

Chapitre 9

Un nouveau paradigme pour la physique ? Nouvelles perspectives.

par

Laurent Nottale

CNRS

LUTH. Observatoire de Paris-Meudon et Université Denis Diderot.

9.1. Limites du paradigme actuel

La physique, et plus généralement la science, est-elle en crise ? Le paradigme de la physique, installé à la fin du XIX^{ème} siècle et au début du XX^{ème}, avec les théories de la relativité du mouvement et la mécanique quantique, a-t'il atteint ses limites ? Un nouveau paradigme est-il nécessaire ? Ces questions, qui pouvaient sembler encore incongrues il y a quelques années, commencent à être posées sérieusement par un certain nombre de physiciens [1,2].

En apparence tout semble aller pour le mieux. Le taux d'innovations technologiques semble n'avoir jamais été aussi haut: explosion des technologies de l'information et de l'informatique, essor des biotechnologies, montée en puissance des nanotechnologies...

Mais si l'on observe plus en détail la nature de ces innovations, on constate qu'il s'agit de la poursuite, de l'amélioration et de l'extension de découvertes anciennes, et non pas d'authentiques découvertes nouvelles, dont l'originalité se repèrerait immédiatement par leur caractère frappant et inattendu, quasi miraculeux. Les ordinateurs sont plus rapides et les mémoires plus compactes, mais ils fonctionnent toujours sur le même principe qu'il y a quarante ans. Les automobiles, les avions se sont améliorés depuis

un siècle, mais aucun nouveau mode de transport aussi révolutionnaire qu'ils l'ont été lors de leur invention n'est apparu depuis lors. Au moment de leur invention, le train, le téléphone, la reproduction sonore, la photographie, la radio, la télévision, l'avion, etc... apparurent comme des outils permettant de réaliser des actions auparavant considérées comme impossibles, apparaissant comme de véritables miracles : communiquer à des distances immenses, stocker et transmettre des images et des sons sans limite, se déplacer à des vitesses inimaginables, voler dans le ciel, etc... Ou sont les équivalents modernes de cette révolution technologique du XIX^e et XX^e siècle ? L'énergie de fission nucléaire a plus de cinquante ans, la fusion qui aurait dû la remplacer n'est pas à l'ordre du jour avant des décennies, les technologies du vivant, qui auraient dû fournir une moisson de nouveaux médicaments extraordinaires vu les sommes investies, n'ont rien donné d'équivalent à l'aspirine ou aux antibiotiques.

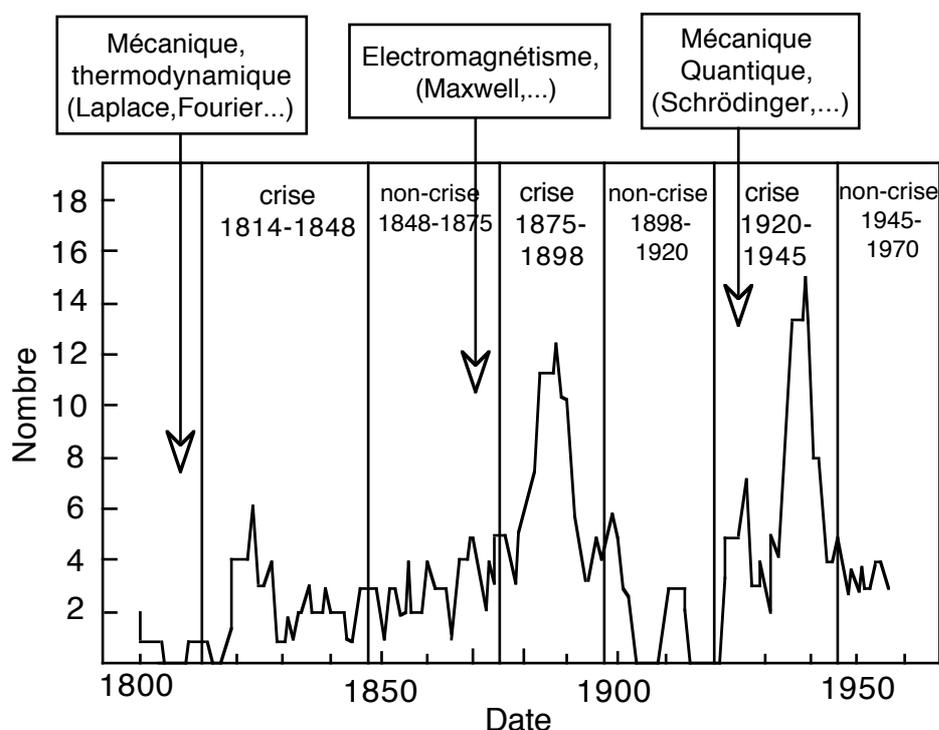


Figure 1. Comparaison entre les dates des changements de paradigme majeurs en physique fondamentale, du rythme des innovations technologiques et de l'alternance crise/non-crise économique entre 1800 et 1960.

Or l'innovation technologique ne se fait pas par hasard, et certainement pas de manière déconnectée des grands changements de paradigme de la physique fondamentale. Les théories et connaissances fondamentales servent en fait de terrain, de base sur laquelle peuvent se développer ces innovations. Comment imaginer le laser ou les microprocesseurs sans la mécanique quantique, l'énergie nucléaire sans relativité et théorie quantique,

les moteurs électriques sans la théorie électromagnétique, etc... Sur la Figure 1, (voir aussi [3] et [4]) on constate que les grands pics d'innovation technologique sont systématiquement précédés par de grands acquis fondamentaux de physique théorique, que ces acquis apparaissent à la fin des périodes d'embellie économique, et que les innovations qui s'ensuivent dans la période de crise sont précisément celles qui permettent d'en sortir.

C'est ainsi qu'Henri Poincaré écrivait dans "La valeur de la science" [5]:

[...] une science uniquement faites en vue des applications est impossible; les vérités ne sont fécondes que si elles sont enchaînées les unes aux autres. Si l'on s'attache seulement à celles dont on attend un résultat immédiat, les anneaux intermédiaires manqueront, et il n'y aura plus de chaîne.

La question qui se pose est alors la suivante. Existe-t'il actuellement un saut théorique conceptuel qui pourrait servir de fondement aux éventuelles innovations technologiques majeures du futur.

