

BOSONS SCALAIRES et SUPERSYMMÉTRIE

Pierre FAYET

Institut Henri Poincaré, Paris, 29 novembre 2014

Après les deux exposés précédents

François Englert: “ Le boson de Brout-Englert-Higgs ”

Yves Sirois : “ La découverte du boson H au LHC ”

On sait beaucoup de choses sur les bosons scalaires

mais pas tout encore ...

On peut notamment se demander:

est-ce bien le **boson scalaire du Modèle Standard ?**

y en a-t-il d'autres { de la même sorte ?
ou d'une autre sorte ?

et *quelle interprétation plus profonde pourrait-on aussi donner
à celui qu'on vient de trouver ?*

Quelles réponses ?

**Le boson trouvé à 125 GeV présente bien, à ce stade,
les caractéristiques attendues du boson de Brout-Englert-Higgs du Modèle Standard**

* *
*

Mais bien d'autres pourraient aussi exister ...

notamment dans le cadre de la supersymétrie

* *
*

et enfin ...

Le BOSON BEH est-il ... UN Z SANS SPIN ?

il faut déjà savoir ce qu'est

un **Boson de Brout-Englert-Higgs**

spin 0

particule associée, notamment, à l'origine des masses

et à la brisure de la symétrie électrofaible

un **Z** ...

et

médiateur neutre de l'interaction faible

spin 1

responsable des diffusions de neutrinos par la matière, $\nu + p \rightarrow \nu + X \dots$

observées au CERN en 1973

Z se couple au “*courant neutre faible*”

(comme le photon au courant électromagnétique)

découverte du **Z** en 1983 (masse $91 \text{ GeV}/c^2$)

DEUX SORTES DE PARTICULES ...

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Bosons :} \quad \text{particules de spin entier, } 0, 1, 2, \dots, \text{ en unité } \hbar \\ \text{Fermions :} \quad \text{particules de spin demi-entier, } \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots, \text{ en unité } \hbar \end{array} \right.$$

Pour les particules fondamentales :

médiateurs des interactions

Bosons de spin 1 :

W^+ , W^- , Z , **photon**, **gluons**

(pas de boson de spin 0 pour le moment ...)

“constituants de la matière”

(au sens large)

 lectron, ..., neutrinos, quarks (\rightarrow proton = uud , neutron = ddu)

Fermions de spin $\frac{1}{2}$:

$$\begin{array}{ccc} \begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix} \end{array}$$

Les **BOSONS** ...

(spin entier, 0, 1, 2, ..., en unité \hbar)

spin 1	{	Z : <u>médiateur neutre de l'interaction faible</u> $m_Z \simeq \underline{\underline{91}} \text{ GeV}/c^2$
		W^+, W^- : médiateurs chargés de l'interaction faible $m_W \simeq 80 \text{ GeV}/c^2$
		photon (γ) : médiateur (neutre) de l'int. électromagnétique $m_\gamma = 0$

le mécanisme de Brout-Englert-Higgs (1964)

permet de donner des masses aux W^\pm et Z (Weinberg, 1967)

Un électron dans un champ électromagnétique acquiert une énergie électrostatique $E = qV$

*Il peut aussi **interagir avec un champ de spin 0 ϕ***

*et **acquérir une masse $m_e = \lambda_e \phi$***

(le champ ϕ étant ici supposé uniforme dans tout l'espace)

*ondes \rightarrow **quanta** associés à ce champ =*

BOSONS "de Brout-Englert-Higgs" **de spin 0**

Plus précisément:

LA THÉORIE ÉLECTROFAIBLE

(1967)

φ doublet de champs de spin 0 complexe \Leftrightarrow 4 composantes réelles (3 phases et 1 module)

Trois composantes éliminées par le **mécanisme BEH**, pour donner des masses aux W^\pm et Z

Reste la quatrième,

$$\phi = \sqrt{2 \varphi^\dagger \varphi}$$

qui s'ajuste pour minimiser $V(\varphi) = \lambda (\varphi^\dagger \varphi)^2 - \mu^2 \varphi^\dagger \varphi$

$$\phi = v = \sqrt{\mu^2 / \lambda}$$

quanta associés au champ $\phi \rightarrow$ bosons BEH, de spin 0

La symétrie de jauge reste exacte (et même non brisée) mais maintenant cachée

(elle est dite ordinairement “spontanément brisée”)

