

Métrologie

Un étalon quantique pour l'ampère

Fin 2018, les métrologues redéfiniront les unités du Système international (SI) – le mètre, le kilogramme, la seconde, l'ampère, le kelvin, la candela et la mole – à partir de constantes fondamentales de la physique, afin de s'affranchir des artéfacts matériels. Mais en pratique, pourront-ils utiliser ces définitions ? Pour l'ampère, c'est désormais acquis. Une équipe du Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), à Trappes, a mis au point un générateur de courant quantique exact à 10^{-8} près. Explications d'un de ses membres, Wilfrid Poirier.

à un autre grâce à une augmentation temporaire de variabilité dans l'expression des gènes.

En fait, tous ces modèles supposent que la variabilité de l'expression des gènes passe par un pic lors de la différenciation : une augmentation de l'hétérogénéité de l'expression dans la population de cellules, suivie d'une restriction de cette hétérogénéité. Et c'est bien un tel pic que Sandrine Gonin-Giraud, Olivier Gandrillon et leurs collègues ont observé en suivant l'expression de 90 gènes de cellules primaires de sang de poulet prélevées à six étapes de leur différenciation. L'intérêt de ces cellules est qu'il est possible de les maintenir en culture dans leur état d'origine, puis de déclencher leur différenciation en globules rouges au moment choisi. En mesurant l'hétérogénéité de l'expression des gènes d'une cellule à l'autre (sous la forme de l'entropie du système), les chercheurs ont montré que celle-ci augmentait pendant les huit premières heures de la différenciation, atteignant un pic entre 8 et 24 heures, puis diminuait considérablement. De plus, le pic précédait l'entrée irréversible dans la différenciation, qui se produisait entre 24 et 48 heures.

Quel déclencheur oriente alors la cellule vers le bon état différencié ? Les trois modèles proposés apportent tous des scénarios séduisants. À l'avenir, l'étude continue de l'expression des gènes dans des cellules individuelles au cours de leur différenciation aidera peut-être à affiner notre vision du mécanisme. En attendant, il n'y a plus de doute possible : la variabilité de l'expression des gènes est une composante essentielle de ce mécanisme.

Marie-Neige Cordonnier

A. Richard et al., *PLOS Biology*,
27 décembre 2016

Quel est l'étalon actuel de l'ampère ?

Wilfrid Poirier : On est toujours contraint par une définition de 1948 fondée sur la force d'Ampère, qui relève de l'électromécanique : on définit l'ampère à partir d'une force mécanique entre deux fils dans lesquels on fait circuler le courant. Le problème est qu'on ne sait pas assez bien mettre en pratique cette expérience de pensée pour réaliser l'ampère avec l'exactitude souhaitée pour les mesures électriques, c'est-à-dire à 10^{-8} près. On se fonde donc sur deux autres étalons – de tension (le volt) et de résistance (l'ohm) – que l'on sait obtenir chacun à 10^{-9} près à partir de deux effets quantiques macroscopiques de la physique du solide : l'effet Josephson pour le volt et l'effet Hall quantique pour l'ohm. Mais les techniques pour donner l'ampère appliquent la loi d'Ohm à des objets physiques – résistance à fil bobiné, référence de tension à diodes Zener – qui, bien qu'étalonnés à partir des étalons quantiques, dérivent dans le temps et limitent l'incertitude à 10^{-6} .

Ne peut-on s'affranchir de ces intermédiaires ?

W. P. : C'est l'intérêt de nos travaux : nous avons trouvé une solution qui permet de produire un circuit

quantique où l'on applique la loi d'Ohm directement aux étalons de tension et de résistance, ce qui permet de s'affranchir des résistances parasites qui les relient et de conserver leur grande exactitude.

Comment procédez-vous ?

