

varient en sens contraire, avec pour conséquence un débit d'information très voisin pour la plupart des langues – même si l'anglais et le japonais se démarquent (leurs débits d'information sont respectivement supérieur et inférieur à la moyenne).

Précisons qu'on parle ici des valeurs moyennes. Des différences de débit d'information demeurent à toutes les échelles : chez un locuteur confronté à diverses situations, entre individus, entre populations... Un individu peut ainsi s'adapter au contexte, non seulement en parlant plus ou moins vite, mais également en choisissant les mots employés, les tournures de phrases, etc. Les locuteurs d'une même langue présentent également des différences de débit « normal » d'élocution, certaines personnes parlant naturellement plus vite que d'autres. Dans notre étude, par exemple, les locuteurs français les plus rapides avaient un débit comparable à celui des locuteurs japonais les plus lents.

Ni trop vite ni trop lentement...

Pourquoi le débit moyen d'information ne varie-t-il pas dans des proportions plus importantes ? Un débit trop faible serait socialement pénalisant, car des interactions efficaces nécessitent l'échange d'informations. À l'inverse, un débit moyen trop rapide aurait des coûts physiologique et cognitif trop élevés. En effet, si chacun peut accélérer momentanément son débit de parole (et donc son débit d'information), cela requiert à la fois un supplément d'énergie biomécanique de la part du locuteur et un supplément de ressources neurocognitives de la part de l'auditeur. Plusieurs travaux récents suggèrent d'ailleurs que le cerveau traite plus efficacement les informations présentées à un rythme compris dans une plage étroite, voisine de celle que nous avons observée ; ils se fondent pour cela sur l'analyse des réseaux neuronaux mobilisés par l'audition et la compréhension du langage.

Nous poursuivons actuellement nos recherches en augmentant le nombre de langues étudiées (nous avons ajouté le turc et le coréen, ainsi que plusieurs langues d'Afrique subsaharienne et de Chine), avec l'intention de relier la densité d'information

Hier soir, j'ai ouvert la porte d'entrée pour laisser sortir le chat. La nuit était si belle que je suis descendu dans la rue prendre le frais.
J'avais à peine fait quelques pas que j'ai entendu la porte claquer derrière moi. J'ai réalisé, tout d'un coup, que j'étais enfermé dehors. Le comble c'est que je me suis fait arrêter alors que j'essayais de forcer ma propre porte !

昨夜、私は猫を外に出してやるために玄関を開けてみると、あまりに気持ちのいい夜だったので、新鮮な空気を吸おうと、ついふらっと庭へ降りたのです。すると後ろでドアが閉まって、カチッと言う音が聞こえ、自分自身を締め出してしまったことに気が付いたのです。挙げ句の果てに、私は無理矢理ドアをこじ開けようとしていたところを逮捕されてしまったのです。

Last night I opened the front door to let the cat out. It was such a beautiful evening that I wandered down the garden for a breath of fresh air. Then I heard a click as the door closed behind me. I realised I'd locked myself out. To cap it all, I was arrested while I was trying to force the door open !

3. CE TEXTE est l'un de ceux qui ont été traduits dans plusieurs langues pour tester les différences de densité syllabique d'information, de débit syllabique et de débit d'information. En japonais, langue où chaque syllabe porte peu d'information (la densité syllabique est faible), il comporte près de deux fois plus de syllabes qu'en anglais.

à la complexité structurelle des systèmes linguistiques. Les questions sont multiples : quelles différences observe-t-on entre les langues où les mots sont souvent polysyllabiques et celles où ils sont plutôt monosyllabiques ? Comment la densité syllabique d'information varie-t-elle entre les langues aux schémas syllabiques très simples (CV ou CVC par exemple) et celles où ces schémas sont plus complexes (CCVCC par exemple) ? Etc.

Pour comparer les langues, il est également intéressant d'aller au-delà de la notion mathématique d'information que nous avons considérée, pour se pencher sur la notion plus générale de signification. Si les informations sont transmises à des débits comparables d'une langue à l'autre, des différences notables existent quant à ce qui est considéré comme une information pertinente à transmettre explicitement. Le mandarin et le japonais, par exemple, recourent à des éléments grammaticaux nommés classificateurs. Ceux-ci spécifient la forme, la taille ou d'autres caractéristiques physiques ou fonctionnelles des éléments dénombrés. Ainsi, la phrase « Trois chats boivent du lait » dite en japonais se traduit littéralement en français par « Trois animaux-chats du lait boivent ». Sur un autre plan, en japonais, les formules de politesse ont un rôle social très codifié et font partie de l'information jugée essentielle à transmettre lors de la communication.

Nos résultats soulignent qu'il existe plusieurs profils de langues. Ainsi, le mandarin se fonde sur des syllabes denses en information (notamment grâce aux tons) transmises à un débit assez lent, tandis que l'espagnol utilise des syllabes moins denses en information, mais émises plus vite. Cependant, le fait qu'une langue soit plus rapide ou plus dense en information ne la rend pas plus efficace pour communiquer, puisque le débit d'information reste quasi constant. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

F. Pellegrino *et al.*,
A cross-language perspective on speech information rate,
Language, vol. 87, pp. 539-558,
2011.

J. Vaissière, **La phonétique**,
Collection Que sais-je ?, Presses
Universitaires de France, 2006.

Bernard Comrie *et al.*, **Atlas des langues : L'origine et le développement des langues dans le monde**, Acropole, 2004.

Physique théorique

Boucles et arbres, à la recherche d'une nouvelle physique

Zvi Bern, Lance Dixon et David Kosower

On calcule les probabilités des processus impliquant les particules élémentaires à l'aide de diagrammes dits de Feynman. Une nouvelle méthode simplifie ces calculs et remet au goût du jour certaines théories unificatrices.





Par un jour ensoleillé de printemps, l'un d'entre nous (L. Dixon) se rendait à l'aéroport de Heathrow à Londres. En entrant dans la station *Mile End* du métro londonien, il repéra un inconnu, un parmi les plus de trois millions de passagers quotidiens, et se posa la question suivante : quelle est la probabilité que cette personne sorte à *Wimbledon*, par exemple ? Comment répondre à une telle question, sachant que toutes sortes d'itinéraires s'offrent à l'usager du métro ? En réfléchissant à cette énigme, il se rendit compte qu'elle s'apparente aux problèmes épineux rencontrés par les physiciens qui cherchent à prédire les résultats des collisions entre particules dans les expériences modernes.

