

**BULLETIN N° 185**  
**ACADÉMIE EUROPEENNE**  
**INTERDISCIPLINAIRE**  
**DES SCIENCES**



**lundi 5 mai à 17h Maison de l'AX 5 rue Descartes 75005 Paris**

**Conférence:**

***"Du Temps à l'Espace-Temps"***

**par Marc Lachièze-Rey**

**Directeur de Recherche CNRS**

**APC - Astroparticule et Cosmologie (UMR 7164)**

**Université Paris 7 Denis Diderot**

**Prochaine séance :**

**lundi 2 juin à 16h30 Maison de l'AX 5 rue Descartes 75005 Paris**

**16h30 : commentaires de notre Collègue Alain STAHL sur l'origine de la vie.**

**17 h: Conférence *"La mesure du temps et les tests de la relativité"***

**par Christophe SALOMON**

**Directeur de Recherche CNRS**

**Laboratoire Kastler-Brossel**

**Ecole Normale Supérieure -Département de Physique**

**24 rue Lhomond 75231 PARIS CEDEX 05**

Académie Européenne Interdisciplinaire des Sciences

Siège Social : Fondation de la Maison des Sciences de l'Homme 54, bd Raspail 75006 Paris

Nouveau Site Web : <http://www.science-inter.com>

# ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES

## FONDATION DE LA MAISON DES SCIENCES DE L'HOMME

**PRESIDENT** : Pr Victor MASTRANGELO  
**VICE PRESIDENT** : Pr Jean-Pierre FRANÇOISE  
**SECRETAIRE GENERAL** : Irène HERPE-LITWIN  
**TRESORIER GENERAL** : Claude ELBAZ

**MEMBRES CONSULTATIFS DU CA :**

Gilbert BELAUBRE  
 François BEGON  
 Bruno BLONDEL  
 Patrice CROSSA-REYNAUD  
 Michel GONDRAN

**COMMISSION FINANCES**: Claude ELBAZ,  
**COMMISSION MULTIMÉDIA**: Pr. Alain CORDIER

**COMMISSION CANDIDATURES**: Pr. Jean-Pierre FRANCOISE

**PRESIDENT FONDATEUR** : Dr. Lucien LEVY (†)  
**PRESIDENT D'HONNEUR** : Gilbert BELAUBRE  
**SECRETAIRE GENERAL D'HONNEUR** : Pr. P. LIACOPOULOS (†)

**CONSEILLERS SCIENTIFIQUES :**  
**SCIENCES DE LA MATIERE** : Pr. Gilles COHEN-TANNOUJJI  
**SCIENCES DE LA VIE ET BIOTECHNIQUES** : Pr Brigitte DEBUIRE

**CONSEILLERS SPECIAUX:**

**EDITION**: Pr Robert FRANCK  
**AFFAIRES EUROPEENNES** :Pr Jean SCHMETS  
**RELATIONS VILLE DE PARIS et IDF** : Michel GONDRAN ex-Président  
**RELATIONS UNIVERSITES et MOYENS MULTIMEDIA**: Pr Alain CORDIER  
**RELATIONS AX et MÉCENAT** : Gilbert BELAUBRE

**SECTION DE NICE :**  
**PRESIDENT** : Doyen René DARS

**SECTION DE NANCY :**  
**PRESIDENT** : Pr Pierre NABET

mai 2014

**N°185**

**TABLE DES MATIERES**

p. 03 Compte-rendu de la séance du lundi 5 mai 2014  
 p. 09 Annonces  
 p. 11 Documents

**Prochaine séance :**

**lundi 2 juin à 16h30 Maison de l'AX 5 rue Descartes 75005 Paris**

**16h30 : commentaires de notre Collègue Alain STAHL sur l'origine de la vie.**

**17 h: Conférence "La mesure du temps et tests de la relativité"**

**par Christophe SALOMON**

**Directeur de Recherche CNRS**

**Laboratoire Kastler-Brossel**

**Ecole Normale Supérieure -Département de Physique**

**24 rue Lhomond 75231 PARIS CEDEX 05**

# **ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES**

**Fondation de la Maison des Sciences de l'Homme, Paris.**

**Séance du**

**Lundi 5 mai 2014**

**Maison de l'AX 17h**

La séance est ouverte à 17h sous la Présidence de Victor MASTRANGELO et en la présence de nos Collègues Gilbert BELAUBRE, Jean-Pierre BESSIS, Alain CARDON, Juan-Carlos CHACHQUES, Gilles COHEN-TANNOUDJI, Alain CORDIER, Ernesto DI MAURO, Françoise DUTHEIL, Claude ELBAZ, Robert FRANCK, Michel GONDRAN, Irène HERPE-LITWIN, Edith PERRIER, Jean SCHMETS, Alain STAHL Jean-Pierre TREUIL

Etaient excusés François BEGON, Bruno BLONDEL, Michel CABANAC, Daniel COURGEAU, Jean -Pierre FRANCOISE , Walter GONZALEZ, Gérard LEVY, Jacques LEVY , Valérie LEFEVRE-SEGUIN , Antoine LONG , Claude MAURY, Pierre PESQUIES, Pierre MARCHAIS , Jean VERDETTI.

## **I. Accueil des nouveaux collègues**

Les nouveaux collègues présents sont chaleureusement accueillis.

## **II. Présentation de notre conférencier, Marc LACHIEZE-REY**

Notre Président nous présente rapidement le conférencier:

Marc Lachièze-Rey est un ancien élève de l'Ecole Normale Supérieure (rue d'Ulm) et docteur d'État en Physique (Astrophysique) . Il est directeur de recherche au CNRS au laboratoire APC-Astroparticules et Cosmologie (UMR 7164) Université Paris Diderot. Il a également conduit des recherches au Service d'Astrophysique du CEA-Saclay. Il est spécialiste de physique théorique fondamentale, et s'intéresse aux rapports de cette discipline avec les mathématique et la philosophie. Il enseigne également à l'École Centrale de Paris.

Ses publications scientifiques portent entre autres sur la topologie de l'espace-temps, la gravitation ou encore la matière noire:

Il a écrit de nombreux articles et plusieurs ouvrages parmi lesquels:

- Au-delà de l'espace et du temps : la nouvelle physique (éd. Le Pommier, 2008)
- Les avatars du vide (éd. Le Pommier, 2005)
- De l'infini (M. Lachièze-Rey et J.-P. Luminet, éd. Dunod, 2005)
- Figures du Ciel (M. Lachièze-Rey et J.-P. Luminet, Le Seuil / Bibliothèque nationale de France, Paris, 1998)
- Initiation à la Cosmologie (4e édition, Dunod, 2004)
- Voyager dans le temps: la physique moderne et la temporalité, (Seuil Sciences Ouvertes 2013)

### III. Conférence de Marc LACHIEZE-REY: "Du temps à l'espace-temps"

Nous remercions très chaleureusement notre nouveau Collègue Jean-Pierre TREUIL de nous avoir communiqué deux résumés enrichis de commentaires très éclairants :

**A) Sur la conférence de Marc LACHIEZE-REY**

**B) Sur la discussion animée qui a suivi ladite conférence**

#### A. Résumé de la conférence de Marc LACHIEZE-REY

Ce Lundi 5 mai, l'AEIS, lors de sa réunion mensuelle, recevait l'astrophysicien Marc [Lachieze-Rey \(M. L-R\)](#). Pour l'écouter sur un thème sur lequel il a beaucoup travaillé : celui du Temps.

Le Temps : il s'écoule, et nous entraîne. On le mesure. La mesure du Temps est actuellement une des plus précises qui soit. L'évolution de cette précision est proprement fantastique, comme le rapporte un texte récent ([Christophe Salomon, IHP, 2010](#)) : Au XVII<sup>e</sup> siècle, les meilleures horloges pouvaient présenter un décalage de l'ordre de 10 secondes par jour ; au début du siècle actuel, le décalage d'une horloge "optique", pour la même durée d'un jour est de l'ordre de la picoseconde, soit un millième de milliardième de seconde.

*Mais que mesure-t-on exactement ?*

L'idée que l'on peut avoir du Temps varie selon les disciplines. L'exposé du conférencier (ci-après désigné par M. L-R) concerne la conception du Temps vu de la Physique et les grandes ruptures qui ont marqué son histoire. Mais la connaissance des changements majeurs que ces ruptures ont provoqués doit-elle rester réservée au cercle des physiciens concernés, essentiellement ceux de l'infiniment petit et de l'infiniment grand? C'est une des questions sous-jacentes de cet exposé passionnant et qui a ressurgi dans la discussion.

Dans son introduction, M. L-R a posé les termes de la thèse qu'il allait développer :

- le Temps, comme concept de la Physique, est *apparu avec Newton*, il a *disparu avec Einstein*.
- les propriétés associées à ce concept n'ont cependant pas toutes disparu dans cette révolution.

Une riche discussion a eu lieu, dont je regrouperai les éléments en quatre chapitres :

- La notion d'évènement
- Physique et Géométrie
- Irréversibilité, flèche du Temps, statut du temps cosmique
- Espace-Temps hors de la Physique.

Dans son esprit général, ce résumé s'adresse aussi à ceux qui, parmi mes proches, s'intéressent à ces sujets. C'est pourquoi je ne me limite pas strictement aux seuls propos tenus lors de la réunion de l'AEIS et j'ai sur certains points essayé de donner quelques arrière-plans. Dans ce résumé "augmenté", je me suis appuyé notamment sur deux ouvrages qui ont beaucoup de points communs, à la fois dans le public qu'ils visent et dans leur propos :

- Marc Lachieze-Rey, *Au delà de l'Espace et du Temps. La nouvelle physique*. Editions Le Pommier 2008

- Roger Penrose, *A la découverte des Lois de l'Univers, La prodigieuse histoire des mathématiques et de la physique*. Editions Odile Jacob Sciences, 2004.

Le Temps ? *Si personne ne me le demande, je le sais. Si on me le demande et que je veux l'expliquer, je ne sais plus.* Cette citation est extraite du livre XI des Confessions de Saint Augustin. Un texte magnifiquement mis en scène récemment au Théâtre National de Chaillot par [Daniel Guenoun](#).

#### Deux remarques illustrent cette dualité

- Aucun auteur n'a pu donner - selon M. L-R - une définition du temps qui rende compte de la totalité de ses propriétés.

• Et pourtant, notre langage est imprégné de notions temporelles ; référence à la conjugaison des verbes, au passé, au présent et au futur. Il n'y a pas de mode verbal, qui indiquerait par exemple - j'imagine - le fait d'être une partie prenante de l'Univers *pendant une certaine durée*, sans aucune autre connotation temporelle. Cette imprégnation nous oblige à penser d'une certaine façon, et c'est parfois gênant, quand justement il faudrait penser autrement.

## Le Temps chez Newton

Le Temps s'écoule uniformément. Derrière cette formule, on trouve une conception du Temps et de ses rapports à l'Espace, à la base de l'essor de la Physique pendant les trois siècles qui allaient suivre ; mais aussi conforme, pour une certaine part, à l'expérience quotidienne.

Mathématiquement, l'Espace-Temps Newtonien est le produit ("produit cartésien") de l'espace euclidien à trois dimensions et de l'ensemble des nombres réels, ce dernier représentant la ligne du Temps. J'aime bien la métaphore donnée par Roger Penrose dans son livre " A la découverte des Lois de l'Univers " au chapitre 17 : celle du film projeté sur un écran de cinéma. L'écran y figure l'Espace, ici en deux dimensions seulement, un ensemble de points bien identifiés, qui *existent indépendamment* du film projeté et *des actions qui vont s'y dérouler*. La succession - l'ordre - des images sur la pellicule y figure le temps. A chaque *évènement* - l'apparition d'un personnage, le début d'une scène d'amour - peut être associé sans ambiguïté un nombre, à savoir le rang de la première image concernée.

## Propriétés du temps Newtonien

Les propriétés du temps Newtonien sont toutes reliées à l'*axiome* suivant : *tout évènement a une date unique, à savoir un nombre réel*, une date qui peut être vue aussi comme un point sur une droite. J'insisterai ici sur ce terme d'axiome, bien qu'il n'ait pas été prononcé me semble-t-il par le conférencier : axiome, un énoncé formalisant notre expérience du temps, posé à priori et indépendant des procédures effectives de datation. Accrochées à cet axiome, viennent alors les définitions et propositions suivantes :

- *définition de l'ordre chronologique* : c'est l'ordre total induit par les dates sur l'ensemble des évènements, avec des relations d'antériorité (ou de postériorité) et de simultanéité. Si A et B sont deux évènements quelconques, *seuls trois cas sont possibles* : A précède B ; B précède A ; A et B sont simultanés. Un énoncé qui peut paraître évident, nous verrons qu'il n'en est rien.

- *définition de la durée* entre un évènement A et un évènement B, simultané ou postérieur à A : différence entre la date de B et celle de A. *La durée est donc vue comme indépendante de ce qui se passe entre A et B.* Par exemple, si A est le début d'un voyage, et B la fin, la durée du voyage ainsi définie est la même, quels que soient le parcours suivi et la vitesse de ce parcours.

- *proposition* sur les relations de causalité : un évènement A peut être une cause possible d'un évènement B, si et seulement si, il n'est pas postérieur à B. Une discussion s'est brièvement ouverte à cet instant de l'exposé sur la notion d'évènement ; j'en reprendrai les composantes dans le résumé ci-dessous de la discussion.

## Incidente : Autour des notions de mouvements uniformes et de mouvements libres

M. L-R rappelle l'intérêt - pour le sujet qui nous occupe - de cette branche de la Mécanique appelée Cinématique. L'étude des *mouvements libres* - c.a.d. mouvements de corps non soumis à une force - est au cœur des rapports entre l'Espace et le Temps. Cette notion de mouvement libre de toute force apparaît explicitement dans le premier principe de Newton affirmant " Tout corps persévère dans l'état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite, à moins que quelque force n'agisse sur lui... " La notion de *mouvement uniforme* était déjà bien là, notamment avec Galilée, mort en 1642, un an avant la naissance de Newton.

## Petit retour à Galilée...

Une idée fonde à l'époque ce qu'on appelle aujourd'hui la Relativité Galiléenne : *les lois de la mécanique sont les mêmes dans tout système animé d'un mouvement uniforme*. Un observateur lié à ce système n'a aucun moyen, en étudiant le mouvement des objets qui en font partie, d'évaluer la rapidité du mouvement, et même d'en reconnaître l'existence. J'emprunte à nouveau à R. Penrose, ouvr. cit. p. 374 et suivantes. Galilée, dans son *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* décrivait, à l'appui de son dire, ce que nous appelons aujourd'hui une "expérience de pensée". Il prenait comme exemple (approché !) d'un système en mouvement uniforme "une grande cabine sous le pont d'un grand navire"

voguant en droite ligne à une vitesse constante ; il observait le comportement des papillons et des gouttelettes d'eau, identique en tout point à celui qu'on constaterait sur la terre ferme, nonobstant le déplacement du bateau. A l'heure actuelle, nous ferions plutôt référence à un train ou un avion se déplaçant en droite ligne à une vitesse constante, voire à un vaisseau spatial courant sur son aire, loin de tout astre.

### *Espace-Temps Galiléen, Espace-Temps Newtonien*

Le principe de Relativité Galiléenne suggère qu'on est toujours en mouvement par rapport à quelqu'un, qu'il n'existe pas d'état de repos ni d'Espace absolu ; autrement dit, l'Espace *ne peut être considéré comme une réalité quasi matérielle*, tel l'écran pendant la projection du film ; *si tel en effet était le cas*, les positions de cet Espace fourniraient une référence pour distinguer Repos et Mouvement ; dans un tel Monde, les physiciens finiraient bien par trouver le moyen pratique d'utiliser cette référence, par des expériences de mécanique - donc portant sur les forces et leurs effets - qui mettraient en évidence la distinction. Cette conclusion s'exprime mathématiquement. L'Espace-Temps Galiléen n'est pas un produit cartésien : savoir, dans ce contexte, une structure associant, à tout évènement, une date sur un axe temporel et une position dans un espace à trois dimensions, lequel serait fixé une fois pour toute. Mais l'espace devient conforme à une telle structure, il devient donc "Newtonien", par la "décision" d'un observateur, choisissant - par convention pratique et révisable - de considérer comme au repos les positions de certains objets ou évènements. Ainsi, dans le système de coordonnées écliptiques par exemple, considère-t-on comme au repos la position d'un objet, savoir le soleil, et aussi la position d'un évènement, savoir l'équinoxe de printemps sur la terre, lors d'une certaine année de référence.

### *Et l'histoire se poursuit.*

La réflexion autour des mouvements uniformes, des mouvements libres et de leur relation a ainsi présidé à la naissance de la Physique moderne. Et c'est la poursuite de la réflexion sur les mêmes thèmes qui a déclenché la seconde révolution, celle des Relativités Restreinte et Générale :

- Les physiciens ont un moment espéré que des expériences hors du cadre de la mécanique -par exemple en électromagnétisme - pourraient faire émerger, malgré tout, la distinction Repos/ Mouvement Uniforme ; et parvenir, par exemple, à mesurer la vitesse absolue de la Terre dans l'espace. Cet espoir s'est révélé vain : son démenti est à la racine de la Relativité Restreinte

- A priori, la chute libre d'un corps, sous l'effet de l'attraction terrestre, n'est pas un mouvement libre, puisque le corps est soumis à une force, la force de gravitation. Et d'ailleurs ce mouvement n'est pas uniforme, mais au contraire *accélééré*. Le changement de point de vue, apporté par la Relativité Générale, c'est que la gravitation n'est pas une force. C'est seulement une courbure de l'Espace-Temps, créée par le corps attirant, et contraignant le mouvement du corps attiré. Le mouvement de ce dernier reste bien alors un mouvement libre.

### **Le Temps après Einstein**

Je reprends maintenant le cours de l'exposé. M. L-R. veut nous faire comprendre l'importance du saut conceptuel entre l'Espace-Temps d'avant, celui de Newton, et l'Espace-Temps d'Einstein. Face à cet objectif, les différences entre les deux Relativités, Restreinte et Générale, sont mineures et seront largement laissées de côté.

### **Pas de datation absolue.**

Après Einstein, l'énoncé fondamental est en effet la négation de l'Axiome de Newton sur la datation unique des évènements. Cet énoncé affirme en effet - je cite M.L-R - *qu'il est impossible de donner une date à un évènement*. Cette affirmation peut paraître brutale, et mérite quelques développements. M. L-R précise donc : pour un évènement donné, une certaine procédure de datation peut toujours être appliquée ; elle conduira effectivement à dater cet évènement. C'est bien une pratique courante et utile. Cette procédure donnera cependant des résultats différents pour deux observateurs distincts ; ce, dès lors qu'ils ne sont pas immobiles l'un par rapport à l'autre et au même endroit (c'est sur ce point que s'introduit un écart entre Relativité Restreinte et Générale : la dernière exigence - le même endroit - n'est imposée que par la Relativité Générale).

*Ce qui vient d'être dit n'est pas une vue de l'esprit*, et a été mainte fois vérifié. On a dû même en tenir compte dans les calculs à la base du fonctionnement des **GPS**. Deux horloges techniquement

identiques, synchronisées au départ, puis placées l'une dans un laboratoire sur Terre et l'autre dans un satellite, se décaleront progressivement. Je cite la référence Web précédente :

1) du fait du mouvement du satellite par rapport au laboratoire, l'horloge du satellite *retardera* de quelques microsecondes *par jour* ;

2) du fait de l'altitude - gravitation plus faible - elle *avancera* de quelque dizaines de microsecondes pendant la même durée. L'effet de l'altitude l'emporte sur l'effet de la vitesse, et au final le *temps du satellite s'écoule plus vite*, on y vieillit plus rapidement. M. L-R note ainsi - si j'ai bien entendu - que l'on était même capable de mesurer le décalage - lié à la seule différence dans l'intensité de la gravitation - d'horloges situées à quelques mètres de distance. La disparition de la possibilité de dater les événements d'une façon absolue, affecte les propriétés qui nous étaient familières avec le Temps Newtonien : l'existence d'un ordre chronologique, son rapport à la causalité, l'évaluation des durées.

### **Il n'existe plus d'ordre chronologique universel**

Mathématiquement, nous n'avons plus, sur l'ensemble des événements, d'ordre total mais simplement un ordre partiel. Comme dans le cas Newtonien, cet ordre est en lien avec la causalité, mais de façon plus complexe. Pour préciser, considérons à nouveau deux événements A et B. Les situations possibles vont se formuler ainsi, hors cas limites omis ici pour ne pas surcharger :

1. *Dans une première situation, B est dans le futur de A* - ou bien, proposition équivalente, *A est dans le passé de B*. La condition pour qu'il en soit ainsi est qu'un signal émis par A *puisse* parvenir à B. Sachant que les signaux les plus rapides sont ceux se propageant à la vitesse de la Lumière. Je suis conscient que l'énoncé de cette condition soulève quelques questions, mais acceptons le pour l'instant. Il revient à dire *que A est une cause possible de B*. Cette propriété (pour B d'être dans le futur de A) est intrinsèque, c.a.d indépendante des observateurs : tous les observateurs parviendront à la même conclusion. Dans leur temps particulier - leur horloge propre - *ils placeront tous B postérieurement à A*.

2. *Dans une seconde situation, A est dans le futur de B*, où de façon équivalente, B est dans le passé de A : c'est la proposition symétrique de la précédente, elle ne fait qu'échanger les rôles des événements. Les deux situations relèvent en fait d'une propriété commune, associée à la possibilité d'une relation causale dans un sens ou dans l'autre : le lien entre A et B est dit *du genre temps*.

3. *Une troisième situation*, bien différente, *inexistante dans le modèle Newtonien*, est celle où aucun signal, même un photon, particule de Lumière, ne peut relier les deux événements. *Ils ne peuvent avoir en conséquence aucun lien causal. Il n'existe alors entre eux aucun ordre déterminé. Le lien entre A et B est alors dit du genre espace*. Dans leur temps particulier, certains observateurs placeront A antérieurement à B, d'autres placeront A postérieurement à B, d'autres enfin les jugeront simultanés.

### **Incidente : Autour de la notion de ligne d'univers**

Pour mieux aborder la notion de *durée*, telle qu'elle a été développée par M.L-R, essayons de préciser ce qu'on entend par possibilité de transmission d'un signal entre deux événements A et B ? Cela m'amène à une notion courante dans les théories de la Relativité, celle de ligne d'univers.

#### **Ligne d'univers des particules massives**

Considérons une particule d'une certaine masse. L'ensemble des événements formant la vie de cette particule constitue ce qui est appelé sa ligne d'univers. L'usage de l'expression *ligne d'univers* implique que l'ensemble des événements composants est vue comme un objet géométrique, une suite continue de positions dans un certain espace, l'Espace-Temps, chaque position correspondant alors à un événement de l'ensemble. C'est une suite *orientée*, avec un événement initial, notons le **I**, associé à son apparition - sa création - et un événement final **F**, associé à sa disparition (annihilation, absorption). Cette orientation donne la direction du futur. On admettra que l'ordre des événements d'une ligne d'univers donnée - ordre allant donc du passé vers le futur - est une propriété intrinsèque : tous les observateurs s'accordent sur cet ordre : pour tous notamment, quels qu'ils soient, F est dans le futur de I.