Il est évidemment impossible d'y répondre avec certitude. La vraie nature d'une découverte authentique est précisément de résister à toutes les prospectives, et d'apparaître de manière inattendue et imprévisible.

Tout ce qui peut être fait, ce sont des propositions, ce qui est le but de la présente contribution à cet ouvrage. Mais l'impact futur réel du changement de paradigme proposé, en l'occurrence celui fourni (de manière potentielle) par la théorie de la relativité d'échelle, ne pourra clairement être jugé qu'à l'aune de ses résultats et applications.

9.2. Théorie de la relativité d'échelle

La théorie de la relativité d'échelle [6,7] est une généralisation moderne des théories de la relativité. Celles-ci se sont développées, depuis maintenant plus de quatre siècles, à partir du premier énoncé de relativité du mouvement dû à Galilée autour de 1592. Giordano Bruno, pratiquement à la même époque, découvrait quant à lui la relativité de la position comme conséquence de la révolution copernicienne. En effet, celle-ci, en invalidant l'idée que la Terre soit le centre du monde, permit de concevoir un monde sans centre ni bord, où plus aucun point n'est privilégié pour définir l'origine du système de coordonnées. Il en est de même pour l'orientation des axes de ce système, qui ne peut être définie que de manière relative (c'est-à-dire par des différences angulaires).

De même, *il n'existe aucun mouvement absolu*, autrement dit, dans le repère entraîné avec le mouvement, il n'y a aucun mouvement. Dans le *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, Galilée écrit:

Le mouvement est mouvement et agit comme mouvement pour autant qu'il est en rapport avec des choses qui en sont dépourvues. Pour toutes les choses qui y participent, [] le mouvement est comme s'il n'était pas. [] Le mouvement est comme rien.

La *relativité du mouvement* trouva un nouvel élan au début du XX^{ème} siècle avec les travaux de Poincaré et d'Einstein. Leur découverte qu'espace et temps ne pouvaient être séparés mais sont chacun des projections (l'une tridimensionnelle, l'autre unidimensionnelle) d'un même espace-temps, a révolutionné la physique. Le mouvement lui-même se ramène alors à un changement d'orientation (dans l'espace-temps), si bien que ses effets peuvent être compris comme une extension des effets, bien connus, de changement d'orientation.

Avec la compréhension de la relativité de la gravitation, une nouvelle étape essentielle est franchie par Einstein en 1915. De même qu'un observateur, entraîné dans le mouvement rectiligne uniforme d'un véhicule, ne sent pas ce mouvement, un observateur en chute libre dans un champ de gravitation (c'est-à-dire en mouvement uniformément accéléré), ne sent plus son propre poids. Autrement dit, pour lui la gravitation a disparu, il est en *apesanteur*. Ainsi la gravitation elle-même n'est pas absolue, mais relative au choix de l'état de mouvement du système de référence. C'est ce qu'Einstein a réalisé en 1907, et qui l'a amené à poser le *principe d'équivalence locale* entre un champ de gravitation et un champ d'accélération. C'est ainsi que la théorie d'Einstein est à la fois théorie de la *relativité généralisée du mouvement*, puisqu'elle s'applique aussi aux mouvements accélérés, et *théorie relativiste de la gravitation*.

Le *principe de relativité d'échelle* est une nouvelle extension du principe de relativité, appliqué cette fois non plus seulement à la position, à l'orientation et au mouvement, mais aussi aux changements d'échelle. Un tel concept s'impose également comme principe fondamental permettant de contraindre la description d'un *espace-temps non-différentiable* : on entend ici par non-différentiabilité l'impossibilité de définir une dérivée (c'est-à-dire la pente d'une courbe), donc une vitesse, au sens ordinaire, et non pas celle de différentiel, qui repose sur la continuité de l'espace-temps, propriété essentielle que l'on conserve dans cette approche.

A l'origine de cette théorie, il y a donc une généralisation de la description du continuum espace-temps. Alors que la théorie standard suppose que celui-ci est au moins deux fois différentiable, on abandonne cette hypothèse, ce qui permet de prendre en compte, en plus des espaces-temps courbes ordinaires, des espaces-temps fractals. En effet, on peut montrer qu'un espace continu mais non-différentiable *dépend explicitement de*

l'échelle de résolution à laquelle on le considère, (dépendance qui va jusqu'à la divergence quand l'échelle tend vers zéro). Autrement dit, un continuum non-différentiable se caractérise par sa *géométrie fractale*.

Ce résultat essentiel (qui est un théorème mathématique) joue un rôle fondamental dans la théorie, car il permet de construire un outil de description qui transcende la non-différentiabilité. Celle-ci a été envisagée par de nombreux mathématiciens, physiciens et philosophes des sciences comme généralisation naturelle de la description de l'espace-temps, en particulier pour tenter de fonder la théorie quantique (Riemann, Einstein, Feynman, Bachelard, Buhl, Finkelstein, ...). Mais aucune de ces tentatives n'a pu être développée, car il semblait évident qu'abandonner la différentiabilité c'était abandonner le calcul différentiel, alors que toutes les équations de la physique sont, depuis Newton et Leibniz, des équations différentielles.

Le théorème qui relie continuité et non-différentiabilité à la fractalité (en un sens très général de divergence d'échelle) permet de dépasser cette limitation apparente. En théorie de la relativité d'échelle, on considère les diverses quantités physiques comme fonction explicites de variables d'échelle internes, intrinsèques à la description, que nous avons appelé résolution (plutôt qu'"incertitudes" bien qu'elles aient un statut du même type que des barres d'erreur ou des intervalles d'incertitude). Ce choix est motivé par la signification sous-tendue par de tels concepts: on abandonne l'idée qu'on pourrait connaître un système avec un intervalle de résolution (spatial ou temporel, par exemple) nul, au profit d'une conception où toute mesure ne peut être faite qu'à intervalle de résolution finie, aussi petit soit-il. Or la non-différentiabilité est précisément une propriété qui se manifeste à la limite des intervalles d'espace et de temps tendant vers zéro. En abandonnant l'idée qu'une telle limite ait un sens, et en remplaçant la description de la limite (qui définit les dérivées au sens ordinaire) par la manière dont la grandeur considérée se conduit en tendant vers cette limite, on peut décrire des fonctions non-différentiables par des équations différentielles.