Le collisionneur LHC (*Large Hadron Collider*, ou grand collisionneur de hadrons) du CERN, près de Genève, accélère des protons qui vont se percuter à des vitesses proches de celle de la lumière. Pour étudier ce qui ressort de ces collisions, les physiciens ont construit des détecteurs qui repoussent les limites de la technologie. Interpréter ce que les machines mesurent est un défi tout aussi grand, même s'il est moins visible. Au premier abord, cela peut sembler étrange, car le modèle standard des particules élémentaires et de leurs interactions est bien établi ; les théoriciens l'utilisent tous les jours pour prévoir les résultats d'expériences. Pour effectuer les calculs, nous nous servons d'une technique développée il y a plus de 60 ans par le physicien américain Richard Feynman. Cette méthode est omniprésente. Les physiciens des particules l'ont apprise à l'université, et tous les livres et articles pour le grand public s'appuient sur les concepts de Feynman.

Pourtant, cette technique est devenue insuffisante pour traiter les problèmes les plus complexes. Elle offre un moyen intuitif et approximatif pour étudier les processus les plus simples, mais elle est trop lourde pour les processus plus compliqués ou pour les calculs de haute précision. Ces dernières années, nous avons développé avec nos collègues une nouvelle façon d'analyser les interactions de particules, qui contourne la complexité de la technique de Feynman. Nommée « méthode d'unitarité », elle revient à une façon très économique de prévoir ce qu'un usager du métro va faire en décomposant le trajet en un nombre limité de séquences avec une probabilité associée à chaque choix dans le parcours. De nombreux problèmes théoriques de la phy-

sique des particules, impossibles à traiter avec les méthodes classiques, ont pu être résolus grâce à cette nouvelle idée. Obtenir des solutions nous permet de mieux comprendre la théorie actuelle de la nature et ainsi de repérer toute mesure qui serait le signe d'une nouvelle découverte. Cette méthode a aussi produit de nombreux résultats pour une version idéalisée du modèle standard qui intéresse particulièrement les physiciens en tant que possible tremplin vers la théorie ultime de la nature.

Plus qu'une astuce de calcul

L'approche fondée sur l'unitarité est plus qu'une astuce de calcul. Elle suggère une vision radicalement nouvelle des théories des interactions entre particules, qui seraient gouvernées par des symétries cachées : une élégance insoupçonnée du modèle standard. En particulier, elle est à l'origine d'un étrange retournement de situation concernant les tentatives menées depuis des décennies pour unifier la théorie quantique et celle de la relativité générale d'Einstein en une théorie quantique de la gravitation.

Jusque dans les années 1970, les physiciens supposaient que la gravitation se comporte comme les autres interactions fondamentales, et cherchaient à l'englober dans les théories existantes. Mais quand ils appliquaient la technique de calcul de Feynman, ils trouvaient des résultats aberrants ou étaient bloqués par la difficulté des calculs. Découragés, les physiciens se sont tournés vers des idées plus révolutionnaires telles la supersymétrie, et plus tard la théorie des cordes.

En revanche, la méthode d'unitarité nous a permis d'effectuer des calculs envisagés dans les années 1980, mais qui semblaient à l'époque hors de portée. En particulier, elle se révèle exempte de certaines incohérences rencontrées avec la méthode de Feynman. La gravitation ressemble bien aux autres interactions, mais d'une façon inattendue : elle se comporte comme l'interaction forte, qui agit dans le noyau atomique et en lie les différents composants, mais en double exemplaire.

L'interaction forte est transmise par des particules nommées gluons ; la gravitation est supposée transmise par des particules nommées gravitons. Dans le nouveau schéma, le graviton se comporte comme deux gluons agissant de conserve. Cette

L'ESSENTIEL

- Les concepts et les méthodes introduits il y a plus de 60 ans par Richard Feynman ont atteint leurs limites dans les calculs de processus complexes en physique des particules.
- Grâce à une nouvelle approche, les physiciens peuvent calculer de façon plus précise les résultats des collisions entre particules dans les grands collisionneurs tel le LHC.
- À un niveau plus fondamental, ces méthodes novatrices apportent un souffle nouveau à la recherche d'une théorie unifiée.

Kenn Brown and Chris Wren, Mondolite Studios

idée est assez étrange, et même les spécialistes n'arrivent pas encore à se faire une bonne image de ce que cela signifie. Néanmoins, la propriété de double exemplaire offre une perspective nouvelle pour unifier la gravitation avec les autres interactions fondamentales.

Ce qui rendait la technique de Feynman si convaincante et pratique, c'est qu'elle donne une recette graphique simple pour représenter des calculs très compliqués. Elle résume ces derniers par des diagrammes qui correspondent aux différentes voies d'interaction de deux particules (ou plus) qui entrent en collision (les particules entrantes et sortantes étant fixées). Suivant un ensemble de règles détaillées que Feynman et ses collègues (notamment Freeman Dyson) ont établies, le théoricien calcule la valeur associée à chaque diagramme. La somme de ces valeurs détermine la probabilité du processus considéré.

Mais il y a une difficulté de taille : le nombre de diagrammes à dessiner est énorme, et en principe infini. Dans les applications pour lesquelles Feynman a initialement conçu ses règles, cet inconvénient n'avait pas d'importance. Il étudiait l'électrodynamique quantique, qui décrit les interactions des électrons et des photons. Ces interactions sont régies par un paramètre, le couplage, qui vaut environ $1/137$. La petite valeur de ce couplage garantit que les diagrammes compliqués contribuent peu à la probabilité totale du processus considéré et peuvent donc être ignorés. C'est comme si l'on disait qu'il

est plus probable qu'un usager du métro choisisse un itinéraire simple.

Deux décennies plus tard, les physiciens ont étendu la technique de Feynman à l'interaction forte. Ils ont ainsi créé la « chromodynamique quantique », qui est aussi régie par un couplage, mais sa valeur est très supérieure à celle du couplage électromagnétique. *A priori*, un couplage plus intense augmente le nombre de diagrammes compliqués que les théoriciens doivent inclure dans leurs calculs. Heureusement, à très courte distance ou très haute énergie, comme pour les collisions au LHC, le couplage de l'interaction forte diminue et, pour les collisions les plus simples, les théoriciens peuvent là encore se limiter aux diagrammes de Feynman les plus élémentaires.

