



Utilisation de données d'éclairement solaire et tellurique

Analyse de données d'éclairement à maille horaire en calendrier milésien

La connaissance de l'éclairement solaire est nécessaire pour une bonne planification d'une centrale solaire. L'utilisation du calendrier milésien permet d'identifier des écarts de second ordre par rapport aux performances attendues à chaque période de l'année, et de caractériser les cycles par rapport à une représentation simple du cycle solaire annuel. Cet article illustre l'utilisation du calendrier milésien pour l'analyse de données d'éclairement à maille horaire issues du SIRTA.

Louis-Aimé de Fouquières

MILETUS | 32 AVENUE THÉOPHILE GAUTIER – 75016 PARIS

Version du 15 septembre 2023 (corrections de la version du 21 juin 2019)



Table des matières

Table des matières	3
Table des illustrations	4
1 Introduction	5
1.1 L'éclairement solaire et les cycles du soleil	5
1.2 Les mesures d'éclairement du SIRTA	5
1.3 Le calendrier milésien	6
2 Observations liminaires sur les données utilisées	8
2.1 Critère de période non-nocturne	8
2.2 Calcul de la fraction diffuse	11
3 Éclairement solaire descendant sur le plan horizontal	12
3.1 Données journalières	12
3.2 Données consolidées par mois	14
3.2.1 Analyse selon les mois grégoriens	15
3.2.2 Analyse selon les mois milésiens	16
3.2.3 Visualisation par classe de mois symétriques	17
4 Fraction diffuse de l'éclairement solaire	18
4.1 Choix de l'estimateur de la fraction diffuse.	18
4.2 Cycle journalier de la fraction diffuse mois par mois	20
4.3 Données journalières pour l'éclairement diffus	22
4.4 Données consolidées par mois	24
5 Éclairement infrarouge tellurique descendant.	26
5.1 Données journalières moyennes et détection d'événements instrumentaux	26
5.1.1 Incident instrumental du 13 sextème 2015 (3 juin 2015)	27
5.1.2 Incident instrumental de novème 2005	28
5.2 Cycle journalier de l'éclairement tellurique	29
5.3 Analyse des moyennes par mois milésiens	36
6 Conclusions provisoires et pistes d'approfondissement	37



Table des illustrations

Figure 1 : le calendrier milésien	7
Figure 2 : Symétries des mois milésiens	7
Figure 3 : Maximum d'éclairement nocturne par jour, 2003 à 2007	9
Figure 4 : Maximum d'éclairement nocturne par jour, 2008 à 2017	9
Figure 5 : Maximum d'éclairement nocturne par jour en 2007	10
Figure 6 : Fraction diffuse moyenne et maximale par jour	11
Figure 7 : Éclairement solaire par quantième annuel milésien	12
Figure 8 : Éclairement solaire : 100 valeurs les plus élevées (W/m^2)	13
Figure 9 : Éclairement solaire par quantième annuel grégorien	14
Figure 10 : Éclairement solaire diurne : moyenne et écart-type par mois grégorien	15
Figure 11 : Éclairement solaire diurne : moyenne et écart-type par mois milésien	16
Figure 12 : Comparaison de l'éclairement solaire diurne moyen entre mois symétriques	17
Figure 13 : Comparaison de l'écart-type pondéré de l'éclairement entre mois milésiens	17
Figure 14 : profil journalier moyen de la fraction diffuse avec mesures filtrées	18
Figure 15 : Nombre de données de fraction diffuse par heure	19
Figure 16 : Profil journalier moyen de la fraction diffuse avec toutes valeurs	19
Figure 17 : Fraction diffuse horaire, 1m-12m	21
Figure 18 : Fraction diffuse horaire, 2m-11m	21
Figure 19 : Fraction diffuse horaire, 3m-10m	21
Figure 20 : Fraction diffuse horaire, 4m-9m	21
Figure 21 : Fraction diffuse horaire, 5m-8m	21
Figure 22 : Fraction horaire diffuse, 6m-7m	21
Figure 23 : Fraction diffuse moyenne de l'éclairement en période diurne, par jour	22
Figure 24 : Moyenne journalière de l'éclairement diffus descendant en échelle milésienne	23
Figure 25 : Moyenne journalière de l'éclairement diffus descendant en échelle d'année grégorienne	23
Figure 26 : Fraction diffuse moyenne en période diurne, par mois milésien	24
Figure 27 : Fraction diffuse moyenne, par mois grégorien	25
Figure 28 : Éclairement tellurique moyen, par jour milésien	26
Figure 29 : Éclairement tellurique les 13 et 14 6m 2015	27
Figure 30 : Éclairement tellurique par jour en 9m 2005	28
Figure 31 : Cycle diurne moyen de l'éclairement tellurique	29
Figure 32 : Cycle diurne de l'éclairement tellurique en unème	30
Figure 33 : Cycle diurne de l'éclairement tellurique en secondème	30
Figure 34 : Cycle diurne de l'éclairement tellurique en tertème	31
Figure 35 : Cycle diurne de l'éclairement tellurique en quartème	31
Figure 36 : Cycle diurne de l'éclairement tellurique en quintème	32
Figure 37 : Cycle diurne de l'éclairement tellurique en sextème	32
Figure 38 : Cycle diurne de l'éclairement tellurique en septème	33
Figure 39 : Cycle diurne de l'éclairement tellurique en octème	33
Figure 40 : Cycle diurne de l'éclairement tellurique en novème	34
Figure 41 : Cycle diurne de l'éclairement tellurique en décème	34
Figure 42 : Cycle diurne de l'éclairement tellurique en onzème	35
Figure 43 : Cycle diurne de l'éclairement tellurique en douzème	35
Figure 44 : Eclairement tellurique moyen par mois milésien	36



1 Introduction

1.1 L'éclairement solaire et les cycles du soleil

La connaissance de l'éclairement solaire permet d'anticiper la performance d'un dispositif d'énergie solaire en un lieu donné, compte tenu de la trajectoire solaire en ce lieu et des conditions de nébulosité.

Une mesure couramment utilisée est la puissance de lumière solaire reçue par unité de surface sur un plan horizontal. En l'absence de toute couverture nuageuse, la puissance reçue dépend de l'angle d'incidence des rayons solaires. Cet angle est la *hauteur* du soleil. Des connaissances élémentaires en astronomie permettent de se rappeler que :

- au cours d'une même journée en un lieu donné, la hauteur du soleil croît de 0° à l'aurore jusqu'à une valeur maximale observée à midi solaire vrai du lieu, puis décroît de manière presque symétrique jusqu'à 0° au crépuscule ;
- la hauteur du soleil à midi vrai croît elle-même de jour en jour à partir du solstice d'hiver jusqu'au solstice d'été, puis décroît de manière presque symétrique jusqu'au solstice d'hiver.

Précisons ce que nous entendons par *presque* symétrique à la latitude de Paris (48°N).

- La partie diurne du jour dure au minimum 8 heures 30, au maximum 16 heures. Cette durée diurne varie d'un jour à l'autre d'environ 4 minutes au moment des équinoxes. À une telle période, le midi solaire n'est pas exactement le milieu du jour, il peut y avoir une différence d'une minute entre ces deux instants. Cet écart représente 0,14% de la durée du jour à l'équinoxe.
- En raison de la légère excentricité de la trajectoire terrestre autour du Soleil, le cycle des saisons n'est lui-même pas tout à fait symétrique. Une saison *moyenne* dure 91,3 jours, mais les saisons *vraies*, comptées d'un solstice à l'équinoxe suivant ou réciproquement, durent jusqu'à 4 jours en moins ou en plus, soit un écart maximum de 4,4%.

Les durées respectives des saisons évoluent elles-mêmes très lentement, selon un cycle de 21 000 ans environ. Il se trouve qu'actuellement, le périhélie, passage de la Terre au plus près du Soleil, a lieu environ 15 jours après le solstice d'hiver. L'axe des solstices est peu éloigné de l'axe de symétrie de l'orbite terrestre : le solstice d'été boréal a lieu environ 181 jours et 18 heures après le solstice d'hiver, soit moins d'un jour en avance par rapport à la moitié de l'année tropique moyenne (182 jours 14 heures 55 minutes).

Pour ces raisons, les phénomènes dépendant directement de l'ensoleillement sur une surface fixe suivent un cycle en phase avec les saisons. Cette propriété n'est généralement pas exploitée dans les études, parce que notre calendrier, le calendrier grégorien, bien que solaire, est déphasé par rapport aux saisons. Le début de l'année tombe un tiers de mois après le solstice d'hiver, et les autres débuts de saisons subissent un écart semblable.

1.2 Les mesures d'éclairement du SIRTAR

Le SIRTAR recueille depuis 2003 diverses données atmosphériques, et notamment

- l'éclairement solaire total descendant sur le plan horizontal,
- l'éclairement diffus descendant sur le plan horizontal,
- l'éclairement dans la direction du soleil sur un plan orthogonal à cette direction,
- l'éclairement infrarouge tellurique descendant sur le plan horizontal.

Ces mesures d'éclairement sont données en watts par mètre carré (W/m^2).



Par convention, le relevé daté à une certaine heure UTC comprend les moyennes des mesures effectuées dans l'heure qui suit cette date.

L'éclairement solaire total présente les caractéristiques indiquées en 1.1 ci-dessus. La mesure suit un cycle diurne très marqué. Des valeurs négatives (minimum -1 à -1,5 W/m²) sont enregistrées la nuit : elles correspondent à la dissipation sous forme lumineuse de l'énergie thermique accumulée le jour. La valeur maximum de l'éclairement est de 1070,4 W/m², et cette mesure ne dépasse 914 W/m² que pour 100 relevés, soit moins de 0,1%.

