

Modèle unitaire de l'interaction en physique: bilan et perspectives

ANDRÉ HAUTOT (*)

SUMMARY. - The first part of this introductory paper reviews the history of physics in its quest of a unitary theory of interaction. It is shown that the current state of physics is a superposition of disjoint models and that, consequently, the probability of reaching the goal of a grand unification is very low. The question is therefore open of the need, and of the possibility, of revisiting our fundamental concepts about interaction at every levels: gravitation, electromagnetism, atomic and nuclear binding. The second part precisely indicates, on the concrete exemple of the two-body interaction, that Newton could perfectly have been able to justify Kepler's laws on the ground of a recursive model which makes no use of the notions of force and potential. It is also shown that the same methodology might be applied to the other types of interaction so that the consequences seem promising at least on the theoretical ground. It will however be settled that the new model is not destined to provide a more straightforward way of calculating the trajectories but to let us gain a better understanding of what interaction really is. The complete theoretical developments together with the mathematics which underlines the model will be presented and detailed in subsequent papers written in english.

I. Bilan: Les modèles en sciences: contraintes et limites.

I.1. L'art et la science.

C'est un des privilèges de l'art de ne connaître aucune contrainte: l'artiste est libre de créer au gré de sa fantaisie. Son œuvre peut plaire, intéresser, provoquer ou stimuler l'imagination, elle n'a de comptes à rendre à personne et pas davantage de dogme à satisfaire. Quand Magritte peint un homme faisant face à un miroir qui lui renvoie son image vue de dos, personne n'y trouve à redire. A ce compte, le nombre des créations artistiques virtuellement concevables est pratiquement infini. Les spécialistes des sciences dites molles jouissent, l'expérience le prouve, d'un privilège similaire quoique muselé par le bon sens. Il est en effet fréquent qu'on y

(*) Université de Liège, Institut de Physique, Sart Tilman par B4000 Liège (Belgique) (email: ahautot@ulg.ac.be)

défende, à quelques années de distance, des thèses radicalement incompatibles que ce soit sur les bienfaits d'une éducation dirigiste ou laxiste ou, dans le domaine socio-économique, sur les vertus de l'avancement ou du report de la retraite des masses actives etc..., on peut multiplier les exemples à l'infini. Au fond, leurs modèles ne connaissent aucune contrainte a priori. Ce n'est qu'a posteriori que, confrontés à l'éventuelle sanction des faits, ils subissent les corrections qui s'imposent. Il ne faut voir nulle moquerie dans ce constat car, malgré leurs manques, ces disciplines sont seules capables de rencontrer les problèmes de société que nous ne cessons de vivre. Simplement, il nous semble, que par leur démarche elles sont plus proches de l'art que de la science. La situation des spécialistes des sciences exactes est bien moins confortable dans la mesure où l'on attend d'eux qu'ils décrivent correctement le monde tel qu'il est et non tel qu'ils aimeraient qu'il soit.

1.2. La situation particulière de la mathématique.

La mathématique est la seule science qui jouit d'un statut particulier dans la mesure où elle ne connaît que les contraintes d'ordre logique. Tout mathématicien est libre de définir les êtres de son choix, auxquels il prête quelques propriétés de base, non contradictoires, qui constituent le cadre axiomatique de sa théorie. Il ne lui reste plus qu'à étudier les propriétés de l'univers clos qu'il s'est ainsi défini. Pourvu qu'il ne commette aucune entorse à la logique, il n'a de compte à rendre à personne. Nul ne le chicanera jamais quant à l'intérêt que présente son travail car l'histoire est riche d'exemples où un modèle qui paraissait futile a fini par trouver des applications inattendues. Qu'on songe à la factorisation de nombres de quelques centaines de chiffres décimaux qui est maintenant à la base des systèmes cryptographiques les plus sûrs. Tout mathématicien est libre de modifier, de façon non contradictoire, les axiomes précédents afin d'en tirer les conséquences logiques d'une nouvelle théorie qui aura peut-être des applications dans d'autres domaines. Les géométries non euclidiennes sont l'exemple classique. Somme toute, les mathématiciens ne connaîtront jamais le chômage intellectuel car le champ de leur prospection est virtuellement infini, comme celui des artistes dont ils se sentent d'ailleurs proches. Ce privilège que la mathématique détient dans le domaine des sciences exactes a d'ailleurs un prix qu'il faut connaître: c'est que le mathématicien passe sa vie à démontrer des tautologies. Une machine, totalement dépourvue d'intelligence, mais programmée pour enchaîner systématiquement les raisonnements logiques à partir des assertions de base ne feraient pas moins bien. Au fond, si l'on y réfléchit, c'est, paradoxalement, le caractère limité de l'intelligence humaine qui fait le prix de la mathématique. Personne ne songerait consacrer sa vie à démontrer des évidences et