En conséquence, la description physique d'un tel espace-temps continu et non-différentiable n'implique pas pour autant l'abandon des équations différentielles, à condition que celles-ci agissent également sur les changements de résolution. Le formalisme mathématique consiste donc en un double calcul différentiel couplé, dans l'espace des échelles et dans l'espace-temps "ordinaire".

9.2.1. La première étape de la construction de la théorie consiste à établir les lois de dépendance explicite en fonction des résolutions (lois d'échelle) qui satisfont au principe de relativité. Différents niveaux de descriptions des lois

d'échelles sont alors physiquement possibles: invariance d'échelles, puis covariance d'échelle (ce qui signifie une invariance de forme des lois d'échelle), depuis l'autosimilarité la plus simple jusqu'à des lois d'échelle non linéaires (*dynamique d'échelle*). A un niveau plus profond encore, il faut inclure les couplages échelle-mouvement (dans lesquels les variables d'échelle deviennent elles-mêmes des fonctions des coordonnées) qu'on identifie aux *transformations de jauge*.

9.2.2. La deuxième étape consiste à décrire les effets induits sur la dynamique par les structures internes fractales des chemins des particules dans un espace-temps continu nondifférentiable. Ces effets transforment la mécanique classique en une mécanique de type quantique. En analogie avec la relativité générale, on décrit les chemins comme géodésiques de l'espace-temps, c'est-à-dire comme les lignes les plus courtes (qui optimisent le temps propre). En fait on n'a pas à considérer que des particules existent, qui suivraient des géodésiques et posséderaient une masse et d'autres propriétés internes, car on peut identifier ce qu'on appelle particule (qui est aussi champ et onde) et ses propriétés (masse, spin, charge...) aux géodésiques elle-même de l'espace-temps fractal et à leurs caractéristiques géométriques.

La nondifférentiabilité implique trois conséquences principales:

(1) Il existe une infinité de géodésiques là où une seule existait classiquement.

(2) Chacune de ces géodésiques est une courbe fractale (de dimension fractale 2 dans le cas de la mécanique quantique standard, mais la théorie est généralisable à d'autres dimensions).

(3) Il y a irréversibilité au niveau infinitésimal, c'est-à-dire non-invariance dans la réflexion de l'élément différentiel temporel $dt \rightarrow -dt$. La vitesse, bien que non définie au sens ordinaire, peut être redéfinie comme fonction fractale explicite de la résolution (qui diverge quand l'intervalle de résolution tend vers zéro, ce qui manifeste la non-différentiabilité). Même ainsi il y a maintenant deux définitions de la vitesse au lieu d'une (qui se transforment l'une dans l'autre par la réflexion $dt \leftrightarrow -dt$), si bien que le concept de vitesse (généralisée aux fonctions fractales) se dédouble et devient descriptible par des nombres complexes.

Ces trois effets sont alors combinés dans la construction d'une dérivée covariante, qui inclut dans l'opération de dérivation même les effets de la géométrie [6]. La covariance signifie que, en terme de cet outil, les équations de la physique vont pouvoir garder, dans la nouvelle géométrie, la forme qu'elles avaient auparavant. Dans le cas de covariance forte, réalisée ici, cette

forme des équations est la plus simple possible, celle du mouvement libre dans le vide. On écrit alors l'équation des géodésiques en fonction de cette dérivée covariante, sous forme d'une équation du mouvement inertiel (qui exprime l'annulation de la dérivée de la vitesse). Après un changement de variables qui définit la fonction d'onde comme manifestation du champ de vitesse complexe des géodésiques, cette équation s'intègre, dans le cas d'un espace fractal, sous forme d'une équation de Schrödinger [6], l'équation fondamentale de la mécanique quantique non-relativiste. Cette approche se généralise au cas d'un espace-temps fractal avec l'établissement de l'équation de Klein-Gordon (mécanique quantique relativiste). Puis la prise en compte d'autres effets plus subtils de la non-différentiabilité mène à la construction de spineurs et à la dérivation des équations de Dirac et de Pauli [8]. Les postulats de Born (la densité de probabilité est donnée par le carré du module de la fonction d'onde) et de von Neumann (réduction du paquet d'onde) peuvent également être établis dans ce cadre. Ce sont ainsi les principaux outils de la mécanique quantique ainsi que ses équations fondamentales qui sont dérivés de principe premiers dans cette théorie (alors qu'ils sont posés comme axiomes dans la théorie quantique actuelle).

9.2.3. La troisième étape correspond à un nouveau niveau de description encore plus profond, dans lequel on inclut les couplages échelle-mouvement (dans lesquels les variables d'échelle deviennent elles-mêmes des fonctions des coordonnées) qu'on identifie aux *transformations de jauge*. Des champs (du type électromagnétique, faible et fort) et leurs charges associées apparaissent dans cette construction comme manifestations de la géométrie fractale de l'espace-temps [9] (de même que la gravitation apparaît en relativité générale du mouvement comme manifestation de sa courbure).

9.3. Applications scientifiques et technologiques

La théorie de la relativité d'échelle relève aujourd'hui de la physique théorique. Un grand nombre d'étapes sont nécessaires pour passer d'une théorie fondamentale aux validations observationnelles et expérimentales, puis à une élaboration d'expériences de physique en d'éventuelles nouvelles technologies. Plusieurs de ces étapes ont déjà été franchies dans certains domaines, tels l'astrophysique [10-14], la cosmologie [15], et les sciences de la vie [4, 16-20], où de nombreuses propositions de mises à l'épreuve observationnelles de la théorie ont été proposées, avec des résultats positifs [7]. Donnons en quelques exemples (non exhaustifs).

9.3.1. Exemples de validation observationnelle

Dans le domaine de l'astrophysique, la théorie a été tout particulièrement appliquée à la formation et à l'évolution de structures gravitationnelles. C'est ainsi qu'elle a permis, dès le début des années 90, de rendre compte de nombreuses structures inconnues de notre système solaire, et de prévoir théoriquement l'existence de structures non encore observées, aussi bien pour notre système (en particulier dans les régions intramercurielles et transplutoniennes) que pour les systèmes planétaires extrasolaires (qui n'avaient pas encore été découverts à l'époque).

