|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| TEMPS CLIMAT EAU | **Organisation météorologique mondiale****COMMISSION DES OBSERVATIONS, DES INFRASTRUCTURES ET DES SYSTÈMES D’INFORMATION****Deuxième session**24-28 octobre 2022, Genève | **INFCOM-2/INF. 6.2(5)** |
| Présenté par:Président du SC-MINT13.X.2022 |

*[Ce document, produit à titre indicatif, est le résultat d’une traduction automatique sans post‑édition. Aucune garantie, expresse ou implicite, n’est donnée quant à son exactitude, sa fiabilité ou sa précision. Les divergences ou différences ayant pu résulter de la traduction vers le français du contenu du document original ne créent aucune obligation et n’ont aucun effet juridique en termes de conformité, d’exécution ou à toute autre fin. Il se peut que certains contenus (tels que les images) n’aient pu être traduits en raison des limites techniques du système. En cas de doute sur l’exactitude des informations contenues dans la traduction, veuillez vous reporter à l’original anglais qui constitue la version officielle du document.]*

## RÉFÉRENCES RADIOMÉTRIQUES

## Rapport de l’Équipe d’experts du SC-MINT pour les références radiométriques

## Recommandations sur les conditions à respecter pour modifierles références radiométriques solaires et terrestres

### Résumé

De nouvelles références primaires sont proposées pour le rayonnement solaire et le rayonnement terrestre (infrarouge). Dans les deux cas, ils permettraient d’améliorer la traçabilité par le système international d’unités et de réduire l’incertitude. Toutefois, dans les deux cas, ils entraîneraient des modifications d’échelle quant à la taille de l’incertitude des références actuelles. Le changement d’échelle est relativement faible pour le rayonnement solaire, mais pour le rayonnement terrestre, l’ampleur du changement d’échelle est conséquence.

La principale recommandation de l’Équipe d’experts est d’aller de l’avant avec l’introduction des nouvelles références pour le rayonnement solaire et terrestre, à condition que certaines conditions soient remplies. En ce qui concerne le rayonnement solaire, il convient de caractériser 1) la nouvelle référence primaire du rayonnement solaire primaire et de publier son budget d’incertitude dans une publication faisant l’objet d’un examen collégial; 2) qu’elle doit être comparée bilatéralement avec un autre cryoradiomètre provenant d’un NMI et d’un CMC pour la sensibilité spectrale; 3) qu’un groupe de radiomètres à cavité ambiante continue d’être exploité comme étalon principal de transfert; et 4) des procédures sont disponibles pour corriger les données traçables par rapport à la référence actuelle pour l’harmoniser avec la nouvelle échelle de référence. Pour ce qui est du rayonnement terrestre, il s’agit des éléments suivants: 1) que les nouvelles références doivent être traçables par rapport au SYSTÈME international d’unités (par exemple, établies par un CMC) et doivent être documentées dans la littérature scientifique, avec un budget d’incertitude; 2) qu’un groupe de pyrgéomètres de référence continue d’être exploité comme étalon de transfert principal; 3) des procédures sont disponibles pour corriger les données de mesure traçables par rapport à la référence actuelle en vue d’une harmonisation avec la nouvelle échelle de référence; 4) les données brutes des pyrgéomètres pour les stations du BSRN sont enregistrées dans les principales archives du BSRN.

