

Questions fréquentes au sujet de la révision du SI
entrée en vigueur le 20 mai 2019
(mise à jour : 20 mai 2019)

Q1 : Quels changements ont eu lieu ?

R1 : Le kilogramme, kg, l'ampère, A, le kelvin, K, et la mole, mol, ont de nouvelles définitions qui ont été choisies de façon à ce qu'au moment de la mise en place du SI révisé, l'amplitude de chacune des unités redéfinies soit équivalente à celle de l'unité avant sa redéfinition.

Q2 : Quel était, dans ce cas, l'intérêt d'adopter de nouvelles définitions ?

R2 : Le fait de définir le kilogramme en se fondant sur des constantes fondamentales assure sa stabilité à long terme et, par conséquent, la fiabilité de l'unité de masse, or la fiabilité du kilogramme a fait l'objet de débats. Les nouvelles définitions de l'ampère et du kelvin devraient améliorer de manière significative l'exactitude à laquelle les mesures de grandeurs électriques et de température radiométrique sont effectuées. L'impact sur les mesures électriques a été immédiat : les mesures les plus précises dans ce domaine étaient déjà effectuées à l'aide des effets Josephson et Hall quantique avant la révision du SI, et le fait de fixer les valeurs numériques de la constante de Planck h et de la charge élémentaire e pour les nouvelles définitions des unités a permis d'obtenir des valeurs numériques exactes pour les constantes de Josephson et de von Klitzing. Il n'est plus nécessaire d'utiliser les unités électriques conventionnelles plutôt que les unités du SI pour exprimer les résultats des mesures électriques (voir R14). En utilisant les définitions actuelles du kelvin et du kilogramme, le facteur de conversion entre la luminance énergétique mesurée et la température thermodynamique (constante de Stefan-Boltzmann) est exact, ce qui devrait améliorer la métrologie des températures au fur et à mesure des progrès technologiques. La nouvelle définition de la mole est plus simple que la précédente, ce qui devrait aider les utilisateurs du SI à mieux comprendre la nature de la grandeur « quantité de matière » et de son unité, la mole. Dans tous les cas, le SI est en meilleure adéquation avec les technologies de ce siècle.

Q3 : Qu'en est-il des définitions de la seconde, s, du mètre, m, et de la candela, cd ?

R3 : Les définitions de la seconde, s, du mètre, m, et de la candela, cd, n'ont pas changé mais la façon de les rédiger a été révisée afin que la formulation soit cohérente avec celle utilisée pour les définitions actuelles du kilogramme, kg, de l'ampère, A, du kelvin, K, et de la mole, mol.

Q4 : Que deviendra le prototype international du kilogramme maintenant que la révision du SI est entrée en vigueur ? Est-ce que le public pourra enfin le voir dans un musée ?

R4 : Il n'est pas prévu de modifier les conditions de conservation du prototype international du kilogramme : il restera donc au BIPM et ne pourra pas être exposé au public. Le prototype international du kilogramme gardera un intérêt métrologique : il sera par conséquent utilisé de manière sporadique pour des mesures afin d'éviter autant que possible tout endommagement de sa surface. Des mesures de la stabilité de la masse du prototype international du kilogramme réalisées dans le futur permettront de faire des extrapolations quant à la stabilité passée du kilogramme.

Q5 : Est-ce que mon étalon de masse peut être étalonné de la même façon qu'avant le 20 mai 2019 ?

R5 : Vous pouvez continuer à faire étalonner votre étalon de masse dans votre laboratoire national de métrologie ou dans un laboratoire secondaire, exactement comme vous le faisiez auparavant. Toutefois, la voie de traçabilité utilisée par votre laboratoire national de métrologie pour relier la masse de votre étalon au kilogramme du SI a changé.

En effet, le BIPM organise une comparaison en continu des réalisations primaires du kilogramme afin de déterminer une *valeur de consensus* du kilogramme. Les laboratoires nationaux de métrologie qui disposent d'une réalisation du kilogramme doivent utiliser cette *valeur de consensus* pour disséminer l'unité de masse redéfinie, jusqu'à ce que la dispersion des résultats soit compatible avec les incertitudes des réalisations individuelles : cela préserve l'équivalence internationale des certificats d'étalonnage et respecte les principes et les protocoles approuvés de l'Arrangement de reconnaissance mutuelle du CIPM (CIPM MRA).