Cette prédiction résulte d'une description de la formation des planètes dans un disque protoplanétaire qui tient compte des interactions des protoplanètes avec les autres objets du disque. Ces interactions impliquent, sur les échelles de temps grandes devant le temps de libre parcours moyen, que les trajectoires deviennent fractales, imprédictibles et irréversibles. On peut alors montrer que ces trois conditions transforment les équations de la dynamique en une équation de type Schrödinger. Les solutions de cette équation dans un potentiel képlérien montrent alors des pics de probabilité pour certaines valeurs des demi-grands axes et des excentricités. Autrement dit, les différentes orbites planétaires ne sont plus équivalentes, certaines sont plus probables que d'autres. On s'attend ainsi à trouver de la matière (astéroïdes, petits corps, petites planètes, planètes naines ou planètes) de manière préférentielle pour des demi-grands axes $a_n = (GM/w_0)n^2$, ce qui correspond à des vitesses caractéristiques $v_n = w_0/n$, où w_0 est une constante pour un sous-système planétaire donné et M est la masse de l'étoile.

Il suffit de calculer les vitesses des planètes du système solaire interne (planètes telluriques) pour vérifier que cette prédiction théorique est vérifiée [12]. Ces vitesses sont effectivement données par ≈ 48 km/s pour Mercure ($n = 3$), ≈ 36 km/s pour Venus ($n = 4$), ≈ 29 km/s pour la Terre ($n = 5$), ≈ 24 km/s pour Mars ($n = 6$), ce qui correspond bien à $v_n = w_0/n$ km/s, avec $w_0 = 144.3 \pm 1.2$ km/s.

Cette loi s'étend jusqu'à la ceinture d'astéroïdes, où les principaux pics (en masse) correspondent à $n = 7$ à 10 (après correction pour les résonances avec Jupiter, qui vident certaines zones). On notera que Mercure n'est pas la première planète du système solaire dans ce cadre de description, mais la troisième. Deux orbitales intramercurielles sont donc prévues, l'une à ≈ 0.17 UA ($n = 2$) et l'autre à ≈ 0.043 UA du Soleil ($n = 1$) [l'unité astronomique, UA, est la distance Soleil-Terre]. La quantité de masse disponible dans ces zones

(et prévue par la théorie) et les conditions de proximité avec le Soleil ne permettent pas l'existence de planètes. Mais des poussières peuvent s'agglomérer de manière transitoire à 0.043 UA, ce que plusieurs observations lors d'éclipses ont confirmées. Quand à la zone autour de 0.17 UA, il n'est pas exclu qu'un anneau d'astéroïdes y soit présent, comme l'indique certains arguments dynamiques [14].

Mais la théorie permet d'aller plus loin. Un de ses résultats essentiels est la formation de structures hiérarchiques. C'est ainsi que l'ensemble du système solaire interne correspond à une fragmentation de l'orbitale $n = 1$ du système externe. Ceci permet de construire un modèle pour la distribution des masses des planètes et d'identifier la Terre, qui a la plus grande masse, au pic de probabilité du système interne, donc de prédire une quantification du système externe en w_{ex}/n , où $w_{\text{ex}} = w_0/5 = 28.8 \text{ km/s}$. On rend ainsi compte des positions de Jupiter ($n_e = 2$), Saturne ($n_e = 3$), Uranus ($n_e = 4$), Neptune ($n_e = 5$), ainsi que Pluton ($n_e = 6$), ce qui a été plus récemment confirmé par objets plutoniens de la ceinture de Kuiper.

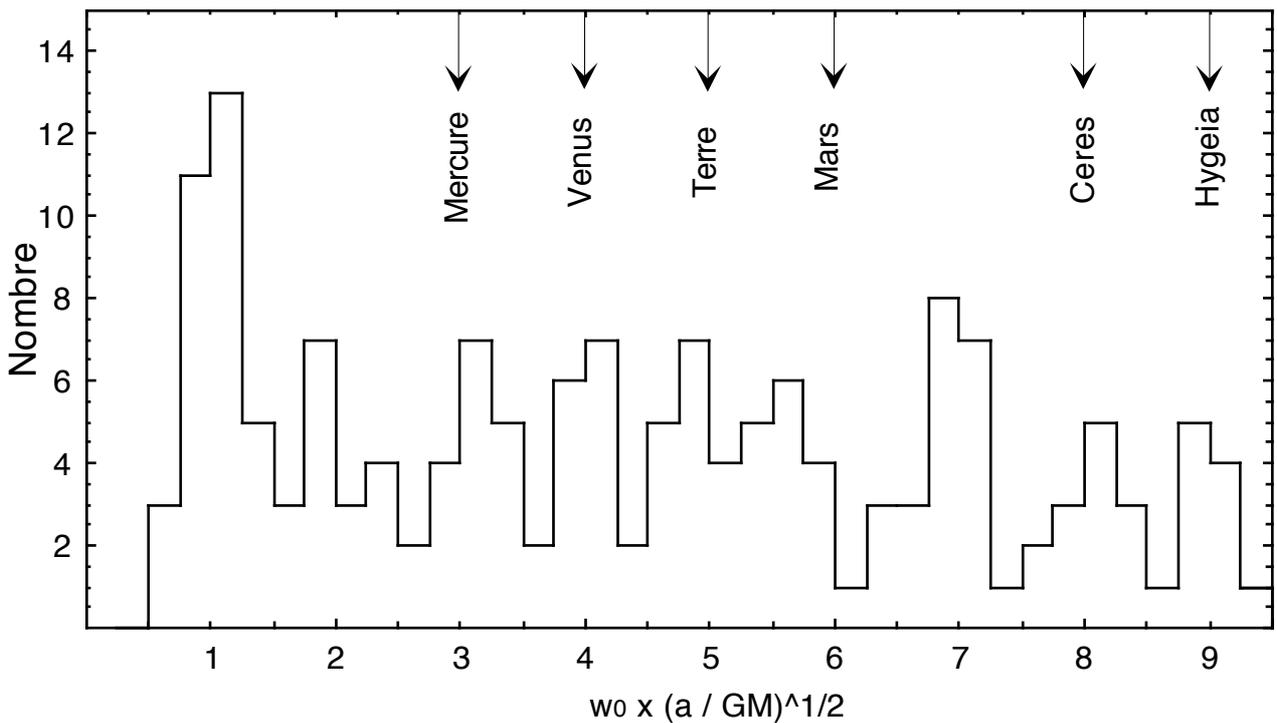


Figure 2. Distribution observée des demi-grands axes a des orbites des exoplanètes, normalisés à la masse de leur étoile M . La théorie prévoit des pics de probabilité pour des valeurs entières de $w_0 \sqrt{a/GM}$, où $w_0 \approx 144 \text{ km/s}$. On compare ces pics aux positions observées des planètes du système solaire interne et des objets principaux de la ceinture d'astéroïdes entre Mars et Jupiter.

