

BULLETIN N° 178
ACADÉMIE EUROPEENNE
INTERDISCIPLINAIRE
DES SCIENCES



lundi 7 octobre à 17h Maison de l'AX 5 rue Descartes 75005 Paris

Conférence:
Du système solaire aux systèmes planétaires
par Thérèse Encrenaz
Directrice de Recherche Émérite au CNRS
LESIA, Observatoire de Paris

Prochaine séance :
lundi 4 novembre à 17h Maison de l'AX 5 rue Descartes 75005 Paris

ASSEMBLEE GENERALE AEIS
Réflexions sur la finalisation du prochain Colloque :
"Formation des Systèmes stellaires et planétaires Conditions d'apparition de la vie"

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

SECTION DE NICE :

PRESIDENT : Doyen René DARS

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
AX : Gilbert BELAUBRE, ex-Président
Ville de Paris et Région IDF : Michel GONDRAN, ex-Président
Universités et moyens multimédias : Pr. Alain CORDIER

SECTION DE NANCY :

PRESIDENT : Pr Pierre NABET

octobre 2013

N°178

TABLE DES MATIERES

- p.03 Convocation à l'Assemblée générale de l'AEIS
- p.05 Calendrier des prochaines réunions de l'AEIS à la Maison de l'AX
- p.06 Compte-rendu de la séance du lundi 7 octobre 2013
- p.20 Compte-rendu de la section Nice Côte d'Azur du 19 septembre 2013
- p.22 Annonces
- P.25 Documents



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

MEMBRE S CONSULTATIFS DU CA :

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

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

CONSEILLERS SCIENTIFIQUES :

SCIENCES DE LA MATIERE : Pr. Gilles COHEN-TANNOUDI
SCIENCES DE LA VIE ET BIOTECHNIQUES : Pr Brigitte DEBUIRE

CONSEILLERS SPECIAUX:

EDITION: Pr Robert FRANCK
AFFAIRES EUROPEENNES: Pr Jean SCHMETS
AX : Gilbert BELAUBRE, ex-Président
Ville de Paris et région Ile. de France : Michel GONDRAN, ex-Président
Universités et moyens multimédias : Pr. Alain CORDIER

SECTION DE NICE :

PRESIDENT : Doyen René DARS

SECTION DE NANCY :

PRESIDENT : Pr Pierre NABET

Chers Collègues,

L'ASSEMBLEE GENERALE DE L'AEIS
aura lieu le mardi 4 novembre 2013 à 17heures
à la Maison de l'AX
5 rue Descartes PARIS 5ème
Métro: Maubert-Mutualité

(Pour pouvoir voter il faut s'être acquitté de sa cotisation)

Les membres de l'AEIS qui seraient dans l'impossibilité de participer à l'AG peuvent, après l'avoir remplie, envoyer la procuration ci-dessous (même sous forme de courriel -réponse) à:

Irène HERPE-LITWIN
 Secrétaire générale AEIS
 39, rue Michel Ange
 75016 PARIS
 01 47 43 02 65/06 07 73 69 75
irene.herpe@science-inter.com
 ou à iherpelitwin@gmail.com

PROCURATION Assemblée Générale AEIS du 4 novembre 2013

En tant que membre de l'AEIS , je soussigné(e) :

Nom.....

Prénom.....

Donne pouvoir de me représenter à l'Assemblée Générale du 4 novembre 2013 à :

Nom..... Prénom.....

Signature :



Maison de l'AX , 5rue Descartes 75005PARIS

Calendrier des séances de l'AEIS de septembre 2013 à juin 2014

(nos séances ont désormais lieu le premier lundi de chaque mois d'où le calendrier ci-dessous)

Mois	Horaire
Lundi 02 Septembre 2013	17h
Lundi 07 Octobre 2013	17h
Lundi 04 Novembre 2013	17h
Lundi 02 Décembre 2013	17h
Lundi 06 Janvier 2014	17h
Lundi 03 Février 2014	17h
Lundi 03 Mars 2014	17h
Lundi 07 Avril 2014	17h
Lundi 05 Mai 2014	17h
Lundi 02 Juin 2014	17h

ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES

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

Séance du

Lundi 4 octobre 2013

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, Alain CARDON, Gilles COHEN-TANNOUDJI, Françoise DUTHEIL, Claude ELBAZ, Michel GONDRAN, Irène HERPE-LITWIN, Pierre MARCHAIS, Jean SCHMETS, Alain STAHL,.

Etaient excusés François BEGON, Bruno BLONDEL, Michel CABANAC, Daniel COURGEAU, Jean -Pierre FRANCOISE, Robert FRANCK, Walter GONZALEZ, Gérard LEVY, Jacques LEVY, Pierre PESQUIES, Valérie LEFEVRE-SEGUIN, Jean VERDETTI.

I) Présentation de la conférencière, Mme Thérèse ENCRENAZ, Directrice de Recherche Emérite au CNRS

Notre Président nous présente Mme ENCRENAZ:

Thérèse ENCRENAZ a obtenu une thèse d'état en science en 1975 après avoir étudié à l'Ecole Nationale Supérieure de Fontenay aux Roses et effectué des recherches à l'Université de Columbia, à l'Institut Goddard pour les études spatiales et à l'Observatoire de Paris-Meudon. Elle est spécialisée dans l'analyse moléculaire par spectroscopie infrarouge des atmosphères des planètes et comètes (composition chimique, structure thermique) et dans la détermination de l'origine et de l'évolution des éléments du système planétaire. A cet effet elle a utilisé des techniques avancées de détection à distance à l'aide de spectrométrie infrarouge et millimétrique.

Ses principaux résultats se situent dans la détermination des abondances en éléments chimiques et isotopiques dans les planètes géantes (C/H, D./H, H/He), dans la découverte et la détection de molécules mères dans la comète de Halley (CO₂, hydrocarbures) et dans les atmosphères planétaires (C₂H₂, C₂H₆, 15NH₃, 12C13CH₂, H₂O et CO₂ sur Jupiter; NH₃, C₃H₄, C₄H₂, CO₂ et CH₃ sur Saturne; H₂O & CO sur Uranus; CO, HCN, H₂O, CO₂ et C₂H₄ sur Neptune; H₂O₂ et CH₄ sur Mars, etc...). Elle a également participé aux missions planétaires spatiales avec une implication particulière dans l'utilisation d'outils tels que IKS sur VEGA, ISM sur PHOBOS, OMEGA et PFS sur Mars Express, NIMS sur Galileo, VIRTIS sur Venus Express, HIFI sur Herschel, VIRTIS sur Rosetta & MIRO-Rosetta, SIMBIO-SIS sur BepiColombo, etc... Elle a également exercé une mission sur ISO pour les observations sur le système solaire.

Elle a publié environ 200 articles soumis à des referees, 5 ouvrages professionnels, et 10 ouvrages de popularisation.

Elle a reçu plusieurs prix et récompenses pour ses activités et ses publications parmi lesquels:

- en 1997 le Prix Deslandres de l'Académie des Sciences
- en 1998 la médaille d'Argent du CNRS

- en 2010 la médaille David BATES .

Elle a dirigé de 1992 à 2001 du LESIA (Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique) à l'Observatoire de Paris dont elle a maintenant la vice-présidence. Elle a participé ou présidé nombre comités nationaux ou européens. Elle a dirigé de 2002 à 2007 l'édition du journal "Palnetary and Space". Elle joue un rôle majeur dans le développement de la Planétologie en Europe.

II) Conférence de Mme Thérèse ENCRENAZ :Du système solaire aux systèmes planétaires

A. Mme ENCRENAZ nous a fourni le résumé suivant de son exposé:

Notre connaissance du système solaire a connu un prodigieux développement au cours des dernières décennies. Cette progression de nos connaissances est d'abord le résultat de l'avènement de l'ère spatiale et des nombreuses missions planétaires qui ont exploré successivement les planètes telluriques, les planètes géantes et leur système, les astéroïdes et les comètes. Ces missions ont été accompagnées par des campagnes soutenues d'observation au moyen de télescopes au sol, en particulier vers les comètes et les objets lointains; on leur doit en particulier, depuis une vingtaine d'années, la découverte des objets transneptuniens qui peuplent la ceinture de Kuiper.

Grâce à cette moisson d'informations, nous avons pu reconstruire, dans ses grandes lignes, le scénario de formation du système solaire. Comme les étoiles qui nous entourent, le Soleil et son cortège planétaire sont nés suite à l'effondrement gravitationnel d'un nuage interstellaire en rotation rapide, effondrement en un disque au sein duquel sont nées les planètes. Ce scénario permet d'expliquer les principales caractéristiques des diverses familles d'objets qui peuplent le système solaire: planètes telluriques et géantes, satellites extérieurs, comètes et objets de Kuiper. Cependant, il existe une extrême diversité au sein de chaque famille: chaque objet est le produit unique des processus de formation et d'évolution dont il a été l'objet.

Enfin et surtout, les deux dernières décennies ont été marquées par la découverte des planètes extrasolaires: nous en connaissons actuellement près de 900 en orbite autour d'étoiles proches. Leurs propriétés, souvent très différentes de celles de notre système solaire, nous prouvent que leurs scénarios de formation et d'évolution peuvent être différents de ceux que nous connaissons. Enfin l'exploration des exoplanètes, en pleine explosion, ouvre la voie à un nouveau champ de recherche: la vie pourrait-elle exister sur certaines d'entre elles, et, si c'était le cas, pourrait-on la mettre en évidence? C'est un thème majeur de l'astronomie d'aujourd'hui.

B. Voici quelques extraits des diapositives qui ont appuyé son exposé

Plan de l'exposé

- L'exploration du système solaire
- La formation du système solaire
- Un bref tour d'horizon
- Du système solaire aux exoplanètes
- La vie dans l'Univers?

1. Le système solaire: un bref inventaire

- Des **planètes**: quatre telluriques, quatre géantes et leur système (**anneaux, satellites**)
 - Entre telluriques et géantes: une ceinture d'**astéroïdes**
 - Pluton: une ancienne planète débaptisée... aujourd'hui un **objet trans-neptunien** de la **ceinture de Kuiper**
 - Des **comètes**...
- ...**Et depuis 1995**: une multitude de **systèmes planétaires extrasolaires** (plus de 700 systèmes et environ 1000 exoplanètes)

2. De la Lune à Neptune: Cinquante ans d'exploration spatiale

- **Années 1960**: L'homme sur la Lune (**Apollo, Lunakhod**)
- **Années 1970**:
 - La difficile conquête de Mars (**Mariner 9, Viking**)
 - Première exploration des planètes géantes (**Pioneer**)
- **Années 1980 (1978 – 1992)**:
 - L'exploration de Vénus (**Pioneer Venus, Venera, Magellan**)
 - Les survols de la comète de Halley (**Giotto, Vega**)
 - Les survols des planètes géantes (**Voyager 1 & 2**)
- **Années 1990 & 2000**:
 - **Galileo** @ Jupiter, **Cassini** @ Saturne et Titan
 - Retour à Mars (orbiters, landers & rovers)

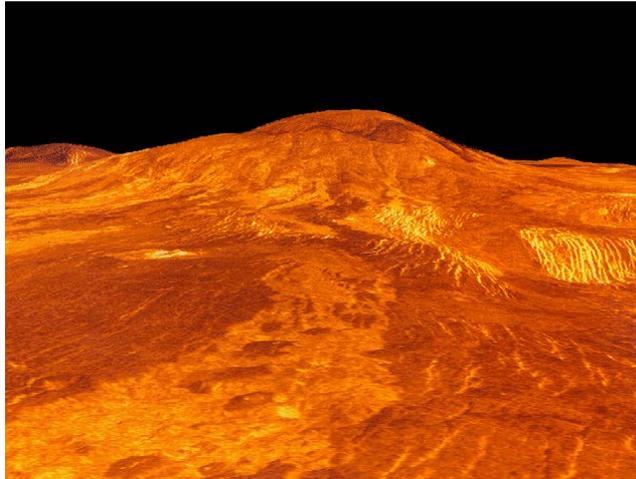
3. Les années 1978 -1992

Les missions Apollo (1969-72)

Collecte d'échantillons lunaires: analyse du vent solaire, datation du système solaire

Le sol de Mars vu par Viking (1976)