### Rayonnement solaire

Nouvelle référence du rayonnement solaire

La nouvelle référence proposée pour le rayonnement solaire (CSAR/MITRA) vise à mettre en place un instrument entièrement caractérisé permettant le calcul de l’éclairement énergétique lié au SI à partir de la compréhension de la physique de l’instrument. La même approche a été adoptée pour les instruments qui composent le Groupe étalon mondial (WSG) qui définit actuellement la Référence radiométrique mondiale (R WRR), mais le CSAR/MITRA inclut des améliorations technologiques majeures et une réduction significative de l’incertitude. En ce qui concerne les radiomètres à cavité ambiante constituant le GSM, l’avancée majeure avec le CSAR/MITRA est la réalisation d’un radiomètre *à cavité cryogénique* qui peut être utilisé en dehors du laboratoire. La radiométrie à cavité cryogénique est une technologie mature fournissant des références liées au SYSTÈME international d’unités en laboratoire et est officiellement identifiée comme une norme de choix primaire dans la mise en pratique du CIPM pour la radiométrie (Comité consultatif pour la photométrie et la radiométrie, 2021). MITRA permet d’évaluer et de déterminer les incertitudes liées à la transmission par fenêtre, nécessaires à l’exploitation cryogénique. Les comparaisons entre la R WRR actuelle et la RSR indiquent que la R WRR est supérieure d’environ 0,3 % à l’échelle du SI. Celles-ci concordent avec des comparaisons antérieures de la puissance radiométrique entre les radiomètres cryogéniques et la R WRR ainsi qu’entre les mesures récentes effectuées à partir d’instruments déployés dans l’espace.

Problèmes/limites connus liés à la nouvelle référence du rayonnement solaire

Seul un seul instrument est proposé comme nouvelle référence pour le rayonnement solaire, qui comporte un risque inhérent. Il est tout d’abord souhaitable qu’un deuxième instrument de même conception (CSAR) soit disponible pour garantir la disponibilité de la référence principale en cas de panne. Deuxièmement, il est souhaitable qu’un (ou plusieurs) instruments d’une conception différente soit disponible pour confirmer la mesure du CSAR/MITRA, car il s’agit d’une bonne pratique métrologique d’avoir plus d’une réalisation indépendante d’une référence. Pour obtenir un avantage réel, une telle réalisation devrait être vraiment indépendante et d’incertitude comparable avec une définition claire des éléments de la réalisation qui sont testés. Actuellement, la seule technologie capable de fournir une référence du rayonnement solaire avec une incertitude comparable à celle du CSAR/MITRA est la radiométrie à cavité cryogénique, pour laquelle il existe des variations limitées qui sont pratiques et ont une incidence réelle sur l’incertitude. Les premières sont celles qui devraient être la transmittance fenêtre et l’aire d’ouverture influençant la diffraction et la diffusion. Toutefois, ces développements impliquent des projets pluriannuels visant à caractériser pleinement les nouvelles références du rayonnement solaire et à déterminer leur incertitude. Un tel retard n’est pas acceptable compte tenu de la nécessité établie de mettre à jour la référence du rayonnement solaire. Étant donné la maturité technologique dans la mise au point de radiomètres cryogéniques à cavité absolue capables sur le terrain, l’ET-RR considère comme acceptable le risque de poursuivre le changement de référence du rayonnement solaire sans attendre l’achèvement de ces projets. De plus, le groupe de radiomètres à cavité ambiante utilisé comme étalon de transfert constituerait une sauvegarde temporaire en cas de panne de la référence primaire.

Il est souhaitable de maintenir un groupe de radiomètres à cavité ambiante (analogues au Groupe étalon mondial pour les radiomètres à cavité ambiante) afin d’établir un étalon de transfert principal opérationnel entre les nouveaux radiomètres de référence pour le rayonnement solaire et les radiomètres de terrain proposés. Cependant, certains radiomètres constituant le WSG ont connu des défaillances techniques ces dernières années, liés aux décennies où la plupart de ces instruments sont en service. Si seuls les radiomètres du WSG qui n’ont pas de problème ou de défaillance détecté ces dernières années sont pris en compte, l’exigence actuelle concernant le nombre de radiomètres constituant le Groupe d’experts ne serait plus remplie. Outre l’entretien déjà effectué sur les radiomètres constituant actuellement le WSG, de nouveaux radiomètres à cavité ambiante devraient être sélectionnés pour être introduits dans le Groupe mondial pour les radiomètres; Le choix de ces instruments axés sur la stabilité et la reproductibilité, car leur traçabilité sera déduite de la nouvelle référence du rayonnement solaire. Un tel groupe de radiomètres devrait également permettre de détecter toute anomalie imprévue dans le fonctionnement du système primaire et constituer ainsi une sauvegarde intermédiaire jusqu’à ce qu’un deuxième instrument doté de capacités analogues à celle du CSAR/MITRA soit disponible.

