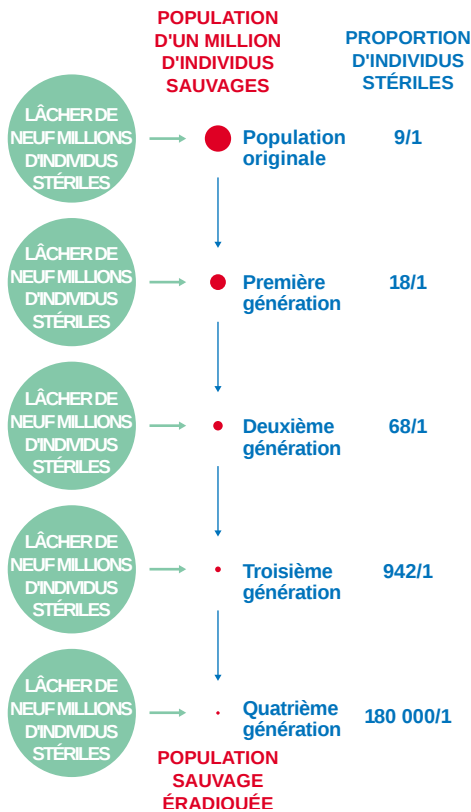




Dmitry Krasny, d'après Gerald Franz

9. LA TECHNIQUE DE L'INSECTE STÉRILE est parfois une arme efficace contre les ravageurs. Les insectes stériles (surtout des mâles), lâchés par vagues successives, surpassent en nombre les individus fertiles de la même espèce et rendent la plupart des accouplements inféconds. Après quelques générations, la population de ravageurs est décimée.

les industriels sont handicapés par la fragilité de ces fils, et ils lorgnent sur les fils de soie produits par les araignées, qui sont plus solides que le Kevlar (lequel entre dans la composition des gilets pare-balles et de pièces d'avions). Malheureusement, les araignées ne produisent pas leur fil au rythme des usines de Kevlar ni même des larves du bombyx. D'où la tentation d'introduire des gènes arachnéens de la soie dans le génome des vers à soie.

Évidemment ces études posent aux scientifiques comme aux hommes politiques le problème général de

l'utilisation du génie génétique dans les laboratoires et dans la nature. Des réglementations régissent déjà le transfert du laboratoire au champ des applications de la transgénèse. Toutes les techniques, notamment la fabrication d'insectes transgéniques, font encourir des risques que nous devons comprendre et minimiser. Par exemple, on étudie d'éventuels transferts imprévus de transgènes d'une espèce d'insectes à une autre. Dans certains cas, le risque semble minime : lorsqu'on lâche dans la nature des individus stériles d'une espèce transgénique, les gènes ajoutés à ces insectes restent confinés dans ces individus.

Les agences techniques qui dépendent des États se préoccupent d'évaluer les risques et les avantages des nouvelles techniques. Aux États-Unis, elles ont élaboré des procédures qui garantissent la sécurité génétique et écologique de l'utilisation en agriculture d'insectes transgéniques.

Les recherches sur la transgénèse ont bouleversé toute la biologie, parce que les résultats obtenus lors de l'étude d'espèces particulières s'appliquent aux autres espèces. Les modestes plants de pois de Gregor Mendel ont révélé la génétique de toutes les espèces végétales ou animales, et les études sur la drosophile ont posé les fondations de l'essentiel des recherches modernes dans le domaine de la génétique. Les investigations dont a fait l'objet la bactérie *Escherichia coli* ont conduit à l'exploration des mécanismes de régulation qui ont accéléré le développement du génie génétique. Des mammifères transgéniques produisent déjà toute une variété de médicaments. Appliquée aux insectes, la transgénèse ouvrira aux biologistes de nouvelles voies d'exploration, de contrôle et d'exploitation de ces créatures qui exercent une emprise considérable sur une importante part des activités économiques de l'homme.

David O'BROCHTA travaille l'Université du Maryland. Peter ATKINSON travaille à l'Université de Californie.

