

ART & SCIENCE

Le réveil de la matière fatiguée

Comment donner à voir le vide quantique ? La parole abstraite des scientifiques s'associe à l'expression artistique de danseurs, de vidéastes, de musiciens... pour raconter l'origine de l'Univers.

Loïc MANGIN

Comment est né l'Univers ? Selon les hypothèses en vigueur aujourd'hui, il résulterait des fluctuations du vide quantique ! Cette réponse est peu satisfaisante, car elle conduit à de nombreuses autres interrogations, à commencer par « Qu'est-ce que le vide quantique ? ».

À ce stade, deux options sont possibles : soit vous vous inscrivez à l'université pour faire de longues études de physique, soit vous guettez la venue dans votre région de *Origins*. Il s'agit d'un spectacle imaginé par la journaliste de radio Marie-Odile Monchicourt avec la participation de nombreux scientifiques, dont Michel Spiro, ancien président du conseil du Cern. Citons également parmi les contributeurs Hubert Reeves, Étienne Klein, Marc Lachièze-Rey, Pierre Sonigo, Sandrine Laplace, Stéphane Dugowson, Anatole Khelif...

L'idée centrale du projet est de donner à voir des concepts ardues qui défient le sens commun (c'est bien le cas du vide quantique) à l'aide d'un outil inédit de divulgation des connaissances, en l'occurrence un spectacle. Dans celui-ci, mis en scène par Jack Souvant, trois acrobates danseurs évoluent, parfois accrochés à des filins, sur une structure aérienne constituée d'éléments métalliques, tels des mâts, des escaliers et des rampes (voir les photographies page ci-contre). La musique a été composée par Benjamin Moussay.

Par ailleurs, Pierrick Sorin, artiste vidéaste et scénographe, a conçu des « petits

théâtres optiques », c'est-à-dire des dispositifs dans lesquels des physiciens et des mathématiciens donnent des indications et des informations sur divers concepts (voir la figure ci-dessous). Par ce stratagème, la parole des scientifiques est transmise de façon ludique dans un contexte décalé.

Par exemple, selon É. Klein, le vide est rempli d'une sorte de matière fatiguée qui



ne demande qu'un peu d'énergie pour sortir de sa torpeur. Aussi voit-on, dans un des théâtres optiques, le physicien devenu une sorte de prince charmant réveillant une « matière au bois dormant » endormie.

Un premier volet de *Origins* consacré au vide quantique a été présenté les 15 et 16 septembre 2014 au Centre des Arts d'Enghien-les-Bains, l'établissement étant

l'un des coproducteurs du projet avec le collectif *Bonheur Intérieur Brut*.

Le projet *Origins* organise également des *Labos* où se rencontrent artistes, scientifiques, philosophes et public. Ces échanges nourrissent l'écriture du spectacle. Dans l'un d'eux, M. Spiro raconte que les idées d'Albert Einstein sont plus accessibles aujourd'hui qu'à l'époque où elles ont été énoncées, grâce à des générations de pédagogues qui se sont succédé pour les digérer et les rendre plus intelligibles.

Il en ira sans doute de même des progrès récents de la physique, notamment la découverte du boson de Higgs en juillet 2012 et la mesure précise du fond diffus cosmologique par le satellite *Planck* en 2013. Ces deux résultats majeurs sont des étapes décisives sur le chemin qui nous conduit à la compréhension de l'Univers, de ses débuts et de son histoire. Et de fait, le vide quantique est la clef de voûte de cet édifice intellectuel en construction.

Nous avons donc là aussi besoin de quelques générations de pédagogues pour bien comprendre de quoi il retourne, et *Origins* nous montre le chemin. P. Sorin prévient : « On sort du spectacle peut-être plus perdu qu'on ne l'était en y entrant, mais avec cette conscience qu'il y a quelque chose que l'on ne maîtrise pas et qui influe beaucoup sur notre manière d'être au monde. » ■

Le site de *Origins, le spectacle* pour connaître les dates des prochaines représentations et des *Labos* : www.originslespectacle.eu



© Origins

IDÉES DE PHYSIQUE

Mettez un turbo dans votre moteur

Les courses de Formule 1 sont aussi celles des ingénieurs, qui s'évertuent à concevoir des moteurs turbo plus performants.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Cette année, depuis le début de la saison, les bolides du constructeur *Mercedes* dominent sans partage les grands prix de Formule 1. L'une des clefs de ce succès est la mise au point d'un moteur turbo plus efficace que celui des concurrents. L'élément caractéristique de tels moteurs est le turbocompresseur : il récupère l'énergie restant dans les gaz d'échappement pour précompresser l'air entrant dans le moteur, ce qui augmente la puissance de ce dernier. Comment les ingénieurs de *Mercedes* ont-ils amélioré les performances de leurs moteurs ? En écartant bien l'un de l'autre les étages de compression et d'échappement de l'air.