La notion de ligne d'univers fournit la clé permettant d'affirmer qu'un événement B est dans le futur d'un événement A. *B est dans le futur de A si l'existence d'une ligne d'univers "passant" par A puis par B est possible*. Sa constatation effective - ou la vérification de sa possibilité - garantit en effet la possibilité d'un lien causal entre les deux événements puisque qu'un élément matériel a été transmis - ou peut se transmettre - entre les deux événements.

Terminons par trois remarques sur les difficultés des notions d'événement et de ligne d'univers, pour y revenir dans la discussion.

- Si l'expression géométrique "passer par" est assez intuitive, il me paraît cependant nécessaire de la traduire en terme d'associations entre évènements. Il apparaît alors quelques difficultés de vocabulaire. Je n'ai pas trouvé de mots traduisant le fait que deux évènements aient lieu en même temps dans un même lieu : *coïncidence* possède une connotation temporelle marquée ; *co-occurrence* a un emploi essentiellement linguistique ; *rencontre* est peut être plus adapté, mais garde une connotation dynamique gênante.

- J'ai cru comprendre que M. L-R donnait à la notion d'événement la nature d'une réalité première, plus fondamentale, première par rapport à la réalité d'une position dans l'Espace- Temps. Mais cela pose la question de la définition de ce qu'est un événement.

- On parlera aussi de ligne d'univers pour un objet macroscopique, un être humain, un laboratoire, un vaisseau spatial. Quelles conditions doivent être remplies pour que cette notion garde une validité à ces échelles ?

### **Lignes d'univers des photons**

Dans ce qui précède ont été considérées les lignes d'univers des particules massives, dont la vitesse est limitée, ne pouvant jamais dépasser ni même atteindre la vitesse de la lumière. Un grain de lumière, un photon, se déplace par contre à cette vitesse. Il participe lui aussi à définir une relation entre deux évènements, ne serait-ce que la relation entre son apparition **I** - par exemple son émission par un atome - et **F** sa disparition - son absorption par un autre atome. Le lien qui existe entre **I** et **F** est un cas limite : bien que ce lien accompagne la transmission de quelque chose - en l'occurrence le photon, il n'est pas du genre temps. En effet, dans la ligne d'univers du photon, **I** et **F** sont en quelque sorte simultanés : comme on va le dire plus loin, la durée propre séparant ces deux évènements est nulle . Il n'est pas non plus du genre espace, puisque il y a bien transmission et donc support d'un lien causal. On dit que ce lien limite est du genre lumière.

### **Durées propres.**

Très souvent, dans les exposés sur la Relativité, on aborde la question de la durée en traitant de la dilatation du temps entre observateurs en mouvement uniforme les uns par rapport aux autres. M. L-R a choisi de nous parler directement des *durées propres*, et de la multiplicité de leur valeurs, différentes selon les lignes d'univers joignant les deux évènements. Ce, en continuité avec ce qui avait été dit à propos de la durée séparant deux évènements dans le cas Newtonien, savoir son indépendance par rapport aux processus se déroulant dans l'intervalle. Dans cette approche l'affaire des "Jumeaux de Langevin" est une bonne introduction.

### **Les jumeaux de Langevin**

Dans le cas Newtonien, la durée entre deux évènements se mesurait par la différence entre leurs deux dates, sur lesquelles tous les observateurs pouvaient s'accorder. Il ne peut plus en être ainsi dans le cas Einsteinien. Considérons d'abord deux évènements A et B supposés reliés *par un lien du genre temps*, avec B dans le futur de A. Et prenons un exemple bien connu - les Jumeaux de Langevin (voir not. le livre déjà cité du conférencier, Au delà de l'espace et du temps, pp 77-79). Le premier évènement est le départ - à partir d'une base terrestre - d'un personnage pour un voyage dans l'espace. Le second évènement est son retour, sur la même base. Ce personnage a emporté dans le vaisseau spatial une horloge semblable à celle utilisée sur la base. Qu'en est-il de l'évaluation de la durée du voyage ?

1. Pour évaluer cette durée, le voyageur va consulter son horloge : il fait la différence entre la date lue à l'arrivée et celle lue au départ, qu'il avait bien sûr notée !

2. Pour évaluer la durée du même voyage, les responsables de la base ont fait de même, mais avec l'horloge restée sur place

Eh bien les deux évaluations conduisent à des résultats différents ! et celle faite par les responsables de la base sera dans tous les cas supérieure à celle faite par le voyageur.

### **Durées propres et lignes d'univers**

Les voyageurs de Langevin illustrent un état de fait général : entre deux événements liés par un lien du genre temps, il existe une multiplicité de lignes d'univers. La ligne d'univers du laboratoire, la ligne d'univers du voyageur, et bien d'autres encore. En l'occurrence, une infinité de lignes. Et pour chacune d'elles une durée propre, mesurée par l'horloge censée être "emportée" par l'observateur ou liée à l'objet concerné. Mais point n'est besoin d'horloge, qui est simplement un instrument de mesure : *la durée propre est une grandeur attachée à la ligne d'univers considérée*. C'est une sorte de longueur, dans une géométrie particulière. Elle se calcule, comme toute longueur de courbe, par la somme de brins infinitésimaux, dont la longueur élémentaire est donnée par la *métrique* de l'Espace-Temps.

Une autre façon de dire : les durées propres entre deux événements sont les durées mesurées par les observateurs dont les lignes d'univers joignent ces événements ; donc qui ont été au "*rendez vous*" des deux événements.

La multiplicité des lignes d'univers entre A et B entraîne donc une multiplicité de durées propres : parmi ces durées, il y en existe nécessairement une qui se trouve être la plus grande. Cette durée maximale correspond à une ligne d'univers - peut être parfois à plusieurs - particulière. La théorie de la Relativité énonce que cette ligne particulière de durée maximale correspond à celle d'une particule - d'un objet, d'un observateur - *se déplaçant dans un mouvement libre*, donc non soumis à une force quelconque. Toutes les autres lignes vont être associées à des mouvements subissant une force exercée sur l'objet concerné, donc accélérés ou décélérés à un moment donné.

Cette constatation éclaire ce qui a été dit précédemment à propos des voyageurs de Langevin. Le laboratoire, resté sur Terre, accompagne le mouvement libre de cette dernière (rappelons ici que dans la Relativité générale, la "force de gravitation" exercée par le Soleil sur la Terre n'est justement pas une force, juste une modification de la métrique). Le voyageur, au contraire, subit l'accélération de départ (poussée initiale des réacteurs), une décélération à l'arrivée, et, en cours de route, un changement de direction, qui lui aussi sera provoqué par la mise en route d'un réacteur. La durée mesurée sur la Terre entre le départ et l'arrivée de la fusée, durée propre d'un mouvement libre, est maximale et donc plus grande que celle du voyageur.

### **Le cas des photons.**

Considérons enfin un cas non évoqué dans ce qui précède, où seuls étaient pris en compte des objets massifs: cette fois celui de deux événements dont le lien relève du genre lumière : la ligne d'univers pouvant les relier est celle d'un photon, un grain lumineux, sans masse. La durée propre entre ces deux événements, mesurée en quelque sorte sur l'horloge du photon, est *nulle*. Mais le mouvement du photon est un mouvement libre : la valeur nulle est une durée maximale, la ligne d'univers joignant les deux événements est alors unique, sauf cas particuliers (cas des lentilles gravitationnelles) ou pathologiques

### **Pour terminer : nul n'entre ici s'il n'est géomètre**

On l'aura compris, l'Espace-Temps - *la structure mathématique rendant compte de la façon dont peuvent s'organiser entre eux les événements* - n'est plus chez Einstein le produit cartésien d'un espace à trois dimension et d'un temps. Ce n'est même pas ce qu'on appelle en Géométrie un *espace fibré*, qui préserverait un axe temporel privilégié, tout en abandonnant l'idée d'un espace comme réalité fixée une fois pour toute. C'est une *variété différentielle à quatre dimensions*, structure géométrique complexe, mélangeant de façon intime coordonnées spatiales et temporelles, dont la métrique et les géodésiques - les lignes d'univers correspondant aux mouvements libres - fournissent la charpente. Pour mieux imaginer de telles structures, les représentations *des cônes de lumière*, c.a.d. faisceaux des géodésiques passant par un événement donné, sont très employées - cf par exemple les pages 389 à 396 du livre de R. Penrose déjà cité - et fournissent des représentations visuelles très parlantes.

## **B. Résumé de la Discussion**

Comme déjà dit, la discussion après l'exposé de M.L-R a été riche. Les points sur lesquels elle a porté - notion d'évènement, physique et géométrie, flèche du temps et statut du temps cosmique, Espace-Temps hors de la Physique méritent quelques incidentes:

Ainsi que je l'annonçais, la discussion suscitée par l'exposé du conférencier s'est articulée, me semble-t-il, autour de quatre points :

- La notion d'évènement
- Physique et Géométrie
- Irréversibilité, flèche du Temps, statut du temps cosmique
- Espace-Temps hors de la Physique.

Je reprends ici ces différents points. Certains éléments n'ont été évoqués que très brièvement. J'ai éprouvé le besoin de les replacer dans un contexte élargi, et sans hésiter parfois à faire part de mes propres interrogations. Pour ce faire, les ouvrages déjà cités dans le premier billet m'ont servi d'appui. J'y rajouterai deux cours consacrés à la cosmologie et à la Relativité générale, savoir :

- Yannick Mellier, *Cours de Cosmologie, Observations, modèles d'Univers et paramètres cosmologiques*. Institut d'Astrophysique de Paris, février 2009
- Ericourgoulhon, *Relativité générale, Cours M2*. Observatoire de Paris, 2010

### **La notion d'évènement.**

Une courte discussion sur cette notion a démarré avec une remarque d'un des participants en cours d'exposé, s'assurant que M.L-R parlait d'*événements ponctuels*. La réponse fut positive. Mais non sans une certaine hésitation, me semble-t-il, amenant le conférencier à parler d'évènement "virtuel", pour désigner les points de l'Espace-Temps où il ne se passe rien. Mais qu'est-ce qu'un évènement ?

Wikipédia, dans l'article [évènement](#), assimile, dans le contexte de la théorie de la Relativité, cette notion comme "un point dans l'Espace-Temps". Ce qui clôt le débat, peut être trop rapidement. Quant aux autres acceptions en Sciences, le même article renvoie à un changement *substantiel* dans la valeur d'une grandeur intervenant *dans un intervalle de temps bref à l'échelle de l'expérience*. Et plus largement un fait aux conséquences importantes. L'image qui vient parfois aussi à l'esprit est celle d'une *rencontre*, la rencontre de deux trajectoires, le point d'intersection de deux lignes d'univers : la fusion de deux galaxies, le rendez vous de deux amis place Saint Michel et la collision de deux protons au [LHC](#).

La discussion sur ces questions n'a pas repris à la fin de l'exposé. Il serait intéressant - me semble-t-il - d'en poursuivre le cours, afin d'éclaircir nos idées sur la *relation entre la notion d'évènement et celle de point dans l'Espace-Temps* :

1) *Qu'est ce qu'un évènement* ? Entre les deux notions, celle d'évènement et celle de point dans l'Espace-Temps, quelle est la plus fondamentale ? Et s'il s'avérait qu'il faut donner une priorité à l'évènement, comment le définirait-t-on ? je me hasarde : l'élément commun minimal qui apparaît dans les différentes acceptions de ce terme d'évènement, est la *constatation d'un changement* : un évènement manifeste que quelque chose s'est modifié. Parler ainsi suppose en arrière-plan l'écoulement d'un temps, mais peut être est-il possible de s'en abstraire. Dire par exemple qu'une certaine grandeur (taille, forme, température...) mesurée le long de la ligne d'univers d'un certain objet, n'est pas constante ; et que cette "nonconstance" la transforme effectivement - du point de vue de cette grandeur - en une séquence d'évènements.

Dans cette perspective, quelle(s) grandeur(s) peut-on considérer pour apprécier les évènements que subit un objet ; à priori, non pas sa position, à savoir ses quatre coordonnées spatio-temporelles, s'il est animé d'un *mouvement libre* ; nous savons en effet que dans cette condition aucun changement physique *interne* ne se manifeste comme conséquence de ce mouvement (cf. principe de relativité). Mais par contre, peuvent être utilisées comme grandeurs les distances qui le séparent d'autres objets, mesurées à partir du signal qu'il reçoit d'eux (et qui sont donc dans son passé) ; et aussi ses grandeurs physiques internes, liées à ses degrés de liberté, sa température par exemple.

2) *la notion même de point*. La naissance d'une étoile sera vue comme un évènement ponctuel par les cosmologistes étudiant l'émergence des grandes structures de l'univers, et comme un long processus par les astrophysiciens étudiant en détail la formation des systèmes stellaires. Le caractère *ponctuel* d'un évènement est bien *relatif* : il dépend des "résolutions" spatiales et temporelles avec lesquelles cet évènement est observé. Or dans la théorie de la Relativité, cet aspect disparaît ou plutôt est considéré comme relevant de l'échelle d'appréciation et de modélisation des phénomènes. Et la réalité

d'évènements de *taille spatiale et temporelle infinitésimale* est admise. Mais cette réalité, on le sait, peut être questionnée. Ces problèmes, liés à la convergence entre Relativité générale et Physique quantique, étaient hors du champ de l'exposé et n'ont pas été abordés.

### Physique et Géométrie

*Il existe pourtant bien un "étalon" de mesure du temps.* Cette remarque a été faite en tout début de discussion. Rappelons qu'étalonner une horloge, c'est faire en sorte que la durée d'une *seconde*, sur cette horloge, corresponde à la "*seconde étalon*", telle que définie dans le Système International d'unités. La *seconde étalon*, on le sait, est depuis 1967 un certain multiple de la période du rayonnement qui résulte de la transition entre deux niveaux d'énergie de l'atome de Césium 133. Concrètement, le **temps atomique international** (TAI) est une moyenne des indications obtenues à partir d'un ensemble d'*horloges atomiques*, réparties dans différents laboratoires.

Si je place la remarque sur l'étalon de temps sous le titre générique de Physique et Géométrie, c'est qu'elle sous-tend - me semble-t-il - une question que l'on peut effectivement se poser. Car nous sommes confrontés à deux notions du temps écoulé :

- une notion pratique : celle d'une horloge atomique - système physique concret - affichant la progression d'une certaine grandeur, savoir le nombre de secondes écoulées depuis sa mise en route.
- une notion théorique, assimilant le temps écoulé à une grandeur géométrique, savoir la longueur d'une portion de la ligne d'univers de l'objet transportant l'horloge ; longueur calculée dans la métrique de l'Espace-Temps, métrique qui dépend elle même du champ de gravitation ambiant. Alors, par quel "miracle", le temps (propre) écoulé  $t$  affiché par l'horloge se trouve-t-il mesurer la longueur  $s$  de la portion de ligne d'univers associée ? Après tout, on pourrait imaginer une relation plus complexe entre les nombres  $t$  et  $s$  : par exemple, une relation manifestant un certain dérèglement aléatoire de l'horloge, le temps mesuré  $t$  tantôt avançant, tantôt reculant, par rapport au "vrai" temps propre  $s$ . On s'en doute, la réponse à une question de ce type se trouve dans la cohérence entre observations et théorie : la théorie est ici la Relativité, portant en avant les structures d'Espace-Temps et de métrique, et donnant une *interprétation* du comportement des horloges. La cohérence réside dans le fait que, dans les multiples observations qui ont pu être faites, cette interprétation n'a jamais été mise en défaut. Mais cette réponse épuise-t-elle la discussion ?

### Irréversibilité, Flèche du temps, temps cosmique

Un participant a fait remarquer qu'on n'avait pas encore parlé de *la flèche du Temps*. Sa remarque a initié une discussion assez longue, laquelle s'est concentrée sur les questions d'irréversibilité, avec leur arrière-plan thermodynamique, l'inévitable croissance de l'entropie. Mais avant d'aborder ce thème, je reviendrai sur un point qui n'a été que très brièvement évoqué par le conférencier, celui du *temps cosmique*. Beaucoup d'entre nous ont entendu parler d'un *âge de l'Univers*, environ 14.7 milliards d'année, de l'âge du système solaire, de celui de la Terre, etc. De telles expressions laissent penser qu'il existe bien malgré tout un temps absolu, permettant de dater différents évènements cosmiques, postérieurs au "Big Bang". Et toute consultation rapide des équations de l'expansion de l'Univers, dans les ouvrages de Cosmologie, fait apparaître un  $t$  représentant un temps, dont on a envie de comprendre le statut.

Quel est donc ce *temps cosmique* ? Peut-on le considérer, au moins en première approximation, comme le temps propre d'un quelconque observateur ?

### Temps cosmique dans un univers parfaitement isotrope et homogène.

La réponse à la question repose sur les conséquences d'une hypothèse centrale de la Cosmologie actuelle. Hypothèse appelée *principe cosmologique*. Ce principe s'appuie sur deux éléments :

1. *un fait d'observation* ; lorsque nous regardons le ciel, toutes les directions se ressemblent, nous paraissent équivalentes : aucune de ces directions ne laisse voir *en moyenne* - et après correction de certains biais - des structures qui seraient spécifiques à l'une d'entre elles : par exemple, une région du ciel significativement plus dense que les autres. Nous disons alors qu'autour de nous, l'espace est *isotrope*. Ce fait d'observation pourrait bien sûr un jour être infirmé par des observations plus précises ; mais jusqu'à présent, malgré des progrès fantastiques dans la finesse et la profondeur de ces observations, il n'a jamais été mis en défaut.

2. *une hypothèse*, celle qu'il en est de même pour *tout observateur*, quel qu'il soit. Si nous pouvions communiquer avec un extra-terrestre, même très lointain, il nous ferait part de la même constatation. On dit que l'espace est *homogène*. Le principe cosmologique a permis aux chercheurs d'écrire la métrique et les équations de la dynamique globale de l'Univers, en injectant dans les formules de la Relativité générale les simplifications inhérentes à ce principe. L'expansion de l'univers est - dans cette métrique et cette dynamique simplifiée - vue comme celle d'un fluide restant uniformément réparti dans un espace qui se dilate.

On peut alors imaginer des observateurs attachés à ces particules de fluide, autrement dit immobiles par rapport à la matière qui les entourent. De tels observateurs suivent alors le mouvement de ce fluide ; on conçoit bien que dans ces conditions d'uniformité ils vivent tous la même histoire : il n'y a pas de raison pour que leurs *temps propres* respectifs soient différents. Ce temps propre commun à tous ces *observateurs fondamentaux* constitue le temps cosmique.

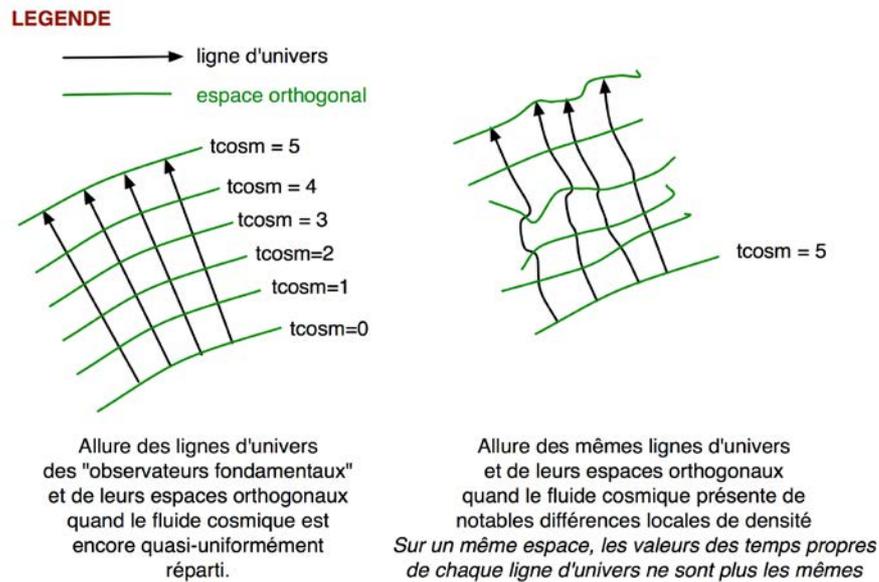
En termes géométriques, l'Espace-Temps conforme au principe cosmologique possède une métrique particulière, dite **FLRW**, des initiales des scientifiques qui l'ont découverte dans les années 1920, avec parmi eux l'astrophysicien belge Frédéric Georges Lemaître. Il possède bien une structure *feuilletonnée* : les feuilles représentant chacune un espace en trois dimensions, s'accrochent au temps  $t$  sur le tronc temporel commun et unique du temps cosmique.

### **Temps cosmique dans l'univers réel.**

Mais l'Espace-Temps décrit par les équations FLRW n'est qu'une approximation de l'Espace-Temps réel. Le principe cosmologique n'exclut pas des variations locales, il n'impose qu'une uniformité statistique. La répartition quasi-uniforme du fluide cosmique, supposée celle des premiers temps, se transforme nécessairement - sous l'effet de la gravitation - en une distribution de matière présentant des différences de densité de plus en plus accentuées, pour aboutir à l'émergence de grandes structures hébergeant la majorité des galaxies. Certains des "observateurs fondamentaux" évoqués précédemment, attachés à la matière locale et suivant donc son mouvement, se retrouvent en conséquence, "au bout d'un certain temps", dans des espaces relativement vides, et d'autres au contraire dans des espaces très denses. Ils ne "vivent" plus la même intensité gravitationnelle, bref ne vivent plus la même histoire. Leurs temps propres respectifs ne sont donc plus synchronisés. Imaginons que les observateurs fondamentaux aient pu synchroniser leurs horloges respectives alors que la répartition du fluide cosmique était encore très uniforme. Cette synchronisation va subsister pendant un moment, mais des différences vont se faire jour et grandir peu à peu : les horloges des uns vont avancer, celles d'autres retarder, ces avances et ces retards restant globalement répartis au hasard, conformément au principe cosmologique toujours en vigueur.

Pour cerner précisément cette répartition des avances et des retards de temps propre entre observateurs, il faut choisir, sur leurs lignes d'univers respectives, les points où les horloges sont consultées. Des considérations géométriques - techniquement l'existence d'espaces "orthogonaux" à ces lignes d'univers, cf le schéma ci-après - permettent de faire ce choix : les points choisis se situent à l'intersection des lignes d'univers et de ces espaces orthogonaux. Chacun de ces espaces - qui ne se recoupent pas, hors cas particuliers - est donc associé à un ensemble bien défini de valeurs de temps propre écoulé, lues sur les horloges : on peut alors, sur cet ensemble, faire diverses statistiques : moyenne, écart-type, valeur maximale et minimale. J'ai cru comprendre, mais c'est à valider, que la valeur atteinte du temps cosmique était justement cette valeur maximale, en fait celle d'un observateur qui *globalement*, depuis le début, s'est trouvé dans les conditions de gravitation les moins intenses et donc dans les régions les moins denses.

