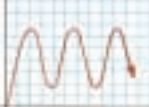
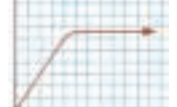


Quel traitement choisir?

ANCIENNES THÉORIES		NOUVELLES THÉORIES
CAUSE 	Excès de sécrétions acides qui attaque les tissus et déclenche l'inflammation.	Helicobacter pylori libère des toxines et déclenche une inflammation de l'estomac qui peut léser les tissus. 
TRAITEMENT 	Régime léger : des laitages toutes les heures ; des repas légers ; ni citron ni mets épicés ; pas d'alcool ni de café. Les antagonistes des récepteurs de type H2 de l'histamine diminuent la concentration sanguine en histamine, ce qui diminue la production d'acide gastrique. Une intervention chirurgicale élimine les ulcères sur lesquels les médicaments n'agissent pas ou qui saignent. Dans les années 1970, c'était l'opération que l'on enseignait le plus souvent aux internes en chirurgie.	Les antibiotiques : Aux États-Unis, on recommande, depuis février 1994, de traiter l'ulcère par deux antibiotiques prescrits pendant deux semaines : l'amoxicilline ou une tétracycline, le métronidazole, et du subsalicylate de bismuth. En France, depuis octobre 1995, on recommande l'association d'un inhibiteur de la pompe à protons (qui diminue l'acidité gastrique) et de deux antibiotiques (amoxycilline et clarithromycine) ; ou l'association d'un inhibiteur de la pompe à protons, d'un des deux antibiotiques précédents et d'un antifongique (métronidazole). Le traitement est prescrit pour une semaine en moyenne. 
RÉUSSITE 	Lorsque les malades sont traités par des antagonistes de l'histamine, un ulcère sur deux réapparaît dans les six mois qui suivent l'arrêt du traitement, et la quasi-totalité des personnes traitées rechute deux ans après l'arrêt du traitement.	Pas de récurrence après l'élimination de l'infection bactérienne. 
COÛT 	Les antihistaminiques H2 coûtent environ 300 francs par mois ; il faut compter des dizaines de milliers de francs pour l'ensemble des soins. Une opération peut coûter jusqu'à 100 000 francs.	Moins de 500 francs pour un traitement standard de deux semaines. 

Des bactéries à action lente

Au cours des 15 dernières années, Les études de *Helicobacter pylori* ont bouleversé les conceptions médicales à propos de la gastrite (que l'on pensait inévitablement associée au vieillissement de l'estomac), de l'ulcère gastrique et du cancer de l'estomac. De nouveaux traitements et des méthodes de dépistage en sont issus. En outre, le domaine de la microbiologie et de l'immunologie de l'estomac humain, que l'on commence tout juste à explorer, nous éclairera certainement sur les mécanismes des infections persistantes dans les muqueuses.

Ainsi, *Helicobacter pylori*, une bactérie à action lente, est responsable d'une inflammation chronique – l'ulcère gastrique – que l'on croyait d'origine métabolique. Or, cette infection augmente le risque d'apparition de cancers, par exemple d'adénocarcinomes et de lymphomes. Dès lors, nous postulons que des microbes per-

sistants participent à diverses inflammations chroniques d'origine inconnue, telles que la recto-colite hémorragique, la maladie de Crohn, la sarcoïdose, la granulomatose de Wegener, le lupus érythémateux et le psoriasis, ou encore à des cancers,

tels des carcinomes du côlon, du pancréas ou de la prostate. *Helicobacter pylori* est probablement la première d'une catégorie de bactéries à action lente qui seraient responsables de diverses maladies restées énigmatiques.

Martin BLASER dirige la Division des maladies infectieuses de l'Université Vanderbilt, à Nashville.

Barry J. MARSHALL et J. Robin WARREN, *Unidentified Curved Bacilli in the Stomach of Patients with Gastritis and Peptic Ulceration*, in *Lancet*, n° 8390, pp. 1311-1315, 16 juin 1984.

A. NOMURA, G.N. STEMMERMANN, P.-H. CHYOU, I. KATO, G.I. PEREZ-PEREZ et M.J. BLASER, *Helicobacter pylori Infection and Gastric Carcinoma among Japanese Americans in Hawaii*, in *New England Journal of Medicine*, vol. 325, n° 16, pp. 1132-1136, 17 octobre 1991.

Pelayo CORREA, *Human Gastric Carcinogenesis: A Multistep and Multifactorial Process*, in *Cancer Research*, vol. 52, n° 24, pp. 6735-6740, 15 décembre 1992.

Enno HENTSCHEL et al., *Effect of Ranitidine and Amoxicillin plus Metronidazole on the Eradication of Helicobacter pylori and the Recurrence of Duodenal Ulcer*, in *New England Journal of Medicine*, vol. 328, n° 5, pp. 308-312, 4 février 1993.

A.C. WOTHERSPOON et al., *Regression of Primary Low-Grade B-Cell Gastric Lymphoma of Mucosa-Associated Lymphoid Tissue Type after Eradication of Helicobacter pylori*, in *Lancet*, vol. 342, n° 8871, pp. 575-577, 4 septembre 1993.

Martin J. BLASER et Julie PARSONNET, *Parasitism by the «Slow» Bacterium Helicobacter pylori Leads to Altered Gastric Homeostasis and Neoplasia*, in *Journal of Clinical Investigation*, vol. 94, n° 1, pp. 4-8, juillet 1994.

Quarks et simulation numérique

DONALD WEINGARTEN

Des années de calculs numériques ont confirmé la théorie qui décrit les quarks. Simultanément les physiciens ont identifié une nouvelle particule dans des enregistrements anciens.

Plus d'un comptable fronceait les sourcils s'il apprenait que nous avons fait fonctionner en continu un supercalculateur durant plusieurs années pour n'obtenir qu'une dizaine de résultats. Pourtant nous n'avons pas perdu notre temps : seul l'ordinateur pouvait venir à bout des tâches que nous lui avons confiées, afin de résoudre des problèmes clés de la théorie des particules fondamentales.

