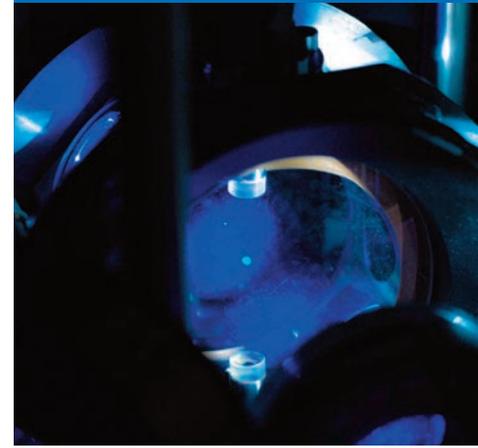




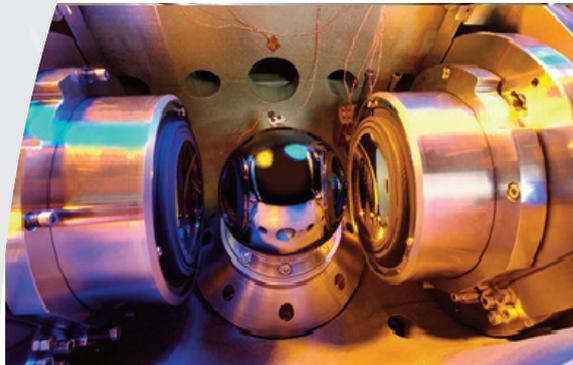
INSTITUT DE FRANCE  
Académie des sciences



## Le nouveau système international d'unités (SI) fondé sur un choix de constantes physiques fondamentales

mardi 4 décembre 2018 de 14h30 à 16h45  
Grande salle des séances  
de l'Institut de France  
23, quai de Conti, 75006 Paris

L'émergence d'une métrologie quantique a permis de rattacher toutes les unités de base à des constantes fondamentales de la physique. Un nouveau système d'unités a donc été proposé à la Conférence générale des poids et mesures de novembre 2018 qui supprime en particulier le kilogramme étalon matériel des unités de base. Cette évolution permet de garantir une universalité, une pérennité et une meilleure reproductibilité des mesures. Le choix des constantes va assurer une cohérence au nouveau système fondé essentiellement sur les progrès de l'interférométrie atomique et de la métrologie électrique quantique. Les développements de ces disciplines et leurs applications en métrologie seront discutés au cours de cette séance.



# Les organisateurs de la conférence-débat



## **Christian BORDÉ**

Académie des sciences

Christian Bordé est physicien directeur de recherche émérite au CNRS. Il est connu pour avoir inventé et développé la spectroscopie de saturation, qu'il a mise à profit pour étudier de nombreux effets nouveaux et fondamentaux en physique moléculaire. Son nom est attaché à la conception de toute une classe d'interféromètres atomiques fondés sur l'effet de recul, qui permettent de réaliser des horloges optiques, de mesurer les masses atomiques et de sonder les propriétés de l'espace-temps. En particulier, il a démontré que ces interféromètres permettaient la mesure très précise des champs d'inertie. Il a assuré à quatre reprises la présidence des séances de la Conférence générale des poids et mesures, organe exécutif de la Convention du mètre.



## **Christophe SALOMON**

Académie des sciences et Laboratoire Kastler Brossel

Christophe Salomon est directeur de recherches au CNRS, membre du laboratoire Kastler Brossel de l'École Normale Supérieure, responsable de l'équipe Gaz de Fermi ultra-froids et membre de l'Académie des Sciences. Il a réalisé des travaux sur l'application des atomes froids à la mesure du temps et aux tests de physique fondamentale avec des horloges atomiques. Il a également étudié les propriétés des gaz quantiques refroidis à des températures de quelques nanokelvin, comme la superfluidité ou les solitons d'ondes de matière. Dans le cadre du projet spatial européen Aces/Pharao, il s'intéresse aux horloges ultrastables dans l'espace et aux tests de la relativité générale.