La théorie a également pu prédire des pics de probabilité plus lointains, à 57 UA en ($n_e = 7$), 70 UA en ($n_e = 8$), etc... [6] La découverte, depuis le milieu

des années 90, de nombreux objets de la ceinture de Kuiper a validé cette prédiction théorique [14], en particulier celles de planètes naines plus massives que Pluton qui ont conduit à un changement de nomenclature: il en est ainsi de la planète Eris, qui se situe précisément dans le pic prévu pour ($n_e = 8$), à 68 UA. De plus, on peut prévoir un nouveau niveau hiérarchique dont le pic à 57 AU serait le fondamental. Les niveaux "excités" estimés sont alors à 228 UA, 513 UA, 912 UA, 1425 UA, etc... cette prédiction théorique a à nouveau été validée par la découverte récente de trois objets autour de 228 UA et deux autour de 513 UA, dont la planète naine Sedna, qui est la plus lointaine connue actuellement du système solaire.

Mais il y a mieux, car depuis 1995 (donc plusieurs années après la prédiction théorique) un grand nombre de systèmes planétaires extrasolaires ont été découverts (plus de 200 exoplanètes sont aujourd'hui connues), ce qui permet d'éprouver la théorie [10,13,14]. C'est ainsi qu'un grand nombre d'exoplanètes (plus de 30 actuellement) ont été découvertes précisément dans le pic de probabilité du niveau fondamental à 0.043 UA/Msol, et que les autres se sont accumulées dans les autres pics, en accord avec les planètes du système solaire interne (voir figure 2). La probabilité d'obtenir par hasard un tel accord est inférieure à 1/10000. Il y a donc une universalité de structure des systèmes planétaires, comme prédit par la théorie de la relativité d'échelle [6].

9.3.2. Application futures à de nouvelles technologies

Par contre, bien qu'un certain nombre de propositions de validations expérimentales au laboratoire aient déjà pu être faites, les expériences effectives n'en sont qu'à leur début .

C'est pourquoi ce qui suit va relever essentiellement de l'anticipation scientifique et technique. Mais il ne s'agit pas de simple spéculation. Il s'agit en effet ici de la proposition de mise en oeuvre technique de lois fondamentales qui sont déjà posées au niveau théorique : la question ouverte est donc celle de notre capacité de construction effective de dispositifs mettant en oeuvre ces lois (qui peut dépendre aussi d'autres progrès concernant nouveaux matériaux, capacités d'action à des échelles microscopiques via les nanotechnologies, etc...).

9.3.2.1. Un premier ensemble d'outils théoriques assez directement applicable est celui des lois d'échelle, en particulier dans des domaines tels qu'optimisation, contrôle ou commande. Les lois d'échelle du type critiques,

dans lesquelles un temps ou une distance butoir sont insérés dans la loi même sont particulièrement adaptées à l'analyse de phénomènes entrant dans des périodes de crise ou en sortant. Il en est ainsi des lois d'évolution temporelle du type $|T-T_c|^\gamma$, et des corrections log-périodiques à ces lois, qui ont l'avantage de contenir dans leur description même la propre fin du système. Un exemple en est donné Figure 3, appliqué à un problème qui est aujourd'hui considéré comme majeur, celui du réchauffement climatique. C'est ainsi que la date estimée par les modèles linéaires de la disparition de la banquise arctique est de 2080-2100. Mais un ajustement par une loi critique donne une valeur beaucoup plus rapprochée, $T_c = 2030$ (sans prendre en compte la diminution d'épaisseur, mal connue mais estimée à 15% par décennie, qui pourrait encore rapprocher cette date !).

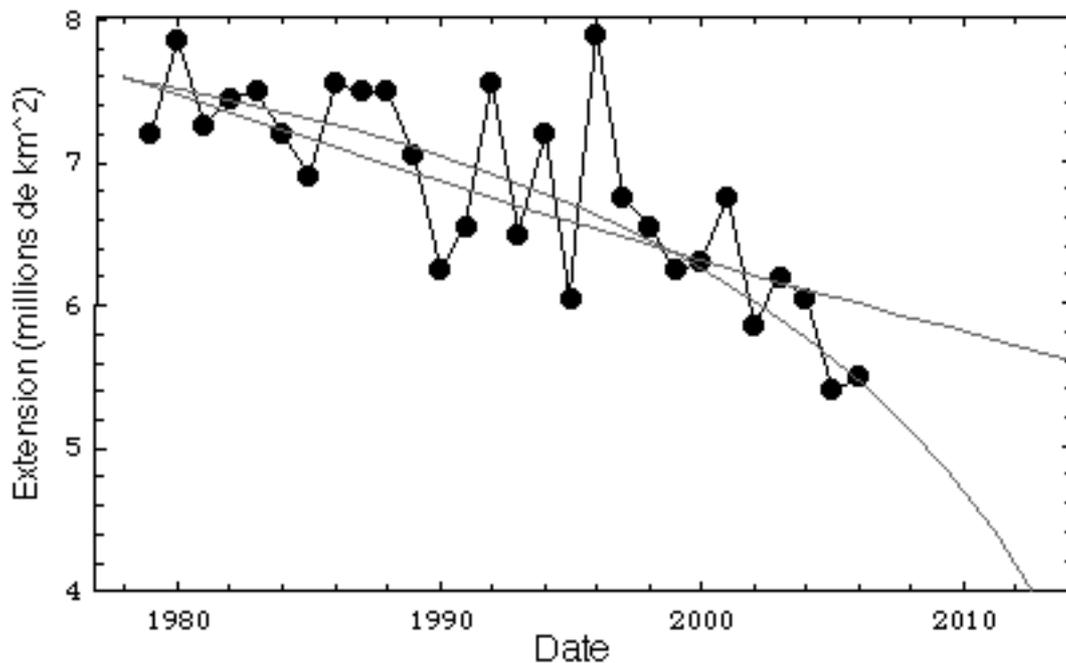


Figure 3. Ajustement de l'extension observée (au 30 Septembre de chaque année) des glaces de la banquise arctique, par un modèle de fonte à taux constant (8 % par décennie) et par un modèle critique en $|T-T_c|^\gamma$. On trouve dans ce deuxième cas une valeur $T_c = 2030$ pour l'époque de disparition totale de la banquise à la fin de l'été.

