

LA THÉORIE DES UNIVERSONS ET LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE

Par Claude POHER et Patrick MARQUET

La théorie des Universons explore les effets de la gravitation à l'échelle des particules élémentaires de la matière. La Relativité Générale est, en revanche, une théorie dans laquelle sont considérés les actions de la gravitation à très grande échelle. La Relativité Générale n'a toutefois pas permis de justifier de certains phénomènes, tels que la vitesse orbitale constante des étoiles, en fonction de la distance, dans les galaxies spirales. Il s'agit, dans ce cas, bien que l'échelle de distances soit grande, d'un effet quantique sur les particules élémentaires constituant les étoiles, et non pas d'un effet gravitationnel classique à grande échelle.

La théorie des Universons nous dit par conséquent qu'il faut prendre garde, même à grande échelle, aux faibles amplitudes de l'accélération gravitationnelle newtonienne, ce que la Relativité Générale semble ignorer jusqu'à présent

On pourrait donc être tenté de considérer que la théorie des Universons n'est pas compatible avec la Relativité Générale d'Einstein.

Cela est cependant erroné, car un soin tout particulier a présidé au choix des hypothèses afin de rendre la théorie des Universons compatible avec les conséquences de la Relativité Générale.

Par exemple, les Universons libres n'ont pas de masse et se propagent à la vitesse de la lumière, dans l'Espace. Ils ont néanmoins une énergie propre. Leur impulsion est égale à leur énergie propre divisée par la vitesse de la lumière.

Ces caractéristiques des Universons sont dictées par la théorie de la relativité.

La Relativité Générale est un ensemble de théories selon lesquelles *tout ou partie des lois de la physique sont invariantes par changement de référentiel*. C'est-à-dire, par exemple, que les lois de la physique restent les mêmes pour un observateur au repos et pour un observateur en mouvement uniforme.

La théorie des Universons est parfaitement en accord avec ce principe de relativité comme nous allons le voir.

ÉNERGIE DES UNIVERSONS ET MOUVEMENT UNIFORME

Les Universons libres se déplacent tous à la vitesse de la lumière, que l'observateur soit au repos ou bien qu'il se déplace à vitesse constante.

Ce qui change pour les deux observateurs, c'est l'énergie observée de chaque Universon quand celui-ci est capturé par une particule de matière.

Ainsi, les Universons libres du flux isotrope naturel, venant de toutes les directions de l'espace, et capturés, ne sont pas observés tous comme possédant exactement la même énergie.

Dans ces conditions, comment des Universons d'énergie différente peuvent-ils conduire au même effet gravitationnel ?

C'est très simple à comprendre.

La conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement impose, aux Universons capturés, d'adopter strictement la même trajectoire, quand ils sont réémis, que celle qu'ils avaient avant capture. En outre, ils conservent la même énergie, avant capture et après réémission, vue par l'observateur supposé situé sur la matière en mouvement.

Par conséquent, la valeur de l'énergie propre de chaque Universon capturé n'a *strictement aucune importance* dans ce processus.

En outre, la *valeur moyenne de l'énergie* capturée temporairement par la matière **ne change pas** si la matière est en mouvement uniforme, parce que la perte d'énergie propre des Universons provenant d'une direction *est exactement compensée* par l'accroissement d'énergie propre des Universons provenant de la direction opposée. Ainsi, l'énergie moyenne totale, des Universons capturés simultanément par une particule, ne change pas avec la vitesse, tant que la durée de capture n'est pas affectée par une vitesse assez grande (relativiste).

En revanche, si la vitesse de la particule de matière devient relativiste, alors la durée de capture des Universons est modifiée, l'énergie moyenne des Universons capturés simultanément change proportionnellement, donc la masse de la particule, qui est égale à cette énergie moyenne, varie avec la vitesse, *conformément à la relation prédite par la théorie de la relativité*.

Ainsi, les caractéristiques des Universons respectent parfaitement les règles imposées par la relativité.

Dans ces conditions, il n'est pas anormal que la théorie des Universons soit en accord avec de nombreux faits expérimentaux.