L'éclairement solaire diffus est mesuré avec un appareil semblable à celui de l'éclairement solaire direct, mais pour lequel la lumière directe du soleil est occultée par un dispositif de poursuite. Cet éclairement constitue en quelque sorte l'éclairage naturel ambiant dans la nature. C'est la lumière du jour dont nous profitons même si le soleil n'est pas visible, caché par des nuages ou par l'ombre d'autres objets. Cette lumière est produite par l'atmosphère elle-même, par réflexion et diffraction de la lumière solaire incidente. Quand le disque solaire n'est pas visible, cet éclairement solaire diffus est en principe égal à l'éclairement solaire total. Cette mesure ne dépasse pas 906,4 W/m², et ne dépasse 515 W/m² que pour moins de 0,1% des relevés.

La mesure de **l'éclairement infrarouge tellurique** rend compte de l'énergie lumineuse produite en permanence par l'environnement, essentiellement en raison de la température ambiante. Les valeurs de cette mesure varient entre 175 et 450 W/m², sauf pendant une période d'une vingtaine de jours où les données sont parcellaires et erratiques, comme nous le verrons plus loin.

L'éclairement dans la direction du soleil rend compte de la puissance due exclusivement aux rayons lumineux dans la direction du soleil, mesurée sur un plan orthogonal à cette direction. Cette mesure permet en premier lieu de contrôler la différence entre l'éclairement total et l'éclairement diffus.

Une donnée calculée utile à la planification est la **fraction diffuse** de l'éclairement solaire total. C'est par définition le rapport entre l'éclairement solaire diffus et l'éclairement solaire total. Quand le disque solaire est caché, et notamment la nuit, ce rapport est de 100%, et il diminue dès que le disque solaire est visible. La connaissance de la fraction diffuse permet notamment d'évaluer l'intérêt de dispositifs orientables.

L'analyse de ces données permet d'estimer les performances de dispositifs sensibles à la lumière, et plus précisément de dispositifs à énergie solaire. L'on pressent que l'éclairement solaire primitif, c'est-à-dire hors effet de la couverture nuageuse, est le même à une même date d'un calendrier solaire. L'on pressent aussi que cet éclairement solaire est le même à deux dates où le soleil parcourt une route de même hauteur dans le ciel. Malheureusement, la disposition des mois du calendrier grégorien ne permet pas de repérer facilement de telles dates.

Nous avons travaillé à partir des moyennes horaires collectées sur 15 ans, entre le 1^{er} janvier 2003 et le 31 décembre 2017 (12 1m 2003 au 11 1m 2018), soit 131 496 relevés. Toutefois, certaines données d'éclairement sont manquantes, en raison d'indisponibilité temporaire des équipements. Sur l'ensemble de la période, au moins l'une des trois données d'éclairement manque sur 14 740 relevés, soit 11,2%. Dans la mesure du possible, nous avons travaillé indépendamment sur les données, limitant les conséquences des données manquantes.

1.3 Le calendrier milésien

Le calendrier milésien est un calendrier solaire équilibré en phase avec les saisons moyennes. Le premier mois 1m commence le 21 décembre, ou le 22 décembre juste avant



une année bissextile. De 2008 à 2047, le premier jour de l'année milésienne est le jour du solstice d'hiver boréal à Greenwich. Les mois milésiens ont alternativement 30 et 31 jours. Le dernier mois, noté 12m (« douzème »), a 30 jours les années *caves*, et 31 jours les années *longues*, lesquelles *précèdent immédiatement* les années bissextiles du calendrier grégorien. Ainsi répartis, les mois suivent les saisons *moyennes*, et correspondent chacun au passage du soleil dans un signe du Zodiaque, à moins de trois jours près. Cette répartition des mois est quasi symétrique pour les phénomènes solaires de premier ordre, notamment la durée du jour.

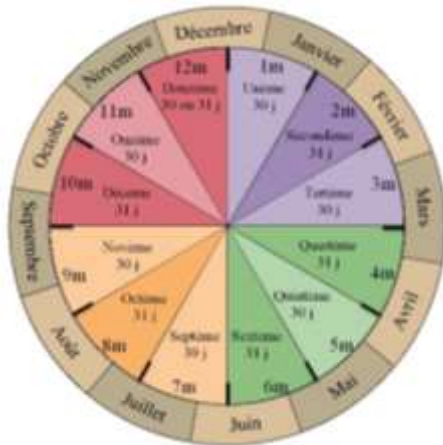


Figure 1 : le calendrier milésien

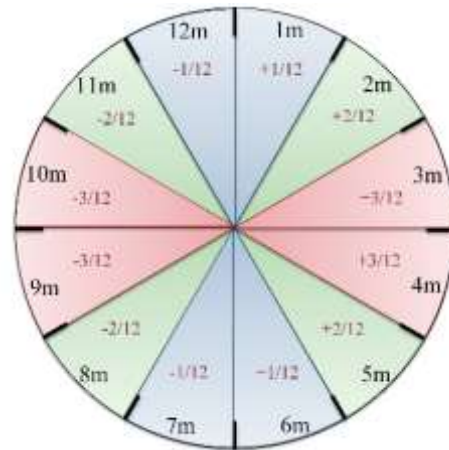


Figure 2 : Symétries des mois milésiens

Les durées des mois milésiens « caves » et « longs » ne diffèrent que de 3,3 % les uns par rapport aux autres, alors que les mois grégoriens, de 28, 29, 30 ou 31 jours, diffèrent de 10% du plus petit au plus grand. De plus, les bimestres milésiens durent 61 jours, aux seules exceptions du dernier bimestre d'une année cave, et du bimestre formé de douzème d'une année cave et d'unème ; ces bimestres ne durent que 60 jours. Par contraste, les bimestres grégoriens durent entre 59 et 62 jours.

Les mois milésiens forment des symétries dans le cycle des saisons, ce qui incite à comparer des phénomènes entre mois symétriques, comme l'illustre la Figure 2. On peut former des classes de mois symétriques : La classe 1 est (1m, 12m), la classe 2 est (2m, 11m) etc. Une application pratique immédiate est l'estimation de la durée du jour à n'importe quelle date, par un simple calcul mental utilisant la *méthode des douzièmes*, bien connue des marins pour estimer les hauteurs d'eau. À la latitude du nord de la France, on peut prendre 40 minutes comme valeur du douzième.

Les écarts par rapport à un cycle parfait apparaissent immédiatement avec le calendrier milésien. Depuis 2008 et jusqu'à 2047, le solstice d'hiver tombe dans la journée du 1 1m à Greenwich. Le solstice d'été tombe le plus souvent 31 6m (21 juin), parfois le 30 6m (20 juin) quand l'année est bissextile, comme 2020. L'équinoxe *vrai* de printemps tombe le 29 3m (« tertème ») soit le 20 mars, non pas le 21. L'équinoxe *vrai* d'automne tombe le 2 ou le 3 10m (« décème ») soit le 22 ou 23 septembre. Avec les dates des saisons dans le référentiel milésien, on rend compte immédiatement des écarts de durées par rapport à la moyenne.

Nous nous proposons ici, à travers une étude succincte de l'éclairement solaire et de l'éclairement tellurique au site du Sirta, de montrer la capacité du calendrier milésien à faire apparaître des écarts par rapport à la symétrie du cycle des saisons moyennes. Pour l'analyse des données, nous avons utilisé le tableur Microsoft Excel dans sa version 2016 sous Microsoft Windows 10, et le complément Excel du calendrier milésien téléchargeable via le site www.calendriermilesien.org.



2 Observations liminaires sur les données utilisées

2.1 Critère de période non-nocturne

L'éclairement solaire présente des caractéristiques intéressantes en période de jour, mais est nul pendant toute la période nocturne. Pendant la nuit, l'éclairement solaire est de valeur constamment très faible. Les instruments mesurant l'éclairement solaire sur le plan horizontal relèvent alors des valeurs négatives, en raison d'un effet de photopile.

En premier lieu, les caractéristiques statistiques de l'éclairement solaire sont moins visibles si on les considère sur un jour complet que si on exclut la période nocturne. Les valeurs pratiquement égales à zéro pendant un peu moins d'un tiers à deux tiers du cycle journalier, selon la saison, définissent une composante de données sans intérêt pour l'étude de l'éclairement solaire.

En second lieu, les valeurs nulles voire négatives de l'éclairement solaire rendent impossible le calcul de la fraction diffuse. Si la mesure de l'éclairement solaire total est nul, le rapport n'a pas de sens physique. Quand la mesure a une valeur absolue très faible, inférieure à 1 W/m^2 , la mesure des deux instruments peut différer de l'ordre de plusieurs dixièmes de W/m^2 , et la fraction diffuse calculée peut prendre des valeurs de quelques unités ou des valeurs négatives, elles aussi dénuées de sens physique.

Pour éviter de devoir tenir compte de valeur aberrantes de la fraction solaire, nous proposons de distinguer les périodes de jour et de nuit, sur la base d'une valeur limite de l'éclairement solaire total. Pour déterminer cette valeur limite nous avons étudié le comportement de l'éclairement solaire totale pendant les périodes toujours nocturnes, de 21h à 2h (ces heures définissent le *début* des périodes horaires de mesure).

Dans les schémas ci-après, les abscisses représentent le *quantième milésien annuel*, le numéro de jour de l'année milésienne. Un quantième d'année milésienne correspond toujours à une et une seule date du calendrier milésien, et donc aussi à une même date du 1^{er} mars au 20 décembre du calendrier grégorien. Les graduations correspondent aux débuts de mois milésiens.