W. P. : Nous avons multiplié les connexions entre les deux étalons et utilisé des propriétés de l'effet Hall quantique. Celui-ci se produit dans un gaz bidi-



Wilfrid Poirier, chercheur au LNE, à Trappes.

mensionnel d'électrons à basse température soumis à un fort champ magnétique. Dans ce gaz, il n'y a pas de dissipation d'énergie, et il existe donc des lignes équipotentielles. La redondance des connexions à ces lignes permet de réduire l'impact des résistances de contact. Un amplificateur cryogénique extrêmement sensible, exact à 10^{-10} près, somme alors l'ensemble des courants redondants et fournit le courant quantique de référence. Enfin, pour obtenir un courant exploitable, nous avons asservi, via

l'amplificateur, une source de courant externe sur ce courant quantifié. Notre générateur produit ainsi un courant quantifié qui peut aller de 1 microampère à 10 milliampères.

Votre approche sera-t-elle compétitive pour 2018 ?

W. P. : C'est bien parti. Dans le futur SI, l'ampère sera défini par le flux de charges élémentaires par seconde, ce que fournit notre étalon, puisque les effets quantiques y sont reliés. Une autre approche quantique existe, la pompe monoélectronique (les électrons passent un à un en cadence par effet tunnel dans un nanodispositif), mais elle livre des courants très faibles (quelques centaines de picoampères), exacts à 2×10^{-7} près. Elle n'a pas encore pu servir à étalonner un appareil commercial, contrairement à notre étalon. Celui-ci est certes encombrant – les étalons Hall et Josephson et l'amplificateur sont chacun dans un cryostat –, mais nous avons bon espoir de diminuer prochainement son incertitude d'un facteur 10 et de rassembler les effets quantiques dans un seul cryostat d'ici à dix ans. Ce qui n'empêchera pas l'étalon d'être opérationnel dès 2018.

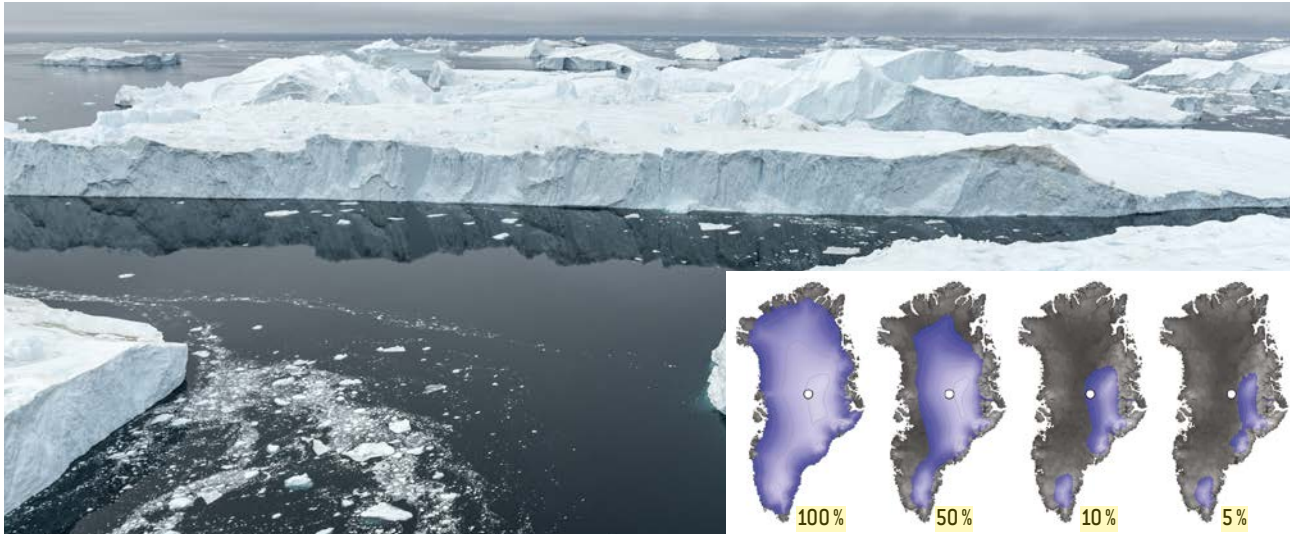
M.-N. C.