LES FAITS EXPÉRIMENTAUX QUI CORROBORENT LA THÉORIE DES UNIVERSONS

Il faut ici rappeler les faits expérimentaux qui sont effectivement prédits par la théorie des Universons :

— *L'accélération constante, égale à Hc , constatée sur toutes les sondes spatiales où les perturbations de la mission permettent de la mettre en évidence. Cette accélération est un effet quantique dû à l'expansion de l'Univers.*

— *La vitesse orbitale des étoiles dans toutes les galaxies spirales, qui est indépendante du rayon galactique. Cet effet est le résultat des fluctuations quantiques des interactions des Universons avec les particules élémentaires, auquel s'ajoute un effet lié aux fluctuations quantiques de l'accélération Hc précédente.*

— *La proportionnalité de la masse apparente avec leur rayon, des galaxies elliptiques et des amas et super amas de galaxies. Cet effet est analogue au précédent dans ses causes, c'est-à-dire une accélération gravitationnelle newtonienne inférieure à un seuil quantique et l'expansion de l'Univers.*

— *La faible modification de l'orbite terrestre, qui a été révélée par Pioneer 10, et dont la cause est l'accélération Hc indiquée précédemment, c'est-à-dire l'expansion de l'Univers.*

Tous ces faits expérimentaux sont associés à l'expansion de l'Univers, qui est une des prédictions de la Relativité Générale. Toutefois, ils font appel aussi à des effets quantiques tels que des fluctuations aléatoires, qui impliquent une interaction gravitationnelle quantifiée, considérée à l'échelle des particules élémentaires.

Par conséquent, on voit apparaître ici la difficulté qui se manifeste dans la Relativité Générale si l'on considère des effets gravitationnels à grande échelle.

Certains de ces effets, bien réels, car effectivement mesurés, sont manifestement quantiques, bien qu'ils soient observés sur de très grandes échelles de distance.

Cela doit nous inciter à une grande prudence dans l'interprétation des résultats expérimentaux des deux théories, celle de la Relativité Générale d'une part, et celle des Universons, d'autre part.

LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE ET LA GÉOMÉTRIE DE L'UNIVERS

La théorie de la relativité d'Albert EINSTEIN est sans doute l'une de celles qui ont fait l'objet du plus grand nombre de vérifications.

La théorie de la relativité nous révèle que notre perception des phénomènes physiques dépend de notre repère de référence et de notre mouvement relatif par rapport à ce repère.

La théorie de la relativité *restreinte* décrit ce qui se passe pour des repères inertiels, c'est-à-dire *au repos ou en mouvement relatif à vitesse constante*.

La théorie de la Relativité *Générale* a élargi ces descriptions au cas des *repères accélérés*.

Ces deux théories reposent sur un ensemble de confirmations expérimentales très solides, et elles sont issues de notions fondamentales bien connues, comme, par exemple, le fait que la vitesse de la lumière est la même dans tous les repères, en mouvement les uns par rapport aux autres.

C'est précisément cette universalité de la vitesse de la lumière, révélée pour la première fois par Michelson et Morley, en 1887, qui a donné naissance à la théorie d'Einstein en 1905.

Les expériences de 1887 avaient une précision de l'ordre d'un dix-millième. Depuis, on sait qu'elles ont été vérifiées avec une précision accrue de plus de 14 ordres de grandeurs. Par conséquent, il s'agit là de résultats incontestables.

La théorie de la relativité *restreinte* a un certain nombre de conséquences bien connues, telles que la *compression temporelle* à grande vitesse, ainsi que la variation relativiste des *masses et des longueurs*.

Cette théorie *restreinte* décrit ce que l'on appelle désormais l'espace-temps, avec la plus grande précision, *dans un environnement sans gravité locale*.

L'emploi de la théorie de la *Relativité Générale* est toutefois indispensable pour décrire l'espace-temps *quand la gravité devient assez importante pour que l'on doive considérer la courbure de l'espace-temps*.

Einstein montra, par la prédiction de l'avance du périhélie de l'orbite de la planète Mercure, effectivement observé, que la présence de la masse du Soleil courbe l'espace-temps.

En outre, Einstein a prédit la déviation des trajectoires suivies par les photons de la lumière passant au voisinage de la masse importante du Soleil.

Cet effet a été effectivement observé, pour la première fois,

par Eddington, en 1918, puis confirmé par de nombreuses autres méthodes, avec une précision croissante. Ce fait expérimental traduit l'équivalence de la masse et de l'énergie.