# P programme

- 14:30**      **Ouverture de la séance**  
**Sébastien CANDEL**, président de l'Académie des sciences  
**Catherine BRÉCHIGNAC**, secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences
- 14:35**      **Fondements du système international d'unités : géométrie, action et entropie**  
**Christian BORDÉ**, Académie des sciences
- 14:55**      Discussion
- 15:05**      **Mesure précise du rapport  $h/m$  : une méthode pour relier les masses microscopiques au nouveau kilogramme.**  
**Pierre CLADÉ**, Laboratoire Kastler Brossel (LKB), groupe *Metrology of simple systems and fundamental tests*
- 15:25**      Discussion
- 15:35**      **L'ampère à l'ère quantique**  
**Wilfrid POIRIER**, Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), pôle de métrologie électrique
- 15:55**      Discussion
- 16:05**      **L'unité de temps aujourd'hui et dans le futur**  
**Sébastien BIZE**, Systèmes de référence temps-espace (SYRTE), équipe métrologie des fréquences optiques
- 16:25**      Discussion
- 16:35**      **Conclusions**  
**Christophe SALOMON**, Académie des sciences et Laboratoire Kastler Brossel

# Résumés et biographies



**Christian BORDÉ**  
Académie des sciences

Christian Bordé est physicien directeur de recherche émérite au CNRS. Il est connu pour avoir inventé et développé la spectroscopie de saturation, qu'il a mise à profit pour étudier de nombreux effets nouveaux et fondamentaux en physique moléculaire. Son nom est attaché à la conception de toute une classe d'interféromètres atomiques fondés sur l'effet de recul, qui permettent de réaliser des horloges optiques, de mesurer les masses atomiques et de sonder les propriétés de l'espace-temps. En particulier, il a démontré que ces interféromètres permettaient la mesure très précise des champs d'inertie. Il a assuré à quatre reprises la présidence des séances de la Conférence générale des poids et mesures, organe exécutif de la Convention du mètre.

## Fondements du système international d'unités : géométrie, action et entropie

L'année 2018 est celle du renouvellement complet du système d'unités avec l'ambition d'établir un système pérenne, universel et cohérent. Ce système se caractérise par l'abandon des artefacts pour se fonder uniquement sur les constantes fondamentales de la Physique. La cohérence sous-jacente du système proposé et la notion de constante fondamentale seront discutées. Un système d'unités naturelles a été introduit par Max Planck en 1899. Il est fondé sur cinq constantes fondamentales  $\hbar$ ,  $k_B$ ,  $c$ ,  $G$ ,  $\varepsilon_0$ . Les deux premières concernent respectivement les mouvements cohérents et la décohérence thermique dans l'espace des phases au moyen des concepts d'action et d'entropie. Les trois dernières précisent la géométrie de cet espace en présence d'interactions gravitationnelles et électromagnétiques. Cette géométrie est celle d'un espace à cinq dimensions introduit par Theodor Kaluza en 1921. Les progrès

considérables des interféromètres à ondes de matière dans les domaines atomique et électrique imposent aujourd'hui un nouveau système dans lequel les deux dernières constantes sont plutôt une différence de masse entre niveaux d'un même atome et la charge de l'électron. La cinquième dimension est alors le temps propre donné par les horloges atomiques. Le lien entre les deux systèmes fait intervenir la constante de structure fine et son équivalent gravitationnel. Le système proposé apparaît alors comme le meilleur compromis dans l'état actuel de nos connaissances.



## Pierre CLADÉ

Laboratoire Kastler Brossel ,  
groupe *Metrology of simple systems and fundamental tests*

Pierre Cladé est ancien élève de l'École Normale Supérieure. Il a effectué sa thèse dans l'équipe de Métrologie de systèmes simples et test fondamentaux du laboratoire Kastler Brossel, sous la direction de F. Biraben. Après deux années de post-doctorat dans le groupe W.D. Phillips au États-Unis, il a rejoint en 2007, en tant que chargé de recherche au CNRS, l'équipe où il a effectué sa thèse. Il poursuit depuis ses travaux sur la mesure de haute précision de la vitesse de recul d'un atome par interférométrie atomique et la détermination de la constante de structure fine.