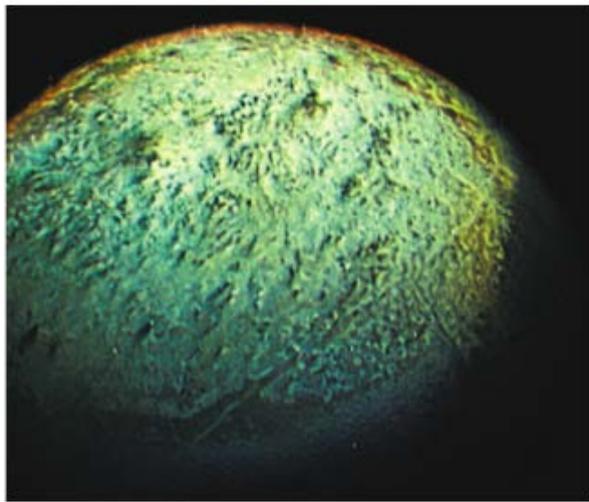


(images radar Magellan, 1992)

L'exploration spatiale de Jupiter

Pioneer 10, 1976 /Galileo 1995/Voyager 1, 1979/ Cassini flyby 2000

**Une découverte majeure des années 1990 par les observations au sol:
la ceinture de Kuiper**



**Triton (probablement un objet transneptunien capturé par Neptune) vu par Voyager 2
(1989)**

1. Comment le système solaire est-il né? Les observations fondamentales

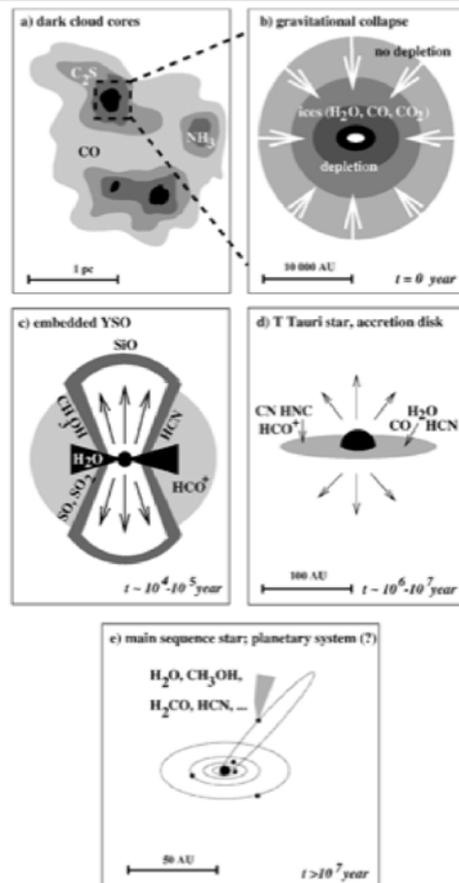
- Des **orbites quasi-coplanaires, circulaires et concentriques**, qui tournent dans le sens direct, celui de la rotation du Soleil
- Suggèrent fortement la **formation des planètes au sein d'un disque**, produit de l'effondrement gravitationnel d'une nébuleuse en rotation (Hypothèse de Kant et Laplace)

Un scénario confirmé par l'observation d'étoiles voisines

- Observation au sol et dans l'espace d'étoiles jeunes ou en formation
- Mise en évidence de disques et d'émission de jets bipolaires
- Observation de phases d'activité intense (phase T-Tauri) chez les étoiles jeunes

Les grandes lignes du modèle d'effondrement

Astrophysical and astrochemical insights into the origin of life 1443



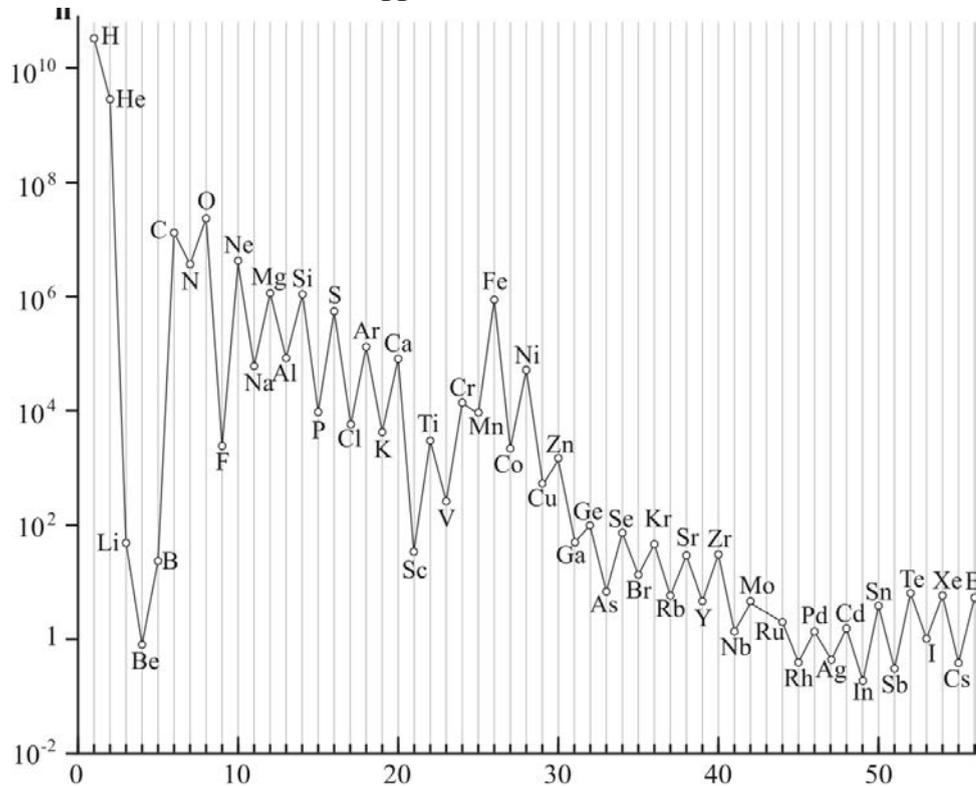
Contraction d'un nuage protosolaire en rotation rapide

- **Effondrement** en un disque perpendiculaire à l'axe de rotation
- Apparition d'**inhomogénéités** au sein du disque turbulent
- **Agrégation** de particules **solides**
- Croissance des agrégats par le jeu des **collisions**
- Croissance des plus gros corps par **gravité**
- **Balayage** des débris par le vent solaire intense (phase T-Tauri)

2. Quelle est la composition du disque protosolaire?

- L'hydrogène et l'hélium (gazeux) sont prédominants
- Ensuite, molécules simples (H_2O , CH_4 , NH_3 , CO_2 , CO ...)
- Ensuite éléments lourds (réfractaires), de moins en moins abondants à mesure que la masse atomique augmente

Log₁₀ Abundance



Masse atomique des éléments

Les abondances cosmiques des éléments chimiques

Pourquoi deux classes de planètes géantes?

- **Jupiter et Saturne: (5 - 10 UA)**

- Grande masse disponible (juste au-delà de la ligne des glaces) -> 100-300 MT
- Croissance rapide (quelques Ma)
- Effondrement d'une grande masse de gaz → **géantes gazeuses**

- **Uranus et Neptune: (> 10 UA)**

- Moins de matière dans le disque → croissance plus lente
- Accrétion du noyau de 10 MT après le balayage du gaz par le vent Solaire → 14 – 17 MT → Moins de gaz disponible pour l'accrétion → **géantes glacées**

3. Comment étudier la composition des objets du système solaire?

Le spectre des planètes

- **Composante solaire réfléchi (UV, visible, IR proche)**

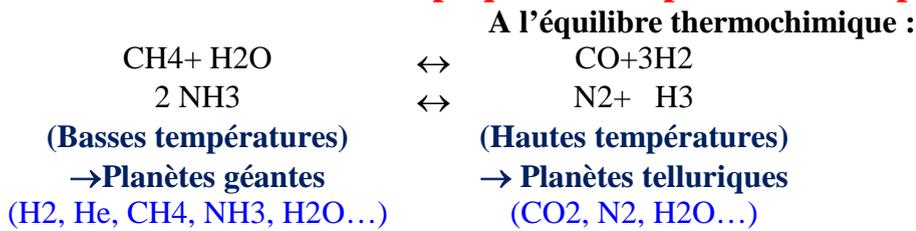
- Raie d'absorption du gaz atmosphérique devant le continu solaire → identification des molécules, mesure d'abondance

- **Composante thermique (IR moyen et lointain, submm et mm)**

Mesure de la température du milieu → Raie en émission dans la stratosphère, en absorption dans la troposphère (dépend de T(P)) → identification, profil de distribution verticale

- **Spectre planétaire : Composante réfléchi (visible) + thermique (IR, max 10-50 μm)**

4. Comment expliquer la composition atmosphérique des planètes ?



5. Les planètes géantes: pourquoi des satellites réguliers et un système d'anneaux?

- Après la formation du noyau initial: effondrement gravitationnel de la nébuleuse environnante
- Formation d'un disque équatorial → formation de satellites au sein du disque (« mini-système solaire ») → **nombreux satellites réguliers**
- A proximité de la planète: destruction des satellites par effets de marée → **formation d'anneaux**

6. Les satellites galiléens de Jupiter

Exemples:

- **Io**: un volcanisme actif (SO₂) observé en 1995 par GALILEO
- **Europe**: un océan probable sous la surface selon (Voyager, Galileo), 2011: Un lac sous la surface?

7. Titan, un satellite très étrange

Le plus gros satellite de Saturne (plus gros que Mercure)

Entouré d'une atmosphère dense d'azote ($P_s = 1.5 \text{ bar}$)
 Recouvert d'une couche épaisse de nuages (produits carbonés et azotés)
 Exploré par Voyager 1 & 2 (1980) puis Cassini-Huygens (2005->)

L'exploration de Titan par Cassini-Huygens:



La surface de Titan telle qu'on se l'imaginait avant le 14/01/2005



... et telle qu'on l'a découverte avec la sonde Huygens:
Des galets de glace d'eau sur un dépôt d'hydrocarbures

Titan: une Terre primitive?

- Une atmosphère proche de celle de la Terre : N_2 , $P_s = 1.5$ bar
- Une température très basse ($-180^\circ C$ en surface!)
- Une couche nuageuse épaisse (hydrocarbures, nitriles) qui cache la surface
- Des molécules prébiotiques dans l'atmosphère

Les découvertes de la sonde Cassini:

- Des composés lourds complexes dans l'ionosphère
- Des lacs de méthane et d'hydrocarbures à la surface

8. Les planètes telluriques

VENUS	TERRE	MARS
$P_s = 93$ bar	$P_s = 1$ bar	$P_s = 6$ mbar
$T_s = 730$ K	$T_s = 288$ K	$T_s = 230$ K

Des atmosphères primitives comparables,
mais des destins très différents...

La basse atmosphère de Vénus: un effet de serre galopant

- Le rayonnement solaire visible chauffe la surface qui émet dans l'infrarouge
- Les gaz atmosphériques absorbent ce rayonnement et chauffent à leur tour -> la température de surface augmente et l'effet s'amplifie
- Les gaz à effet de serre les plus efficaces: CO₂, H₂O et CH₄

L'eau lourde dans l'atmosphère de Vénus: un indice de son histoire passée

Dans la basse atmosphère de Vénus: signatures spectrales de HDO et H₂O → $[D/H]_V = 120 \times [D/H]_T$!

Implication: L'eau a été très abondante dans l'atmosphère primitive de Vénus. Elle s'est échappée massivement, l'eau lourde HDO s'échappant moins facilement.

L'eau lourde dans l'atmosphère de Mars

-Interprétation: dégazage de H₂O au début de l'histoire de la planète → atmosphère primitive plus dense

Qu'est devenue l'eau de Mars?

Des traces d'écoulement fluvial, preuve que l'eau a coulé sur Mars dans le passé...

L'eau est présente aux pôles, sous la surface de Mars

→ L'eau a coulé en abondance au cours du premier milliard d'années, et ensuite épisodiquement

Le Rover MSL/Curiosity sur Mars (Août 2012 ->)



Recherche de molécules organiques et de conditions favorables à une vie passée

9. Evolution comparative des planètes telluriques: Le rôle de l'eau et de l'effet de serre

- **Au départ:** des atmosphères de composition comparable (CO₂, N₂, H₂O, CO) mais des températures différentes
- **Sur Vénus: H₂O gazeux** -> effet de serre qui s'amplifie -> T_s = 730 K (460°C)!