Le décalage d’échelle de 0,3 % prévu à partir de l’introduction de la nouvelle référence du rayonnement solaire peut avoir un impact non négligeable sur la recherche sur le climat, car il devrait s’appliquer à toutes les mesures de rayonnement uniformément. L’OMM et l’INFCOM devraient collaborer avec les milieux du BSRN pour évaluer la possibilité d’harmoniser les séries chronologiques historiques du rayonnement solaire à partir de bases de données les plus importantes pour la recherche sur le climat (BSRN, GEBA). Ces discussions devraient être menées lors de la réunion du BSRN de 2022. L’harmonisation devrait permettre d’adapter les données traçables à la référence fournie par le Groupe étalon mondial pour l’observation de la terre par rapport à l’échelle liée à la nouvelle référence introduite. Une recommandation finale relative à cette harmonisation devrait être émise après cette évaluation.

Recommandations

L’Équipe d’experts pour les références radiométriques (ET-RR) reconnaît que:

* Le développement du radiomètre CSAR/MITRA est suffisamment mature pour qu’il soit introduit en tant que nouvelle référence pour la traçabilité des mesures du rayonnement solaire au SI, avec une incertitude réduite (d’environ 0,3 % à environ 0,01 %, Walter et al., 2017; Winkler, 2013), ce qui a permis d’améliorer la précision des mesures de la valeur absolue du rayonnement solaire,
* La compréhension de la technologie nécessaire au développement du CSAR/MITRA est suffisante pour permettre la reproduction d’autres instruments du même modèle de radiomètres avec des performances similaires
* La complexité de l’exploitation des radiomètres à cavité cryogénique, tels que le CSAR/MITRA, ne permet pas leur fonctionnement de routine, et nécessite donc l’utilisation continue d’un groupe de radiomètres à cavité ambiante (analogues au Groupe étalon mondial pour les radiomètres à cavité actuelle) comme étalon principal de transfert
* L’introduction d’une nouvelle référence du rayonnement solaire basée sur le CSAR/MITRA et potentiellement d’autres radiomètres à cavité cryogénique introduireait un décalage d’échelle d’environ 0,3 % (nouvelle échelle inférieure au courant)
* L’amélioration potentielle de la référence du rayonnement solaire qui serait apportée par la mise en œuvre du CSAR/MITRA étant donné que la nouvelle RMM a été documentée depuis plusieurs années (Walter et al., 2017; Winkler, 2013)
* Les acteurs commerciaux de la mesure du rayonnement solaire (en particulier dans le secteur de l’énergie solaire) demandent à ce qu’une telle nouvelle référence solaire soit rapidement mise en place

L’Équipe d’experts recommande donc à l’INFCOM d’introduire une nouvelle référence solaire fondée sur un artéfact constitué par le CSAR/MITRA et, éventuellement, d’autres radiomètres à cavité cryogénique, aussi rapidement que possible, à condition que les quatre conditions suivantes soient satisfaites:

1. Le nouveau instrument de référence proposé (CSAR/MITRA) doit être caractérisé et son budget d’incertitude doit être publié, de préférence dans une publication évaluée par des pairs pour démontrer ses performances opérationnelles.
2. Le nouvel instrument de référence du rayonnement solaire proposé doit être comparé bilatéralement avec un autre cryoradiomètre provenant d’un Institut national de métrologie et d’un CMC pour la sensibilité spectrale et les résultats de comparaison publiés.
3. Un groupe standard de radiomètres à cavité ambiante (semblable au Groupe étalon mondial actuel) doit continuer d’être exploité en tant que norme principale de transfert.
4. Des procédures doivent être mises à disposition pour corriger les données de mesure traçables par rapport à la R WRR actuelle afin d’harmoniser [[1]](#footnote-2) les séries de données historiques à la nouvelle échelle de référence, en particulier pour les grandes séries chronologiques climatologiques.

