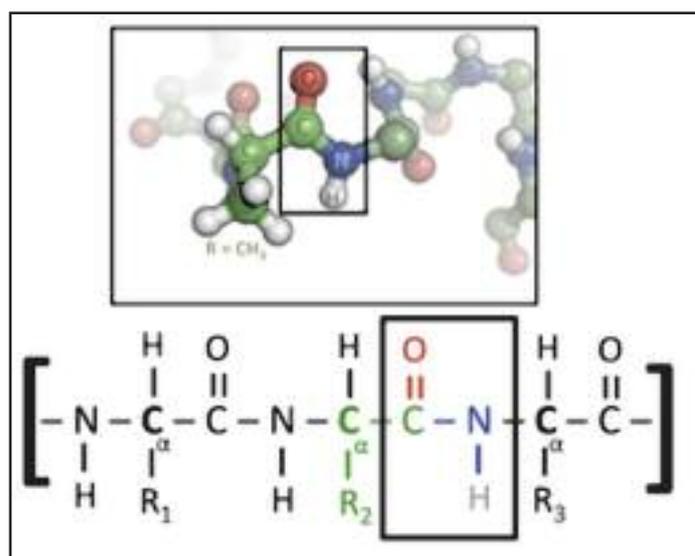


Fig. 16.- Liaisons peptidiques dans une protéine

L'organisation spatiale des atomes dans les protéines (structure tertiaire) est déterminée par cristallographie aux rayons X depuis plus d'un demi-siècle^{3,9}. Cette investigation par une technique de diffraction sur des cristaux connaît une grande activité avec l'utilisation actuelle du rayonnement synchrotron des accélérateurs de particules dont l'exemple type est l'E.S.R.F. de Grenoble.

Historiquement c'est TcAChE du poisson torpille (*Torpedo californica*), riche en cet enzyme, qui a été résolue en premier (Figure 17, droite) puis est venue l'AChE humaine qui donne un assemblage globulaire du même type avec de grandes analogies (Figure 17, gauche).

Le repliement moléculaire délimite une gorge au fond de laquelle (Figure 17, en rouge) se situe la triade catalytique :

Ser-His-Glu qui participe à la coupure hydrolytique de l'acétylcholine (Figure 18). C'est le OH du bras (c) (Figure 9) de la sérine qui joue un rôle déterminant dans le mécanisme, on parle d'une enzyme à «sérine active». His447 et Glu334 participent au mécanisme par une assistance dans le déplacement des charges. On retrouve ce superbe «design» moléculaire dans beaucoup des enzymes dont la fonction est d'assurer une coupure du substrat par hydrolyse.

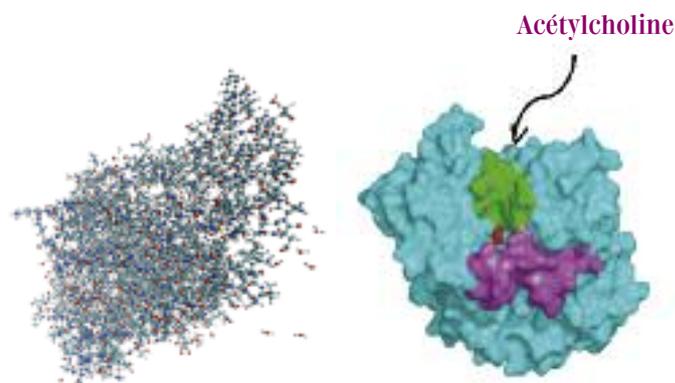


Fig. 17.- Représentations de la structure globulaire d'après les RX⁴. gauche : les 543 résidus a. a. en coordonnées atomiques de hAChE droite : surface graphique de la protéine avec vue plongeante sur la gorge pour TcAChE (profondeur : 2 nm, diamètre : 0,5 nm) jusqu'au site catalytique en rouge.

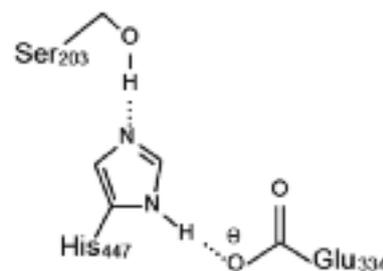


Fig. 18.- Triade catalytique avec les numéros des a.a. impliqués

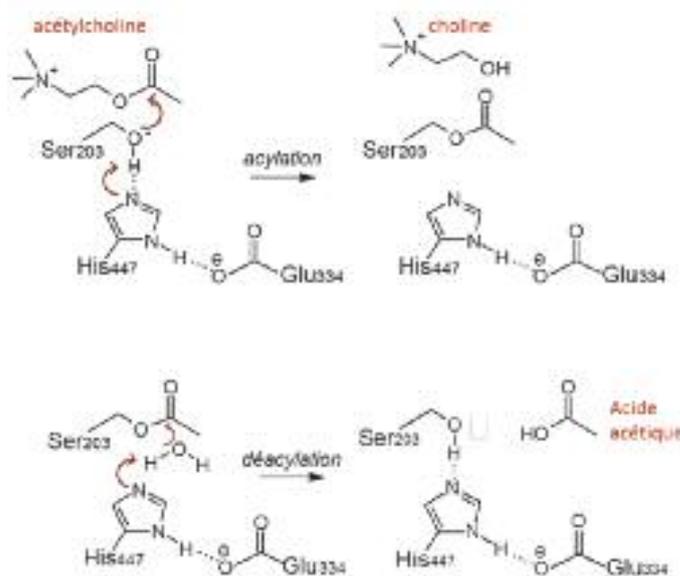


Fig. 19.- Cycle catalytique non détaillé de l'hydrolyse de l'acétylcholine

Les recherches sur le mécanisme de fonctionnement de l'ACHé ont pris une dimension considérable qui se trouve amplifiée par les possibilités actuelles de modélisation «*in silico*»⁴. Celui-ci peut être résumé ainsi :

- la première étape est la formation du complexe entre l'enzyme et le substrat,
- puis un ajustement conformationnel a lieu après la fixation du substrat mais avant la catalyse,
- enfin, les deux étapes de la catalyse se produisent : formation du complexe acyl-enzyme et déacylation de ce complexe (Figure 19).

Le bilan global de la réaction enzymatique est en fait la consommation d'une molécule d'eau pour hydrolyser la fonction ester.

L'acétylcholinestérase est une protéine qui possède une activité catalytique extraordinaire, elle peut dégrader jusqu'à 25000 molécules d'acétylcholine/seconde. Cette efficacité est étroitement corrélée à sa fonction ubiquitaire dans l'influx nerveux telle qu'elle apparaît dans le premier chapitre, mais cela peut être analysé aussi comme une étape à risques potentiels dans ce système prodigieusement élaboré.

La présence d'un neurotoxique organophosphoré introduit par différentes voies et véhiculé par le flux sanguin génère une compétition NOP – acétylcholine pour l'occupation du site catalytique Sérine₍₂₀₃₎-Histidine₍₄₄₇₎-Glutamine₍₃₃₄₎ dans la gorge de l'enzyme, un grand nombre de preuves expérimentales attestent ce fait. La Sérine 203 joue son rôle de réactif nucléophile vis-à-vis du substrat qui se présente, mais la structure de l'organophosphoré avec un groupe partant (F⁻ sur la figure 20) va favoriser la création d'un composé stable cette fois-ci, fixé sur le «bras» enzymatique et entraîner une inhibition irréversible du site, donc de l'enzyme.



Fig. 20.- Exemple : mécanisme chimique de l'inhibition de l'ACHé par le (S)-Sarin

La conséquence est une accumulation de l'acétylcholine dans la fente synaptique. L'activation non interrompue à tous les niveaux du message nerveux, entraîne immédiatement des troubles graves².

Dans les secondes ou les heures qui suivent l'exposition au Sarin par exemple, à de faibles doses, les symptômes apparaissent : nez qui coule, yeux larmoyants, petites pupilles ou micropupilles, douleurs aux yeux, vision brouillée, bave ou sudation excessive, toux, serrement de poitrine, respiration rapide, diarrhée, miction accrue, confusion, somnolence, faiblesse, maux de tête, nausées, vomissements, et/ou douleurs abdominales, fréquence cardiaque lente ou rapide, tension basse ou élevée.

Même une petite goutte de sarin sur la peau peut causer la sudation et des secousses musculaires aux endroits où le Sarin est entré en contact avec la peau. Dans le cas du VR ou du VX très lipophiles leur migration est facilitée à travers la peau (couche cornée), la même situation entraîne la mort, avec le facteur supplémentaire que leur toxicité est 200 fois supérieure au Sarin⁵.