Différenciation entre interactions faibles (courte portée) *et électromagnétique* (longue portée) :

$$m_W = \frac{gv}{2}, \quad m_Z = \frac{\sqrt{g^2 + g'^2} v}{2} = m_W / \cos \theta; \quad m_\gamma = 0; \quad \tan \theta = g'/g, \quad e = g \sin \theta$$

$$\frac{G_F}{\sqrt{2}} = \frac{g^2}{8m_W^2} = \frac{1}{2v^2} \implies v = (G_F \sqrt{2})^{-1/2} \simeq 246 \text{ GeV.}$$

Couplages scalaires aux quarks et aux leptons, proportionnels aux masses:

$$\lambda_{q,l} = \frac{m_{q,l}}{v} = 2^{1/4} G_F^{1/2} m_{q,l}$$

Mais quelle est la masse du boson BEH ??

comme chacun sait, $m_H = \mu\sqrt{2} = \sqrt{2\lambda v^2}$

mais que vaut λ ??

40 ans plus tôt, en SUPERSYMETRIE, déjà ...

PF, NPB 90, 104 (1975)

il faut 2 doublets de champs de spin 0 pour la brisure électrofaible (+ éventuel singlet)

$$h_1 = \begin{pmatrix} h_1^0 \\ h_1^- \end{pmatrix} \text{ et } h_2 = \begin{pmatrix} h_2^+ \\ h_2^0 \end{pmatrix}$$

\Rightarrow *nouveaux bosons BEH, chargés et neutres $H^\pm; H, h, A$...*

couplages quartiques fixés par g^2 et g'^2 , en particulier $(g^2 + g'^2)/8$

\Rightarrow *boson neutre de spin 0, de même masse que le Z*

$$m_h = \sqrt{2\lambda v^2} = \frac{\sqrt{g^2 + g'^2} v}{2} = m_Z \simeq 91 \text{ GeV}/c^2$$

tant que les effets de brisure de supersymétrie ne se font pas sentir

La supersymétrie fournit un cadre naturel pour un boson scalaire de masse

$$m_h = m_Z \simeq 91 \text{ GeV}/c^2$$

avant effets de brisure de supersymétrie

un boson BEH, qui est aussi

un Z de spin 0

* *
*

Le boson scalaire du modèle standard est longtemps resté

sa dernière pièce manquante

après la découverte du quark top en 1995

échappant jusqu'en 2012 à tous les recherches expérimentales

notamment au LEP, qui a établi une borne inférieure de 114 GeV/c² sur sa masse

* *
*

Beaucoup ont longtemps mis en doute son existence réelle

particulièrement à partir de la fin des années 1970

mais pourquoi ?

Un boson scalaire, élémentaire ou pas ?

l'existence d'un tel scalaire a été beaucoup mise en question

de nombreux physiciens ayant longtemps eu

des doutes sérieux sur l'existence même de champs de spin 0 fondamentaux

En présence de grandes échelles d'énergie (\gg électrofaible)

telles $m_{GUT} \approx 10^{16}$ GeV ou $m_{\text{Planck}} \simeq 10^{19}$ GeV

ceux-ci devraient tendre à acquérir de grandes masses,

et disparaître de la théorie de basse énergie

*Nombreux efforts visant à remplacer les champs de spin 0 fondamentaux
par des champs composés de champs de spin 1/2*

*e.g. des champs de **techniquarks** spécialement introduits dans ce but
avec une nouvelle interaction de “**technicouleur**” ($SU(4)_{TC}$), puis de “**technicouleur étendue**”
dans l'espoir d'éviter les champs scalaires fondamentaux*

(sans grand succès à ce jour)

Un NOUVEAU BOSON ...