J. Brun-Picard et al., *Phys. Rev. X*,
12 décembre 2016

Climatologie

La calotte groenlandaise, plus instable qu'on ne le pensait

Au cours du dernier million d'années, la couche de plusieurs kilomètres de glace qui recouvre normalement le centre du Groenland a disparu pendant des dizaines, voire des centaines de milliers d'années, chaque fois que la température moyenne terrestre s'est stabilisée à un niveau comparable à l'actuel.



Au Groenland, les glaciers qui débouchent sur la mer transportent des sédiments boueux. L'étude de ces derniers montre que la seule partie de la calotte glaciaire restée quasi immuable recouvre les montagnes orientales.

Deux études sur le passé groenlandais intriguent : selon la première, l'est du Groenland est couvert de glace depuis des millions d'années ; selon la seconde, le centre du Groenland s'est retrouvé plusieurs fois à l'air libre au cours du dernier million d'années.

Pour parvenir à ces conclusions, les chercheurs ont mesuré dans les sédiments marins de l'est groenlandais et dans la roche sous-jacente à la calotte glaciaire d'épaisseur plurikilométrique du centre du Groenland les variations des concentrations en béryllium 10 (noté ^{10}Be) et en aluminium 26 (noté ^{26}Al).

Ces deux isotopes radioactifs sont produits par la fragmentation de noyaux de silicium et d'oxygène sous l'effet du rayonnement cosmique. Ce dernier étant divisé par deux tous les 40 centimètres de roche et tous les 120 centimètres de glace, son flux est négligeable à la base d'un épais glacier. Dans ce cas, seuls des muons, particules qui interagissent très peu, traversent

toute l'épaisseur et brisent encore quelques noyaux.

L'équipe de Paul Bierman, de l'université du Vermont aux États-Unis, a constaté que les sédiments marins transportés en mer puis relâchés par les icebergs de l'est du Groenland contiennent très peu de ^{10}Be et de ^{26}Al (environ 5000 atomes par gramme). Typiques d'un bombardement muonique, ces faibles teneurs sont maintenues sur l'épaisseur sédimentaire accumulée durant les 7,5 derniers millions d'années. On en déduit qu'au cours de cette période, la base boueuse des glaciers orientaux du Groenland se trouvait sous les glaciers.

Quant à l'équipe de Joerg Schaefer, de l'observatoire terrestre Lamont Doherty à New York, elle a mesuré les teneurs des mêmes isotopes dans un échantillon rocheux épais de 1,5 mètre et prélevé sous la calotte glaciaire du centre du Groenland. Les teneurs importantes constatées (10 000 à 25 000 atomes ^{10}Be par gramme et 55 000 à 90 000 atomes ^{26}Al) indiquent que le rayonnement

cosmique a atteint ces roches dans le passé. Combien de temps l'écran de glace est-il resté absent ? À partir des teneurs mesurées, les chercheurs estiment que cela a été le cas pendant 280 000 ans au cours du 1,1 dernier million d'années.

Chargés par la revue *Nature* de lever cette contradiction apparente, Pierre-Henri Blard et Guillaume Leduc, du CNRS, ainsi que Neil Glasser, un collègue anglais, ont pointé qu'à l'est du Groenland, une longue chaîne de montagnes atteint parfois 2000 mètres d'altitude. Lors des périodes chaudes, les glaciers ont donc pu s'y maintenir, tandis qu'ils disparaissaient au centre du Groenland. Or, au cours du dernier million d'années, la température moyenne terrestre a été comparable à deux reprises à celle d'aujourd'hui. Et que s'est-il probablement passé à chaque fois ? La glace a disparu du centre du Groenland pendant des dizaines, voire des centaines de milliers d'années tandis que l'océan mondial est monté de 7 à 10 mètres...

François Savatier

Nature, vol. 540, pp. 202-203, 252-260, 2016

7,5
millions d'années

C'est la durée pendant laquelle les montagnes de l'est du Groenland ont été constamment recouvertes de glace