Une exposition à de larges doses au Sarin (et des autres NOP), quelle que soit la voie, peut causer les effets suivants : perte de conscience, convulsions, paralysie, défaillance respiratoire pouvant entraîner la mort.

Conclusion

Cet article s'est proposé de mettre en évidence les propriétés principales qui font des NOP des armes de guerre chimiques, on peut les résumer ainsi :

- ces molécules présentent un encombrement dans l'espace, un mimétisme de forme et une flexibilité proches du substrat normal acétylcholine qui est un neurotransmetteur essentiel de l'influx nerveux,
- leur réactivité chimique est importante avec une fixation forte du phosphore sur le résidu Sérine₂₀₃ et inhibition irréversible de l'enzyme Acétylcholinestérase (3.1.1.7),
- leurs propriétés physiques en font des liquides dispersibles dans les conditions d'utilisations,
- leur lipophilie liée au squelette hydrocarboné autorise une migration dans les phases lipidiques et notamment le VX(VR) : C₁₁H₂₆NO₂PS,
- enfin, leur préparation ne nécessite que quelques étapes mais dans des conditions exigeant une sécurité absolue pour les opérateurs, à partir de composés phosphorés déjà bien définis.

Beaucoup des pays à culture chimique avancée¹⁰ connaissent l'ensemble des technologies liées à l'obtention et l'utilisation de ces neurotoxiques et les chercheurs s'efforcent donc de trouver des antidotes puissants...

Éléments bibliographiques

- 1 - Wikipedia
- 2 - à propos du sarin <http://emergency.cdc.gov>
- 3 - Benoît Sanson. Thèse de doctorat (12/10/2009). Université Joseph Fourier, Grenoble I. Dynamique structurale de l'acétylcholinestérase étudiée par cristallographie aux rayons X et par une autre méthode spectroscopique complémentaire.
- 4 - Ophélie Kwasnieski. Thèse de doctorat (17/12/2010). Université Pierre et Marie Curie, Paris. Etude théorique de la réactivation de l'ACHé inhibée par le Tabun.
- 5 - Marielle Wanhammer. Thèse de doctorat (16/02/2012). Université de Strasbourg. Etude structurale de l'inhibition des cholinestérases par les neurotoxiques organophosphorés. Stratégie de réactivation.
- 6 - Règlement Union Européenne N°656/2011 de la commission du 7 juillet 2011. Pesticides : définitions et listes des substances actives.
- 7 - Roger Godement. Les origines des armes chimiques. Exposé au Colloque «vers l'abolition des armes chimiques». Paris. 6 janvier 1989. Historique remarquable présenté par un mathématicien.
- 8 - Armand Lattes, Société Chimique de France. Dossier SCF. The risk of chemical and biological terrorism : discussing chemical disarmament in relation with the risk.
- 9 - 2014 est l'«Année Internationale de la Cristallographie».
- 10 - Un long entretien, peu remarqué, mais très intéressant, avec un chercheur militaire Français retraité, ayant travaillé durant toute sa carrière sur les NOP a été publié récemment. *Nouvel Observateur*, 30/10/2013.



PAR JEAN CHANDEZON

1. De la comparaison à la mesure

Pour pouvoir faire un choix parmi les choses concrètes de la vie on est amené à faire des comparaisons entre les objets du choix. Si deux objets de même nature sont côte à côte il est très facile de savoir lequel est le plus grand ou le plus petit. Cela permet, par exemple, à un gourmand de choisir la plus grosse part de tarte. Si ces objets sont séparés dans l'espace ou dans le temps la comparaison directe devient impossible il faut comparer les deux objets avec un troisième objet, servant d'étalon dont on doit disposer facilement. Pour pouvoir vivre en société il est souhaitable, pour éviter les conflits, que les comparaisons entre les objets donnent les mêmes résultats quels que soient les objets et les personnes concernées. On est donc conduit à définir des étalons communs au plus grand nombre, voire, c'est l'utopie, à l'humanité toute entière. C'est cette quête de mesures universelles qui a conduit à la création d'une branche extrêmement importante de la physique appelée métrologie.

Au fil du temps on est arrivé à bâtir un système d'étalons universels. A partir de ces étalons on a construit le système universel d'unités, appelé Système International d'unités ou **SI**, accepté par tous les pays du monde à l'exception des USA, du Libéria et de la Birmanie. A ce système d'unités se sont ajoutées des normes pour les objets qui nous entourent de façon par exemple à ce que tous les pas de vis aient les mêmes caractéristiques ce qui permet de remplacer un boulon par un autre sans aucun problème.

2. Le système métrique

Qui dit mesure, dit unité de référence permettant la mesure. Dans un passé pas si lointain, coexistaient de nombreuses unités qui n'avaient souvent que peu de rapports les unes avec les autres. Il a fallu attendre la Révolution française pour qu'un premier système cohérent d'unités voie le jour : le système métrique. Ce système fût consacré sur le plan international par la Convention du mètre du 20 mai 1875, qui est un traité diplomatique.

La première rationalisation des unités de mesure fut l'adoption par les révolutionnaires du système décimal. Après avoir, le 14 Thermidor an I (1^{er} août 1793), promulgué une loi sur l'adoption du système métrique l'Assemblée Nationale fixe la nomenclature actuelle des unités de mesure de surface, de capacité et de poids le 18 germinal an III (7 avril 1795) :

« On appellera : **Mètre**, la mesure de longueur égale à la dix-millionième partie de l'arc du méridien terrestre compris entre le pôle boréal et l'équateur.

Are, la mesure de superficie, pour les terrains, égale à un carré de dix mètres de côté. **Stère** la mesure destinée particulièrement aux bois de chauffage, et qui sera égale au mètre cube.

Litre, la mesure de capacité, tant pour les liquides que pour les matières sèches, dont la contenance sera celle du cube de la dixième partie du mètre.

Gramme, le poids absolu d'un volume d'eau pure égal au cube de la centième partie du mètre, et à la température de la glace fondante.

Enfin, l'unité des monnaies prendra le nom de franc, pour remplacer celui de livre usité jusqu'aujourd'hui.

Au lieu des tables des rapports entre les anciennes et les nouvelles mesures, qui avaient été ordonnées par le décret du 8 mai 1790, il sera fait des échelles graphiques pour estimer ces rapports sans avoir besoin d'aucun calcul. L'agence est chargée de leur donner la forme la plus avantageuse, d'en indiquer la méthode, et de la répandre autant qu'il sera nécessaire.»

3. Le système international et les unités fondamentales

C'est en 1960, lors de la onzième Conférence générale des poids et mesures (CGPM), qu'apparaît le Système International d'unités, qui, dans toutes les langues est noté SI, il est inspiré du système métrique. Excepté pour la mesure du temps, il s'agit d'un système décimal (on passe d'une unité à ses multiples ou sous-multiples à l'aide de puissances de 10). C'est la Conférence Générale des Poids et Mesures, rassemblant les délégués des États membres de la Convention du Mètre qui, tous les quatre ans à Paris, décide de son évolution. Le Système SI est fondé sur un choix de sept unités de base ou unités fondamentales bien définies qui sont, par convention, considérées comme indépendantes du point de vue dimensionnel : le mètre, le kilogramme, la seconde, l'ampère, le kelvin, la mole et la candela. Les étalons des unités fondamentales se trouvent au pavillon de Breteuil à Sèvres. Les noms et les symboles des unités fondamentales sont rassemblés dans le tableau 1.

Tableau 1 : les unités fondamentales

mètre (m)	Longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1/299 792 458 de seconde.
kilogramme (kg)	Masse du prototype en platine iridié qui a été sanctionné par la Conférence générale des poids et mesures tenue à Paris en 1889 et qui est déposé au Bureau International des Poids et Mesures.
seconde (s)	Durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133.
ampère (A)	Intensité d'un courant électrique constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance de un mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force de 2.10^{-7} newton par mètre de longueur.
kelvin (K)	Le kelvin est la fraction 1/273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau.
candela (cd)	La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540.10^{12} hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est 1/683 watt par stéradian.
mole (mol)	La mole est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kilogramme de carbone 12.

Les unités dérivées (incluses les unités sans dimension)

A partir des unités fondamentales on définit des unités dérivées qui sont formées à partir des unités de base d'après les relations algébriques qui lient entre elles les grandeurs correspondantes. Les unités dérivées sont nombreuses et viennent compléter les unités de base. Elles peuvent avoir des noms spéciaux (hertz, ohm, tesla, pascal, becquerel, ...) mais peuvent toujours être exprimées à partir des unités de base. Il existe aussi des unités dérivées sans dimension.