Un autre exemple est l'application de ce type de lois à la prédiction de tremblements de terre par l'ajustement de données observées telles des concentrations d'ion [21], éventuellement en incluant des fluctuations log-périodiques qui améliorent grandement la prédiction du temps critique [22]. A une autre échelle d'analyse, on peut ajuster par une loi de probabilité log-périodique la distribution du nombre de tremblements de terre dans un région donnée. Appliquée aux tremblements de terre de Californie, cette

méthode a montré que leur taux fluctue de manière importante suivant une décélération log-périodique de date critique $T_c \approx 1800$ et de rapport d'échelle ≈ 1.3 . On peut alors prévoir un prochain pic de probabilité autour de 2050 [23].

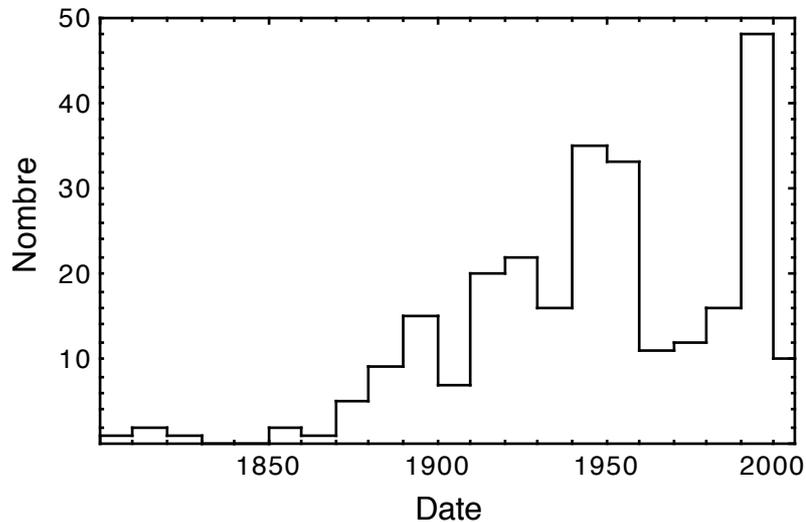


Figure 4. Distribution des dates de tremblements de terre de magnitude supérieure à 5 en Californie du Sud. Un modèle de décélération log-périodique ajusté à ces dates prédit des pics de probabilité en 1855, 1873, 1895, 1922, 1955, 1996, 2047, 2110, etc...

C'est, plus généralement, un vaste ensemble de systèmes qui peuvent être modélisés par ces méthodes: ceux qui sont caractérisés par une structure arborescente, temporelle et/ou spatiale, organisée sous forme de réseau hiérarchisé. Du point de vue de la recherche fondamentale, elles ont été utilisées pour modéliser l'arbre de l'évolution des espèces [4,16], l'évolution économique des sociétés [4], ainsi que le développement humain (embryogenèse et développement de l'enfant) [18]. De nombreuses applications en physiologie et médecines sont envisageables, étant donné la généralité de l'existence de tels réseaux hiérarchiques dans les organismes vivants (systèmes nerveux, circulatoire, respiratoire, etc...) ainsi que dans les sociétés animales. Mais les applications industrielles potentielles sont également nombreuses, en ce qui concerne la prédictibilité et l'optimisation de réseaux hiérarchisés tels les réseaux électriques, hydrologiques, de communication, de transport, etc...

9.3.2.2. Un deuxième ensemble d'applications concerne la théorie quasi-quantique macroscopique. Il s'agit là aussi d'un champ très vaste d'applications à de nouvelles technologies, envisageables dans un futur relativement proche. Plusieurs manières de mettre en oeuvre les effets prédits par cette théorie peuvent être considérées.

L'une est la réalisation d'un milieu fractal simulant un espace fractal. Les objets inclus dans un tel milieu, s'il est fractal sur une gamme d'échelles suffisante (on estime à environ 10^5 le rapport minimal nécessaire entre échelle minimale et maximale) devraient acquérir des propriétés de type quantique macroscopique (différents de ceux connus actuellement, qui restent fondés sur la constante de Planck). La physique a déjà connu des aller-retours de ce type entre physique des matériaux et théorie fondamentale. C'est ainsi que la théorie du champ électrofaible de Salam, Weinberg et Glashow a été conçue en analogie avec les propriétés des matériaux supraconducteurs. Inversement, des propriétés de l'espace-temps, milieu universel, pourraient être simulées localement et partiellement par celles de matériaux.

Une autre possibilité consiste à identifier des systèmes naturels terrestres qui mettent déjà en oeuvre spontanément le type de comportement recherché. Comme nous l'avons rappelé plus haut, un grand nombre de systèmes astronomiques, du fait des grandes gammes d'échelles impliquées dans ce domaine, ont déjà révélé des propriétés de ce type, la plus petite échelle concernée étant celle de la distribution des débris spatiaux autour de la Terre [14]. A l'échelle terrestre, nous avons proposé que certains des aspects des systèmes vivants relèvent d'une telle théorie [4,6,7,19,20], ce qui pourrait mener à possibilités nouvelles de compréhension et d'action, en particulier thérapeutique. D'autres domaines d'application potentielle sont ceux de l'atmosphère aux grandes échelles, spatiales ($>100-1000$ m) et temporelles ($\gg 7$ jours), ce qui pourrait mener à une nouvelle forme de prévision (probabiliste) de l'évolution climatique, la géophysique interne, dans les cas de fractalité du milieu sur de large gammes d'échelle, et plus généralement tous les milieux qui pourraient réaliser une bonne approximation des trois conditions qui sous-tendent la transformation de l'équation de la dynamique en équation de Schrödinger.