Pour comprendre, détaillons d'abord le principe du moteur à explosion à quatre temps (voir la figure 1). Au plus bas de la course du piston, le volume de la chambre est à son maximum et rempli d'air. Ce dernier est alors comprimé par le piston toutes soupapes fermées, tandis que du carburant y est injecté dans les proportions qui assurent une combustion de tout l'oxygène disponible.

La combustion, très rapide, est déclenchée au point haut de la course du piston, grâce à une étincelle produite par la bougie. Le gaz, fortement chauffé et sous très haute pression, repousse violemment, jusqu'à son point bas, le piston qui fait tourner le vilebrequin et entraîne *in fine* le mouvement des roues. Au retour du piston, une

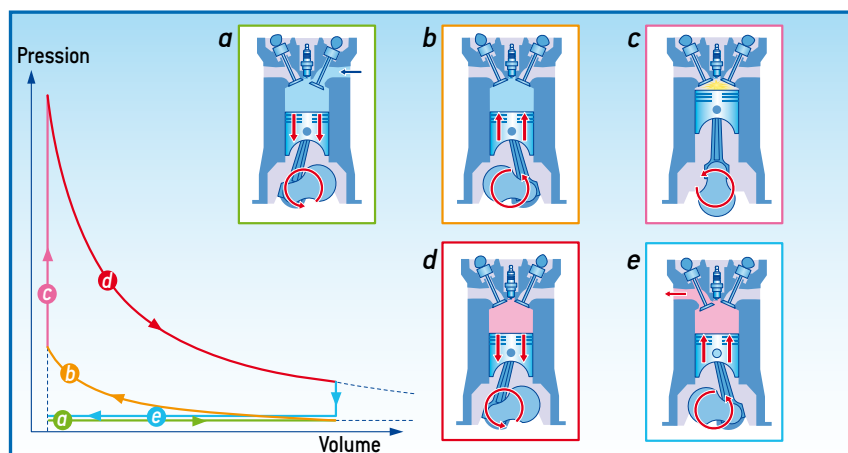
soupape s'ouvre pour que les gaz brûlés s'échappent. Puis le cycle recommence avec la fermeture de la soupape d'échappement et l'admission d'air frais par une autre soupape.

Comprimer l'air qui entre dans le moteur

Comment augmenter la puissance d'un tel moteur ? Une première idée est de raccourcir la durée d'un cycle, c'est-à-dire de faire tourner le moteur plus rapidement. Le règlement de la F1 interdit cependant de dépasser 15 000 tours par minute, valeur sans rap-

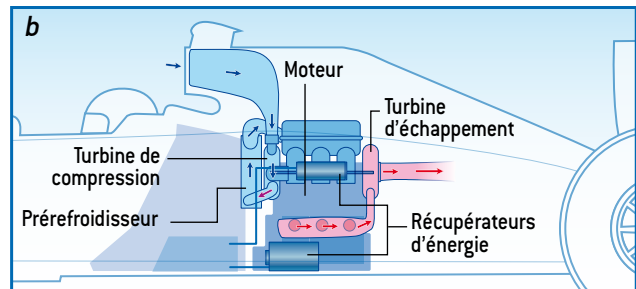
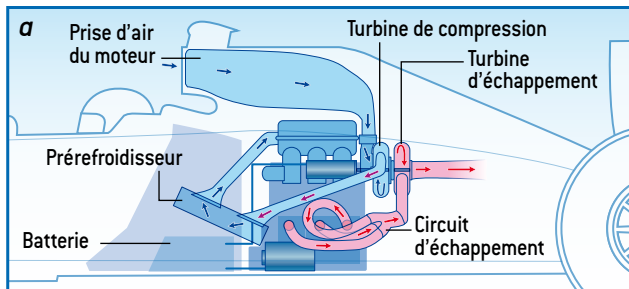
port avec les performances des voitures de tourisme (de l'ordre de 3 000 tours par minute) et pour laquelle les efforts mécaniques sont déjà considérables.