Des diagrammes trop problématiques

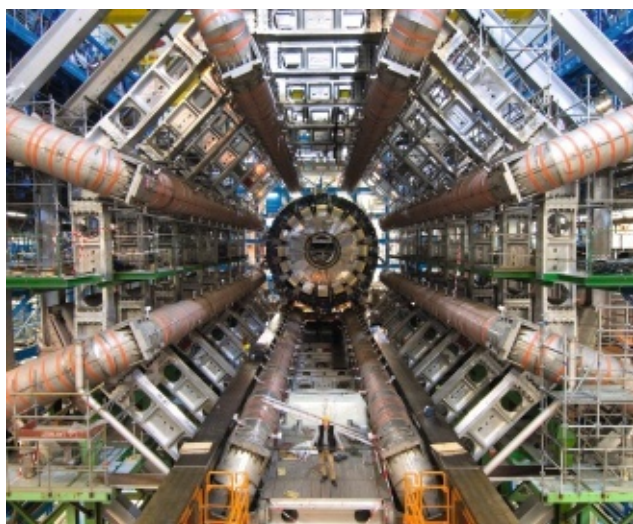
Mais pour les collisions complexes, toute la lourdeur de la technique de Feynman resurgit. On classe les diagrammes de Feynman en fonction du nombre de lignes externes et du nombre de boucles qu'ils contiennent (voir l'encadré page 76). Les boucles représentent une des composantes fondamentales de la théorie quantique : elles mettent en jeu des particules « virtuelles », qui, bien qu'inobservables, ont un effet mesurable. Ces particules obéissent aux principes habituels de la physique, comme la conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement, mais leur

masse peut différer de celle de la particule « réelle » correspondante. Les boucles représentent des cycles de vie éphémère : les particules naissent, puis s'annihilent très peu de temps après. Leur masse détermine leur durée de vie : plus elles sont lourdes, plus cette durée est brève.

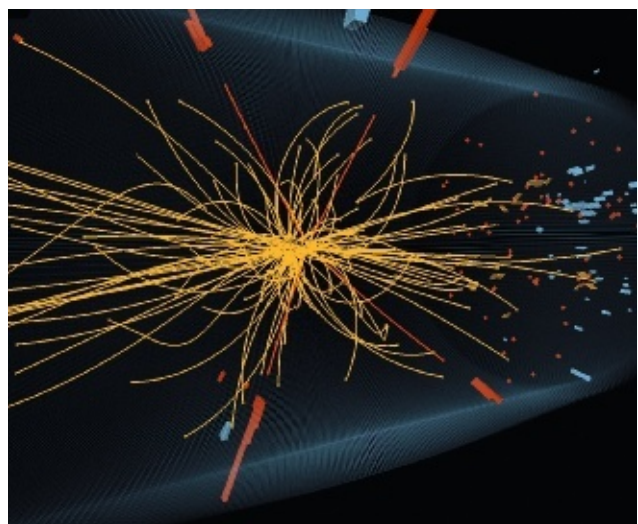
Les diagrammes de Feynman les plus simples ne comportent pas de boucles et sont appelés diagrammes en arbre. En électrodynamique quantique, le diagramme le plus simple de tous représente deux électrons qui se repoussent en échangeant un photon. Les diagrammes se compliquent par l'ajout progressif de boucles. Cette technique de calcul est qualifiée de perturbative. Cela signifie qu'on part d'une estimation approchée (représentée par les diagrammes en arbre) et qu'on l'améliore progressivement en ajoutant des termes *a priori* de plus en plus petits (représentés par les diagrammes à boucles).

Par exemple, le photon échangé entre deux électrons peut disparaître spontanément et se transformer en un électron et un antiélectron virtuels, qui se recombinent très peu de temps après pour redonner naissance à un photon. À mesure que le nombre de leurs particules virtuelles augmente, les diagrammes décrivent les effets quantiques avec une précision croissante.

Toutefois, même les diagrammes en arbre peuvent être un défi. Dans le cas de la chromodynamique quantique, si vous aviez le courage de considérer une collision entre deux gluons incidents qui produisent huit gluons sortants, vous devriez



LE DÉTECTEUR ATLAS DU CERN (à gauche, lors de sa construction) enregistre le signal de centaines de particules produites lors de la collision entre deux protons de haute énergie (à droite, une reconstitution



numérique d'une collision dans le détecteur CMS). Les expérimentateurs estiment la probabilité qu'un événement se produise et la comparent avec les calculs théoriques.

dessiner dix millions de diagrammes en arbre et calculer la valeur de chacun. Une approche récursive, introduite dans les années 1980 par Frits Berends, de l'Université de Leyde, aux Pays-Bas, et Walter Giele, maintenant au Fermilab, aux États-Unis, a permis de résoudre le problème pour les diagrammes en arbre, mais n'a pu être étendue aux boucles.

L'introduction d'une seule boucle fait exploser à la fois le nombre de diagrammes et la complexité de leur calcul. La force brute, même avec l'aide d'ordinateurs de plus en plus nombreux et puissants, finit par céder devant le nombre croissant de particules ou de boucles mises en jeu.