- **Sur la Terre: H₂O liquide** -> CO₂ piégé dans les océans -> effet de serre modéré, Ts approx. Constant (288 K = 15°C)
- **Sur Mars: H₂O solide(/liquide?)** et planète peu massive -> faible activité interne -> l'effet de serre disparaît, Ts = environ 230 K (-140°C)

10. Les petits corps du système solaire: des vestiges de sa formation

- **La ceinture principale des astéroïdes:** les restes d'une planète inachevée
 - La cause: l'intense champ de gravité de Jupiter
- **Les astéroïdes géocroiseurs**
 - des voisins de la Terre... et des menaces potentielles de collision
- Au delà de Neptune: **la ceinture de Kuiper** et les objets transneptuniens (dont Pluton)

Les comètes... hier et aujourd'hui

- Des fragments de glace qui voyagent du plus loin au plus près
- Certaines d'entre elles sont connues depuis l'Antiquité et reviennent périodiquement
- Des vestiges des premiers âges du système solaire
- **Deux réservoirs possibles:**
 - **le nuage de Oort** (40000 UA) pour les comètes à longue période
 - **la ceinture de Kuiper** (40-100 UA) pour les comètes à courte période

Halley 1986: une exploration par cinq sondes spatiales

- **Sonde Giotto (ESA):** observation du noyau
- **Sondes Vega (URSSEurope):** détection de l'eau et de molécules hydrocarbonées complexes

1997: Hale-Bopp, la comète géante Le système solaire: une exception dans l'Univers? Non!

- La découverte des planètes extrasolaires: une révolution en astronomie!
- **Depuis 1995:** près de 1000 planètes extrasolaires géantes (« exoplanètes ») découvertes autour d'étoiles proches

11. La vie hors du système solaire: Une quête aussi vieille que l'humanité

... et plus récemment : Fontenelle, Kant, Laplace, Flammarion soutiennent le concept de la pluralité des mondes

Antiquité: Epicure (341-270 av. JC) croyait en une infinité de mondes

L'ère de Copernic: G. Bruno, Galilée, Huygens évoquent la possibilité de multiples systèmes stellaires

Le principal problème de la détection des exoplanètes

- En lumière visible, une planète comme Jupiter est plus d'un million de fois plus faible que son étoile hôte
 - Une bougie à côté d'un phare, vue à 40 km de distance...
 - A 10 parsec, la distance Soleil-Jupiter est 0.5 seconde d'arc -> la lumière de la planète est cachée dans la lumière stellaire
-

- **Il faut utiliser des méthodes indirectes**

- Mesure du déplacement de l'étoile
- Passage de la planète devant l'étoile

→ **Exoplanètes: La méthode de vélocimétrie**

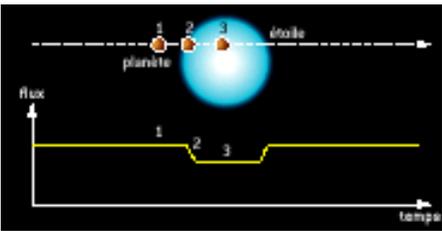
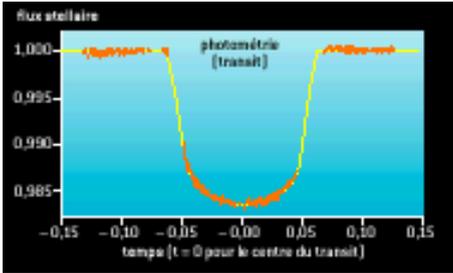
Une surprise: les exoplanètes géantes sont très proches de leur étoile!

→ **Le modèle de formation des exoplanètes est différent de celui du système solaire**

Un mécanisme possible: la migration

<p>Dans le système solaire, les planètes géantes se forment à l'extérieur (noyaux de glace de > 10 MT → Capture du gaz (H₂))</p>	<p>Dans les systèmes planétaires, les planètes géantes peuvent se former à l'extérieur et migrer à l'intérieur par interaction avec le disque</p>
---	--

La méthode des transits

<p>Passage de la planète devant l'étoile → diminution du flux stellaire (Jupiter: 1%; Terre: 0.01%)</p>	
<p>→ Détection possible des exoplanètes géantes depuis la Terre, des exoplanètes telluriques (« exoterras ») depuis l'espace</p>	 <p>Détection de l'exoplanète HD209458B</p>

Les missions spatiales CoRoT et Kepler

Objectif: recherche des exoterras par observation photométrique de champs stellaires

CoRoT (F): 2007 - 2012 **Kepler (USA):** 2009 ->

-> **plusieurs centaines d'exoplanètes découvertes, plusieurs milliers de candidats à confirmer (vélocimétrie)**

L'inventaire des exoplanètes

- Environ 1000 exoplanètes découvertes (Octobre 2013)
- La plupart sont détectées par vélocimétrie

- Avec la mission Kepler (2009-13), >500 détections, >2000 planètes candidates
- Plus de 50% sont sans doute des systèmes multiples
- La probabilité pour une étoile d’avoir au moins une planète est > 50%
- Nombreux « Jupiters chauds » très proches de leur étoile (0.05 UA)

De la détection à la caractérisation: La spectroscopie des exoplanètes par transit

• Transits primaires

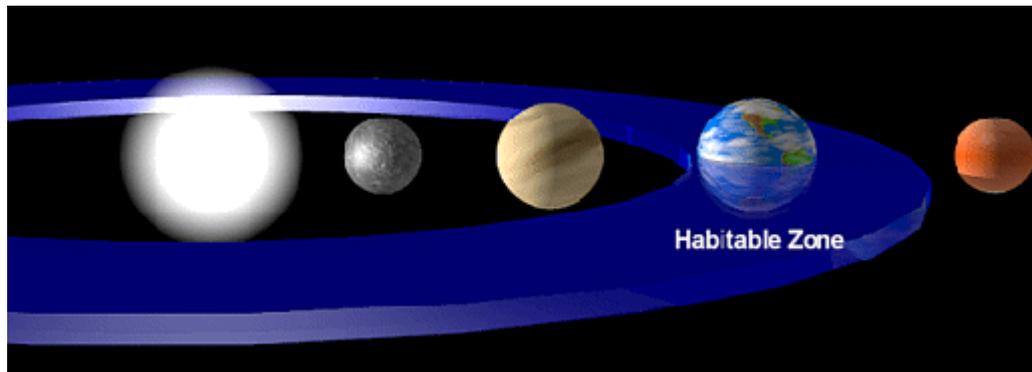
- Spectroscopie par transmission
- Sondage de l’atmosphère supérieure au terminator
- Bien adapté aux Jupiters chauds

• Transits secondaires

- Emission thermique des exoplanètes
- Nécessite la connaissance du profil thermique de la planète

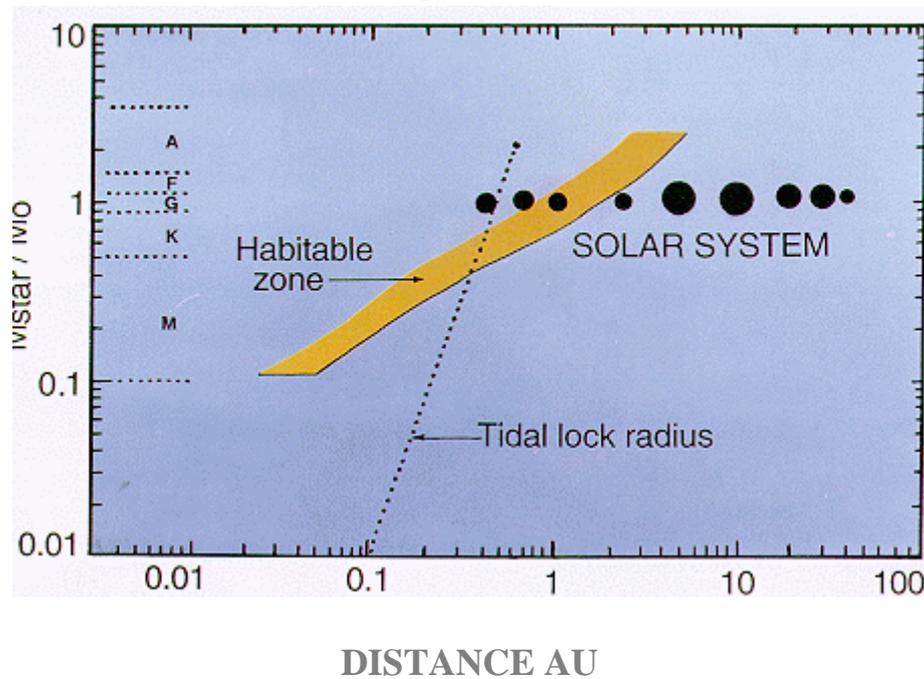
Moyens d’observation actuels: HST, Spitzer (espace) + télescopes au sol

La zone habitable d’une étoile: celle où l’eau peut être liquide



H₂O H₂O H₂O
vapeur liquide glace

Le but ultime: la recherche de la vie dans les exoplanètes



La zone habitable : la région où l'eau est sous forme liquide

Comment rechercher la vie dans les exoplanètes?

- Recherche de l'**oxygène**
- **Traceurs**: les biomarqueurs moléculaires (spectroscopie infrarouge)
 - Meilleur contraste de flux $P/∗$
 - O₃ (plus facile à identifier que O₂)
 - CO₂ + CH₄
- **Etape suivante**: imagerie directe

12. Les projets du futur...

Système solaire:

Rosetta: Survol d'une comète + module de surface (Nov. 2014)

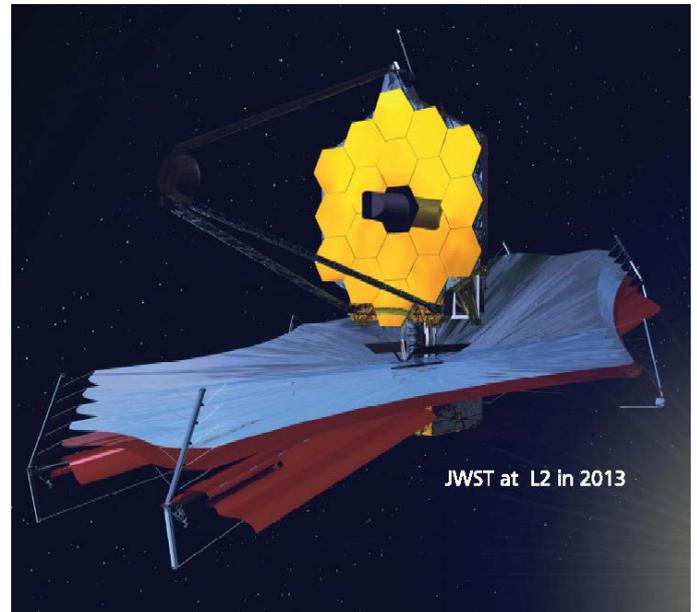
JUICE: Exploration du système de Jupiter (2022-2033)

Les grands observatoires de demain

Au sol: ELT
Extremely Large Telescope (40m diamètre)



Dans l'espace: JWST
Successeur du HST (6m diamètre)



13.En conclusion...

- **Le système solaire**: une extrême variété d'objets au sein de chaque famille
- Nous comprenons les grandes lignes du mécanisme de sa formation (accrétion au sein d'un disque)
- Ce mécanisme semble largement répandu dans l'Univers
- Il existe de nombreuses **exoplanètes** autour des étoiles proches...mais celles-ci ne ressemblent pas aux planètes du système solaire!
- Leur mode de formation est différent de celui du système solaire, et reste mal compris (migration?)
- **Un grand défi pour demain: rechercher les exoterres et rechercher si la vie a pu y émerger**

Après cette très riche séance, nos travaux prennent fin.

Irène HERPE-LITWIN

Compte-rendu de la section

Nice-Côte d'Azur

La pensée de l'Homme crée le monde une seconde fois. On en vient à se demander ce que pouvaient bien être l'univers, l'espace, le temps, la lumière sans personne pour regarder, pour écouter, pour parler, pour changer les choses en mots, en chiffres, en commentaire, en représentation infinie.
Jean d'Ormesson

Compte rendu de la séance du 19 septembre 2013

(173^{ème} séance)

Présents :

Richard Beaud, Pierre Bourgeot, Patrice Crossa-Raynaud, François Cuzin, Guy Darcourt, René Dars, Jean-Pierre Delmont, Pierre Gouirand, Maurice Lethurgez, Claude Nigoul, Jean-Marie Raynaud.

Excusés :

Jean Aubouin, René Blanchet, Yves Ignazi, Jacques Lebraty, Maurice Papo.