c'est pourtant ce que font les mathématiciens. C'est uniquement parce que notre intelligence est limitée que toutes les tautologies ne nous apparaissent pas immédiatement évidentes et c'est pourquoi les études de mathématique resteront à jamais indispensables: elles servent tout simplement à accroître progressivement notre sphère d'évidences.

1.3. Les contraintes qui pèsent sur la physique.

La physique, qui va nous occuper désormais, connaît des contraintes considérablement plus grandes. En effet, aux contraintes logiques, qui subsistent évidemment, viennent se superposer les contraintes qui résultent de la confrontation de la théorie avec la réalité expérimentale. Alors que le mathématicien dispose d'une grande liberté dans le choix des axiomes de base, le physicien est confronté à la tâche écrasante de découvrir quels sont les prémices de la théorie qui décrit notre univers et qui en prédit correctement l'évolution temporelle. Aujourd'hui l'objectif d'une théorie unitaire qui expliquerait tout est encore bien loin d'être atteint et ce n'est pas l'histoire du développement de la physique qui peut nous rassurer à ce sujet. Durant quatre siècles d'expérimentation véritable, on peut distinguer trois époques dans le développement de la physique:

- La physique classique à laquelle restent attachés quelques grands noms, tels Newton et Maxwell, achève son développement vers 1900. Elle a abordé un vaste ensemble de problèmes qui se posent à l'échelle humaine, voire du système solaire (mécanique, gravitation, électromagnétisme, thermodynamique et optique). Des concepts ont été dégagés et pour ainsi dire mis sur piédestal: la force, l'énergie, les champs gravifique ou électromagnétique. Le calcul infinitésimal a été reconnu comme l'outil mathématique de choix.
- Entre 1900 et 1935 se développe, au cours de trois décennies véritablement exceptionnelles, la physique dite moderne. Elle est l'oeuvre de Planck, Einstein, de Broglie, Schrödinger, C'est l'éclosion des théories de la relativité et de la mécanique quantique qui viennent se substituer à une physique classique impuissante, contre toute attente de l'époque, à aborder correctement les problèmes cosmologiques et atomiques. Assez curieusement, le calcul infinitésimal est resté l'outil mathématique de référence même en physique quantique.
- Depuis 1935, se construit la physique contemporaine qui s'est particulièrement intéressée à deux domaines distincts. Le premier concerne la structure des particules élémentaires où il apparaît que les expérimentateurs, qui disposent il est vrai de budgets colossaux pour mener à bien des expériences coûteuses, ont une longueur d'avance sur les théoriciens. L'autre, connue sous le nom de chaos déterministe, a

consisté en un retour aussi inattendu que fécond vers la physique classique qui démontre que l'on avait mal perçu la signification du déterminisme en science.