C'est-à-dire la célèbre relation $E = m c^2$.

L'Univers étant essentiellement fait de matière et d'énergie, la théorie de la Relativité Générale s'avère donc être un moyen de déterminer, par le calcul, la géométrie de l'Univers à grande échelle, grâce à la courbure de l'espace-temps.

Effectivement, nous savons que les photons de lumière passant à proximité d'une masse, ont leur trajectoire affectée par la courbure locale de l'espace-temps.

Ainsi, un observateur, qui mesure l'écart angulaire entre deux objets astronomiques, observe en réalité un angle différent de la réalité, parce que la lumière de chaque objet a parcouru un trajet différent et a donc nécessairement subi des effets gravitationnels de courbure de trajectoire différents de la part des autres objets de l'Univers.

La théorie de la relativité permet donc, en principe, de connaître la véritable géométrie de l'Univers que nous observons, déformé, à cause de la courbure de l'espace temps, due à la masse de la matière, et due aussi à la quantité d'énergie existant, en moyenne, dans l'Univers.

Einstein en déduit que cette courbure de l'espace-temps est *la cause* de la gravitation.

LA CAUSE DE LA GRAVITATION ?

Peut-on être légitimement certain que la courbure locale de l'espace-temps est la cause de la gravitation, ou bien est-ce là un des effets observables de la gravitation ?

Le problème majeur est que cette courbure Einsteinienne est incapable, actuellement, de justifier l'accélération constante, indépendante de la distance, égale à $H_0 c$, des sondes spatiales lointaines, qui s'ajoute à l'accélération gravitationnelle relativiste du Soleil. Cette accélération $H_0 c$ est en effet demeurée constante tandis que la distance des sondes au Soleil a été multipliée par un facteur supérieur à 80 fois.

Mais, en revanche, cette accélération, dont l'amplitude est égale au produit de la constante de Hubble H_0 par la vitesse de la lumière c , est aisément démontrée dans le cadre de la théorie des Universons.

Or, la théorie des Universons considère que l'interaction gravitationnelle est le résultat de l'action de *quanta d'énergie sur les particules élémentaires* de la matière. La Relativité Générale impose certes des contraintes aux caractéristiques des quanta d'énergie, qui

sont appelés Universons, mais, cela n'a aucun rapport apparent avec la courbure de l'espace-temps à l'échelle macroscopique.

Par conséquent, rien ne nous prouve que l'effet de courbure de l'espace-temps ne soit pas en réalité une *conséquence* de la gravitation plutôt que sa *cause*. Il s'agit là, en quelque sorte, une autre version de *l'histoire de l'oeuf et de la poule*.

Mais peu importe. Nous sommes en présence de deux théories complémentaires, l'une à l'échelle quantique, l'autre à l'échelle de l'Univers entier, où les effets de la gravitation sont très importants à considérer.

Il apparaît donc souhaitable d'examiner dans quelle mesure il est possible de rattacher les deux théories. Toutes deux ont, semble-t-il, un point commun à très grande échelle : *l'existence du flux cosmologique d'Universons libres* qui est la cause réelle de l'interaction gravitationnelle à l'échelle quantique.

Il est donc très intéressant d'examiner si la Relativité Générale peut révéler l'existence de ce flux d'énergie isotrope, **qui exerce sa pression** sur la matière à l'échelle quantique, d'une manière un peu plus complexe que le ferait un gaz. Néanmoins, il est clair que l'action de ce flux énergétique peut parfaitement être comparée à la pression d'un fluide parfait, car la force gravitationnelle s'avère être proportionnelle au flux d'Universons, c'est-à-dire à leur densité dans l'Univers.

UNE QUESTION D'ÉCHELLE

L'étude de la géométrie réelle de l'Univers au moyen de la Relativité Générale ne peut cependant pas être entreprise à petite échelle car la structure de l'Univers est très loin d'être homogène.

En effet, la théorie n'est exploitable que si l'on fait l'hypothèse d'un Univers homogène, sans variations locales importantes de densité de matière ou d'énergie.