Dans tous les cas, l'intérêt d'une telle approche serait de bénéficier de la spécificité des propriétés de type quantique, qui diffèrent fortement de celles des systèmes classiques: structuration, stabilisation, auto-organisation, confinement, duplication spontanée par changement d'énergie, non-dissipation, cohérence, etc... Certaines de ces propriétés, qui se rencontrent aux très petites échelles dans l'organisation des atomes, se retrouvent dans quelques effets quantiques macroscopiques tels la supraconductivité et la superfluidité. Mais ils restent réservés aux très basses températures, qui permettent d'augmenter l'échelle de transition quantique -classique donnée par l'échelle de de Broglie thermique, inversement proportionnelle à la racine carrée de la température, car la constante organisatrice (celle de Planck)

reste microscopique. Par contre, si l'on réussit à manier et /ou à détecter des effets quasi-quantiques fondés sur une constante elle-même macroscopique, comme la théorie de la relativité d'échelle l'envisage, de tels milieux pourraient, aux très grandes échelles, réaliser (au moins partiellement) une nouvelle forme de supraconductivité ou de superfluidité macroscopique. C'est alors tout une gamme nouvelle de technologies du futur qui deviendront possibles.

9.3.2.3. Un dernier ensemble d'applications concerne la théorie des champs.

Aujourd'hui les expériences de physique des particules se font à résolution constante (donc à énergie donnée). A une autre énergie, c'est une autre expérience qui est faite. Du point de vue de l'approche relativiste d'échelle, cela correspond à un comportement d'"inertie d'échelle". Or la théorie prévoit un régime de "dynamique d'échelle", en analogie avec la dynamique du mouvement impliquant forces et accélérations. Le rôle des "accélérations d'échelles" (qui correspondent à des dimensions fractales variables) pourraient se révéler essentiel, dans le cadre d'un principe d'équivalence généralisé où les propriétés d'échelle d'un champ seraient localement équivalentes à des changements d'échelle non-linéaires (i.e., deviendraient de nature purement géométrique et liée à des changements de repères généralisés). La théorie de la relativité générale et le principe d'équivalence d'Einstein permettent la disparition locale du champ de gravitation ou l'apparition d'une "gravité artificielle" par le choix d'un système de coordonnées accéléré. De même on peut considérer deux possibilités d'expériences nouvelles impliquant des champs du type électromagnétique, faible ou fort pouvant mener à terme à de nouvelles technologies:

*disparition locale (totale ou partielle) d'un champ par changement de repère d'échelle (en analogie avec la disparition du champ de gravitation dans le repère accéléré en chute libre);

*apparition locale d'un champ par un changement inverse (en analogie avec l'apparition d'une "gravité artificielle" dans un vaisseau uniformément accéléré).

Un exemple simple de l'apparition d'une accélération, donc d'un champ apparent, par simple changement local de repère d'échelle, concerne la conception d'un tapis roulant accélérateur par expansion différentielle. La combinaison d'un mouvement régulier et d'une expansion différentielle locale donne une accélération (à l'entrée du tapis roulant), alors qu'avec une contraction différentielle locale on obtient un freinage (à la sortie).

La simulation de champs de jauge artificiels mènerait à reproduire des

propriétés du type de celle de l'électromagnétisme, mais sans être contraint par les valeurs quantifiées et invariables des charges telles qu'on les connaît actuellement. Celle de champs de jauge du type de l'interaction forte (non-abélien) bénéficierait des propriétés de confinement naturel d'un tel champ, qui pourraient être exploitées, par exemple, dans le domaine du stockage d'énergie.

Plus radicales encore seraient les applications éventuelles de l'approche relativiste d'échelle du problème des masses et des charges. Depuis Mach et Einstein, on sait qu'il n'y a pas de masse absolue, seuls existent des rapports de masse. Cette relativité de l'inertie, qui est ainsi en fait une relativité d'échelle, est ce qu'Einstein a appelé 'principe de Mach'. Toute masse est ainsi définie par rapport à une énergie de référence. Les masses des particules élémentaires semblent "absolues", mais elles sont en fait définies par rapport à l'énergie du vide quantique, qui est l'état d'énergie minimum d'un champ, qui est en fait différente de zéro.

Or la théorie quantique des champs a été amenée, dans les années 60, à postuler l'existence d'un champ particulier, le champ de Higgs, dont les propriétés particulières permettent précisément de générer des masses (en particulier des bosons faibles Z et W et du boson de Higgs lui-même). Jusqu'à maintenant, on considère ce champ comme séparé du champ électrofaible, et il est activement recherché. On peut néanmoins envisager [24] qu'il soit en fait une partie du champ total, qui apparaît comme séparé du fait d'une brisure de symétrie spontanée (ce qui permet de donner une prédiction théorique de sa masse). S'il en est ainsi, on peut envisager une technologie future d'induction électrofaible. Ce serait l'équivalent de ce que fut l'induction électromagnétique, qui permet de fabriquer un champ magnétique à partir du mouvement d'un champ électrique, et qui est à l'origine d'une grande part des technologies utilisant l'électromagnétisme. Mais dans ce cas, on pourrait par changement de repère (incluant les changements d'échelle) changer les propriétés du champ de Higgs lui-même, et donc changer les points de référence des masses, ce qui changerait les masses (apparentes) elles-mêmes. De plus, l'existence de relations entre masses et charges peut être proposée [25], si bien qu'un tel changement du vide pourrait affecter les charges aussi. Mais un changement, par exemple, de la masse et de la charge de l'électron et du proton dans une éventuelle expérience future de ce type changerait le rayon de Bohr de atomes, donc leur taille caractéristique, et par extension celle de tous les objets macroscopiques formés de tels atomes...