Il est aussi à noter que ces unités sont reliées entre elles pour former un système cohérent d'unités. Enfin, chaque grandeur peut avoir à couvrir une vaste étendue de valeurs. Pour éviter d'avoir à utiliser des facteurs multiplicatifs ou des valeurs avec un grand nombre de zéros, on a recours à des préfixes. Ces derniers permettent, depuis 1991, de couvrir une gamme allant de 10^{24} fois l'unité pour **Yotta** symbole **Y**, à 10^{-24} pour **yocto** symbole **y**.

Les règles orthographiques pour les unités

Les symboles des unités prennent une majuscule lorsque leur nom est dérivé de celui d'un savant (W pour James Watt, C pour Charles Augustin de Coulomb, J pour James Prescott Joule, Hz pour Heinrich Rudolph Hertz, etc.) et n'en prennent pas dans le cas contraire. Pour le litre il y a une exception : on peut utiliser l'abréviation **L** au lieu de **l** afin de pouvoir distinguer entre la lettre l, le chiffre 1 et la lettre i majuscule. D'autre part l'unité de résistance électrique est l'ohm d'après **Georg Simon Ohm**, Physicien allemand dont l'abréviation est la lettre grecque Ω au lieu du caractère latin **O** que l'on pourrait confondre avec 0. Depuis le 14^{ème} congrès du CGPM en 1971 l'unité de conductance, l'inverse de la résistance, est le siemens, abréviation **S** ; l'ancien nom de cette unité qui avait été suggéré par Lord Kelvin (William Thomson) était le **mho** avec pour abréviation la lettre grecque Ω à l'envers.

Les unités en toutes lettres ne prennent pas de majuscule (même si elles dérivent du nom d'un savant), elles portent la marque du pluriel à partir de deux. Par conséquent on écrira par exemple qu'un moteur possède une puissance de 100 watts ou bien 100 W

On écrit donc : 1,4 ampère, 4,2 ampères, 5 ohms, 12 volts, 150 watts et 300 newtons.

4. Le système d'unités pifométriques

La plupart de nos concitoyens n'ont que des notions assez floues de la métrologie, ils n'utilisent le système international que s'ils ne peuvent pas faire autrement c'est-à-dire essentiellement pour des transactions marchandes lorsque le porte-monnaie intervient. Dans la vie de tous les jours ils préfèrent indiscutablement un autre système de mesure beaucoup plus souple et plus humain, possédant une cohérence scientifiquement discutable mais d'une grande efficacité dans la vie courante et dans les discussions de salon : le système pifométrique. Ce système, dans sa version la plus élaborée, est propre à l'espèce humaine, chacun de nous dispose, dès la naissance d'un instrument de mesure universel : le pifomètre, qui est incorporé conjointement aux cinq sens qu'il vient bien à propos compléter. Bien que primordiale dans la vie sociale la pifométrie a été jusque là totalement négligée par les scientifiques orthodoxes des sciences dures. Heureusement, assez récemment, pour compléter la norme ISO 80000 de 2009 qui décrit les unités du Système international et les recommandations pour l'emploi de leurs multiples et de certaines autres unités l'**Union de Normalisation de la Mécanique (UNM)** a publié la norme UNM 00-001 relative au système d'unités pifométriques. J'encourage vivement le lecteur intéressé par ce sujet consulter cette norme (http://contrails.free.fr/article_pifometrie.php).

On peut penser que la pifométrie donne des résultats très

discutables et incertains, c'est pourtant une forme très élaborée du pifomètre qui permet au joueur de tennis de renvoyer la balle de son adversaire. Le pifomètre n'est pas totalement réservé à l'espèce humaine, pour les animaux c'est la seule façon d'apprécier les choses. Un écureuil, par exemple, peut sauter de branche en branche sans jamais tomber grâce à un pifomètre d'une grande précision à ce sujet.

5. Les troubles du pifomètre

Comme la vue ou l'ouïe, le pifomètre peut être l'objet de disfonctionnements qui rendent compliquée la vie en société. Actuellement ces troubles sont complètement négligés par la médecine traditionnelle ce qui, pour les soigner, oblige à avoir recours à des médecines parallèles ou perpendiculaires. On peut penser que, dans l'avenir, les progrès de l'imagerie médicale permettront de localiser très précisément dans le cerveau humain l'emplacement du pifomètre. La mise au point de traitements permettant de soigner efficacement ces troubles de la pifométrie seraient bien utiles pour recalibrer, par exemple, les pifomètres des hommes politiques qui apparaissent actuellement particulièrement dérégés.

6. Quelques éléments de la science pifométrique

Les unités de la pifométrie sont d'un usage universel, il y a toujours une ou plusieurs unités adaptées à tous les moments de la vie. Dans ce qui suit nous donnons quelques exemples illustrant bien la pifométrie. Le lecteur intéressé qui voudrait approfondir sa connaissance du sujet pourra se reporter aux études plus complètes mais toujours pas exhaustives que l'on trouve sur internet.

Les unités pifométriques et le système métrique

Le système pifométrique n'a rien à faire du système décimal car il n'est pas du tout destiné au calcul. On pourra bien utiliser un multiplicateur décimal comme avec la *pincée* où il est possible de spécifier *deux ou trois pincées* mais dix *pincées* n'a pas réellement de sens car personne n'est capable, sans se tromper, de mesurer dix pincées. A plus forte raison 100 *pincées* est complètement hors sujet. Dans la pratique on préfère utiliser un adjectif pifométrique de grandeur comme une *petite pincée* ou une *très grosse pincée*. Cependant la pifométrie utilise parfois de façon assez floue deux préfixes du Système International le micro (10^{-6}) comme dans le micro chouïa et le méga (10^{+6}) comme dans la *méga trotte*. On remarque que les unités pifométriques font en général référence à un instrument de mesure corporel très précis comme le pouce et l'index pour la pincée, les guibolles pour la *trotte*, l'estomac pour la *ventrée*...

Les unités pifométriques fondamentales

Les unités relatives à l'espace

Dans le système international une seule unité suffit pour mesurer les longueurs : le mètre. Dans la vie courante cette seule unité est très insuffisante pour apprécier les distances c'est pourquoi il existe un grand nombre d'unités pifométriques de distance. Parmi celles-ci nous n'en retiendrons que quelques unes : *La trotte*, *la grimpée* et *la grimpette*, *la tirée*.

La pifométrie fait la différence entre les distances horizontales exprimées par exemple en trottées et les distances comportant des montées ou l'on utilise plutôt la *grimpée*, la *sacrée grimpée* étant la limite de ce que l'on peut raisonnablement parcourir. A cela on peut ajouter la *grimpette* qui, a priori est une *petite grimpée*. Cependant il faut être très vigilant dans l'utilisation de cette unité car une bonne petite grimpette est à peu près égale à une *grimpée* alors qu'une bonne petite *grimpée* n'est pas très différente d'une *grimpette*.

Une autre unité, dérivée du mètre étalon est très souvent utilisée : le mètre élastique. On rencontre fréquemment le bord des routes des panneaux indiquant qu'un restaurant se trouve à 300 mètres ce qui indique qu'il est assez proche mais très rarement à 300 mètres plutôt à 500 voire 800 mètres.

L'unité utilisée est un mètre élastique plus grand que le mètre étalon destiné à faire croire au touriste que le restaurant est vraiment très proche. De la même manière lorsque vous demandez votre chemin et qu'après bien des demandes infructueuses vous finissez par trouver quelqu'un qui connaît l'endroit cherché s'il vous donne une distance en mètres cela ne correspond que très rarement à la distance réelle. Si de surcroît il affirme que vous ne pouvez pas vous tromper cela signifie que la distance donnée est complètement fantaisiste et que vous n'avez aucune chance d'atteindre aisément l'endroit cherché.

La mesure des trajets

Pour mesurer un trajet entre deux villes, ce qui sous-entend un temps de parcours, il existe de nombreuses unités parmi lesquelles on peut citer :

La tirée, le pas loin, le à coté, le pétaouchnock...

Dans cet exemple précis la pifométrie est d'un grand secours en effet on parle souvent de distance à vol d'oiseau sans préciser l'oiseau en négligeant la courbure de la terre, la vitesse du vent, la présence de montagnes élevées...

On donne aussi une distance par autoroute, le trajet le plus court en distance, en temps, le trajet le plus économique... La pifométrie est bien plus précise, par exemple, le *à côté* signifie qu'on atteindra la destination dans *pas longtemps* alors que le pétaouchnock indique qu'il vaudrait mieux renoncer au voyage car c'est trop loin et sans intérêt.

Il a bien fallu que la science sérieuse se rende à l'évidence de cette difficulté qu'il y a d'évaluer simplement les distances. Pour cela les scientifiques ont introduit de façon très savante de nouveaux objets géométriques : les fractales.