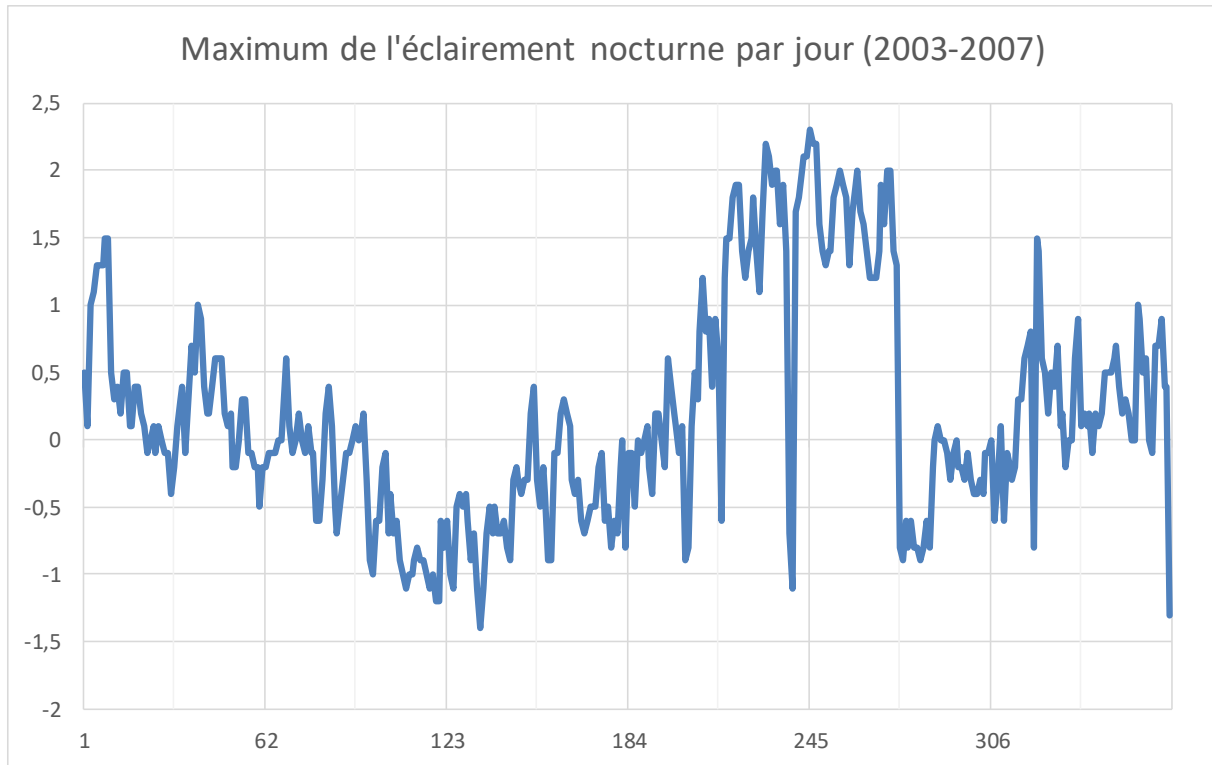


Figure 3 : Maximum d'éclairement nocturne par jour, 2003 à 2007

La mesure varie sur une large plage, $-1,4$ à $+2,3$ W/m^2 , et l'évolution paraît très chaotique. La courbe passe, sans justification apparente, de valeurs positives à des valeurs négatives et réciproquement.

Par contraste, observons le même graphique à partir des données de 2008 à 2017.

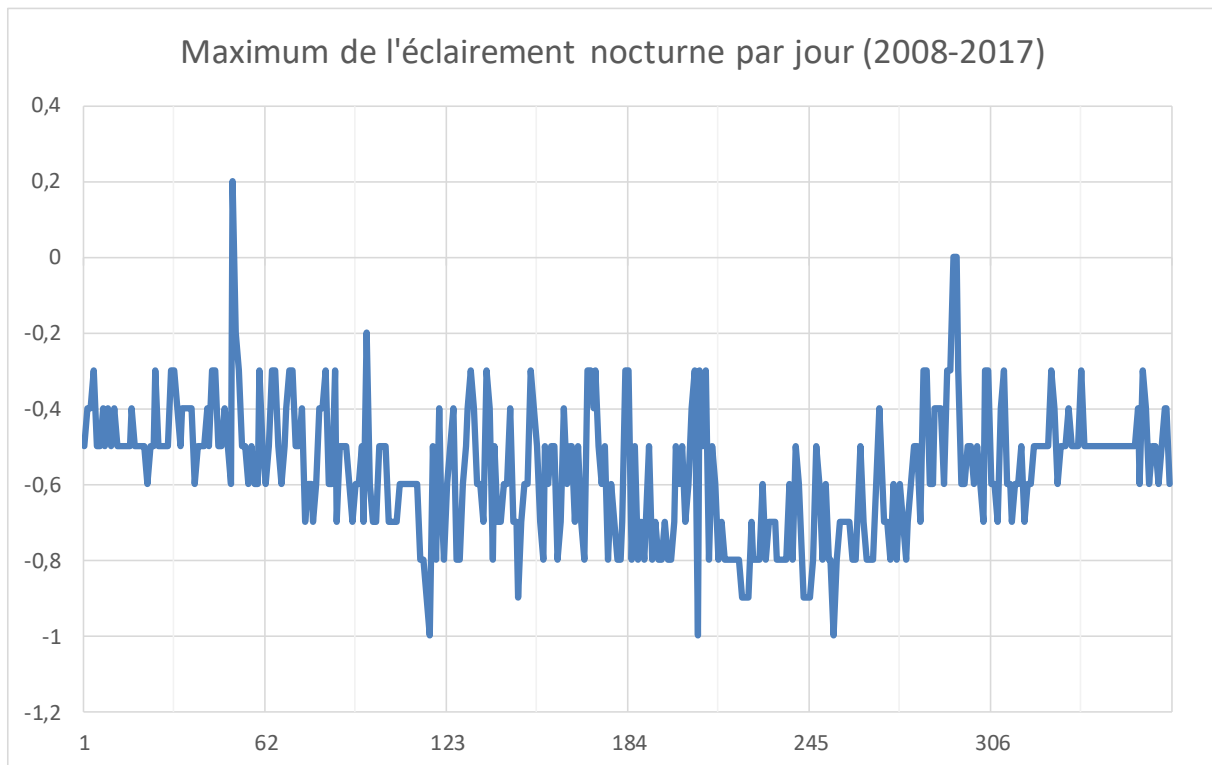


Figure 4 : Maximum d'éclairement nocturne par jour, 2008 à 2017



Seules deux valeurs ne sont pas strictement négatives, et le minimum n'atteint -1 que trois fois. La quasi-totalité des valeurs sont dans l'intervalle -0,8 à -0,3 W/m².

Ce changement de régime peut être daté à l'aide de la chronique des moyennes journalières de l'année 2007.

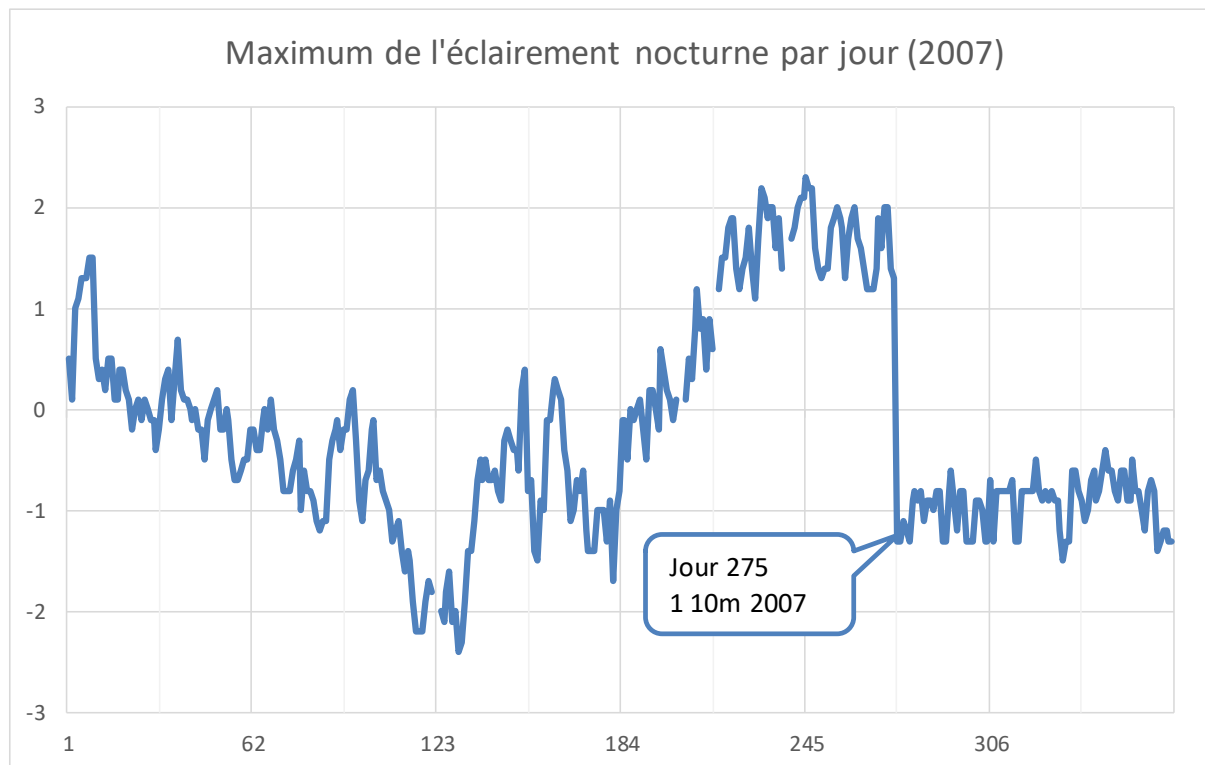


Figure 5 : Maximum d'éclairement nocturne par jour en 2007

Le changement est observé au jour 275, soit le 1 10m 2007 (21 septembre 2007). À partir de cette date, les mesures maximales nocturnes sont très encadrées. Cette date correspond à la mise en œuvre d'actions de maintenance des appareils de mesure, qui a permis d'éviter les dérives de mesures en raison d'effets indésirables.

