

lors de la naissance de l'océan, alors que celui-ci était encore peu profond. Ce mécanisme explique la présence de gisements pétroliers importants au pied des talus continentaux, voire plus au large. Les techniques d'aujourd'hui rendent possibles les forages en haute mer, mais les coûts associés sont énormes. C'est pourquoi la croissance fine de la structure des réservoirs pétroliers d'origine turbidique est un gros enjeu. Par ailleurs, les installations pétrolières posées au fond sont parfois directement menacées par les glissements et les avalanches. L'IFREMER collabore avec les pétroliers tant pour les aider à apprécier le risque associé aux avalanches que pour les aider à établir la structure sédimentaire des pièges à pétrole.

Quels enjeux ?

C'est ainsi qu'IFREMER et la Société *Elf-Aquitaine Production* (qui fait aujourd'hui partie de *Total*) ont lancé en 1998 le projet de recherche ZaiAngo visant à explorer, décrire et comprendre la marge continentale face au Gabon, au Congo et à l'Angola et plus particulièrement le réseau de vallées sous-marines du Zaïre. Ce projet faisait suite à la découverte par 1350 mètres de fond du champ pétrolier Girasol à l'intérieur de certaines paléovallées sous-marines du Zaïre. Situées au large de l'Angola, ces vallées vieilles de 15 millions d'années sont recouvertes aujourd'hui par près de 2000 mètres de sédiments. L'objectif principal du projet était de mieux connaître leur structure interne.

Outre ces applications industrielles, vers où se dirige la recherche sur les avalanches sous-marines ? Pour le

moment, notre connaissance de ce phénomène est surtout empirique. Pour progresser, il va nous falloir associer la collecte de données d'observation *in situ* et la modélisation. Depuis quelques années, on tente de placer des instruments de mesure dans le passage des avalanches afin de préciser leurs caractéristiques. Pour le moment, les problèmes de capteurs et d'ancrage restent difficiles à résoudre, mais il est d'ores et déjà clair que les géologues disposeront de stations d'observations utilisables d'ici à quelques années. Quant à la modélisation, elle devra combiner le développement de codes numériques et la réalisation d'expériences de calibration en bassin afin de simuler les différents types d'avalanche. On espère ainsi apprécier plus précisément ce qui déclenche les avalanches, ainsi que leur impact tant sur le fond que sur les structures industrielles qu'elles rencontrent sur leur chemin, tels les câbles sous-marins, les pipelines ou gazoducs, les têtes de puits de forage... Plus généralement, on voudrait aussi connaître leur influence sur les écosystèmes des profondeurs marines.

Bruno SAVOYE, géologue, est responsable du Laboratoire de sédimentologie marine du Centre IFREMER de Brest.

B. SAVOYE, *Océans, marge et pétrole profond*, in *Accès*, pp. 262-263, 2002.

N. BABONNEAU et al., *Morphology and architecture of the present canyon and channel system of the Zaire deep-sea fan*, in *Marine and Petroleum Geology*, vol. 19, pp. 445-467, 2002.

A. HUGOT et al., *Nouvelle modélisation des écoulements gravitaires sous-marins : application à l'effondrement de Nice de 1979*, in *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 333, série II, 133-139, 2001.

Abonnement Spécial Été



54 € seulement
au lieu de ~~77,80 €*~~

30% de réduction

Les avantages de l'abonnement

- ☒ Je profite d'un tarif avantageux
- ☒ Je bénéficie de tous les services de www.pourlascience.com
- ☒ Je reçois **Pour La Science** directement chez moi, avant sa parution en kiosque
- ☒ Je lis un n° de plus de **Pour La Science**

En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-dessus sont susceptibles d'être communiquées à des tiers. Elles peuvent donner lieu à l'émission de documents d'avis et de notification auprès de Pour La Science. Pour plus d'informations, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'autres organismes. En cas de refus de votre part, il vous suffira de nous prévenir par simple courrier.

*Par rapport au prix hors taxes

Offrez-vous **Pour La Science**
13 n°s au prix de 12 !

BON D'ABONNEMENT

À retourner, accompagné de votre règlement à
Abonnements **Pour La Science** - 8 rue Férou - 75278 Paris cedex 06

☐ **OUI**, je m'abonne à **Pour La Science**
avec l'offre spéciale été : 13 n°s dont 1 spécial
pour **54 € seulement** au lieu de **77,80 €***

☐ Je règle par :

☐ Chèque ci-joint

☐ Carte bancaire

Numéro de la carte :

_____ ** Date d'expiration _____

Signature :

**Inscrire les 3 derniers chiffres de la série de 7 figurant au dos de votre carte.

Mes coordonnées :

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Ville : _____

Code Postal : _____

ENPLSES

Un outil universel de la physique

Les diagrammes inventés par Richard Feynman ont sorti l'électrodynamique quantique d'une impasse calculatoire. Ils ont bouleversé la pratique de la physique des particules et de bien d'autres domaines.