Les fractales

Prenons comme exemple le trajet entre Saint-Malo et Brest :



Figure 1 La côte de Bretagne

- A vol d'oiseau : 184 km
- Par la route directe 233 km
- En suivant toutes les villes de la cote : 398 km
- A pied en suivant la côte au plus près : 460 km
- En faisant le tour de tous les petits rochers ?

On constate que cette distance dépend énormément de la façon de la mesurer puisque, pour un humain, elle varie entre 184 km et 460 km selon la manière de la mesurer. Si ce n'est pas de la pifométrie cela y ressemble beaucoup. Des réflexions de ce genre, sur la longueur de la côte de Bretagne ont conduit Benoît Mandelbrot à introduire la notion de dimension fractale des objets. Lorsque, dans la science classique on mesure une longueur, la valeur trouvée ne dépend pas du tout de l'étalon utilisé pour la mesure. En fait, si pour mesurer la longueur de la côte de Bretagne vous utilisez un décimètre, un mètre, un centimètre... vous ne trouverez pas du tout le même résultat : plus l'étalon est petit, plus la longueur trouvée est grande.

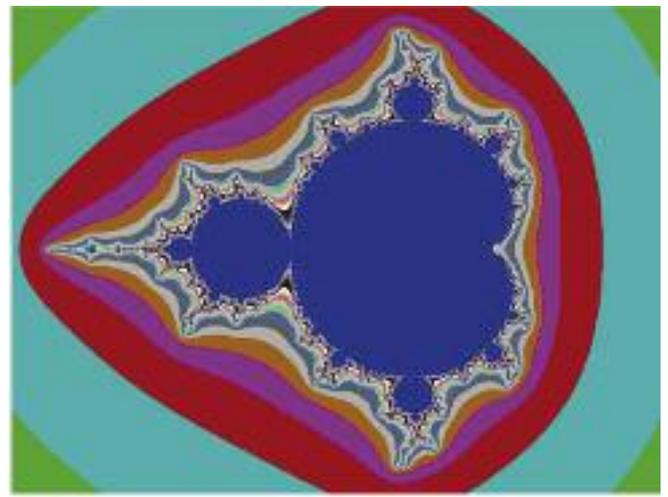


Figure 2 L'ensemble Mandelbrot

On peut considérer les fractales comme le triomphe de la pifométrie qui se garderait bien de donner une valeur numérique pour la distance entre Saint-Malo et Brest en se bornant à dire que cela fait une tirée. Pour une meilleure précision on peut utiliser le mètre élastique : dire alors qu'il y a 250 km entre Saint-Malo et Brest, ce qui est pifométriquement très précis.



Figure 3 L'horloge astronomique de Prague

Les unités de temps

Si la distance est assez floue en unités pifométriques c'est encore pire pour le temps. On utilise des unités qui n'ont aucun rapport avec le temps des physiciens classiques mais plutôt avec celui, à la suite d'Albert Einstein, du physicien relativiste qui considère que le temps est relatif. En pifométrie, ce qui compte, c'est le temps ressenti qui est fonction de l'évaluateur. Les unités pifométriques de temps, ou plutôt de durée, sont différentes pour les petites durées, les moyennes durées et les grandes durées.

Quelques unités : *le tout de suite, l'instant, le pas longtemps, la plombe, le bail, l'éternité...*

Ces unités n'ont pas la même valeur selon que l'on attend ou selon que l'on fait attendre. Si quelqu'un dit « attendez un petit instant » cela signifie qu'en général vous allez attendre pas loin d'une petite plombe.

A ces unités on se doit d'ajouter le *certain temps* introduit par Fernand Raynaud pour définir le temps que met le fût du canon pour se refroidir. Cette unité est universelle car elle peut s'appliquer à tout sans aucun risque d'erreur.

Les unités de masse

La pifométrie ne s'intéresse guère qu'aux masses qu'un humain est capable de porter plus ou moins facilement.

Les unités les plus courantes sont la *plume*, le *max*, la *tonne*. Comme pour le temps cela est relatif selon que l'on porte : cela pèse un *max*, ou que l'on fait porter : cela pèse comme une *plume*. La tonne est réservée à la limite de ce que l'on est capable de porter.

Les unités de température



Figure 4 : froid de canard au lac Chambon

La thermométrie est un domaine dans lequel le ressenti est très important, ce qui conduit à une échelle très largement utilisée : *glacial*, *froid*, *bon*, *tiède*, *chaud*, *bouillant*... La température de type celsius est en général évitée ; c'est pour cela que sur les thermostats des radiateurs électriques ou des fours on trouve souvent une échelle numérique quasi-pifométrique allant de 1 à 6 ce qui ne manque pas de plonger l'utilisateur dans un abîme de perplexité. Les unités pifométriques de température sont le plus souvent réservées aux mesures de froid comme le *froid de chien* ou le *froid de canard*. On utilise parfois la *bérie* qui est une échelle absolue dérivée du froid de six *béries* qui est le froid maximum supportable par un occidental.

Les unités d'électricité



Figure 5 : mesure d'une tension électrique à l'aide pêche

Comme nous ne possédons pas d'un sens permettant des mesures électriques, la pifométrie est assez mal adaptée à ce type de mesures. Cependant il existe une unité pifométrique électrique assez connue : la *pêche*. Bien que cela soit très fortement déconseillé en raison de la dangerosité la *pêche* est utilisée pour mesurer un voltage avec les doigts. Elle est souvent complétée par un préfixe : une *grosse pêche* par exemple. Au début de l'électricité, au 18^{ème} siècle, à l'époque de l'abbé Nollet la *pêche* était la seule unité électrique disponible.

Les unités de luminosité

En pifométrie, plutôt que la luminosité c'est son absence, l'obscurité, qui est mesurée avec le noir : il fait noir *comme dans un four* ou bien, unité assez ancienne il fait noir *comme dans le cul du loup*.

La quantité de matière

Le pifométricien sérieux considère que la matière n'est pas du tout constituée de vide comme le prétendent les physiciens. Pour s'en convaincre il suffit de se taper sur les doigts avec un marteau lorsqu'on enfonce un clou. Une unité équivalente à la mole, étant sans objet, elle n'existe pas en pifométrie.

Les unités pifométriques dérivées

En pifométrie si les unités dérivées existent bien elles ne s'expriment pas du tout en fonction des unités fondamentales. La vitesse, qui s'exprime en mètres par seconde dans le système international, pourra être évaluée avec la *manette* : plein pot les *manettes*, la *pompe* : à toute *pompe*, ou avec le *berzingue* : à toute *berzingue*. Jamais on n'utilisera une unité dérivée comme la *grimpette* par *plombe*.

Pour mettre en évidence la stupidité des unités dérivées il y a une expérience facile à faire. Lors d'un contrôle de vitesse, lorsque qu'un officier de police vous annonce que vous faisiez du 110 km à l'heure au lieu des 90 km/h autorisés vous pouvez lui répliquer que c'est totalement impossible puisque vous n'êtes parti que depuis dix minutes !

Les unités de capacité

Ces unités abondamment utilisées en cuisine sont en général associées à des denrées alimentaires ou des boissons : la *souppçon*, la *pincée*, la *noix*, la *lichette*, la *poignée*, la *cuiller*, la *louche*...

Celles relatives aux quantités consommées : la *gorgée*, le *verre*, la *giclée*, la *ventrée*...

L'unité générique du *verre* est utilisée, dans leur grande sagesse, par les pouvoirs publics pour mesurer l'alcoolisation des automobilistes : pas plus de deux *verres*. Cela permet d'interpréter avec beaucoup de souplesse la taille du verre ce qui fait qu'on n'a jamais bu plus de deux *verres*. Pour contrer ce laxisme certaines personnes fixent la taille du verre à 12,5 cl mais qui connaît la taille du centilitre ? Centilitre fréquemment confondu avec le centimètre cube. On trouve également des consommateurs qui s'alcoolisent au mètre en buvant, par exemple, un mètre de bière.

Les unités monétaires

Ces unités sont très nombreuses, on en trouve d'adaptées à chaque situation : la *clopinette*, le *fiifrelin*, le *rien*, le *pas cher*, le *bézet*, la *peau des fesses*, le *max*...

Les quantités monétaires dépendent en général de celui qui les évalue : celui qui paye ou celui qui reçoit. Une petite robe qui a coûté trois fois *rien* peut s'avérer coûter la *peau des fesses* pour celui qui paye.