On peut considérer, pour les mesures depuis 2008, que la nuit complète est atteinte dès que l'éclairement solaire total est inférieur ou égal à 1 W/m²

Ayant le souci de prendre en compte également les mesures depuis 2003, nous proposons de relever ce seuil à 2,3 W/m², valeur maximale atteinte une fois pendant une nuit de 2007.

Ainsi nous considérerons que **les mesures d'éclairement concernent une période non-nocturne si l'éclairement solaire total est supérieur à 2,3 W/m²**. Nous avons ajouté aux données de chaque relevé un indicateur calculant ce critère.

Les classes de relevés définies à l'aide de ce critère sont les suivantes :

Caractéristiques	Nombre de relevés	Part
Éclairement solaire > 2,3 W/m ²	64 309	52,26%
Éclairement solaire <= 2,3 W/m ²	58 756	47,74%
Total relevés avec mesure	123 065	100,00%
Absence de mesure	8 431	
Total général	131 496	



Les relevés concernant des périodes réputées non nocturnes forment un peu plus de la moitié de la population des relevés comportant avec la mesure d'éclairement total. Compte tenu des périodes de crépuscules, notre classification paraît cohérente.

2.2 Calcul de la fraction diffuse

Sur la base de ce critère, nous calculons la fraction diffuse ainsi :

- Si l'une des mesures d'éclairement solaire total ou diffus manque, la fraction diffuse est réputée manquante ;
- Si l'éclairement solaire est $\leq 2,3 \text{ W/m}^2$, la fraction diffuse est fixée à 100% ;
- Sinon, la fraction diffuse est le rapport entre l'éclairement diffus et l'éclairement total, exprimé en pourcentage.

Avec cette définition, la fraction diffuse calculée est toujours positive, et la valeur moyenne à une même heure et un même mois ou une même date est toujours inférieure à 100%. Il existe toutefois des valeurs individuelles supérieures à 100% : ceci est dû au fait que le calcul est fait à partir de mesures déjà moyennées sur une heure, et provenant de deux instruments distincts.

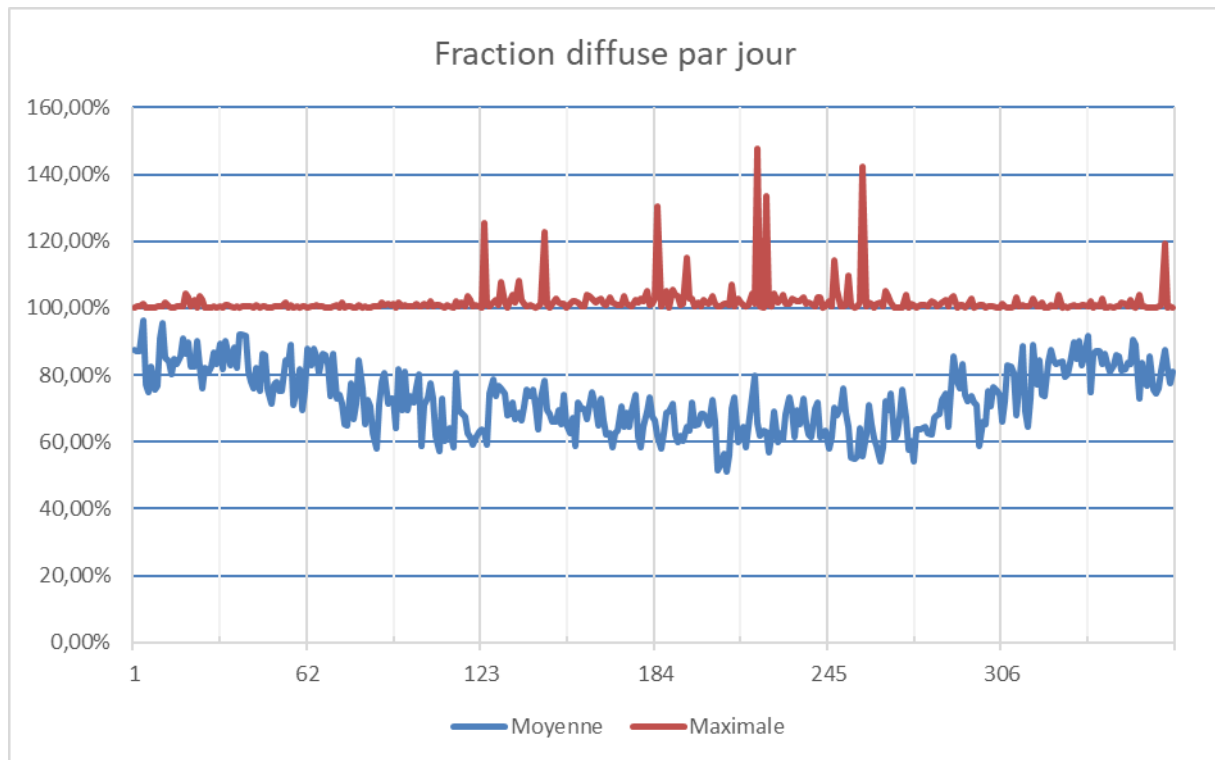


Figure 6 : Fraction diffuse moyenne et maximale par jour

Il n'y a en réalité que 19 relevés pour lesquels la valeur calculée de la fraction diffuse est supérieure à 105%, et seulement 10 au-dessus de 110%. Le record absolu est 148%. En analysant plus finement ces données apparemment aberrantes, on s'aperçoit que les relevés ont été faits en période de précipitation (quand celle-ci est mesurée). On comprend aisément que les gouttelettes sur les instruments puissent en perturber les mesures.

Nous avons pris le parti de n'éliminer aucune de ces données de calcul, considérant que les moyennes restent probablement significatives même si certaines valeurs paraissent aberrantes.

Par ailleurs, grâce au critère sur le seuil d'éclairement total à $2,3 \text{ W/m}^2$, nous pouvons aussi faire des analyses éliminant toute donnée de période réputée nocturne.



3 Éclairément solaire descendant sur le plan horizontal

3.1 Données journalières

Le graphique ci-dessous représente le maximum et la moyenne en période diurne de l'éclairément solaire, pour chaque quantième d'année milésienne, sur les 15 années.

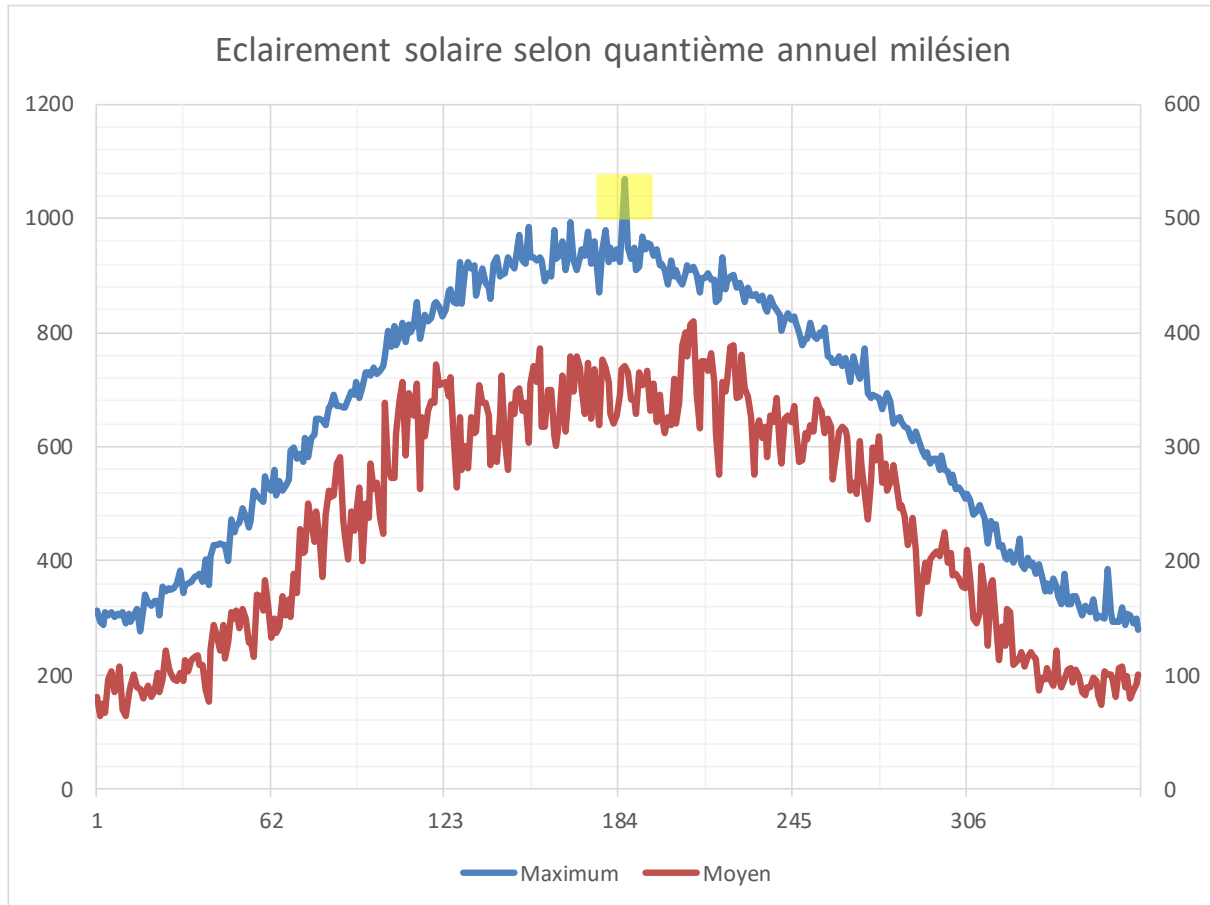


Figure 7 : Éclairément solaire par quantième annuel milésien

Les graduations de l'axe des abscisses correspondent au 1^{er} des mois milésiens impairs. Les lignes verticales principales délimitent les bimestres milésiens, qui sont tous de 61 jours dans une année. Le 366^e jour ne recueille que les mesures correspondant au jour intercalaire des 4 années abondantes de la période 2003-2017.