### **Temps cosmique : Schéma de l'articulation lignes d'univers/espaces orthogonaux**



### Flèche du temps et irréversibilité

Dans la structure géométrique d'Espace-Temps présentée ci dessus, les espaces orthogonaux se classent sans ambiguïté les uns par rapport aux autres, du passé vers le futur ; cet ordre total reflète l'orientation commune des différentes lignes d'univers utilisées dans leur construction. Tel que défini, le temps cosmique se modifie, d'un espace **A** à un espace **B** situé dans son futur, en progressant de la *valeur maximale* sur **A** à la *valeur maximale* sur **B** et donc, mathématiquement, *ne peut qu'augmenter*. Si je ne fais pas d'erreur, cette structure géométrique, et ses conséquences sur le temps cosmique, représente bien la dynamique de notre univers en expansion, et donc *fonde une flèche du temps*. Notons cependant que M.L-R a évoqué lors de la discussion la possibilité théorique, pour des lignes d'univers, de boucler sur elles mêmes - formant ainsi des *boucles temporelles*-.

Selon M.L-R, et contrairement à ce que l'on pense spontanément, aucun paradoxe logique ne surgit. Mais la possibilité *physique* de tels univers est néanmoins discutée. S'il en est ainsi, nous voilà bien devant deux notions de flèche du temps :

- la flèche du temps qui vient d'être évoquée, de nature cosmologique, sous-tendant l'histoire de l'univers sur des milliards d'années.
- la flèche du temps à notre échelle, celle par exemple qui nous fait naître, vivre et mourir, sans possibilité de retour en arrière. La flèche du temps qui désorganise un "système fermé" de l'ordre vers le désordre, en augmentant irrémédiablement son entropie.

Une question vient alors immédiatement à l'esprit, celle de l'existence d'une relation intime entre ces deux "flèches". Elle a bien été abordée dans la discussion, mais d'une manière rapide et un peu elliptique, en référence à diverses démonstrations de la croissance nécessaire de l'entropie.

### Bref rappel : la notion d'entropie

La croissance de l'entropie d'un système matériel isolé exprime le sens dans lequel peut évoluer ce système, soumis à des contraintes *macroscopiques* déterminées - par exemple rester enfermé dans un récipient de volume donné : l'évolution l'amène inévitablement à cheminer de *configurations moins probables* vers des *configurations plus probables* ; les configurations dont il s'agit ici sont *des ensembles* bien définis d'états *microscopiques*, des régions dans l'espace de ces états ; par état microscopique, il

faut entendre *une description complète* du système dans ses moindres détails, sans omettre aucune des possibilités dans lesquelles il peut se présenter au monde (ses degrés de liberté). L'état microscopique d'un certain volume de gaz comprendra ainsi la position et la vitesse de chacune de ses molécules. Un exemple souvent donné, pour faire mieux saisir l'entropie - présenté ici d'une façon sommaire - est le suivant : on considère un gaz enfermé dans un récipient, et on compare les probabilités de deux configurations : celle dans laquelle le gaz occupe la totalité du récipient ; celle où il occupe une certaine moitié délimitée a priori. La probabilité qu'une molécule déterminée de ce gaz se situe dans cette moitié est évidemment  $1/2 = 0.5$ . La probabilité que l'ensemble des N molécules soient regroupées dans cette même moitié est  $0.5$  à la puissance N : le nombre des molécules étant très grand - plusieurs milliards - cette deuxième probabilité sera "ridiculement faible".

La physique classique - contrairement à la physique quantique - décrit les interactions entre molécules du gaz - les chocs entre molécules - de façon déterministe : dans ces conditions, le cheminement de ce gaz, à travers l'ensemble de ses états microscopiques possibles, ne comporte *aucun aléa*. Mais à cause de la multiplicité des interactions à l'oeuvre et de leur indépendance statistique, ce cheminement apparaît en fait comme une marche au hasard. On conçoit bien alors que le gaz, ne subissant dans son évolution aucune direction imposée a priori, a toute chance de rester peu de temps dans des configurations très peu probables, et qu'il passera au contraire le plus clair de son temps dans les configurations dont la probabilité est quasiment égale à 1.

L'impossibilité de "retour en arrière", l'irréversibilité de l'évolution, apparaît alors plutôt comme une "*improbabilité*". Elle reste cependant théoriquement possible : considérons l'état microscopique du gaz - savoir je le rappelle les positions et vitesses de toutes ses molécules - qui est atteint à un moment donné ; imaginons alors une expérience de pensée, dans laquelle on considère l'état microscopique *opposé*, obtenu avec les mêmes positions mais en inversant la direction des vitesses, aucune autre modification n'ayant par ailleurs été faite, ni dans le récipient, ni à l'extérieur. La mécanique individuelle des molécules étant supposée réversible, il se produira bien dans ces conditions un retour en arrière, le gaz suivant exactement le chemin inverse de celui emprunté à l'aller.

Mais en pratique, un tel retour en arrière ne se constatera jamais :

- l'état opposé considéré, celui qui conduit au retour en arrière, constitué des valeurs exactes des positions et des vitesses des milliards de molécules, n'a qu'une chance infinitésimale de se rencontrer spontanément *à priori*.

- la seule manière de rencontrer cet état opposé est de *le préparer* - i.e. de le construire, par une intervention utilisant un quelconque procédé physique. Outre le fait qu'un tel procédé n'existe pas nécessairement, on peut penser qu'il ne réussirait pas à une reconstruction parfaite ; l'évolution ultérieure du gaz ne suivra pas la voie étroite espérée, le ramenant à sa configuration initiale. Elle aura toute chance au contraire de suivre la ligne de croissance entropique, vers des configurations hautement probables.

### *De l'entropie locale à l'entropie de l'univers*

Les raisonnements précédents ne sont qu'une toute première approche des notions d'entropie et d'irréversibilité, beaucoup de questions subsistent qu'il serait hors de propos de développer ici. Les discrétisations des états possibles et divers aléas, introduits par la physique quantique, interfèrent en outre dans cette problématique. Mais, si j'ai bien compris (cf les explications avancées par Roger Penrose dans le livre cité au billet précédent, pages 665-711), la cohérence de la notion d'entropie exige 1) que l'on puisse parler de *l'entropie de l'univers* ; 2) que l'univers obéisse lui aussi au second principe de la thermodynamique, savoir une augmentation continue de cette entropie depuis le "Big Bang", et l'irréversibilité de son évolution.

De fait, les "transferts d'entropie" se font jour sur des échelles auxquelles on ne pense pas nécessairement, au vu des exemples de thermodynamique donnés habituellement. R. Penrose donne ainsi l'exemple des transferts d'entropie entre le Soleil, la Terre et l'espace : la Terre, *reçoit du Soleil une énergie de faible entropie* - et *restitue dans l'univers une énergie égale* - puisque la Terre est en

équilibre thermique - mais *d'entropie plus élevée* ; le rayonnement du soleil dans le domaine du visible est en effet plus concentré en fréquence que le rayonnement infrarouge rejeté. La *perte* d'entropie qui en résulte pour la Terre serait une condition nécessaire de l'émergence du vivant sur notre planète et aussi de son maintien.

La question se pose alors de savoir comment définir cette entropie de l'univers aux différentes étapes de son existence. Une part de cette entropie est contenue dans la matière ordinaire, sa localisation dans l'espace, les températures et les mouvements qui l'animent. Mais d'autres composantes entrent en jeu : la part de l'entropie contenue dans la lumière, mais aussi celle contenue dans les structures géométriques de l'Espace-Temps, la gravitation, les trous noirs. Aussi bien, l'explication de la faiblesse - nécessaire à l'application du second principe - de l'entropie de l'univers à ses débuts n'est elle pas du tout simple.

La discussion amorcée par les participants sur ces questions fondamentales et complexes n'a pu se poursuivre. *Il serait intéressant - c'est une suggestion que j'avance - d'organiser une des réunions mensuelles de l'AEIS autour de ce thème, avec un conférencier spécialisé.*

### **Espace Temps hors de la Physique**

Le tour de table effectué lors de la discussion a donné la parole à des personnes impliquées dans des disciplines ou des activités très diverses.

Une première remarque a été faite, dans un registre interdisciplinaire. Elle comparait la difficulté de *définir la Vie* - thème abordé lors du colloque organisé par l'AEIS en février 2014 - à la difficulté de *définir le Temps*. Peut-être cette remarque sous-tendait-elle une question explicitée lors de ce colloque, savoir la question de l'utilité des définitions abstraites : plutôt que de s'acharner à élaborer de telles définitions, faisait remarquer un participant, n'est-il pas peut-être plus directement productif d'étudier les propriétés empiriques des notions concernées ?

Un autre des points soulevés se résume bien dans cette interpellation soulevée par une participante, *"et l'humain dans tout ça ?"*.

Que peut-on faire, quelle leçon tirer dans notre vie de ces nouvelles conceptions du temps ?

Plus largement, sont-elles utiles aux autres disciplines scientifiques ? Les opinions des participants semblent partagées : les uns pensent que non et que leur unique domaine d'application est la Physique et les techniques qui lui sont liées ; d'autres, comme le conférencier, pensent que oui : M.L-R a ainsi mis en pratique cette conviction en collaborant à des réflexions interdisciplinaires, dans des domaines - comme la géologie, la paléontologie - où le temps, les procédures de datation, l'analyse de l'ordre des événements, jouent un rôle important. Personnellement j'ai exprimé l'idée que les points de vue sur l'univers apportés par les sciences, leurs avancées et leurs questionnements, devraient irriguer davantage la culture de tous.

Les échanges en sont restés là.

**IV ) EXAMEN d'une nouvelle candidature:**

Une nouvelle demande d'adhésion à l'AEIS nous est parvenue émanant de Vincent FLEURY, Directeur de Recherche au CNRS : Chef d'équipe Biofluidique au laboratoire Matières et Systèmes Complexes de l'Université Paris Diderot. Il est ancien élève de l'École Polytechnique et possède un doctorat en Physique de la Matière Condensée.

Après lecture de sa lettre de motivation et de son CV la candidature est soumise au vote des membres de l'AEIS. La candidature a été acceptée à l'unanimité des participants.

Après cette très riche séance, nos travaux prennent fin.

Irène HERPE-LITWIN

# Compte-rendu de la Commission scientifique interne de préparation du colloque

## « Ondes, Matière et Univers »,

Tenue le 7 Avril 2014.

Membres : Gilbert Belaubre, Gilles Cohen-Tannoudji, Alain cordier, Claude Elbaz, , Jean-Pierre Françoise, Michel Gondran, Victor Mastrangelo, Pierre Nabet, Jean Schmets, Alain Stahl.

Invitée : Irène Herpe-Litwin

Rapporteur : Gilbert Belaubre

.....

En vue de cette séance, des propositions avaient été transmises par nos collègues Gilles Cohen-Tannoudji, Alain Cordier, Claude Elbaz et Michel Gondran. Le Président avait demandé à Gilbert Belaubre et Pierre Nabet d'examiner l'opportunité d'une session consacrée aux phénomènes quantiques en Biologie et de faire des propositions à cette occasion.

Un avant-projet de programme avait été diffusé par Victor Mastrangelo pour susciter des commentaires.

La séance est ouverte à 16 heures.

Le Président rappelle l'objet de la réunion : rassembler des éléments et discuter des choix concernant les lieux et dates du colloque, de son contenu, du choix des conférenciers, et d'esquisser les éléments permettant ultérieurement de préciser son budget.

Il insiste donc pour que chacun, sur la base du projet de programme, fasse des propositions précises de conférenciers dont la compétence soient garanties par des articles publiés par des revues à comité de lecture.

Il donne la parole successivement à Claude Elbaz, Gilbert Belaubre, Alain Cordier, Michel Gondran, et Gilles Cohen-Tannoudji.

### ➤ C. Elbaz

L'ébauche de programme envisagé, appelle les remarques et suggestions suivantes :

#### **Titre :**

Le titre proposé me paraît très bien choisi pour résumer le contenu, et l'orientation, du colloque. En inversant les termes du titre proposé initialement (L'univers des ondes), il souligne l'importance accordée aux ondes dans l'univers. On en a déjà eu un début de confirmation dans l'exposé qu'avait fait **François Bouchet**, où les ondes électromagnétiques servaient à la fois de témoins de l'origine de l'univers, et de moyens pour représenter une image pour sa description d'ensemble actuelle.

L'insertion de *matières* entre *ondes* et *univers* traduit une conséquence théorique du modèle standard. La matière y joue un rôle central certes, mais, avec sa masse, et sa vitesse inférieure à celle de la lumière, elle a émergé à partir du champ relativiste originel sans masse, indifférencié avec les quatre interactions unifiées, et qui se propageait à vitesse de lumière. Ces mêmes propriétés sont également cohérentes avec le programme d'Einstein, dans lequel, en prolongement de la relativité générale, il proposait de baser la physique, et en particulier la matière, sur un champ relativiste unique qui se propage à vitesse de lumière.

Mais le titre proposé rappelle également la problématique de la dualité onde-particule en physique, et celle de la partie et du tout dans les sciences, ou plus généralement de l'individuel et du collectif.

#### **Dualité ondes/corpuscule:**

Par exemple, la dualité onde-particule a joué un rôle important dans les recherches de Serge Haroche : on en trouve la confirmation dans différentes conférences, disponibles sur internet, comme celle du 9 juillet 2013 au Palais Farnèse à Rome, intitulée « La dualité onde-particule », ou encore dans son introduction à la leçon inaugurale de Jean Dalibard au Collège de France le 18 avril 2013, intitulée « Atomes et rayonnement ». A son tour, il y fait explicitement référence, en particulier avec les ondes de de Broglie pour la matière.

Le prix Nobel de 2012 a été attribué conjointement à Serge Haroche et David Wineland pour leurs approches expérimentales complémentaires : David Wineland piège des atomes chargés électriquement, ou des ions, et les contrôle et les mesure grâce à des particules de lumière, Serge Haroche, lui, piège des photons, en envoyant des atomes dans le piège.

En conséquence, il apparaît que la dualité onde-particule sert implicitement de fil conducteur pour les différents exposés du colloque.

### **A la frontière de l'optique.**

L'optique étudie les propriétés des ondes lumineuses, et par extension les ondes en général comme les ondes de matière avec le microscope électronique, par exemple .

En dialoguant avec les conférenciers envisagés, nous pourrions orienter leurs interventions dans un sens qu'eux mêmes ont évoqué, ou souligné, celui de *l'optique du futur*, comme on peut le vérifier sur internet

**Gérard Mourou** : outre les techniques d'accélération avec les lasers, il pourrait présenter les différentes activités de recherche, et développement du Laboratoire d'Optique Appliquée ;

**Alain Aspect** : Plutôt que le programme EPR, qui date maintenant, on pourrait plutôt lui demander de présenter l'optique du futur, comme on peut le visionner sur internet.

**Christophe Salomon** (SYRTE) pourrait présenter l'importance des améliorations futures en métrologie. (Pour mémoire, le remplacement des étalons matériels d'espace et de temps par les étalons électromagnétiques basés sur une longueur d'onde et la vitesse de la lumière contribue à la validation du programme d'Einstein.)

Nous pourrions y ajouter :

**L'Holographie** : en contactant Yves Gentet, ingénieur, (Bordeaux) qui serait le spécialiste français. [Atelier d'art et holographie (06 66 73 14 75)]

**La Photo ultra rapide** : Le MIT (Pr Ramesh Raskar) a mis au point une caméra qui peut filmer à la vitesse d'un billion d'images par seconde. Le système permet d'étudier jusqu'au déplacement de lumière elle-même, grâce à une méthode de traitement mathématique. Voir sur « photo ultra rapide MIT » sur internet.

Ce qui conduit aux

### **Liens entre mathématiques et physique.**

Nous pourrions demander à **Yves Meyer** (ENS Cachan, Académie des Sciences) de présenter les ondelettes. « Les liens établis par Yves Meyer entre la théorie des ondelettes et la théorie des opérateurs lui ont permis de développer de nouvelles techniques avec des conséquences de grande portée dans de nombreux domaines scientifiques (théorie du signal, médecine, astronomie, etc.) ainsi que dans la vie pratique. Ainsi, les algorithmes modernes utilisés dans la compression d'images de films (JPEG2000), ou le traitement des images du satellite spatial Herschel, sont directement issus d'ondelettes introduites par Yves Meyer. »

#### ➤ **G. Belaubre.**

*LE QUANTIQUE EN BIOLOGIE*

*G. Belaubre ,*

*Avril 2014*

*P. Nabet ,*

*Mai 2014*

*En Physique statistique, l'interprétation quantique des phénomènes naturels est fréquemment utilisée et souvent donnée en parallèle avec l'interprétation classique. Mais il s'agit de phénomènes macroscopiques pour lesquels le projet d'une représentation à partir des objets élémentaires est hors de portée.*

*En revanche, lorsqu'on étudie les comportements des particules subatomiques , seule la physique quantique est à l'œuvre. Il s'agit alors , soit de phénomènes où des particules changent d'état quantique,( et c'est le cas dans la plupart des phénomènes naturels ) , phénomènes énergétiques caractérisés par le changement d'état quantique d'un ou de plusieurs électrons, soit de phénomènes spécifiquement*

quantiques comme les phénomènes de cohérence, , généralement éphémères dans les phénomènes naturels, mais que les physiciens maîtrisent bien aujourd'hui, comme les phénomènes d'interférence entre systèmes ondulatoires, ou comme les phénomènes d'intrication étudiés sur des paires de particules issues d'un événement énergétique (collision par exemple produisant des paires de photons intriqués).

Avec le développement important de la physique statistique, les phénomènes biologiques ont été largement abordés et expliqués par la chimie et la physique, (principalement la physique statistique), mais la richesse des morphogenèses et la découverte de « l'ordre génétique » a donné lieu, au milieu du 20<sup>ème</sup> siècle, à des interprétations superficielles qui sont désormais contestées : la stéréospécificité mettant en cause des macromolécules figées, jugée simpliste au regard de la complexité profonde des interactions de nuages électroniques, et la « téléonomie » mal comprise, espèce de finalisme aristotélicien, dont l'interprétation statistique gaussienne des phénomènes élémentaires très nombreux se résout en des moyennes très stables et des écarts-types très faibles, induisant ainsi ce déterminisme apparent. Il n'en reste pas moins vrai que l'examen isolé de chacun de ces phénomènes biologiques semble faire apparaître un but, et c'est dans ce sens que le terme de téléonomie a été employé.

Vers la fin du 20<sup>ème</sup> siècle, des moyens d'investigation nouveaux et performants, ainsi que des avancées mathématiques, ont permis d'approfondir la compréhension des phénomènes biologiques principalement dans trois directions :

---Une interprétation au niveau des nuages électroniques des forces de cohésion chimiques, depuis la liaison covalente, jusqu'aux forces de Van Der Waals en passant par les forces hydrophobes.

---Une recherche puissante afin de mettre en évidence les interactions typiquement quantiques qui seraient à l'origine de ces phénomènes.

---L'utilisation des mathématiques de la mécanique quantique (en particulier l'équation de Schrödinger), pour prévoir des applications en biochimie.

Il est vrai que pour l'instant on a plus des conjectures que des résultats probants :

1 Concernant les interactions entre molécules ou les modifications de structures moléculaires, qu'il s'agisse de liaisons stables, d'adsorption, de « repliement », les conditions dans lesquelles les nuages électroniques provoquent ces événements appellent une compréhension au niveau électronique. Ainsi, dans la molécule d'eau, la contrainte du nuage électronique compensant la répulsion des noyaux protoniques impose à l'angle HOH une valeur de 104 degrés, de même le nuage électronique d'un bloc de métal est la cause de sa rigidité, de même les forces de Van der Waals, , résultantes des interactions entre nuages électroniques des molécules, provoquent toutes sortes de liaisons ou de répulsions qui engendrent des états de surface, des interpénétrations, des adsorptions ou répulsions, des complémentarités spatiales.

2 Plus spécifiquement dans les phénomènes biologiques mettant en œuvre des macromolécules, les forces de Van der Waals jouent un rôle primordial. Forces faibles lorsqu'elles sont en petit nombre (molécules à nombre limité d'atomes), elles donnent des liaisons extrêmement stables lorsqu'elles sont très nombreuses dans des macromolécules de plusieurs dizaines de milliers d'atomes (comme c'est le cas dans le maintien de la structure double hélice ou la topologie des acides nucléiques, ou encore de la conformation spatiale des protéines) mais elles peuvent aussi se dissocier très facilement sous l'effet d'une faible modification du milieu extérieure.

Ces processus ont été étudiés en détail, et cet acquis apporte un éclairage nouveau sur, en particulier, l'expression des gènes et les activités enzymatiques. Ces études poussent la précision jusqu'à la description détaillée des forces électroniques.

3 Prenant un autre point de vue, de nombreuses recherches en biologie ont lieu en utilisant la mathématique de la mécanique quantique, et en particulier l'équation de Schrödinger, pour non seulement comprendre mais aussi modifier dans un sens souhaité les activités biologiques en jouant sur les nuages électroniques dont les orbitales frontières. Ces recherches qui ont mené Fukui à partager le prix Nobel de chimie 1981 avec Woodward et Hoffmann (1), se sont poursuivies jusqu'à nos jours et l'attribution en 2013 du prix Nobel de chimie à Karplus, Levitt et Warshel (2).l

On n'est certes pas en présence de phénomènes typiquement quantiques, mais la profondeur de la représentation qui en résulte atteint le niveau quantique, et ce niveau d'interprétation mérite

*d'être évoqué, car il pourra servir d'introduction à de nombreuses présentations qui justifieront un programme ultérieur de l'AEIS.*

*Car bien des phénomènes de la physiologie sont déjà étudiés à ce niveau d'interprétation.*

*Mais d'autres phénomènes semblent échapper aux interprétations macroscopiques de la physico-chimie, et ceux qui les étudient en cherchent des interprétations quantiques.*

*Donnons deux exemples auxquels se réfèrent avec complaisance les auteurs qui écrivent sur ce sujet.*

*1 - La photosynthèse (3),*

*Certains microbes et algues, qui utilisent l'énergie solaire dans des dispositifs de transformation chimique atteignent un rendement strictement avéré de 95 pour cent, alors que les plaques voltaïques les plus évoluées atteignent actuellement à peine 25 pour cent.*

*Les chercheurs qui ont étudié ce résultat extraordinaire l'attribuent à un processus quantique qui guiderait les photons dans des micro-tubulures ad hoc. L'hypothèse de mise en cohérence des photons guidés par des structures moléculaires est une conjecture généralement adoptée.*

*2 - Magnétisme aviaire (4),*

*Des études effectuées sur des merles migrateurs ont montré que ces oiseaux possèdent une boussole interne qui leur permet de définir l'angle que doit suivre leur vol par rapport à la direction du champ magnétique terrestre.*

*Cette boussole a été analysée, et elle fonctionnerait de la manière suivante :*

*Dans l'œil de l'oiseau des molécules orientées possèderaient un nuage électronique interagissant avec le champ magnétique terrestre, et l'oiseau percevrait l'angle que fait sa direction de vol avec celle du champ magnétique terrestre. On est là dans des sensibilité extrêmes.*

*Si les chercheurs en sont, pour l'instant, à des études théoriques que les moyens techniques n'ont pas permis de valider, il est raisonnable de penser que des progrès prochains permettront d'une part d'étendre les domaines des spéculations théoriques, et d'autre part, d'apporter une moisson de résultats expérimentaux permettant de comprendre l'origine des phénomènes spectaculaires observés à l'échelle macroscopique.*

*C'est pour toutes ces raisons qu'il paraît judicieux de réserver à ces nouvelles recherches quelques communications dans le cadre de notre projet. Une communication d'ordre général serait la bienvenue. Elle pourrait porter sur l'interprétation au niveau électronique. Mais il faudrait aussi aborder le stade spécifiquement quantique, et pour cela, nous devrions avoir qu'une ou deux communications assez techniques apportant au moins des conjectures fortes, sinon des résultats définitivement avérés.*

*Bibliographie*

*1) Nobel lectures, December 8, 1981 Ed. The Nobel foundation 1981*

*The rôle of frontiers orbitals in chemical réactions by K. FUKUI Kyoto University Japan.*

*2) Nobel lectures December 8, 2013 Ed. The Nobel foundation 2013*

*Development of multiscale models for complex chemical systems : from H+H2 to Biomolecules, By M. KARPLUS Université de Strasbourg France.*

*3) Coherently wired light-harvesting in photosynthetic marine Algae at ambient température by G.D. SHOLES Nature, 463, 644-647 ; 2010*

*4) A model for photoreceptor-based magnetoreceptor in birds*

*by R.S. ADEM and K. SCHULTEN Biophysical journal 78, 707-7018, 2000 .*

➤ **Cordier.**

En l'absence d'Alain Cordier, V. Mastrangelo présente la proposition qu'il a reçue de lui.