Contrairement à ce que l'on aurait pu légitimement espérer, toutes ces théories modernes qui sont venues modifier le paysage de la physique classique, n'ont en rien contribué à une quelconque unification de la physique théorique. Chacune s'est contentée, dans son domaine, d'approximer mieux la réalité physique que ce soit aux grandes vitesses ou aux très petites dimensions. Gravitation, électromagnétisme, théorie atomique et interaction nucléaire ont été, de ce fait modélisées de façon disparate. En un mot la théorie unitaire espérée est restée largement hors d'atteinte. Cette difficulté trouve sans doute son origine dans le fait que l'on est parti de modèles qui fonctionnaient à l'échelle du laboratoire et du système solaire et qu'on a tenté de les généraliser aux moindres frais, en particulier en conservant les concepts de force, d'énergie, de potentiel et de champ qui avaient fait fortune en physique classique. Cette démarche peut paraître naturelle mais elle n'est que pragmatique et cela ne garantit nullement qu'elle soit judicieuse. S'il existe quelque part dans l'univers quelques extraterrestres en train de faire de la physique, rien ne prouve qu'ils auront fatalement abordé le problème comme nous. A vrai dire ce serait plutôt surprenant comme il serait étonnant qu'on retrouve dans leurs manuels de physique l'écho fidèle de toutes ces grandeurs déjà citées que nous considérons pourtant comme fondamentales. Dès lors, il paraît intéressant de revisiter l'histoire de l'évolution du modèle newtonien, qui le premier obtint droit de cité, afin de déceler dans quelle mesure on pourrait imaginer une approche complètement différente.

1.4. La genèse du modèle newtonien.

Mais tout d'abord, pourquoi la mécanique classique a-t-elle fini par épouser la forme que nous lui connaissons? Reportons-nous près de quatre cents ans en arrière, à l'époque de Képler. Celui-ci disposait de tables de données qui reprenaient de manière ordonnée la position des planètes dans le ciel et il accepta l'idée Copernicienne de lire ces positions par rapport au soleil. Il finit par trouver qu'elles étaient bien représentées par des ellipses dont le soleil occupe un des foyers. Tout cela n'était encore qu'une description simple et commode du mouvement des planètes c'est-à-dire de la cinématique. L'étape suivante fut franchie par Newton qui s'aperçut qu'une manière de justifier ce type de mouvement consistait à poser, arbitrairement à ce stade, qu'il doit exister des forces dans la nature qui sont responsables des mouvements observés et de proposer les lois de la dynamique qui portent son nom. Si les forces sont l'élément moteur de l'uni-

vers, il faut en compensation un élément résistant. Newton reconnut que c'est la masse des corps qui joue ce rôle. Il est essentiel que nous rappellions comment le concept de force a fait son apparition en physique. En effet cette notion, dont il n'est pas question de contester la fécondité, a cependant et peut-être abusivement, orienté tout le champ des recherches ultérieures. En fait, Newton n'a jamais pris la peine de définir précisément ni la masse ni la force. Il considérait que ces grandeurs étaient suffisamment intuitives, basée sur les notions de quantité de matière et d'effort musculaire, pour être dispensé de les définir plus soigneusement. Nous n'en sommes plus là aujourd'hui et la façon la plus simple de procéder, qui évite tout cercle vicieux, consiste à partir de ce fait expérimental que lorsque deux corps quasi ponctuels interagissent, à l'exclusion de tout autre, leurs accélérations, mesurées dans un repère convenable, demeurent en permanence alignées selon la droite qui les joint et de plus elles sont proportionnelles en module. C'est ce rapport constant des modules qui définit le rapport des masses inertes des objets en interaction. Le choix d'une unité fixe alors univoquement la valeur de chacune d'entre elle. A partir de là, on dit qu'un corps est soumis à une force, $\vec{F} = m\vec{a}$ unique ou résultante, lorsqu'il prend l'accélération \vec{a} . Au fond, l'expression, $\vec{F} = m\vec{a}$ n'est en fait qu'une définition convenable de la force. C'est abusivement qu'on lui prête le nom de loi. Cela ne lui ôte pas sa valeur mais simplement il importe d'être pleinement conscient que le travail du physicien démarre à ce stade dans la mesure où il doit être capable de dresser l'inventaire complet des forces qui existent en physique et de montrer qu'elles justifient tous les mouvements observés sans qu'il en résulte jamais de contradiction interne. C'est bien comme cela que la physique s'est développée progressivement. Chaque fois qu'un phénomène nouveau surgissait, on inventait une nouvelle force, de contact, électrique, magnétique, ... dont on a cherché l'expression compatible avec les résultats expérimentaux. Cette procédure a donné de bons résultats jusqu'au jour où on s'est mis à considérer des objets animés de grande vitesse ou évoluant dans l'infiniment petit.