En l’absence de mention de la modification de la référence du rayonnement solaire, l’ÉQUIPE d’experts recommande en outre à l’INFCOM de prier instamment les NMIs, les centres radiométriques et les chercheurs

* Établir d’autres réalisations indépendantes de la référence du rayonnement solaire, ce qui permet de déterminer dans le champ la détermination du rayonnement solaire avec une exactitude comparable ou supérieure à celle du CSAR/MITRA (voir le premier paragraphe de la section « problèmes connus » ci-dessus)
* Réaliser un deuxième instrument de la même conception de modèle que le CSAR/MITRA pour atténuer les risques liés à une défaillance technique de l’instrument (voir le premier paragraphe de la section « problèmes connus » ci-dessus)
* Poursuivre les recherches sur le CSAR/MITRA en vue d’améliorer encore sa précision et sa fiabilité, par exemple grâce à l’inclusion de corrections de diffraction adaptatives, de fenêtres CSAR et MITRA swappables et de capteurs à courant foncé

L’Équipe d’experts recommande à l’OMM/INFCOM de prier instamment le Centre radiométrique mondial

* Faire tout son possible pour la mise en place d’un deuxième CSAR/MITRA, y compris en collaborant avec d’autres institutions et en procédant éventuellement à un transfert de technologie
* Veille à ce qu’un groupe de radiomètres à cavité ambiante (semblable au Groupe étalon mondial pour l’infrarouge) soit maintenu pour qu’il soit maintenu en tant que norme de transfert principale opérationnelle (condition 2 ci-dessus)
* « Gère le processus d’intégration de nouveaux radiomètres à cavité ambiante dans le Groupe mondial pour l’observation de la mer (y compris la définition du processus d’inclusion de nouveaux instruments dans le Groupe mondial pour l’observation de la température ambiante et la définition des exigences en matière d’incertitude et de stabilité); »

L’Équipe d’experts recommande enfin à l’INFCOM:

* Élabore et publie un bref document expliquant la nature du changement de référence du rayonnement solaire, le décalage d’échelle correspondant et ses conséquences, ainsi que des directives sur la nécessité et la méthode de correction des données de terrain mesurées par des instruments traçables par rapport à la référence actuelle, et préconise que ce document soit joint aux certificats d’étalonnage traçables par rapport à la nouvelle référence.

Autre exigence

Suite au changement de référence du rayonnement solaire (mise à jour de référence), l’ÉQUIPE d’experts recommande qu’elle soit décrite dans les certificats d’étalonnage traçables par rapport à la nouvelle référence, y compris une description de la façon dont les certificats traçables par rapport à la référence précédente peuvent être comparés à des certificats traçables par rapport à la nouvelle référence (voir le dernier point à la section « recommandations » ci-dessus).

### Rayonnement terrestre

Nouvelle référence radiométrique terrestre possible

L’approche de la nouvelle référence proposée consiste essentiellement à mettre au point une méthode permettant de relier de nouveaux radiomètres infrarouges (IRIS, ACP, etc.) au Système international d’unités. Ces nouveaux radiomètres infrarouges visent principalement une conception sans fenêtre avec une réponse spectrale uniforme afin de réduire au minimum les erreurs d’inadéquation spectrale liées à la transposition de l’étalonnage en utilisant une source du corps noir pour mesurer un spectre atmosphérique de grande longueur d’onde. Ces radiomètres sont généralement caractérisés par des corps noirs dans les centres d’étalonnage du rayonnement (au PMOD/WRC, corps noir BB2007). Des comparaisons bilatérales récentes réalisées dans le cadre du projet EMPIR METEOC 3 et 4 projets du BB2007 et du corps noir d’un institut métrologique national (PTB) reliés à l’échelle de température du rayonnement SI à l’aide de différents instruments (IRIS, pyrgéomètre et thermomètre à rayonnement spécialisé) ont fourni une trajectoire indépendante de traçabilité pour la BB2007 et vérifié sa traçabilité.