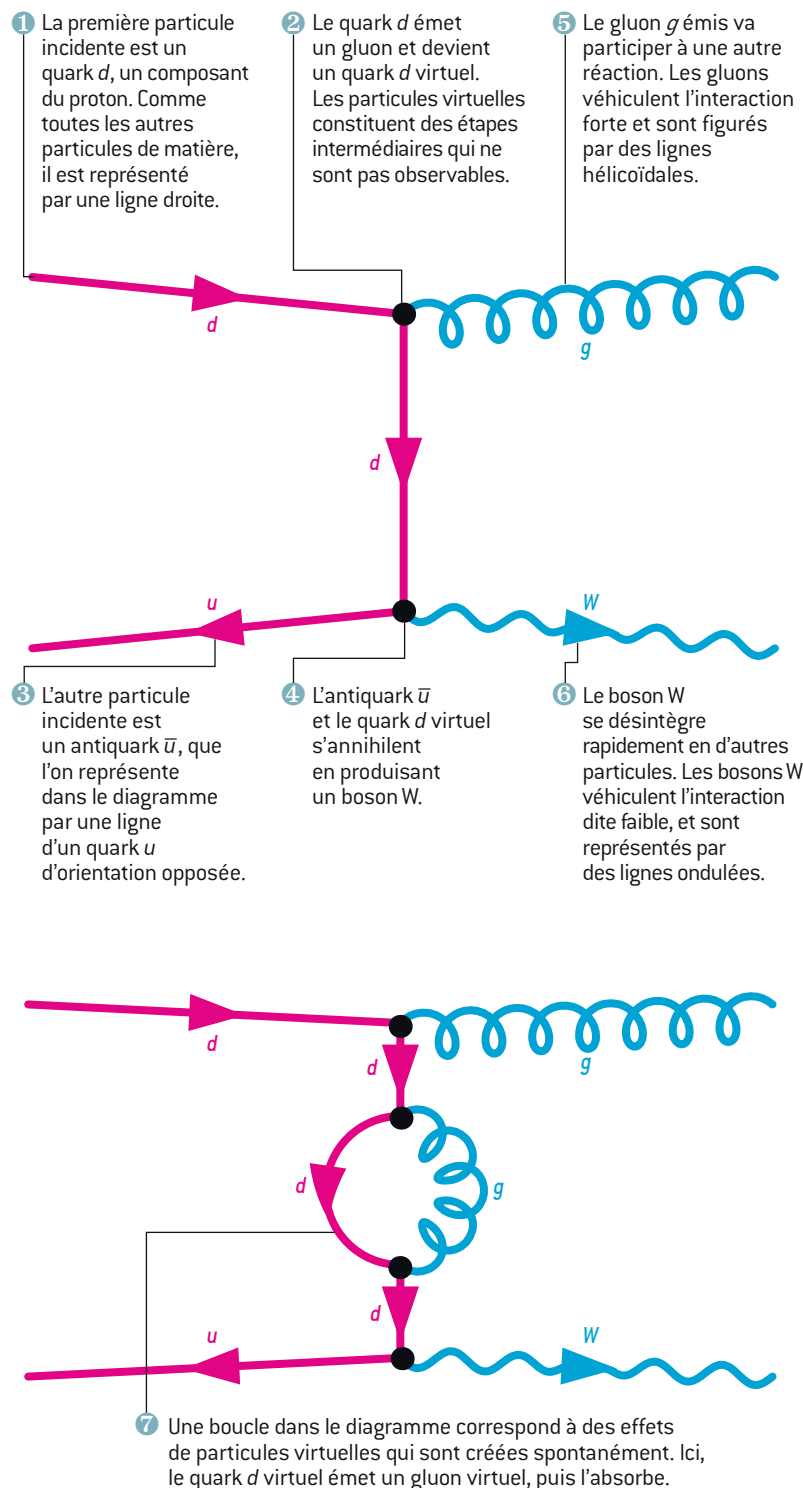
Une alternative fondée sur l'unitarité

Plus grave encore, ce qui était au départ une façon concrète de visualiser le monde microscopique peut au contraire le faire disparaître dans l'obscurité. Le grand nombre de diagrammes et leur complexité font perdre de vue la physique sous-jacente. De façon surprenante, le résultat final de calculs laborieux peut être assez simple. Des diagrammes distincts peuvent se compenser quand on les additionne, et parfois des formules formées de millions de termes finissent par se réduire à un seul. Ces compensations suggèrent que les diagrammes de Feynman ne sont pas les bons outils pour la tâche – c'est un peu comme si on voulait enfoncer un clou avec une plume. Il doit exister une meilleure façon de s'y prendre.

Au fil des ans, les physiciens ont essayé de nombreuses autres techniques. Petit à petit, une ébauche d'alternative aux diagrammes de Feynman s'est dessinée. Notre propre participation à ces efforts a commencé au début des années 1990, quand deux d'entre nous (Z. Bern et D. Kosower) ont montré que la théorie des cordes simplifie les calculs de la chromodynamique quantique en résumant tous les diagrammes de Feynman pertinents à une seule formule. Grâce à ce résultat, nous avons analysé une réaction qui n'avait jamais été comprise en détail auparavant : la diffusion de deux gluons d'où émergent trois gluons, avec une boucle de particules virtuelles. Ce processus était très compliqué pour l'époque, mais il pouvait être entièrement décrit par une formule d'une remarquable simplicité, tenant sur une unique page.

QUAND LES PARTICULES ENTRENT EN COLLISION

Tout autour de nous, sans cesse, les particules élémentaires s'attirent, se repoussent, se heurtent ou s'annihilent. Pour résumer de façon simple le calcul des probabilités des interactions, Richard Feynman a créé une représentation par des diagrammes. Ceux présentés ci-dessous décrivent deux quarks qui interagissent et disparaissent en donnant naissance à un gluon et un boson W. Le diagramme se lit de gauche à droite. Les particules incidentes viennent du côté gauche, les produits de la réaction partent vers la droite.



Zvi Bern, Lance Dixon, David Kosower et Harald Ita

La formule était tellement simple qu'avec David Dunbar, qui travaillait à l'époque à l'Université de Californie à Los Angeles, nous pouvions comprendre la diffusion presque entièrement en termes du principe d'unitarité, qui exige que l'addition des probabilités de tous les résultats possibles donne 100 pour cent. L'unitarité est implicite dans la technique de Feynman, mais tend à être masquée par la complexité des calculs. Nous avons donc

développé une technique alternative qui la place au premier plan. Déjà dans les années 1960, des physiciens avaient eu l'idée de fonder les calculs sur l'unitarité. La suggestion n'avait pas abouti, mais comme souvent en science, elle est réapparue sous une nouvelle forme.

La clef du succès de la méthode d'unitarité est d'éviter l'utilisation directe de particules virtuelles, qui sont la principale raison pour laquelle les diagrammes de

Feynman deviennent aussi compliqués. Ces particules ont des effets à la fois réels et fictifs. Par définition, les effets fictifs doivent s'annuler et disparaître dans le résultat final, si bien qu'ils constituent une sorte de bagage excédentaire dans les calculs.

Calculer l'interaction de façon plus globale

La méthode peut être comprise par analogie avec un système de métro complexe comme celui de Londres, où il existe de multiples itinéraires entre deux stations données. Supposez que nous voulions connaître la probabilité qu'un usager entré à *Mile End* sorte à *Wimbledon*. La technique de Feynman additionne les probabilités de tous les itinéraires concevables. Si on pouvait la transposer, les diagrammes de Feynman incluraient des trajets à travers la roche, en plus des trajets dans les couloirs et les tunnels. Ces trajectoires irréalistes sont les analogues des contributions fictives des boucles de particules virtuelles. Elles s'annulent au bout du compte, mais doivent être conservées pendant les étapes intermédiaires.