Les États Membres qui ne disposent pas d'une réalisation du kilogramme peuvent établir la traçabilité à la même *valeur de consensus* par le biais des services d'étalonnage du BIPM pendant la phase d'utilisation de cette *valeur de consensus*.

Q6 : Une fois que les laboratoires pourront réaliser eux-mêmes le kilogramme, comment serons-nous sûrs que les résultats des différents laboratoires seront compatibles ?

R6 : Dans le cas du kilogramme, lorsque la *valeur de consensus* ne sera plus nécessaire, tous les laboratoires devront démontrer la traçabilité de leurs mesures de masse à la définition du kilogramme, fondée sur des constantes de la physique. Néanmoins, comme il est toujours possible de sous-estimer une incertitude expérimentale ou de simplement faire une erreur, les laboratoires qui déclareront les incertitudes les plus faibles compareront régulièrement les résultats de leurs mesures afin d'évaluer leur compatibilité. Un mécanisme de base pour cela existe déjà et est couramment utilisé en métrologie : il se fonde sur l'Arrangement de reconnaissance mutuelle du CIPM (CIPM MRA) établi en 1999.

Q7 : Est-ce que les laboratoires nationaux de métrologie doivent également utiliser une valeur de consensus pour disséminer les trois autres unités redéfinies ?

R7 : Non. Le kilogramme est un cas à part. Les unités électriques et le kelvin sont évoqués dans les réponses R14 et R8 ci-après. Concernant la mole, il n'y a aucun changement par rapport à la pratique précédente.

Q8 : Est-ce que mon thermomètre peut être étalonné de la même façon qu'avant le 20 mai 2019 ?

R8 : Oui. La nouvelle définition du kelvin n'a pas eu d'effet sur les échelles de température couramment utilisées EIT-90 et EPTB-2000. Le Comité consultatif de thermométrie (CCT) a publié des informations sur les avantages immédiats et à venir de la nouvelle définition du kelvin.

Q9 : Dans le SI, la constante de référence pour le kilogramme est la constante de Planck h , exprimée en $J \cdot s = kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$. Cela serait plus facilement compréhensible si la constante de référence avait pour unité l'unité de masse, le kilogramme. Il serait alors possible de dire que le kilogramme est la masse de *<quelque chose>*, telle que la masse d'un nombre donné d'atomes de carbone ou de silicium. Cette définition n'aurait-elle pas été meilleure ?

R9 : C'est, dans une certaine mesure, une question de subjectivité. Il est toutefois à noter que la constante de référence utilisée pour définir une unité donnée n'a pas à avoir la même dimension que cette unité (même si cela peut paraître plus simple d'un point de vue conceptuel lorsque tel est le cas). Le SI utilise depuis longtemps plusieurs constantes de référence, chacune ayant une unité différente de celle définie. Ainsi, le mètre est défini en utilisant comme constante de référence la vitesse de la lumière c , avec pour unité m/s, et non une longueur spécifique exprimée en m. Cette définition n'est pas considérée comme insatisfaisante. Cette pratique a commencé en 1960 avec la définition de l'ampère fondée sur une valeur fixée d'une constante dont l'unité était $kg \cdot m \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$. (L'actuelle définition de l'ampère est plus simple.)

Bien qu'intuitivement il puisse sembler préférable de définir le kilogramme avec une masse comme constante de référence, le fait d'utiliser la constante de Planck présente d'autres avantages. Ainsi, étant donné que h et e sont désormais connues exactement, les constantes de Josephson et de von Klitzing, K_J et R_K , sont également connues exactement, ce qui apporte des bénéfices majeurs à la métrologie de l'électricité. (La physique nous apprend que nous ne pouvons pas fixer à la fois h et la masse de *<quelque chose>*, telle la masse d'un atome de carbone ^{12}C , sans redéfinir la seconde d'une manière qui ne serait pas du tout pratique.)

Q10 : Malgré la réponse donnée à la question 9, il subsiste des personnes qui mettent en doute le bien-fondé de redéfinir le kilogramme en se fondant sur h comme référence plutôt qu'en utilisant $m(^{12}\text{C})$. L'un des arguments avancés est que l'expérience de la balance de Kibble¹ visant à déterminer h repose sur un équipement complexe plus difficile à utiliser et plus onéreux à construire que les expériences de masse volumique de cristaux par rayons X (projet XRCD) dont l'objectif est de mesurer la masse d'un atome de silicium 28, et d'en déduire la masse d'un atome de carbone 12. Quelles sont les principales raisons de choisir h plutôt que $m(^{12}\text{C})$ comme constante de référence pour le kilogramme ?