C.F. CURTIS et P.M. GRAVES, *Methods for Replacement of Malaria Vector Populations*, in *Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, vol. 91, n° 2, pp. 43-48, avril 1988.

The Ecology of Agricultural Pests : Biochemical Approaches, sous la direction de W.O.C. Symondson et J.E. Liddell, Chapman and Hall, 1996.

Frank H. COLLINS et Anthony A. JAMES, *Genetic Modifications of Mosquitoes*, in *Science & Medicine*, pp. 52-61, novembre / décembre 1996.

Margaret G. KIDWELL et Alice R. WATTAM, *An Important Step Forward in the Genetic Manipulation of Mosquito Vectors in Human Disease*, in *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 95, n° 7, pp. 3349-3350, 31 mars 1998.

Les boules de glu

FRANK CLOSE • PHILIP PAGE

Les gluons sont les particules qui transmettent l'interaction nucléaire forte entre les quarks et assurent la cohésion des protons. Ils se regroupent parfois en «boules de glu».

Il n'existe pas d'atomes de lumière : les photons, ces particules qui transmettent les interactions électromagnétiques, ne se lient pas en entités composées analogues aux atomes. Pourquoi alors existe-t-il des assemblages de gluons ? Ces particules lient les quarks (les composants élémentaires de la matière nucléaire) en particules telles que les protons. Les assemblages de gluons sont ce que les

physiciens nomment des boules de glu. On pense que les boules de glu ont un rayon de 0,5 femtomètre (soit 0,5 millionième de milliardième de mètre), inférieur à celui du proton, et une durée de vie inférieure au temps mis par la lumière pour traverser un atome d'hydrogène. De nombreux physiciens sont aujourd'hui convaincus que, malgré leur caractère éphémère, des boules de glu ont été produites dans des accélérateurs de particules. La mise en évidence d'une boule de glu serait l'un des plus beaux épisodes de l'histoire des charges de couleur, commencée en 1964 avec les travaux de Murray Gell-Mann.

Dans les années 1960, les physiciens comprirent que les protons ou les neutrons qu'ils observaient expérimentalement se composent de particules encore plus petites, nommées quarks. Ces quarks ont une charge électrique

et d'autres caractéristiques plus insolites, telle la «saveur», qui se présente sous six aspects différents nommés *up*, *down*, *charm*, *strange*, *top* et *bottom* ; ils ont également une charge «de couleur». Par exemple, un quark *up* peut être rouge, jaune ou bleu.

Le regroupement de trois quarks de couleurs différentes forme un objet «blanc», c'est-à-dire un objet dont la charge de couleur totale est nulle : selon la saveur des quarks constituant, les objets blancs sont des protons, des neutrons ou n'importe laquelle des innombrables particules du même type, que l'on nomme des baryons. Les physiciens ont nommé couleur ce type de charge parce que l'addition de trois charges de couleur est toujours égale à zéro, de la même façon que l'addition des trois couleurs primaires donne du blanc. Les particules (quarks et gluons) qui

1. UN GLUON (~~~~~) est libéré par un antiquark (■) qui a été créé en même temps qu'un quark (●) à partir d'un photon (~~~~~). Ce photon résulte de l'annihilation d'un électron (●) et d'un positon (■). Les quarks, les antiquarks et les gluons ont des charges de couleur (rouge, bleu et jaune) qui déterminent leurs interactions par la force nucléaire forte. Une charge de couleur et la charge d'anticouleur correspondante (couleur opposée) sont représentées ici par la même couleur. La nature ayant horreur de la couleur, le quark, l'antiquark et le gluon se combinent à d'autres particules ; ainsi, ils forment les «jets» (~~~~~) de particules incolores, ou blanches, que l'on observe lors des expériences. L'électron, le positon et le photon ont une charge de couleur nulle, de sorte qu'ils sont insensibles à l'interaction forte. Sur ce diagramme, le temps s'écoule de gauche à droite. Les diagrammes de ce type se nomment diagrammes de Feynman, du nom du physicien Richard Feynman, qui les a inventés pour faciliter le calcul.

portent des charges de couleur s'attirent par la force nucléaire forte. C'est elle qui regroupe les quarks en objets stables nommés baryons.