Une deuxième idée est d'apporter plus d'énergie lors de chaque cycle. Dans un moteur à combustion interne, c'est la quantité d'essence injectée qui détermine l'énergie fournie. Or cette quantité de carburant est limitée par l'oxygène disponible pour la brûler. Il faut donc plus d'oxygène, c'est-à-dire plus d'air frais en départ de cycle, le tout sans changer la cylindrée du moteur (le volume total balayé par les six pistons), que le règlement limite à 1,6 litre.



1. LE CYCLE DU MOTEUR À EXPLOSION peut être représenté dans un diagramme pression/volume, les différentes étapes du cycle étant distinguées par la couleur du tracé (à gauche). Ces étapes sont, successivement, l'admission de l'air (a, en vert), la compression (b, en orange), l'allumage (c, en rose), la détente (d, en rouge) et l'échappement (e, en bleu).

Dessins de Bruno Vazaro



2. DANS UN MOTEUR TURBO CLASSIQUE, la turbine actionnée par les gaz d'échappement est très proche de celle servant à comprimer l'air qui entre dans le moteur [a]. La proximité du circuit d'échappe-

ment, chaud (*en rose*), et de celui de compression, qui doit être froid (*en bleu*), est un inconvénient. Dans le moteur turbo développé par Mercedes, les deux circuits sont bien séparés [b].

Pour ce faire, la seule solution est de comprimer l'air avant son admission dans le moteur. Où puiser l'énergie requise ? Elle peut être prélevée directement sur l'arbre moteur ou, plus astucieusement, sur l'énergie résiduelle des gaz d'échappement.

En effet, le cycle du moteur à quatre temps a la particularité d'avoir une détente incomplète. Lorsque le piston est à son point bas, les gaz contenus dans le cylindre sont encore sous pression. L'énergie que ces gaz recèlent – de l'ordre de 10 % de l'énergie fournie par la combustion – est perdue lorsqu'ils s'échappent... sauf si l'on fait passer ces gaz dans une turbine. L'énergie ainsi récupérée peut actionner une seconde turbine qui précomprime l'air avant son admission dans le moteur. C'est le principe du turbocompresseur.

Refroidir l'air comprimé

L'idée est ingénieuse, mais des difficultés surgissent. Pour commencer, la précompression qui amène l'air entrant à une pression de 3,5 atmosphères a pour effet, comme toute compression « rapide », d'échauffer cet air. Sa température passerait ainsi de 20 °C à près de 150 °C. Or il n'est pas question de faire entrer dans le moteur un air aussi chaud, pour trois raisons.

Tout d'abord, pour une pression donnée dans le cylindre, plus l'air est froid, plus la masse d'air initiale (et donc la quantité d'oxygène disponible) sera importante. Ensuite, la température maximale en fin de compression ne doit pas dépasser la

température d'auto-ignition du mélange air-essence, car cela déclencherait une combustion spontanée et erratique. Enfin, pour un rapport de compression donné, les lois de la thermodynamique indiquent que le rendement d'un moteur est d'autant meilleur que l'écart entre les températures extrêmes atteintes au cours du cycle est grand.

Pour débiter le cycle avec la température initiale la plus basse possible, on refroidit donc l'air précomprimé avec un prérefroidisseur (ou *precooler*) – un échangeur thermique entre l'air précomprimé et l'air ambiant.

Un autre problème est que dans la disposition habituelle des moteurs turbo, la turbine d'échappement et la turbine de compression se retrouvent côte à côte. La proximité de la circulation de l'air précomprimé, que l'on veut froid, et des gaz brûlés, qui sont chauds à près de 1000 °C, complique ainsi le refroidissement.

Or les ingénieurs de Mercedes ont rompu avec cette géométrie : dans leur modèle AMG F1 W05, les deux turbines sont placées de part et d'autre du bloc moteur et donc reliées par un arbre plus long. Grâce à cette séparation, les transferts thermiques sont réduits, ce qui diminue les besoins en refroidissement et permet d'avoir un air précomprimé plus froid. Le rendement du moteur est alors meilleur, le prérefroidisseur est plus petit et il en est de même pour les bouches de prise d'air, ce qui améliore l'aérodynamisme.