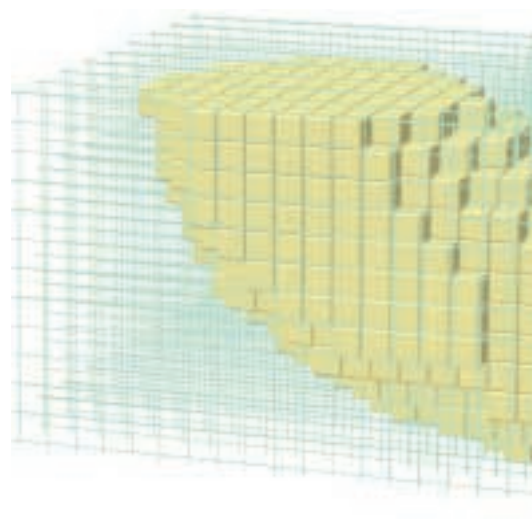
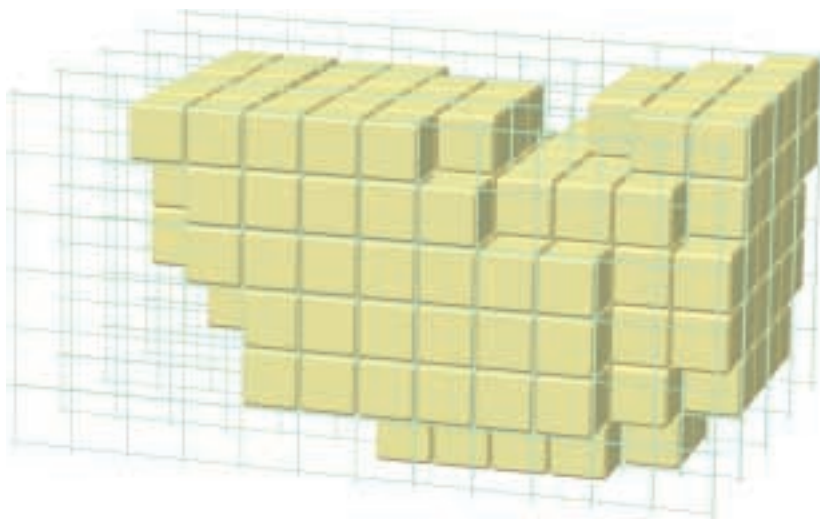
Les problèmes qui nous intéressaient sont nés de la chromodynamique quantique, la théorie qui décrit le comportement des quarks. Formulée dans les années 1970, cette théorie stipule que les quarks s'associent par deux ou par trois pour former des hadrons, c'est-à-dire des particules sur lesquelles s'exerce la force nucléaire forte. Cette famille comprend les protons et les neu-

trons, qui composent les noyaux atomiques, ainsi que d'autres particules moins familières qui apparaissent brièvement dans les accélérateurs de particules ou dans les gerbes de rayons cosmiques. Les expériences qui consistent à bombarder des hadrons à l'aide d'électrons, afin de sonder la structure interne des particules, ont contribué à corroborer la chromodynamique quantique, laquelle est devenue l'une des clefs de voûte du Modèle standard, la théorie la mieux admise de la physique des particules.

Cependant la confirmation était imparfaite, car la chromodynamique quantique aurait dû permettre de calculer la masse du proton, du neutron ou de n'importe quel hadron (le problème était de calculer la masse des hadrons et non de la mesurer, ce qui a été fait depuis longtemps ; les masses

du proton et du neutron, par exemple, ont été découvertes au début de ce siècle). Toutefois la résolution des équations mathématiques requise pour déduire de telles masses de la théorie était largement au-delà des capacités de calcul humaines. Même les ordinateurs les plus rapides des années 1970 auraient mis plus de 100 ans pour faire les calculs.

Aussi, en 1983, au Centre de recherches IBM de Yorktown Heights, nous avons commencé la construction d'un ordinateur parallèle spécialisé dans la résolution des équations de la chromodynamique quantique. L'ordinateur devait effectuer jusqu'à 11 milliards d'opérations arithmétiques par seconde et devait être ainsi plusieurs centaines de fois plus puissant que les ordinateurs les plus puissants de l'époque (aujourd'hui une telle puissance de cal-



cul n'a plus rien d'exceptionnel : c'est celle de 200 ordinateurs personnels équipés de la dernière puce de la Société Pentium).

En 1991, après huit ans d'études, nous avons utilisé l'ordinateur pour nos premiers calculs de chromodynamique quantique. Puis, après environ un an de calcul, notre ordinateur, GF11, a produit son premier résultat, en déterminant la masse du proton et de sept autres hadrons. Les différences entre nos prévisions et les mesures expérimentales, inférieures à six pour cent, résultaient de l'algorithme utilisé pour les statistiques plutôt que des incertitudes dues à la théorie elle-même.

En novembre 1995, nous avons achevé un autre ensemble de calculs, obtenu cette fois en faisant fonctionner l'ordinateur en continu pendant deux ans. En examinant une table de résultats expérimentaux du passé, l'ordinateur détermina la masse et le taux de désintégration d'une particule subatomique insaisissable appartenant à la sous-famille des hadrons, les «boules

de glu». Cette boule de glu, créée lors d'une expérience, n'avait pas été reconnue ; c'était la première fois que des calculs massifs identifiaient une nouvelle particule.

Simultanément, ce travail sur les masses des hadrons et sur la masse et le taux de désintégration des boules de glu a confirmé la chromodynamique quantique, et il a indiqué une nouvelle façon de traiter les problèmes de physique fondamentale. En raison des coûts exorbitants des accélérateurs de particules et de la complexité des problèmes théoriques actuels, les calculs numériques deviendront, dans certains cas, le seul recours possible pour les physiciens.