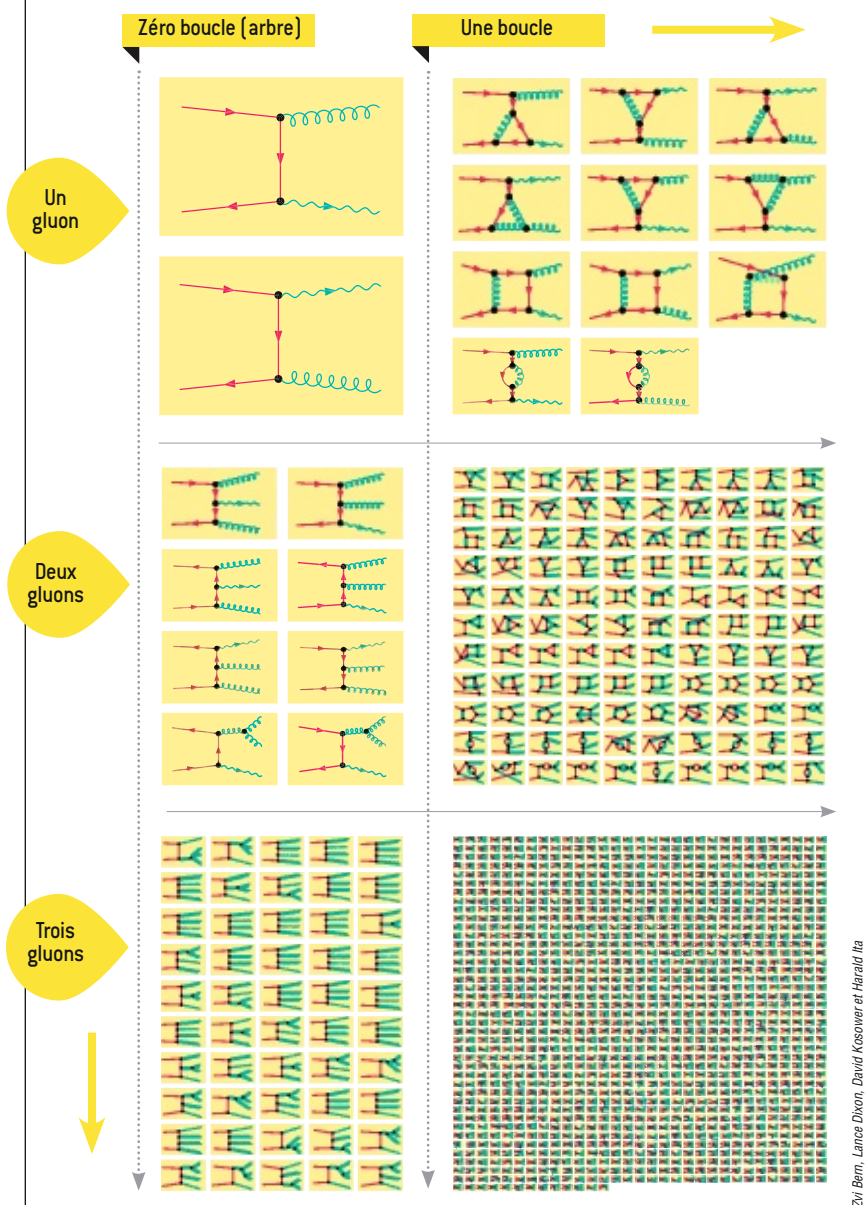
Avec l'unitarité, nous ne prenons en compte que les itinéraires qui ont un sens. Nous calculons la probabilité qu'une personne emprunte tel ou tel itinéraire en décomposant le problème : quelle est la probabilité que la personne passe par un tourniquet donné, un couloir donné ou un autre, et ce à chaque étape du voyage ? Cette procédure réduit considérablement la taille des calculs.

Le choix entre la méthode de Feynman et la méthode d'unitarité n'est pas une question de juste ou de faux. Toutes deux expriment les mêmes principes physiques de base et donneraient à la fin les mêmes valeurs de probabilité. Mais elles représentent différents niveaux de description. Un unique diagramme de Feynman, parmi les dizaines de milliers pour une collision complexe, est comparable à une unique molécule dans une gouttelette de liquide. En principe, on peut déterminer le comportement du fluide en suivant chacune de ses molécules, mais c'est fastidieux, voire irréaliste, et très peu éclairant. On a tout intérêt à considérer des propriétés plus globales telles que la vitesse du fluide, sa densité et sa pression.

De même, au lieu de considérer une interaction de particules comme étant construite élément par élément à partir de

UNE MYRIADE DE DIAGRAMMES

Pour calculer la probabilité d'un processus entre particules, il faut considérer toutes les façons dont les particules peuvent interagir. Chaque diagramme de Feynman représente une possibilité. Une interaction quark-antiquark peut produire plus d'un gluon, ou impliquer plus d'une boucle de particules virtuelles, ou les deux à la fois. Les calculs deviennent rapidement impossibles à gérer.



Zvi Bern, Lance Dixon, David Kosower et Harald Ita

diagrammes de Feynman, les physiciens peuvent se la représenter de façon globale. Nous nous concentrons sur les propriétés qui régissent le processus dans son ensemble – l'unitarité et des symétries spéciales auxquelles la méthode d'unitarité donne la prééminence. Dans des cas particuliers, nous pouvons faire des prévisions théoriques avec une parfaite précision, ce qui aurait exigé un nombre infini de diagrammes avec la technique de Feynman.

Cette méthode offre d'autres possibilités, comme la décomposition des processus. Une équipe de l'Institut d'étude avancée de Princeton – Ruth Britto, Freddy Cachazo, Bo Feng et Edward Witten – a montré que, pour les diagrammes en arbre, il était possible de calculer la probabilité d'un processus impliquant cinq particules à partir d'une interaction à quatre particules suivie d'un dédoublement de l'une d'elles. Ce résultat est surprenant, car les deux processus semblent très différents. Il est ainsi possible de fractionner un problème en éléments plus simples.

Le LHC est le lieu idéal pour tester l'efficacité de la méthode: les collisions de protons sont très complexes. Feynman les avait autrefois comparées à la démarche qui consisterait à fracasser des montres suisses les unes sur les autres pour comprendre leur mécanisme, et sa technique de calcul a bien du mal à suivre ce qui se passe pendant le choc. Les protons ne sont pas des particules élémentaires, mais de petits assemblages de quarks et de gluons liés par l'interaction forte. Quand ils se heurtent violemment, les quarks et les gluons interagissent, et d'autres quarks et gluons sont produits. Ils s'agrègent finalement en particules composites qui émergent du collisionneur en jets étroits.

Ce fatras peut cacher des particules nouvelles, des symétries nouvelles, voire de nouvelles dimensions de l'espace-temps. Il est difficile de les distinguer des phénomènes déjà connus. Les différences sont minimes et passent facilement inaperçues. Cependant, avec la méthode d'unitarité, nous pouvons décrire la physique ordinaire avec une précision telle que les phénomènes inédits se détacheront bien.