Comme chacun sait

Le **LHC** du CERN a découvert en **2012** **une nouvelle particule**

depuis longtemps activement recherchée – car nécessaire à la cohérence de la théorie

de masse \simeq **125** GeV/ c^2

Elle se désintègre en $\gamma\gamma$, WW^ , ZZ^* , $b\bar{b}$, $\tau^+\tau^-$, ...*

C'est un **BOSON**, presque sûrement de spin 0 (*plutôt que 2*)

que l'on pense être le (ou un)

Boson de Brout-Englert-Higgs

associé à la brisure spontanée de la symétrie électrofaible $SU(2) \times U(1)$

et à **l'origine des masses** (m_W , m_Z , m_e , ...)

Le boson de Brout-Englert-Higgs est la dernière pièce manquante du

MODÈLE STANDARD de la physique des particules

après les découvertes

des **courants faibles neutres** (1973)

du **quark charmé c** (1974-76)

des **gluons** (1979)

des bosons intermédiaires **W^\pm** et **Z** (1983)

et du **quark top t** (1995)

* * *

*Obtient-on alors, avec un **boson H** scalaire (2012)
et un Modèle Standard qui serait finalement complet,
une description satisfaisante de la physique des particules ?*

LE MODÈLE STANDARD

interactions fortes, électromagnétiques et faibles des quarks et leptons

$$SU(3) \times SU(2) \times U(1)$$

bosons de jauge (spin 1) : gluons, W^+ , W^- , Z , photon

fermions (spin- $\frac{1}{2}$) : quarks, leptons

+ 1 boson de Brout-Englert-Higgs de spin 0

associé à la brisure spontanée de la symétrie électrofaible et à l'origine des masses

potentiel en "chapeau mexicain" ...

- *succès remarquables*
- *mais laisse de nombreuses questions sans réponse*

quelques questions

Est-ce bien le boson scalaire du Modèle Standard ?

(et aurait-on alors tout compris ?)

*ou cette particule pourrait-elle avoir des propriétés légèrement différentes,
signes d'une “**nouvelle physique**” au delà du Modèle Standard ?*

Pas de tel signe pour l'instant. Les études se poursuivent ...

* * *

Est-il le seul ?

ou peut-il en exister d'autres – neutres ou chargés ?

comme dans les théories supersymétriques:

au moins 5 bosons tels bosons scalaires, deux chargés et 3 neutres:

SUSY \Rightarrow ***$H^+, H^-; H, h, A, \dots$***

Comment mieux comprendre et interpréter ce boson H ?

Un seul champ de spin-0 ? ou plusieurs (comme en supersymétrie) ?

est-il fondamental, ou composé (*mais alors de quoi...*) ?

* * *

articulation avec les champs de spin 1 ou $\frac{1}{2}$?

d'où provient *son potentiel* – et donc *sa masse* ?

comment l'échelle de masse associée (≈ 100 GeV) peut-elle rester modérée ?

* * *

Quoi qu'il en soit,

le Modèle Standard ne peut être la fin de l'histoire, il doit exister de la

Nouvelle Physique au delà du Modèle Standard

(*mais laquelle ... ?*)

NOMBREUSES QUESTIONS, dont

pourquoi **3 familles de quarks et de leptons**

qu'est-ce qui détermine leurs masses, et angles de mélange

d'où proviennent les (très petites) masses des neutrinos ?

* *

*

problèmes liés à la conservation ou non-conservation des symétries ***P*** et ***CP*** ...

origine de la **prépondérance de la matière sur l'antimatière**

* *

*

nature de la **matière sombre** (non-baryonique) de l'Univers ($\simeq 26\%$)

et de l'**énergie sombre** qui semble responsable de l'accélération de son expansion ($\simeq 69\%$)

provient-elle d'une **constante cosmologique Λ** ?

mais pourquoi celle-ci serait-elle aussi incroyablement petite ? ($\Lambda < 10^{-121} L_{\text{Planck}}^{-2}$)

* *

*

la **gravitation**, et son inclusion dans le cadre quantique ...