1- Approbation du compte rendu de la 172^{ème} séance.

Le compte rendu est approuvé à l'unanimité des présents.

2- Programme des conférences.

Nous avons préparé un programme qui va jusqu'en juin 2014. La bibliothèque Nucéra en est informée et l'inclut dans son programme trimestriel d'activités.

Richard Beaud nous a suggéré d'éditer une plaquette pouvant être mise à la disposition du public. Notre secrétaire a préparé le projet joint qui a été approuvé par notre assemblée. Il sera mis au point dans les jours à venir et pourra être ensuite distribué (UNIA, FNAC, Librairie Masséna, Dominicains, etc.). Cela n'empêchera pas d'envoyer l'affichette de la conférence du mois à tous ceux qui nous ont donné leur adresse électronique.

3- Le mois écoulé.

Notre confrère Guy Darcourt, lors d'une conversation avec son fils, fait état de l'effet du magnétisme sur le climat.

Nous avons eu (cf notre volume sur « *Les climats de la Terre au cours des temps* », un exposé du Professeur Vincent Courtillot où il évoque ce problème. Pour lui, la Terre, grâce à son magnétisme, évite la majeure partie des vents solaires et des rayons cosmiques. Mais cette protection varie avec l'activité du Soleil qui est visible à la surface par la présence de taches.

Depuis 1998, le Soleil est entré dans une période de calme et, parallèlement, la température moyenne de la Terre a cessé d'augmenter. Cela correspond à ce qui avait été observé au 18^{ème} siècle, lors du « Petit Age glaciaire » où les températures furent très basses.

Serions-nous entrés à nouveau dans un « Petit Age glaciaire » ?

Cette hypothèse n'est pas retenue par le GIEC dans son dernier rapport.

François Cuzin : l'Académie des Sciences a été très officiellement saisie par le Président de la République pour qu'elle lui suggère des noms de personnes pouvant être inhumées au Panthéon.

Notre confrère Pierre Gouirand annonce la sortie de son livre : « *Tocqueville et l'Action française* ». Tocqueville est mort plus de cinquante ans avant la naissance de l'Action française ! Tout le monde le prend pour un démocrate alors qu'il était royaliste légitimiste. Mais il avait découvert, aux USA, comment fonctionnait la démocratie, ce qu'il a décrit dans un livre, sans en être forcément tout-à-fait partisan. Son livre le plus important, sur les origines de la Révolution française, est devenu un « best seller » en Chine où les conditions d'une révolution comparable à la nôtre ne sont pas hypothétiques ...

RAPPEL : il est demandé aux retardataires de verser leur cotisation de 60 € pour l'année en cours.

Cette somme nous est très nécessaire car c'est actuellement notre seule ressource puisque nous n'avons aucune réponse de la Ville, ni du Conseil Général, à nos demandes de subventions.

Prochaine réunion
le jeudi 17 octobre 2013 à 17 heures
au siège : Palais Marie Christine - 20 rue de France
06000 NICE

Prochaine conférence à la Bibliothèque Nucéra
Parking Promenade des Arts
le mercredi 23 octobre 2013 de 17 à 19 heures
Claude Nigoul
« *La souveraineté et l'Europe : mythes et réalité* »

Annances

I)Annonces relatives au prochain Colloque:

A) site inscription et information: <http://aeis-2014.sciencesconf.org>



Académie Européenne Interdisciplinaire des sciences

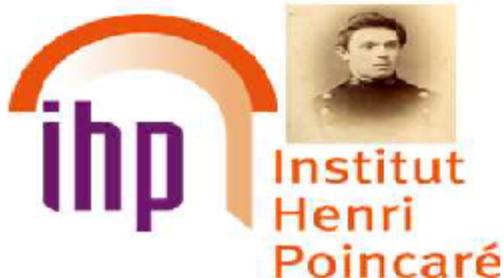
<http://www.science-inter.com>

FORMATION DES SYSTÈMES STELLAIRES ET PLANÉTAIRES

CONDITIONS D'APPARITION DE LA VIE

COLLOQUE DE L'ACADÉMIE EUROPÉENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES

5 et 6 février 2014



À l'Institut Henri Poincaré

Amphithéâtre Hermite

11, rue Pierre et Marie Curie

75005 Paris

Comité scientifique

Pierre ALBAREDE (ENS-Lyon), Gilbert BELAUBRE (AEIS), André BRACK (CNRS-Orléans), Sylvie DERENNE (CNRS/ENS Paris), Thérèse ENCRENAZ (IAP), Maryvonne GERIN (CNRS/ENS Paris), Louis LE SERGEANT d'HENDECOURT (IAS-Orsay), Marie-Christine MAUREL (Université PMC-Paris), Marc OLLIVIER (IAS-Orsay), François RAULIN (Université Paris-Est Créteil), François ROBERT (MNHN), Alain STAHL (AEIS)

Comité d'organisation

Irène HERPE-LITWIN, Gilbert BELAUBRE, Gilles COHEN-TANNOUJJI, Alain CORDIER, Claude ELBAZ,

Jean-Pierre FRANCOISE, Michel GONDRAN, Victor MASTRANGELO, Jean SCHMETS, Jean VERDETTI

Contact

Irène HERPE-LITWIN

Secrétaire générale AEIS

irene.herpe@science-inter.com

ihemelitwin@gmail.com

II) Site Cordis:

Notre Collègue Jean SCHMETS a placé sur le site CORDIS l'annonce de notre prochain colloque :

[Colloque : Formation des systèmes stellaires et planétaires, Conditions d'apparition de la vie](#)

L'étude de nos origines est reconnue comme l'un des grands défis scientifiques du XXIème siècle. Il mobilise plusieurs champs conceptuels et combine de nombreux aspects de la connaissance scientifique dans une variété de domaines.

Organisation: **Académie Européenne Interdisciplinaire des Sciences**

par ailleurs, il nous communique également les informations suivantes:

[Signifiant progress in stimulating endogenous stem cells for tissue repair made by Endostem project](#)

The Endostem partnership has also made significant advances in deciphering the complex and tightly regulated interactions between inflammatory cells recruited into the injured tissue and myogenic precursor cells, as part of the regeneration of injured muscle, resulting in publications in several high impact journals including Cell, Cell Metabolism, Development, and Nature.

Organisation: Dando Weiss and Colucci Ltd

Country:

Category: Result

[Structuring the biodiversity informatics community at the European level and beyond](#)

“Biodiversity, in the broad sense, is our life support system. It is absolutely essential and more important than almost everything else, but is typically taken for granted”. Alex Hardisty and Dave Roberts, BIH2013

Organizers

Organisation: Trust-IT Services

Country: ITALY

Category: General Policy

III) notre Collègue Christian HERVE nous fait part de la prochaine tenue d'un colloque

"ETHIQUE DE LA RECHERCHE: UNE MALREGLEMENTATION"

Mercredi 13 novembre 2013 à 18heures

Faculté de Médecine Paris Descartes/Amphithéâtre RICHEL (2ème étage)
15 rue de l'Ecole de Médecine 75006PARIS
Métro ODEON

Entrée libre et gratuite

+ d'info, programme complet et vidéos des conférences sur le site: <http://www.medecine.parisdescartes.fr>

Une conférence prononcée par: Mme Marie-France MAMZER Présidente du comité de protection des personnes	Avec la participation de : Mme Michèle STANTO-JEAN M. Claude HURLET
--	---

Contact: Pr Christian HERVE

christian.herve@parisdescartes.fr

Stéphanie MARTY

stephanie.marty@parisdescartes.fr

Pr. Christian Hervé

Directeur du Laboratoire d'Ethique Médicale et de Médecine Légale (EA 4569)

Président de la Société Française et Francophone d'Ethique Médicale (*Sffem*)

45 rue des Saints-Pères

75006 PARIS

Tél. : 01.42.86.41.32.

Avez-vous visité notre nouveau site "Réseau Rodin" ?

<http://www.ethique.sorbonne-paris-cite.fr>

Sur les réseaux sociaux :

Twitter : [@PrHerve](https://twitter.com/PrHerve) / Facebook : [Christian Hervé](https://www.facebook.com/ChristianHerve)

Pr. Christian Hervé

Directeur du Laboratoire d'Ethique Médicale et de Médecine Légale (EA 4569)

Président de la Société Française et Francophone d'Ethique Médicale (*Sffem*)

45 rue des Saints-Pères

75006 PARIS

Tél. : 01.42.86.41.32.

Avez-vous visité notre nouveau site "Réseau Rodin" ?

<http://www.ethique.sorbonne-paris-cite.fr>

Sur les réseaux sociaux :

Twitter : [@PrHerve](https://twitter.com/PrHerve) / Facebook : [Christian Hervé](https://www.facebook.com/ChristianHerve)

Documents

Dans le cadre de la préparation de notre prochain colloque sur nous vous proposons un article sélectionné sur le site @RT Flash du 4/10/2013:

p. 26 "de l'eau en grande quantité sur le sol martien." issu de la revue Science

Pour illustrer la problématique du Boson de Englert Higgs notre Collègue Gilles COHEN-TANNOUDJI nous a proposé et pour célébrer l'obtention du Prix Nobel de Physique par François ENGLERT et Peter HIGGS nous vous proposons la lecture de :

p. 27 **Le boson de Higgs, une découverte historique de portée anthropologique issu de la revue "La Pensée" N°375, juillet-septembre2013**

p .35 **un article sur le boson de Higgs paru dans LE MONDE | 21.10.2013 jour |Par Etienne Klein (Directeur de recherches au Commissariat à l'énergie atomique (CEA) et professeur à l'Ecole centrale de Paris)**

De l'eau en grande quantité dans le sol martien

Vendredi, 04/10/2013 - 14:58



Décidément, le robot d'exploration Curiosity, à l'œuvre sur Mars depuis un peu plus d'un an, n'en finit pas de faire des découvertes toutes plus étonnantes les unes que les autres.

C'est ainsi que Curiosity vient de découvrir, à partir de l'analyse d'un échantillon de sol martien provenant de Rocknest, une zone sablonneuse située dans le cratère Gale, que le sol de la planète rouge contenait entre 1,5 % et 3 % d'eau, ce qui est considérable. En effet, une telle teneur en

eau signifie que 0,3m³ de sol martien contient en moyenne 1 litre d'eau !

Pour parvenir à ce résultat, Curiosity a chauffé l'échantillon prélevé à l'aide du laboratoire portatif d'analyse SAM. Ces nouvelles analyses du sol martien ont également permis de confirmer la présence d'autres composés chimiques, notamment du dioxyde de soufre, du dioxyde de carbone et de l'oxygène.

On savait certes depuis longtemps que l'eau avait été présente, sous forme liquide, en grande quantité sur Mars il y a plusieurs milliards d'années et qu'elle existait encore aujourd'hui sous forme de glace, notamment au Pôle sud de la planète rouge.

Néanmoins, les scientifiques sont surpris par l'importante proportion d'eau présente dans le sol de Mars, sur un site très éloigné des zones où se trouvent les plaques d'eau glacée.

Article rédigé par Georges Simmonds pour RT Flash

[Science](#)

Le boson de Higgs, une découverte historique de portée anthropologique

Gilles Cohen-Tannoudji

Laboratoire de recherche sur les sciences de la matière (LARSIM) CEA-Saclay

Revue : La PENSÉE N°375, juillet-septembre2013

Résumé La découverte au CERN, à l'aide du grand collisionneur de hadrons (LHC) de la particule appelée boson de Higgs est le couronnement de recherches expérimentales menées depuis une cinquantaine d'années. Le boson de Higgs était le chaînon manquant et la clé de voûte du *modèle standard*, la théorie quantique et relativiste qui concrétise la révolution scientifique du XXe siècle. C'est à tenter de faire apprécier aux lecteurs de *La Pensée* la signification scientifique de cette découverte, la hauteur des défis qu'il a fallu relever pour mener à bien les recherches qui l'ont rendue possible, ainsi que son immense portée au plan philosophique, voire anthropologique, qu'est consacré le présent article.

Abstract The discovery at CERN, with the large Hadron Collider (LHC) of the particle known as the Higgs boson has been the crowning of experimental researches undertaken for about fifty years. The Higgs boson was the missing link and the keystone of the standard model, the quantum relativistic theory that concretizes the scientific revolution of the 20th century. It is to try to help the readers of *La Pensée* in a position to appreciate the scientific significance of this discovery, the height of the challenges which it was necessary to take up to undertake the researches that made it possible, as well as its immense range from a philosophical, even anthropological point of view, that is devoted this article.