1.5. Les limites du modèle newtonien.

Les limites du modèle newtonien apparaissent clairement si l'on considère le problème fondamental de l'interaction gravifique à deux corps en accord avec la loi de Newton, $F = GMm/r^2$. La force, \vec{F} , que cette loi introduit, agit sur chaque corps en provoquant une accélération, \vec{a} donnée par l'autre loi $\vec{F} = m\vec{a}$. Elle est censée agir instantanément à quelque distance que ce soit. Le caractère instantané de cette action à distance peut paraître inacceptable et de fait, il l'est dans la mesure où lorsque deux corps qui interagissent sont en mouvement, ce qui est généralement le cas

en dynamique, on ne voit pas comment ils pourraient être instantanément informés de la nouvelle distance, r , qui va les séparer à l'instant ultérieur. Les imprécisions des prédictions faites par la théorie de Newton sont donc d'autant plus importantes que les corps interagissant se déplacent rapidement. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle la théorie de la relativité restreinte a vu le jour. C'est évidemment parce que la théorie de Newton a cru pouvoir se dispenser de justifier l'action instantanée à distance qu'elle est limitée en validité. Il manque à ses fondements la description de l'agent médiateur qui règle l'interaction gravifique.

1.6. Les limites de l'électromagnétisme de Maxwell.

Une autre limite à la physique classique concerne l'électromagnétisme de Maxwell. Celle-ci est basée sur les notions de champs électriques et magnétiques, ce qui est une manière déguisée de continuer à consacrer la notion de force. C'est à nouveau la considération du problème fondamental à deux corps qui révèlent les premières faiblesses de cette théorie. Bien que la loi d'interaction de Coulomb, entre charges électriques au repos, $F=kQq/r^2$, ressemble à s'y méprendre à la loi de la gravitation, la comparaison s'arrête là car la théorie de Maxwell prévoit que deux charges électriques qui interagissent forment un système solaire miniature aux propriétés bien différentes et à vrai dire tout-à-fait singulières. Les ouvrages qui traitent du sujet ne résolvent d'ailleurs, en toute rigueur, que le problème particulier où un des corps est infiniment lourd, ce qui a pour effet de le rendre fixe. Lorsque les deux particules sont mobiles, les calculs deviennent tellement inextricables qu'il faut se contenter d'une approximation qui suffit à révéler des conclusions inacceptables au vu de la réalité expérimentale. On trouve en effet que les deux charges rayonnent une quantité appréciable de leur énergie cinétique au point qu'un atome d'hydrogène ne devrait pas exister plus d'une fraction de microseconde. On règle habituellement ce problème en expliquant que la mécanique quantique se chargera d'expliquer pourquoi l'électron ne rayonne pas dans l'atome d'hydrogène mais on devine la faiblesse de cet argument. Primo, la théorie quantique **n'explique** rien du tout à ce sujet, tout au plus se contente-t-elle de poser qu'il en est ainsi, et secundo prétendre justifier la validité d'une théorie, en l'occurrence ici celle de Maxwell, en en invoquant une autre relève plus de la prestidigitacion que de la science.