Les quarks et le champ de couleur

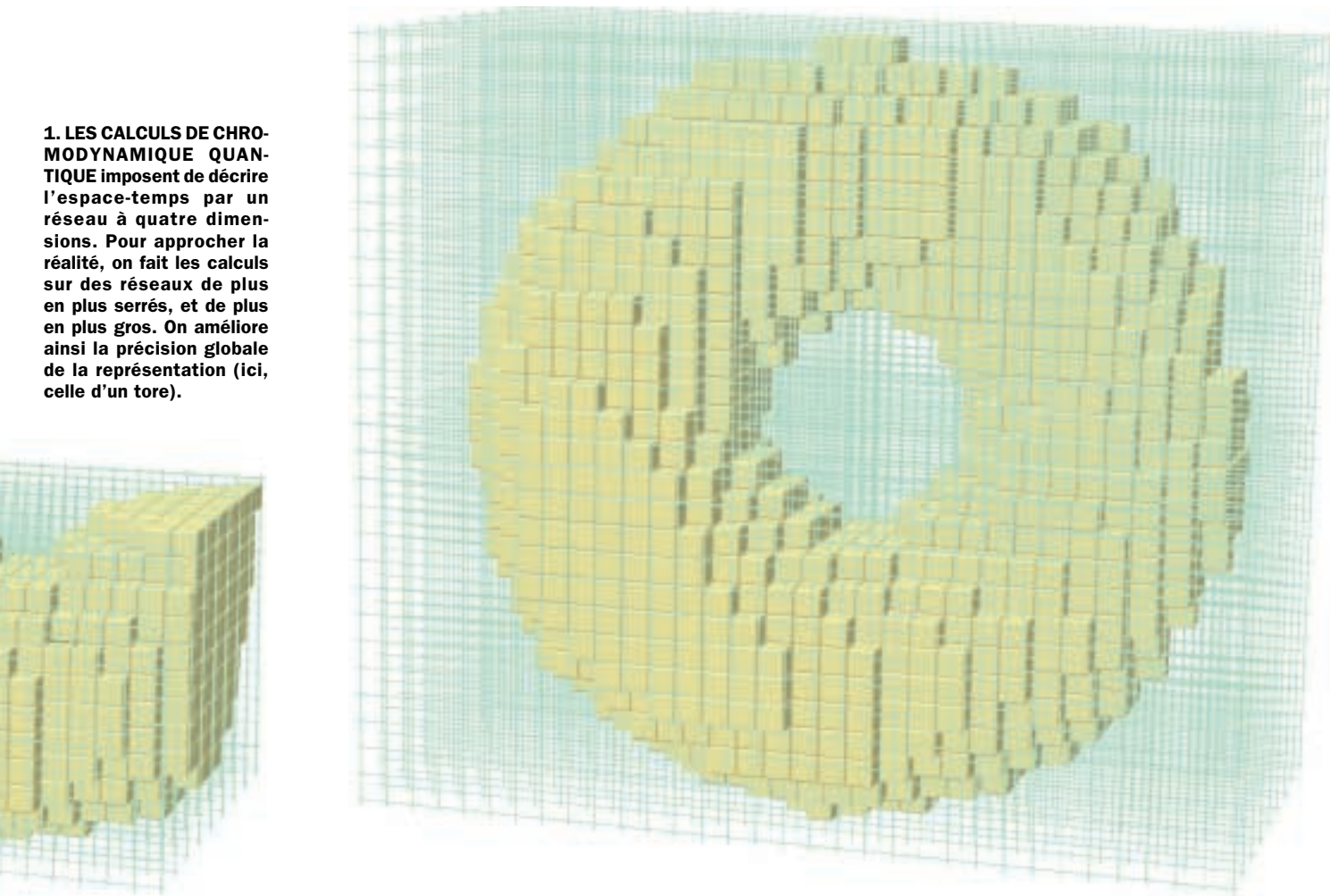
Pourquoi les quarks ont-ils un comportement si complexe ? En partie, parce qu'ils s'associent de façons variées. Il existe six «saveurs», c'est-à-dire six sortes de quarks : u , d , s , c , t

et b . Chacun peut porter l'une des trois «couleurs de charge» dénommées rouge, vert et bleu.

Ainsi les caractéristiques des quarks sont décrites par 18 combinaisons possibles de saveurs et de couleurs. En outre, à chaque type de quark correspond un antiquark, caractérisé par son antisaveur et son anticouleur. La chromodynamique quantique stipule que les quarks ou les antiquarks ne peuvent être isolés ; aussi les physiciens déduisent leurs propriétés en observant les interactions entre des paires de hadrons ou entre des hadrons et d'autres particules élémentaires, tels les électrons et les photons.

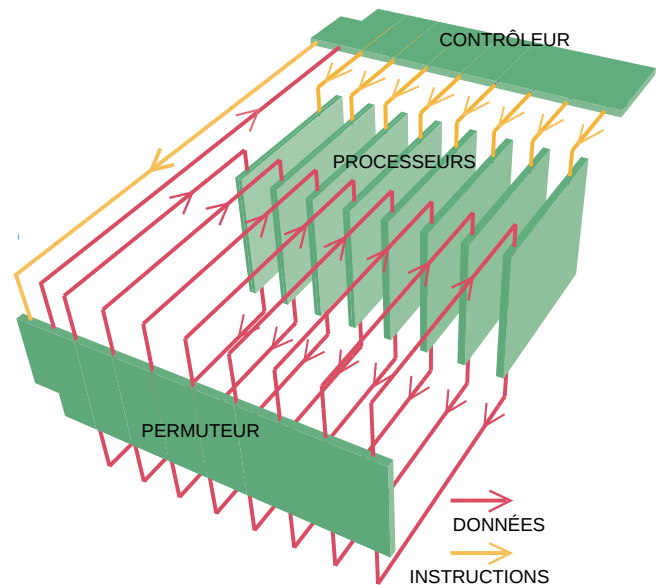
La chromodynamique quantique est complexe, parce que les charges de couleur engendrent un champ confinant, nommé «champ chromoélectrique» : les charges de couleur des quarks sont analogues aux charges électriques ordinaires, qui créent un champ électromagnétique autour des particules chargées. Et tout comme un champ électromagnétique lie les électrons chargés

1. LES CALCULS DE CHROMODYNAMIQUE QUANTIQUE imposent de décrire l'espace-temps par un réseau à quatre dimensions. Pour approcher la réalité, on fait les calculs sur des réseaux de plus en plus serrés, et de plus en plus gros. On améliore ainsi la précision globale de la représentation (ici, celle d'un tore).