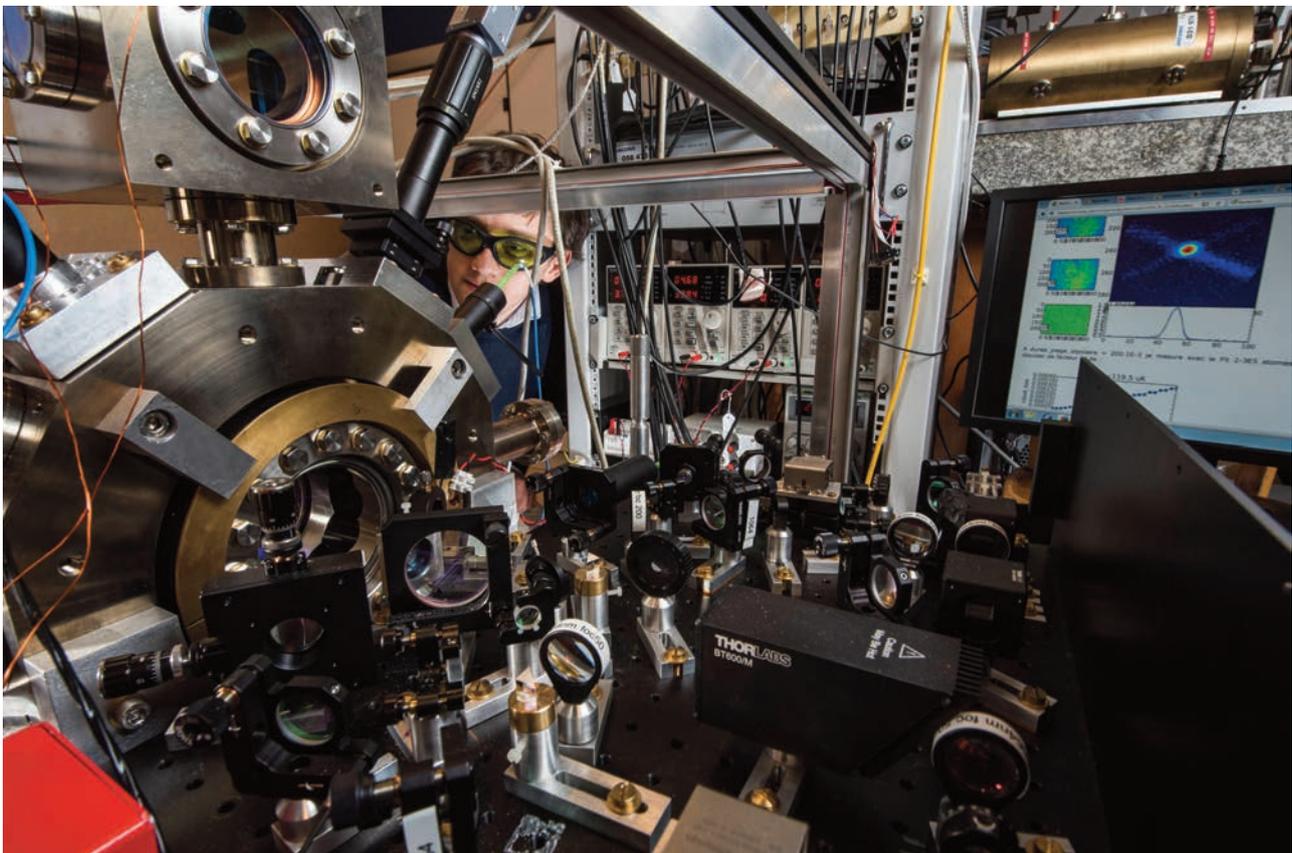


### Mesure précise du rapport $h/m$ : une méthode pour relier les masses microscopiques au nouveau kilogramme.

Le système d'unité international sera redéfini à partir des constantes fondamentales. La principale difficulté est la réalisation d'expériences permettant de relier ces constantes au kilogramme macroscopique. Pour cela deux méthodes existent : la balance du watt qui fait un lien avec la constante de Planck  $h$  et la méthode de mesure de densité par cristallographie aux rayons X (X-ray Crystal Density Method - XRCD) qui fait un lien avec la masse atomique unifiée  $m_u$ .

Depuis plusieurs années, notre équipe utilise l'interférométrie atomique pour mesurer directement le rapport  $h/m_u$  entre ces deux constantes. La mesure de ce rapport a permis de comparer les deux expériences afin de fixer la valeur de  $h$  pour la nouvelle définition. Cette mesure joue aussi un rôle important dans le nouveau SI.

Au cours de cette conférence, nous présenterons en détail la mise en pratique du kilogramme à l'aide de la méthode XRCD et de la mesure du rapport  $h/m_u$ . Nous présenterons les expériences permettant de mesurer ce rapport ainsi que leurs perspectives d'amélioration. Nous montrerons aussi comment ces expériences permettent de tester certaines lois fondamentales de la physique.