R10 : Cette question aborde deux points qui n'ont pas de rapport entre eux :

1. Pourquoi choisir h plutôt que $m(^{12}\text{C})$ comme constante de référence pour le kilogramme ?
2. Est-ce que le choix de h ou $m(^{12}\text{C})$ détermine si le kilogramme sera réalisé en pratique par une expérience de la balance de Kibble ou par des mesures de masse volumique de cristaux par rayons x ?

1. Une fois la valeur numérique d'une constante fixée, il n'est ensuite pas nécessaire, ni même possible, de mesurer la constante. Ainsi, lorsqu'en 1983 le SI a été modifié afin que la vitesse de la lumière dans le vide, c , devienne la constante de référence pour le mètre, la longue histoire de la mesure de c a soudainement pris fin. Cela a constitué un immense avantage pour la science et la technologie, notamment en raison du fait que c étant utilisée dans de nombreux domaines scientifiques et technologiques, il était nécessaire à chaque changement apporté à la valeur du SI recommandée pour c de mettre à jour les valeurs de multiples constantes et facteurs de conversion liés à c . La décision de définir la valeur numérique de c comme exacte était de toute évidence adéquate.

De la même façon, h est la constante fondamentale de la physique quantique et, par conséquent, sa valeur du SI est utilisée dans de nombreux domaines de la science et de la technologie. Par le passé, les changements apportés à la valeur recommandée de h à mesure que les expériences progressaient ont pu être source, dans le meilleur des cas, de désagrément et, dans le pire, de confusion. La principale raison de définir la valeur numérique de h a été similaire à celle de définir c , et présentait de plus des avantages spécifiques pour la métrologie de l'électricité, tel que mentionné au point R2.

Bien entendu, $m(^{12}\text{C})$ est de façon indéniable une constante et revêt une importance incontestable, en particulier dans les domaines de la chimie et de la physique des atomes. La raison en est que les « poids atomiques » (pour un chimiste) ou « masses atomiques relatives » (pour un physicien) se fondent sur $m(^{12}\text{C})$. Toutefois, les poids atomiques ne dépendent pas de la définition du kilogramme et n'ont évidemment été aucunement affectés par la nouvelle définition.

¹ La balance du watt a été renommée balance de Kibble, du nom de son inventeur Bryan Kibble

2. Non. Le choix de la constante de référence à utiliser pour définir le kilogramme n'implique aucune méthode particulière pour réaliser l'unité de masse, la Résolution 1 (2018) n'en mentionne d'ailleurs aucune. Nous savons que la réalisation du kilogramme, quelle qu'elle soit, doit être traçable à h car h est la constante de référence de l'actuelle définition du kilogramme. Toutefois, on sait également que $h/m(^{12}\text{C}) = Q$, où Q représente un produit de facteurs numériques exacts et de constantes déterminées de façon expérimentale. L'incertitude-type relative de Q est inférieure à $4,5 \times 10^{-10}$ en se fondant sur les valeurs actuelles recommandées pour les constantes concernées. Il est possible, pour réaliser le kilogramme, d'utiliser un équipement tel qu'une balance de Kibble, qui mesure directement un étalon de masse de 1 kg à partir de h (par des mesures électriques réalisées à l'aide de dispositifs quantiques), ainsi que des mesures auxiliaires de longueur et de temps. Toutefois, une expérience qui mesure un étalon de masse de 1 kg à partir de $m(^{12}\text{C})$, tel que dans le projet de mesures de masse volumique de cristaux par rayons X, peut également permettre de réaliser le kilogramme. La raison en est que $m(^{12}\text{C})Q = h$ et donc le prix à payer pour arriver à h à partir de la mesure de $m(^{12}\text{C})$ est l'incertitude supplémentaire de Q mais cette incertitude est négligeable dans le contexte de la mise en pratique de l'actuelle définition du kilogramme.

Q11 : Les sept grandeurs et unités de base du SI ont-elles changé ?

R11 : Non. Les sept grandeurs de base (temps, longueur, masse, courant électrique, température thermodynamique, quantité de matière, intensité lumineuse) et les sept unités de base correspondantes (seconde, mètre, kilogramme, ampère, kelvin, mole, candela) sont les mêmes.