Les quarks se lient également aux antiquarks, qui ont des caractéristiques – des «nombres quantiques» – opposées à celles des quarks. Par exemple, un antiquark possède une anticharge de couleur : il peut être antirouge, anti-jaune ou antibleu (une anticouleur est mathématiquement représentée par une charge de couleur négative : l'antirouge est «moins rouge»). Les charges de couleur de signes opposés s'attirent. Par exemple, un quark rouge qui se lie à un antiquark antirouge forme un objet blanc nommé méson ; le méson le plus courant est le pion, souvent observé dans les réactions nucléaires.

La théorie électromagnétique décrit l'attraction entre charges électriques opposées. Dans les années 1940, les physiciens ont intégré cette théorie dans le formalisme de la relativité et de la mécanique quantique, établissant ainsi l'électrodynamique quantique. Cette théorie stipule que la force électromagnétique est transmise par des objets de masse nulle, les photons. Grâce à ces quanta de lumière, l'idée classique de forces agissant à distance est transformée : par exemple, un électron attire son antiparticule, le positon, parce qu'un photon rebondit entre les deux particules. Les photons assurent l'attraction de particules de charges électriques opposées sans être eux-mêmes chargés. Aussi, un photon n'attire ni ne repousse un autre photon.

Un tube de gluons

Pour les charges de couleur, la théorie équivalant à l'électrodynamique quantique est la chromodynamique quantique, qui décrit l'interaction forte, et ce sont les gluons, particules sans masse, qui transmettent cette interaction. Les gluons possèdent une charge de couleur, mais aussi une charge d'anticouleur. Par exemple, un quark rouge se transforme quelquefois en un quark bleu en émettant un gluon rouge / antibleu (voir la figure 2). Contrairement aux photons, qui ne portent pas de charge, les gluons interagissent selon leur charge de couleur.

Par ailleurs, un électron isolé est entouré d'un nuage de photons dont la densité décroît avec la distance ; de sorte que l'attraction entre un électron et un positon diminue lorsque la distance qui les sépare augmente. Les gluons, eux, ne sont pas répartis aussi uniformément autour des quarks : ils se regroupent en un tube qui relie un quark à un antiquark ; la couleur qui prend sa source dans le quark «s'écoule» à travers ce tube gluonique pour être absorbée par l'antiquark.

Lorsque le tube est étiré, il réagit en opposant une force constante, indépendante de sa longueur. Il faudrait donc dépenser une énergie infinie pour donner une longueur infinie au tube, c'est-à-dire pour séparer un quark d'un antiquark. Ainsi les quarks ne sont