2. LE SUPERORDINATEUR GF11 est composé de 566 processeurs qui calculent en parallèle. Le «permuteur» collecte et redistribue les données aux processeurs ; le contrôleur coordonne toutes les activités. Sur la photographie, les processeurs sont les cartes couleur bronze qui coulisent dans les armoires ; les câbles font partie du système contrôleur-permuteur.



négativement aux charges positives présentes dans le noyau d'un atome, le champ chromoélectrique lie les quarks et les antiquarks en hadrons (la matière et l'antimatière peuvent coexister pendant un temps limité avant de s'annihiler mutuellement). La chromodynamique quantique prévoit donc une vaste gamme de hadrons, qui résultent des différentes combinaisons possibles entre les 36 types de quarks et d'antiquarks.

Le champ chromoélectrique est toujours plus compliqué que le champ électromagnétique : il peut interagir fortement avec lui-même pour créer des agrégats variés. Dans un hadron, le champ se condense en une corde dense et fine qui contient une partie notable de la masse totale du hadron. C'est la raison principale pour laquelle on n'obtient pas la masse d'un hadron en additionnant simplement les masses des quarks qu'il contient. C'est aussi, en dernière analyse, la raison pour laquelle on détermine si difficilement la masse des hadrons par la chromodynamique quantique.

Les cordes du champ chromoélectrique peuvent aussi former une boucle fermée, créant ainsi une particule sans quarks ni antiquarks. Comme le champ chromoélectrique «colle» les hadrons faits de quarks, les particules composées uniquement de ce champ sont nommées des boules de glu.

Un réseau d'espace

La prévision de phénomènes physiques nouveaux à partir de la chromodynamique quantique impose une inter-

prétation mathématique plus spécifique du comportement des quarks et du champ chromoélectrique. Les méthodes numériques qui ont été appliquées sont toutes fondées sur une formulation de la théorie proposée en 1974 par Kenneth Wilson, de l'Université de l'Ohio.

K. Wilson a proposé de décrire comment la configuration des quarks et du champ chromoélectrique dans le monde réel change au cours du temps. Par exemple, dans une configuration, un quark serait sur le point d'entrer en collision, à midi pile, avec un autre quark, à une vitesse de un mètre par seconde, le champ chromoélectrique étant nul partout dans l'espace. Dans une autre configuration, à deux heures de l'après-midi par exemple, les quarks repartiraient dans des directions opposées et à 90 degrés de leur trajectoire initiale, le champ chromoélectrique étant devenu non nul en certains points de l'espace.

La théorie de K. Wilson permet de calculer la probabilité que la transition entre les deux configurations survienne entre midi et 14 heures. La chromodynamique quantique donne ainsi des prévisions, parce qu'elle permet de calculer des probabilités de transition.

La formulation de K. Wilson s'applique à un monde assez inhabituel, où l'espace-temps, continu et illimité, est approché par un réseau, c'est-à-dire une sorte de damier à quatre dimensions (trois dimensions pour l'espace et une pour le temps). On limite l'étendue de ce réseau, de sorte que l'en-

semble de l'espace et du temps est approché par un nombre fini de points ; à chaque point correspond une configuration spécifique des quarks et du champ chromoélectrique. C'est la raison pour laquelle la formulation donnée par K. Wilson est nommée chromodynamique quantique sur réseau.

Comme le monde ainsi modélisé diffère du monde réel, on cherche une meilleure description en considérant des réseaux de plus en plus serrés et de plus en plus gros : on fait tendre vers zéro la distance entre deux nœuds adjacents du réseau et l'on fait tendre vers l'infini le volume du réseau.

En principe, on doit additionner un très grand nombre de termes afin d'obtenir la probabilité d'une transition : à chacune des façons possibles de construire une sorte de tableau correspond un terme de la somme. Plus précisément, les colonnes et les rangées du tableau correspondent respectivement aux points du réseau et aux configurations de quarks et du champ chromoélectrique en chaque point.

Le nombre de tableaux possibles est vertigineux : pour chaque point du réseau, on doit utiliser 32 nombres réels pour représenter le champ chromoélectrique, de sorte que, pour un réseau de seulement dix unités de côté, dans chaque dimension, le tableau du champ est composé de 320 000 nombres réels (32 nombres pour chacun des $10 \times 10 \times 10 \times 10$ points du réseau). Pour les besoins d'un calcul d'ordre de grandeur, négligeons la

nécessité de conserver en mémoire la trace des quarks au cours des calculs et supposons (ce qui n'est pas exact) que les 320 000 nombres valent seulement zéro ou un. Chaque tableau possible serait composé d'une série de 320 000 zéros et uns, et le nombre total de ces tableaux possibles – c'est-à-dire le nombre total de termes dans la somme de K. Wilson – serait égal à 2 à la puissance 320 000, un nombre qui s'écrit en système décimal par un 1 suivi de 96 000 zéros!

Casino et mécanique quantique

En 1979, au Laboratoire de Brookhaven, Michael Creutz, Lawrence Jacobs et Claudio Rebbi reprirent une idée de K. Wilson et inventèrent une méthode numérique pour venir à bout de ces calculs rédhibitoires. Leur méthode est une forme d'«intégration de Monte-Carlo», qui consiste à approcher la solution d'un problème complexe par le biais d'un échantillonnage statistique, un peu comme on utilise des sondages pour prédire le résultat des élections (voir l'encadré ci-contre).