Problèmes/limites connus liés à la nouvelle référence radiométrique terrestre possible

Un changement d’échelle qui pourrait avoir des conséquences importantes sur l’analyse des tendances de l’éclairement énergétique terrestre et, plus généralement, sur la recherche sur le climat, est attendu en cas d’adoption de la nouvelle référence proposée pour l’éclairement énergétique terrestre si le changement n’est pas mis en œuvre avec soin[[2]](#footnote-3). L’impact exact sur les mesures n’est pas encore déterminé précisément puisqu’il dépend de la climatologie (principalement de la climatologie des nuages, voir le paragraphe suivant) de l’emplacement de mesure. Même si ce changement est estimé que l’incertitude de l’éclairement énergétique terrestre est déterminée lors de la réunion de Teddington (15-17 novembre 2017) de l’Équipe spéciale pour les références radiométriques, les conséquences sont telles que les recommandations devraient porter sur cette question. Ces recommandations devraient permettre d’atténuer les conséquences néfastes d’un changement d’échelle. Ils devraient être fondés sur les informations suivantes:

* Les résultats du projet ExTrac mené par le PMOD/WRC visant i) à mieux évaluer l’impact du changement proposé de référence du rayonnement terrestre sur les mesures pyrgéomètres; « ii) mettre au point des méthodes d’harmonisation des séries chronologiques historiques de l’éclairement énergétique terrestre; »
* Recommandations issues de la réunion du BSRN de 2022 (voir le paragraphe suivant)

Le décalage d’échelle sur les mesures dépend des caractéristiques des nuages, principalement de la nébulosité, et potentiellement de facteurs tels que la quantité de vapeur d’eau intégrée dans l’atmosphère. À cause de cela, il est difficile de déterminer avec précision combien d’influence le décalage d’échelle aura sur les données de mesure de l’éclairement énergétique terrestre mesurées à l’aide de pyrgéomètres commerciaux. De même, les méthodes d’harmonisation des séries chronologiques historiques à la nouvelle échelle de référence ne sont pas bien établies, mais elles ne sont pas encore bien établies. La recherche sur le climat concernant l’éclairement énergétique terrestre repose essentiellement sur les séries de données du BSRN. Ainsi, un retraitement central par les archives BSRN à l’aide d’une méthode uniforme de retraitement serait le plus optimal. Lors de la réunion de 2022, le BSRN devrait examiner la faisabilité et la meilleure méthode pour harmoniser le rayonnement terrestre historique du BSRN (à l’échelle de référence). Par la suite, les recommandations définitives de l’OMM et de l’INFCOM devraient être élaborées concernant l’harmonisation des données historiques sur le rayonnement terrestre dans la base de données du BSRN.

L’harmonisation des données historiques est susceptible d’être une tâche longue qui ne peut commencer qu’une fois que le changement de référence du rayonnement terrestre est effectué. Il est important que le processus de cette entreprise soit défini aussi rapidement que possible.

Recommandations

L’Équipe d’experts pour les références radiométriques reconnaît que:

* Les radiomètres infrarouges IRIS mis au point par le PMOD/WRC mesurent l’éclairement énergétique de grandes longueurs d’onde avec une incertitude élargie d’environ ±2 Wm−2 (Gröbner, 2012). Ils sont reliés au SI par la caractérisation du corps noir en utilisant à la fois le corps noir principal de la section de radiométrie infrarouge au Centre radiométrique mondial et le corps noir hémisphérique PTB, ce dernier permettant un lien direct avec l’échelle de température du rayonnement de PTB. Cette méthode est suffisamment mature pour qu’elle soit adoptée en tant que nouvelle référence pour le rayonnement terrestre.
* Le pyrgéomètre à cavité absolue (ACP) mis au point par NREL permet de déterminer l’éclairement énergétique atmosphérique de grandes longueurs d’onde avec une incertitude d’environ ±4 Wm-2 (U95) avec traçabilité par le SI (Reda et al., 2012). Reda et al. (2012) indiquent que l’ACP fournit une référence absolue pour l’étalonnage des pyrgéomètres sans nécessiter la caractérisation ACP dans un corps noir, fournissant une méthode indépendante pour la traçabilité SI.
* Les nouveaux radiomètres infrarouges uniformisés spectralement (IRIS et ACP) nécessitent des conditions particulières et un suivi minutieux en cours d’exploitation, car ils sont sans fenêtre. Par conséquent, l’utilisation continue d’un groupe de pyrgéomètres de référence (comme le Groupe étalon mondial pour l’infrarouge) est nécessaire en tant que norme principale de transfert pour les étalonnages opérationnels.
* L’introduction d’une nouvelle référence radiométrique terrestre fondée sur les méthodes décrites ci-dessus entraînerait un décalage d’échelle d’environ +5 Wm-2 (avec une incertitude élargie dans la nouvelle échelle d’environ 2 Wm-2) pour les conditions de ciel clair (nouvelle échelle d’éclairement plus élevée que le courant), descendant jusqu’à zéro Wm-2 pour les conditions de prévision excessive (voir la section ci-dessus).

L’Équipe d’experts recommande donc à l’INFCOM qu’une nouvelle référence radiométrique terrestre soit introduite sur la base de l’IRIS (liée au SI via la caractérisation du corps noir) et de l’ACP aussi rapidement que possible, à condition que les quatre conditions suivantes soient satisfaites:

1. La ou les nouvelles références doivent avoir une traçabilité avérée par rapport au SYSTÈME international d’unités, par exemple établie par un centre d’étalonnage et de capacités de mesure (CMC) approuvé, et doivent être documentées dans la littérature scientifique, avec des performances caractérisées par un budget d’incertitude. Dans le cas où plusieurs nouvelles références sont admissibles, les nouvelles références doivent convenir dans le cadre de leurs incertitudes déclarées dans les comparaisons internationales.
2. Un groupe étalon de pyrgéomètres de référence (comme le Groupe étalon mondial pour l’infrarouge (WISG) doit continuer d’être exploité en tant qu’étalon principal de transfert avec une mise à jour de l’étalonnage par rapport aux nouvelles références selon les dernières méthodes de métrologie.
3. Des procédures doivent être mises à disposition pour corriger les données de mesure traçables par rapport au Groupe étalon mondial pour l’harmonisation avec la nouvelle échelle de référence, en particulier pour les grandes séries chronologiques climatologiques.
4. Le BSRN devrait rendre obligatoire l’enregistrement des données brutes du pyrgéomètre (signal net IR en volts et température) en utilisant le nouveau relevé logique LR4000 et le BSRN devrait déterminer combien de stations sont en mesure de fournir ce relevé pour les données historiques.

En l’absence de modification de la référence radiométrique terrestre, l’ÉQUIPE d’experts recommande en outre à l’INFCOM de prier instamment les NMIs, les centres radiométriques et les milieux de la recherche:

* Améliorer et décrire la compréhension des deux réalisations proposées pour la référence terrestre. Les connaissances acquises au cours de la décennie écoulée depuis la production de l’IRIS et des pays ACP doivent être publiées dans des revues à comité de lecture, de préférence dans le domaine de la métrologie, en particulier en ce qui concerne l’amélioration de la compréhension de l’exactitude de ces instruments et de leur traçabilité par rapport au SYSTÈME international d’unités. Alors que iris et ACP sont cohérents dans les incertitudes énoncées, la communauté devrait poursuivre ses recherches afin de réduire ces incertitudes et de mieux caractériser les différences entre les références.
* Effectuer davantage de recherches pour comprendre les divergences observées entre différents instruments de pyrgéomètres (même de même type) pendant des conditions atmosphériques très sèches (vapeur d’eau intégrée inférieure à 10 mm environ).