Or, l'essentiel de la matière de l'Univers se trouve concentrée dans les galaxies, sous la forme de centaines de milliards d'étoiles et d'un peu de gaz. Ces objets ont un diamètre de l'ordre de cent mille années lumière.

Mais la distance moyenne entre galaxies est de l'ordre de trente fois leur diamètre, ce qui ne correspond donc pas à une composition homogène de l'Univers à cette échelle.

À plus grande échelle, les galaxies sont groupées au sein d'amas comportant en moyenne un millier de galaxies, dans une région de dix millions d'années lumière de diamètre moyen.

Les amas de galaxies sont séparés par de vastes espaces vides de matière, et se groupent en filaments et super amas comportant de 5 à 40 amas, cela est illustré par la figure ci-jointe. À plus grande

échelle que deux milliards d'années lumière, il ne semble pas y avoir de nouvelle structure observée.

C'est donc au delà de cette échelle, de quelques milliards d'années lumière, que la géométrie de l'espace-temps peut être analysée dans le cadre de la Relativité Générale, avec une plus grande probabilité de représenter la réalité.

Toutefois, il faudra se souvenir qu'il n'est pas encore question, pour le moment, de prédire des effets observables directement à cette échelle.

Nous chercherons donc ici à examiner seulement les conséquences phénoménologiques de la relativité à cette échelle très vaste.

Quand il s'agira, beaucoup plus tard, d'envisager une confirmation des prédictions par des observations, il faudra se souvenir que la théorie des Universons prévoit, à l'échelle des amas et des super amas de galaxies, une valeur très différente de l'accélération gravitationnelle, par rapport à la théorie macroscopique, en raison des fluctuations quantiques. Les immenses distances en cause amèneront à examiner, dans ce cas, l'effet des *très faibles accélérations* sur la matière. C'est précisément dans ce domaine que la théorie des Universons prédit, avec succès, des effets radicalement nouveaux.

L'ESPACE-TEMPS D'EINSTEIN

A l'époque où Hubble découvrait l'expansion de l'Univers par la fuite des galaxies, Einstein développait sa théorie de la Relativité Générale.

L'explication que Newton donnait de la gravitation était remplacée par celle *d'événement dans l'espace-temps* à quatre dimensions : trois d'espace et une de temps. Dans cet espace temps chaque événement est représenté par un point.

Au lieu de considérer qu'une masse modifie le mouvement d'un corps par la force qu'elle exerce sur lui, Einstein décrit l'effet de cette masse par la façon dont elle modifie l'espace-temps. Les corps se déplacent dans ce repère à quatre dimensions selon des trajectoires appelées *géodésiques*, et la présence des masses déforme les géodésiques.

La théorie de la Relativité Générale relie ainsi *la structure géométrique de l'Univers à son contenu en matière et en énergie.*

MODÈLES COSMOLOGIQUES

La théorie de la Relativité Générale a donc permis de décrire, par des équations, des « *modèles cosmologiques* » qui dépendent étroitement de la répartition de la matière et de l'énergie dans l'Univers.

Tous ces modèles reposent sur le « *postulat cosmologique* » qui dit qu'à l'échelle considérée, la distribution de matière et d'énergie est *homogène et isotrope*. Nous savons que ce n'est pas vraiment exact et que nous ne disposons pas encore d'observations certaines à cette échelle, il s'agit donc d'une théorie abstraite et sans fait d'observation, pour le moment.

Une des difficultés est que la théorie de la Relativité Générale autorise le calcul d'un grand nombre de modèles cosmologiques différents, et que les faits observés ne permettent pas encore de n'en conserver qu'un seul.

Toutes les solutions de ces modèles cosmologiques représentent des Univers non statiques. Tous se dilatent ou se contractent au cours du temps. Ainsi, la distance entre les galaxies ne saurait être constante.

La découverte de l'éloignement de toutes les galaxies confirme remarquablement ce résultat, et permet d'éliminer quelques modèles où une contraction se manifeste.

La plupart (mais pas tous) des modèles cosmologiques en expansion ont un instant singulier dans le passé, où les distances s'annulent toutes. C'est le fameux « Big Bang » de l'origine de l'Univers. Une vaste « explosion ».