→ **rôle de l'ESPACE-TEMPS**
et de sa généralisation à des **coordonnées supplémentaires**

(“ordinaires”: x^5, x^6 ; ou anticommutantes: θ^α , comme en supersymétrie)

→

Dimensions supplémentaires

$$x^{\hat{\mu}} = (x^\mu, x^5, x^6 \dots)$$

dim. spatiales, très petites

(x^5, x^6 typiquement $< 10^{-16}$ cm)

Superspace

$$(x^\mu, \theta)$$

dim. fermioniques, et anticommutantes

$$\theta^\alpha \theta^\beta = -\theta^\beta \theta^\alpha$$

⇒ **Supersymétrie**

(les deux approches peuvent être combinées)

Autres questions ...

l'éventuelle unification des interactions

La nature de la MATIÈRE SOMBRE (non-baryonique) de l'Univers

??

des **particules neutres**, suffisamment massives,
ayant survécu aux annihilations des premiers instants de l'Univers ... (?)

(mais pas dans le modèle standard ...)

alors, une nouvelle sorte de particules ?

pourquoi seraient-elles stables ?

il serait bien d'avoir une raison fondamentale ...

→

... la supersymétrie → le **neutralino**

... la **R-parité** → sa **stabilité**

nouvelles particules, et symétries ...

LA SUPERSYMÉTRIE

peut (*en principe*) **relier les bosons et les fermions**
en changeant le spin des particules d'une demi unité

Transformations géométriques dans le superspace

L'espace-temps $x^\mu = \begin{pmatrix} ct \\ \vec{x} \end{pmatrix}$ est étendu au **superspace** (x^μ, θ)

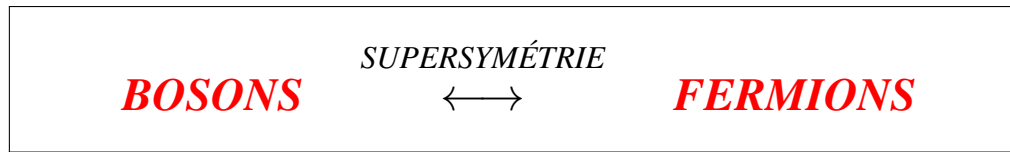
$\theta = \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{pmatrix}$ *coordonnées anticommutantes* (de spin $\frac{1}{2}$): $\theta_i \theta_j = -\theta_j \theta_i$, $(\theta_i)^2 = 0$

↑

(cf. Principe de Pauli: deux fermions identiques ne peuvent être dans le même état quantique)

$$\text{Alg\`ebre: } \begin{cases} \{ Q, \bar{Q} \} = -2 \gamma_\mu P^\mu \\ [Q, P^\mu] = 0 \end{cases}$$

engendre les translations ...



*c'est aussi le cadre naturel pour discuter de **particules de spin 0 fondamentales ...***

(les mal-aimées de la théorie des champs)

peut-on alors relier les Bosons, **messagers des interactions**

aux Fermions **constituants de la matière** ?

et arriver à une sorte d'unification

FORCES ↔ MATIÈRE ??

idée très attirante !

mais les choses ne se passent pas ainsi ... !!

(contrairement à ce qui est souvent écrit ...)

Comment la Nature pourrait-elle être supersymétrique ???

il ne semble pas que ce puisse être le cas ...

Comment briser spontanément la supersymétrie ?

alors qu'un état supersymétrique a toujours moins d'énergie qu'un autre qui ne l'est pas ...

et si l'on y arrive, pourquoi le fermion de Goldstone associé n'est-il pas observé ?

Que faire des fermions de Majorana de ces théories ?

alors que les quarks et les leptons sont de Dirac ?

Comment définir des nombres quantiques "fermioniques" B et L conservés

comment éviter des échanges de particules de spin 0, rendant le proton très instable ?

et déjà, ***quels bosons et fermions relier ?***

$$\left\{ \begin{array}{lll} \textit{photon} & \longleftrightarrow & \textit{neutrino} \\ W^\pm & \longleftrightarrow & e^\pm \\ \textit{gluons} & \longleftrightarrow & \textit{quarks} \\ & & \dots \end{array} \right.$$

ne convient pas ...