La mesure de la bêtise

Habituellement on mesure, très difficilement, l'intelligence avec le QI (coefficient d'intelligence). Le QI de 100 est le QI moyen ce qui signifie qu'une partie de nos contemporains ont un QI inférieur à 100. Cependant si vous faites des recherches autour de vous, vous aurez un mal fou à trouver quelqu'un qui possède un QI inférieur à 100. Cela montre que dans le cas du QI il ne faut surtout pas confondre la médiane et la moyenne. Si le QI de cent était la médiane il y aurait la moitié de la population avec un QI inférieur à 100 alors que de toute évidence ce n'est pas le cas. On peut penser que la médiane serait plutôt vers 120. La pifométrie, elle, s'intéresse plutôt à la bêtise dont l'unité principale est la *couche*. Les préfixes sont ici très importants comme, par exemple dans l'expression machin en a une de ces *couches* ou truc en a une *bonne couche* ou une *sacrée couche*. Au lieu de la *couche* on utilise parfois la *dose* qui à vue de nez est *kif-kif* à la *couche*.

La pifométrie et l'infini

Les notions d'infini, infiniment grand et infiniment petit, sont primordiales en physique. La pifométrie ne s'intéresse pas à la notion controversée d'infini mais uniquement à ce qui est très grand qui sera qualifié de *vachement* ou de *méga* en postulant que ce qui est plus grand que *méga* ne mérite pas d'être considéré par un pifométricien sérieux.

Ce qui est très petit est assez bien appréhendé par la *chouïa* mais, dans ce cas là, il faut se méfier des préfixes car un petit *chouïa* est plutôt plus grand que le chouïa lui-même alors que le *pico-chouïa* est vraiment ce que l'on peut concevoir de plus petit à peine différent de zéro. Pour la pifométrie scientifique on préfère souvent le *pouïème* au *chouïa*.

L'hyper-pifométrie

La pifométrie permet de concevoir des instruments de mesure au-delà de la perfection. Un exemple bien connu des apprentis maçon est l'hyper-équerre qui étant plus d'équerre que l'équerre classique permet d'obtenir deux murs d'équerre même si l'on s'est un peu trompé en faisant la mesure. A cela on peut ajouter l'hyper-centre des urbanistes qui, dans une métropole, est encore plus central que le centre ville. Cet hyper-centre est situé dans un hyper espace car, jamais sur un plan ou sur un panneau indicateur on ne voit inscrit : hyper-centre.

On peut sourire de l'hyper-équerre, cependant il existe des méthodes de calcul très sérieuses qui conduisent à des résultats exacts même si l'on se trompe parfois dans les calculs. Une telle méthode, plus qu'exacte, peut être illustrée par la méthode itérative de Newton appliquée au calcul des racines carrées. Soit x le nombre dont recherche la racine carrée, on construit la suite numérique suivante :

$$u_{n+1} = (u_n + x/u_n)/2$$

On choisit comme valeur de départ $u_0 = x$ on réitère le calcul et l'on se rend compte que u_n tend vers la racine cherchée. Dans le cas de $x=3$ on obtient pour les premiers termes :

$$u_0 = 3, u_1 = 2, u_2 = 1.75, u_3 = 1.73214285714,$$

$$u_4 = 1.73205081001, u_5 = 1.73205080757$$

La dernière valeur est le résultat cherché. On constate que si l'on se trompe un peu dans les calculs on finit quand même par obtenir le résultat cherché ce qui me fait dire que la méthode de Newton est une méthode de calcul plus qu'exacte. La méthode itérative tolère les erreurs ce qui est le rêve de tous les collégiens : donner un résultat exact même si on se trompe.

Cet algorithme s'appelle **méthode de Héron** ou méthode babylonienne car il semble que ce soit celle utilisée par les babyloniens pour trouver des valeurs approchées de racines carrées.

L'arithmétique et le calcul pifométrique



Figure 6 : la conception du Picon-Curaçao

Si pour le mathématicien l'arithmétique est le royaume de la rigueur il n'en va pas de même pour le pifométricien. Un exemple célèbre est celui de la recette du Picon-Curaçao-Citron dans la pièce de Marcel Pagnol : César dont voilà la description de la recette :

CÉSAR Tu mets d'abord un tiers de curaçao. Fais attention : un tout petit tiers. Bon. Maintenant, un tiers de citron. Un peu plus gros. Bon. Ensuite, un BON tiers de Picon. Regarde la couleur. Regarde comme c'est joli. Et à la fin, un GRAND tiers d'eau. Voilà.

MARIUS Et ça fait quatre tiers.

CÉSAR Exactement. J'espère que cette fois, tu as compris.

MARIUS Dans un verre, il n'y a que trois tiers.

CÉSAR Mais, imbécile, ça dépend de la grosseur des tiers !

MARIUS Eh non, ça ne dépend pas. Même dans un arrosoir, on ne peut mettre que trois tiers.

CÉSAR Alors, explique moi comment j'en ai mis quatre dans ce verre.

MARIUS Ça, c'est de l'arithmétique.

A première vue c'est Marius qui a raison mais le bon sens est du côté de César. En effet dans un grand verre à bière on peut, sans problème, mettre un grand nombre de tiers de verres à liqueur. Ca dépend bien, comme le fait remarquer César, de la grosseur des tiers !

Conversion des unités SI en unités pifométriques

Comme, dans le monde moderne les instruments de mesure sont toujours en SI, il convient d'avoir des moyens de transformer le système SI en système pifométrique. Pour faire cela on dispose d'un grand nombre de transformateurs adaptés à tous les cas de figure : *au pif*, *à vue de nez*, *à la louche*, *à un poil près*, *à un cheval près*.

La transformation inverse permettant de passer d'une évaluation pifométrique à une évaluation rigoureuse utilise le terme générique *pile-poil*.

Les unités pifométriques qui ont réussi

Certaines unités qui, au départ, étaient pifométriques sont encore largement utilisées de nos jours dans les pays anglo-saxons sous une forme normalisée rigoureuse comme c'est le cas pour le pouce ou le pied. En aviation on mesure toujours les altitudes et les niveaux de vol en pieds.

Le carat, unité bien connue des acheteurs de diamants possède initialement une définition analogue à l'unité pifométrique du pouïème qui qualifie quelque chose qui est de la taille d'un pou.

Le caroubier est un **arbre dioïque** de la famille des **fabacées**, originaire des régions **méditerranéennes**, il est cultivée pour son



Figure 7 : les graines du caroubier

7. Conclusion

J'espère que ce modeste article contribuera à faire prendre conscience aux membres de l'Adasta en particulier et aux très nombreux lecteurs de la revue en général de l'importance de la pifométrie et de la nécessité de poursuivre assidûment des travaux dans ce domaine. Je souhaite, comme le disait Pierre Dac, que dans un futur d'autant moins lointain qu'il sera plus proche, les autorités internationales organisent la création d'une Conférence Générale Internationale de la Pifométrie (CGIP) pour mettre un peu plus d'ordre, ou de désordre, dans les unités pifométriques. Cette conférence devra mettre au point le système Pifométrique International (PI) qui deviendra alors accessible à tous et en particulier à nos hommes politiques qui pourront ainsi développer avec une grande rigueur pifométrique leurs inévitables promesses électorales. C'est dans cet état d'esprit que l'Adasta envisage d'organiser une journée internationale sur la pifométrie, journée à laquelle vous ne manquerez certainement pas de participer et d'apporter votre contribution.



VISITE DU CERN À GENÈVE AU SEIN DU MONDE VIVANT DES 10 ET 11 DÉCEMBRE 2013

(À L'INITIATIVE DE LA SFEN AUVERGNE, ORGANISATION ADASTA - SFEN)

PIERRE ROULLEAU

vice président de SFEN AUVERGNE

PRÉAMBULE

La nuit est déjà tombée quand le bus en provenance de Clermont atteint les faubourgs de GENÈVE à la recherche de notre hôtel. Certains d'entre nous se sont assoupis, d'autres lisent ou commentent le programme de ces deux jours de visite prévus au CERN. Tous étaient à l'heure au rendez-vous et c'est dans une ambiance très sympathique mais surtout très enrichissante et instructive que s'est déroulé le voyage. En effet, afin de préparer les neurones de certains d'entre nous, peu rompus aux arcanes des mystères de la science et notamment du nucléaire, il n'était pas superflu qu'une petite «révision» nous soit prodiguée. Evidemment, comme à son habitude et qu'il en soit déjà remercié, c'est Michel, notre guide «touristico - scientifique» qui s'y colle.