Plutôt que d'additionner la totalité des termes associés aux configurations possibles du réseau, on effectue un échantillonnage et l'on estime la somme cherchée en additionnant un petit nombre de termes sélectionnés aléatoirement. Par cette méthode, on traite le cas d'un réseau de dix unités de côté en seulement 20 milliards d'opérations arithmétiques. En 1979, un ordinateur de puissance moyenne effectuait un demi-million d'opérations arithmétiques par seconde : la méthode de Monte-Carlo donnait une approximation suffisamment précise en moins d'un jour.

Malheureusement on n'obtenait ce résultat qu'en appliquant une forme simplifiée de la chromodynamique quantique, où l'on ne tient compte que du champ chromoélectrique et pas des quarks. Avant d'effectuer des calculs similaires en utilisant la théorie complète, on a dû résoudre une série de problèmes techniques. En 1981, Federico Fucito, Enzo Marinari et Giorgio Parisi, à Rome, Donald Petcher et moi, à Yorktown Heights, et d'autres physiciens ont proposé des versions de l'algorithme de Monte-Carlo qui prenaient

Chromodynamique quantique et méthode de Monte-Carlo

Pour résoudre les équations de la chromodynamique quantique sur des réseaux, les physiciens utilisent la méthode de Monte-Carlo. Ils déterminent ainsi des «amplitudes de transition», c'est-à-dire la probabilité que les quarks et le champ chromoélectrique évoluent vers un état final particulier. Quand on jette un dé, l'amplitude de transition est simplement la probabilité d'apparition d'une des faces. Supposons maintenant que le dé soit pipé et que vous ignoriez quelles faces sont chargées. Le résultat dépend de l'orientation du dé avant le jet et du temps pendant lequel il est secoué avant d'être lancé.

La méthode de Monte-Carlo consiste à lancer le dé et à observer ce qui se passe, comme un joueur le ferait lors d'une véritable partie dans un casino (d'où le nom de la méthode). Pour trouver l'amplitude de transition du dé entre la position avec un point sur la face visible et la position avec six points une minute plus tard, par exemple, vous tiendriez le dé avec la face à un point en l'air, le secoueriez pendant un moment et le jetteriez de sorte qu'il s'arrête au bout d'une minute ; puis vous regarderiez si la face à six points est sortie ou non. Vous répéteriez l'opération plusieurs fois. La proportion de lancers qui aboutissent à un six serait l'amplitude de transition désirée.

En chromodynamique quantique, la détermination des amplitudes de transition n'est pas très différente. Initialement on spécifie la configuration du champ désirée au temps initial (ce qui correspond à l'orientation particulière du dé dans la main). L'ordinateur crée alors une série temporelle aléatoire de champs selon la dimension temps du réseau (il secoue le dé), et il s'arrête dans une configuration de champ au temps final spécifiée (il lance le dé). On examine alors le résultat pour déterminer si la configuration finale souhaitée a été obtenue (on regarde si un six est sorti). La proportion de tirages conduisant à la configuration finale spécifiée donne l'amplitude de transition recherchée. Une fois l'amplitude de transition trouvée, on déduit les masses des hadrons.



UN LANCER DE DÉ ne contribue à l'amplitude de transition 1-6 que si un six est finalement obtenu (premier et troisième jet).

Dans les calculs de chromodynamique quantique, on confie à chacun des 566 processeurs parallèles de l'ordinateur GF11 une partie des calculs. Les algorithmes qui engendrent des champs chromoélectriques aléatoires et déterminent les mouvements des quarks sont intégrés dans des programmes qui déterminent en détail les calculs, dans la partie confiée à chaque processeur. En chaque point du réseau, le processeur «secoue» le champ chromoélectrique – l'analogue chromodynamique de l'agitation du dé – d'une façon qui dépend du champ en ce point et aux sites voisins.

Avec le GF11, nous avons comparé des masses calculées aux masses observées dans le monde réel, où la distance entre deux points adjacents du réseau tend vers zéro et où le volume du réseau tend vers l'infini. Nous avons calculé les masses pour des volumes et des mailles de réseau différentes. Tout d'abord, nous avons considéré de grands volumes, en choisissant une maille de $1,5 \times 10^{-14}$ centimètre, connue pour donner des résultats pas trop éloignés des masses limites obtenues quand la maille tend vers zéro. Nous avons alors calculé les masses des hadrons pour différents volumes du réseau. Les résultats obtenus pour un réseau de 16 unités de côté étaient cohérents à cinq pour cent près avec les valeurs limites pour un réseau infini, et à un pour cent près pour un réseau de 24 unités de côté. Puis nous avons entrepris de faire tendre la maille du réseau vers zéro. Nous avons calculé les masses des hadrons sur un réseau de 24 unités de côté et de maille égale à 1×10^{-14} centimètre, puis sur un réseau de 32 unités de côté et de maille égale à $0,75 \times 10^{-14}$ centimètre, toujours avec un volume de 16 unités de côté. Ces trois calculs nous ont permis d'extrapoler nos prédictions à la limite où la maille du réseau tend vers zéro.

en compte la présence de quarks. Ces divers algorithmes comprenaient notamment une mesure de la difficulté pour les quarks et les antiquarks à passer de leur configuration initiale à une configuration finale.

La prise en compte des quarks et des antiquarks imposait toutefois un accroissement excessif du nombre d'opérations arithmétiques : le plus rapide des ordinateurs de l'époque n'aurait donné des résultats réalistes qu'en un siècle et demi de calcul ininterrompu !

Cette difficulté provenait de l'énergie de chaque configuration de quarks et du champ chromoélectrique : dans toute région de l'espace où un champ chromoélectrique est présent, une énergie importante est émise quand des paires de quarks-antiquarks apparaissent fugacement, puis disparaissent.