L’Équipe d’experts recommande à l’INFCOM de:

* Veiller à ce que le Groupe étalon actuel du SIO soit maintenu pour qu’il soit maintenu en tant que norme principale de transfert opérationnelle (condition 1 ci-dessus).
* Gérer le processus d’intégration d’autres pyrgéomètres dans le Groupe mondial pour l’infrarouge pour s’assurer qu’il comprend toujours un nombre suffisant de pyrgéomètres, même si les anciens pyrgéomètres du WISG échouent. Il faudrait envisager d’inclure d’autres modèles que ceux déjà présents dans le Groupe de coordination de l’OMM.

L’Équipe d’experts recommande enfin à l’INFCOM:

* Collabore avec le BSRN pour faciliter l’harmonisation de ses relevés radiométriques terrestres, notamment pour s’assurer que ces efforts *sont disponibles* dans le cadre du Centre mondial de surveillance du rayonnement (WRMC) du BSRN et d’autres centres internationaux de bases de données
* Élabore et publie un bref document expliquant la nature du changement de référence du rayonnement terrestre, le décalage d’échelle correspondant et ses conséquences, ainsi que des directives sur la nécessité et la méthode de correction des données de terrain mesurées par des instruments traçables par rapport à la référence actuelle, et préconise que ce document soit joint aux certificats d’étalonnage traçables par rapport à la nouvelle référence

Autre exigence

Suite au changement de référence du rayonnement terrestre (mise à jour de référence), l’Équipe d’experts recommande de décrire les certificats d’étalonnage traçables par rapport à la nouvelle référence, y compris une description de la façon dont les certificats traçables par rapport à la référence précédente peuvent être comparés à des certificats traçables par rapport à la nouvelle référence (voir le dernier point de la section « recommandations » ci-dessus).

Références

Comité consultatif pour la photométrie et la radiométrie (2021). Appendice 2: Mise en pratique pour la définition des candelas et unités dérivées associées pour les grandeurs photométriques et radiométriques dans le SI (p. 5). Dans Le Système international d’unités / The International System of Units (’The SI Brochure’). Pavillon de Breteuil, Sèvres, France: Bureau international des poids et mesures. Disponible à <https://www.bipm.org/documents/20126/41489685/SI-App2-candela.pdf> (consulté le 25.02.2022).

Gröbner, J. (2012). Radiomètre étalon de transfert pour les mesures de l’éclairement énergétique atmosphérique de grande longueur d’onde. *Métrologie*. **49**:2, S105-S111, doi:[10.1088/0026-1394/49/2/s105](https://dx.doi.org/10.1088/0026-1394/49/2/s105).

Kato, S., F. G. Rose, D. A. Rutan, T. J. Thorsen, N. G. Loeb, D. R. Doelling, X. Huang, W. L. Smith, W. Su et S.-H. Ham, 2018: Produit sur l’éclairement énergétique de surface de l’édition 4.0 – Nuages et système d’énergie rayonnante de la Terre (CERES) – Energy Balanced and Filled (EBAF), *J. Climate*, **31**, 4501-4527 doi:[10.1175/JCLI-D-17-0523.1](https://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0523.1).

Reda, I., J. Jinan, Z. Scheuch, L. Hanssen, B. Wilthan, D. Myers et T. Stoffel (2012). Pyrgéomètre à cavité absolue permettant de mesurer l’éclairement énergétique absolu extérieur de grande longueur d’onde avec traçabilité par rapport au système international d’unités SI. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* **77**, 132-143, doi:[10.1016/j.jastp.2011.12.011](https://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2011.12.011).

Walter, B., Winkler, R., Graber, F., Finsterle, W., Fox, N., Li, V., et Schmutz, W. (2017). Mesures de l’éclairement énergétique solaire direct avec radiomètre solaire absolu cryogénique, AIP Conference Proceedings 1810, 080007, doi:[10.1063/1.4975538](https://dx.doi.org/10.1063/1.4975538).