Infatigable, il nous fait réviser nos cours (si loin déjà), et pendant 3 h, nous ramène dans l'ambiance des bancs de la fac. Tout y passe : les différentes disciplines scientifiques, qui, entre découvertes et inventions, ont généré nos connaissances actuelles ; le voyage dans le temps, du Big Bang à la découverte du boson dont les théoriciens R. Brout, F. Englert et P. Higgs (2 prix Nobel de Physique 2013 ; R. Brout étant décédé en 2011) avaient postulé l'existence depuis 50 ans déjà, de l'infiniment grand à l'infiniment petit, sans oublier le rappel «obligé» concernant les unités. Ces unités qui servent à tout mesurer : les longueurs, les puissances, la lumière ...et les masses, soit entre autres, les mètres, les watts, les candelas et les fameux kilos-kilos que Michel trouve avec raison d'une cohérence pour le moins discutable et qui le chagrinent un peu. A l'unanimité, et avec humour, le «comité scientifique restreint» du bus s'accorde pour envisager de rebaptiser cette unité de masse «kilo» en une unité qu'on appellerait dorénavant : le «MAS-SAUX».

Michel, merci encore de nous faire partager ton érudition, ton sens de l'autodérision et ton humour qui sont un bonheur pour nous tous.



Michel Massaux. L'animateur intarissable

Le CERN en quelques mots !

C'est «l'organisation européenne pour la recherche nucléaire» un des plus prestigieux laboratoires scientifiques et le plus grand laboratoire de physique des particules au monde. Il a pour vocation la physique fondamentale, la découverte des constituants et des lois de l'Univers. Une représentation du CERN... sous la frontière.

Fondé en 1954, le CERN est situé de part et d'autre de la frontière franco-suisse, près de Genève. Il a été l'une des premières organisations à l'échelle européenne. Il compte aujourd'hui vingt États membres et emploie environ 2500 permanents : scientifiques, ingénieurs et techniciens. La moitié des physiciens des particules du monde, soit 10000 personnes, participent aux recherches du CERN. Le CERN collabore avec plus de 600 universités représentant environ 110 nationalités.

Il utilise des instruments scientifiques très complexes pour sonder les constituants ultimes de la matière : les particules fondamentales. En étudiant ce qui se passe lorsque ces particules entrent en collision, les physiciens appréhendent les lois de la Nature.

Ces instruments qu'utilise le CERN sont des accélérateurs et des détecteurs de particules. Les accélérateurs conduisent des faisceaux de particules à des énergies élevées pour les faire entrer en collision entre eux ou avec des cibles fixes. Les détecteurs, eux, observent et enregistrent le résultat de ces collisions. Le CERN abrite le plus grand et le plus puissant des accélérateurs de particules au monde : le LHC (Large Hadrons Collider).

Ajoutons une information importante qui précise le champ de recherche du CERN : l'organisation s'abstient de toute activité à des fins militaires et les résultats de ses travaux théoriques et expérimentaux sont largement publiés au sein de la communauté scientifique mondiale.

Le LHC ou : le grand collisionneur de hadrons.

La visite d'un tel instrument scientifique ne se fait pas sans une certaine préparation des esprits afin de faciliter la compréhension des phénomènes étudiés et des technologies employées.

Le soir même de notre arrivée, après un repas sympathique, nous sommes conviés à une conférence animée par François VAZEILLE qui pendant plus d'une heure et demie, nous a présenté les différents objectifs de recherche et les nombreuses disciplines impliquées dans le fonctionnement du LHC. Les esprits sont un peu fatigués à cette heure tardive, mais l'intérêt du sujet et la clarté de l'exposé ont tenu tous les participants en haleine jusqu'au bout... malgré la pénombre de la salle et... la digestion.

Merci encore à François VAZEILLE, directeur de recherche émérite au **laboratoire de physique des particules**, qui avec son équipe, au sein d'une collaboration internationale, œuvra en vue de la conception, de la réalisation et de l'exploitation du détecteur **ATLAS**, le plus grand détecteur de particules jamais construit à ce jour et aujourd'hui en charge des développements de ce laboratoire concernant les modifications à apporter au détecteur ATLAS, à l'horizon 2022 dans le cadre du projet super LHC. Il fut pour beaucoup dans la planification de cette passionnante visite du **CERN** à GENEVE, nous facilitant grandement les contacts et l'organisation.



François Vazeille

VOYAGE... au centre de la terre ...ou presque

LE LHC, est installé dans un tunnel circulaire, de 27 km de circonférence, enfoui à environ 100 m sous terre. Cette construction souterraine s'explique par la nécessité de minimiser des perturbations (magnétiques, gravitationnelles et vibratoires) générées par l'environnement, et - subsidiairement - le coût très important des expropriations qu'aurait engendré une construction en surface qui a duré 20 ans. Son exploitation a commencé en 2009.

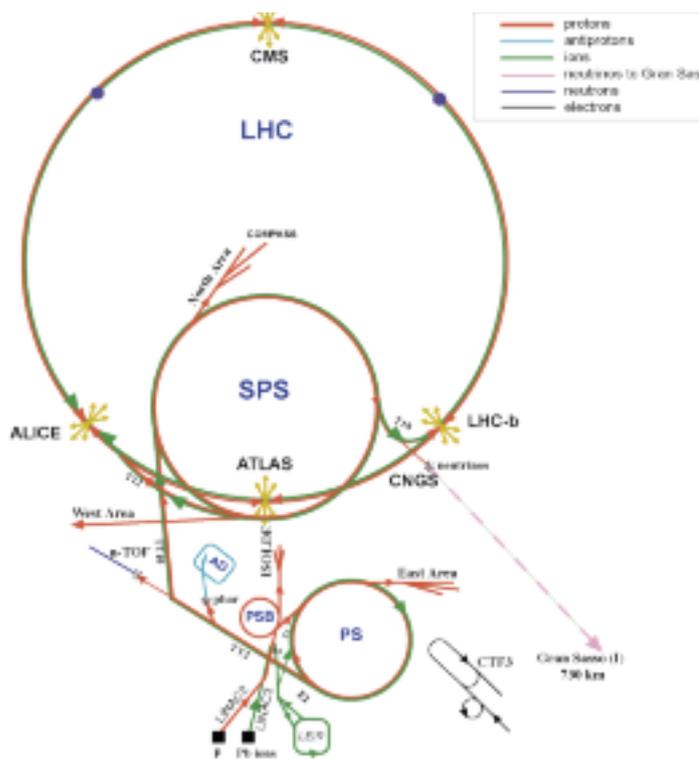


Schéma des différents accélérateurs

Le LHC est une machine qui accélère et fait se collisionner deux faisceaux (tournant en sens inverse) de particules identiques (des protons) à une vitesse proche de celle de la lumière. Ces faisceaux sont créés dans la chaîne des différents accélérateurs du CERN avant d'être injectés dans le LHC. Ils y circulent dans un vide presque absolu, et sont guidés et encore accélérés tout au long des 27 km de l'anneau grâce à des aimants supraconducteurs.

Les fruits de ces collisions sont captés dans des détecteurs qui les analysent grâce à un réseau complexe d'ordinateurs super-puissants. Le LHC est équipé, entre autres, de quatre immenses détecteurs dénommés : ALICE, ATLAS (A Toroidal, LHC ApparatU), LHCb et CMS. Pour l'exemple, le détecteur ATLAS, et qui n'est pas le plus massif, pèse 7500 tonnes, fait 22 m de diamètre et 44 m de long. Chaque détecteur est formé de millions d'éléments qui fonctionnent en parallèle.

Pour concevoir, fabriquer et utiliser cet ensemble (accélérateurs et détecteurs), les ingénieurs ont dû apprivoiser des contraintes techniques considérables :

- **Génie civil** pour le creusement du tunnel, à plus de 100 m de profondeur et l'installation d'infrastructures de grande taille;
- **Maîtrise du vide** pour la circulation des faisceaux de particules afin d'éviter tout contact avec des molécules de gaz présentes dans l'accélérateur;
- **Construction d'énormes et très nombreux électro-aimants** qui accélèrent et guident les faisceaux de protons;
- **Cryogénie** pour le refroidissement des 10000 tonnes d'hélium à - 271°C, soit 3 K - qui permettent de réfrigérer les électro-aimants, leur conférant ainsi des propriétés supraconductrices;
- **Informatique** pour stocker d'abord et analyser ensuite les données générées par les 600 millions de collisions par seconde, qui libèrent des particules de plus en plus petites. Des circuits électroniques enregistrent le passage de chaque particule à travers un détecteur qui les traduit en signaux électroniques qui seront exploités par les ordinateurs... et les chercheurs.
- ETC... ...ETC



Le détecteur ATLAS



Vue partielle de la salle informatique

Vous avez dit : collisions !!!

Il est un endroit dans ce voyage, qui pour chacun d'entre-nous, procura un moment inoubliable d'étonnement, voire d'angoisse, tranchant singulièrement avec l'ambiance feutrée des bureaux où s'affairent chercheurs, ingénieurs et techniciens, où la sérénité et la patience de ceux qui nous ont accompagnés pendant les visites techniques : chacun aura reconnu... le restaurant du CERN. Une fourmilière dans laquelle un ours aurait mis sa patte !!! Des centaines de personnes, se déplaçant dans tous les sens, plateau à la main, cherchant sur les différents étals de victuailles, à composer rapidement leur repas. Pour les habitués, certainement la routine ! Mais pour nous : le parcours du combattant. «Vous posez votre plateau, il n'est déjà plus là, vous avez choisi dessert et vous vous retrouvez avec un fromage !!!».