En 1981, j'ai imaginé une technique d'«approximation de valence» pour compenser cet effet : on supprime la contribution des paires de quarks-anti-

quarks en divisant toutes les charges de couleur par une constante «chromoélectrique». Puis nous avons découvert qu'on atteignait une bonne description du monde réel en considérant des réseaux de 32 unités de côté, par dimension ; 10^{17} opérations arithmétiques permettaient d'effectuer un calcul complet.

Toutefois les ordinateurs les plus rapides du début des années 1980 exécutaient 40 millions d'opérations arithmétiques par seconde, soit 10^{15} opérations par an. Ainsi, même avec la méthode de l'approximation de valence, le calcul des masses des hadrons aurait pris 100 ans. C'était encore excessif.

Enfin des prévisions

En 1983, avec mes collègues Monte Deneau et John Beetem, j'ai entrepris la construction d'un ordinateur spécialisé dans les calculs de chromodynamique quantique. Nous visions une

puissance de 11 milliards d'opérations arithmétiques par seconde, soit 11 gigaflops (d'où le nom de l'ordinateur : GF11).

Pour obtenir une telle machine, 250 fois plus rapide que les meilleurs ordinateurs de l'époque, nous avions prévu de faire travailler 566 processeurs en parallèle. La fréquence d'horloge, correspondant à la vitesse à laquelle un processeur peut exécuter une addition ou une multiplication, devait être égale à 50 milliards de hertz, et chaque processeur, d'une capacité de 20 mégaflops, devait envoyer une donnée aux autres processeurs toutes les 200 nanosecondes (plusieurs dizaines de superordinateurs d'aujourd'hui sont plus rapides que GF11 ; le plus rapide de tous est environ dix fois plus rapide). Avec James Sexton, j'ai réalisé les programmes du système d'exploitation, du compilateur et un jeu de programmes de diagnostic du matériel. Puis nous avons collaboré avec un groupe important du Centre de recherche pour la mise au point finale de la machine.

À la fin de 1991, nous avons fait les premiers calculs de masses hadroniques. Nous avons d'abord étudié les masses de 11 hadrons formés de combinaisons des trois saveurs des quarks et des antiquarks les plus légers, u , d et s . Les quarks u et les quarks d sont les constituants des neutrons (un u et deux d) et des protons (deux u et un d). Les quarks s sont présents dans un grand nombre de hadrons instables. Nous avons calculé la masse de chaque hadron pour des réseaux de tailles diverses. Dans chaque cas, nous avons ajusté des paramètres en utilisant la masse connue de trois hadrons : nous avons modifié ces paramètres jusqu'à ce que la masse calculée concorde avec la masse connue.

Il nous est ainsi resté huit prédictions de masse à faire pour chaque type de réseau. Pour trouver la valeur des masses aux limites, quand le réseau a un volume infini et une maille de longueur nulle, nous avons extrapolé les prédictions obtenues pour des réseaux de volume croissant et de maille décroissante.

La différence entre chaque prédiction et la masse déterminée expérimentalement a été, dans tous les cas, inférieure à six pour cent, ce qui était dans la gamme des incertitudes que nous attendions, du fait de l'utilisa-

Calcul et physique théorique

La simulation numérique sur réseau prend une importance croissante dans un domaine de la physique des particules nommé physique des interactions fortes. La disponibilité de moyens de calcul de puissance, rapidement croissante, permet maintenant une exploration de la chromodynamique quantique dont l'étude avait résisté à des efforts plus analytiques. Des résultats, que je qualifierais de semi-quantitatifs, ont été obtenus, qui valident définitivement, à la fois la théorie et cette démarche numérique. Il est possible d'envisager dans un avenir proche, non seulement une reproduction de résultats déjà établis expérimentalement, mais aussi la prédiction de résultats nouveaux. Il faut noter toutefois que la prise en compte précise des degrés de liberté des quarks exigera des puissances de calcul encore supérieures, probablement d'un facteur 100 à 1 000.

Dans certains domaines de la physique, la simulation numérique pourrait-elle, à terme, remplacer l'expérience quand cette dernière est trop

difficile ou trop onéreuse? La simulation numérique ne peut intervenir que dans des domaines où la théorie a déjà des bases suffisamment solides, elle ne peut rien tant que les modèles physiques ne sont pas encore connus. Croire qu'un jour le calcul rendra l'expérience totalement inutile est absurde. Ainsi il est très peu vraisemblable que la simulation numérique joue le moindre rôle dans la solution d'un problème aussi fondamental que celui de la particule de Higgs.

La France est peu présente dans ce domaine d'activité, alors même que nos physiciens (en particulier au Service de physique théorique du CEA-Saclay) ont contribué de façon très importante aux premières études de la chromodynamique sur réseau. Cependant l'absence de moyens de calcul compétitifs pendant les années 1980, au moment où le sujet s'est développé, ont conduit plusieurs équipes à abandonner le domaine. La situation est aujourd'hui meilleure, mais le changement est apparu tardivement.

Jean ZINN-JUSTIN
CEA-Saclay

tion de la méthode de Monte-Carlo. Bien que ces résultats aient été obtenus dans le cadre de l'approximation de valence, cette approximation n'aurait probablement pas fourni huit résultats corrects si la chromodynamique quantique avait été faussée. Autrement dit, nos résultats confirment à la fois les prédictions de masse de la chromodynamique quantique et la fiabilité de l'approximation de valence.

Plus récemment, nous avons exploré les propriétés de la plus légère des boules de glu (les boucles fermées du champ chromoélectrique, mentionnées précédemment). Les premiers calculs, effectués par des ordinateurs plus lents que le *GF11*, étaient trop peu précis pour que l'on identifie clairement des boules de glu. En utilisant 448 des processeurs de *GF11* en continu pendant deux ans, nous avons calculé la masse de la boule de glu la plus légère et étudié sa désintégration en d'autres particules plus stables. Les calculs ont montré que cette particule était apparue dans des expériences effectuées au cours des 12 dernières années ; personne ne l'avait reconnue, car il n'existait pas de profil suffisamment détaillé de ses propriétés. Ainsi nos calculs «découvraient» une particule subatomique.