Le maximum et la moyenne sont représentés sur deux échelles différentes, pour faciliter l'appréciation générale de l'allure des deux courbes.

L'aspect le plus frappant du graphique est la quasi-symétrie des enveloppes des deux courbes par rapport à l'axe central, qui représente le solstice d'été à moins de deux jours près. Ceci invite à analyser plus finement les dissymétries des courbes réelles, et d'en chercher de possibles conséquences pour les utilisateurs.

La courbe du maximum fait apparaître un point singulier, surligné en jaune. Il correspond à une seule valeur, relevée le 24 juin 2015 (3 7m 2015) à 11 heures. Ce jour particulier, des nébulosités ont entouré le soleil sans le cacher : elles ont amplifié l'éclairément de lumière solaire reçue directement. La valeur de 1070,4 W/m² est 7% au-dessus de la seconde valeur enregistrée sur toute la période de 15 ans, 1006 W/m². Cette seconde valeur



a d'ailleurs été enregistrée le même jour, à midi. Les valeurs suivantes du palmarès sont 994,1 W/m², 984,2 W/m², 979,6 W/m², puis des valeurs espacées de 2 à 3 W/m², qui se resserrent progressivement.

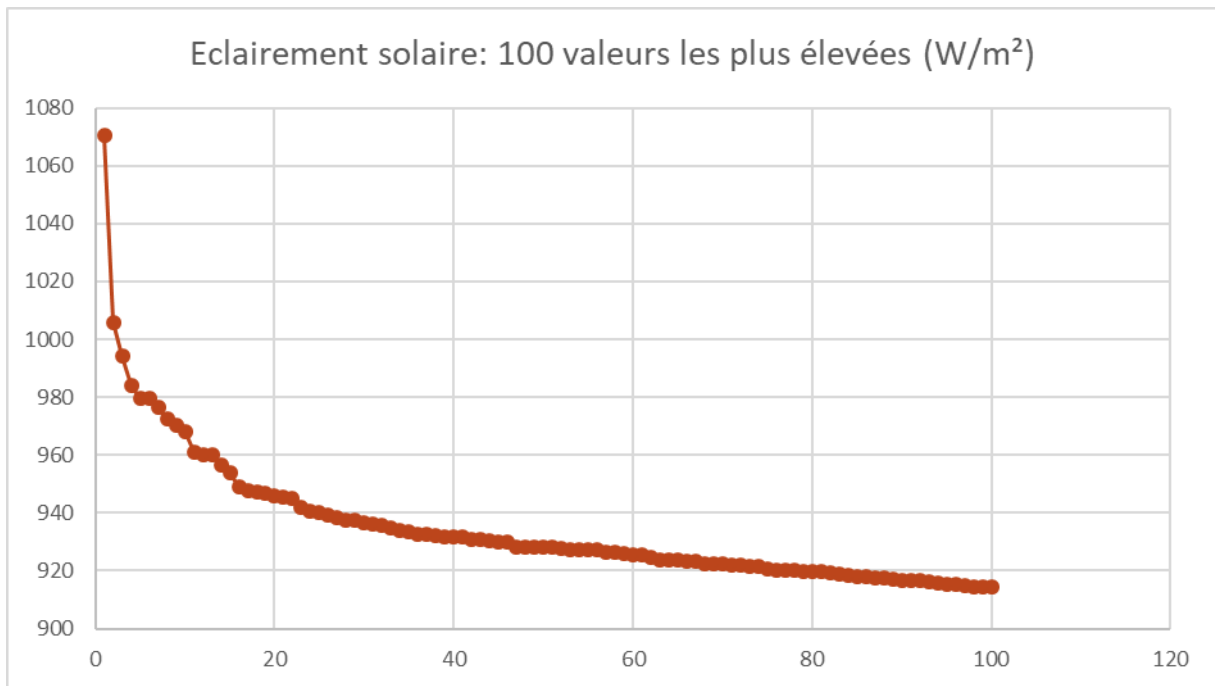


Figure 8 : Éclairement solaire : 100 valeurs les plus élevées (W/m²)

Revenons à la Figure 7 : Si l'on fait abstraction de la mesure singulière de la St Jean 2015, la courbe de moyenne est nettement moins symétrique que la courbe de maximum. Elle suggère des pistes sur l'influence d'origine météorologique sur la moyenne d'éclairement.

À titre de comparaison, le graphique suivant restitue les chiffres selon le calendrier grégorien, ou plus précisément en utilisant le quantième annuel grégorien. Notez bien qu'un même quantième annuel grégorien ne représente pas toujours la même date : ainsi le 62^e jour de l'année grégorienne est le 3 mars en année commune, mais le 2 mars en année bissextile. De même, les lignes verticales, bien que régulièrement espacées, ne représentent pas exactement les débuts de mois grégoriens.

Comme pour la Figure 7, la valeur pour l'abscisse 366 est la moyenne sur 4 années seulement. Pour cette figure, il se trouve qu'aux quatre dates, les 31 décembre des années bissextiles, l'ensoleillement a été faible, sans que cela ne soit significatif pour l'ensemble des mesures.

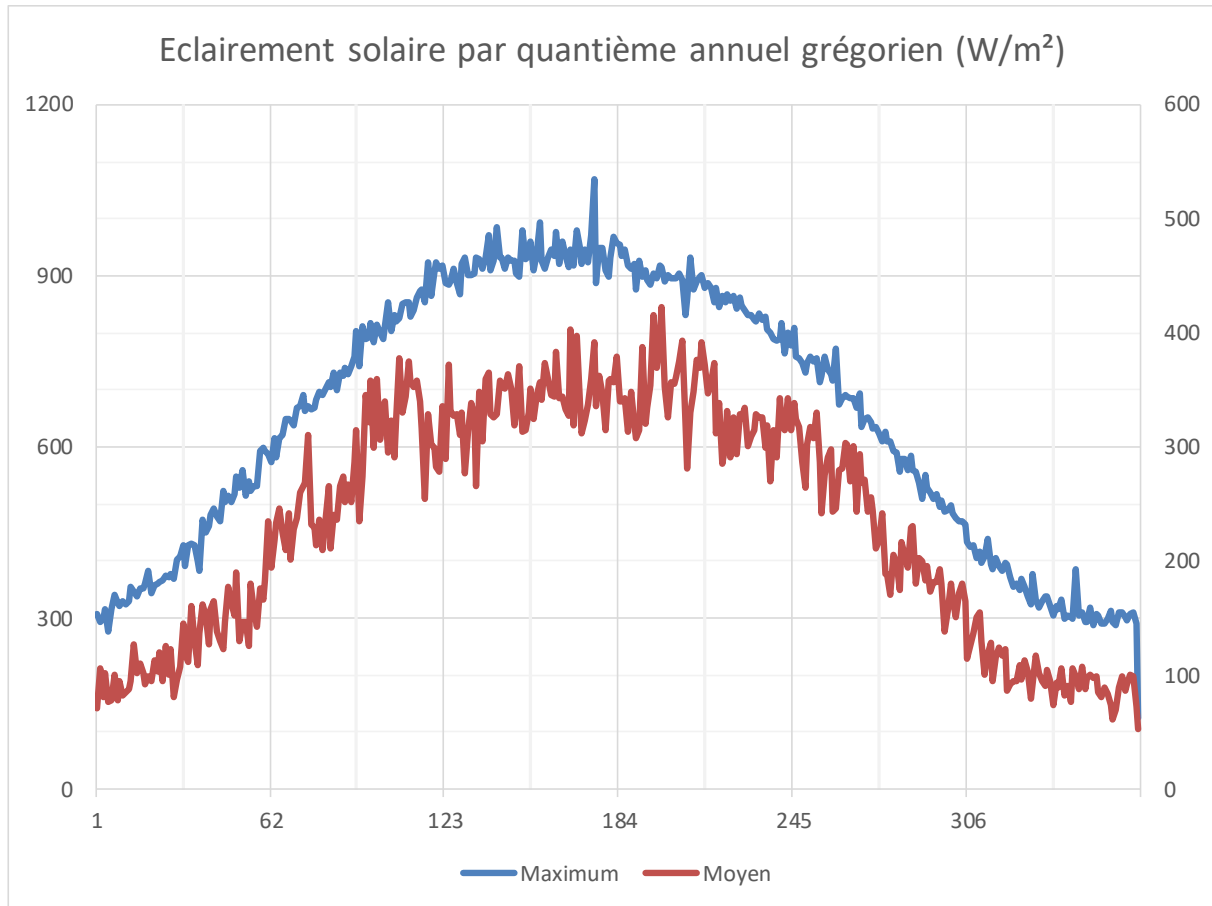


Figure 9 : Éclairement solaire par quantième annuel grégorien

On notera qu'il est difficile d'identifier l'axe de symétrie sur cette figure. L'axe de symétrie pour l'éclairement maximum (en exceptant le 24 juin 2015) n'est pas porté par un axe du quadrillage. Ce constat n'incite pas à faire une analyse plus poussée.