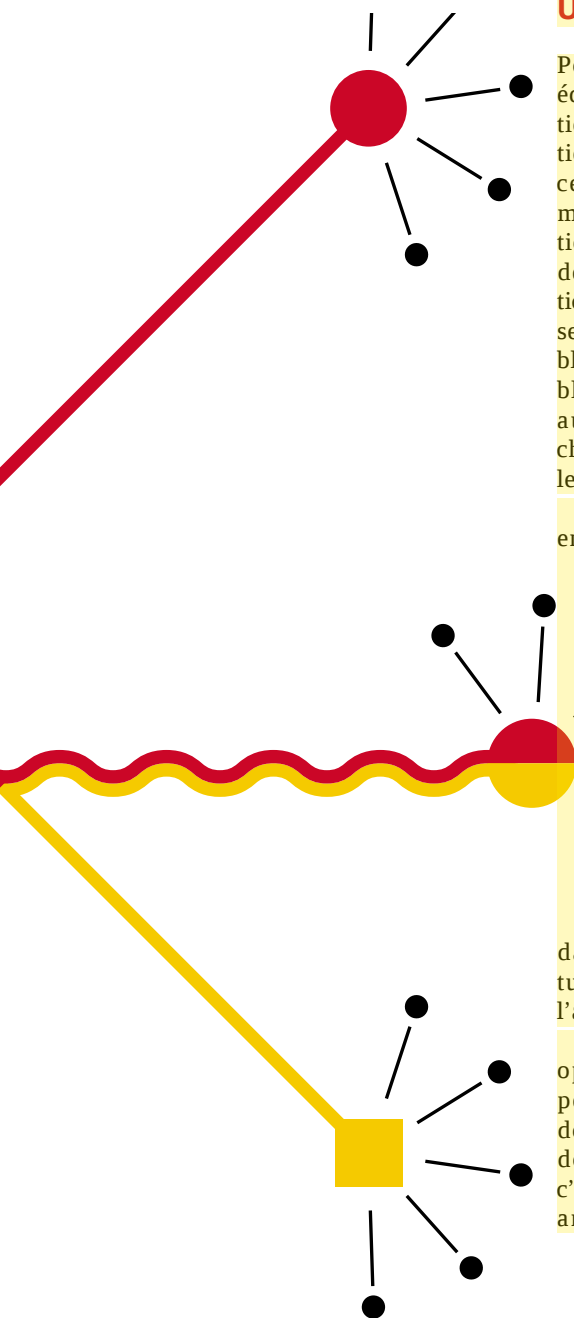
jamais isolés : la nature a horreur de la couleur. Cependant, un tube de gluons, qui assure la cohésion d'un méson, peut se rompre en deux morceaux. Les nouvelles extrémités colorées des tubes correspondent à des quarks ou à des antiquarks : le méson se scinde en deux mésons (voir la figure 5).

Cette interprétation théorique décrit bien les observations, mais comment démontrer l'existence des gluons ? L'annihilation d'une paire électron-positon donne des indices indirects de cette existence : lorsque ces particules se combinent, l'énergie libérée se matérialise souvent en un quark et un antiquark, qui partent dans des directions opposées. Le tube qui les relie se brise en gerbes de mésons et de baryons, et l'expérimentateur voit deux jets de particules composées qui s'éloignent en sens contraires.

Cependant, le quark ou l'antiquark émet parfois un gluon, ce qui porte le nombre de jets à trois (voir la figure 1). Les premiers triplets de tels jets ont été découverts en 1979, à Hambourg, grâce au synchrotron à électrons allemand (DESY). Les jets étaient exactement ceux prédits par les calculs des théoriciens, et l'expérience a également confirmé que les gluons pouvaient émettre d'autres gluons.

Les expérimentateurs du DESY ont également sondé la structure interne des protons en envoyant vers eux des électrons très énergétiques, et ils ont alors retrouvé la présence de gluons. Par ailleurs, les gluons sont nécessaires pour expliquer les valeurs des masses de certains mésons : ceux qui sont composés de quarks et d'antiquarks massifs (saveurs *strange*, *charm* et *bottom*). La valeur de leur masse correspond à celle d'un quantum de force de couleur possédant un moment cinétique intrinsèque égal à 1 ; ce qui est le cas pour les gluons.

Les gluons peuvent-ils se manifester de façon autonome, c'est-à-dire sans quarks ? En 1972, à l'Institut de technologie de Californie, Harald Fritzsch et Murray Gell-Mann ont prédit que deux – ou plus de deux – gluons (par exemple, un rouge / antibleu et un bleu / antirouge) pouvaient se combiner en une particule de couleur neutre, ou blanche. Cet objet hypothétique, composé uniquement de gluons solidement liés ensemble est ce que l'on a nommé une boule de glu. Ces théoriciens ont affirmé également qu'un gluon pouvait se lier à un méson pour



former un hybride. Par exemple, un quark rouge et un antiquark antibleu pouvait se lier à un gluon bleu / anti-rouge pour former une particule blanche.