Une autre application prospective de notre éventuelle capacité future de

changer l'énergie du vide concerne la lévitation. On sait que celle-ci peut être réalisée en compensant le champ gravitationnel par un champ magnétique. Mais une lévitation purement gravitationnelle peut aussi être envisagée. En effet, la gravitation einsteinienne, contrairement à la gravitation newtonienne qui n'est qu'attractive, comporte une composante répulsive liée à la constante cosmologique. Cette composante, extrêmement faible à nos échelles, s'est récemment révélée dominante aux échelles cosmologiques, en accord précis avec une prédiction théorique de la relativité d'échelle faite il y a 15 ans [6] : la prédiction est de $\Omega_\Lambda h^2 \text{ (pred)} = 0.38874 \pm 0.00011$, en bon accord avec la valeur mesurée $\Omega_\Lambda h^2 \text{ (obs)} = 0.405 \pm 0.031$. Mais il se trouve que cet effet de la gravitation einsteinienne est équivalent à une densité d'énergie du vide et à la pression négative qu'elle implique (qui est la source de la répulsion). Si l'on envisage une future technologie du vide quantique qui permettrait d'augmenter, dans une enceinte, la densité effective d'énergie du vide (dont la valeur naturelle varie comme $1/r^4$, où r est la taille de l'enceinte, et est donc extrêmement petite), celle-ci pourrait permettre de compenser localement l'attraction gravitationnelle et de réaliser une apesanteur dans un repère au repos par rapport à la Terre.

Concluons pour finir sur une dernière application potentielle de l'approche géométrique des champs de jauge en relativité d'échelle. On sait qu'en théorie de la relativité générale d'Einstein, le champ gravitationnel est compris plus profondément comme manifestation de la courbure de l'espace-temps. L'énergie potentielle gravitationnelle est donc décrite comme une énergie purement géométrique, stockée dans la courbure. Or l'interprétation géométrique des champs électromagnétique, faible et fort en relativité d'échelle est tout à fait du même type. On y décrit ces champs comme manifestation de la fractalité de l'espace-temps [9], ce qui signifie que leur énergie potentielle est stockée dans sa structure fractale multiéchelle. Mais comme la fractalité est une sorte d'hypercourbure, les effets d'un tel repliement de l'espace sont énormément plus grands que ceux de la simple courbure. C'est ainsi que la force électrique entre deux électrons est 10^{44} fois supérieure à leur attraction gravitationnelle.

On pourrait alors envisager de fabriquer un milieu fractal simulant les propriétés d'un tel espace-temps, ce qui permettrait de stocker dans sa structure géométrique même de grandes quantités d'énergie, réalisant ainsi des batteries géométriques...

Références

- [1] Penrose, R., 2007, *The road to reality* (Vintage books)
- [2] Smolin, L., 2006, *The trouble with Physics* (Houghton Mifflin Company)
- [3] Grou, P., 1987, *L'aventure économique* (L'Harmattan).
- [4] Nottale, L., Chaline, J., & Grou, P., 2000, "Les arbres de l'évolution: Univers, Vie, Sociétés", Hachette, 379 pp.
- [5] Poincaré, H., in "La valeur de la science", cité dans *Reflets de la physique*, Bulletin de la Société Française de Physique, Mars 2007, n°3, p.29.
- [6] Nottale, L., 1993, "Fractal Space-Time and Microphysics: Towards a Theory of Scale Relativity" (World Scientific).
- [7] Nottale, L., 1998, "La Relativité dans tous ses Etats : Au delà de l'Espace-Temps", Hachette, collection "Sciences", 319 pp, réédité (Pluriel, 2000).
- [8] Célérier, M.-N. & Nottale, L., 2004, *J. Phys. A*, 37, 931-955 (arXiv: quant-ph/0609161)
- [9] Nottale L., Célérier M.N., Lehner T., 2006, *J. Math. Phys.* 47, 032303 (arXiv: hep-th/0605280)
- [10] Nottale, L., 1996, *Astron. Astrophys. Lett.* 315, L9
- [11] Nottale, L., 1997, *Astron. Astrophys.*, 327, 867
- [12] Nottale, L., Schumacher, G., Gay, J., 1997, *Astron. Astrophys.*, 322, 1018
- [13] Nottale, L., Schumacher, G., & Lefèvre, E.T., 2000, *Astron. Astrophys.*, 361, 379
<http://luth2.obspm.fr/~luthier/nottale/arA&A361.pdf>
- [14] Da Rocha D. & Nottale, L., 2003, *Chaos, Solitons and Fractals*, 16, 565 (arXiv: astro-ph/0310036)
- [15] Nottale, L., 2003, *Chaos, Solitons and Fractals*, 16, 539
<http://luth2.obspm.fr/~luthier/nottale/arScRCosmo.pdf>
- [16] Chaline, J., Nottale, L., Grou, P., 1999, *C.R. Acad. Sci. Paris*, 328, IIa, 717. Réimprimé dans: "Points sur... Sciences de la Terre IX: évolution", (Académie des Sciences, Elsevier 2001)
<http://luth2.obspm.fr/~luthier/nottale/arCNGcra.pdf>
- [17] Nottale, L., Chaline, J., & Grou, P., 2001, in *Fractals in Biology and Medicine*, Vol III, Proceedings of Fractal 2000 Third International Symposium, Ascona, Suisse, 8-11 Mars 2000, Eds. G. Losa, D. Merlini, T. Nonnenmacher and E. Weibel, Birckhäuser Verlag, p. 247.
<http://luth2.obspm.fr/~luthier/nottale/arbiomed.pdf>
- [18] Cash R., Chaline, J., Nottale, L., Grou, P., 2002, *Comptes Rendus Acad. Sci. Biologies* 325, 585-590
"Développement humain et loi log-périodique".
<http://luth2.obspm.fr/~luthier/nottale/arcash.pdf>
- [19] Auffray C., Nottale L., 2007, *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, soumis pour publication

- [20] Nottale L., Auffray C., 2007, *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, soumis pour publication
- [21] Allègre, C., LeMouel, L., Provost, A., 1982, *Nature* 297, 47
- [22] Sornette D, Sammis C., 1995, *Journal of Physics (France)* 5, 607
- [23] Nottale L., Héliodore F., Dubois J., en préparation
- [24] Nottale, L., 2001, in *Frontiers of Fundamental Physics, Proceedings of Birla Science Center Fourth International Symposium, 11-13 dec. 2000, Hyderabad, India*, Eds. B.G. Sidharth and M.V. Altaisky, (Kluwer Academic), p. 65
<http://luth2.obspm.fr/~luthier/nottale/arBirla00.pdf>
- [25] Nottale, L., 1996, *Chaos, Solitons and Fractals*, 7, 877-938
<http://luth2.obspm.fr/~luthier/nottale/arRevFST.pdf>