1.7. Revisiter le modèle classique?

Confronté aux limites des théories classiques, on a cherché **des** issues qui s'appelle la théorie de la relativité ou la mécanique quantique. On n'est cependant jamais revenu en arrière préférant juxtaposer des théories

disjointes plutôt que faire un réel effort d'unification. Un exemple typique est fourni par le concept de moments, cinétique ou magnétique, qui sont des grandeurs parfaitement définies à propos des corps tournants. La mécanique quantique, qui ne possède pas la vertu de représenter les objets qu'elle traite de façon concrète, est obligée de remplacer ces grandeurs par des opérateurs abstraits. Ces opérateurs sont cependant bâtis sur le modèle de leur homologue classique et cela ne manque pas de créer une grande confusion. Aujourd'hui, le problème se repose à nouveau avec la force nucléaire qui échappe dans une large mesure à une modélisation satisfaisante. Certes concrètement, revisiter les divers modèles existants peut paraître inutile puisque chacun donne satisfaction dans son domaine d'application. Toutefois, cette démarche est peu satisfaisante puisqu'elle nous éloigne à coup sûr de l'unification espérée. Une manière de reconsidérer le problème est de se poser la question suivante: que ce serait-il passé si Newton avait découvert une toute autre manière de rendre compte des trajectoires de Képler, sans intervention de la notion de force par exemple? Impossible pensez-vous: si Newton a trouvé un formalisme qui décrit quasi correctement le mouvement des planètes comment se pourrait-il qu'il en existe un autre? Il ne doit y avoir qu'une théorie physique et si Newton en a trouvé une ce doit être la bonne! En fait, il n'en est rien. L'avènement de la théorie de la relativité générale devrait déjà mettre la puce à l'oreille: il montre qu'il est possible de retrouver les résultats de Képler à l'aide d'une théorie entièrement différente de celle de Newton. Malheureusement cette nouvelle théorie connaît des problèmes d'intégration au reste du monde physique, électromagnétique et surtout quantique en sorte que beaucoup de chercheurs doutent que le modèle unitaire ultime se trouve de ce côté. Quoi qu'il en soit de la relativité générale, la question posée précédemment est intéressante et nous montrerons bientôt comment développer, de toutes pièces, un modèle légitime inédit. Dans l'immédiat il nous faut encore discuter avec soin ce qu'on entend par un modèle légitime.

1.8. Les caractéristiques des modèles.

Un modèle est une représentation imagée qui est capable de décrire, avec l'aide d'un formalisme mathématique, les divers états d'un système physique et si possible d'en prédire l'évolution. On voit d'emblée qu'un modèle possède une double vocation basée sur les vertus d'interpolation et d'extrapolation dans l'espace et dans le temps. Or, il faut savoir qu'il est parfaitement possible d'inventer plusieurs modèles, d'aspects très différents, qui atteignent ce double objectif **localement**. Sauf le modèle ultime que personne ne connaît, il n'existe aucun modèle qui y parvient **globalement**. Cela étant admis, le modèle que l'on retient pratiquement est celui qui,

provisoirement, fonctionne localement dans le domaine le plus vaste. Il est possible de trouver, en mathématique appliquée, une illustration du point de vue que nous défendons et qui aidera à comprendre ce que nous voulons dire. Imaginons que nous étudions un phénomène qui est décrit quantitativement, à notre insu, par la fonction de Bessel de troisième espèce, $K_\nu(z)$. Que font les physiciens quand la solution exacte d'un problème leur échappe? Ils cherchent une approximation de la solution, généralement sous la forme d'un développement en série. Si $|z|$ est petit, (<3), une série de Taylor suffit à approximer $K_\nu(z)$. Si $|z|$ est grand, (>10), une série asymptotique peut faire l'affaire. Dans le domaine intermédiaire, $3 < |z| < 10$, une troisième approche est nécessaire, basée, par exemple, sur une transformation de Fourier adéquate. Toutefois quantité d'autres approches, des fractions de Padé, par exemple, sont envisageables et peuvent se révéler utiles dans un domaine particulier de la variable z . Tout développement particulier convient dans un domaine restreint de la variable, z , mais aucun ne décrit correctement la réalité de manière globale. Cette situation est transposable en physique. La physique moderne, particulièrement au niveau particulière, s'est forgée un formalisme mathématique tellement complexe, qu'elle n'est plus capable de résoudre les équations qu'elle écrit. Elle est obligée de calculer les grandeurs utiles par perturbation. Elle ignore tout de la convergence des séries qu'elle construit et il est fréquent qu'elle soit réduite à n'en connaître qu'un ou deux termes! Lorsque, dans le meilleur des cas, la série converge, tout ce qu'on peut dire c'est qu'on a obtenu une approximation valable localement. Il n'est pas étonnant, qu'avec ce type de procédés, on s'éloigne du modèle unitaire.