Notre collègue propose que le programme comporte une conférence sur les ondes gravitationnelles. Il propose qu'elle soit confié au Professeur Patrice HELLO (LAL-Orsay), qui est impliqué dans les programmes Virgo et LISA.

➤ **M. Gondran.**

Michel Gondran propose un certain nombre de conférenciers :

1 -Luc Blanchet, CNRS, IAP

Il fait un cours sur la relativité Générale à l'ENS

Il a écrit en particulier un papier grand public avec Françoise Combes (de l'académie des sciences) sur "MOND avec ou sans matière noire.

MOND est une alternative possible à la matière noire

2 - Jan Broekaert (centre Leo Apostel) Universitat Brussel, Belgium

IL a proposé une transformée de Lorentz pour la RG dans l'optique de Poincaré:

"Poincaré Geometric Conventionalism and Relativity Principe: a physical perspective on GRT"

différents articles parues dans Foundations of Physics

Théodore JACOBSON, aujourd'hui aux USA, Université du Maryland, a travaillé à l'IAP

Il a écrit des articles sur l'éther d'Einstein Relativité Générale.

Et enfin, COUDERC, pour son expérience sur « les gouttes marcheuses, qui donne une bonne simulation de la quantification des trajectoires et de l'onde pilote.

### ➤ **G. Cohen-Tannoudji**

Gilles Cohen-Tannoudji présente une proposition globale comme référence aux articles majeurs d'Einstein de 1916, et en prolongement des manifestations organisées par l'IAP, la SFP et la BNF.

#### **Pourquoi faire référence aux deux articles d'Einstein de 1916,**

1. Théorie quantique du rayonnement (paru en 1917 dans *Physikalische Zeitschrift* mais d'abord publié en Suisse en 1916)
2. Les fondements de la théorie de la relativité générale (paru dans *Annalen der Physik*, en 1916) ?

Dans le premier article, Einstein achève la démonstration de la formule de Planck pour le rayonnement du corps noir qu'il avait amorcée en 1905, en intégrant le modèle de l'atome de Bohr pour décrire la matière en équilibre thermique avec le rayonnement émis et absorbé, et en montrant que les quanta d'énergie qui lui avaient permis de lever le paradoxe de l'effet photoélectrique sont des quanta de quadri-moment i.e. qu'ils ne portent pas seulement une énergie mais aussi une quantité de mouvement égale à l'énergie divisée par la vitesse de la lumière  $c$ . En fait on peut dire que cet article est la première ébauche de la théorie quantique des champs qui rend compte, pour la lumière, de la propriété de dualité ondes/corpuscules. Dans *La théorie quantique du gaz parfait*, écrit en 1925 (après l'article de Bose et la thèse de de Broglie), il étend cette dualité ondes/particules à la matière. Quant au second article, en tant que synthèse finale de la théorie de la RG comme théorie relativiste de la gravitation, on peut dire qu'il jette les fondements de la cosmologie moderne, la science de l'univers dans lequel la gravitation joue le rôle primordial. Ainsi, prendre ces deux articles comme référence à notre colloque correspond bien au titre que nous lui donnons.

#### **Proposition de partenariat avec la BNF et l'IAP**

Mais il se trouve que la communauté des astrophysiciens et cosmologistes voit dans les années 2015 et 2016 surtout une occasion de célébrer le centenaire de la théorie de la relativité générale. En effet, sur proposition de l'Institut d'astrophysique de Paris (IAP), la BNF organisera d'octobre 2015 à décembre 2015, une série de six conférences sous le titre *Les mécanos de la générale, cent ans après le théorie de la gravitation d'Einstein*. Ces conférences sont destinées à un public très large, mais elles seront faites par des spécialistes particulièrement qualifiés. C'est pourquoi je fais la proposition d'un partenariat, non limitatif, avec la BNF et l'IAP, pour nous intégrer à cette initiative, sous la forme d'un colloque scientifique, le colloque AEIS 2016 qui se tiendrait à la BNF dans la première semaine de février 2016, avec comme titre *Les mécanos (quantiques) de la générale, ondes, matière univers*, et avec comme objectif d'une part de faire le point des acquis de la révolution de la relativité et des quanta initiée par les deux articles d'Einstein,

et d'autre part de tenter de répondre à la question, *de savoir si nous ne sommes pas au début d'une nouvelle révolution scientifique.*

Un autre élément rend particulièrement judicieux la date que nous avons choisie pour notre colloque : comme nous l'a dit François Bouchet, en fin 2015, la totalité des résultats du satellite Planck auront été analysés et publiés ; le LHC aura redémarré début 2015 et il y a de fortes chances que des résultats positifs ou négatifs auront été publiés.

### **Propositions non détaillées et à discuter d'agenda du colloque**

L'idée serait de consacrer la première journée à l'histoire et aux acquis sous la forme désormais classique des séances des colloques AEIS, et la seconde journée à la prospective sous la forme de deux tables rondes, modérées par des philosophes, avec des intervenants de la première journée, des conférenciers de l'initiative BNF-IAP et d'autres invités particulièrement qualifiés.

Il me paraît clair que la première ébauche de programme devra être fortement allégée. Je pense que la formule des sessions posters permettra de le faire.

Je ferai oralement mes propositions qui doivent rester confidentielles tant qu'elles n'auront pas été acceptées et adoptées. De même, les aspects plus « politiques » concernant d'éventuels partenariats et démarches auprès d'institutions doivent rester confidentiels tant que des décisions fermes n'auront pas été prises.

Après cette intervention, une discussion s'engage :

G. Belaubre, reprenant la proposition d'un partenariat avec la BNF, évoque la question du choix de l'amphithéâtre : Il note que nous sommes dans une situation nouvelle, compte tenu de nos nouveaux rapports avec l'IHP.

Son Directeur a, en effet, répondu aux remerciements de notre président en lui faisant part que son amphithéâtre nous était désormais ouvert pour nos colloques.

G. Belaubre ajoute que l'impression qu'il a retenue de notre dernier colloque l'avait persuadé que la taille et la forme de l'amphithéâtre Hermite étaient l'idéal pour nos colloques, car les relations entre la salle et les conférenciers étaient beaucoup plus proches et animées que celles qui s'établissent dans un amphi. de plus grande taille, et que, si c'était nécessaire, nous pourrions sélectionner les participants, ce que nous avons commencé à faire en Février dernier.

Le Président opine sur ces observations et ajoute que notre objectif primordial, aujourd'hui, est d'être visible pour tous nos correspondants, et qu'à ce titre, les liens avec des institutions très importantes pouvaient nous mettre dans leur ombre.

G. Belaubre renforce ce point de vue en rappelant que la remarquable réussite du colloque « le siècle des quantas », due essentiellement à Gilles Cohen-Tannoudji, nous avait été confisquée par J. Audouze, Directeur du Palais de la Découverte, qui abritait notre colloque.

Après cet échange, le Président demande :

- que Claude Elbaz fasse des propositions concrètes concernant le choix des conférenciers
- que P. Nabet et G. Belaubre fassent une proposition concernant la session éventuelle « Biologie quantique »,

Il ajoute que les décisions finales seront prises de manière collégiale, en tenant compte des diverses sensibilités, et aussi en incitant les sections de province à une participation active. !

Il précise enfin que le choix définitif sera fait, le moment venu, sans préjuger de l'acceptation d'un conférencier que nous aurions reçu lors d'une séance.

La séance est levée. Rendez-vous pour la suite à la rentrée.

## ANNEXE

Ci-après est donné le préprogramme mis à jour en Mai 2014:

(DOCUMENT de TRAVAIL)  
Ébauche programme AEIS-2016 (13 mai 2014)

### **Ondes, Matières et Univers**

(Quatre orateurs par session, en principe)

Présentation du colloque : Cédric VILLANI (Médaille Fields, ADS, IHP) ou par défaut le Président de l'AEIS

#### **SESSION 1. La relativité, les ondes de l'univers (modérateurs Claude ELBAZ/Jean SCHMETS)**

Dominique LAMBERT (Université de Namur)  
Alain CONNES (IHES)  
Thibaud DAMOUR (IHES)  
Christophe SALOMON (ENS)  
François BOUCHET (IAP)  
Marc LACHIEZE-REY (CNRS/Université Paris Diderot)  
Jean-Philippe UZAN (IAP)  
Patrice HELLO (LAL-Orsay)

#### **SESSION 2. La dualité Onde/corpuscules de la physique quantique (modérateur Alain CORDIER)**

Jean DALIBARD (ENS/Collège de France)  
Serge HAROCHE (ENS/Collège de France)  
Alain ASPECT (IOP)  
Jean ZINN-JUSTIN (DSM/CEA-Saclay)  
Franck LALOE (ENS)  
GATTLI Christian (IRAMIS/SPEC/CEA-Saclay)  
Roger BALIAN (ADS/CEA-Saclay)

#### **SESSION 3. Ondes, matières et quantification (modérateurs Michel GONDRAN/Jean-Pierre FRANCOISE)**

Carlo ROVELLI (Université de Provence)  
Gabriele VENEZIANO (CERN, Collège de France)  
Théodore JACOBSON (Université de Maryland)  
Thanu PADMANABHAN (IUCAA/Inde)  
Erik VERLINDE (Université d'Amsterdam)  
Jan BROEKAERT (Vrije Universitat Brussel)  
Luc BLANCHET (IAP/ENS)  
Jean BRICMONT (Université de Louvain)  
Yves COUDER (Université Paris Diderot)

#### **SESSION 4. Matière vivante : Biologie, Médecine et Applications (modérateur Pierre. NABET)**

Deux orateurs en biologie quantique à définir  
Jean-Philippe GRIVET (CNRS/Orléans)  
André AURENGO (CHU Pitié-Salpêtrière-Paris)  
Philippe ABEILLE (CHU Trousseau, Université de Tours)  
Sylvaine TURCK-CHIEZE (DSM-Saclay)  
Gérard MOUROU (LOA/ Ecole Polytechnique)  
Yves GENTET (Holographie, chercheur indépendant)  
Yves MEYER (ADS/ENS-Cachan)

Noël DIMARCQ (SYRTE/IAP)  
Ramesh RASKAR (MIT)

**Table Ronde sur le thème : Une nouvelle révolution scientifique à l'horizon (animée par Gilles COHEN-TANNOUDJI...)**

Claude COHEN-TANNOUDJI (ADS, ENS)  
Pierre JOLIOT (ADS, IBPC)  
Michel SERRES (Académie Française)  
Olivier DARRIGOL (CNRS/Université Paris Diderot)  
Françoise BALIBAR (ENS)  
Jean-Louis BASDEVANT (École Polytechnique)  
Jean-Marc LÉVY-LEBLOND (Université de Nice)  
Michel LE BELLAC (Université de Nice)

**+ UNE SESSION POSTERS**

## *Annances*

Notre Collègue Christian HERVE nous fait part de quelques manifestations intéressantes de la part de l'ESPACE ETHIQUE REGION ILE DE FRANCE accessible sur le site: <http://www.espace-ethique.org/>

## Documents

Pour préparer la conférence du Pr Christophe SALOMON, nous vous proposons les trois articles ci-dessous :

p. 27 : "Quand les constantes n'en sont plus" paru dans la revue du CNES *E-Espace et Science* du 24 avril 2007 site : <http://smc.cnes.fr/PHARAO/Fr/index.htm>

p. 32 : La mesure du Temps au XXIème siècle par Christophe SALOMON, écrit pour le séminaire Poincaré XV le Temps (2010) 103-113

p. 44 : L'introduction à "Quanta et photons Le gaz de fermions ultra-froids", un article proposé par Frédéric CHEVY et Christophe SALOMON du laboratoire Kastler-Brossel de l'ENS

## ► Quand les constantes n'en sont plus

### Sources

#### Design of the Cold Atom PHARAO Space Clock and Initial Test Results

Laurent Ph., Abgrall M., Jentsch Ch., Lemonde P., Santarelli G., Clairon A., Bize S., Salomon Ch., Blonde D., Vega J.F., Grosjean O., Picard F., Saccoccio M., Chaubet M., Ladiette N., Guillet L., Zenone I., Delaroche Ch., Sirmain Ch.

*Applied physics. B : Lasers and Optics*, vol. 84, pp 683-690, september 2006

### Notes

#### Période :

Les ondes électromagnétiques, du rayonnement gamma aux ondes radio en passant par la lumière visible sont caractérisées par leur longueur d'onde (exprimée en mètre). La période (exprimée en seconde) ou la fréquence (exprimée en Hertz) sont calculées simplement à partir de cette valeur.

#### Transition :

Dans un atome, les électrons ne peuvent se trouver que dans certaines zones de l'espace (orbitales) parfaitement déterminées dite quantifiée. Sous l'action d'un photon absorbé un électron peut passer d'un niveau d'énergie à un niveau d'énergie supérieur. Mais cette situation est instable et l'électron revient à son niveau d'énergie d'origine en émettant un photon dont la longueur d'onde est parfaitement déterminée et stable.

#### Le domaine micro-onde :

(comme les fours de cuisine) correspond à des longueurs d'onde du rayonnement électromagnétique ayant une longueur d'onde de 1 à 300 millimètre.

Depuis 1967, le temps vit au rythme des oscillations des atomes : son étalon, la seconde, est défini comme la durée de 9 192 631 770 [périodes](#) (ni plus ni moins !) de la radiation correspondant à une certaine [transition entre deux niveaux d'énergie](#) de l'atome de césium 133. Rassurez-vous, ces horloges atomiques (comme celle qui vous donne le 4ème top) ne produisent pas de déchets nucléaires et ne sont pas radioactives. Le césium 133 est un élément stable. Les électrons des atomes de césium changent de niveau d'énergie lorsqu'ils sont soumis à une radiation [micro onde](#) en subissant une transition dite de structure hyperfine. Il se trouve que le phénomène quantique utilisé, l'absorption ou l'émission de photons correspondant à ce changement d'énergie, fournit une fréquence plus précise et plus stable que tous les autres phénomènes connus. L'utilisation des horloges atomiques repose sur un postulat que l'observation n'a encore jamais mis en défaut : les propriétés des atomes sont universelles et invariantes dans le temps. La fréquence de l'horloge est ainsi la même pour tous les atomes de césium 133, aux corrections relativistes près.

En effet depuis la théorie de la relativité d'Einstein, il y a un siècle, le temps est devenu élastique. Le temps n'est plus ce cadre immuable et uniforme qu'avait décrit Newton. Le temps et l'espace s'entremêlent dans l'espace-temps ; la gravitation est aussi de la partie en déformant l'espace-temps. La vitesse des observateurs mais aussi l'intensité du [potentiel gravitationnel](#) influent sur la vitesse d'écoulement du temps. Les durées mesurées entre deux événements par des observateurs situés dans des référentiels différents ne donnent pas le même résultat. Les horloges en mouvement prennent du retard par rapport aux horloges fixes. C'est ainsi que le temps est soumis à des effets relativistes comme la dilatation du temps ou le décalage gravitationnel (red-shift). Autant d'effets prévus par la relativité qui sont vérifiables par l'expérience en comparant des signaux d'horloges situées à des endroits éloignés les uns des autres.

Le temps est au croisement de diverses branches de la physique moderne : relativité générale, physique quantique, cosmologie. Plus déroutant encore, les physiciens nous prédisent que la relativité générale pourrait ne pas être pas la théorie ultime des lois de la nature. Ses principes semblent être incompatibles avec ceux de la mécanique quantique. C'est un vrai casse-tête ! Lorsque ces deux disciplines interviennent en même temps comme en cosmologie, d'importants problèmes conceptuels surgissent. Pour décrire l'univers entier, sa naissance et son évolution, les deux théories sont en effet nécessaires : la relativité générale définit la structure géométrique de l'univers alors que le modèle standard de physique des particules (modèle quantique) décrit son contenu en matière. Il est possible que la résolution de leur incompatibilité passe par une théorie unifiée des phénomènes gravitationnels et non gravitationnels.

► Et le signal sortit de la mélasse

Notes

**Potentiel gravitationnel :**

Le temps s'écoule plus lentement dans les champs de gravitation très intenses, tels ceux qui règnent à la surface des corps célestes massifs comme le Soleil. Même sur notre Terre, cet effet pourrait être mesuré si les horloges avaient des performances suffisantes : théoriquement, en bas d'une montagne les horloges battent moins vite qu'en altitude.

**Constante de structure fine « alpha » :**

Historiquement la constante de structure fine a été introduite par Arnold Sommerfeld en 1916 quand il a étudié la structure de l'atome d'hydrogène. En introduisant des orbites électroniques elliptiques plutôt que circulaires, il apparaissait un doublement des raies spectrales de l'hydrogène appelé structure fine. Aujourd'hui alpha est considéré comme la constante de couplage de la force électromagnétique.

**Ultravide :**

Les mesures se font sur un nuage d'environ 10 millions d'atomes de césium 133 se propageant dans un vide tel que toutes les autres traces de gaz sont éliminées.

**Kelvin :**

Unité de mesure de la température « thermodynamique » ou température absolue. Une température de 0 kelvin correspond à une température de  $-273,15^{\circ}\text{C}$ . Une température d'un microkelvin (un millionième de kelvin) correspond donc à une température très très proche du 0 absolu.

De minuscules effets violant la relativité générale devraient alors être observables, notamment une dérive avec le temps des constantes fondamentales des lois de la physique. Les constantes ne seraient plus constantes ! C'est là que les horloges interviennent à nouveau car les nouvelles générations d'horloges atomiques, d'une exactitude et d'une stabilité diaboliques, pourraient détecter leur variation dans le temps. En particulier, la variation relative de la constante de structure fine pourrait être suivie avec une précision égale à  $10^{-17}$  par an. Le sujet est étudié aujourd'hui par un nombre de laboratoires grandissant, parce qu'il constitue une des voies d'accès à la « physique au delà du modèle standard ». L'idée n'est plus seulement de tester une éventuelle dérive de la seule constante de structure fine (une paire d'horloges fonctionnant avec des atomes différents est alors suffisante), mais de comparer des horloges fonctionnant sur des principes aussi différents que possible afin de suivre les dérives éventuelles des diverses constantes fondamentales impliquées.

Pour gagner en précision, les chercheurs se sont ingéniés à minimiser toutes les sources potentielles d'erreur et à éviter que les atomes ne soient perturbés par leur environnement. Cela impose de multiples contraintes techniques comme d'abaisser la pression jusqu'à l'ultra-vide ou d'abriter les atomes derrière un blindage magnétique. Ils ont réussi à les ralentir en les piégeant par une technique optique de refroidissement par laser, créant une « mélasse optique ». Des températures de l'ordre du microkelvin, proches du zéro absolu, ont ainsi été atteintes. Le pic de résonance, représentant le nombre d'atomes détectés ayant subi la transition en fonction de la fréquence, est alors plus fin ; d'où un gain de performances de l'horloge car c'est ce pic qui sert de signal d'asservissement sur un oscillateur externe, tel qu'un quartz ultra stable. Des améliorations ont été mises au point en utilisant une géométrie en fontaine atomique, pour allonger le temps de vol des atomes. Ces atomes refroidis reçoivent une impulsion verticale infinitésimale par laser et passent alors deux fois dans la cavité micro-onde, lors de la montée et lors de la descente sous l'action de la pesanteur. Une dizaine de fontaines atomiques fonctionnent ainsi dans le monde, avec des performances record.

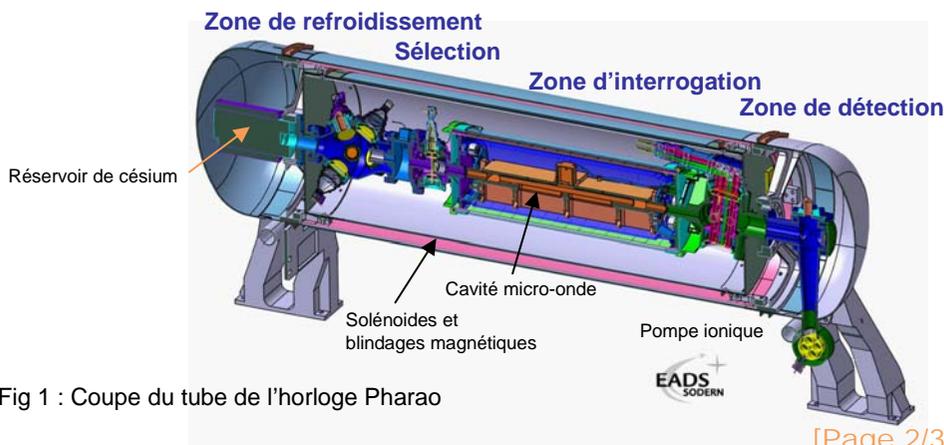


Fig 1 : Coupe du tube de l'horloge Pharaon

## ► A la recherche du temps perdu

### Notes

#### Airbus OG :

Airbus A300 de présérie, affrété par le CNES et la société Novespace. L'avion a été modifié et équipé pour recevoir des expériences activées au cours de vols paraboliques créant des périodes de micropesanteur de 20 à 25 secondes.