3.2 Données consolidées par mois

Fréquemment les données météorologiques sont synthétisées par mois du calendrier grégorien. Les mois grégoriens sont d'ailleurs considérés comme pertinents pour représenter les caractéristiques météorologiques (voir notamment <http://www.meteofrance.fr/actualites/4896487-pourquoi-les-saisons-meteorologiques-different-elles-des-saisons-astronomiques>). Quand l'on se remémore les circonstances dans lesquelles ont été définis les mois du calendrier julien par Sosigène, l'astronome de Jules César, on peut considérer cette adéquation comme miraculeuse. S'agissant de phénomènes dépendant au premier ordre de la hauteur du soleil, le calendrier grégorien n'est pas adéquat, comme nous allons le voir.

Nous proposons ici d'analyser la moyenne de l'éclairement total diurne par mois (c'est-à-dire, rappelons-le, la moyenne des données supérieures à 2,3 W/m²), et l'écart-type ou plus précisément l'écart type pondéré par le nombre de mesures.



3.2.1 Analyse selon les mois grégoriens

Commençons par rendre compte de ces variables selon les mois grégoriens sur les 15 années d'observation.

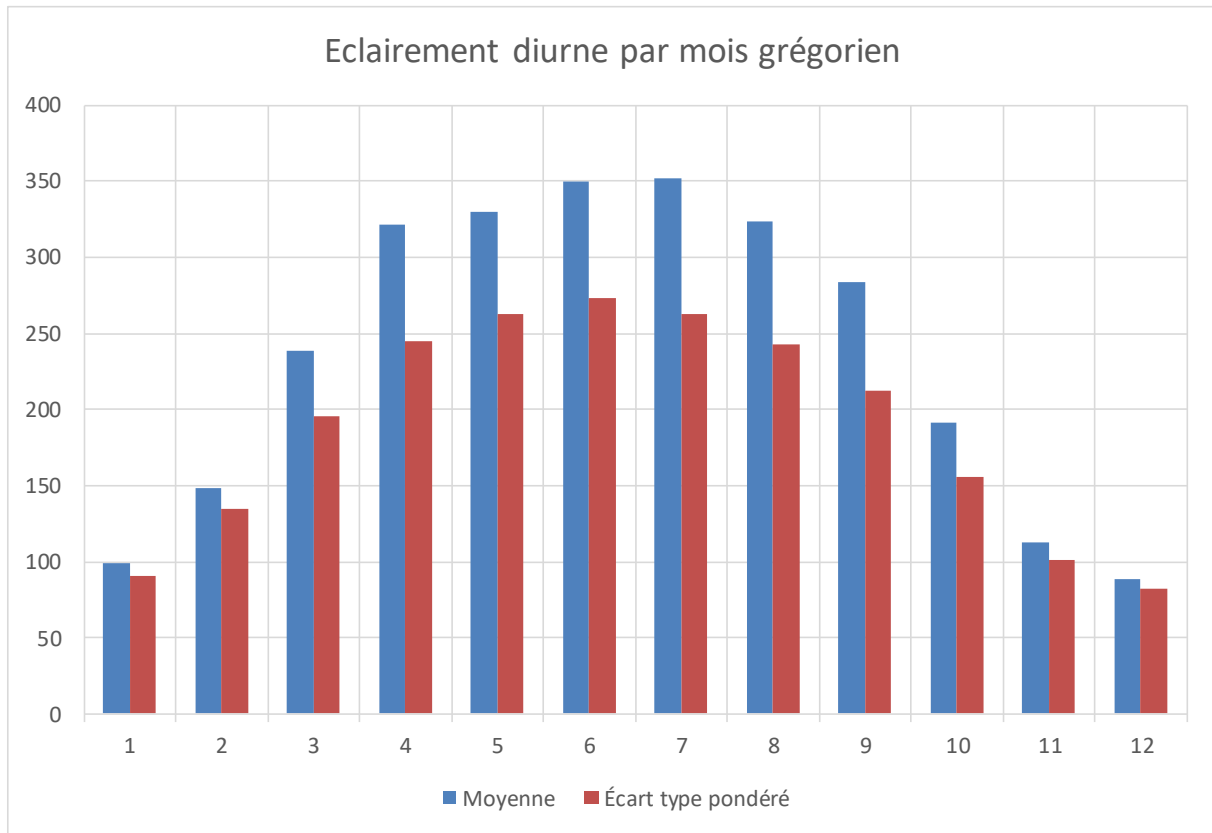


Figure 10 : Éclairage solaire diurne : moyenne et écart-type par mois grégorien

Au-delà de son mouvement général en cloche, le graphique ne présente pas de symétrie, et ne permet pas de qualifier les dissymétries entre les mois respectifs du premier et du second semestres. La moyenne est pratiquement la même en juillet qu'en juin, alors que juin bénéficie d'un ensoleillement primaire un peu plus favorable. Avril est très semblable à août, alors qu'août est en principe nettement plus ensoleillé. Janvier et février présentent des niveaux respectivement plus élevés que décembre et novembre, ce qui s'explique facilement par la position de ces mois pour le cycle solaire annuel ; mais en disant cela, on ne perçoit pas de possibles effets de second ordre. Finalement, que peut-on dire ?

On perçoit certes certains effets de second ordre par rapport à ce que l'on peut attendre, mais le graphique ne suggère aucune piste ; et par ailleurs, d'autres dissymétries existent peut-être sans que l'on ne puisse les percevoir.



3.2.2 Analyse selon les mois milésiens

Le graphique ci-après est construit sur le même principe que le précédent, en remplaçant les mois grégoriens par les mois milésiens. Nous l'avons vu, les valeurs d'éclairement solaire « primaire » sont théoriquement les mêmes pour les couples de mois symétriques (1m, 12m), (2m, 11m) etc. Appelons « montants » les mois 1m à 6m et « descendants » les mois 7m à 12m, par analogie au mouvement de la hauteur méridienne solaire dans les régions extratropicales de l'hémisphère nord. Nous avons matérialisé le niveau atteint respectivement par la moyenne mensuelle et par l'écart-type mensuel en prenant comme référence chacun des mois montants.

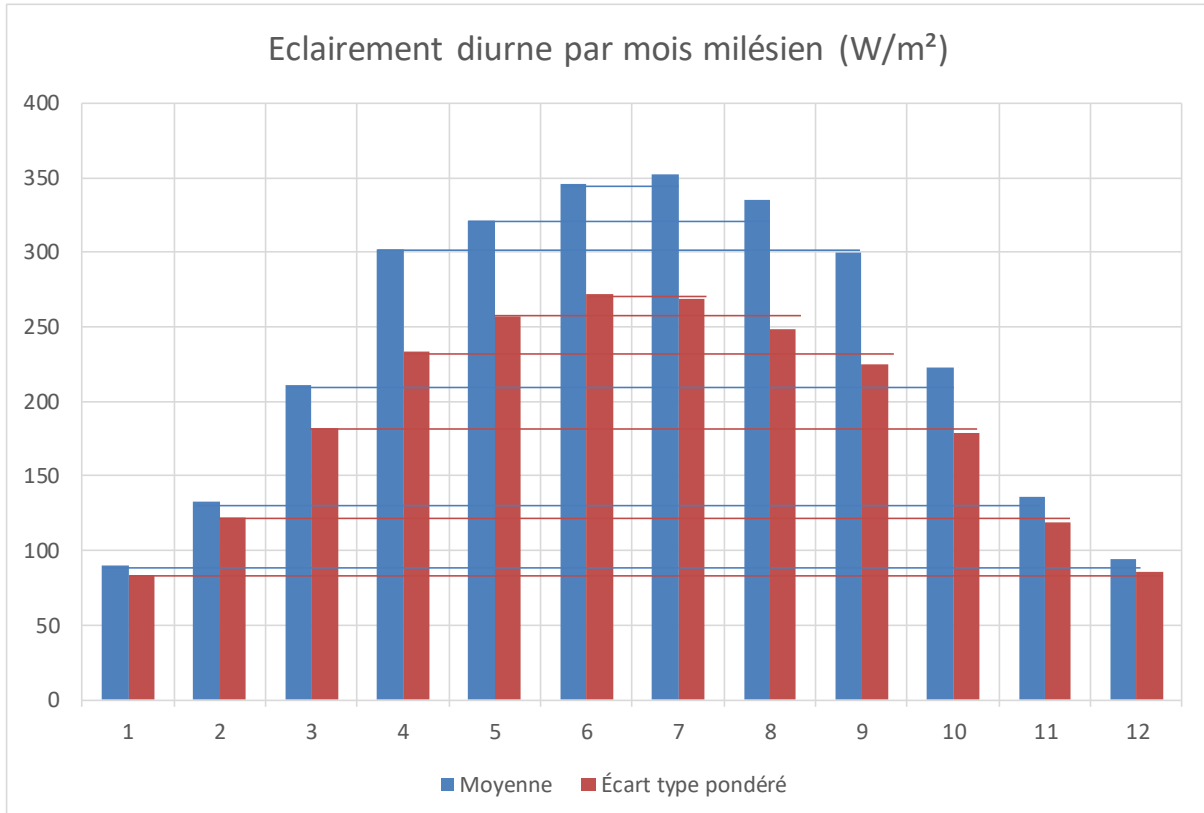


Figure 11 : Éclairement solaire diurne : moyenne et écart-type par mois milésien

La symétrie générale de ce graphique représente ce à quoi l'on pouvait s'attendre a priori. Mais l'on est frappé de voir que cinq des six moyennes de mois descendants sont plus élevées que leurs correspondantes des mois montants. Et encore, les valeurs de l'exception 4m-9m sont presque égales : 300,87 W/m² pour 299,95 W/m². Corrélativement, cinq des six écarts-types des mois descendants sont plus faibles que leurs correspondants, et l'exception 1m-12m est très peu marquée : 83,78 W/m² pour 85,37 W/m². Le second semestre été-automne présente un ensoleillement final plus important et plus stable que le premier. Les différences entre quintème et octème sont les plus marquées.