1.9. Lutter contre le conservatisme en physique.

Les remarques qui précèdent ont montré la fragilité des théories, quelles qu'elles soient. Evidemment elles rencontrent forcément des succès au début de leur existence puisqu'elles ont été précisément conçues pour expliquer les premières observations expérimentales faites. Mais cela n'implique nullement qu'elles fournissent la description ultimement correcte des phénomènes étudiés. Le fait que des théories très étrangères coexistent pour expliquer la mécanique, l'électromagnétisme ou la physique nucléaire est déjà éloquent à cet égard. Ambitionner de réviser de façon unitaire les modèles physiques est une entreprise qui réclame une indépendance d'esprit certaine et une bonne dose de courage intellectuel. La raison principale est le dogmatisme qui est passivement entretenu par la frilosité de la communauté scientifique. Il s'illustre habituellement par un accueil hostile aux idées nouvelles, qui consiste à rejeter tout nouveau modèle parcequ'il est en conflit avec le modèle couramment admis. L'objection, toujours la même, se formule habituellement ainsi: «Pourquoi décrivez-vous les choses

de cette manière puisque nous savons grâce à notre théorie qu'il y a lieu de les décrire autrement?». Il est généralement très difficile de convaincre ce genre d'interlocuteur que l'on ne juge pas la valeur d'un modèle à la lumière d'un autre modèle, sinon il n'y a plus de progrès possible. C'est la confrontation des deux concurrents à l'ensemble des résultats expérimentaux qui seule peut aider à faire, provisoirement, le meilleur choix. Il ne faut cependant pas se cacher que cette affirmation, qui paraît si légitime, masque en réalité une difficulté redoutable dont il nous faut dire un mot.

1.10. Le problème de la mesure.

Le problème se résume en affirmant qu'il est rare, dans les domaines de pointe, que les résultats d'une expérience soient affranchis d'un modèle théorique particulier. Si cela est vrai, on comprend qu'il y a là un obstacle au jugement comparatif sain entre deux modèles théoriques distincts dont un seul a inféodé l'expérience. Précisons notre pensée. Si l'on désire mesurer la masse volumique d'un cylindre, on devrait y parvenir, sans référence à un modèle partisan, en procédant aux mesures directes des paramètres nécessaires, masse et dimensions. Certes, le recours au cadre de la géométrie d'Euclide est sous-entendu mais elle fait, à l'échelle du laboratoire, l'objet d'un consensus tel, que sans lui, il n'y a plus rien moyen d'entreprendre. Mais supposons que l'on décide de mesurer, par déflexion électrique, le rapport e/m qui concerne l'électron. Mesure-t-on réellement ce rapport? Evidemment la réponse est négative: on mesure la déviation du faisceau des électrons, c'est-à-dire une distance, puis on tente de relier cette distance à la grandeur cherchée en se mouvant dans le cadre des théories mécanique et électrique en vigueur et c'est très différent. L'exemple choisi n'est sans doute pas trop grave car des mesures de la même quantité basées sur d'autres principes viennent recouper la valeur obtenue mais le principe demeure qu'il y aura toujours un danger à mêler l'expérimentation à un modèle théorique particulier. Cela est particulièrement vrai dans tous les cas où le traitement des données expérimentales comporte des ajustements sur un grand nombre de paramètres car ces paramètres sont hérités d'une théorie particulière, ce qui ne leur garantit aucune existence légale. A la limite on pourrait, dans cet ordre d'idée, conférer des valeurs numériques à des grandeurs purement fictives et croire qu'elles ont, de ce simple fait, acquis droit de cité. Un exemple typique est l'affichage, dans la table des propriétés particulières publiées par le CERN, du résultat de la «mesure» de toute une série de paramètres de désintégration des particules instables. Ces «mesures» ne sont, en fait, que le résultat de l'ajustement d'une ensemble de paramètres que le modèle standard définit car il croit en leur existence. Or un ajustement de ce type fournit fatalement un résultat numérique. Quelle preuve peut-on en tirer de l'exis-