### Contacts chercheurs

Philippe Laurent  
SYRTE (SYstèmes de  
Référence Temps Espace)  
Paris  
[philippe.laurent@obsprm.fr](mailto:philippe.laurent@obsprm.fr)

### + sur le web

[SYRTE](#)

[Observatoire de Paris](#)

[Laboratoire Kastler Brossel](#)

### + sur le CNES

[CNES](#)

[Missions scientifiques du  
CNES](#)

L'idée de placer une horloge à atomes de césium refroidis par laser dans l'espace, est apparue dans les années 1990, en Europe puis aux Etats-Unis. Le projet d'horloge spatiale Pharaon proposé par le laboratoire Kastler-Brossel de l'Ecole Normale Supérieure de Paris et le laboratoire Syrte (SYstèmes de Références Temps-Espace) de l'Observatoire de Paris a été sélectionné en 1997 par l'ESA. L'exactitude visée est de  $10^{-16}$  et la stabilité de fréquence de  $3 \times 10^{-16}$  à 1 jour. Pharaon fait partie du projet Aces (Atomic Clock Ensemble in Space), prévu à l'extérieur du module européen Columbus de la station spatiale internationale. Outre Pharaon fourni par la France, le projet Aces comprend notamment un maser à hydrogène fourni par l'Observatoire de Neuchâtel en Suisse et un lien micro-onde de nouvelle génération développé en Allemagne. Les fréquences de ces deux horloges Pharaon et Maser seront comparées entre elles, ainsi qu'à celles d'horloges de différents types, situées au sol et réparties en différents points du globe grâce au lien micro-onde et à un récepteur GPS/Galileo installé à bord. Cet ensemble fournira la meilleure technique de comparaison d'horloges avec une exactitude et une stabilité de l'ordre de  $10^{-17}$ . Il testera ainsi les bases de la relativité générale jusqu'aux limites extrêmes et recherchera les dérives éventuelles des constantes fondamentales.

Revenons sur Terre ! Il aura fallu presque dix ans d'innovation entre la réalisation du prototype de laboratoire testé en micropesanteur dans [l'Airbus Og](#) et la réalisation du modèle d'ingénierie Pharaon de qualité spatiale, qui est un concentré des technologies les plus avancées. Le CNES a reçu les derniers éléments de ce modèle au cours de l'année 2006. Les essais sont en cours avec les scientifiques à Toulouse. L'article en référence rend compte de ces travaux. L'horloge a donné ses premiers signaux : les atomes ont été capturés, refroidis et lancés dans la cavité d'interrogation micro-onde. Le signal obtenu atteste du succès des technologies utilisées. Les performances du modèle d'ingénierie de l'horloge Pharaon seront ensuite testées avec le maser à hydrogène dans la configuration du projet Aces de l'ESA.

#### Signal d'asservissement :

Une horloge atomique se fonde sur la comparaison du signal fourni par un oscillateur comme un cristal de quartz et de la valeur de la fréquence de résonance atomique. Si un écart entre ces deux mesures est constaté, un signal est envoyé pour corriger la fréquence de l'oscillateur. Ce système constitue un asservissement.

E-Space&Science vous informe des résultats des expériences scientifiques soutenues par le CNES

Directeur de la publication : **Yannick d'Escatha** ■ Directeur de la rédaction : **Pierre Tréfouret** ■ Rédacteur en chef : **Michel Viso** ■ Secrétaire de rédaction : **Martine Degrave** ■ Rédactrice : **Sylvie Léon-Hirtz** ■ Diffusion du magazine : **INIST diffusion** ■

#### Abonnement

Envoyez un mail sans objet ni contenu à :

[Abonnement version Française](#)

ou à :

[Abonnement version Anglaise](#)

#### Désabonnement

Envoyez un mail sans objet ni contenu à :

[Désabonnement version Française](#)

ou à :

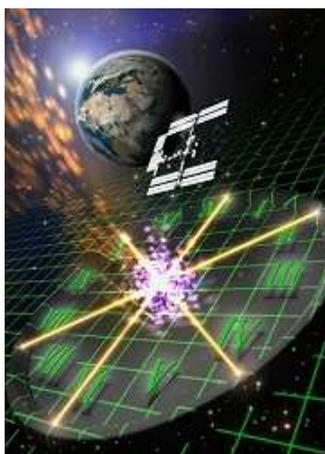
[Désabonnement version Anglaise](#)

Mission de **physique fondamentale**  
**Projet d'Horloge Atomique par Refroidissement d'Atome en Orbite**

ACCUEIL  ENGLISH VERSION | INFOS PRATIQUES | MENTIONS LEGALES | WEBMASTER | AIDE | PLAN DU SITE | AUTRES LIENS | LEXIQUE | Missions spatiales  
 BIENVENUE | ACTUALITES | SCIENCE | MISSION | PLATEFORME ACES | INSTRUMENT | ORGANISATION | CONTACTS | AUTRES SITES | GALERIE MEDIAS | ACRONYMES



**Projet d'Horloge Atomique  
 par Refroidissement  
 d'Atomes en Orbite**



**CARACTERISTIQUES**

Instrument embarqué à bord de la Station Spatiale Internationale sur le module Columbus

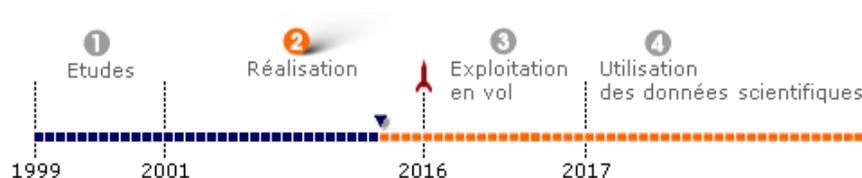
Etude de la physique d'une horloge atomique par refroidissement d'atomes.

Durée de vie : 3 ans

Cliquer ici pour augmenter ou diminuer la

taille des caractères : [A](#) [A](#) [A](#) [A](#)

**Les principales étapes du projet**



**Le projet PHARAO a été initié dans le cadre du programme scientifique de Physique Fondamentale du CNES.** En Octobre 1993, comme une des principales recommandations du Séminaire de Prospective Scientifique, qui s'est tenu à Saint-Malo, le but de cette mission est essentiellement de mesurer l'effet du potentiel gravitationnel sur l'écoulement du temps.

Les principaux éléments à l'origine du projet PHARAO sont :

- ▶ le succès de la méthode de refroidissement et de piégeage des atomes de césium par laser au Laboratoire Kastler-Brossel (LKB) de l'Ecole Normale Supérieure de Paris (ENS), avec le support du CNES dans le cadre du programme scientifique depuis 1990 ;
- ▶ l'application de cette méthode à un nouveau type d'horloge appelée fontaine atomique ;
- ▶ L'avantage de l'environnement en micropesanteur qui permet d'augmenter les performances de l'horloge ;
- ▶ le besoin d'horloges atomiques ultra-précises et ultra-stables dans l'espace pour la physique fondamentale et particulièrement pour tester les effets prédits par la Relativité Générale.

PHARAO est une étape majeure dans la recherche et les applications liées à la physique fondamentale, notamment :

- ▶ La métrologie par l'amélioration de la précision des horloges atomiques,
- ▶ La science fondamentale par les tests dans l'espace, bénéficiant de la micropesanteur, des lois de la physique dans un domaine non accessible au sol,
- ▶ La technologie par le développement d'une nouvelle génération d'horloges spatiales, qui offre aussi la possibilité d'expériences dans

**EVENEMENTS CLES**

- ▶ **2017**  
Phase opérationnelle
- ▶ **Mi à fin 2016**  
Recette en vol, Calibration et Validation
- ▶ **2016**  
Lancement de PHARAO
- ▶ **Février 2014**  
Livraison du modèle de vol de PHARAO pour intégration avec ACES
- ▶ **4<sup>me</sup> trimestre 2013**  
Intégration et tests du modèle de vol de l'horloge PHARAO
- ▶ **Janvier 2013**  
Livraison du tube césium
- ▶ **Décembre 2012**  
Livraison du calculateur de vol
- ▶ **Janvier 2011**  
Test du prototype du Segment Sol
- ▶ **Septembre 2010**  
Fin des tests EMC et de performance du modèle d'ingénierie de PHARAO
- ▶ **Juillet 2009**  
Test du modèle d'ingénierie de PHARAO avec son équivalent ACES

**Bulletin E-Space&Science**

d'autres domaines utilisant le refroidissement et la manipulation d'atomes.

Faire voler PHARAO est un vrai défi en raison de la complexité de technologies variées tout juste sorties de leurs laboratoires d'origine. Aujourd'hui, l'instrument PHARAO a fini sa qualification. Tous ses sous-ensembles sont livrés et intégrés dans le Modèle d'Ingénierie (EM : Engineering Model) complet depuis fin 2006. Chaque jour au CNES l'équipe PHARAO utilise des atomes froids pour évaluer les performances de l'EM et pour préparer le Modèle de Vol (FM : Flight Model), dont le montage a commencé.

---

Dernière mise à jour le 19/03/2013

Avant de reproduire de l'information de ce site web, veuillez consulter les **Mentions Légales**

► [Pharao, la machine à explorer le temps](#)

Podcast Ciel&Espace

► [Pharao et Microscope : le temps et la gravitation à l'épreuve](#)

[1<sup>ère</sup> partie](#) - [2<sup>ème</sup> partie](#)

# Les gaz de fermions ultra-froids

Après l'observation en 1995 des premiers condensats de Bose-Einstein gazeux, la physique des atomes ultrafroids s'est tout récemment ouverte à l'étude de gaz de fermions dans le régime quantique. En présence d'interactions attractives, les fermions acquièrent un comportement bosonique qui conduit à l'observation du phénomène de condensation de Bose-Einstein à basse température. La possibilité d'ajuster la force des interactions dans les systèmes d'atomes froids permet d'établir un lien profond entre condensation de Bose-Einstein et supraconductivité.

## Introduction

La mécanique quantique influence les propriétés macroscopiques d'un système à N-corps lorsque les fonctions d'ondes des particules commencent à se recouvrir, c'est-à-dire lorsque la longueur d'onde de de Broglie  $\Lambda_{\text{th}} = h/\sqrt{2\pi mk_{\text{B}}T}$  associée à l'agitation thermique devient de l'ordre de la distance interparticule. Ce régime, dit aussi de dégénérescence quantique, se manifeste pour une densité  $n$  du système satisfaisant la condition  $n\Lambda_{\text{th}}^3 \lesssim 1$ . On distingue alors deux cas très différents, suivant que le moment cinétique intrinsèque (ou spin) des particules du gaz est, en unité de  $\hbar = h/2\pi$ , entier ou demi-entier. Dans le cas des particules de spin entier (les bosons), le passage dans le régime quantique s'accompagne d'une transition de phase vers un état superfluide où toutes les particules s'accumulent dans l'état fondamental (figure 1.a). C'est la *condensation de Bose-Einstein*, conséquence de l'effet d'*amplification bosonique* qui pousse les bosons à tous occuper un même état. Pour les gaz piégés, la Condensation de Bose-Einstein a été observée pour la première fois en 1995 par les équipes de E. Cornell et C. Wieman au JILA et de W. Ketterle au MIT et a constitué un thème d'étude important depuis (voir *Images de la Physique 2000*). Pour des particules de spin demi-entier (des fermions) sans interactions, l'état fondamental du système est déterminé par le principe de Pauli qui interdit à deux particules fermioniques d'occuper le même état quantique (figure 1.b). Il suffit donc de remplir un à un les états d'énergie du piège avec exactement un atome par niveau et par état de spin, et ceci jusqu'à épuisement du nombre d'atomes disponibles. L'on parle alors de mer de Fermi et l'énergie correspondant au dernier état peuplé est baptisée énergie de Fermi, notée

$E_{\text{F}} = \hbar^2 k_{\text{F}}^2 / 2m$ . Dans le cas d'un système homogène, le vecteur d'onde de Fermi  $k_{\text{F}}$  est inversement proportionnel à la distance moyenne  $d$  entre particules, c'est-à-dire  $k_{\text{F}} \propto n^{1/3}$ . Cette dépendance explicite de l'énergie avec la densité traduit simplement le fait que plus le nombre d'atomes piégés est grand, plus l'énergie de Fermi est élevée. Les phénomènes quantiques se manifesteront naturellement si la température de l'échantillon est plus basse que  $T_{\text{F}} = E_{\text{F}}/k_{\text{B}}$  mais, à la différence des bosons, le passage du comportement classique au comportement quantique ne s'accompagne d'aucune transition de phase. La manifestation la plus spectaculaire de l'entrée dans le régime quantique est l'existence d'une pression résiduelle à température nulle, dite pression de Fermi : au contraire d'un gaz parfait « classique » pour lequel l'équation des gaz parfaits  $p = nk_{\text{B}}T$  donne une pression  $p$  nulle à température nulle, la pression d'un gaz de fermions est non nulle même à  $T = 0$ . La pression de Fermi est une simple conséquence du principe d'exclusion qui empêche deux fermions de même spin de se trouver au même endroit et s'oppose donc à toute tentative de compression du gaz.

L'ajout des interactions enrichit le panorama des effets physiques observables dans les fluides quantiques. Ainsi, dans le cas des électrons dans les solides, la présence d'interactions attractives propagée par les phonons provoque à basse température l'apparition d'une phase supraconductrice également présente dans les noyaux atomiques ou les étoiles à neutrons. Bien que les superfluides fermioniques soient au cœur d'une immense variété de systèmes physiques, la compréhension de leur propriété n'est encore que très partielle et constitue l'un des enjeux majeurs de la physique contemporaine.

Article proposé par :

Frédéric Chévy, [chevy@lkb.ens.fr](mailto:chevy@lkb.ens.fr)

Christophe Salomon, [Christophe.Salomon@lkb.ens.fr](mailto:Christophe.Salomon@lkb.ens.fr)

Laboratoire Kastler-Brossel, CNRS/ENS

Ont également participé à ce travail T. Bourdel, J. Cubizolles, L. Khaykovich, S. Kokkelmans, F. Schreck et J. Zhang.

Encadré 1

**Piégeage d'atomes neutres**

**Le piège magnéto-optique**

L'exploration de la physique des atomes ultra-froids a été rendue possible le développement dans les années 80 des techniques de piégeages et de refroidissement d'atomes par laser, travaux couronnés par le prix Nobel 1997 attribué à S. Chu, C. Cohen-Tannoudji et W. Phillips. Le piège magnéto-optique, qui utilise une combinaison de champs magnétiques et de lasers accordés proche d'une résonance atomique, permet de refroidir des vapeurs d'atomes depuis la température ambiante jusqu'à des températures de l'ordre de la dizaine de microkelvin.

Le principe de ce dispositif a été décrit dans Images de la physique 1990 et repose sur la pression de radiation exercée par un faisceau lumineux sur un atome. Cette force qui résulte simplement de l'effet de recul subi par un atome lorsqu'il absorbe un photon (figure a) est d'autant plus efficace que la fréquence du faisceau laser est proche de celle d'une transition atomique. Si l'on envoie sur un atome deux faisceaux contre-propageants avec des fréquences légèrement inférieures à la fréquence de résonance atomique (en pratique quelques MHz) la combinaison de la pression de radiation et de l'effet Doppler, qui rapproche de résonance le faisceau se propageant en sens opposé à l'atome, provoque une force totale opposée à la vitesse de l'atome (figure b). Cette force de friction induite par la lumière est équivalente à un refroidissement qui peut être complété par un effet de piégeage en ajoutant un gradient de champ magnétique.

Ce type de piège ne permet cependant pas d'atteindre des températures arbitrairement basses. En effet, les fluctuations de la force de pression de radiation induite par l'émission spontanée aléatoire de photons provoque un chauffage qui s'oppose au refroidissement Doppler. La température la plus basse accessible par ce procédé est la température de recul, correspondant à l'énergie  $\hbar^2 k^2 / 2m$  acquise par un atome de masse  $m$  émettant un photon de vecteur d'onde  $k$ .

**Piégeage magnétique**

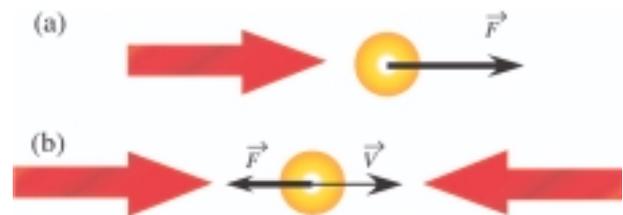
De manière générale, on montre en mécanique quantique que toute particule possède un moment magnétique  $\vec{\mu}$  proportionnel à son spin. De l'existence de ce moment magnétique, il résulte une énergie potentielle d'interaction dipolaire magnétique  $E_p = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$  entre un atome et un champ magnétique  $\vec{B}$ . Si le moment magnétique est de sens opposé au champ magnétique, l'énergie potentielle  $\mu B$  permet de piéger les atomes au voisinage d'un minimum de  $B^a$ . Une évaporation est possible dans un piège magnétique si l'on ajoute une onde

a. On pourrait imaginer un piégeage au voisinage d'un maximum de  $B$  en prenant  $\mu$  et  $B$  parallèles. Cependant, les lois de l'électromagnétisme interdisent l'existence d'un tel maximum dans le vide.

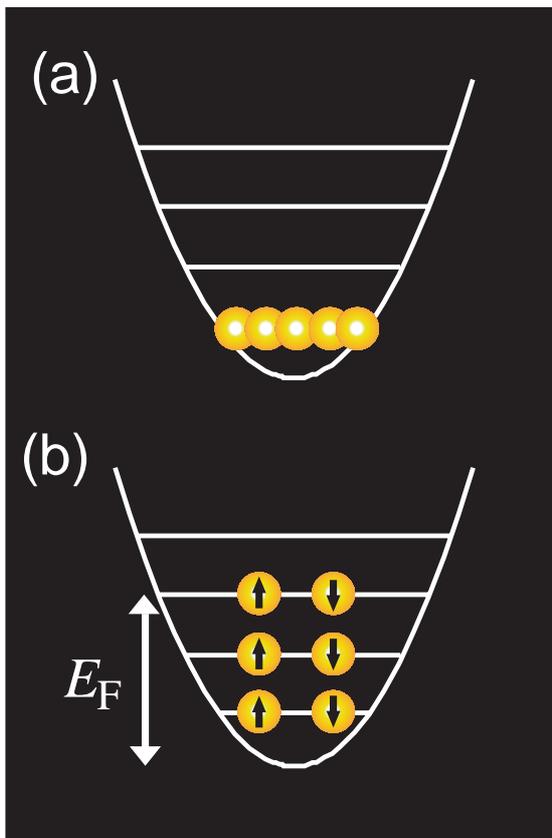
radio-fréquence de fréquence  $\nu_{rf}$ . Lorsque  $h\nu_{rf} = 2\mu B$ , le champ radio-fréquence peut basculer le moment magnétique atomique de l'état anti-parallèle jusqu'à l'état parallèle ce qui provoque l'expulsion de l'atome sous l'effet de la force magnétique qui a changé de sens.

**Piégeage dipolaire**

Le piège dipolaire consiste à utiliser un faisceau laser très désaccordé afin de limiter au maximum les transitions atomiques vers un état excité et donc l'émission spontanée qui était la principale source de chauffage dans le piège magnéto-optique. Lorsque l'on s'éloigne de résonance, la force de pression de radiation devient de plus en plus faible et laisse place à une force de type dipolaire électrique. On sait en effet qu'un atome possède une polarisabilité électrique  $\alpha$  et son énergie d'interaction  $E_p$  avec un champ électrique  $\vec{E}$  se met sous la forme  $E_p = -\alpha E^2/2$ . On montre que le signe de  $\alpha$  est uniquement déterminé par le désaccord de l'onde lumineuse avec la transition atomique : lorsque la fréquence optique est inférieure à la fréquence de transition atomique,  $\alpha$  est positif et négatif sinon. Un faisceau laser focalisé et accordé en dessous de résonance réalise donc un piège pour atomes, puisque dans une telle configuration l'énergie potentielle est minimale au point d'intensité lumineuse maximale, c'est-à-dire au foyer du laser.



**Figure - Principe du refroidissement Doppler et du piège magnéto-optique.** (a) Un faisceau lumineux provoque sur un atome une force de pression de radiation dans la direction de propagation du faisceau et maximale à résonance. (b) Lorsqu'un atome se déplace à une vitesse  $\vec{V}$  au sein de deux faisceaux contre-propageants, l'effet Doppler décale la fréquence lumineuse vue par l'atome : le faisceau se propageant dans le même sens que l'atome voit sa fréquence apparente diminuer alors que celui se propageant en sens opposé voit sa fréquence augmenter. Si la fréquence des deux lasers était choisie légèrement inférieure à la fréquence de résonance atomique, on constate que le faisceau contre propageant sera rapproché de résonance, ce qui lui permet d'exercer une force de pression de radiation plus importante et donc un effet de freinage.



**Figure 1** - Etat fondamental d'un gaz de bosons et de fermions piégés. (a) Condensat de Bose-Einstein où tous les atomes occupent l'état fondamental du piège. (b) Mer de Fermi : pour un gaz de fermions sans interaction, l'état fondamental est obtenu en remplissant un à un les niveaux d'énergies les plus bas jusqu'à une énergie maximum, dite énergie de Fermi. Dans le cas de particules de spin 1/2, chaque état peut contenir deux particules correspondant aux états « spin en haut » et « spin en bas ».

## Refroidissement par évaporation et refroidissement sympathique

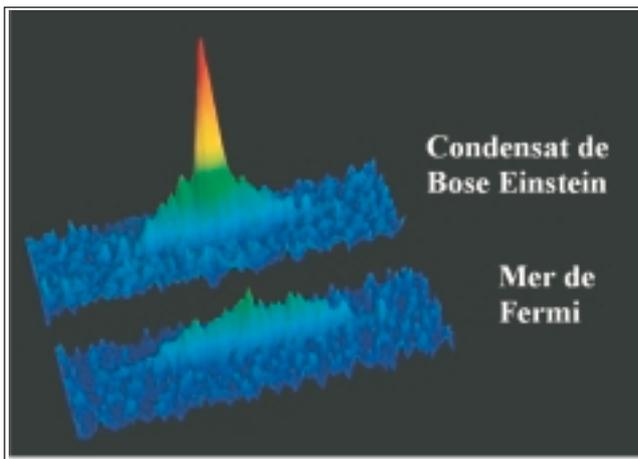
A température ambiante, le paramètre de dégénérescence  $n\Lambda_{\text{th}}^3$  d'une vapeur est de l'ordre de quelques  $10^{-18}$ . Les techniques de refroidissement par laser (encadré 1) développées au cours des années 80 permettent de parcourir la plus grande partie du chemin séparant du régime de dégénérescence quantique, jusqu'à des densités dans l'espace des phases typiques de l'ordre de  $10^{-6}$ . Pour parcourir les six ordres de grandeurs nous séparant de la dégénérescence quantique, la seule méthode connue à ce jour est le refroidissement par évaporation forcée dont le principe a été décrit dans *Image de la physique 2000*. Pour résumer, il s'agit de confiner les atomes dans un piège tronqué à une énergie de coupure  $E_c$ , ce qui permet d'éliminer les atomes les plus énergétiques du gaz. Si après une collision entre deux atomes l'un des partenaires acquiert une énergie supérieure  $E_c$ , celui-ci est évacué hors du piège. Ceci diminue l'énergie moyenne des atomes restant piégés et provoque le refroidissement du gaz. Cependant, plus la température du

gaz est basse, plus la probabilité d'obtenir un atome d'énergie  $E_c$  après un choc diminue, ce qui provoque un ralentissement notable du refroidissement dès que la température devient égale à une fraction de l'énergie de coupure. Afin de maintenir le rythme de l'évaporation, on force l'évaporation en abaissant progressivement  $E_c$  de façon à garder le rapport  $E_c/k_B T$  constant (typiquement entre 5 et 10).