Bref, avec votre plateau garni d'un choix aléatoire, vous vous faufilez entre tous, évitant si possible des **collisions humaines**, autrement moins véloces que celles du chapitre précédent, mais risquant de produire quand même quelques effets spectaculaires incontrôlés, heureusement mineurs.

Enfin, chacun essaie de trouver une place à une table de ce réfectoire en effervescence.

A droite, ça parle anglais, à gauche, il semble que ce soit de l'espagnol et en face, on ne sait pas trop. Un monde polyglotte composé de jeunes gens qui semblent avoir... la moitié de notre âge. Un grand moment de solitude... Si on peut dire !!!



Chercheurs de tous pays... bon appétit

FIN DU VOYAGE

Toutes les bonnes choses ayant une fin, nous quittons GENÈVE et son brouillard givrant pour regagner CLERMONT, fatigués, mais un peu plus savants qu'avant, en remerciant encore une fois tous ceux qui, animateurs et participants, ont contribué à l'intérêt et la bonne ambiance de ce voyage scientifique organisé par la SFEN en collaboration avec l'ADASTA.



Une représentation du CERN... sous la frontière

VISITE DE LA CHAUFFERIE BIO-MASSE CLERMONT-NORD

Les 19 et 26 février 2014

(Compte-rendu rédigé par Catherine Darennes et René Bousquet)

Située rue du Crouzet, dans le Quartier de la Croix-de-Neyrat, cette chaufferie a fait l'objet d'un contrat DSP (Délégation de Service Public) par la Ville de Clermont-Ferrand avec la Sté ECLA (COFELY, Groupe GDF-SUEZ) :

- * Durée 25 ans
- * Remplacement de 50 chaufferies anciennes (au gaz, des années 70).
- * 45.000 MWh d'énergie / an
- * 12 km de réseau souterrain
- * 65 points de livraison
- * 25.000 t de bois/an
- * Mixité d'énergies : 85% bois + 14% gaz + 1% fuel.

COÛT DU PROJET :

16,00 M€ dont :

- 3,00 M€ pour les bâtiments de la chaufferie,
- 3,30 M€ pour les matériels de process,
- 6,50 M€ pour le réseau,
- 2,00 M€ pour les sous-stations
- 1,20 M€ pour divers.

6,90 M€ sont financés par des subventions, le solde étant financé par COFELY.

Amortissement : 25 ans

PÉRIMÈTRE DE DISTRIBUTION :

La fourniture de chauffage et de ECS (eau chaude sanitaire) concerne 5.500/6.000 «équivalents-logements», couvrant les quartiers Nord de Clermont : Croix-de-Neyrat, Champratel/Flamina et les Vergnes.

Les principaux bénéficiaires sont :

- Bailleurs sociaux (Logidôme, Auvergne Habitat, OPHLM)
- Bâtiments publics (écoles, gymnases, piscine, collège, le lycée, l'Institut des Métiers ; seules les Archives ne sont pas raccordées). Le raccordement de la Gendarmerie est prévu au cours de l'été 2014
- Autres bâtiments (quelques copropriétés, la future Ecole d'Architecture, et un particulier).

ECLA-COFELY souhaite vivement agrandir son parc de bénéficiaires, en intégrant le plus possible de nouveaux projets d'habitation situés dans le périmètre, car la chaufferie fonctionne à l'heure actuelle à 60% de sa capacité ; donc il y a de la réserve (d'autant plus que les bailleurs sociaux ont tous des programmes d'isolation qui vont entraîner des économies d'énergie).

Chaque contrat comprend un «Skid» (système de distribution) comprenant diverses clauses techniques et financières sur la distribution de l'énergie (chauffage + ECS), la consommation et l'entretien :

- Température de l'eau du chauffage selon le contrat : comprise entre 85 et 100°C toute l'année (en pratique, elle varie de 90 à 96°C).

- Température contractuelle du chauffage chez le client : 19° (jour et nuit).

- Le coût est de 68 € / MWh TTC en 2013.

L'une des références de base de facturation est le DJU «degré jour unitaire» = moyenne des températures des 30 dernières années = 2500 DJU/an.

La DSP bénéficie d'une réduction (à 0,50 € /MWh) de la future taxe TICGN (Taxe Intérieure de Consommation Gaz Naturel) qui est de 1,19 €/MWh/an en 2014.

LES INSTALLATIONS :

C'est la plus grosse chaufferie parmi celles que le Groupe Cofely gère sur la région (Croix Neyrat à Clermont, Moulins, Riom-le-Beau, Rochefort-Montagne et Riom es-Montagne).

- **2 Chaudières Bois** (marque française COMPTE, entreprise locale située à Arlanc),

1 chaudière de 8MW + 1 chaudière de 4MW

(pour donner une comparaison : une chaudière de maison individuelle a une capacité d'environ 0,025MW).

- **2 Chaudières «de secours» :**

1 chaudière GAZ de 15MW (marque allemande : Weissmann)

1 chaudière MIXTE (gaz / fuel) de 15MW (brûleurs non français).

- **4 circulateurs** gérés par une gestion automatique des pompes (avec 1 seul départ), avec un contrôle permanent automatique amont/aval. Les 4 pompes (type «multicellulaire») tournent à la même vitesse.

Un compteur d'énergie permet de contrôler la distribution, et permet de comparer avec les relevés des compteurs de chaque client.

Un vase d'expansion de 18 m3 permet de régulariser le réseau.

- **des «sous-stations»** installées au RdC ou dans des locaux spécifiques au pied des immeubles, pour pousser l'eau dans les canalisations existantes des bâtiments.

Il n'y a pas de groupe électrogène (non prévu dans le contrat) mais il y a de la place dans les locaux pour en installer si nécessaire.

Pas de cogénération possible car la capacité de la chaufferie ne le permet pas (il n'y a qu'une chaudière dédiée à la production d'ECS).



BOIS :

85% de l'énergie doit venir du bois, selon le contrat DSP : soit 25.000 tonnes de bois / an (dont 75% est consommé l'hiver), 7 camions/jour seront nécessaires au cœur de l'hiver pour l'alimentation de cette chaufferie.

APPROVISIONNEMENT :

- Les fournisseurs doivent être locaux (à moins de 50 km), conformément à la DSP (les réserves locales en bois ayant été estimées suffisantes pour les consommations prévues).

- L'approvisionnement est actuellement assuré par 7 Sociétés (dont une à Bromont-Lamothe et une à Lezoux).

- Les contrats avec les fournisseurs mentionnent (entre autres contraintes de qualité du bois), une provenance locale.

- Le bois est du bois «décheté» (moins cher que le granulé) : ce sont des déchets (écorces, branches) qui sont récupérés lors des coupes ou élagages dans les forêts, et dans les scieries (chutes de coupes) et conditionnés par les fournisseurs eux-mêmes.

- Toutes essences d'arbres peuvent être récupérées, mais les non-résineux sont bien sûr plus appréciés

- Les bois traités sont interdits.

- Une certaine «granulométrie» doit être respectée : pas de grandes ou grosses branches, pas de poussières de sciures.

Le circuit de livraison du bois est : Boulevard Clémentel, rue Sous-les-Vignes, rue du Crouzet.

Les horaires de livraison sont fixés de 8h00 à 12h00 et de 14h00 à 18h00 et sont aménagés de façon à éviter les entrées et sorties de l'école Georges Sand.

STOCKAGE DU BOIS :

Il y a 2 silos de stockage :

- 1 silo «passif» de 450 m³

- 1 silo «actif» de 1200 m³

soit une capacité de stockage prévue pour 4 jours d'autonomie (pour couvrir les week-ends).

Les bois sont déversés par les remorques à fond mouvant dans le silo «passif» (présence de sprinklers pour prévenir les risques d'incendies dû aux gaz dégagés par la fermentation du bois), et sont récupérés par un grappin automatique pour être transférés dans un silo adjacent pour alimentation automatique de trémies et bandes de transport jusqu'à la chaudière.

La charpente du local est «stable au feu» (résistance = 1/2 heure).

BRULAGE DU BOIS :

- Le bois est acheminé dans des trémies, par un convoyeur à chaîne jusqu'à la chaudière-bois.

- Les vapeurs d'eau sortent à 150° et sont récupérées par un échangeur.

- Les cendres tombent dans le « cendrier ».