Par exemple, Joe Incandela, de l'Université de Californie à Santa Barbara, l'actuel porte-parole de l'expérience CMS du LHC qui implique plus de 2000 physiciens, nous a suggéré un problème concernant la traque par son équipe de particules exotiques, celles qui consti-

tuent la matière noire, dont on suppose l'existence, mais qui n'a pas encore été identifiée. Si le LHC produit certaines de ces particules – qui interagissent très peu avec la matière ordinaire –, elles échapperont au détecteur CMS, en donnant l'impression que de l'énergie a disparu. Cette perte d'énergie signalerait la production de ces particules. Malheureusement, d'autres particules ont le même comportement. Par exemple, le LHC produit souvent un boson Z, lequel se désintègre une fois sur cinq en deux neutrinos qui, eux aussi, échappent au détecteur. Comment prédire le nombre de ces particules dont les effets imitent ceux des particules de matière noire ?

Appliquer la méthode aux collisions du LHC

L'équipe de J. Incandela proposait d'estimer le nombre de neutrinos produits dans le détecteur CMS et de voir s'ils expliquent entièrement la perte apparente d'énergie. Dans le cas contraire, cela pourrait signifier que le LHC crée de la matière noire. Cette idée est typique des méthodes indirectes utilisées par les physiciens qui n'ont pas les moyens d'observer directement certains types de particules. Mais pour que cette stratégie donne un résultat, l'équipe de J. Incandela avait besoin de connaître précisément le nombre de neutrinos: avec une précision insuffisante, cette stratégie échouerait. Avec plusieurs collègues, nous avons étudié le problème à l'aide des nouveaux outils théoriques et nous avons pu donner à J. Incandela l'assurance que la précision était suffisante. L'équipe CMS a appliqué sa technique et a obtenu des contraintes très strictes sur les particules de matière noire. Notre technique avait démontré son utilité.

Ce succès nous a incités à aller plus loin, avec des projets plus ambitieux. Au sein d'une équipe internationale, nous avons calculé la probabilité que les collisions au LHC produisent une paire de neutrinos accompagnée de quatre jets – un jet est un ensemble de particules se déplaçant sensiblement dans la même direction. Effectués au moyen des diagrammes de Feynman, de tels calculs auraient pris une dizaine d'années. La méthode d'unitarité nous a permis d'en venir à bout en moins d'une année. À notre grande satisfaction, une autre équipe du LHC, l'expérience ATLAS, a déjà comparé nos valeurs avec ses données, et les résultats sont pour l'instant en excellent accord.

■ LES AUTEURS



Zvi BERN est professeur de physique à l'Université de Californie à Los Angeles.



Lance DIXON est professeur au Centre de l'accélérateur linéaire de Stanford.



David KOSOWER est chercheur à l'Institut de physique théorique du Centre de recherche du CEA [Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives] à Saclay.

■ BIBLIOGRAPHIE

C. F. Berger *et al.*, Precise predictions for W+4 jet production at the Large Hadron Collider, *Physical Review Letters*, vol. 106, n° 9, 2011.

K. Stelle, Supergravity : Finite after all ?, *Nature Physics*, vol. 3, pp. 448-450, 2007.

D. Kaiser, Un outil universel de la physique, *Pour la Science*, n° 333, juillet 2005.

S. K. Blau, Lovely as a tree amplitude : Hidden structures underlie Feynman diagrams, *Physics Today*, vol. 57, n° 7, p. 19, 2004.

La méthode d'unitarité a également facilité la recherche du boson de Higgs, une particule postulée dans les années 1960 pour compléter le modèle standard. Une manifestation possible de cette particule est la production d'un unique électron, une paire de jets et un neutrino, le neutrino qui donne dans ce cas encore l'impression que de l'énergie a disparu. Le même résultat peut également être produit par des réactions de particules où le boson de Higgs n'intervient pas. Une des premières utilisations de la méthode d'uni-

tarité a été de calculer la probabilité précise de ces réactions qui sont sources de confusion. Et en juillet 2012, les physiciens du LHC ont annoncé la découverte d'une nouvelle particule, qui est probablement le boson de Higgs.

Une utilisation encore plus impressionnante de la méthode d'unitarité est l'étude de la gravitation quantique. Pour que les physiciens puissent développer une théorie entièrement cohérente de la nature, on doit trouver un moyen de faire entrer la gravitation dans le cadre de la physique quantique. Si la gravitation se comporte comme les autres interactions de la nature, elle devrait être véhiculée par des particules, les gravitons, qui entreraient en collision et seraient diffusées comme les autres particules. Et nous pourrions dessiner des diagrammes de Feynman.

À la poursuite de la gravitation

Cependant, les premières tentatives visant à décrire la diffusion de gravitons en créant le plus simplement possible une version quantique de la théorie d'Einstein ont conduit à des prédictions aberrantes : des valeurs infinies pour des quantités qui devraient clairement être finies. Les quantités infinies ne sont pas, en elles-mêmes, un problème. Elles peuvent apparaître à des étapes intermédiaires des calculs même dans des théories bien sages comme le modèle standard, mais elles devraient s'annuler pour toutes les quantités mesurables. Pour la gravitation, ces annulations ne semblaient pas avoir lieu.

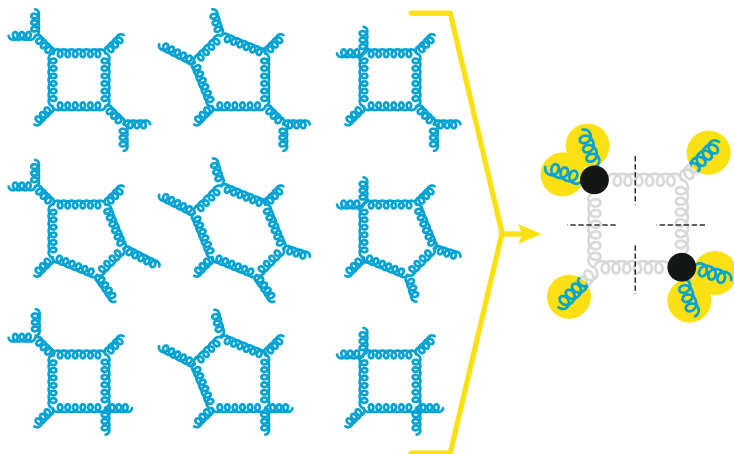
Une issue possible est l'existence de particules non encore découvertes qui mettraient au pas ces effets quantiques. Cette idée, incorporée par les théories dites de supergravité, a été très étudiée dans les années 1970 et au début des années 1980. Mais l'enthousiasme est retombé quand des arguments indirects ont suggéré que des infinis dépourvus de sens apparaîtraient toujours dans les diagrammes à trois boucles ou davantage. La supergravité semblait vouée à l'échec.