Malgré ces succès, il reste à confirmer directement la chromodynamique quantique, sans aucune approximation. À cette fin, on devra utiliser des ordinateurs plusieurs centaines de fois plus rapides que le *GF11* ou des algorithmes des centaines de fois plus efficaces que les meilleurs algorithmes actuels. Trois machines de cette envergure sont étudiées à l'Université Columbia, à l'Université de Rome et au Japon. On espère que ces ordinateurs expliqueront également certaines diffusions de particules observées dans les collisionneurs.

La physique théorique expérimentale

Au-delà de la découverte des masses des hadrons et des boules de glu, nos calculs sont le signe d'un changement fondamental de la physique des particules. Alors que les méthodes numériques étaient utilisées dans la plupart des disciplines, papier et crayon restaient les outils des physiciens théoriciens. Nos études numé-

HADRON	MASSE (EN MILLIONS D'ÉLECTRONVOLTS)	
	CALCULÉE	OBSERVÉE
KAON (Dans un état excité)	898 ± 12	896
PROTON	936 ± 80	941
PHI	1 026 ± 25	1 022
DELTA	1 205 ± 94	1 235
SIGMA	1 391 ± 62	1 388
XI + SIGMA – PROTON	1 484 ± 57	1 576
XI (Dans un état excité)	1 582 ± 50	1 537
OMÉGA	1 768 ± 69	1 676
BOULE DE GLU LA PLUS LÉGÈRE	1 740 ± 70	1 710

3. LES MASSES CALCULÉES DES HADRONS sont comparées aux valeurs mesurées expérimentalement. Les calculs sont plus simples quand on additionne les masses de la particule xi, de la particule sigma et du proton.

riques, toutefois, se sont imposées parce que les méthodes analytiques avaient échoué et que les ordinateurs étaient devenus assez puissants pour exécuter les algorithmes essentiels.

Cette évolution, du papier à l'ordinateur, a toutefois des conséquences profondes, car, dans les travaux théoriques, sur le papier, chaque étape peut (en principe) être vérifiée ; en étudiant l'enchaînement logique des étapes d'un calcul, on confirme le résultat. En revanche, la physique expérimentale ou le calcul numérique ne donnent pas cette certitude, cette confiance absolue dans les résultats. Dans ces deux cas, des résultats jugés plausibles sont acceptés si suffisamment de tentatives pour les réfuter ont échoué. Nous acceptons le résultat expérimental que toute pierre tombe, et non l'inverse, car personne n'a jamais vu une pierre s'élever spontanément dans l'air ; néanmoins, du strict point de vue logique, il n'est pas certain que les pierres tombent toujours.

Notre travail a été l'analogue d'une recherche infructueuse de pierre qui

ne tombe pas. Toutefois, si nous avions pu calculer la masse du proton sur un réseau à maille bien plus petite que celle que nous avons effectivement utilisée du fait de notre puissance de calcul limitée, nous aurions peut-être trouvé une valeur de 2 000 mégaélectronvolts (un mégaélectronvolt, ou MeV, correspond à $1,78 \times 10^{-30}$ gramme), en contradiction avec notre valeur extrapolée de $1,67 \times 10^{-27}$ gramme. Par conséquent, notre prédiction de la masse du proton est testée par la série de nombres entrant dans notre extrapolation, mais elle n'est pas vraiment prouvée.

Nos travaux sont ainsi, ce qui semble une contradiction, de la «physique théorique expérimentale». Compte tenu de la complexité des théories physiques, du coût des énormes projets expérimentaux et de l'augmentation constante de la puissance des ordinateurs, cette physique théorique expérimentale pourrait, dans certains domaines de la physique, devenir la façon la plus accessible d'étudier les phénomènes naturels.

Donald WEINGARTEN est physicien au Centre de recherches IBM Thomas Watson, à Yorktown Heights.

Ta-Pei CHENG et Ling-Fong LI, *Gauge Theory of Elementary Particle Physics*, Oxford University Press, 1984.

D. WEINGARTEN, *Lattice Quantum Chromodynamics*, in *Particles, Strings and Supernovae*, sous la direction de A. Jevicki et C.-I. Tan, World Scientific, Singapour, 1989.

H.J. ROTHE, *Lattice Gauge Theories*, World Scientific, Singapour, 1992.

F. BUTLER, H. CHEN, J. SEXTON, A. VACCARINO et D. WEINGARTEN, *Hadron Mass Predictions of the Valence Approximation to Lattice QCD*, in *Physical Review Letters*, vol. 70, n° 19, pp. 2849-2852, 10 mai 1993.

M. CREUTZ, *Quarks, Gluons and Lattices*, Cambridge University Press, 1993.

I. MONTVAY et G. MUNSTER, *Quantum Fields on a Lattice*, Cambridge University Press, 1994.

Quads et quazars

IAN STEWART

Dans le jeu de Quads, on essaye de former des carrés sur une grille tronquée.

Un informaticien de mes amis, Keith Still, dirige une société qui étudie par simulation les mouvements de foule au stade de Wembley, en Angleterre. Outre ses préoccupations sur la dynamique des foules, K. Still est une personne inventive : il m'a fait part d'un jeu qu'il a conçu il y a quelques années.

Ce jeu, que K. Still a nommé *Quads*, se joue sur une grille formée d'un carré de 11 cases de côté, auquel on a retiré les quatre cases des coins. Le nombre total de cases est donc 117. Les deux joueurs possèdent chacun 20 pions (rouges pour l'un et noirs pour l'autre), nommés *quads*, et sept (ou six pour un jeu court) pions blancs nommés *quazars*. Ils jouent à tour de rôle en plaçant un de leurs *quads* sur une case inoccupée de la grille. Le but du jeu est de former un carré quelconque avec ses *quads* (voir la figure 1 en haut).