tence **réelle** de la grandeur paramétrisée? Ce côté pervers de l'ajustement tous azimuts était déjà épinglé, non sans humour, au début du XXème siècle par l'illustre Henri Poincaré: «*Il est clair qu'en donnant des dimensions convenables aux tuyaux de communication entre ses réservoirs et des valeurs convenables aux fuites, M. Jeans pourra rendre compte de n'importe qu'elle constatation expérimentale. Mais ce n'est pas là le rôle des théories physiques. Elles ne doivent pas introduire autant de constantes arbitraires qu'il y a de phénomènes à expliquer; elles doivent établir une connexion entre les divers faits expérimentaux et surtout permettre la prévision*». La remarque de Poincaré demeure plus applicable que jamais.

II. Perspectives: Un essai de théorie unitaire de l'interaction en physique, la dynamique récursive.

II.1. Les règles de base.

Nous présentons, maintenant, les grandes lignes d'un essai d'une théorie unitaire de l'interaction à deux corps. Les détails techniques et le formalisme mathématique feront l'objet d'articles séparés. Dans le cadre du nouveau modèle, deux objets qui interagissent, peu importe dans un premier temps le type d'interaction, présentent un écart de masse positif (excès de masse) ou négatif (déficit de masse). La première éventualité correspond à une répulsion et la deuxième à une attraction. Le cas de la répulsion est particulièrement facile à comprendre; il concerne, par exemple, deux charges de même signe. Les deux particules, une fois libérées, se débarrassent instantanément de leur excès de masse sous la forme d'un boson, (photon, graviton, etc, ... selon le type d'interaction), qu'elles émettent dans la direction de l'autre. Elles reculent par conséquent, comme le fait un canon qui tire un obus, en accord avec les lois relativistes de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement. Elles reculent à nouveau lorsqu'elles absorbent, chacune à leur tour, le boson émis par l'autre, toujours en accord avec les mêmes lois. On peut, sur base de ce modèle, calculer comment le système va évoluer, à la condition de connaître la loi de répartition initiale des écarts de masse. Sans entrer dans les détails techniques qui figureront dans les articles suivants, on trouve que le système évolue quasiment comme le prédit la théorie newtonienne. Toutefois, la loi en $1/r^2$, qui reste d'application à grande distance, se trouve légèrement modifiée à très courte distance, évitant en particulier la singularité du champ infini en $r=0$ qui embarrasse tant la théorie classique. Le nouveau modèle ne fait plus de différence entre la gravitation et l'électromagnétisme si ce n'est dans l'ordre de grandeur des écarts de masse. Le problème de l'attraction se règle au prix d'une légère complication exigée par le fait que les particules doivent émettre des antibosons d'énergie

négative afin d'assurer qu'elles avancent au lieu de reculer à chaque émission ou absorption. L'interaction forte diffère des précédentes en ce que, dans ce cas précis, les objets échangent des (anti)bosons de masse au repos finie et non plus des photons. On peut montrer que la différence la plus considérable est dans le très court rayon d'action de ce type d'interaction. Une surprise de taille est cependant que la loi de Yukawa, en $\exp(-\mu r)/r$, est totalement infirmée par notre modèle, même à grande distance. Le modèle permet de fixer les ordres de grandeurs des masses des bosons échangés par ce procédé.

II.2. Caractéristiques du modèle.

Bien que ce modèle soulève encore bien des questions non résolues, les perspectives qu'il offre sont intéressantes à beaucoup d'égards. Passons-en quelques unes en revue.