LES SUPERPARTENAIRES

Mais à chaque particule connue pourrait être associée
une particule image, son **reflet par supersymétrie** :

$$\left\{ \begin{array}{l} \textit{photon} \leftrightarrow \text{spin-}\frac{1}{2} \textit{ photino} \\ \textit{gluons} \leftrightarrow \text{spin-}\frac{1}{2} \textit{ gluinos} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \textit{leptons} \leftrightarrow \text{spin-0} \textit{ sleptons} \\ \textit{quarks} \leftrightarrow \text{spin-0} \textit{ squarks} \end{array} \right. \dots$$

alors:

$$\begin{array}{l} \text{bosons connus} \longleftrightarrow \text{nouveaux fermions} \\ \text{fermions connus} \longleftrightarrow \text{nouveaux bosons} \end{array}$$

(\rightarrow pas de relation directe entre les forces et particules connues ...)

longtemps moqué comme un signe de l'inutilité de la supersymétrie

mais maintenant considéré comme “*évident*” !

Les BOSONS de SPIN 0

squarks et sleptons: nouveaux bosons de spin-0

pas de la même nature que les bosons BEH

associés à la brisure électrofaible et à l'origine des masses

Distingués par le nouveau nombre quantique de R parité

(aussi à l'origine de la stabilité de la matière sombre)

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{squarks et sleptons:} & R\text{-parité} - 1 \\ \text{bosons BEH (et autres):} & R\text{-parité} + 1 \end{array} \right.$$

interactions quartiques des champs BEH = interactions de jauge électrofaibles

$$V_{\text{quartic}} = \frac{g^2 + g'^2}{8} (h_1^\dagger h_1 - h_2^\dagger h_2)^2 + \frac{g^2}{2} |h_1^\dagger h_2|^2$$

potential quartique du MSSM

Le MODÈLE STANDARD SUPERSYMETRIQUE

(1974-77)

(contenu minimal)

Spin 1	Spin 1/2	Spin 0
gluons g photon γ	gluinos \tilde{g} photino $\tilde{\gamma}$	
W^\pm Z	winos $\tilde{W}_{1,2}^\pm$ zinos $\tilde{Z}_{1,2}$ higgsino \tilde{h}^0	H^\pm h H, A
		} bosons BEH
	leptons l quarks q	sleptons \tilde{l} squarks \tilde{q}

4 neutralinos (au moins) qui se mélangent

le plus léger, stable → **Matière Sombre** (?)

2 doublets ⇒ **5 bosons BEH**, au moins

avec mélange H/h , l'un d'eux à $125 \text{ GeV}/c^2$

Le **NEUTRALINO** le plus léger

associé au photon, au Z, à un boson de Higgs (ou à tous à la fois)

doit être stable, par la symétrie de **R-parité**

$$R_p = (-1)^{2S} (-1)^{3B+L}$$

associée à une réflexion de la coordonnée anticommutante θ

$$\theta \rightarrow -\theta$$

candidat naturel pour la Matière Sombre de l'Univers

MATIÈRE SOMBRE reliée
aux médiateurs (γ et Z) des interactions
et/ou aux bosons BEH ?

\Rightarrow recherche de **matière sombre** aux collisionneurs de particules ...

Mais où sont les PARTICULES SUPERSYMMÉTRIQUES ... ?

toujours inobservées, même au LHC

expériences ATLAS, CMS \Rightarrow

Les **gluinos** et les **squarks** – s'ils existent – doivent être

plus lourds que $\approx \text{TeV}/c^2$ (dans la plupart des cas)

à suivre:

La montée en énergie du LHC, de 8 à 13 TeV

scénario optimiste:

découverte 😊

(implications considérables ...)

scénario pessimiste:

elles n'existent pas 😞

ou sont encore trop lourdes ... 😞

La MUSIQUE des SPARTICULES ... ?

Les particules supersymétriques pourraient “vibrer”

(\equiv *sparticules*, de *R-parité* -1)

le long de *dimensions supplémentaires cachées ... ?*

extrêmement petites ($\lesssim 10^{-17}$ cm)

(*R-parité* alors associée au fait de parcourir un cycle le long d'une dimension supplémentaire)

Elles seraient alors très lourdes !!

$$(L \lesssim 10^{-17} \text{ cm} \leftrightarrow mc^2 \approx \frac{\pi \hbar c}{L} \gtrsim 6 \text{ TeV})$$

Plus la dimension est petite, plus la vibration est aigüe, et plus la particule est lourde ...