Cette déception a conduit beaucoup de physiciens à se tourner vers la théorie des cordes. Celle-ci se démarque du modèle standard : les particules élémentaires ne sont plus de minuscules points, mais des oscillations de cordes unidimensionnelles. Les interactions des particules sont réparties sur les cordes plutôt que

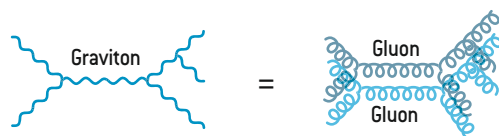
SE SIMPLIFIER LA VIE

Les auteurs ont développé une alternative aux diagrammes de Feynman nommée « méthode d'unitarité ». Ci-dessous, à gauche, on a représenté quelques exemples de diagrammes de Feynman à une boucle pour un processus à six gluons. Dans la méthode d'unitarité, quelques diagrammes généraux (dont un est représenté à droite) suffisent pour calculer le processus complet.

Contrairement aux diagrammes de Feynman, les échanges de particules virtuelles ne sont pas détaillés. On fixe les particules entrantes et sortantes (*en bleu*) et le diagramme est découpé selon les lignes pointillées pour obtenir quatre sous-diagrammes plus petits et plus simples à calculer. Les disques noirs représentent des processus calculés au niveau des arbres. Le produit des valeurs associées à chaque sous-diagramme correspond à un coefficient qui pondère une intégrale représentative du diagramme. Il faut calculer le coefficient et l'intégrale pour chaque diagramme de la méthode d'unitarité. La somme des intégrales pondérées permet alors de calculer la probabilité liée au processus.



La technique a mis en évidence des propriétés de la nature, implicites dans les théories, mais que le foisonnement des diagrammes de Feynman masquait. La plus frappante de ces découvertes est une voie possible pour inclure la force de gravitation. Celle-ci pourrait être véhiculée par des particules, les gravitons, qui présentent une remarquable ressemblance avec les gluons ; mathématiquement, chaque graviton équivaut à une sorte de combinaison de deux gluons. Plus précisément, la valeur correspondant à un diagramme avec gravitons s'apparente à un produit des valeurs correspondant à deux diagrammes identiques où les gravitons sont remplacés par des gluons.



concentrées en un point, ce qui évite les infinis. Mais d'un autre côté, la théorie des cordes se heurte à ses propres problèmes; par exemple, elle ne fait pas de prédictions théoriques fermes pour les phénomènes observables.

La supergravité remise au goût du jour

Au milieu des années 1990, le Britannique Stephen Hawking a plaidé pour un réexamen des théories de supergravité. Il faisait remarquer que les études des années 1980 avaient pris des raccourcis qui rendaient leurs conclusions douteuses. Mais S. Hawking ne parvint pas à convaincre, car les physiciens avaient une bonne raison de prendre ces raccourcis: les calculs complets étaient hors de portée, même des plus brillants mathématiciens. Pour savoir avec certitude si un diagramme de Feynman à trois boucles de gravitons virtuels produit des quantités infinies, il faudrait évaluer 10^{20} termes. La question semblait devoir finir sur l'étagère des problèmes indécidables.

La méthode d'unitarité a changé la donne et a remis en selle la supergravité. Ce qui aurait nécessité 10^{20} termes avec la technique de Feynman, nous le faisons maintenant avec quelques dizaines. Avec plusieurs collègues, nous avons trouvé que les spéculations des années 1980 étaient fausses. Des quantités qui semblaient vouées à être infinies se révélaient finies. Cela signifie que les fluctuations quantiques de l'espace et du temps sont beaucoup plus inoffensives dans le cadre de la supergravité qu'on ne le pensait. La supergravité est moins absurde qu'elle ne le semblait.

Plus remarquable, trois gravitons interagissent exactement comme deux copies de trois gluons en interaction. Cette propriété de double exemplaire semble persister quel que soit le nombre de particules en interaction ou le nombre de boucles de particules virtuelles impliquées. Il reste à interpréter physiquement ce résultat mathématique et à vérifier s'il est toujours vrai. Pour l'instant, le point crucial est que la gravitation pourrait en fait ne pas être très différente des autres interactions fondamentales.

Comme souvent en science, à chaque fois qu'un débat se clôt, un autre s'ouvre. Immédiatement après nos calculs pour trois boucles, les sceptiques se sont

demandé si les problèmes n'allaient pas surgir avec quatre boucles. Quand nous avons fait le calcul, nous n'avons pas décelé de difficultés. Ce succès nous a permis de remporter un pari mettant en jeu de bonnes bouteilles de vin.

La théorie de la supergravité est-elle complètement dépourvue d'infinis? Ou bien son niveau élevé de symétrie limite-t-il ses excès pour un faible nombre de boucles? Dans ce dernier cas, les problèmes devraient s'insinuer à partir de cinq boucles, et à sept boucles les effets quantiques devraient être suffisamment forts pour produire des infinis. David Gross, de l'Université de Californie à Santa Barbara, offre une bouteille de zinfandel californien si les infinis ne sont pas présents à sept boucles. Pour trancher ce dernier pari, certains d'entre nous ont entrepris de nouveaux calculs. Une absence d'infinis à sept boucles stupéfierait les sceptiques et pourrait enfin les persuader que la supergravité peut être une théorie cohérente. Mais même si elle l'est, cette théorie ne rend pas compte d'autres types d'effets, non perturbatifs, qui sont trop infimes pour être vus dans l'approche boucle-par-boucle que nous avons suivie. Pour traiter ces effets, on risque d'avoir besoin d'une théorie plus fondamentale, peut-être la théorie des cordes.