Historiquement, le refroidissement par évaporation a été développé pour des bosons piégés magnétiquement en les polarisant de façon à garder leur moment magnétique de sens opposé à la direction du champ magnétique (encadré 1). Cette particularité, additionnée au rôle central joué par les collisions dans le processus d'évaporation, empêche d'utiliser cette technique pour le refroidissement d'atomes fermioniques de spin 1/2. En effet, d'après la proportionnalité existant entre spin et moment magnétique, des atomes de même moment magnétique sont aussi dans un même état de spin. Le principe de Pauli, qui interdit à deux fermions de se trouver dans le même état quantique, empêche deux atomes de cette famille de se trouver proche l'un de l'autre, ce qui provoque une forte diminution du taux de collisions par rapport à ce que l'on obtiendrait avec un gaz de bosons. Afin de pouvoir obtenir un gaz de fermions dégénérés, nous avons adapté la technique de refroidissement par évaporation en développant une méthode de refroidissement appelée *refroidissement sympathique*, qui consiste à piéger magnétiquement un mélange de bosons et de fermions polarisés. On évapore comme précédemment les bosons qui servent alors de réfrigérant aux fermions.

## Gaz de Fermi dégénéré

Les expériences réalisées à l'ENS utilisent des atomes de lithium pour lequel il existe à la fois un isotope fermionique ( ${}^6\text{Li}$ ) et bosonique ( ${}^7\text{Li}$ ) stables. La première partie de notre séquence expérimentale consiste à utiliser un piège magnéto-optique afin de refroidir jusqu'à 1 mK une vapeur de lithium issue d'un four à 550 °C et contenant les deux isotopes. Le mélange de quelques  $10^6$  atomes de  ${}^6\text{Li}$  et  $10^9$  atomes de  ${}^7\text{Li}$  est ensuite transféré dans un piège magnétique où nous débutons le refroidissement en évaporant le  ${}^7\text{Li}$ . Le bon déroulement de la séquence est surveillé en mesurant le nombre d'atomes et la température par *temps de vol*. Cette technique consiste à éteindre brusquement le potentiel de piégeage pour ensuite laisser le nuage s'étendre balistiquement pendant environ 1 ms. A l'issue de cette phase d'expansion, nous mesurons l'absorption d'un faisceau résonnant avec une transition atomique, ce qui nous permet d'obtenir simplement le profil de densité atomique. Dans le cas d'atomes en interactions faibles, la densité atomique mesurée après temps de vol est une image de la distribution de vitesse dans le piège. En effet, un atome détecté à une distance  $d$  du centre du piège après un temps de vol  $\tau$  devait posséder une vitesse  $v = d/\tau$  au moment de l'extinction du potentiel de confinement. Cette propriété nous permet d'utiliser le temps de vol comme thermomètre, puisque



**Figure 2** - Images d'un condensat de Bose-Einstein d'atomes de  ${}^7\text{Li}$ , immergé dans une mer de Fermi d'atomes de  ${}^6\text{Li}$  confinés dans un piège magnétique. Le condensat (pic central étroit) comporte  $1 \times 10^4$  atomes et le piédestal large correspond aux atomes non condensés. L'extension axiale plus importante du nuage de fermions ( $2.5 \times 10^4$  atomes) reflète la pression de Fermi s'opposant au potentiel de confinement.

la largeur du nuage est directement reliée à la température (on sait par exemple que pour un gaz parfait classique,  $\langle v^2 \rangle = 3k_B T/m$ )<sup>1</sup>.

Après quelques dizaines de secondes d'évaporation, nous atteignons le régime de dégénérescence quantique pour les deux isotopes. Les profils de densité des gaz de  ${}^6\text{Li}$  et de  ${}^7\text{Li}$  obtenus par absorption dans le piège sont représentés sur la figure 2. La flagrante différence de taille entre les deux nuages est une conséquence directe de la différence de statistiques quantiques des deux isotopes. Dans le cas du condensat de Bose-Einstein de  ${}^7\text{Li}$  les atomes se trouvent condensés au centre du piège et forment un pic de densité très étroit superposé à une distribution plus large correspondant aux atomes non condensés. Dans le cas des fermions, l'élargissement de la distribution de position des atomes est une simple conséquence de la pression de Fermi qui s'oppose à la compression imposée par le potentiel de confinement. Pour ces conditions expérimentales, la température  $T = 1,6 \mu\text{K}$  correspond à  $T = 0,87T_C = 0,57T_F$  ( $T_C$  désigne ici la température de condensation de Bose-Einstein), ce qui nous place près du seuil d'apparition des effets quantiques. Lorsque l'évaporation est poursuivie plus avant, les meilleurs degrés de dégénérescence obtenus correspondent à  $T \lesssim 0,2 T_F$ .

## L'état fondamental d'un gaz de Fermi en interaction

Si l'on considère le cas de fermions en interactions attractives (ce qui est toujours le cas pour des atomes dont

les interactions à longue distance sont de type Van der Waals), on sait que pour un potentiel suffisamment profond, il existe un état lié correspondant à un dimère de deux atomes. Lorsque la température est plus basse qu'une certaine valeur  $T_c^*$  de l'ordre de l'énergie de liaison de ces molécules, on s'attend donc à observer un appariement des atomes. Or, dans le cas d'une expérience sur des fermions de spin demi-entier, leur association fournit un composé de spin entier, donc un boson. A suffisamment basse température, on atteint la température de  $T_C$  de condensation de Bose-Einstein et il apparaît une phase superfluide.

Si l'on diminue suffisamment la force des interactions attractives, le potentiel d'interaction devient si peu profond qu'il ne contient plus aucun état lié (dans le cas d'un potentiel de profondeur  $V_0$  et de rayon  $R$ , ceci se produit lorsque  $V_0 \lesssim \hbar^2/mR^2$ ) : puisque les molécules n'existent plus au delà de ce seuil, la condensation de Bose-Einstein n'est bien entendue plus possible et on s'attend donc naïvement à la disparition de la superfluidité. Cette affirmation est cependant fautive, comme le prouve la supraconductivité des métaux à basse température. La théorie BCS (pour Bardeen-Cooper et Schrieffer) montre que l'état supraconducteur d'un système de fermions en interactions faiblement attractives résulte lui aussi d'un appariement de particules. Ces « paires de Cooper » sont cependant radicalement différentes des molécules discutées précédemment puisque l'appariement ne résulte pas simplement de l'interaction des deux particules constitutives de la paire, mais implique la mer de Fermi dans son ensemble. Ce caractère collectif se manifeste de deux façons : tout d'abord, contrairement aux dimères « classiques » qui correspondent à deux particules physiquement proches l'une de l'autre, les paires de Cooper sont associées à un appariement dans l'espace des impulsions et si l'une des particules de la paire possède une quantité de mouvement  $\vec{p}$ , l'autre partenaire possède automatiquement une quantité de mouvement  $-\vec{p}$ . Ensuite, l'énergie de liaison de la paire,  $\Delta$  dépend explicitement de la densité de particules. En effet, si l'on introduit la longueur de diffusion  $a$  caractérisant les interactions interparticules à basse énergie (encadré 2), on montre que la limite de faible interaction correspond à  $a \rightarrow 0^-$  et que l'on a  $\Delta \propto E_F \exp(-1/k_F|a|)$ , qui dépend de la densité via  $E_F$  et  $k_F$ . Une des conséquences fondamentale de cette origine collective est que, contrairement aux molécules discutées plus haut qui préexistaient à l'apparition de la superfluidité, l'ordre quantique naît à la même température  $T_C = T_c^* \sim \Delta/k_B$  que les paires de Cooper.

L'état fondamental d'un gaz de fermions en interaction attractive étant qualitativement très différent dans les régimes de fortes et faibles attractions, on est naturellement amené à s'interroger sur la nature de la transition entre ces deux régimes et sur la transformation des paires de Cooper en molécules. C'est le problème dit de la transition CBE-BCS dont les premières études théoriques, ont été réalisées par T. Leggett, P. Nozières et S. Schmitt-Rink. Dans leurs

1. Notons que cette technique est destructive puisque l'absorption d'un faisceau résonnant crée un chauffage tel que le gaz ne survit pas à la prise d'image. Elle oblige donc à recréer un gaz d'atomes froids à la prise de chaque point expérimental.

### Notion de longueur de diffusion

Tout comme en physique classique, l'étude d'une collision entre deux particules quantiques de masse  $m$  peut être remplacée par celle de la diffusion d'une particule fictive de masse réduite  $\mu = m/2$  évoluant dans un potentiel statique. De manière analogue à la diffusion de la lumière par un atome, la fonction d'onde  $\psi$  décrivant la diffusion de la particule fictive est la somme d'une onde plane incidente et d'une onde diffusée. A longue distance du point de collision, l'onde diffusée est une onde sphérique, de sorte que l'on peut écrire pour une particule fictive de quantité de mouvement  $\vec{p} = \hbar \vec{k}$  avant le choc

$$\psi(\vec{r}) = e^{i \vec{k} \cdot \vec{r}} + \frac{f(\vec{k})}{r} e^{ikr},$$

où  $r$  et  $\vec{k} = k \vec{r} / r$  désignent respectivement la distance au point d'impact et la direction dans laquelle la particule est diffusée. Dans le cas d'une collision élastique où l'énergie cinétique totale des deux particules est conservée les modules des vecteurs d'ondes sont identiques pour l'onde incidente et l'onde diffusée.

L'amplitude de diffusion  $f$  est homogène à une longueur et caractérise complètement les propriétés de diffusion. D'après l'interprétation probabiliste de la fonction d'onde,  $|f(\vec{k})|^2$  est

proportionnel à la probabilité d'être diffusé dans la direction  $\vec{k}$ . Bien souvent dans les expériences d'atomes froids, la température des atomes, et donc leur énergie cinétique  $\hbar^2 k^2 / 2m$

est tellement basse que l'on peut remplacer  $f(\vec{k})$  par sa valeur en  $k = 0$ . On pose alors conventionnellement  $f(0) = -a$ , où  $a$  est appelé longueur de diffusion.  $a$  peut être aussi bien positif que négatif et physiquement sa valeur absolue représente la « taille » effective de l'atome puisqu'en intégrant  $|f|^2$  sur toutes les directions de l'espace, on trouve que la section efficace de diffusion élastique à basse énergie vaut simplement  $4\pi a^2$ .

Il est notable que, dans la limite de basse énergie, l'amplitude de diffusion ne soit caractérisée que par cette seule longueur de diffusion. En particulier, si l'on considère deux systèmes de particules interagissant par des potentiels différents mais possédant la même longueur de diffusion, on s'attend à ce que la physique à basse température soit la même pour les deux systèmes. Dans la description des nuages d'atomes ultra froids, ceci permet de remplacer le potentiel d'interaction interatomique réel (de type Lennard Jones comprenant une partie attractive à longue portée et une partie répulsive à courte portée) par un potentiel plus simple et de même longueur de diffusion sans que les prédictions théoriques ne soient modifiées.

travaux, ceux-ci ont montré que cette transition se faisait probablement sans accident ni transition de phase, mais jusqu'à l'observation des premières résonances de Feshbach dans les atomes ultra-froids, aucun système physique ne permettait d'explorer expérimentalement l'intégralité du diagramme de phase décrivant un gaz de fermions en interactions.

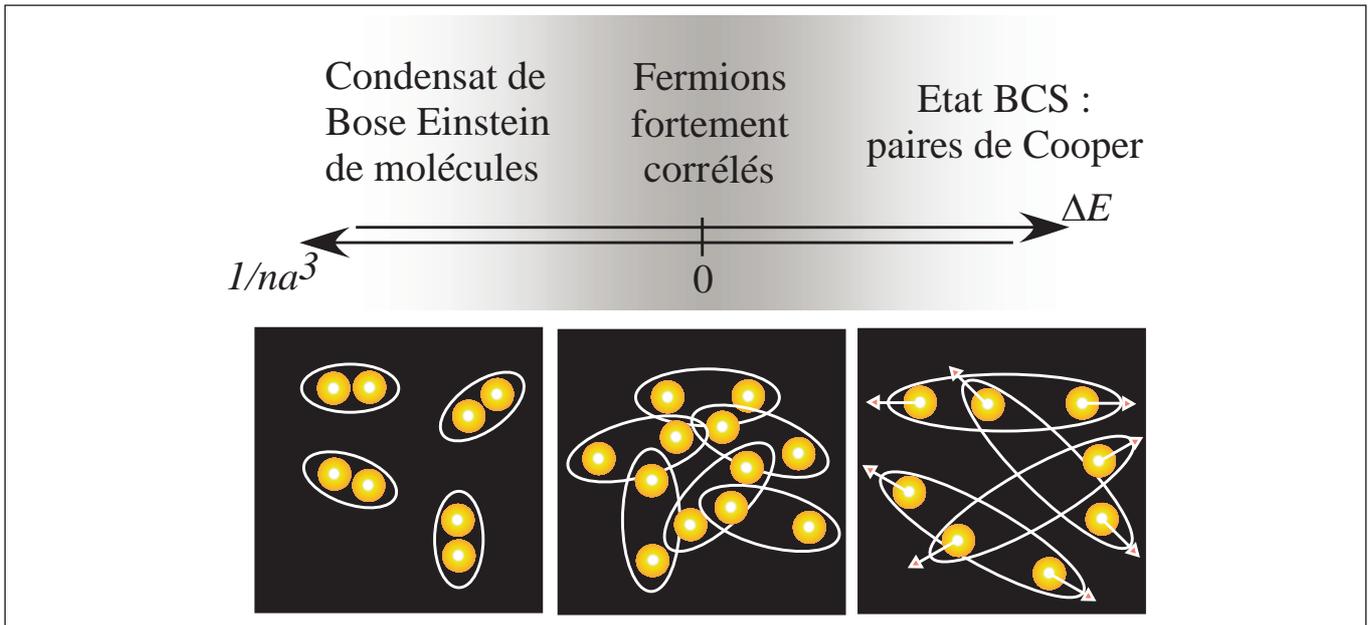
La résonance de Feshbach décrite dans l'encart 3 correspond à un déplacement d'un état lié diatomique d'énergie  $\Delta E$  à l'aide d'un champ magnétique (figure 3). Dans la région  $\Delta E < 0$ ,  $a$  est positif et la résonance de Feshbach est associée à un état moléculaire stable. Ce régime correspond au gaz de fermions en interaction forte dans lequel l'état fondamental est décrit par un condensat de Bose-Einstein de molécules. La région  $\Delta E > 0$  correspond quant à elle à une longueur de diffusion négative et l'état fondamental dans ce domaine de paramètre est bien décrit par un état de type BCS. Pour finir, la transition CBE-BCS se situe autour de la résonance de Feshbach  $\Delta E = 0$  pour laquelle  $a$  diverge. La largeur de cette région de transition peut être obtenue par un argument simple. En effet, on sait que, près de la résonance à  $\Delta E < 0$ , la taille des molécules est de l'ordre de la longueur de diffusion  $a$ . Le gaz de particule ne peut être décrit par un gaz de molécules ponctuelles uniquement si la taille des molécules reste très petite devant la distance interparticules  $d$ . Puisque la densité  $n$  de particules

est de l'ordre de  $1/d^3$ , cette condition est vérifiée si le produit  $na^3$  reste petit devant 1. Au contraire, lorsque  $na^3$  devient grand, les molécules sont si étendues qu'elles se recouvrent les unes les autres et leurs constituants internes fermioniques commencent à se manifester. On parle dans ce cas d'un régime de *fermions fortement corrélés*, ou régime *unitaire*, dans lequel il n'est plus possible d'isoler un constituant élémentaire du gaz (molécule ou atome) réellement pertinent.

Bien que le régime unitaire soit théoriquement très difficile d'accès du fait des fortes corrélations entre particules, on montre que dans le régime où  $n|a|^3 \gg 1$  l'énergie de Fermi est la seule énergie pertinente du problème. Dans ces conditions, le potentiel chimique du gaz peut s'écrire

$$\mu = (1 + \beta)E_F,$$

où le nombre  $\beta$  est universel et ne dépend pas de la nature exacte du système fermionique étudié (quarks, neutrons, atomes froids...). Son évaluation par des moyens théoriques ou expérimentaux est donc d'une importance capitale pour la compréhension des systèmes de fermions en interactions fortes. De récents calculs Monte Carlo réalisés dans le groupe de V. R. Pandharipande ont montré que  $\beta \sim -0.56$ , résultat qui restait à être confirmé expérimentalement.



**Figure 3** - Diagramme de phase de l'état fondamental d'un gaz de fermions au voisinage d'une résonance de Feshbach en fonction de l'écart  $\Delta E$  entre l'énergie de l'état entrant de collision et l'état moléculaire. De gauche à droite : pour  $\Delta E < 0$ , il existe un état moléculaire stable dans lequel les atomes s'apparient dès que  $k_B T \lesssim |\Delta E|$ . Composés de deux fermions, les dimères ainsi formés sont des bosons. Lorsqu'on poursuit le refroidissement, les molécules subissent une condensation de Bose-Einstein amenant le gaz dans un état superfluide. Pour  $\Delta E > 0$ , l'état lié à deux corps disparaît. Un appariement est néanmoins possible à très basse température sous la forme de paires dans l'espace des impulsions mettant en jeu la mer de Fermi dans son ensemble. Entre ces deux régimes, la région  $\Delta E \sim 0$  et  $n|a|^3 \gtrsim 1$  correspond à une situation de fermions fortement corrélés dans laquelle les paires se chevauchent et la notion de molécule ou d'atomes individuels perd sa pertinence.

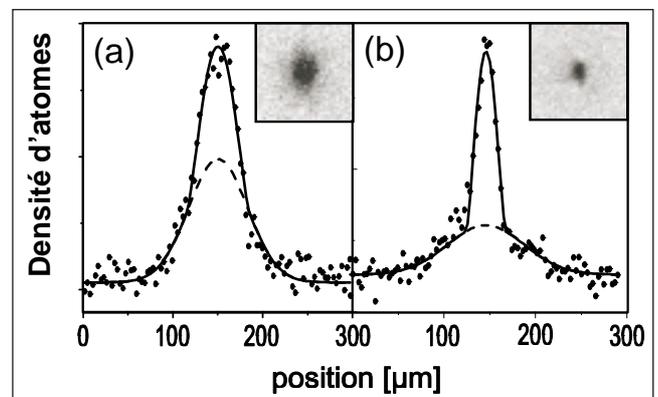
### Etude expérimentale de la transition CBE-BCS

Les atomes de  $^6\text{Li}$  piégés magnétiquement sont polarisés et ne peuvent donc interagir entre eux. Pour pouvoir espérer sonder la transition CBE-BCS, il est donc nécessaire de travailler avec un mélange de plusieurs états de spin. Après la phase de refroidissement sympathique décrite dans la première partie, et nous permettant d'atteindre le régime de dégénérescence quantique, nous transférons les atomes dans un piège dipolaire réalisé par l'intersection de deux faisceaux lasers. A l'aide d'une impulsion radio-fréquence, nous plaçons ensuite les atomes dans une superposition des états de spin haut et de spin bas de façon à permettre l'apparition d'interactions entre fermions de spins opposés. En diminuant la puissance du laser de piégeage, on évapore les atomes les plus chauds et la température du nuage s'abaisse.

La résonance de Feshbach que nous utilisons est située à un champ  $B_F = 834 \text{ G}$  (encadré 3) et la région de stabilité des molécules est caractérisée par les champs magnétiques inférieurs à  $B_F$ . Si l'on se place dans cette région, on commence à former des molécules lorsque la température devient de l'ordre de  $T_c^*$ .

Si l'on forme un nuage quasi-pur de dimères et que l'on diminue encore la température, on atteint le régime de condensation de Bose-Einstein de molécules. Le condensat

est détecté par temps de vol : on coupe brusquement le piège et on laisse le nuage de molécules s'étendre. A la fin de l'expansion, nous augmentons le champ magnétique de façon à franchir la résonance de Feshbach et à rompre les liaisons entre atomes, ainsi qu'on l'a vu précédemment. Ce procédé nous permet d'observer directement le profil densité de molécules représenté sur la figure 4.a et de le comparer à un condensat de  $^7\text{Li}$  obtenu dans le même piège 4.b.



**Figure 4** - (a) Condensat de Bose-Einstein de molécules  $^6\text{Li}_2$ . (b) Condensat de Bose-Einstein de  $^7\text{Li}$ . Les deux profils présentent une double structure somme d'une fraction condensée et non condensée (ligne tiretée). En insert les profils bidimensionnels elliptiques sont caractéristiques d'une expansion superfluide. La différence de largeur est essentiellement due à l'écart de longueur de diffusion dans les deux systèmes.

### Encadré 3

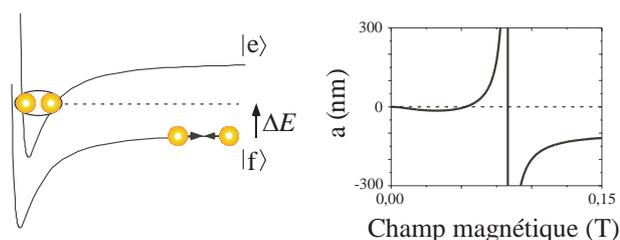
## Résonance de Feshbach et états moléculaires

Un atout majeur des atomes ultra-froids provient de la possibilité de manipuler les interactions interatomiques (et donc la longueur de diffusion) à l'aide d'un simple champ magnétique, en mettant à profit le phénomène dit de résonance de Feshbach. Pour comprendre cette résonance, il est nécessaire de prendre en compte la structure interne des atomes, c'est-à-dire la possibilité qu'un des atomes passe dans un état excité durant la collision. Considérons la diffusion de deux atomes initialement dans leur état fondamental  $|f\rangle$ . Cette diffusion est décrite par un potentiel d'interaction  $V_f$  du type de celui représenté sur la figure. Si lors de la collision un des atomes peut passer dans un état excité  $|e\rangle$ , les deux atomes n'interagissent plus par le potentiel  $V_f$  défini ci-dessus, mais par un potentiel  $V_e$  décalé en énergie. Lors des collisions à faible énergie que l'on rencontre en physique des atomes ultra-froids, l'énergie cinétique des atomes est insuffisante pour faire passer les atomes de l'état  $|f\rangle$  à l'état  $|e\rangle$ . Cependant, il peut se produire qu'un état lié du puits de potentiel  $V_e$  devienne quasi-résonnant avec l'énergie des atomes incidents. Dans ce cas, les atomes peuvent d'après les inégalités de Heisenberg passer un temps  $\tau \sim \hbar/\Delta E$  dans cet état. Lorsqu'ils se trouvent dans l'état lié, les atomes sont localisés plus près l'un de l'autre ce qui augmente considérablement leur interaction. La théorie de la diffusion quantique montre que proche de la condition de résonance  $\Delta E = 0$ , la longueur de diffusion est donnée par  $a \propto -1/\Delta E$  et diverge donc en changeant de signe lorsque  $\Delta E$  s'annule : c'est la résonance de Feshbach.