Il est possible de calculer les conditions physiques existant dans l'Univers au cours des instants qui ont suivi le Big Bang, sur la base du contenu actuel, observé, de l'Univers, en matière et en énergie. C'est ainsi que l'on a pu prédire l'existence d'un rayonnement lumineux infrarouge isotrope, qui a été observé. C'est le fameux rayonnement du corps noir cosmologique à 2,7K.

En outre, sur les bases de la physique nucléaire, il a été possible d'analyser la transformation de l'énergie du Big Bang en particules élémentaires, puis en hydrogène, en hélium, et en deutérium, éléments qui furent utilisés dans la création des premières étoiles puis des premières galaxies.

Cet ensemble de prédictions a été confronté avec un relatif succès aux observations, ce qui a permis d'éliminer quelques modèles cosmologiques inadaptés. Néanmoins il en reste encore un grand nombre qui sont compatibles avec ces faits.

Il est tout-à-fait remarquable que ces théories abstraites de l'Espace-temps conduisent à prédire un Big Bang aux conséquences

physiques effectivement observées.

Les modèles cosmologiques qui restent valides permettent de décrire le passé et l'avenir de l'Univers d'une manière générale. Ces modèles différents reposent sur des hypothèses différentes, toutes compatibles avec la théorie de la Relativité Générale, et un petit nombre de paramètres physiques que les astronomes s'emploient à tenter de déterminer.

Chacun des modèles restants conduit à des prédictions différentes.

Le comportement de l'Univers est lié, dans ces modèles, aux paramètres suivants :

— *La constante de Hubble H_0 . C'est le taux d'expansion actuel de l'univers, exprimé en kilomètres par seconde par mégaparsec de distance.*

— *Le paramètre de décélération q_0 . Il indique le rythme de modification dans le temps de la constante de Hubble.*

— *La constante cosmologique λ_0 introduite par Einstein.*

— *La densité moyenne de matière dans l'Univers ρ_0 avec la densité d'énergie incluse.*

Dans tous les modèles cosmologiques encore valides, si la densité de matière est suffisante, alors l'attraction gravitationnelle ralentit l'expansion et finit par l'emporter. Dans ce cas l'Univers se contracte après un temps d'expansion et finit dans un «Big Crunch».

Dans le cas contraire, l'Univers se dilate éternellement.

Il semble que la densité de l'Univers observée nous place dans cette dernière hypothèse. En effet, suite aux clichés de sondage profond réalisés par le télescope spatial HUBBLE, en 1997, Ferguson, Williams et Cowie ont montré que ces clichés étaient en faveur des modèles cosmologiques dits « ouverts » ou dominés par la constante cosmologique.

Il va être question, ici, de l'un de ces modèles cosmologiques valides :

LE MODÈLE COSMOLOGIQUE DE PATRICK MARQUET

Le physicien théoricien Patrick MARQUET a élaboré un modèle cosmologique du type ROBERTSON-WALKER, c'est-à-dire basé sur l'hypothèse d'un Univers homogène et isotrope, mais qui n'est pas basé sur une géométrie non euclidienne de Riemann. Ce modèle fait appel à un second type de courbure de l'espace temps à quatre dimensions, basé sur les travaux de Weyl, qui généralisent la courbure Riemannienne.

Le résultat de cette analyse est l'apparition de l'équation d'un fluide massique parfait baignant l'ensemble de l'Univers, fluide qui se manifeste par une pression permanente et isotrope.

Cette pression est à rapprocher de la notion de flux cosmologique d'Universons libres, qui, par son interaction avec la matière, exerce sur celle-ci une forme de pression responsable des effets d'inertie et de gravitation.

Un tel modèle « jette un pont » entre le monde quantique où se manifeste l'interaction Universons / matière, et le monde infiniment grand à l'échelle duquel l'Univers apparaît homogène et isotrope.

C'est la première fois que la physique théorique relativiste parvient à un résultat de ce type. Il conviendra par conséquent d'approfondir cette approche en examinant les autres conséquences de ce modèle.

On trouvera, en annexe le détail de la théorie de Monsieur Patrick MARQUET, dont les spécialistes apprécieront la clarté et la concision.

Ce modèle d'Univers a été soumis à deux professeurs d'Université, considérés par leurs pairs comme étant les plus compétents en France, et ils ont tous deux confirmé l'exactitude des calculs de ce modèle théorique.