Les physiciens aiment bien se représenter les nouvelles théories comme émergeant de nouveaux principes – relativité, physique quantique, symétrie. Mais parfois, ces théories émergent simplement d'un réexamen minutieux des principes que nous connaissons déjà. La révolution silencieuse de notre compréhension des collisions de particules nous a permis de déterminer les conséquences du modèle standard avec un luxe de détails, conduisant à des améliorations significatives de notre potentiel de découverte de la physique plus fondamentale. Plus surprenant, elle nous permet de suivre les implications non explorées de la physique d'hier, parmi lesquelles une piste négligée d'unification de la gravité avec les autres interactions connues. À de nombreux égards, la route qui mène à la compréhension des interactions des particules élémentaires n'est pas du tout comparable à un trajet dans le très prévisible métro de Londres; elle s'apparente plutôt à une virée dans le magicobus de Harry Potter, où vous ne savez jamais ce qui va se passer au prochain tournant. ■


Institut de recherche pour le développement

Un éditeur pour le développement

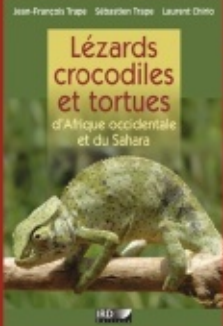
Les éditions de l'IRD vous accueilleront sur leur stand au Festival international de géographie de Saint-Dié-Les-Vosges, du 12 au 14 octobre 2012



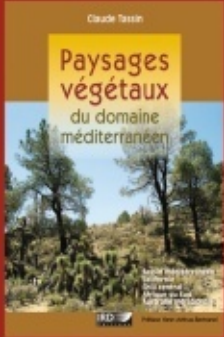
Hommes et natures
E. Motte-Florac, Y. Aumeerud-Thomas, E. Dounias
176 p., 120 photos, 35 €
978-2-7099-1724-7



Le Caire
Centre en mouvement
G. El Kadi
288 p., 247 photos, 35 €
978-2-7099-1717-9



Lézards, crocodiles et tortues d'Afrique occidentale et du Sahara
J.-F. Trape, S. Trape, L. Chirio
504 p., 750 photos, 64 €
978-2-7099-1726-1



Paysages végétaux du domaine méditerranéen
Bassin méditerranéen, Californie, Chili central, Afrique du Sud, Australie méridionale
C. Tassin
424 p., 270 photos, 45 €
978-2-7099-1731-5

Diffusion libraires : Eyrolles/Géodif
Vente par correspondance : IRD Diffusion
 32, av. Varagnat - F 93143 Bondy cedex
 Tél : 01 48 02 56 49 Fax : 01 48 02 79 09
 diffusion@ird.fr
www.ird.fr

HISTOIRE DES SCIENCES

Les multiples ancêtres du jeu de *Nim*

Piquet des cavaliers, Tiouk-Tiouk... Dès le XVI^e siècle en Europe, mais aussi en Afrique, se sont répandues diverses versions du jeu de *Nim*, un jeu numérique simple qui fournit, au début du XX^e siècle, les bases de la théorie des jeux combinatoires.

Lisa ROUGETET

Vous êtes assis face à votre adversaire. Une table où reposent trois tas d'allumettes vous sépare. Votre adversaire vient de jouer et vous laisse la configuration 7-5-3 : sept allumettes dans le premier tas, cinq dans le deuxième et trois dans le troisième. À tour de rôle, vous ne pouvez retirer d'allumettes (au minimum une) que d'une seule pile. Votre objectif est de prendre la (ou les) dernière(s) allumette(s). Par une diminution adéquate, vous pouvez vous placer en position gagnante et remporter la partie ; que faites-vous ?

Ce jeu nommé *Nim* doit son appellation au mathématicien américain Charles Bouton, qui publia en 1901 un article dans *The Annals of Mathematics* intitulé « *Nim, a game with a complete mathematical theory* » (*Nim*, un jeu avec une théorie mathématique com-

plète). Pour la première fois, ce jeu combinatoire impartial, c'est-à-dire où le hasard n'intervient pas et où les mouvements possibles sont les mêmes pour les deux joueurs, était résolu non seulement dans un cas particulier (la configuration 9-5-12), mais aussi dans le cas général (avec un nombre quelconque de tas), le tout formalisé mathématiquement (voir l'encadré page 82).

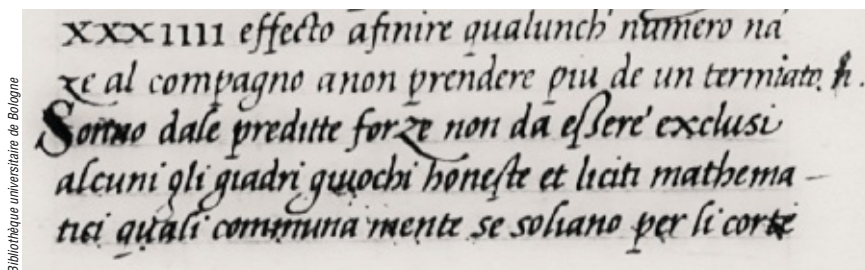
Depuis, l'article de Bouton est considéré comme l'élément déclencheur de la théorie mathématique des jeux combinatoires. Il constitue le point de départ de multiples recherches consacrées à la résolution de jeux de plus en plus compliqués avec des avancées toujours plus spectaculaires, comme la résolution du jeu de Dames anglaises en 2007 par l'équipe canadienne de Jonathan Schaeffer. Lorsque Bouton s'est intéressé au jeu de *Nim*, celui-ci existait déjà

depuis plusieurs siècles sous diverses formes, parfois assez éloignées. Présenté aux XVI^e et XVII^e siècles dans les premiers ouvrages de récréations mathématiques – des recueils qui rassemblent, aujourd'hui encore, des problèmes mathématiques amusants et leur solution – ou pratiqué dans des villages d'Afrique de l'Ouest, ce jeu était l'apanage d'une élite.

Une recette pour gagner à tous les coups

C'est dans l'ouvrage *De viribus quantitatis* du moine franciscain italien Fra Luca Pacioli publié en 1508, un des premiers recueils de récréations mathématiques, qu'apparaît l'ancêtre européen le plus ancien connu à ce jour du jeu de *Nim*. Dans l'effet XXXVIII, Pacioli confronte le lecteur au problème suivant : « Finir [le jeu] avant son compagnon, quel que soit le nombre, et sans prendre plus qu'un nombre limité. » Cet énoncé sibyllin prend tout son sens dans la résolution que donne ensuite Pacioli : il propose à deux personnes d'atteindre le nombre 30 en additionnant à tour de rôle des chiffres compris entre 1 et 6.

Il s'agit ici d'une version simplifiée du jeu de *Nim* correspondant au cas à un seul tas contenant 30 objets dont on ne peut prélever plus de 6 éléments par tour. Le jeu est énoncé sous une forme additive, où l'on ajoute des chiffres au lieu de diminuer des



1. L'EFFET XXXVIII DE L'OUVRAGE DE VIRIBUS QUANTITATIS du mathématicien Fra Luca Pacioli (1508). Le moine italien y énonce une version du jeu de *Nim* – la plus ancienne variante européenne connue à ce jour : « Finir [le jeu] avant son compagnon quel que soit le nombre, et sans prendre plus qu'un nombre limité. » Il explique ensuite que ce jeu fait partie des jeux mathématiques amusants, honnêtes et légitimes qui ont toute leur place dans les cours et auxquels tout le monde peut s'adonner comme récréation mathématique.