Les avantages du dispositif de Mercedes ne s'arrêtent pas là. L'un des défauts du turbocompresseur est son temps de réponse :

LES AUTEURS



Jean-Michel COURT Y et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>



Retrouvez la rubrique
Idées de physique sur
www.pourlascience.fr

BIBLIOGRAPHIE

E. Hecht, **Physique**
(chapitre de thermodynamique),
de Boeck, 1999.

lorsque le pilote appuie sur l'accélérateur, il faut un certain temps pour que les gaz d'échappement fassent tourner la turbine de récupération et déclenchent la turbine de précompression. En raccourcissant le circuit du prérefroidisseur et celui de l'échappement, quitte à diminuer un peu l'efficacité du moteur, les ingénieurs ont fortement réduit ce temps.

Cet avantage est renforcé par la présence d'un récupérateur d'énergie placé sur l'arbre du turbocompresseur. Lorsque le pilote ralentit ou n'a pas besoin du turbo, l'énergie des gaz d'échappement est convertie en énergie électrique et stockée dans une batterie, dans la limite réglementaire de deux mégajoules par tour de circuit. Cette énergie peut ensuite être utilisée pour remettre en route le turbo lorsqu'il devient nécessaire et que les gaz d'échappement ne sont pas

encore assez efficaces. Le temps de réponse du turbo étant plus court, le besoin en énergie extraite du récupérateur est limité : comme l'énergie que celui-ci peut restituer ne doit pas excéder quatre mégajoules par tour, on peut utiliser plus souvent ce dispositif.

Cette nouvelle conception de l'intégration du turbo dans le moteur a rendu possibles plusieurs autres améliorations, notamment un nez plus aérodynamique et une boîte de vitesse placée plus à l'avant, d'où un meilleur positionnement du centre de gravité du véhicule. Comme la conception des Formule 1 est figée en début de saison, la concurrence n'a pu cette année que constater les performances des Mercedes, sans pouvoir s'adapter. Gageons que la créativité des ingénieurs sera au rendez-vous l'an prochain pour répondre au défi de la marque allemande. ■



{ Partagez
les savoirs }

**LES
RENDEZ-
VOUS DU
MUSÉUM**

Entrée
gratuite

CONFÉRENCES Cycle : Le Trésor du Muséum

Lundi 3 novembre – 18h :
La minéralogie : des profondeurs planétaires au corps humain
F. Guyot, professeur, minéralogiste, Muséum

Lundi 24 novembre – 18h :
La minéralogie : cristallisation naturelle ou sociétale ?
F. Farges, professeur, minéralogiste, Muséum

UN CHERCHEUR / UN LIVRE Présentation suivie d'une séance dédiées

Lundi 10 novembre – 18h :
Mort ou vif. Une histoire de la taxidermie française
J. Thiney & J. Vekemans, Éd. La Martinière/MNHN, 2014. Présenté par les auteurs

Lundi 17 novembre – 18h : Roger Caillois anthologie d'une collection
R. Caillois, photographies ; *F. Farges*, Éd. Xavier Barral/Muséum, 2014.
Présenté par *F. Farges*, minéralogiste, Muséum ; lecture des textes par les comédiens de la compagnie du Théâtre du voyageur

FILMS Cycle : Regards sur les zoos

Samedi 15 novembre
– 15h30 : Tant qu'il y aura des bêtes, Réal. : Brassai, 1956, 21 min
– 16h : Bestiaire, Réal. : D. Côté, Canada, 2012, 72 min., dès 10 ans

Samedi 22 novembre
– 15h30 : Programme de films expérimentaux 16 mm
D. Lange, H. Richter, L. Moholy-Nagy, P. Miller, Néozoon, J. Painlevé...
Durée totale : 74 min.

MÉTIER DU MUSÉUM

Dimanche 30 novembre – 15h : Régisseurs audiovisuels
C. Moisson et F. Roturier

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution — 36 rue Geoffroy St-Hilaire, Paris 5^e

**Au Jardin
des Plantes**

Détails sur mnhn.fr,
dans "l'agenda du jardin"

QUESTION AUX EXPERTS

À quelles profondeurs trouve-t-on du pétrole ?

Les réservoirs exploités se situent entre 600 et 8 000 mètres de profondeur. Mais il existe des gisements plus profonds...