UN VOCABULAIRE SPÉCIALISÉ

Les physiciens théoriciens spécialistes des modèles cosmologiques de Relativité Générale manipulent des concepts mathématiques abstraits pour déterminer la géométrie prédite par chaque modèle. Leurs calculs font appel à des méthodes développées par des mathématiciens célèbres, et utilisent généralement le calcul tensoriel.

Ces méthodes sont assez rarement utilisées dans les autres disciplines scientifiques, et elles se réfèrent à un langage précis qui est parfois inconnu des lecteurs. C'est pourquoi il a semblé intéressant de regrouper ici les principales définitions du vocabulaire utilisé, ainsi que les noms des chercheurs qui se sont illustrés dans ces domaines.

RIEMANN Bernhard, 1826 - 1866 . Mathématicien allemand qui fut l'un des premiers à envisager une géométrie « non Euclidienne », très employée en Relativité Générale ultérieurement. Il étudia les fonctions de variables complexes, et aborda les théories fondamentales sur les nombres premiers, sur l'intégration, et les fondements de la géométrie et de la topologie.

WEYL Hermann : Mathématicien américain d'origine allemande. 1885 - 1955. On lui doit la première présentation rigoureuse des fonctions de Riemann et d'importants résultats sur les groupes de Lie. Ses publications s'échelonnent de 1918 à 1950, par exemple :

Introduction

— «*Gravitation und elektrizitat*» (*Académie des sciences de Prusse — Sitz. Preuss Akad. Wissenschaft*)

— «*A remark on the coupling of gravitation and electron*» (*physical review t.77, 1950*).

Il fut à l'origine de la théorie mathématique du neutrino.

Les **modèles cosmologiques** bâtis sur l'hypothèse d'un Univers homogène et isotrope sont souvent appelés modèles de **ROBERTSON-WALKER**, du nom des physiciens qui furent les premiers à les aborder en 1935. Ils étudient le rayon de courbure variable de l'Univers en expansion selon la géométrie de **RIEMANN**. Pour ce faire, ils ont repris et perfectionné les idées de **FRIEDMANN** et de **LEMAÎTRE**.

HOMOGENÈME : l'Univers est dit homogène quand ses éléments constitutifs sont de même nature (en l'occurrence des galaxies).

ISOTROPE : L'Univers est isotrope si ses propriétés physiques sont identiques dans toutes les directions.

SCALAIRE : c'est une grandeur dont la mesure s'exprime par un seul nombre.

VECTEUR : segment de droite orienté, défini par sa direction, son sens, et sa longueur, ou norme. On parle des composantes d'un vecteur selon les axes d'un repère, ou d'une base.

PRODUIT SCALAIRE DE DEUX VECTEURS : Somme des produits de leurs composantes de même rang, relativement à une base orthogonale.

4-Vecteur (ou quadri-vecteur) : Vecteur généralisé, constitué en réalité de quatre vecteurs, utilisé pour simplifier la notation dans un espace-temps à quatre dimensions.

ESPACE VECTORIEL : Un vecteur est un élément d'un espace vectoriel, dans le plan ou dans l'espace, ou dans l'espace-temps.

MÉTRIQUE : une métrique étudie les propriétés des figures qui sont invariantes par des transformations appelées isométries. Dans une métrique, les distances sont prises en considération.

TRANSFORMATION CONFORME : il s'agit d'une transformation qui conserve les angles orientés (mais pas nécessairement les longueurs donc les surfaces).

FONCTION AFFINE : c'est une fonction réelle, de variables réelles (à considérer par opposition à une variable complexe, faisant intervenir la racine carrée de -1).

GEOMETRIE AFFINE : Elle a des propriétés invariantes par des transformations du premier degré.

REPERE AFFINE : Dans l'espace, repère formé par quatre points non coplanaires.

ESPACE VECTORIEL AFFINE : Un espace vectoriel où il n'est pas possible de comparer les longueurs (on s'intéresse aux angles)

ESPACE VECTORIEL MÉTRIQUE : Un espace vectoriel où il est possible de comparer les longueurs

VARIÉTÉS : espaces continus à n dimensions, sur lesquels sont permises des opérations mathématiques telles que la différentiation. Il est possible de travailler sur une variété sans avoir recours à un système de coordonnées. Par exemple : la surface d'une sphère est une variété. Autre exemple : une variété peut être orientable ou orientée suivant des directions. Localement, elle s'apparente à l'espace euclidien (Espaces tangents). L'ancienne terminologie était la « multiplicité » (Manifold en anglais).