En plaçant le quatrième sommet de son carré, un joueur crie : «Quad!» pour annoncer sa victoire. Il arrive qu'un joueur ne remarque pas un carré qu'il a formé au cours du jeu. Si, par chance, l'autre joueur s'en aperçoit, il peut crier : «Quad!» quand vient son tour. Tous ces oublis doivent être relevés dans le cours de la partie.

Le bas de la figure 1 montre une manière pour les noirs de placer une suite de *quads* de sorte que, à chaque tour, les rouges sont forcés de jouer sur une case donnée pour empêcher la victoire des noirs au coup suivant. Ce type de jeu forcé n'est guère intéressant et c'est pour cette raison que les *quazars* entrent en action. Ils sont utilisés précisément pour empêcher l'adversaire de terminer un carré. Ces pions ne comptent donc pas pour la formation des carrés. Ils sont

d'ailleurs blancs pour les deux joueurs. Il y a plusieurs règles pour les utiliser : d'abord, il faut attendre son tour, ensuite, on peut jouer autant de *quazars* que l'on désire, de un à six, mais on doit les jouer avant de jouer son

quad. Puis l'on joue ce dernier pour achever son tour.

Deux règles techniques subsistent. Si à la fin de la partie, un joueur a laissé une position qui aurait conduit nécessairement à une victoire au tour suivant s'il avait eu d'autres *quads* à jouer, ce joueur est déclaré vainqueur. Si la partie s'achève sans qu'aucun joueur ait formé un carré et si les joueurs ont joué des nombres différents de *quazars*, celui qui en a utilisé le moins gagne.

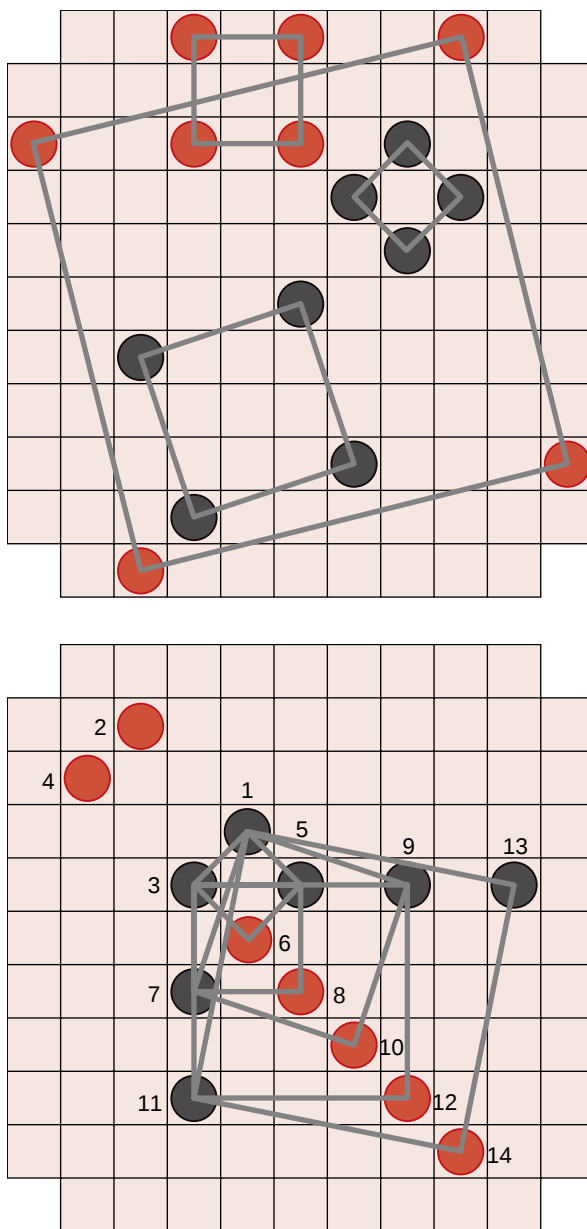
En raison du grand nombre de carrés réalisables, les *Quads* peuvent être étonnamment complexes. Par exemple, il est relativement aisé d'effectuer un coup «bicarré», qui crée deux carrés potentiels simultanément – un carré potentiel étant, bien entendu, un carré à trois sommets déjà occupés. L'adversaire peut contrer ces coups bicarrés en un seul tour à l'aide de ses *quazars*. Les coups bicarrés sont favorables car ils obligent l'adversaire à utiliser des *quazars*.

L'expérience montre que placer un *quad* dans la case centrale est une ouverture raisonnable. Par la suite, on doit surveiller les carrés potentiels, ainsi que ceux formés accidentellement qui peuvent avoir une orientation inattendue. Il faut également guetter les carrés multiples pouvant conduire l'adversaire à des coups bicarrés. La figure 2 vous plonge dans le jeu ; tous les carrés potentiels sont indiqués.

VARIANTES

Si ce jeu vous amuse, vous pouvez imaginer un certain nombre de variantes adaptées à diverses circonstances. Par exemple, de jeunes enfants trouveront le jeu plus accessible sur une grille plus petite et avec moins de *quazars* (5 pour une grille de 10 par 10, 4 pour une grille de 9 par 9, et ainsi de suite). De même, si trois joueurs jouent simultanément, chacun reçoit quatre *quazars* et 20 *quads* de trois couleurs différentes (par exemple, noir, rouge et jaune). Quatre joueurs auront chacun trois *quazars*, et cinq ou six joueurs, chacun deux.

K. Still décrit aussi d'autres variantes de ce jeu. Les *Quads* baladeurs sont analogues au jeu classique à deux joueurs, mais chaque joueur n'a que six *quads*



1. UN CARRÉ GAGNANT peut être de taille quelconque (en haut), de sorte que les noirs peuvent réaliser une suite de mouvements qui, en l'absence de *quazars*, forcent le jeu des rouges (en bas).