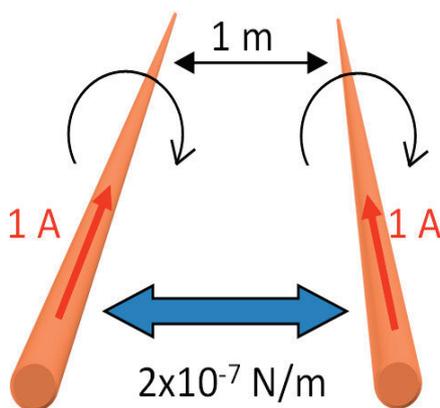
## Wilfrid POIRIER

Laboratoire national de métrologie et d'essais, pôle de métrologie électrique

Wilfrid Poirier est chercheur confirmé au Laboratoire national de métrologie et d'essais. Ancien élève de l'ESPCI, il a reçu son doctorat en physique du solide en 1997. Depuis, il consacre ses travaux de recherche à la métrologie électrique quantique, plus particulièrement à l'étude et l'application de l'effet Hall quantique. Ses recherches visent à l'évolution vers un Système International d'unités plus universel. Elles concernent les étalons quantiques de résistance, notamment en graphène, la réalisation de l'ampère à partir de la charge élémentaire, ainsi que l'instrumentation quantique.

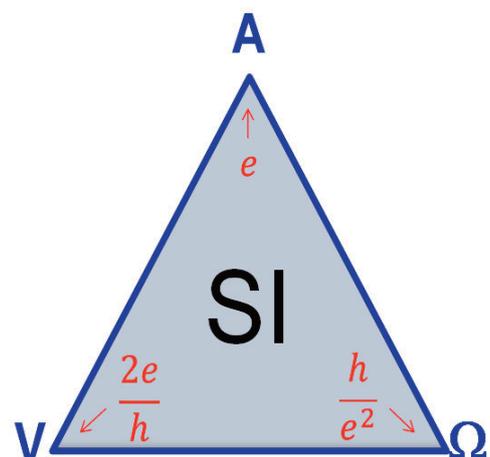
### L'ampère à l'ère quantique

La définition de l'ampère, datant de 1948, relie l'unité d'intensité du courant électrique au newton. Elle impose, de fait, une incertitude aux réalisations des unités électriques qui est attachée à la mise en œuvre d'expériences de mécanique. Cette définition ne permet pas de tirer profit de la reproductibilité exceptionnelle des étalons quantiques de tension et de résistance, respectivement fondés sur l'effet Josephson et l'effet Hall quantique, qui ont la propriété d'être uniquement liés à la constante de Planck  $h$  et à la charge élémentaire  $e$ . L'évolution vers un Système International d'unités (SI), adoptant la mécanique quantique et fondé sur des constantes universelles de définition dont  $h$  et  $e$ , va résoudre cette impasse. L'exposé présentera les réalisations, exploitant les phénomènes quantiques du solide, des unités électriques, notamment de l'ampère, du volt et de l'ohm mais également du farad, et au-delà du kilogramme. Il mettra en lumière une métrologie électrique progressant continuellement au fil des nouvelles découvertes, telle celle du graphène, et qui, entrant dans une ère d'ingénierie quantique, vise à la réalisation d'un calibrateur quantique universel.



SI actuel: illustration de la définition électromécanique de l'ampère

20 mai 2019  
→



Nouveau SI: illustration des réalisations de l'ampère, du volt et de l'ohm à partir de la constante de Planck  $h$  et de la charge élémentaire  $e$