HOLONOME : référentiel particulier, dans lequel les systèmes de coordonnées sont locales ou repère naturel. Dans ce système, par exemple, un vecteur général peut devenir le gradient d'une fonction scalaire.

HOLOMORPHE : Une fonction holomorphe est continue, uniforme et analytique.

CONNEXION D'UNE VARIÉTÉ : c'est le « raccord » mathématique de deux espaces tangents en deux points, infiniment voisins, d'une variété donnée. En dépit de sa forme, une connexion n'est pas un tenseur, seule sa différence l'est.

TENSEUR : C'est la généralisation d'un vecteur à plus de trois dimensions. Une quantité scalaire est un tenseur d'ordre zéro et ne possède qu'une composante. Un vecteur est un tenseur du premier ordre et possède r composantes, dans un espace à r dimensions. Ce tenseur peut être covariant, et alors ses composantes seront indiquées en indice, comme dans t_k . Le tenseur peut aussi être contravariant, auquel cas ses composantes seront placées en exposant, comme dans t^k . Un tenseur peut être du n ième ordre, et dans ce cas il possédera r^n composantes. Les tenseurs peuvent être mixtes et comporter des composantes en indice et en exposant. L'emploi des tenseurs (calcul tensoriel) permet de simplifier considérablement l'écriture de l'algèbre des transformations matricielles. La Relativité Générale utilise le calcul tensoriel pour exprimer les lois de la physique sous une forme indépendante du système de coordonnées choisi. Les tenseurs possèdent des propriétés supplémentaires par rapport aux vecteurs ordinaires.

Ces définitions ne sont évidemment pas exhaustives. Elles ne suffiront pas à comprendre les équations du modèle de Patrick MARQUET si l'on ignore tout du calcul tensoriel.

BIBLIOGRAPHIE

Outre les ouvrages proposés par Monsieur MARQUET, et en particulier pour aborder le calcul vectoriel et le calcul tensoriel, on consultera avec profit deux ouvrages de Jean HLADIK publiés en 1993 :

— *Le calcul tensoriel en physique* - MASSON -

— *Le calcul vectoriel en physique* - ELLIPSES -

Jean HLADIK est professeur de physique des Universités, il enseigne à l'Université d'Angers, et dirige le laboratoire d'énergétique et de thermodynamique.

On pourra trouver un intérêt à aborder la relativité générale grâce à l'ouvrage en anglais :

— *A first course in General relativity* par Bernard F. SCHUTZ
(Cambridge University Press)

L'historique et les caractéristiques des principaux modèles cosmologiques sont présentés dans l'ouvrage synthétique de Kenneth R. LANG, qui comporte de nombreuses références bibliographiques :

— *Astrophysical Formulae, Vol II* — Springer — 3rd édition, 1999.

Les Universons et la relativité générale

La figure ci dessous correspond à un sondage de l'Univers dans deux secteurs minces de 500 millions d'années lumière de rayon maximum. Chaque point blanc est une galaxie. On voit ici la répartition spatiale observée de plus de 14000 galaxies de l'hémisphère Nord (en haut de l'image) et de l'hémisphère Sud (en bas). Les galaxies sont réparties selon de vastes filaments laissant de grandes bulles d'espace complètement vides. La Terre est au centre de ce dessin, au point de rencontre des deux secteurs. La vitesse d'éloignement des galaxies périphériques de ce sondage atteint 12000 km/seconde. Une sorte de grand mur de galaxies apparaît dans l'hémisphère Sud, en diagonale, sur une longueur considérable. Un autre mur curviligne diagonal existe dans le segment Nord. Notre Galaxie masque la zone horizontale centrale de ce sondage. Celui-ci ne couvre en outre que le cent millième de l'ensemble de l'Univers observable, et les galaxies trop faiblement lumineuses ne sont pas représentées. D'après GELLER & al. Smithsonian Astronomical Observatory.