David Kaiser

Le légendaire physicien George Gamow expliquait un des avantages de son métier : il pouvait s'allonger sur un divan et fermer les yeux, personne ne savait s'il travaillait ou dormait. La facétie fait sourire, mais c'est une mauvaise représentation du travail des théoriciens dont la recherche n'est pas constituée de pensées abstraites déconnectées de la pratique calculatoire.

Depuis le milieu du XX^e siècle, les physiciens théoriciens utilisent des « hiéroglyphes », dénommés diagrammes de Feynman, qui les aident à effectuer des calculs difficiles. Toutefois, les physiciens ont dû apprendre à s'en servir.

Le physicien théoricien américain Richard Feynman inventa ces diagrammes à la fin des années 1940 afin de simplifier les calculs quantiques des interactions électromagnétiques (électrodynamique quantique ou QED pour *Quantum electrodynamics*). Ces diagrammes intéressèrent vite les spécialistes du noyau atomique et de la physique des particules, puis les spécialistes du problème à n corps en théorie de la matière condensée. À la fin des années 1960, des physiciens commencèrent à les utiliser pour mener des calculs en théorie de la gravitation. Les diagrammes de Feynman ont amélioré la pratique calculatoire des physiciens, tout comme les calculs par ordinateur ont permis le décryptage du génome.

Les physiciens englués

Feynman présenta ses diagrammes novateurs lors d'un colloque organisé dans un hôtel des Pocono Mountains en Pennsylvanie au printemps 1948. Vingt-huit théoriciens s'y étaient réunis pendant plusieurs jours pour d'intenses discussions et la plupart travaillaient à des problèmes d'électrodynamique quantique « non triviaux », selon l'euphémisme de l'époque.

En électrodynamique quantique, les électrons et les autres particules fondamentales échangent des photons virtuels (des particules « fantômes » de lumière) qui véhiculent l'interaction électromagnétique. Une particule virtuelle emprunte son énergie au vide pour commencer une existence éphémère à

partir de rien. Ces particules virtuelles restituent l'énergie empruntée et disparaissent en un temps très court déterminé par le principe d'incertitude de Heisenberg.

Deux difficultés principales sabordaient les efforts des physiciens. D'abord, ils savaient, depuis le début des années 1930, que l'électrodynamique quantique conduisait à des quantités infinies. Les physiciens répondaient à des questions élémentaires (par exemple : quelle est la probabilité pour que deux électrons se rencontrent ?) par des approximations acceptables du premier ordre ; hélas, dès qu'ils tentaient de pousser leurs calculs à une précision supérieure, la validité des calculs s'effondrait. La source de la difficulté était le photon virtuel, susceptible d'emprunter une quantité quelconque d'énergie, voire une quantité infinie, tant qu'il la restituait vite : des quantités infinies surgissaient.

Le second problème était le formalisme, d'une insupportable lourdeur, un cauchemar algébrique où il fallait combiner les contributions des différents termes. Les électrons pouvaient interagir en échangeant un nombre arbitraire de photons : plus ils échangeaient de photons, plus les expressions, qu'il fallait sommer, devenaient inextricables.

Tous les espoirs n'étaient cependant pas perdus : Heisenberg, Pauli, Dirac et les autres architectes de l'électrodynamique quantique pensaient qu'ils pouvaient simplifier ce calcul compliqué, en raison de la faible valeur de la charge e de l'électron (e^2 est approximativement égal à $1/137$ dans des unités adéquates). À chaque fois que l'on introduit un nouveau photon échangé par une paire d'électrons, on introduit un facteur e^2 . Un scénario où les électrons n'échangent qu'un photon comporte donc un facteur e^2 , celui où les électrons échangent deux photons ne pèse que d'un facteur e^4 , beaucoup plus petit. Ce dernier événement ne contribuerait au calcul total qu'un centième de l'échange d'un seul photon. Le terme correspondant à l'échange de trois photons serait un dix millièmes de fois plus petit ; aussi les calculs pourraient-ils être tronqués après quelques termes.

Ce calcul est une méthode dite perturbative : on ne conserve que les premiers termes, car les contributions des suivants sont supposées insignifiantes. Le calcul est