L'annonce, le 4 juillet 2012, de la découverte au CERN, à l'aide du grand collisionneur de hadrons (LHC), de la particule appelée *boson de Higgs* a eu un retentissement médiatique considérable : son annonce, faite sur le web a été suivie par un milliard d'internautes et téléspectateurs ; elle a fait l'objet de plusieurs ouvrages, dont celui que j'ai publié avec Michel Spiro, dans la collection folio essais de Gallimard, *Le boson et le chapeau mexicain – un nouveau grand récit de l'univers* –. De fait, cette découverte, à six mille signataires (deux collaborations impliquant chacune trois mille physiciens) est le couronnement de ce que l'on a pu qualifier de plus grande expérience scientifique jamais entreprise ; elle est le résultat de recherches expérimentales menées depuis près de cinquante ans, après la publication en 1964 d'abord par Brout et Englert, puis par Higgs de deux articles théoriques prédisant l'existence de cette particule, qu'il serait d'ailleurs plus conforme à la justice d'appeler le boson de Brout Englert Higgs (BEH).

C'est à tenter de faire apprécier aux lecteurs de *La Pensée* la signification scientifique de cette découverte, la hauteur des défis qu'il a fallu relever pour mener à bien les recherches qui l'ont rendue possible, ainsi que son immense portée au plan philosophique, voire anthropologique, qu'est consacré le présent article.

Modèles standards et révolutions scientifiques

Le boson BEH était le chaînon manquant de ce que l'on appelle le *modèle standard* de la physique des particules, une discipline, née au XXe siècle qui vise à identifier les constituants élémentaires de la matière et à étudier les interactions qualifiées fondamentales (l'interaction gravitationnelle, l'interaction électromagnétique et les deux interactions nucléaires, la forte et la faible) dans lesquelles ils sont impliqués. Il est nécessaire pour pouvoir faire apprécier la portée de la découverte du boson, de s'expliquer sur la signification de ce concept de modèle standard. Historiquement, c'est en physique des particules que cette expression a été adoptée, mais elle est maintenant largement utilisée pour désigner la théorie de référence d'une discipline scientifique, l'ensemble des connaissances théoriques historiquement accumulées et expérimentalement confirmées, qui ne seront plus complètement invalidées mais qui risquent seulement d'être dépassées ou englobées dans de nouvelles théories plus générales.

La physique des particules ne s'est constituée comme une branche à part entière de la recherche fondamentale qu'après la seconde guerre mondiale ; elle est au cœur de la révolution scientifique du XXe siècle initiée par les remises en causes majeures de la physique classique par la théorie de la relativité et par la mécanique quantique. Au tournant du XXe siècle la physique classique était parvenue à une véritable apogée qui représentait l'aboutissement de la première grande révolution scientifique qui marque le début, à la Renaissance, de la science moderne et qui est un élément constitutif du vaste mouvement culturel et philosophique qui s'est épanoui au XVIIIe siècle, le siècle des Lumières. Cette apogée consacrait le succès de trois grandes synthèses théoriques rendant possible une compréhension satisfaisante de l'ensemble des phénomènes physiques qui se prêtaient alors à l'observation ou à l'expérimentation :

- La synthèse de la mécanique terrestre et de la mécanique céleste réalisée grâce à la *mécanique rationnelle* et à la *théorie de la gravitation universelle* de Galilée, Kepler et Newton
- La synthèse de l'électricité, du magnétisme et de l'optique réalisée grâce à la *théorie électromagnétique de la lumière* de Faraday, Maxwell et Hertz
- La synthèse de la conception atomiste des philosophes de l'antiquité et de la mécanique grâce au recours à la statistique dans *la théorie moléculaire de la matière* et la *thermodynamique statistique* de Maxwell et Boltzmann.

C'est à l'ensemble de ces trois synthèses théoriques que peut, à mon avis, s'appliquer le concept de modèle standard comme marqueur de la révolution scientifique de la physique classique : en effet si chacune de ces trois théories a été généralisée et englobée dans celles apparues au XXe siècle, aucune d'elles n'a été complètement invalidée, toutes gardent leur pertinence comme approximations de celles qui les ont dépassées. Au tournant du XXe siècle, les succès des trois théories de l'apogée de la physique classique étaient tels qu'ils faisaient dire à certains que la physique était pour l'essentiel achevée et qu'il ne restait plus qu'à améliorer de quelques décimales la précision des mesures. Cependant les quelques problèmes qui restaient en suspens et qui semblaient n'être que purement académiques, comme l'effet photoélectrique, le rayonnement du corps noir ou l'avance du périhélie de Mercure, ont suffi à mettre toute la physique classique en crise et à rendre nécessaire la révolution scientifique du XXe siècle.

Les trois coups de ce grand chambardement ont été frappés en 1905, l'année miraculeuse d'Einstein au cours de laquelle

- il a remis en cause la partie la plus fondamentale de la mécanique, la cinématique qui est la doctrine de l'espace et du temps avec la théorie de la relativité,
- il a mis en chantier la physique quantique en élucidant l'effet photoélectrique qui défiait la théorie électromagnétique de la lumière, grâce à une réinterprétation des travaux de Planck sur le rayonnement du corps noir en termes de quanta d'énergie
- il a élaboré une théorie du mouvement brownien qui a conduit, quelques années plus tard Jean Perrin à réaliser des expériences lui permettant en quelque sorte de compter les atomes et donc de prouver de manière irréfutable leur réalité.

Ces travaux d'Einstein sont le point de départ de la révolution scientifique du XXe siècle marquée par le dépassement du modèle standard de la physique classique. Le premier dépassement du modèle standard intervenu concerne la gravitation : la théorie de la *relativité générale* d'Einstein, qui étend la théorie de la relativité dite restreinte qu'il avait établie en 1905, est au fondement d'une théorie de la gravitation universelle qui dépasse celle de Newton, la redonne à l'approximation non relativiste et sert maintenant de base au modèle standard de la cosmologie contemporaine, le modèle du big bang. À la fin des années quarante, s'est produit le second dépassement du modèle standard, avec l'élaboration de l'*électrodynamique quantique* (QED pour Quantum Electro-Dynamics), théorie relativiste et quantique de l'interaction électromagnétique, qui dépasse celle de Maxwell, la redonne à l'approximation non quantique, et constitue la première pierre de l'édification du modèle standard de la physique des particules et des interactions fondamentales non gravitationnelles. QED est l'archétype de la *théorie quantique des champs* qui prend simultanément en compte les contraintes de la relativité et de la mécanique quantique. Une fois qu'eût été découvert le niveau des quarks, les constituants élémentaires du proton et du neutron et des hadrons (les particules qui participent à toutes les interactions, y compris l'interaction forte), QED a servi de modèle à l'élaboration de la *chromodynamique quantique* (ou QCD pour Quantum

ChromoDynamics), d'une part, qui est la théorie de l'interaction forte au niveau des quarks, et la *théorie unifiée électrofaible*, d'autre part, qui est la synthèse de QED et d'une théorie quantique de l'interaction faible. C'est dans le cadre de cette unification électrofaible que se situait la recherche du fameux boson qui a abouti à la découverte annoncée en juillet 2012.

Le grand récit de l'univers : la dimension cosmogonique de la révolution scientifique du XXe siècle

Cette rapide mise en perspective historique, faisant apparaître les noms de Newton, Maxwell et Einstein, permet déjà d'apprécier la portée de ces recherches, mais un autre élément vient encore en rehausser l'enjeu : il s'agit du rapprochement de la physique des particules et du modèle cosmologique du Big Bang qui leur confère une dimension temporelle. La représentation qui se dégage de ce rapprochement est celle d'un univers qui n'est pas seulement en expansion, mais aussi *en devenir, en évolution*, depuis une phase primordiale, de haute énergie (parce que proche du big bang) où toutes les particules sont indifférenciées et sans masse, où toutes les interactions sont unifiées, jusqu'à l'état dans lequel il se laisse aujourd'hui observer, en passant par une série de *transitions de phases*, au cours desquelles les particules se différencient (certaines d'entre elles acquérant de la masse), les interactions se séparent, les symétries se brisent, de nouvelles structures émergent, des nouveaux états de la matière apparaissent. La transition, objet des recherches qui ont abouti à la découverte du boson serait intervenue à la plus haute énergie, c'est-à-dire dans le passé le plus lointain, qu'il est possible d'explorer expérimentalement, celle dans laquelle la synthèse électrofaible se serait défaire en donnant naissance d'une part à l'interaction électromagnétique dont relève la lumière (le fiat lux en quelque sorte !) et d'autre part à l'interaction faible de courte portée, responsable des réactions thermonucléaires fournissant l'énergie des étoiles; de plus, c'est dans cette transition que les quarks et l'électron, les constituants de la matière dont nous sommes faits seraient *devenus* massifs.

Le boson de Brout Englert Higgs, la clé de voûte du nouveau modèle standard de la physique

Je reviendrai, à la fin de l'article sur le bilan épistémologique, philosophique et anthropologique qu'il devient maintenant possible de tirer de cette révolution scientifique, mais, si comme je le pense, le nouveau modèle standard est le marqueur de cette révolution scientifique, il est nécessaire de prendre le temps d'expliquer à un public non spécialiste, en termes aussi peu techniques que possibles, en quoi le boson BEH en est, avec le mécanisme qui lui est associé, la clé de voûte. De telles explications peuvent être trouvées dans notre livre écrit avec Michel Spiro cité plus haut : elles en occupent plus de la moitié des 544 pages de l'ouvrage ; il ne peut être question de les reprendre ici en détails, mais nous pouvons au moins en résumer les grandes lignes.

L'invariance de jauge, un principe directeur

À première vue, l'interaction électromagnétique et l'interaction faible semblent aussi différentes l'une de l'autre que possible : l'interaction faible, responsable de la radioactivité β et des réactions de fusion thermonucléaire transformant l'hydrogène en hélium au cœur des étoiles est une interaction de très faible intensité et de très courte portée, elle viole de façon maximale l'invariance par *parité d'espace* (changement de signe des coordonnées d'espace) alors que l'interaction électromagnétique (qui a des effets macroscopiques) est d'assez forte intensité et de portée infinie et est invariante par parité d'espace. Pourtant l'aspect le plus attrayant du modèle standard est la perspective de l'unification de ces deux interactions fondamentales : tous ses succès renforcent en effet l'idée qu'elles ont une origine commune. En théorie quantique des champs, la théorie à la base du modèle standard de la physique des particules, toute l'information concernant une interaction fondamentale, à savoir les propriétés (masses, spins, charges) des constituants élémentaires de la matière qui y sont impliqués, celles des particules qui la transmettent, les paramètres de couplage qui déterminent son intensité au niveau élémentaire, et, de manière générale, ses propriétés d'invariance et les lois de conservation auxquelles elle obéit, est encodée dans ce que l'on appelle son *lagrangien*, en quelque sorte, son « ADN ». Une fois connu ce lagrangien, il

devient possible, en principe, de calculer par approximations successives, au moyen de ce que l'on appelle *le développement perturbatif*, les probabilités des événements expérimentalement produits dans des réactions relevant de l'interaction fondamentale considérée. Encore faut-il, pour que ce calcul soit possible, que l'on ait pu surmonter la difficulté des infinis qui peuvent apparaître dans les calculs de ce développement perturbatif. Les théories pour lesquelles cet obstacle peut être surmonté sont dites « *renormalisables* », et c'est de telles théories qui peuvent, de manière fiable être comparées à l'expérience, que l'on a recherchées pour toutes les interactions fondamentales.

Dans le modèle standard, le *principe d'invariance de jauge* a joué le rôle d'un véritable principe directeur car il permet, d'une part de déterminer la forme même du lagrangien et d'autre part, de prouver que les théories qui le satisfont sont renormalisables. On dit d'une théorie qu'elle est à *invariance locale de jauge*, ou que c'est une *théorie de jauge*, si son lagrangien est invariant par les transformations d'un groupe de symétrie dépendant du point d'espace-temps où elles sont appliquées. L'électrodynamique quantique, la théorie quantique de l'interaction électromagnétique des électrons, vérifiée expérimentalement avec une incroyable précision dès la fin des années quarante, est l'archétype d'une théorie de jauge renormalisable. Dans cette théorie les électrons et leurs antiparticules, les positons, interagissent par échange du photon, le *boson de jauge* qui transmet l'interaction, une particule de masse nulle. La symétrie de jauge a été généralisée à des groupes plus complexes que celui de l'invariance de jauge de l'électrodynamique, et on s'est attaché à découvrir, pour l'interaction forte et l'interaction faible, des théories de jauge avec l'espoir qu'elles aussi soient renormalisables. La construction du modèle standard représente l'aboutissement de cette recherche.