Observons d'ailleurs que le mois de mai reste tristement réputé pour ses « saints de glaces » : en région de plaine en France, des gelées nocturnes peuvent décimer des plantes sensibles au gel jusqu'au 21 mai, seuil de sextème. « S'il gèle à la Saint Bernardin, (20 mai), adieu le vin ». Août en revanche est réputé le mois le plus stable dans la chaleur.

Il serait pertinent de comprendre l'origine de ces différences entre mois pour lesquels l'éclairement solaire primaire est semblable.



3.2.3 Visualisation par classe de mois symétriques

Cette restitution des variables mensuelles est pertinente pour faire apparaître les différences entre mois montants et descendants.

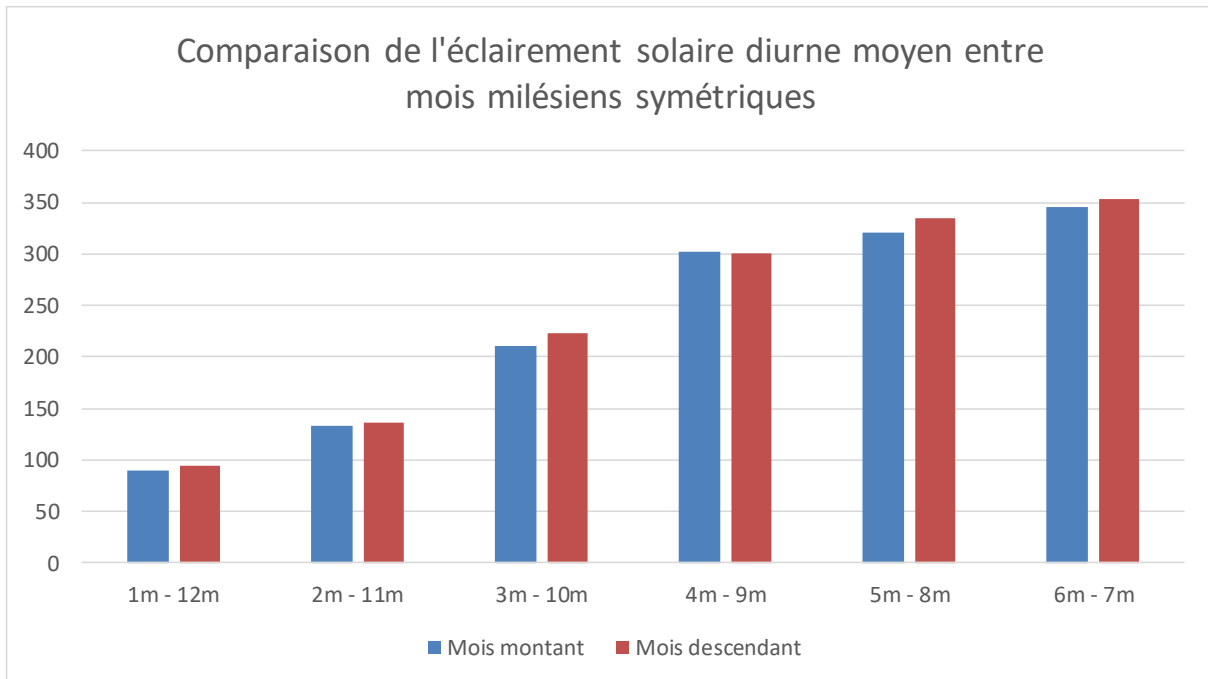


Figure 12 : Comparaison de l'éclairement solaire diurne moyen entre mois symétriques

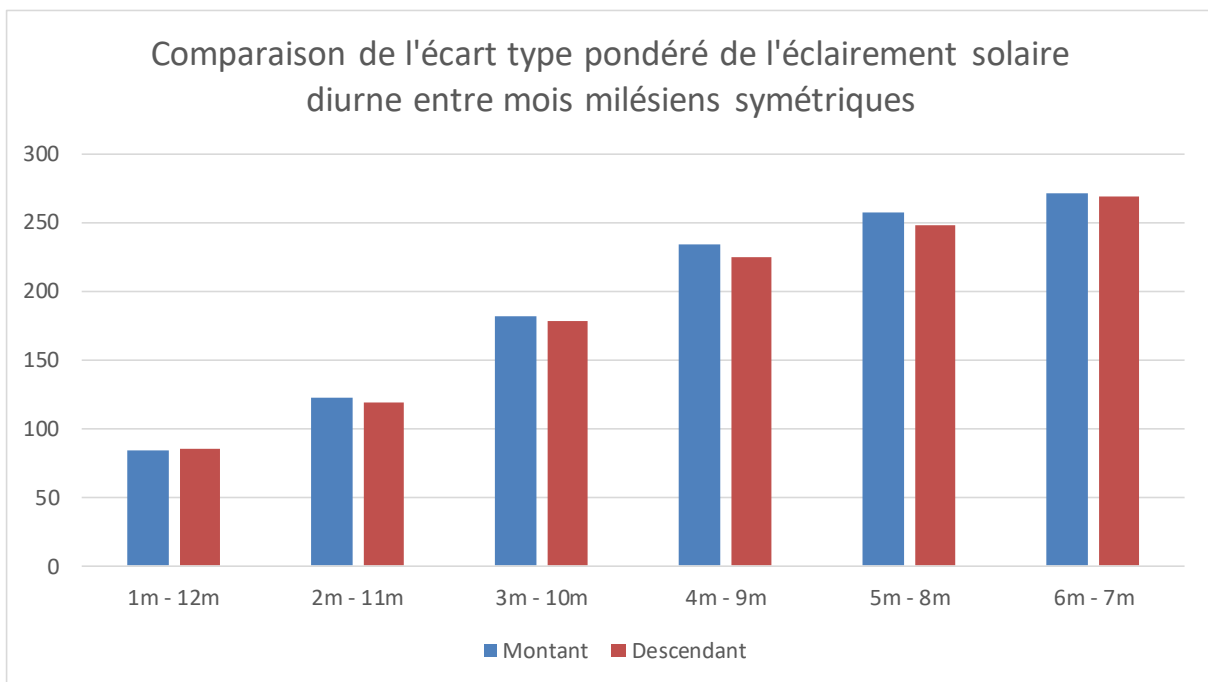


Figure 13 : Comparaison de l'écart-type pondéré de l'éclairement entre mois milésiens

Alors qu'avec les mois grégoriens, on cherche à justifier les écarts de valeurs par des considérations sur l'irrégularité des mois, ici on est incité à rechercher des explications dans les phénomènes atmosphériques. Pourquoi l'éclairement moyen est-il plus faible en hiver et printemps qu'en été et automne ? Pourquoi est-il plus variable ? Qui sait si l'un de ces faits cache un phénomène ou une loi digne d'intérêt pour l'étude de l'ensoleillement ou la planification de centrales solaires ?



4 Fraction diffuse de l'éclairement solaire

4.1 Choix de l'estimateur de la fraction diffuse.

La fraction diffuse suit un cycle journalier assez marqué. De 100% aux premières lueurs mais avant que le soleil ne se lève, elle va diminuer dans la journée pour atteindre des valeurs d'autant plus faibles que le soleil sera dégagé, puis remontera jusqu'à atteindre 100% pendant les dernières heures du jour, après le coucher du soleil.

Ce cycle diffère fortement d'une journée à la suivante en raison de couvertures nuageuses différentes. En revanche, si l'on recherche la moyenne de toutes les fractions diffuses d'une même heure enregistrée à une même date sur toutes les années d'observation, ou sur un même mois, on voit apparaître un profil journalier.

Comparons la moyenne de la fraction diffuse heure par heure sur toutes les observations, selon deux modes de calcul :

- En considérant la mesure *absente* si l'éclairement total est inférieur à $2,3 \text{ W/m}^2$,
- Selon le mode que nous proposons en 2.2 page 11 : la fraction diffuse est fixée à 100% dès que l'éclairement total est connu et inférieur à $2,3 \text{ W/m}^2$,