Wild, M., 2020: Le bilan énergétique mondial représenté dans les modèles climatiques CMIP6.  *Clim. Dyn.* , **55**, 553‒577, doi:[10.1007/s00382-020-05282-7](https://dx.doi.org/10.1007/s00382-020-05282-7).

Winkler, R. (2013). Radiomètre solaire absolu cryogénique, étalon si potentiel pour l’éclairement énergétique solaire. Thèse de doctorat, University College London, Royaume-Uni.

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

1. L’harmonisation est utilisée au lieu de l’homogénéisation pour distinguer le processus d’application des corrections aux données historiques pour compenser les modifications d’échelle apportées par des modifications de référence du processus de rendu des séries de données homogénéisantes par différents moyens (par exemple homogénéisation statistique). [↑](#footnote-ref-2)
2. Wild (2020) a passé en revue la représentation du bilan énergétique dans la dernière génération de modèles climatiques (CMIP6) utilisée pour le rapport d’évaluation du GIEC. Pour la génération du CMIP6, le rayonnement moyen de grandes longueurs d’onde descendante à l’échelle mondiale multimodèle concorde avec l’estimation optimale des observations du BSRN. Pour toutes les conditions de ciel, la moyenne multimodèle CMIP6 est maintenant supérieure de 2 Wm-2 à la meilleure estimation déduite des données du BSRN, et 4 Wm-2 plus élevés dans des conditions de ciel clair (figures 5 et 13, Wild, 2020). La moyenne multimodèle CMIP6 est également plus élevée et convient mieux avec les observations, que la moyenne multimodèle CMIP5 de la génération précédente (par 4 Wm-2 pour tous les ciels et 3 Wm-2 pour le ciel clair, les spécialistes de la modélisation valident les modèles climatiques par rapport aux observations en surface pour les flux de ciel clair et tous les ciels). L’hypothèse selon laquelle la variation des références à grandes longueurs d’onde entraînerait un décalage de la meilleure estimation du BSRN d’environ 2 Wm-2 pour tous les ciels et environ 5 Wm-2 pour le ciel clair, l’accord entre la moyenne multimodèle CMIP6 et la référence d’observation serait presque parfaite, tandis que la moyenne multimodèle CMIP5 serait plus éloignée de la référence. Il n’est pas clair s’il est significatif ou dû à la probabilité, puisque les modèles individuels ne donnent toujours pas de résultats satisfaisants à la fois dans tous les ciels et dans le ciel clair et le rayonnement descendant de grandes longueurs d’onde descendante, qui dépasse 20 Wm-2 même sur une base mondiale (figure 5, Wild, 2020). L’écart type multimodèle CMIP6 est d’environ 5 Wm-2. En outre, l’impact du changement de référence de grandes longueurs d’onde peut également être significatif, car les observations de l’éclairement énergétique en surface sont utilisées pour la validation des produits satellitaires. Par exemple, Kato et al. (2018) montrent que l’écart moyen de l’éclairement énergétique moyen descendant de grande longueur d’onde provenant d’un produit satellitaire est de +1,0 Wm-2 au-dessus de l’océan et de 0,0 Wm-2 sur les terres émergées. Les observations sur les terres utilisées dans l’étude proviennent principalement des sites du BSRN. Le degré d’influence de l’éclairement énergétique descendant de grande longueur d’onde observé dépend de la variation de référence de la longueur d’onde du ciel (par exemple, fraction nuageuse ou eau précipitable) à chaque site et de la façon dont chaque pyrgéomètre a été étalonné. Il est donc difficile d’évaluer l’impact sans plus d’informations. Cependant, jusqu’à 5 Wm-2 est significativement plus grande que le biais moyen de l’éclairement énergétique moyen de grandes longueurs d’onde mensuelle provenant d’un produit satellitaire. [↑](#footnote-ref-3)