En pratique, la position relative des états  $|f\rangle$  et  $|e\rangle$  est modifiée par l'ajout d'un champ magnétique externe. En effet, dans le cas du lithium et d'autres atomes tels que le potassium, les moments magnétiques de l'état fondamental et de l'état excité sont différents ce qui permet de décaler magnétiquement les courbes  $V_e$  et  $V_f$  l'une par rapport à l'autre. Dans le cas de l'isotope fermionique  ${}^6\text{Li}$  du lithium, la variation de la lon-

gueur de diffusion est représentée sur la figure et nous utilisons dans nos expériences la résonance de Feshbach localisée au voisinage de 0,083 T.

Une des propriétés frappantes de la résonance de Feshbach est l'existence, pour  $\Delta E < 0$ , d'un état lié du potentiel  $V_e$  énergétiquement plus stable que des atomes libres dans l'état  $|f\rangle$ . En comparaison des molécules usuelles, ces dimères obtenus près d'une résonance de Feshbach ont une très grande extension spatiale et une très faible énergie. En effet, comme nous l'avons vu plus haut, la longueur de diffusion caractérise complètement la physique de basse énergie. Au voisinage de la résonance de Feshbach où l'énergie de liaison  $\Delta E$  est très faible, une analyse dimensionnelle simple nous indique que la taille de l'état moléculaire est de l'ordre de  $a$  et son énergie de liaison vaut  $\Delta E \sim -\hbar^2/ma^2$ . Pour une longueur de diffusion typique de 100 nm, ceci correspond à une énergie de  $10^{-10}$  eV, à comparer aux énergies de liaisons chimiques habituelles de l'ordre d'une fraction d'électron volt.



**Figure** - A gauche : principe de la résonance de Feshbach. On déplace un état lié de l'état  $|e\rangle$  à l'aide d'un champ magnétique. Lorsque l'énergie  $\Delta E$  de cet état devient résonnante avec celle des atomes incidents, la longueur de diffusion diverge. A droite : longueur de diffusion entre deux atomes de  ${}^6\text{Li}$  de spins opposés en fonction du champ magnétique. La résonance de Feshbach est localisée au voisinage de 0.0834 T.

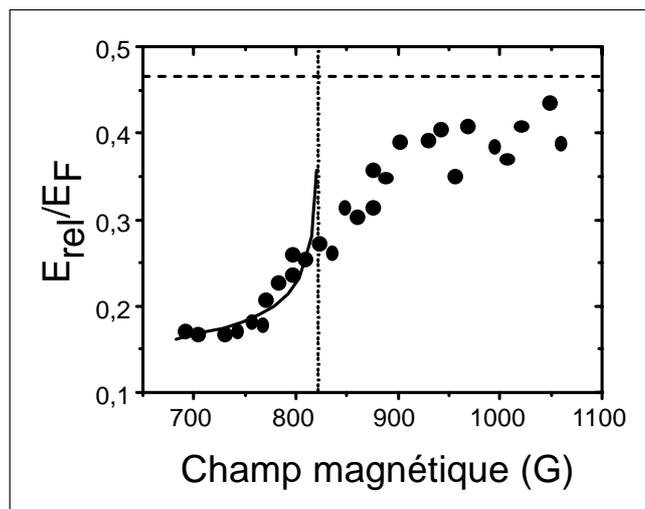
Au-delà de la différence de largeur due à la différence de longueur de diffusion des deux systèmes, les profils partagent deux caractéristiques prouvant l'observation de la condensation de Bose-Einstein des molécules : la double structure, somme des parties condensées et non condensées, et le profil elliptique signalant une expansion superfluide.

Pour explorer le régime fortement corrélé CBE-BCS, nous partons d'un condensat de molécules obtenu à un champ de 700 G. On augmente alors le champ magnétique jusqu'à une valeur  $B$  pour laquelle on image le nuage.

En mesurant le rayon du nuage après temps de vol, nous avons accès à une quantité baptisée « énergie relâchée ». En effet, lorsque l'on ouvre le piège, le nuage explose et une partie de l'énergie d'interaction entre particules est transformée en énergie cinétique. Ce transfert est très rapide et on estime qu'au bout d'une fraction de milliseconde, toute

l'énergie est convertie sous forme cinétique. Plus l'énergie relâchée dans ces premiers instants sera grande, plus le nuage explosera vite. Après un temps de vol donné, on s'attend donc à ce que le nuage soit d'autant plus étendu que l'énergie sera grande.

Le graphe de l'énergie relâchée en fonction du champ magnétique est représentée sur la figure 5. On constate que, de même que pour les profils de densité, aucun accident ne semble marquer le passage à la résonance. On peut comparer ce graphe aux théories limites du condensat de molécules (ligne pleine) et du gaz de Fermi en interaction faible (ligne tiretée) pour lesquelles on trouve un accord relativement bon. Dans le régime de condensation de molécules, la mesure de l'énergie relâchée nous donne accès à la longueur de diffusion  $a_{\text{nm}}$  associée aux collisions entre molécules. Expérimentalement, on trouve  $a_{\text{nm}} \sim 0,6a$ , ainsi que le prédisent les calculs réalisés par D. Petrov et G. Shlyapnikov.



**Figure 5** - Énergie relâchée dans la région de la transition CBE-BCS. Dans le domaine de condensation de molécules, les données expérimentales coïncident avec les prédictions de la théorie de la condensation de Bose-Einstein (ligne pleine). A grand champ, on approche le comportement d'un gaz de Fermi sans interaction (ligne tiretée). A la résonance (ligne pointillée) la valeur de  $E_{\text{rel}}$  donne accès au paramètre  $\beta$  caractérisant le comportement unitaire.

A résonance, on peut montrer que si l'on suppose que les paires sont toutes brisées par l'ouverture du piège, l'énergie relâchée est donnée par  $E_{\text{rel}} = \sqrt{1 + \beta} E_{\text{rel}}^0$ , où  $E_{\text{rel}}^0$  est l'énergie relâchée par un gaz de Fermi sans interaction et  $\beta$  est le paramètre sans dimension caractérisant le régime unitaire (cf. encadré 2). Nos données expérimentales nous donnent  $\beta \sim -0.68 \pm 0.13$  ce qui est relativement proche de la valeur  $\beta \sim -0.56$  prédite théoriquement.

## Perspectives

Les résultats que nous avons présentés ici ne constituent qu'une facette des études effectuées ces derniers mois sur ces gaz de Fermi en interaction et d'autres données importantes ont été prises en Europe et aux USA. Les équipes de R. Grimm à l'université d'Innsbruck et de J. Thomas à Duke

ont étudié les modes d'excitation des condensats de fermions dans la zone de transition CBE-BCS. Plus récemment, le groupe d'Innsbruck a réalisé l'observation de paires liées dans la région  $a < 0$ . Ces observations sont complétées par les résultats des équipes de D. Jin à JILA et W. Ketterle à MIT qui ont montré que la distributions de vitesse de ces paires étaient très piquées autour de  $k = 0$ , indiquant la présence d'un condensat de paires de fermions.

De l'ensemble de ces études il ressort aujourd'hui qu'une phase superfluide existe très probablement au voisinage de la résonance de Feshbach. L'étude de la région BCS achèverait de clore l'exploration du diagramme de phase proposé par T. Leggett, P. Nozières et S. Schmitt-Rink. L'étude de la superfluidité dans cette région se heurte cependant au fait que les paires de Cooper sont localisées sur une bande de largeur  $\Delta$  autour de la surface de Fermi. Loin de la résonance,  $\Delta$  tend vers 0 et le nombre de paires diminue. Le condensat BCS ressemble donc beaucoup à une mer de Fermi pour ce qui est de ses propriétés de volume, telles que l'énergie relâchée. Pour étudier directement la superfluidité du système, les propositions théoriques ne manquent pas. On peut songer à mettre en rotation le gaz de Fermi, une méthode qui s'est avérée très fructueuse pour produire des tourbillons quantifiés dans les condensats de bosons ou encore à étudier par des méthodes d'interférence l'ordre à longue portée existant dans l'échantillon.

Au-delà de ces études sur la superfluidité, les gaz de Fermi ouvrent un nouveau point de vue sur certains phénomènes observés en matière condensée. On peut ainsi citer l'étude des mélanges bosons-fermions dont on a vu un exemple avec le condensat de  $^7\text{Li}$  immergé dans la mer de Fermi de  $^6\text{Li}$ , qui est l'analogue microscopique des mélanges  $^3\text{He}/^4\text{He}$  utilisés par exemple en cryogénie dans les réfrigérateurs à dilution. Une autre possibilité serait de placer ces fermions dans des réseaux optiques, des potentiels périodiques obtenus par piégeage dipolaire dans une figure d'interférence lumineuse. Cette configuration permettrait par exemple d'étudier les mécanismes de transition métal-isolant induite par le désordre ou les interactions dont certains aspects sont encore mal compris dans les systèmes bidimensionnels.

## Pour en savoir plus

- ASPECT (A.), SALOMON (C.), « Atomes refroidis par laser, vers le microKelvin », *Images de la Physique*, p. 74, (1990).
- COURTOIS (J.Y.), GRYNBERG (G.), « Cristallisation d'atomes dans un réseau de lumière », *Images de la physique*, p. 88, (1994).
- DALIBARD (J.), « Les condensats de Bose-Einstein en phase gazeuse », *Images de la physique*, p. 22, (2000).
- BOURDEL (T.), KHAYKOVICH (L.), CUBIZOLLES (J.), ZHANG (J.), CHEVY (F.), TEICHMANN (M.), TARRUELL (L.), KOKKELMANS (S.), SALOMON (C.), « Experimental Study of the BEC-BCS Crossover Region in Lithium 6 », *Phys. Rev. Lett.*, 93, p. 050401, (2004).

## La mesure du Temps au XXI<sup>e</sup> siècle

Christophe SALOMON  
 Laboratoire Kastler Brossel  
 Ecole Normale Supérieure  
 CNRS et UPMC  
 24, rue Lhomond  
 75231 Paris, France

### Un peu d'histoire : la quête de la précision

Depuis l'antiquité, les hommes ont toujours cherché à mesurer le temps ou, plus précisément, les intervalles de temps. Ils se sont d'abord tournés vers les phénomènes naturels qui présentent une grande régularité comme la rotation de la terre autour du soleil, la rotation de la lune autour de la terre ou encore la rotation de la Terre sur elle-même pour définir des calendriers et des échelles de temps. Ils ont ensuite cherché à réaliser eux-mêmes des instruments toujours plus précis et l'un des plus anciens instruments connus est le sablier égyptien. Cependant, il faudra attendre le début des années 1600 et la découverte du pendule par Galilée et sa mise en pratique par Huygens, pour que les instruments commencent à atteindre une précision de l'ordre de quelques dizaines de secondes par jour (Figure 1).

Figures de l'article la mesure du temps  
 C. Salomon

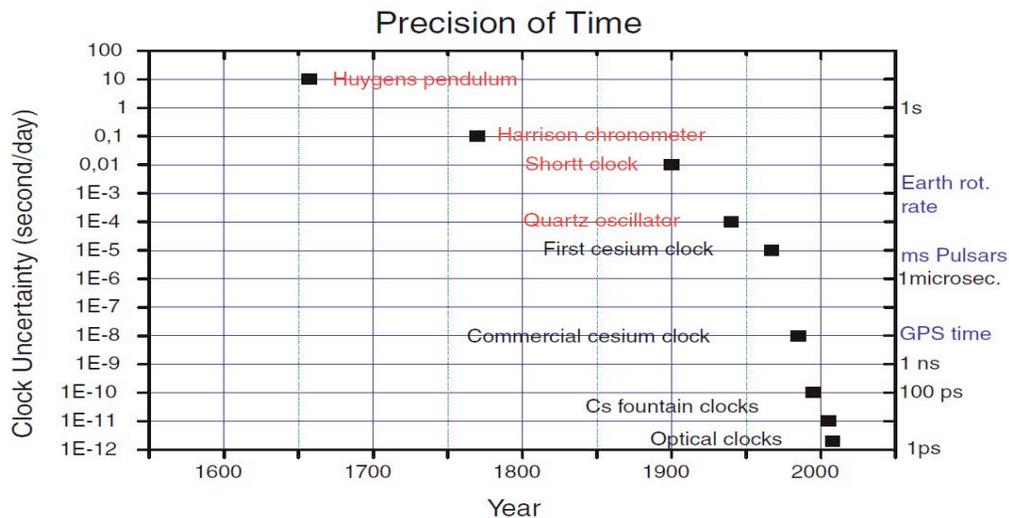


FIGURE 1. L'évolution de la précision de la mesure du temps sur les quatre derniers siècles. Avant 1950, les horloges utilisaient des systèmes mécaniques comme le pendule ou les montres à échappement. Depuis le milieu du 20<sup>ème</sup> siècle, des horloges les plus précises sont les horloges à atomes. Les plus récentes présentent une précision de 1 seconde tous les 3 milliards d'années, ou 5 secondes sur l'âge de l'univers.



Les petites oscillations sont remarquablement indépendantes de l'amplitude du mouvement et sont remarquablement périodiques. En comptant le nombre de ces oscillations du pendule, on mesure un intervalle de temps, réalisant ainsi une horloge. Plus la période du pendule est courte, plus élevé sera le nombre d'oscillations dans un intervalle de temps donné et plus précise sera la mesure de cet intervalle. Enfin, une formule simple relie la période des oscillations à la longueur du fil et à l'accélération de la gravité indiquant aussi les limites d'un tel dispositif, les variations de température et les variations de l'accélération de la pesanteur.

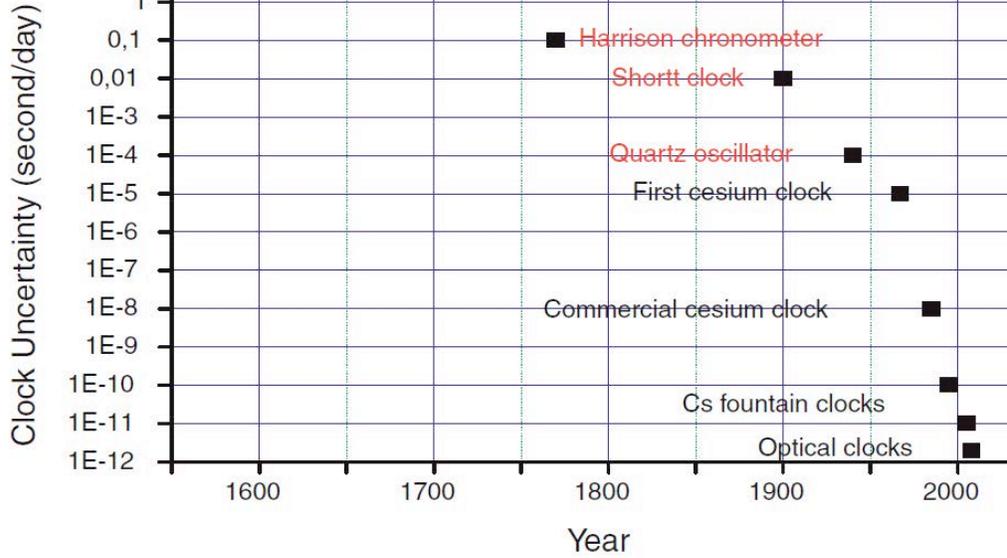


FIGURE 2 – Le pendule de Galilée/Huygens. Les petites oscillations du pendule sont indépendantes de l'amplitude du mouvement et sont remarquablement périodiques. En comptant le nombre de ces oscillations du pendule, on mesure un intervalle de temps, réalisant ainsi une horloge. Plus la période du pendule est courte, plus élevé sera le nombre d'oscillations dans un intervalle de temps donné et plus précise sera la mesure de cet intervalle. Enfin, une formule simple relie la période des oscillations à la longueur du fil et à l'accélération de la gravité indiquant aussi les limites d'un tel dispositif, les variations de température et les variations de l'accélération de la pesanteur.

La percée scientifique suivante fut l'invention de l'oscillateur à quartz en 1918. Le système périodique n'est plus un système mécanique mais un champ électromagnétique oscillant reposant sur les propriétés piezoélectriques du quartz.

La vibration mécanique du cristal de quartz produit un champ électrique oscillant à une fréquence bien définie et bien plus élevée que celle du pendule (quelques millions d'oscillations par seconde). Ce champ est amplifié électroniquement jusqu'à atteindre le seuil d'oscillation, ce qui se produit lorsque le gain de l'amplificateur excède les pertes du système. Les montres et oscillateurs à quartz ont envahi notre monde moderne et constituent une base de temps suffisamment stable pour la plupart des applications courantes.

Cependant, comme le pendule, mais à un degré bien moindre, l'oscillateur à quartz présente des dérives en température. Pour domestiquer ces oscillateurs, les physiciens ont eu l'idée de réaliser une horloge atomique qui combine les propriétés de l'oscillateur à quartz et celles de l'atome. Dans un atome, l'énergie d'excitation ne peut prendre que des valeurs discrètes ; on dit que les niveaux d'énergie sont quantifiés ; ils sont régis par les lois de la mécanique quantique qui gouverne le comportement des objets microscopiques. Les niveaux d'énergie ne dépendent pas de la température (ou plus exactement très, très peu !). Les atomes sont universels : un atome de césium à Paris présentera exactement les mêmes propriétés qu'un atome de césium à New-York ou Tokyo. Ce n'est pas le cas des pendules ou des oscillateurs à quartz qui sont extrêmement difficiles à réaliser à l'identique. La première horloge à césium réalisée en Angleterre par Essen et Parry en 1955 fonctionnait sur le principe décrit sur la figure 3 et son erreur journalière n'était que de 0,00001 seconde bien plus faible que l'erreur d'un quartz ou des meilleurs systèmes mécaniques.

La 13<sup>ème</sup> Conférence Générale des Poids et Mesures de 1967 choisit ainsi l'atome de césium pour donner la définition actuelle de la seconde du système international d'unités : "La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état électronique fondamental du césium 133". Depuis cette époque, plusieurs milliers d'horloges à césium commerciales ont été produites pour de nombreuses applications dont le fameux système de navigation par satellite GPS. Au début des années 1990, les atomes refroidis par laser ont permis d'augmenter la précision des horloges à césium par encore deux ordres de grandeur. En effet, à une température de un millionième de degré au dessus du zéro absolu les atomes de césium ont une vitesse d'agitation de seulement 7 millimètres par seconde. Ils peuvent être utilisés en fontaine atomique de façon à obtenir un temps d'interaction avec l'onde électromagnétique excitatrice approchant 1 seconde (Figure 4). Cette durée est cent à mille fois plus longue que dans l'horloge à jet atomique de Essen et Parry. Les fontaines atomiques du LNE-SYRTE présentent une erreur de 10 picosecondes par jour et, avec d'autres horloges disséminées dans le monde, contribuent à la réalisation du temps Atomique International (TAI) qui est le temps de référence au niveau mondial. Aujourd'hui, une vingtaine de fontaines atomiques sont en fonctionnement dans le monde et sont régulièrement comparées entre elles pour réaliser le TAI.

Ces deux dernières années, de nouveaux développements sur les horloges atomiques ont permis d'approcher la picoseconde d'erreur par jour, soit moins d'une seconde tout les 3 milliards d'années ou encore 5 secondes sur l'âge de l'univers ! Ces nouvelles horloges sont des horloges optiques : au lieu d'utiliser un champ électromagnétique de période  $10^{10}$  Hertz comme l'horloge à césium, (le pendule bat à 10 milliards de périodes par seconde !) elles utilisent un champ lumineux qui oscille encore plus vite :  $10^{15}$  Hz, soit 100 000 fois plus vite. Ce champ lumineux est produit par un laser et ce laser est asservi sur une transition atomique qui se trouve

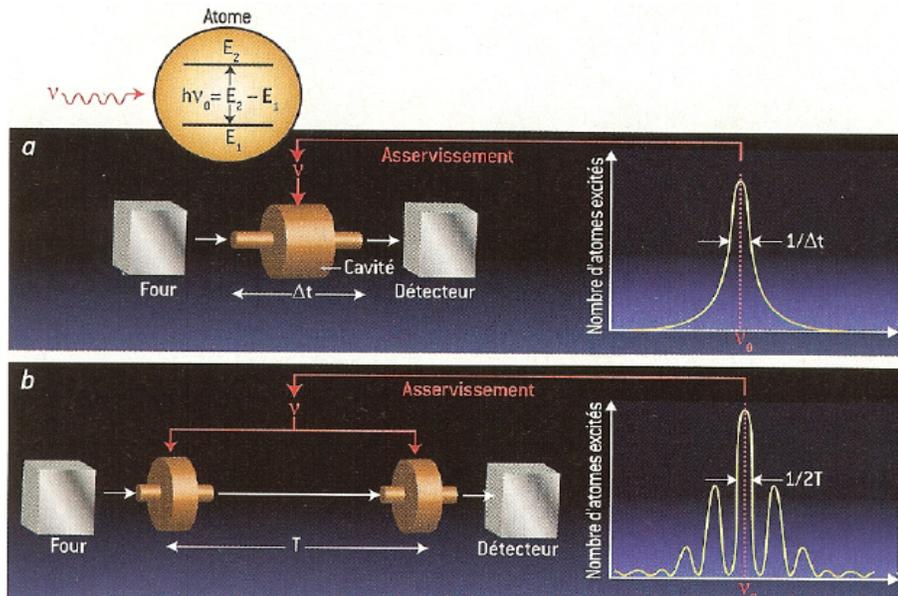


FIGURE 3 – Principe d’une horloge atomique. Une radiation électromagnétique de fréquence  $\nu$  éclaire un ensemble d’atomes à deux niveaux d’énergie  $E_1$  (fondamental) et  $E_2$  (excité). La séparation en énergie est  $h\nu_0$  ou  $h$  est la constante de Planck. Les atomes de césium issus d’un four forment un jet atomique qui traverse une cavité où la radiation est appliquée. Le détecteur  $D$  compte le nombre d’atomes portés dans l’état excité quand la radiation de fréquence  $\nu$  est proche de la fréquence atomique  $\nu_0$ . Lorsqu’on balaye la fréquence de la radiation autour de  $\nu_0$ , le nombre d’atomes excités fournit une courbe en cloche, une courbe de résonance centrée en  $\nu_0$  dont la largeur est inversement proportionnelle au temps d’interaction  $\Delta t$  entre la radiation et les atomes. La méthode proposée par N. Ramsey utilise deux zones séparées dans l’espace. Les atomes subissent deux interactions successives séparées dans le temps par une quantité  $T$ . Il en résulte un phénomène d’interférence produisant des franges de largeur  $1/2T$ . Plus les atomes sont lents, plus les franges seront étroites et meilleure sera l’horloge.

dans le spectre visible ou proche ultra-violet. L’analogie avec le pendule décrit plus haut indique que la période d’oscillation est ici beaucoup plus courte : il est donc plus facile de déceler un infime écart de temps en comptant un nombre entier de périodes. Mais comment compter ces oscillations si rapides ? aucun photodétecteur n’est capable de répondre à un champ oscillant si rapidement. C’est ici que la contribution des prix Nobel de physique 2005, Jan Hall et Theodore Haensch est cruciale. Ces deux chercheurs et leurs équipes ont mis au point un “diviseur” de fréquences optiques très efficace et simple à mettre en oeuvre. Avec ce diviseur, il est maintenant facile de raccorder les fréquences rapides du domaine optique au domaine radio où les signaux oscillants sont plus lents : ils peuvent être transmis simplement sur des câbles et les périodes d’oscillation comptées par des méthodes électroniques standard. Le diviseur peut aussi être utilisé en sens inverse, comme multiplicateur et réaliser, à partir des basses fréquences, des références de fréquences précises dans le domaine visible du spectre.