- Des particules qui interagissent électromagnétiquement échangent des photons. On peut se demander comment elles savent dans quelle direction elle doivent lancer leur photon pour qu'il arrive à destination correcte. La réponse est obtenue en faisant le calcul qui simule le problème de géométrie posé. On constate qu'il suffit de faire comme si la particule émettait une onde isotrope allant à la rencontre de la trajectoire de la particule cible. C'est à l'intersection de celle-ci et du front d'onde émis que la collision se produit. Dès cet instant tout les paramètres physiques du problèmes sont fixés et on peut passer à l'étape suivante de l'échange des photons. On voit apparaître une nouvelle version de la dualité onde-corpuscule: tant que le photon émis est à la recherche de sa cible, il garde les caractéristiques d'une onde et il ne redevient particule qu'au moment de la collision.
- Bien que rien dans le modèle ne contraint deux charges formant un système isolé à rayonner, il est possible que, dans certains cas un photon échangé manque sa cible et soit perdu pour le système: ce photon est donc rayonné et cette émission perd tout le caractère mystérieux qu'il a dans la théorie de Maxwell du fait que le photon ne fait pas partie des bases du modèle Maxwellien. Nous ignorons encore dans quelles conditions le rayonnement s'opère à coup sûr. Le modèle ne l'impose pas dans le cas du problème à deux corps en sorte qu'un atome d'hydrogène cesse de s'effondrer après une nanoseconde comme c'est le cas dans la théorie classique. Le rayonnement synchrotron, que l'on observe effectivement, pose le tout autre problème de l'interaction à N corps, avec N très grand.
- Rien n'oblige l'interaction gravifique à s'effectuer par échange de photons. Elle s'effectue sans doute par échanges de gravitons mais ce

point est accessoire. Ce qui l'est moins, c'est que la gravitation reçoit un traitement similaire à celui de l'électromagnétisme même si les ordres de grandeurs des écarts de masse sont complètement différents. En particulier le rayonnement gravifique doit logiquement apparaître dans la théorie au même titre que le rayonnement électromagnétique. De même il doit exister, en gravitation, l'équivalent d'un champ magnétique créé par une masse en mouvement. Evidemment sa petitesse en rend l'observation impossible par les moyens expérimentaux actuels. Cette conclusion est au fond rassurante car il était plutôt étrange que les théories de Newton et de Maxwell aient pu diverger à ce point alors qu'elles sont toutes deux fondamentalement issues d'une même loi en $1/r^2$.

Un dernier point concerne le problème à plusieurs corps. Nous savons, depuis Poincaré, que le problème à N corps est chaotique à partir de la valeur $N=3$. Cela signifie que si l'on prépare deux systèmes identiques dans des conditions initiales de position et de vitesse extrêmement voisines, ils vont rapidement évoluer dans le temps de façon complètement divergente. C'est ce qu'on appelle la sensibilité aux conditions initiales. Cette sensibilité reçoit, dans le nouveau modèle, une explication très élégante: lorsque plusieurs corps interagissent par échange mutuel de bosons, il peut se faire que deux systèmes, initialement très proches, évoluent de façon complètement différente parce que l'ordre dans lequel les collisions entre les particules et les bosons s'est trouvé modifié. Dès qu'une inversion de ce type se produit, on comprend que l'évolution du système subit une modification irréversible qui va en s'amplifiant.

II.3. Le formalisme mathématique.

Les détails de la théorie seront publiés dans une série d'articles à paraître prochainement. Puisque l'interaction est décrite, dans ce modèle, comme le résultat d'une succession d'émissions et d'absorptions de bosons, en accord avec les lois relativistes de conservation du quadrivecteur énergie-quantité de mouvement, le formalisme mathématique utilisé sera tout naturellement relativistiquement invariant, algébrique et récursif. Ce dernier point signifie que l'état du système est calculé de proche en proche, les paramètres à l'instant t_{i+1} se déduisant des valeurs correspondantes à l'instant antérieur t_i .