Jacques PIRONON et Raymond MICHELS



En 2009, on découvrait dans le golfe du Mexique un gisement pétrolier sous 1 260 mètres d'eau et atteignant 10 600 mètres de profondeur. La présence de pétrole à une telle profondeur était inimaginable il y a une trentaine d'années. Jusqu'où en trouvera-t-on ?

Le pétrole résulte de la dégradation de débris organiques, essentiellement d'origine végétale, sous l'action de la chaleur. Or la température augmente avec la profondeur, de 30 °C par kilomètre en moyenne. Enfouis au sein d'une roche sédimentaire (la « roche-mère »), les débris organiques se transforment d'abord en un solide carboné nommé kérogène, dont le charbon est une variété, puis donnent soit du pétrole et un peu de gaz (entre 80 °C et 150 °C), soit juste du gaz (au-dessus de 150 °C). On en déduit que le pétrole se forme à des profondeurs comprises entre 2 500 et 5 000 mètres en moyenne (même si, dans certaines conditions, elles peuvent dépasser 8 000 mètres), et le gaz jusqu'à 10 000 mètres.

Les fluides pétroliers migrent à travers les pores et les fractures des roches, en général vers le haut où la pression est plus faible, jusqu'à ce qu'une couche imperméable stoppe leur progression et entraîne leur accumulation dans une roche réservoir. C'est cette dernière que l'on exploite dans le cadre des ressources pétrolières dites conventionnelles. On trouve alors du pétrole dans une large gamme de profondeurs.

L'existence d'un gisement exige d'une part que la roche contienne des pores susceptibles d'abriter les hydrocarbures, d'autre part des conditions thermodynamiques adéquates. Or la porosité diminue avec la profondeur : des chercheurs du Service géologique américain et de l'Université de Liverpool ont montré en 2000 que dans les trois premiers kilomètres, la pression mécanique referme les pores et qu'au-delà, il se produit une compaction chimique, caractérisée par la dissolution des grains rocheux.

Cependant, une étude menée dans notre laboratoire ces deux dernières années a révélé que la présence d'hydrocarbures préserve le réseau poreux, par des effets à la fois mécaniques et chimiques. Par conséquent, les roches peuvent rester assez poreuses pour contenir du pétrole jusqu'à environ dix kilomètres de profondeur, voire un peu plus.

La stabilité dépend de la composition chimique

Outre la question du réservoir, se pose celle de la stabilité thermique du fluide. Au-delà de cinq kilomètres de profondeur, lorsque les températures dépassent 150 °C, on pensait jusque dans les années 1980 que le pétrole se cassait en molécules plus petites sous l'action de la chaleur, finissant par former du méthane et du graphite.

Toutefois, la présence d'hydrocarbures liquides à une grande profondeur (9,6 kilomètres, soit 252 °C) dans un puits américain

contredisait cette idée, qui fut définitivement abandonnée en 1985 lors de la découverte du gisement d'Elgin, en mer du Nord, à 5 500 mètres de profondeur et à une température de 195 °C.

En collaboration avec le Laboratoire Réactions et génie des procédés, à Nancy, nous avons montré que la stabilité thermique du fluide dépend des interactions chimiques des hydrocarbures qui le composent. Un pétrole peut alors être stable à des profondeurs bien plus élevées qu'on ne le pensait – jusqu'à plus de 8 000 mètres (240 °C) pour celui d'Elgin.

Aujourd'hui, les réservoirs exploités se situent entre 600 et 8 000 mètres de profondeur. Aux États-Unis, la profondeur moyenne des puits de pétrole et de gaz est passée de 1 200 mètres dans les années 1950 à 2 100 mètres dans les années 2000. On estime que 15 % des réserves se situent entre 4 500 et 5 000 mètres, et 15 % au-delà.

L'exploitation des gisements profonds, notamment en mer, est rendue possible par l'augmentation du prix du baril. Selon l'*Energy Funds Advisors* (ENFA), les compagnies pétrolières louent parfois les appareils de forage à plus de 800 000 dollars (626 000 euros) par jour ! Et il faut en moyenne quatre mois pour forer jusqu'à 6 000 mètres...

Jacques PIRONON dirige le laboratoire GeoRessources (Université de Lorraine, CNRS, CREGU), à Nancy.
Raymond MICHELS est chargé de recherche au CNRS, au laboratoire GeoRessources.