Q12 : Les 22 unités dérivées cohérentes ayant des noms spéciaux et des symboles particuliers ont-elles changé ?

R12 : Non, ces unités dérivées cohérentes restent inchangées.

Q13 : Les noms et les symboles des préfixes des multiples et sous-multiples (kilo pour 10^3 , milli pour 10^{-3} , etc.) ont-ils changé ?

R13 : Non, les noms et symboles des préfixes n'ont pas changé.

Q14 : L'amplitude des unités a-t-elle changé dans le SI révisé ?

R14 : Non, ce n'est pas le cas. Des conditions visant à assurer la continuité du SI ont été établies avant l'entrée en vigueur des nouvelles définitions afin de s'assurer qu'il n'y aurait pas de changement d'amplitude pour aucune des unités de base du SI et, par conséquent, pour aucune des unités qui en sont dérivées.

(Il existe une exception concernant les unités électriques : de 1990 au 20 mai 2019, les unités électriques utilisées dans la pratique se sont fondées sur des valeurs conventionnelles de la constante de Josephson et de la constante de von Klitzing plutôt que sur leur définition du SI. Cela a généré un petit décalage entre les valeurs conventionnelles et les valeurs du SI. Avec la révision du SI, les unités électriques pratiques sont de nouveau dans le SI. Cela a entraîné le 20 mai 2019 un unique

changement de + 0,1 partie par million (ppm) pour les valeurs de tension et de + 0,02 ppm pour les valeurs de résistance, exprimées en unités du SI.)

Q15 : Comment vous est-il possible de fixer la valeur d'une constante fondamentale telle que h pour définir le kilogramme, e pour définir l'ampère, etc. ? Comment avez-vous su quelles valeurs choisir pour fixer ces constantes ? Que se passera-t-il si l'on s'aperçoit à l'avenir que la valeur que vous avez choisie est erronée ?

R15 : Nous n'avons pas fixé – ni changé – la valeur de quelque constante que ce soit pour définir des unités. En effet, les valeurs des constantes fondamentales sont des constantes de la nature et nous avons seulement fixé la valeur numérique de chaque constante lorsque celle-ci est exprimée en unité du SI. En fixant cette valeur numérique, nous déterminons l'amplitude de l'unité dans laquelle nous mesurons la constante.

Par exemple, si c est la *valeur* de la vitesse de la lumière, $\{c\}$ sa *valeur numérique*, et $[c]$ l'*unité*, de sorte que

$$c = \{c\} [c] = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

alors la valeur c est le produit du nombre $\{c\}$ multiplié par l'unité $[c]$, et cette valeur ne change jamais. Toutefois, les facteurs $\{c\}$ et $[c]$ peuvent être choisis de diverses manières de façon à que le produit c reste inchangé.

Il a été décidé en 1983 de fixer le nombre $\{c\}$ à exactement 299 792 458, ce qui a défini l'unité de vitesse $[c] = \text{m/s}$. La seconde, s , étant déjà définie, cela a eu pour conséquence de redéfinir le mètre, m . Le nombre $\{c\}$ dans cette nouvelle définition a été choisi de façon à ce que l'amplitude de l'unité m/s reste inchangée, afin que la continuité entre l'ancienne et la nouvelle définition soit assurée.

Q15 : Vous n'avez donc fixé en réalité que la valeur numérique de la constante exprimée en unité du SI. Pour le kilogramme, par exemple, vous avez choisi de fixer la valeur numérique $\{h\}$ de la constante de Planck exprimée en unité du SI $[h] = \text{kg m}^2 \text{ s}^{-1}$. Mais la question subsiste : si une nouvelle expérience semble montrer que vous avez choisi une valeur numérique erronée pour $\{h\}$, que se passera-t-il ?

R15 : Du fait de la révision du SI, la masse du prototype international du kilogramme, qui a défini l'unité de masse de 1889 au 20 mai 2019, devra être déterminée de façon expérimentale. S'il s'avérait que nous avons choisi une valeur erronée pour $\{h\}$, cela signifiera simplement que, d'après cette nouvelle expérience, la masse du prototype international du kilogramme n'est pas exactement 1 kg.

Cette situation n'aurait de répercussions que sur les mesures de masses macroscopiques ; les masses des atomes et les valeurs d'autres constantes relatives à la physique quantique n'en seraient pas affectées. Si au lieu de redéfinir le kilogramme nous avions conservé la définition approuvée en 1889, nous continuerions à utiliser une grandeur de référence (la masse du prototype international du kilogramme) pour laquelle on ne peut affirmer avec certitude qu'elle ne varie pas dans le temps par rapport à des constantes de la nature telles que la masse d'un atome ou la constante de Planck.