Les défis théoriques de l'unification électrofaible

Une des implications universelles de l'invariance de jauge est que, dans toutes les théories de jauge, la masse des bosons de jauge (les analogues du photon en QED) qui transmettent l'interaction, est nécessairement nulle. Or, en théorie quantique des champs, la masse de la particule qui transmet une interaction est inversement proportionnelle à sa portée. Comme il était apparu que l'interaction faible est de très courte portée, on en a conclu que si l'interaction faible est transmise par un boson d'interaction, la masse de ce boson est certainement très élevée, voire infinie. Il semblait donc difficile d'envisager une théorie de jauge pour l'interaction faible. Cependant cette circonstance n'a pas empêché de continuer à tenter l'unification des interactions électromagnétiques et faibles. C'est ce qui est fait avec le modèle dit des *bosons vecteurs intermédiaires*, selon lequel l'interaction faible est transmise par des bosons d'interaction dont la masse est de l'ordre de quelques dizaines de fois celle du proton. Mais, hélas, ce modèle n'est pas renormalisable ! Néanmoins, si les constituants de la matière impliqués dans les interactions électromagnétiques et faibles (les quarks et les leptons) voulaient bien être de masse nulle, alors il serait possible de construire une théorie de jauge, la *théorie électrofaible*, dont les bosons de jauge seraient aussi de masse nulle, qui unifierait les interactions électromagnétiques et faibles, qui rendrait compte de la violation de la parité d'espace dans l'interaction faible et de l'invariance par parité d'espace en électrodynamique, et qui serait renormalisable. Encore faudrait-il, pour qu'une telle théorie de jauge eût quelque chance de correspondre à la réalité expérimentale, lui adjoindre un mécanisme susceptible de rendre massifs les fermions et les bosons de l'interaction faible, de préserver la masse nulle du photon et, si possible, d'en sauvegarder le caractère renormalisable. Un tel mécanisme a été proposé en 1964 par Brout, Englert et Higgs, c'est le mécanisme de *brisure spontanée de la symétrie électrofaible*, qui implique l'existence du fameux boson BEH.

Le vide quantique et le paradigme du potentiel en forme de chapeau mexicain

En théorie quantique des champs, le vide, qui n'est pas le néant¹, est l'état fondamental, d'énergie minimale du système de champs quantiques : c'est l'état où tous les nombres de quanta d'énergie (les

¹ Avec une très surprenante clairvoyance, Blaise Pascal avait, en son temps entrevu que l'espace vide n'est pas le néant, lorsqu'il écrivait : « D'où l'on peut voir qu'il y a autant de différence entre le néant et l'espace vide, que de l'espace vide au corps matériel ; et qu'ainsi l'espace vide tient le milieu entre le matière et le néant. C'est pourquoi la maxime d'Aristote dont vous parlez, "que les non-êtres ne sont point différents", s'entend du véritable néant, et non pas de l'espace vide. » Réponse de Blaise Pascal au très révérend père Noël, recteur de la Société de recteur de la Société de Jésus, à Paris, 29 octobre 1647 Pascal, OEuvres complètes, La Pléiade, p 384, ed. 1998

particules et leurs antiparticules) associés aux champs quantiques impliqués dans l'interaction, sont nuls. Les relations d'incertitude de Heisenberg, valides pour toute la physique quantique, s'appliquent aussi à la théorie quantique des champs : lorsque le champ a une valeur bien déterminée, le nombre de ses quanta d'énergie n'est pas déterminé, et réciproquement, lorsque le nombre de quanta est bien déterminé, la valeur du champ ne l'est pas. Dans le vide, le nombre de quanta est bien déterminé, il est nul ; le champ n'y a donc pas une valeur bien déterminée ; il *fluctue* et seule sa valeur moyenne y est bien déterminée.

Pour qu'une théorie quantique de champs puisse être utilisée en physique des particules, il est nécessaire que le vide (état d'énergie minimum) soit un état stable du système de champs en interactions ; lorsque le vide est stable, son énergie qui est définie à une constante additive près, peut être posée à zéro. Le mécanisme BEH susceptible d'induire une brisure de la symétrie de jauge électrofaible, s'inspire de développements en physique de la matière condensée dans lesquels les phénomènes de brisure spontanée de symétrie jouent un rôle très important. Il y a brisure spontanée de symétrie lorsque un état d'énergie extrême, invariant sous les transformations de la symétrie, candidat à servir de vide, ne convient pas parce qu'il est instable, alors que les seuls états stables ne sont pas symétriques : on est donc contraint à utiliser un vide non symétrique.

Pour relever le défi de l'unification électrofaible, le mécanisme BEH consiste à ajouter un nouveau champ (en plus de ceux des quarks et des leptons), un champ *scalaire* (c'est-à-dire un champ dont les quanta sont des particules de spin zéro), appelé *champ BEH*, lui aussi impliqué dans la théorie de jauge électrofaible et auto-interagissant par un potentiel adéquat, dit en forme de *chapeau mexicain* (voir la figure). Cette forme de chapeau mexicain intervient dans une représentation du potentiel d'auto-interaction dans l'espace (abstrait) des états du champ : dans la figure, l'énergie potentielle d'auto-interaction est portée en fonction de la partie réelle et de la partie imaginaire du champ BEH ; dans cette représentation, la symétrie de jauge électrofaible (invariance par changement de la phase du champ) correspond à la symétrie de révolution de la forme de chapeau mexicain. Il est clair sur cette figure que l'état du champ correspondant au sommet du chapeau ne peut pas, bien que satisfaisant la symétrie de révolution, servir de vide puisqu'il correspond à un maximum de l'énergie. Par contre chaque état correspondant à un point de la « rigole » peut être utilisé comme vide (énergie minimum). Si la symétrie était une symétrie globale (invariance par un changement de la phase du champ indépendant du point d'espace-temps où ce changement est appliqué) on aurait bien une situation de brisure de symétrie : seul un point de la rigole peut être choisi comme vide, il correspondrait à un vide non symétrique. Mais si, comme c'est le cas dans la théorie de jauge électrofaible en construction, la symétrie est une invariance par tous les changements de la phase du champ qui dépendent du point d'espace-temps où ils sont appliqués, c'est l'ensemble de la rigole qui peut être utilisée comme vide. Or cet ensemble est symétrique (la rigole a la symétrie de révolution.) On peut donc dire qu'avec le mécanisme BEH, la symétrie de jauge électrofaible n'est pas brisée ! Mais alors que se passe-t-il ? Il se trouve que dans le cas d'un potentiel en forme de chapeau mexicain, le champ BEH comporte deux types de composantes (on dit aussi de degrés de liberté), d'une part celles liées au « mouvement² » dans le fond de la rigole sans échange d'énergie, donc correspondant à des particules de masse nulle, que l'on appelle des bosons de Nambu-Goldstone, et d'autre part celle liée au « mouvement² » au-dessus de la rigole, correspondant au boson BEH, qui est massif. Dans le cas d'une invariance de jauge locale, il y a d'autres particules de masse nulle liées au « mouvement » dans le fond de la rigole, ce sont les bosons de jauge de l'interaction. Cela signifie que les bosons de Nambu-Goldstone deviennent partie intégrante des champs de jauge. Et c'est là qu'intervient un des nombreux miracles attribués à la physique quantique : les bosons de Nambu-Goldstone et les bosons de jauge, tous deux de masse nulle, fusionnent pour former des bosons de jauge massifs³ ! *Ainsi, avec le mécanisme BEH, la symétrie de jauge n'est pas brisée, seulement les bosons de jauge ne sont plus nécessairement*

Jésus, à Paris, 29 octobre 1647 Pascal, OEuvres complètes, La Pléiade, p 384, ed. 1998

² J'ai mis des guillemets au mot mouvement car ce « mouvement » se produit dans un espace abstrait, celui des états du champ.

³ Pour simplifier le plus possible la discussion, j'ai considéré dans la figure le cas où la symétrie de jauge ne fait intervenir qu'un seul boson de jauge ; dans le cas de la théorie électrofaible, il y a en réalité quatre bosons de jauge dont trois deviennent massifs au travers du mécanisme BEH, le quatrième, le photon restant de masse nulle

de masse nulle ! Mais si les composantes du champ BEH, les bosons de Nambu-Goldstone, (correspondant au « mouvement » dans le fond de la rigole) sont absorbées par les champs de jauge pour former des bosons massifs, que devient son autre composante, (celle correspondant au « mouvement » au-dessus de la rigole) ? Eh bien elle devient le boson scalaire massif, le boson BEH !

Bilan épistémique du mécanisme BEH

Ainsi, le mécanisme BEH semble-t-il avoir rempli son contrat : il a été en effet démontré en 1971 par 'tHooft et Veltman (ce qui leur a valu le prix Nobel en 1999) ainsi que, en même temps et indépendamment par Zinn-Justin et Lee, que les théories de jauge, avec ou sans mécanisme de brisure, sont renormalisables. Une fois activé le mécanisme BEH, le modèle standard devient donc une théorie prédictive, dépendant d'un nombre fini et fixé de paramètres, comportant une approximation quasi-classique et des corrections quantiques calculables. Dans ce modèle standard, le boson BEH apparaît comme une clé de voute : il confère de la masse à toutes particules avec lesquelles il interagit (y compris à lui-même puisqu'il auto-interagit) ; il laisse sans masse le photon et les gluons ; quant aux neutrinos, avec lesquels il n'interagit pas, leurs masses ne peuvent être dues qu'à une nouvelle physique, au-delà du modèle standard. Avant la découverte annoncée le 4 juillet dernier, toutes les prédictions du modèle standard, à l'exception de l'existence du boson BEH, avaient été comparées avec succès à l'expérience. La recherche du boson constituait ce que l'on appelle une expérience critique : en cas d'échec, il aurait fallu reconsidérer l'ensemble de la théorie électrofaible et donc aussi l'ensemble du modèle standard. Il sera encore nécessaire de confirmer que la particule découverte est bien celle qui était prédite. Les premiers résultats des analyses sont très satisfaisants, et les faibles écarts qui semblent apparaître entre les prédictions et ces résultats sont plutôt encourageants car ils pourraient suggérer des ouvertures vers une physique au-delà du modèle standard.

Le grand récit de l'univers et la signification ontologique du mécanisme BEH

Jusqu'à présent le mécanisme que nous avons tenté d'expliquer apparaît comme une astuce ad hoc (relevant d'une approche épistémique) destinée à résoudre un problème purement théorique, celui de la contradiction entre l'invariance de jauge supposée de l'interaction faible et la masse différente de zéro de ses bosons intermédiaires. Mais lorsque ce mécanisme est mis en perspective cosmogonique, dans le cadre du grand récit de l'univers qui confère à la physique relativiste et quantique du XXe siècle son caractère authentiquement révolutionnaire, il acquiert une signification authentiquement ontologique. Dans le cadre de ce grand récit, ce n'est plus dans l'espace abstrait des états du champ qu'il convient de discuter les propriétés du vide quantique, c'est dans l'espace-temps de l'univers en expansion et en devenir au cours du temps écoulé depuis le « big bang ». Selon le mécanisme BEH, ce sont les fluctuations du champ BEH, qui ne s'annulent pas en moyenne dans l'espace-temps vide de particules, qui font de ce vide un *milieu complexe*, siège des fluctuations des champs, qui possède la dissymétrie permettant au phénomène de l'*émergence* des masses de se produire : une particule, initialement de masse nulle, quantum d'un champ couplé au champ BEH, donc pouvant interagir avec lui, ne se propagerait pas dans ce milieu à la vitesse de la lumière, comme elle le ferait si sa masse était nulle, mais y serait ralentie par les interactions avec le champ BEH, comme dans une sorte de « mélasse quantique visqueuse » : elle acquerrait de la masse. Et ceci concerne toutes les particules couplées au champ BEH, les bosons intermédiaires de l'interaction faible, les quarks, les leptons chargés (l'électron, le muon et le tauon), mais ni le photon, ni les gluons ni les neutrinos, qui resteraient de masse nulle. De plus l'auto-interaction du champ BEH implique que boson BEH acquiert lui aussi de la masse. Du point de vue du grand récit de l'univers qui résulte du rapprochement de la physique des particules et de la cosmologie, le mécanisme BEH est associé à une transition qui a affecté l'espace-temps, quelque 10-12 seconde après le big bang, au cours de laquelle, même si la symétrie électrofaible n'a pas été brisée, les quarks, les leptons chargés et les bosons intermédiaires de l'interaction faible sont *ontologiquement devenus massifs*.