L'idée est élégante, mais la chromodynamique quantique est une théorie compliquée : la nature particulière et complexe de l'interaction forte interdit tout calcul théorique exact, et la quasi-totalité de nos connaissances sur la couleur et sur les gluons provient de colossales simulations numériques (voir *Quarks et simulation numérique*, par Donald Weingarten, *Pour la Science*, avril 1996). Dans cette chromodynamique sur réseau, on assimile l'espace-temps à un réseau discontinu. Un quark en un point donné du réseau est connecté par un segment à un antiquark situé en un autre point. Le calcul fait apparaître des entités purement gluoniques, constituées d'un tube de glu qui se referme sur lui-même, tel un serpent qui se mord la queue. La boucle ainsi formée est une représentation simple d'une boule de glu.

La plus légère boule de glu permise par la théorie correspond à un tube de glu circulaire possédant un moment cinétique intrinsèque, ou spin, nul.

Conformément aux équations de la théorie quantique, un tel objet de moment cinétique nul doit être décrit par une fonction d'onde à symétrie sphérique. D'autres «boules de glu» ont un moment cinétique non nul ; elles sont donc décrites par des fonctions d'onde non sphériques.

Parfois, le tube de glu reliant une paire quark-antiquark se détend et s'écarte légèrement de l'axe rectiligne joignant les deux particules. Il peut alors tourner autour de cet axe, à la manière d'une corde à sauter (voir la figure 5). Cette rotation exigeant une énergie considérable, l'énergie totale du système (ou sa masse, puisque masse m et énergie E sont reliées par la relation d'Einstein, $E = mc^2$, où c est la vitesse de la lumière) est supérieure à celle d'un méson ordinaire. Les configurations résultantes, qui peuvent être considérées comme contenant un gluon supplémentaire, correspondent aux hybrides prédits par H. Fritzsch et M. Gell-Mann.

Un méson ordinaire, composé d'un quark et d'un antiquark reliés par un tube gluonique rectiligne, peut également subir une rotation, mais

uniquement autour d'un axe perpendiculaire à l'axe quark-antiquark. Un méson d'énergie minimale n'est pas soumis à une telle rotation : il est décrit par ce que l'on nomme une fonction d'onde de type S. D'une manière générale, un méson d'énergie minimale (par exemple, le pion) se désintègre en deux mésons d'énergie minimale. En revanche, un hybride, d'énergie supérieure, se désintègre rarement de cette manière, car une telle désintégration violerait la conservation du moment cinétique intrinsèque. La théorie prédit la désintégration des hybrides en un méson d'énergie minimale et en un autre méson, à courte durée de vie, dont le moment cinétique n'est pas nul et qui se désintègre ensuite en deux mésons d'énergie minimale. L'hybride signalerait donc sa présence en engendrant au minimum trois mésons d'énergie minimale.

Les hybrides exotiques

Durant de nombreuses années, les physiciens ont parlé des hybrides, sans les chercher vraiment : les difficultés de détection des trois mésons émis lors d'une désintégration semblaient insurmontables.

En décembre 1994, nous avons calculé toutes les désintégrations possibles d'hybrides en assimilant les tubes de glu à une chaîne de boules représentant des gluons. Les résultats étaient similaires à ceux de la chromodynamique sur réseau, mais notre modèle avait l'avantage d'expliquer plus de situations. Nous avons alors constaté que l'on avait peut-être même observé un hybride au cours de cette même année 1994 : durant l'été, des physiciens de l'Institut de physique des hautes énergies, à Protvino, en Russie, avaient détecté un objet nouveau lors de collisions de pions et de protons. Cette particule, nommée $\pi(1800)$ – le nombre entre parenthèses indique la masse en millions d'électronvolts –, avait les caractéristiques et les modes de désintégration prédits pour les hybrides.

L'identité du $\pi(1800)$ reste incertaine, mais des indices récents suggèrent l'existence d'hybrides particuliers, qualifiés d'«exotiques». Les mésons sont caractérisés par plusieurs nombres quantiques tels que leur moment cinétique intrinsèque J , leur parité P (qui indique si le symétrique par rapport à un point conserve, ou non, les mêmes propriétés) et leur conjugaison de charge C (qui