Comme le montre le graphe de la figure 1, l’amélioration des performances des horloges est spectaculaire : en un peu plus de 4 siècles, les meilleures horloges atomiques ont gagné 13 ordres de grandeurs par rapport au pendule de Huygens !

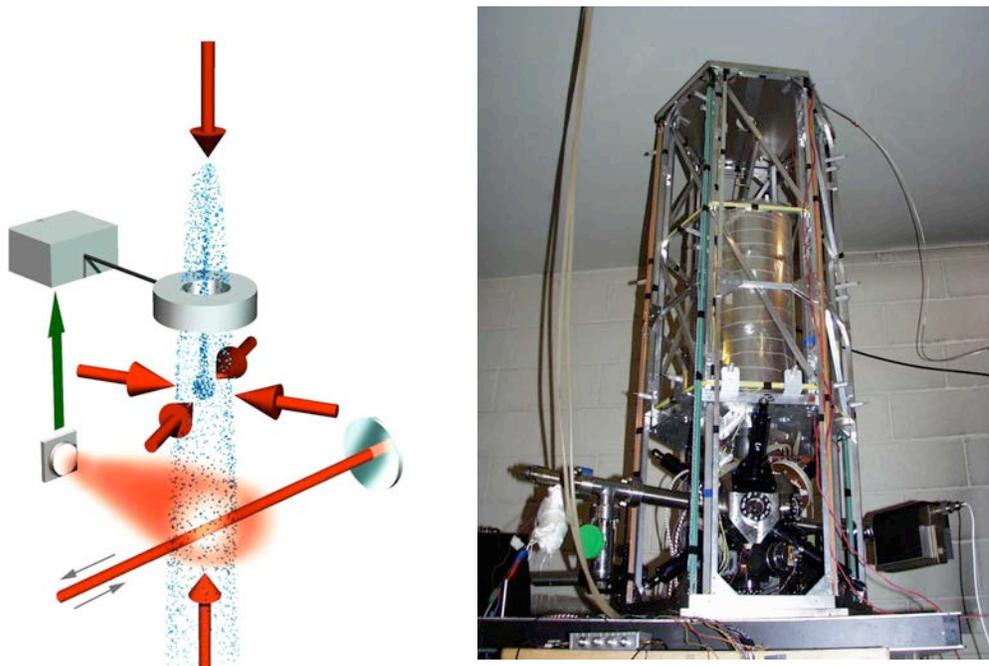


FIGURE 4 – (a) Une fontaine atomique. Les atomes de césium sont refroidis par laser à une température de 1 microKelvin et lancés vers le haut avec une vitesse de 4 m/s. Ils traversent la cavité micro-onde qui contient le champ excitateur de la mesure de fréquence. Le temps entre les deux interactions atomiques est de l'ordre de 0,5 secondes et est environ 100 fois plus long que dans une horloge à jet thermique illustrée sur la figure 5. (b) Une fontaine à atomes froids du LNE-SYRTE de l'observatoire de Paris.

Sur les 50 dernières années le gain est d'un facteur 10 tous les 10 ans! Nul ne sait si cette progression se maintiendra à un tel rythme dans l'avenir!

### Les horloges à atomes froids et l'horloge spatiale PHARAO

Revenons au principe des fontaines atomiques illustré sur la figure 4. Comme nous l'avons dit plus haut, la fontaine atomique utilise la gravité pour allonger le temps d'interaction entre le champ oscillant excitateur et les atomes. Dans la méthode inventée en 1952 par le prix Nobel N. Ramsey, il n'est pas nécessaire que ce champ oscillant éclaire en permanence les atomes. Deux interactions successives suffisent et la courbe de résonance possède une largeur donnée par l'inverse du temps entre ces deux interactions et non pas le temps passé par les atomes à l'intérieur de la cavité. Pour allonger ce temps, il est donc tentant de lancer les atomes de la fontaine le plus haut possible et une expérience à l'université de Stanford explore cette direction avec une fontaine de 10 mètres de haut. De telles dimensions apportent de nouvelles contraintes et le gain en précision attendu n'évolue que comme la racine de la hauteur; il sera d'un facteur 3 par rapport aux fontaines en fonctionnement. Une solution plus radicale est de s'affranchir de l'accélération de la pesanteur. C'est le projet spatial PHARAO (Projet d'Horloge Atomique par Refroidissement d'Atomes en Orbite) conduit par le CNES, le LNE-SYRTE à l'observatoire de Paris et le LKB

à l'École Normale Supérieure.

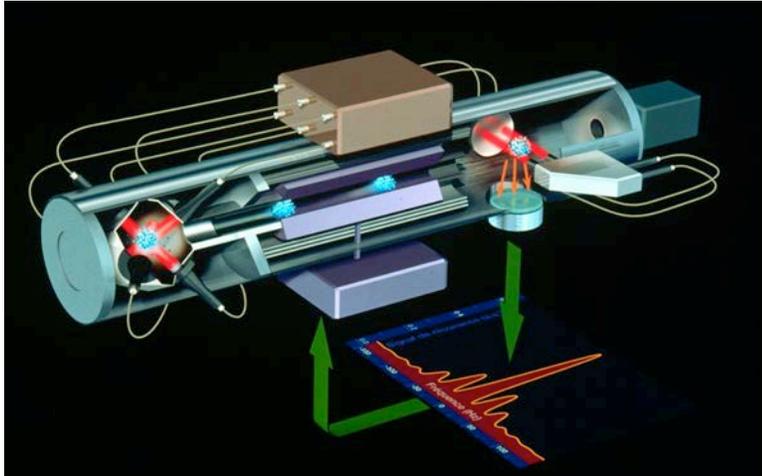


FIGURE 5 – Principe de l'horloge à atomes froids PHARAO en microgravité. Les atomes de césium sont collectés dans une chambre à vide (à gauche). Ils sont envoyés dans la cavité micro-onde où ils subissent les deux interactions successives avec le champ accordé à la fréquence de l'atome de césium  $\nu_0 = 9\,192\,631\,770$  Hz. Les atomes sont ensuite détectés par fluorescence induite par laser. Pour une vitesse de lancement de  $10\text{ cm/s}$ , la largeur de la résonance attendue en microgravité est  $0.2\text{ Hz}$ , cinq fois plus fine que dans une fontaine atomique en présence de gravité.

Le principe de l'horloge en microgravité PHARAO est illustré sur la figure 5. L'on revient en quelque sorte au schéma de l'horloge de Essen et Parry mais les atomes du jet atomique sont maintenant remplacés par un jet ultra-lent d'atomes refroidis par laser. L'absence de gravité qui règne à bord d'un satellite permet aux atomes d'évoluer à vitesse constante et les deux zones d'interaction sont séparées spatialement. Dans un dispositif compact (figure 6 a et b), on espère produire une résonance atomique 5 à 10 fois plus fine que dans une fontaine atomique, soit près de dix mille fois plus fine que dans une horloge commerciale !

L'horloge PHARAO sera un élément central de la mission spatiale européenne ACES (Atomic Clock Ensemble in Space) de l'agence spatiale européenne ESA. La charge utile ACES (Figure 8) sera installée en 2013 à bord de la station spatiale internationale (ISS) qui orbite autour de la terre à une altitude moyenne de 400 kms. Par temps clair, il est très facile de voir l'ISS à l'oeil nu une heure environ après le coucher du soleil. Eclairée par le soleil, elle apparaît à l'observateur comme une étoile très brillante qui parcourt la voûte céleste en environ 5 minutes ! sa période orbitale est d'environ une heure et demie, soit 5400 secondes. Outre l'horloge PHARAO, la mission spatiale ACES comporte un maser à hydrogène développé par la Suisse, un système de comparaison de temps sol-bord ultra-précis développé par l'Allemagne, un transfert de temps par laser, un récepteur GPS/GALILEO et des équipements de support. L'ensemble pèse 220 kg et consomme 450 watts.

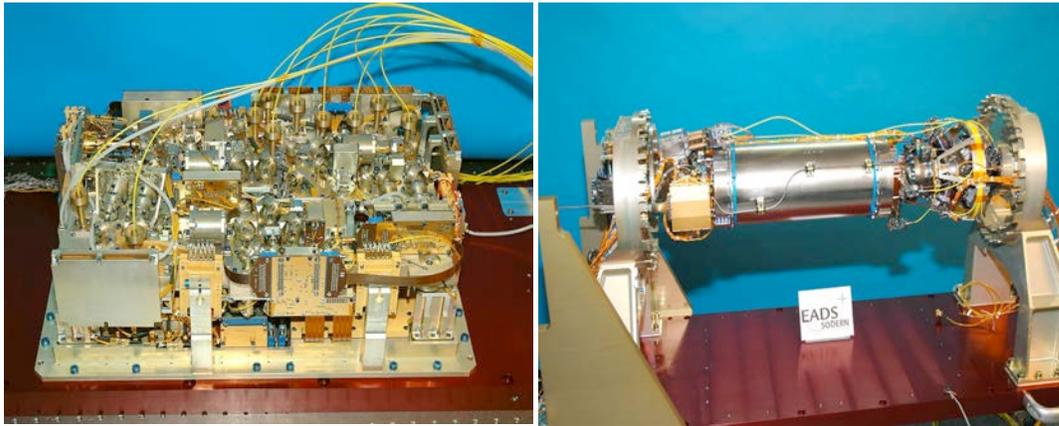


FIGURE 6 – (a) Le banc optique de l'horloge PHARAO. Il comporte huit lasers à diode stabilisés en température, fréquence et en intensité. Les faisceaux sont dirigés vers la chambre à vide à l'aide de fibres optiques (en jaune). Il occupe un volume de 30 litres et pèse 20 kg. Réalisation société EADS-SODERN. (b) Le tube à vide de l'horloge PHARAO où a lieu l'interaction entre les atomes froids et le champ excitateur micro-onde. Sa longueur est de 900 mm et son poids de 45 kg. Réalisation de la société EADS/SODERN.



FIGURE 7 – La mission spatiale ACES de l'Agence spatiale européenne et l'horloge PHARAO et un maser à hydrogène seront mis en orbite à bord de la Station spatiale internationale en 2013. Des comparaisons de temps de précision avec un réseau de stations terrestres permettront d'effectuer des tests de physique fondamentale en relativité. L'acceptation de CALIBRE permettra également des applications en sciences de la terre et en navigation.

**Les tests de physique fondamentale**

Les objectifs scientifiques d'une telle mission comportent plusieurs volets : tout d'abord l'horloge PHARAO en microgravité et le maser à hydrogène réaliseront



! "#\$%&'()\*+,-./:;<=>?@A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z [ \ ] ^ \_ ` { | } ~ ¡ ¢ £ ¤ ¥ ¦ § ¨ © ª « ¬ ® ¯ ° ± ² ³ ´ µ ¶ · ¸ ¹ º » ¼ ½ ¾ ¿ À Á Â Ã Ä Å Æ Ç È É Ê Ë Ì Í Î Ï Ñ Ò Ó Ô Õ Ö × Ø Ù Ú Û Ü Ý Þ ß à á â ã ä å æ ç è é ê ë ì í î ï ð ñ ò ó ô õ ö ÷ ø ù ú û ü ý þ ÿ

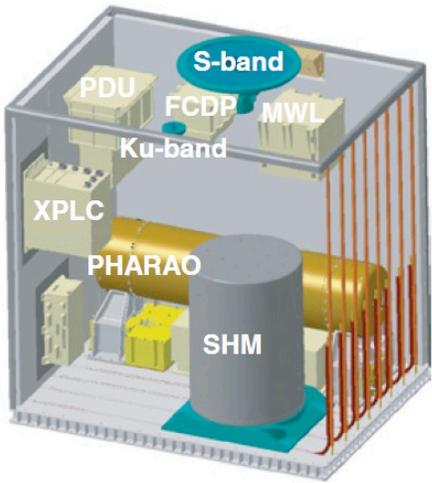
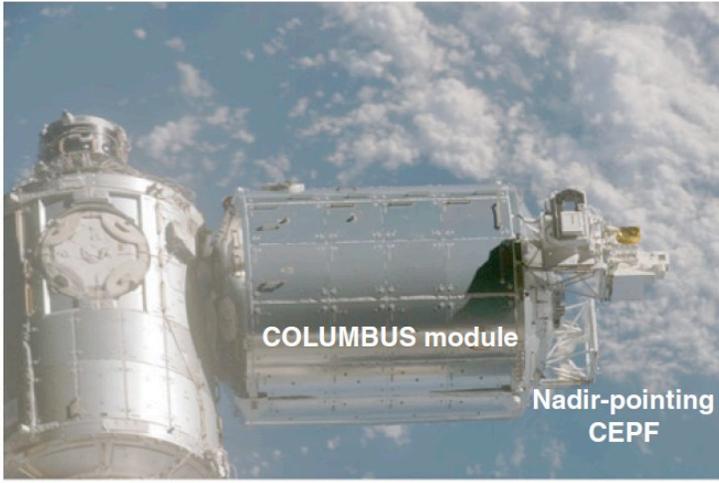


FIGURE 8 – A gauche le module européen Columbus de la station spatiale internationale et la Nadir-pointing CEPF. A droite, schéma des équipements de support de la mission ACES (SHM, XPLC, Ku-band, FCDP, MWL, S-band, PDU).

dans l'espace une échelle de temps de très haute stabilité. Cette échelle de temps sera comparée à celle fournie par un réseau d'horloges au sol. Il sera alors possible de mesurer avec une grande précision l'effet Einstein, le décalage gravitationnel des horloges : la fréquence de l'horloge PHARAO, mesurée par le réseau d'horloges au sol apparaîtra plus élevée par une quantité  $gH/c^2$ , où  $g$  est l'accélération de la pesanteur,  $H$  l'altitude de l'ISS est  $c$  la vitesse de la lumière. Avec l'altitude de 400 kms, on attend un décalage de fréquence de  $+ 4.5 \cdot 10^{-11}$  en valeur relative. Avec des horloges stables et exactes à  $10^{-16}$ , l'effet Einstein pourra être testé au niveau de  $2 \cdot 10^{-6}$ , une amélioration par un facteur 70 par rapport à la précédente expérience spatiale Gravity Probe A de la NASA en 1976.

En second lieu, grâce à cette échelle de temps spatiale, il sera possible de comparer entre elles les diverses horloges au sol qui participeront à la mission. Celles-ci fonctionnent souvent sur des principes physiques différents, utilisent des atomes différents ou encore des transitions atomiques différentes. Cela permettra alors de tester la conjecture du grand physicien P. Dirac : est-ce que les constantes fondamentales de la physique sont invariables dans le temps ? L'objectif de la mission ACES est ici de réaliser un tel test au niveau global avec une sensibilité de  $10^{-17}$ /an. Par exemple, la constante de structure fine  $\alpha$  qui caractérise l'interaction électromagnétique et qui est responsable de la stabilité des atomes et des molécules a-t-elle évolué depuis les premiers âges de l'univers ? Ou encore le rapport des masses des constituants fondamentaux de la matière que sont les protons et les électrons est-il en train de changer avec l'âge de l'univers ? Cette recherche est extrêmement active aujourd'hui au niveau mondial car son enjeu est considérable. Si l'on trouve en effet une variation pour l'une de ces quantités, ce sera le signe que le principe d'équivalence, l'un des fondements, depuis Einstein, de notre description actuelle de la physique, est violé. Cela indiquerait que de nouvelles interactions ou nouvelles forces sont en jeu, qu'il faudra découvrir et étudier ! Il est utile de rappeler ici que

les astrophysiciens nous indiquent que près de 95 % de la masse de l'univers visible aujourd'hui est constituée de matière noire ou d'énergie noire d'origine inconnue !

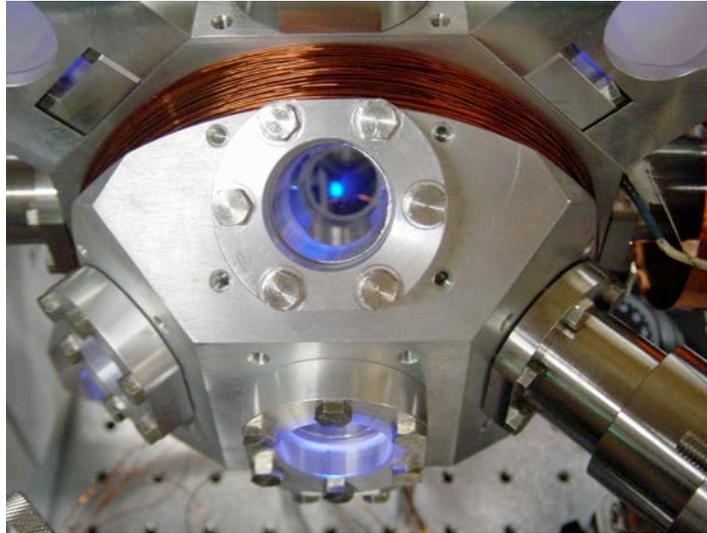


FIGURE 9 – Une horloge optique à atomes de strontium refroidis par laser, en cours de développement par l'équipe de Pierre Lemonde au laboratoire LNE-SMRT de l'observatoire de Paris. La fluorescence bleue des atomes de strontium est visible au centre de l'enceinte à vide. Ce type d'horloge est le plus précis pour atteindre une stabilité de fréquence dans la gamme des  $10^{-18}$ .

### Quelques applications

Enfin, outre ces objectifs de test des lois fondamentales de la physique et une amélioration prévisible du Temps Atomique International par ces comparaisons entre horloges au niveau global, la mission ACES comporte également des objectifs scientifiques appliqués : le premier a trait à la géodésie. En effet, ayant testé la validité du décalage gravitationnel des horloges, on pourra ensuite utiliser l'effet Einstein pour réaliser une nouvelle sorte de géodésie : l'effet Einstein sera utilisé pour déterminer la différence des potentiels gravitationnels entre deux horloges distantes. Supposons que ces deux horloges soient identiques, au repos, et leur fréquences comparées à distance par la mission ACES ou, pour des distances plus faibles, par fibre optique télécom. Leur écart de fréquence sera directement imputable à leur différence de potentiel gravitationnel. Cette nouvelle méthode de géodésie pourra être comparée aux méthodes existantes pour la détermination du géode terrestre qui reposent principalement sur des missions spatiales ou des méthodes de nivellement terrestres. ACES vise à démontrer ce nouveau type de géodésie relativiste avec une sensibilité en distance verticale au niveau de 10 centimètres. Dans une publication récente, l'équipe de D. Wineland au NIST Boulder a mis en évidence cet effet en comparant deux horloges optiques dont l'une était soulevée verticalement d'une trentaine de centimètres ! Si l'on extrapole les performances des horloges actuelles à l'échelle de 10 ans comme indiqué sur la figure 1, les horloges optiques devraient atteindre une stabilité de fréquence de  $10^{-18}$  soit l'équivalent de 1 cm de décalage gravitationnel. A

ce niveau, le potentiel terrestre n'est plus du tout stable ; suivant l'état des marées océaniques, la pression atmosphérique, les vents et le niveau de l'eau dans les nappes phréatiques, le potentiel terrestre varie ! Les horloges deviennent ainsi un nouveau type de senseur géodésique ; mais inversement l'on peut craindre que ces fluctuations du potentiel terrestre ne viennent limiter la qualité de la mesure du temps et de ses applications !

Une solution possible à ce problème sera alors de mettre dans l'espace une ou plusieurs horloges ultrastables de façon à s'affranchir de ces fluctuations. En effet leur influence décroît très vite lorsque l'on s'éloigne de la surface de la terre.

Une seconde classe d'applications repose sur l'utilisation du récepteur GPS/GALILEO qui sera placé sur la plateforme ACES pour l'étude de l'atmosphère terrestre. Les signaux émis par les satellites GPS lorsqu'ils apparaissent ou disparaissent au dessus de l'horizon vu par IISS sont perturbés par la vapeur d'eau de l'atmosphère présente sur le trajet satellite GPS-ISS. De même les signaux sont affectés par les différences de température en fonction de l'altitude. Les spécialistes de météorologie utilisent ces signaux pour reconstituer une carte des zones nuageuses et les profils de température de l'atmosphère. Une direction de recherche actuelle concerne également la réflexion des signaux GPS sur la surface de la mer qui donne accès à la hauteur des vagues et à leur direction.

## Le futur

La mission spatiale ACES aborde la dernière phase de réalisation avant son lancement vers l'ISS. Les modèles d'ingénierie des instruments ont été réalisés et testés au cours des années 2008-2010. L'horloge PHARAO et les autres instruments de vol sont en cours de fabrication dans l'industrie. Ils seront assemblés et testés au centre spatial du CNES à Toulouse avant d'être acheminés vers Friedrichshafen en Allemagne où l'intégration globale sur la plate-forme ACES sera réalisée. Le lancement dans l'espace sera réalisé par une fusée japonaise dans la seconde moitié de 2013 pour une durée de mission de 18 mois à 3 ans. Les équipes d'ingénieurs et de scientifiques préparent maintenant les opérations en vol, l'acquisition des données et leur exploitation.

Si l'on revient à l'amélioration exponentielle des performances des horloges qu'indique la figure 1, jusqu'où les horloges atomiques pourront elles progresser avant qu'une nouvelle technologie ne viennent les surpasser ? De façon plus prosaïque, après 45 ans de bons et loyaux services, la précision de la définition actuelle de la seconde fondée sur l'atome de césium est maintenant dépassée par un facteur 20 par les horloges optiques. Il va donc falloir changer la définition de la seconde du SI ; les atomes candidats sont nombreux (Figure 9) et les travaux en laboratoire explorent plusieurs pistes pour atteindre des stabilités de fréquence de  $10^{-18}$ - $10^{-19}$  !

Gageons que de nouvelles applications scientifiques et de nouvelles idées pour mesurer le temps de façon de plus en plus précise verront le jour dans les prochaines années !

## Références

- [1] Cacciapuoti L. et Salomon Ch. : Space clocks and fundamental tests : the ACES experiments, *European Physical Journal (Special topics)* **172**, 57–68 (2009).

- [2] Schiller S. et al. : Optical clocks in space. Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) **166**, 300–302 (2007).
- [3] Tino G. M. et al. : Atom interferometers and atomic clocks : new quantum sensors for fundamental physics experiments in space. Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) **166**, 159–165 (2007).

Le site Internet du projet PHARAO : <http://smc.cnes.fr/PHARAO/Fr/>