## Sébastien BIZE

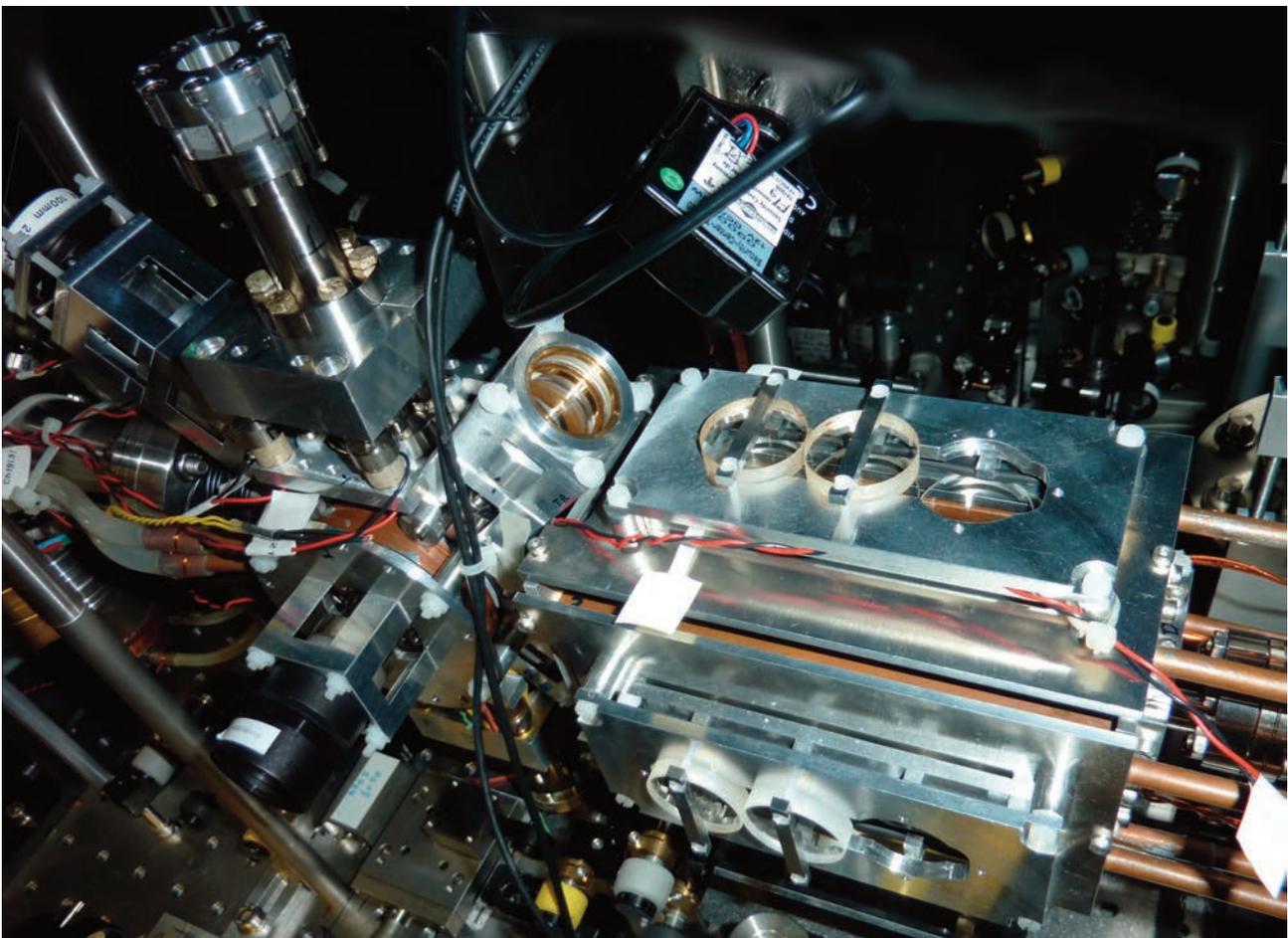
Systèmes de référence temps-espace ,  
équipe métrologie des fréquences optiques

Sébastien Bize est chercheur CNRS au SYRTE à l'Observatoire de Paris. Ses recherches portent sur les développements d'étalons atomiques de fréquence de grande exactitude et sur leurs applications. Il contribue à l'élaboration du temps atomique international avec des fontaines atomiques, à la réalisation de tests des lois physique fondamentales et à la recherche de la matière noire. Il travaille à rendre possible une redéfinition de la seconde du système international d'unités à partir de transitions optiques. Il s'intéresse au développement de la géodésie chronométrique.



## L'unité de temps aujourd'hui et dans le futur

L'intervention rappellera les aspects fondamentaux qui sous-tendent la réalisation de l'unité de temps à partir d'étalons atomiques de fréquence. La mise en œuvre et les applications actuelles seront mentionnées, dont l'élaboration du temps atomique international, des tests des lois physiques fondamentales et la recherche de la matière noire. Les progrès considérables, et toujours en cours, de la métrologie des fréquences optiques ont débouché sur une nouvelle génération d'étalons atomiques optiques. Sur des distances continentales, les liens optiques fibrés cohérents permettent des comparaisons aux limites actuelles de ces étalons et même au-delà. Ces avancées se traduisent en amélioration pour toutes les applications mentionnées ci-dessus. De plus, elles rendent possible de nouvelles applications comme la géodésie chronométrique. Au vu de ces développements, il est naturel d'envisager une redéfinition de la seconde du système international d'unités à partir de transitions atomiques optiques. Les prérequis pour une telle redéfinition seront évoqués.





INSTITUT DE FRANCE  
Académie des sciences

Inscriptions ouvertes au public dans la limite des places disponibles.

[www.academie-sciences.fr](http://www.academie-sciences.fr)

(rubrique «prochains évènements»)