Défis techniques expérimentaux et organisationnels

J'ai utilisé beaucoup de place pour évoquer les défis théoriques de l'unification électrofaible, et il me reste peu de place pour évoquer les défis techniques, expérimentaux et organisationnels qu'il a fallu relever pour parvenir au succès. Je me contenterai ici d'en dresser la liste :

- L'énergie délivrée par le LHC, (actuellement 4 TeV par faisceau, en attendant d'atteindre l'énergie nominale de 7 TeV par faisceau) est la plus élevée au monde. Pour atteindre cette énergie dans le tunnel du LEP, il a fallu développer, en grandes quantités des aimants fournissant un champ magnétique énorme (8,2 tesla)
- Pour limiter autant que possible la consommation d'électricité, on a eu recours à des aimants supraconducteurs, ce qui a nécessité de refroidir l'ensemble de l'accélérateur à 1,9 K (l'installation est ainsi devenue l'endroit le plus froid de l'univers)
- Comme le LHC est un collisionneur proton – proton, il a fallu réaliser dans le tunnel deux accélérateurs! Chaque aimant doit avoir les deux polarités à quelques centimètres de distance, ce qui implique d'énormes forces magnétiques.
- Comme les probabilités de produire des événements intéressants est très faible, il faut maximiser ce que l'on appelle la luminosité, à savoir le nombre d'interactions par seconde (de l'ordre du milliard). Cela suppose de multiplier le nombre de paquets (2808) circulant dans chacun des accélérateurs, le nombre de protons par paquet (100 milliards), et de minimiser la taille transverse (10 μ m) des faisceaux.
- Cette très haute luminosité produit une radiation très intense pouvant détériorer les détecteurs, qu'il a fallu rendre résistants aux radiations
- La grande majorité des interactions proton-proton relève de l'interaction forte et produisent un intense bruit de fond par rapport aux événements potentiellement intéressants pour la recherche : il a fallu développer des procédures de tri informatique au sein d'énormes flux d'information, à la disposition de collaborations de scientifiques éparpillés dans le monde entier.

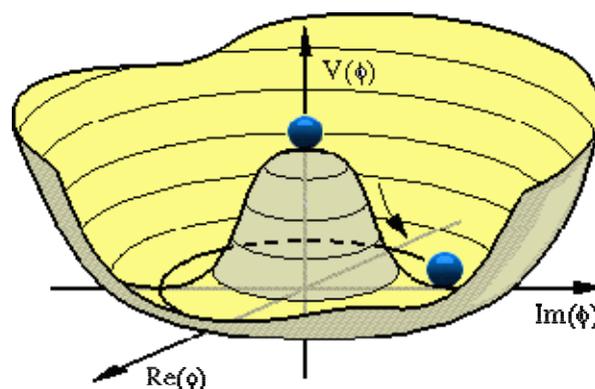
Le CERN, une aventure humaine exemplaire

Le CERN a été créé au lendemain de la seconde guerre, pour mener, dans le prolongement de l'aventure nucléaire, des recherches dans le domaine de la recherche fondamentale en physique des particules, avec comme tâches celles de révéler les secrets de la nature, de rassembler par-delà les frontières, d'innover et de former de nouvelles générations de travailleurs scientifiques. Le CERN doit son succès à l'atout essentiel d'un financement stable, garanti par un traité international, qui lui a permis de mettre en oeuvre une stratégie à long terme, exclusivement motivée par les besoins de la recherche fondamentale, en vue du progrès des connaissances. Pour répondre à ces besoins de manière optimale, cette stratégie vise toujours à construire du nouveau à partir de ce qui existe déjà et à continuer à faire vivre ce qui existe en y développant ce qu'il a d'unique (les anciennes machines servent d'injecteurs aux nouvelles machines mais sont aussi l'objet de développements qui les maintiennent durablement à niveau).

Parmi des très nombreuses retombées technologiques et socio-économiques de ces recherches, il convient de mentionner l'impact spectaculaire des innovations collaboratives auxquelles le CERN a recours pour faire travailler ensemble des milliers de scientifiques répartis dans le monde entier. Le WEB en est une première illustration. Sait-on que la première proposition de la toile d'araignée mondiale (le fameux World Wide Web, WWW) a été soumise au CERN par Tim Berners-Lee en 1989, puis affinée par lui-même et Robert Caillau en 1990 ? L'immense mérite du CERN, dont les statuts lui interdisaient de déposer un brevet, a été de rendre publics le concept et la réalisation du WEB, de sorte qu'aucune compagnie ne puisse prendre de brevet sur le WEB. C'est la raison pour laquelle le WEB est maintenant gratuit et contribue tant à l'essor de la société de l'information. Dans le domaine du traitement des données, le CERN a récemment mis en oeuvre un nouveau paradigme. Au lieu d'avoir un supercalculateur localisé au CERN et traitant toutes les données, on réalise ce supercalculateur en répartissant les données sur tous les ordinateurs utilisés par les chercheurs qui, de par le monde, travaillent sur les expériences menées au LHC. Ainsi un utilisateur en Inde ou aux États-Unis ou en Europe a-t-il accès à la même puissance de calcul, la grille d'ordinateurs, et a accès à toutes les données sans qu'il ait besoin de savoir où s'exécuteront les calculs qu'il a programmés et où se trouvent les données qu'il souhaite utiliser. C'est un

système puissant de traitement des données, optimisé (l'achat des ressources est réparti), transparent et démocratique (tous les chercheurs sont à égalité de moyens). Ce système qui marche donc très bien est utilisé maintenant par des chercheurs d'autres disciplines. Pour les usages du secteur privé qui demandent plus de confidentialité et de sécurité, il a évolué en ce qu'on appelle « le cloud computing ». Dans le domaine collaboratif, la contribution du CERN s'est étendue aux logiciels libres (comme le LINUX) à certains matériels (hardware) libres et aussi aux publications scientifiques. Ce qu'à mon avis prouve l'exemple des succès du CERN, c'est qu'à partir de la seule motivation du progrès partagé des connaissances, il est possible de former des équipes de jeunes travailleurs au travail au sein de grandes collaborations internationales, de mobiliser au service de l'intérêt général, de vastes communautés scientifiques où, selon un principe bien connu des lecteurs, chacun contribue selon ses moyens et reçoit selon ses besoins. Le CERN est maintenant en mesure de proposer un modèle, que, dans notre ouvrage Michel Spiro et moi avons dénommé le modèle *coopétitif* dont puissent s'inspirer nos contemporains pour stimuler à la fois le progrès des connaissances, la créativité et l'innovation, de nouveaux outils de gestion de projets et de communication, pour rassembler par-delà les frontières, les cultures et les croyances, et plus généralement, pour répondre aux défis de notre temps. C'est d'ailleurs pour porter cet idéal que le CERN a tout récemment (en 2012) été admis comme observateur à l'Assemblée générale des Nations Unies. Compte tenu des nuages qui assombrissent actuellement notre horizon, pensons-nous que nous puissions faire l'économie d'un progrès soutenu des connaissances, dans tous les domaines ? Pourquoi ce qui a été possible avec le CERN ne serait-il pas possible dans les nombreux autres domaines où le progrès des connaissances, non soumis aux exigences de l'utilité immédiate, est plus que jamais nécessaire ? Il faut bien voir en effet que l'extraordinaire aventure humaine qu'ont représentée la recherche et la découverte du boson BEH intervient dans un contexte qui n'est pas sans analogie avec celui du début du XXe siècle : l'apogée actuelle du modèle standard fait penser à celle de la physique classique d'alors ; le prodigieux essor des technologies de l'information rendu possible par la révolution quantique et relativiste fait penser à celui des techniques de la révolution industrielle des XVIIIe et XIXe siècles, mais, en même temps, la crise systémique dans laquelle est plongée l'économie mondiale, la perspective d'épuisement des ressources énergétiques et les inquiétantes prémisses du changement global du climat font craindre la survenue, à l'échelle mondiale, de convulsions comparables à celles qui ont marqué la première moitié du XXe siècle.

Si, comme nous l'avons dit plus haut, le nouveau grand récit de l'univers confère à la découverte du boson BEH une signification ontologique, il en souligne aussi la portée anthropologique. Toutes les civilisations, toutes les religions se sont appuyées, sans avoir à attendre une révolution scientifique sur un grand récit fondateur. En tant que récit fondé sur les avancées scientifiques consignées dans le modèle standard, a une portée essentiellement épistémologique, mais cela ne l'empêche pas d'avoir aussi une portée axiologique, c'est-à-dire relative aux valeurs : le progrès des connaissances humaines n'est-il pas une valeur universelle ? Qu'une organisation internationale comme le CERN, fondée au lendemain des drames de deux guerres mondiales, avec comme seule finalité, ce progrès des connaissances humaines, ait réussi à relever les redoutables défis de la recherche du boson BEH, n'est-ce pas un facteur d'espoir dans la capacité des civilisations humaines de refuser la fatalité et de surmonter les crises aussi graves soient-elles ?



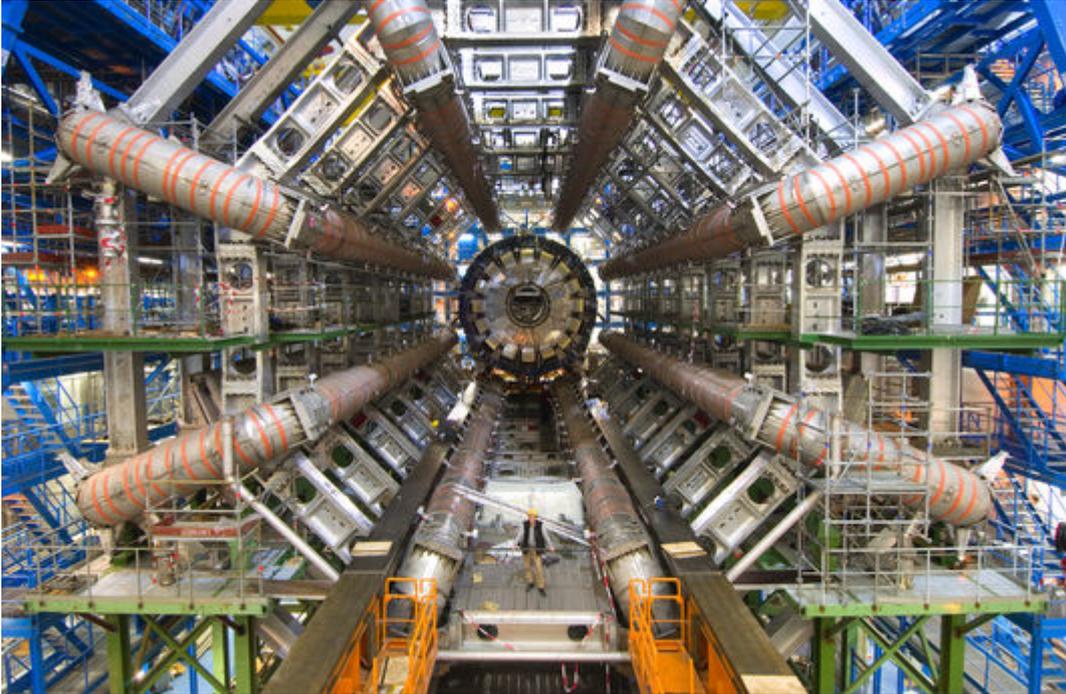
Légende Représentation, dans l'espace abstrait des états du champ, de son potentiel d'autointeraction en forme de chapeau mexicain

Les grandes leçons d'un petit boson

LE MONDE | 21.10.2013 à 10h06 • Mis à jour le 21.10.2013 à 14h48 | Par Etienne Klein (Directeur de recherches au Commissariat à l'énergie atomique (CEA) et professeur à l'Ecole centrale de Paris)

Réagir Classer

Partager facebook twitter google + linkedin pinterest



Née il y a à peine un siècle, la physique des particules nous transporte, tels des touristes déroutés et hagards, en des mondes étranges où nos intuitions perdent leurs marques. Elle constitue aujourd'hui une activité à la fois ambitieuse et discrète, imposante et mal connue: alors qu'elle délivre des résultats fascinants et mobilise des instruments dont la taille suffit à impressionner, elle fait rarement parler d'elle.