\Rightarrow très grandes masses $\approx \frac{\pi \hbar}{Lc} \gtrsim$ **quelques TeV/c²** (ou même bien plus ... ??)

perdrait-on alors l'espoir de voir des signes de la supersymétrie ?

pas forcément ...

*Des signes de **SUPERSYMETRIE** dans le secteur de **B-E-H** ... ?*

Même si les particules supersymétriques demeurent invisibles:

deux doublets de spin 0, $\begin{pmatrix} h_1^0 \\ h_1^- \end{pmatrix}$, $\begin{pmatrix} h_2^+ \\ h_2^0 \end{pmatrix}$

⇒ 2 bosons chargés H^+ , H^-
et 3 neutres H , h , A (au moins)

*auto-interactions fixées par les constantes de jauge électrofaibles g , g'
masses reliées à m_W et m_Z*

Le boson BEH le plus léger ne doit pas être trop lourd ...

c'est une bonne chose pour la supersymétrie que :

- 1) trouver un tel boson de spin 0
- 2) semble *fondamental*, plutôt que composé ⇒ ☺
- 3) à 125 GeV, *et pas plus ...*

Un **BOSON** h à $125 \text{ GeV}/c^2$?

MSSM usuel

avant brisure de SUSY: *pas de brisure électrofaible* ☹️

après brisure de SUSY: $m_h \leq m_Z \cos \beta$ + grandes (?) corrections radiatives
dépendant de $m_{\tilde{t}}$

(potentiellement problématique ...) ☹️

N/nMSSM

singulet S avec interaction (superpotentiel) trilineaire $\lambda H_1 H_2 S$

(introduit il y a 40 ans, et pas pour “coller” aux résultats expérimentaux ...)

avant brisure de SUSY: *brisure électrofaible* + $m_h = m_Z$ ☺️ (nMSSM)

après brisure de SUSY:
beaucoup plus facile d'avoir le boson scalaire le plus léger à $125 \text{ GeV}/c^2$ ☺️

Mais on peut aller plus loin:

“Gauge - BEH UNIFICATION”

associations entre bosons W^\pm, Z et bosons BEH de spin 0 :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{spin-1 } Z \xleftrightarrow{\text{SUSY}} \xleftrightarrow{\text{SUSY}} \text{spin-0 BEH boson} \\ \text{et} \\ \text{spin-1 } W^\pm \xleftrightarrow{\text{SUSY}} \xleftrightarrow{\text{SUSY}} \text{spin-0 } H^\pm \end{array} \right.$$

avec aussi des inos de spin- $\frac{1}{2}$

le **neutralino** le plus léger étant candidat pour la Matière Sombre de l’Univers

Les mêmes **superchamps** $W^\pm(x, \theta, \bar{\theta}), Z(x, \theta, \bar{\theta})$ peuvent décrire à la fois les bosons W^\pm et Z (de spin 1) et les bosons **BEH** (de spin 0) associés

dans les notations usuelles le partenaire de spin-0 du Z est

$z = \sqrt{2} \text{Re} (h_2^0 \sin \beta - h_1^0 \cos \beta)$, voisin de h à grand $\tan \beta$

comportement très voisin de celui d’un H du modèle Standard !!

“Gauge-BEH unification” (1974)

Relie des particules alors inconnues, par une symétrie hypothétique !!

(quand peu de physiciens prenaient vraiment au sérieux l'existence d'un boson BEH ...)

40 ans après, la supersymétrie reste hypothétique, mais les particules sont là ...

Z (1983) **h** (2012)

Possibilité d'interpréter (à un angle de mélange près, éventuellement petit)

le **boson BEH à 125 GeV** comme **un Z dépourvu de spin**
lié au **Z** par deux transformations de supersymétrie

(à discuter, selon les résultats des expériences, les propriétés de ce boson,
l'angle de mélange et le mécanisme de brisure de supersymétrie)

Un premier signe de la supersymétrie ?

EPJC 74 (2014) 2837 (arXiv:1403.5951)

PRD 90 (2014) 015033 (arXiv:1406.0093)

http://www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/pdf/1993/04/refdp_bsfp-91.pdf

[Sources et évolution de la physique quantique. Textes fondateurs (Masson; EDP-Sciences)]