La question de savoir dans quelle mesure la masse du prototype international du kilogramme était en train de varier par rapport à la masse d'une vraie constante de la

nature a fait l'objet de nombreux débats au cours de ces dernières années. L'avantage de la nouvelle définition réside dans le fait que nous sommes sûrs que la constante de référence utilisée pour redéfinir le kilogramme est un vrai invariant de la nature.

Q17 : Chacune des constantes fondamentales utilisées pour la redéfinition du SI a une incertitude : sa valeur numérique n'est donc pas connue exactement. Toutefois, vous avez fixé exactement la valeur numérique. Comment est-ce possible ? Qu'en est-il de l'incertitude ?

R17 : La précédente définition du kilogramme fixait la masse du prototype international du kilogramme à exactement un kilogramme, avec une incertitude zéro, $u_r(m_{\text{IPK}}) = 0$. La constante de Planck, avant la révision du SI, était déterminée de façon expérimentale et présentait une incertitude-type relative $u_r(h)$ voisine de $1,0 \times 10^{-8}$.

Désormais, la valeur de h , exprimée en unités du SI, est connue exactement, de sorte que $u_r(h) = 0$. Cependant, la masse du prototype international du kilogramme doit être déterminée de façon expérimentale et sa valeur initiale a une incertitude relative $u_r(m_{\text{IPK}})$ de $1,0 \times 10^{-8}$. Ainsi, l'incertitude est conservée au moment de l'adoption de la nouvelle définition mais elle est transférée à la référence précédente qui n'est plus utilisée, tel qu'indiqué dans le tableau ci-dessous.

<i>Constante utilisée pour définir le kilogramme</i>	<i>Incertaince dans le précédent SI</i>	<i>Incertaince dans l'actuel SI</i>
masse du prototype international du kilogramme, $m(\mathcal{K})$	0	$1,0 \times 10^{-8}$ (obtenue expérimentalement)
constante de Planck, h	$1,0 \times 10^{-8}$ (obtenue expérimentalement)	0

Q18 : L'unité de la constante de Planck est l'unité d'action, $\text{J s} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$. Comment le fait de fixer la valeur numérique de la constante de Planck permet-il de définir le kilogramme ?

R18 : Le fait de fixer la valeur numérique de h définit en fait l'unité d'action, $\text{J s} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$. Comme nous avons déjà défini la seconde, s , en fixant la valeur numérique de la fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, ainsi que le mètre, m , en fixant la valeur numérique de la vitesse de la lumière dans le vide, c , le fait de fixer l'amplitude de l'unité $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$ a pour effet de définir l'unité kg .

Q19 : Les définitions actuelles pour les unités de base du SI révisé ne sont-elles pas circulaires, et par là même insatisfaisantes ?

R19 : Non, les définitions proposées ne sont pas circulaires. Une définition circulaire utilise le résultat de la définition dans sa formulation. Les termes proposés pour chacune des définitions des unités de base de l'actuel SI précisent la *valeur numérique* de chaque constante de référence choisie mais le résultat n'est pas utilisé pour formuler la définition.

Q20 : Est-il toujours possible de vérifier la cohérence de la physique maintenant que nous avons fixé les valeurs de toutes les constantes fondamentales ?

R20 : Ce ne sont pas les valeurs de toutes les constantes fondamentales que nous avons fixées mais seulement les *valeurs numériques* d'un petit sous-ensemble de constantes et des combinaisons des constantes de ce sous-ensemble. Cela a eu pour effet de changer les définitions des unités, mais non les équations de la physique, et cela n'empêche en rien les chercheurs de vérifier la cohérence des équations.

Q21 : Les valeurs numériques des constantes de la physique c , h et e sont fixées. Toutefois, cela ne fixe-t-il pas la valeur de la constante de structure fine alors que la valeur de cette constante ne doit pas être fixée ?

A21: Non. La valeur de la constante de structure fine continue à être déterminée par des expériences. Dans le SI, la constante de structure fine a toujours été fonction de c , h , e et μ_0 , la perméabilité magnétique du vide ; cette dernière constante, qui définissait l'ampère, est désormais déterminée de façon expérimentale par une mesure de la constante de structure fine.