- La chaudière-bois fait l'objet d'une grande maintenance annuelle (2 jours l'été) et de 4 ramonages par an.

A partir d'une température de +3°C, la chaufferie fonctionne majoritairement au bois.

Au dessous de -3°C, l'appoint avec la chaudière gaz se fait automatiquement.

Les chaudières et le «Process-Bois» dans son ensemble exigent plus de maintenance, de contrôle et de vigilance que le «Process-Gaz».

CONTRÔLE BOIS ET FUMÉES :

- Qualité et humidité du bois sont systématiquement contrôlées : 1 échantillon par livraison. Les échantillons sont gardés 15 jours.

- Si le taux d'humidité n'est pas dans les normes, l'Ecla-Co-fely applique une pénalité sur le prix du tonnage.

- Après les premiers essais de mise en route, le process de combustion est maintenant maîtrisé à la Préfecture.

- Le panache blanc sortant des cheminées signifie que les fumées sont saturées en vapeur d'eau.

- Les fumées sont analysées en permanence et tous les résultats des contrôles sont envoyés par Ecla-Cofely une fois/mois à la Préfecture.

- Un rapport annuel technique et financier est remis à la Ville tous les ans.



CHEMINÉES :

- 4 Cheminées.

- Hauteur = 20m

Suite à des questions des visiteurs, l'animateur signale que la législation impose une «hauteur d'au moins 5 m au-dessus de l'environnement le plus élevé».

- Cette cheminée est de type «multi-conduits». 4 fûts se trouvent à l'intérieur du fût porteur, soit un par chaudière.



TRAITEMENT DES CENDRES :

Les cendres sont traitées dans 2 systèmes de filtration à la sortie de la chaudière :

- 1^{ère} filtration : filtre les grosses particules (mouillées dans un bac d'eau pour éviter les poussières et recyclées comme compost dans la filière agricole).

- 2^{ème} filtration dite «à manche» (ou «à poches») : filtre les particules fines (récupérées et stockées dans des sacs pour traitement en «déchets ultimes»).

Le taux de cendres varie actuellement de 2 à 3% car il dépend de la qualité des bois. Il devrait être de 2%.

RÉSEAU DE DISTRIBUTION :

- Le réseau fait 12 km, avec des canalisations isolées (6 cm de mousse polyuréthane).

- La pression du réseau en sortie de chaufferie peut atteindre 14 bars

- Le réseau est traité anti-corrosion et anti-tartre.

TEMPÉRATURES :

- Les températures départ chaudières doivent être entre 90°-96°C et le retour non-inférieur à 70°C pour desserte d'environ-20°C.

- Pertes en ligne autres que desserte : les données n'ont pas été communiquées, mais selon Ecla-Cofely, elles sont «assez limitées».

Ils restent cependant vigilants sur les risques de fuites au niveau des canalisations et des échangeurs au pied des bâtiments.

Suite à des questions concernant le problème des pertes en ligne, le responsable technique précise que l'eau met 1/2 h pour alimenter le dernier client en bout de ligne, avec une perte calorifique d'environ 3°.

- Le volume total du réseau est de 700 m³ avec une perte totale de 500 kWh.

ACTIVITÉS DE L'ADASTA

CONFÉRENCES PRÉVUES

Mercredi 5 novembre 2014

à 18h30 CONFÉRENCE SPÉCIALE : «Economie circulaire dans le pneumatique selon Michelin» - *Exceptionnellement, cette conférence aura lieu au Pôle Commun POLYTECH/ ISIMA (amphi 1) - Les Cézeaux.*

Par Jean-Marie MUS, Directeur Physique et Modélisation des Performances (Michelin)

Judi 13 novembre 2014

à 17h30 «Orgue : définition, découverte des spécificités, fonctionnalités, caractéristiques acoustiques et musicales» - *Exceptionnellement, cette conférence-animation aura lieu en l'église de Chamalières*

Par Henri BOUFFARD, Organiste et facteur d'orgue, Président de l'ADASTA

Mercredi 10 décembre 2014

à 17h30 «Le BIOPOLE de Saint-Beauzire (63)» Par M. PREVOTEAU directeur BioPôle et M. FONTAINE conférencier

Judi 20 novembre 2014

dans le cadre du partenariat ADASTA/SFEN, la SFEN présente une conférence (18h00, lieu à préciser): "Le gaz de schiste et les hydrocarbures non conventionnels". Conférencier : Jean-Pierre Couturier"

Mercredi 14 janvier

à 17h30 Réfraction atmosphérique et ses propriétés - Luc DETWILLER, Professeur Physique /MathSpé PC - Lycée Blaise Pascal Clermont- Ferrand - Membre de l'ADASTA

Mardi 24 février

à 17h30 Oreille et problèmes de vertige, Professeur MOM - CHU Clermont-Ferrand

Mercredi 25 mars

à 17h30 Renversement du temps. Z. AJALTUNI - Laboratoire de Physique Corpusculaire de Clermont-Ferrand

SORTIES PRÉVUES

Judi 18 décembre 2014 (10h et 14h)

Nouveau bâtiment du Conseil Régional
59 Boulevard Léon-Jouhaux - 63050 Clermont-Ferrand

Judi 15 janvier 2015 (10 et 14h)

Incinérateur : complément visite du 16 janvier 2013. Aspects techniques d'exploitation. VERNEA - Chemin des Domaines de Beaulieu - Clermont Fd

RIX DÉCERNÉS EN 2014 DANS DES COLLÈGES ET LYCÉES

Prix Adasta décerné au lycée Albert-Camus de Clermont-ferrand

«Eduquer et Sensibiliser sur les risques majeurs»

«Apprendre à se reconstruire»

Parmi les ateliers qui animent le collège Albert Camus il existe depuis quelques années un club UNESCO qui a pour objectif de sensibiliser et éduquer aux risques majeurs (séisme, inondations, avalanches, catastrophes industrielles ...) La pre-

mière promotion (2006-2009) a mené à bien la construction d'une maquette de la vallée de Chaudefour en 3 dimensions, la seconde a travaillé sur la réalisation d'une exposition centrée sur le recueil de témoignages de victimes ou de témoins de catastrophes majeures. C'est le travail de ce groupe, repris et développé en 2013-2014 par les nouveaux collégiens sous la conduite de Fabienne Raffin, professeure d'Histoire-Géographie et Sébastien Baron, professeur de Sciences-Physiques, qui était récemment présenté dans l'enceinte de l'établissement.

Une quarantaine de témoignages ont été recueillis à travers le monde. Les récits, écrits ou oraux, ont été présentés et rassemblés sur des panneaux qui ont été très appréciés lors des «Exposciences» ont également construit une maquette pour simuler les conséquences de secousses sismiques sur un bâtiment et présenter ainsi aux visiteurs des situations particulièrement réalistes.



C'est cette réalisation que, démonstrations et images à l'appui, le Collège Albert Camus a présenté à la finale académique du concours "C'Génial" et obtenu la 3^{ème} place. Cette compétition qui veut valoriser la culture scientifique et technique en récompensant des projets menés dans les établissements a ouvert des contacts avec Serge Tisseron, psychiatre et psychanalyste qui travaille sur la résilience, faculté à rebondir pour sortir d'une situation traumatique et Henri Bouffard, président de l'ADASTA qui a pour objectif de "Diffuser et promouvoir la culture scientifique et technique, notamment auprès des jeunes".

En récompense du travail présenté au collège, pour aider à l'achat des matériels nécessaires à la réalisation des projets inscrits au titre de l'année scolaire prochaine, Henri Bouffard a remis un don de 400 € qui, n'en doutons pas, sera un vrai soutien pour des jeunes épris de sciences et techniques qui ont fait la preuve de leur enthousiasme et de leur forte implication.

Prix décernés dans le cadre d'EXPERSCIENCES

Mercredi 26 mars 2014, des membres de l'ADASTA : Henri Bouffard (président), Jean Chandezon (vice-président) et Roland Fustier se sont rendus au lycée polyvalent de Chamalières à l'invitation de l'UDPPC (union des professeurs de physique chimie), afin d'auditionner les élèves de 1^{ère} S des différents lycées sur les sujets scientifiques choisis.

Ils ont pu constater le niveau élevé des prestations, l'aisance dans l'élocution, la clarté des exposés et l'apport parfois important pour illustrer le discours.

A la fin des exposés, la présidente de l'UDPPC a réuni les examinateurs pour déterminer les points forts de chaque groupe d'élèves. Finalement la qualité des exposés et des élèves a permis à chaque groupe de recevoir un prix.

L'ADASTA a pu remettre un prix de 300 €, divisé en plusieurs prix : 150 €, 100 € et 50 €.

Les Sociétés Michelin et Aubert et Duval ont également remis un prix.