Elle constitue pourtant une discipline frontière : dans son expression théorique, elle fait appel à des concepts mathématiques très élaborés, fort éloignés des mathématiques lycéennes. Dans son versant expérimental, elle se situe toujours à la limite des possibilités technologiques. L'univers impalpable de "l'infiniment petit" exige en effet des moyens lourds et complexes. C'est même le prix à payer pour espérer le prendre en filature.

Les connaissances que les "conquêteurs du minuscule" ont accumulées ces dernières décennies ne sont certes pas d'accès facile. Il est toutefois impératif de transmettre les plus importantes d'entre elles, car tout au long de son histoire, la physique des particules a détruit des préjugés, démonté des certitudes, ouvert des perspectives inédites. Il lui est même arrivé de faire des "découvertes philosophiques négatives", au sens où elle a parfois modifié les termes en lesquels certaines questions se posent à propos de la matière, de l'espace ou du temps. Ses résultats les plus décisifs apportent des éclairages, des contraintes, voire des démentis à propos de conceptions métaphysiques qui prétendaient décrire de façon trop précise le monde physique.

LE VIDE EST HABITÉ

Le prix Nobel de physique qui vient d'être attribué à François Englert et à Peter Higgs récompense une découverte qui a révolutionné notre façon de comprendre un des plus vieux concepts de la physique, celui de masse. Intrinsèquement liée à l'idée même de matière, la masse semblait pourtant condamnée à demeurer une propriété évidente des objets matériels, une grandeur physique dépourvue de mystère, à la fois mesurable et mesurante. Que pourrait-on jamais trouver à redire à cette lancinante façon de la considérer ? Beaucoup de choses ! Car ce que les physiciens savent désormais, c'est qu'au lieu d'être une propriété primitive des particules élémentaires, une caractéristique qu'elles porteraient en elles-mêmes, la masse apparaît plutôt comme n'étant qu'une propriété secondaire et indirecte résultant de leur interaction avec le vide qui, en fait, n'est pas vide ! En réalité, le vide est habité. Il contient notamment de quoi créer la masse, c'est-à-dire l'inertie par laquelle les particules élémentaires résistent aux forces.

Pour bien entendre cette leçon, il faut revenir sur la façon dont sont aujourd'hui comprises les interactions entre particules, sans bien sûr entrer dans le détail du détail.

Selon la physique classique, si une particule agit sur une autre, c'est qu'un champ, engendré par la première, se propage dans l'espace puis agit sur l'autre. Mais cette conception a dû être revue afin de tenir compte des leçons de la physique quantique : dans ce nouveau cadre, pour qu'il y ait interaction entre deux particules, il faut que "quelque chose" soit échangé, et ce quelque chose est une particule caractéristique de l'interaction. En d'autres termes, une interaction ne s'exerce entre deux particules que par l'échange d'une troisième, qu'en termes savants on appelle le "boson de jauge" de l'interaction.

Voir la vidéo : [Le boson de Higgs en trois minutes](#)

Une métaphore aidera ici à mieux comprendre. Imaginons deux barques sur un lac, dont chacun des occupants est démuné de toute espèce d'objet qui pourrait l'aider à diriger son embarcation : il n'a ni rame, ni pagaie, ni perche. Supposons que les deux barques se dirigent l'une vers l'autre de telle sorte que la collision paraisse inévitable. Inévitable ? Pas tout à fait. Car si l'un des occupants dispose d'un objet massif, par exemple d'un ballon, et le lance avec vigueur au passager de l'autre barque, qui le lui renverra, et ainsi de suite, les deux embarcations s'écarteront peu à peu l'une de l'autre. Par l'entremise d'un médiateur, en l'occurrence le ballon, la succession des lancers créera une force répulsive capable de modifier les trajectoires.

Bien qu'approximative, cette image permet en outre de comprendre une chose importante : puisqu'un ballon lourd condamne à ne faire que des passes courtes, la portée d'une interaction sera d'autant plus faible que la masse de ses particules médiatrices sera plus élevée.

Quatre interactions ont été identifiées à ce jour : la gravitation et les interactions électromagnétiques, faible et forte. Après la seconde guerre mondiale, les physiciens ont pu démontrer que les forces électromagnétiques et la force faible n'étaient pas indépendantes l'une de l'autre, bien qu'elles soient très dissemblables en apparence : dans un passé très lointain de l'Univers, elles ne faisaient qu'une seule et même force, qui s'est par la suite dissociée : d'un côté, l'interaction électromagnétique, dont la portée est infinie ; de l'autre, l'interaction faible, dont la portée est brusquement devenue très courte (moins de 10-15 mètres). Ils ont ensuite pu étendre cette démarche unificatrice à l'interaction forte, qui agit comme une sorte de glu collant les protons et les neutrons au sein des noyaux d'atomes. Le résultat constitue le "modèle standard" de la physique des particules, qui a été très finement testé grâce à des expériences menées auprès des accélérateurs ou des collisionneurs de particules.

RÉCONCILIER EMPIRIQUE ET THÉORIQUE

Ce modèle standard utilise le concept de symétrie. On dit d'une chose qu'elle est symétrique si, après avoir été soumise à une certaine transformation, son apparence n'est pas modifiée. Par exemple, si je fais subir à une sphère une rotation de n'importe quel angle autour de n'importe quel axe passant par son centre, cela ne change ni sa forme ni même sa position. Dans le monde des particules élémentaires, les symétries intéressantes opèrent au sein d'espaces mathématiques abstraits. Elles sont directement liées à la façon qu'ont les systèmes physiques de se comporter sous l'effet d'une force, et c'est pourquoi il peut se révéler très fructueux d'identifier les symétries qui gouvernent telle ou telle catégorie de phénomènes.

C'est ce qu'ont fait les physiciens : pour traiter les interactions, ils se sont appuyés sur un certain nombre de symétries qui se sont révélées très efficaces du point de vue des prédictions qu'elles permettaient de faire. Mais elles posaient aussi un problème irritant. Elles impliquaient en effet que les particules médiatrices des interactions (les ballons) devaient avoir une masse nulle ! C'est effectivement le cas du photon, le médiateur de l'interaction électromagnétique, mais pas du tout celui des ballons qui médiatisent l'interaction faible, dont la masse vaut près de cent fois celle d'un proton. Ce désaccord flagrant entre la théorie et l'expérience a menacé pendant un temps la cohérence de la théorie.

Mais durant l'été 1964, François Englert et Robert Brout, puis, de façon indépendante, Peter Higgs, ont proposé une solution théorique permettant de réconcilier les équations du modèle standard avec les données empiriques : elle consistait à postuler l'existence d'un champ quantique emplissant tout l'espace avec lequel les particules élémentaires, effectivement sans masse, interagissent plus ou moins fortement. Cette interaction a pour effet de ralentir leurs mouvements de la même façon que si elles avaient une masse. Selon cette hypothèse, la masse ne serait donc qu'une propriété secondaire des particules, résultant du fait qu'elles se frottent au vide, plus exactement au champ qu'il contient et qu'on appelle "le champ scalaire de Higgs".

On osera une seconde analogie : tout se passe comme si les particules élémentaires étaient des objets sans masse, mais dotés de skis, se déplaçant sur un champ de neige qui serait l'équivalent du champ scalaire de Higgs ; les particules ayant des skis bien fartés se déplacent sans frottement, donc à la vitesse de la lumière, et leur masse apparente est nulle ; celles dont les skis sont mal fartés glissent mal sur la neige, leur vitesse est moindre que celle de la lumière et leur masse est non nulle. La masse apparaît alors comme une mesure de la mauvaise qualité du fartage des skis des particules.

Cette conjecture de Brout, Englert et Higgs a été confirmée en juillet 2012 par la découverte, à l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire, du boson scalaire de Higgs, la particule associée au champ éponyme. Loin de ne concerner que le monde microscopique, ses implications sont aussi cosmologiques. Elle invite à penser que lorsque l'Univers était très dense et chaud, les particules n'avaient pas de masse : telles des anges véloce, elles se propageaient dans le vide à la vitesse de la lumière; puis soudain, le champ scalaire de Higgs s'est installé dans tout l'espace, conférant aux particules une masse non nulle qu'elles ont conservée par la suite. Cet événement a eu un autre effet, celui de déclencher le temps propre des particules. Une horloge de la matière s'est en somme mise en marche, qu'on pourrait appeler l'horloge des anges ici-bas, dont une anagramme se trouve être le boson scalaire de Higgs.

Mais cette découverte nous donne aussi une leçon politique. A l'heure où un grand nombre de ressortissants des pays de l'Union européenne, dont beaucoup de Français, se plaignent de l'Europe, il n'est pas luxueux de rappeler que c'est sur le Vieux Continent que cette belle avancée scientifique a eu lieu, en résultat d'une longue persévérance et d'une forte détermination de la part des scientifiques et des institutions qui les

encadrent. Elle vient préciser la bonne réponse à une question qui fut posée jadis sur les rivages de la mer Ionienne: de quoi la matière est-elle faite ?

Etienne Klein a par ailleurs participé à divers grands projets, en particulier à la conception du LHC, le grand collisionneur de particules de l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN), grâce auquel a été découvert le boson de Higgs en juillet 2012. Il anime tous les jeudis matin une chronique sur France Culture. Il vient de publier chez Les Equateurs/Flammarion : *En cherchant Majorana* (2013) et *Discours sur l'origine de l'univers* (2012).

Etienne Klein (Directeur de recherches au Commissariat à l'énergie atomique (CEA) et professeur à l'Ecole centrale de Paris)

Le LHC, une bouilloire qui chauffe le vide

Le Large Hadron Collider (LHC), le grand accélérateur de particules, est la plus grande expérience de physique jamais réalisée. Ce collisionneur de particules de 27 km de circonférence, érigé de part et d'autre de la frontière franco-suisse par l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire, permet de réaliser des collisions entre protons de très haute énergie. Véritable prouesse technique : deux faisceaux de dimensions infimes, parcourant en sens inverse et 11 245 fois par seconde un anneau de 27 km de circonférence à une vitesse quasiment égale à la vitesse de la lumière, se percutent en des lieux bien déterminés.

La conception et la construction d'une telle machine ont mobilisé pendant longtemps des milliers d'ouvriers et de physiciens. Son intérêt principal tient en ce qu'elle permet de sonder le vide. Car selon la physique quantique, le vide n'est pas l'espace vide. Il est rempli de ce qu'on pourrait appeler de la matière fatiguée, constituée de particules bel et bien présentes mais n'existant pas réellement: elles ne possèdent pas assez d'énergie pour pouvoir vraiment se matérialiser et, de ce fait, elles ne sont pas directement observables. Ce sont des particules "virtuelles", en hibernation, qui végètent dans une sorte d'ontologie endormie, telles des Belles au bois dormant.

CURE DE JOUVENCE À UN COIN D'UNIVERS

Pour les faire exister vraiment, il faut leur donner l'énergie qui manque à leur pleine incarnation. Le vide quantique peut lui-même jouer le rôle de prince charmant. A vrai dire, il joue plutôt le rôle d'un banquier des plus impatientes : il accepte de prêter de l'énergie aux particules virtuelles à la stricte condition qu'elles lui restituent très rapidement l'emprunt.

En vertu de ce contrat, des particules virtuelles peuvent surgir du vide, mais avec l'obligation d'y retourner presque aussitôt pour s'annihiler et ainsi rembourser leur dette énergétique... Heureusement, il y a un autre moyen plus efficace de réveiller le vide quantique : faire entrer en collision deux particules de haute énergie. Celles-ci offrent alors gratuitement leur énergie au vide et, du coup, des particules virtuelles que celui-ci contenait deviennent réelles et s'échappent hors de leur repaire. Elles qui faisaient un petit somme depuis plusieurs milliards d'années retrouvent la vitalité qu'elles avaient dans l'univers primordial.

Cette façon de voir change bien des choses. Elle invite à regarder le LHC comme une sorte de bouilloire capable de chauffer le vide quantique et d'offrir ainsi une cure de jouvence à un tout petit coin de l'Univers. C'est grâce à ce puissant collisionneur que le boson de Higgs a pu être extirpé du vide, puis repéré et identifié à l'aide de deux énormes détecteurs.