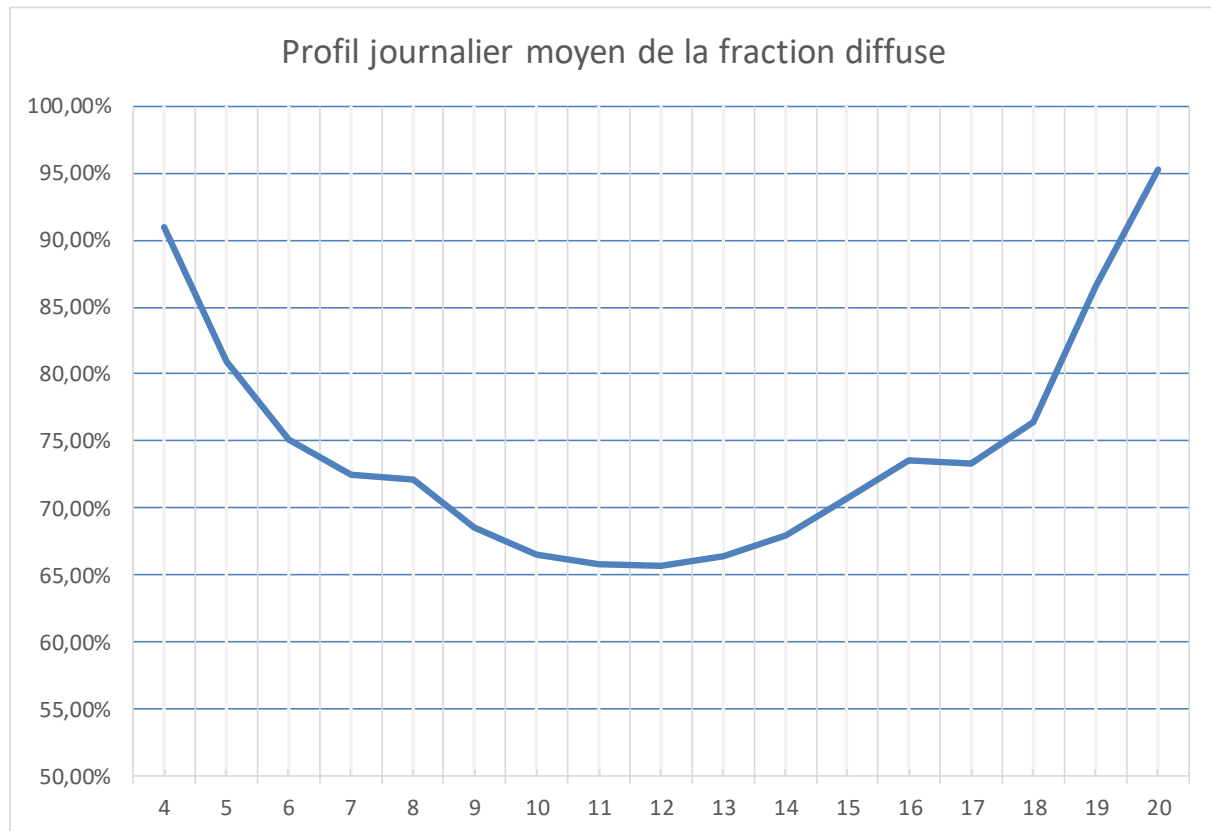


Figure 14 : profil journalier moyen de la fraction diffuse avec mesures filtrées

Le profil paraît harmonieux de 8 h à 16 h, mais est plus chaotique aux extrémités. La raison est que des valeurs de plus en plus nombreuses manquent à ces horaires, comme le graphique suivant l'indique :

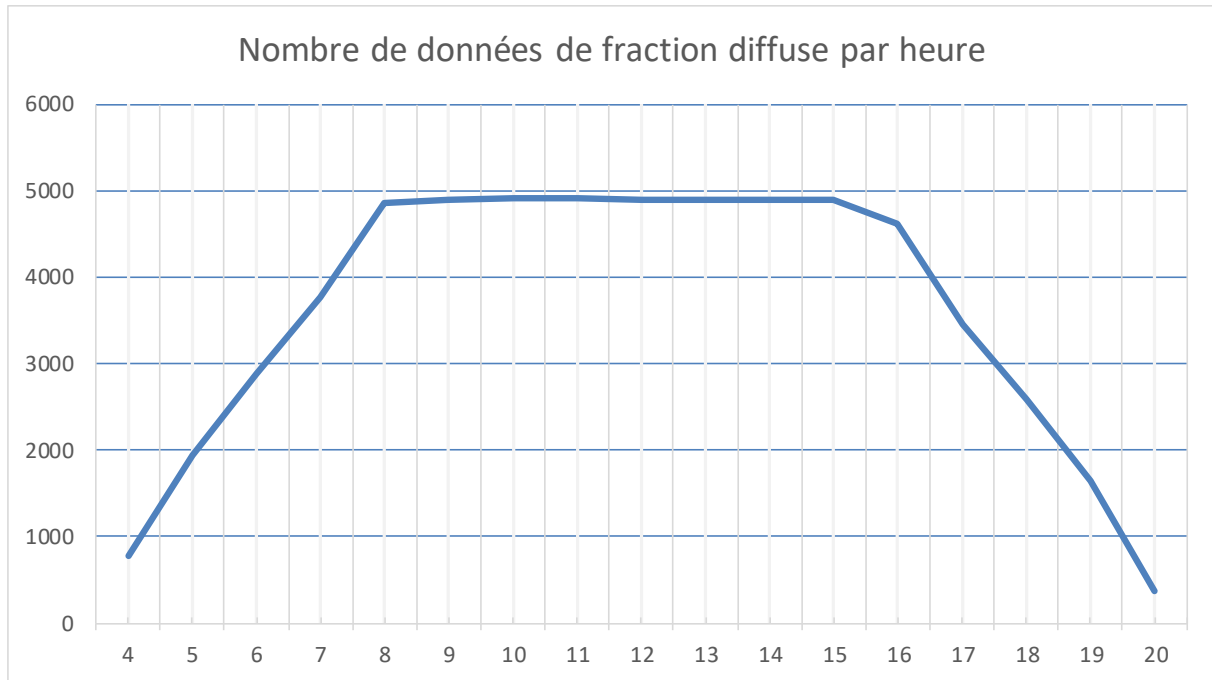


Figure 15 : Nombre de données de fraction diffuse par heure

Avant 8 heures et après 16 heures sont éliminées de nombreuses données au motif qu'elles sont réputées manquantes. Ces données manquantes, qui correspondent à la valeur 100% introduisent un biais dans la moyenne de la fraction diffuse.

Le profil journalier moyen en considérant toutes les données donne lieu au profil plus régulier ci-dessous.

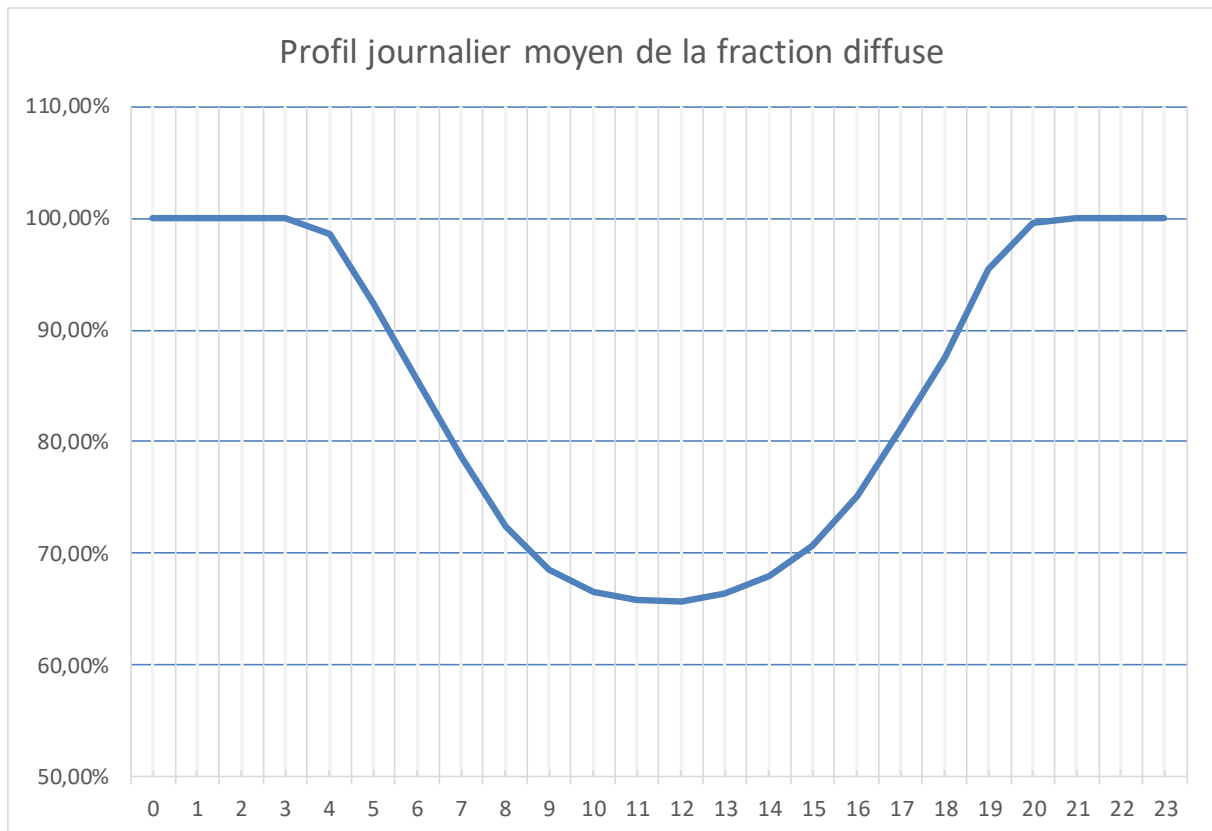


Figure 16 : Profil journalier moyen de la fraction diffuse avec toutes valeurs



Il nous paraît préférable de comparer les profils journaliers en prenant toutes les données, y compris les valeurs conventionnelles de 100% quand l'éclairement total est très faible. Ce principe présente un avantage supplémentaire : toutes les heures sont représentées sur tout graphique, ce qui facilite la comparaison des profils, tous étant à la même échelle.

4.2 Cycle journalier de la fraction diffuse mois par mois

Après avoir vu sur la Figure 16 la moyenne de la fraction diffuse sur toute la période, nous proposons de comparer les fractions diffuses par mois, en représentant ensemble les mois symétriques.

Les bords gauche et droit de la « cuve » correspondent respectivement au lever et au coucher de soleil. La cuve se resserre pour les mois d'hiver et s'ouvre pour les mois d'été. De plus, la cuve se creuse quand les périodes ensoleillées se développent au détriment des périodes nuageuses.

Les « bords » des cuves sont équidistants pour chaque classe de mois symétriques, ce qui est attendu. Sur les graphiques 2m-11m et 3m-10m, la bouche de la cuve est un peu décalée vers la droite les mois descendants. Ce décalage correspond à l'équation horaire : le midi vrai arrive avant le midi moyen en secondème et tertème, et au contraire après le midi moyen en décème et onzème.

En revanche, l'on constate que le minimum des courbes est inférieur de quelques points sur la courbe des mois descendants par rapport aux mois montants. Ce constat doit être rapproché du plus fort éclairement solaire moyen constaté pour les mois descendants en 3.2.2 page 16.

Nous avons indiqué pour chaque mois la valeur moyenne pour 12 heure ainsi que la valeur la plus faible, qui arrive à 11 heures voire à 10 heures.

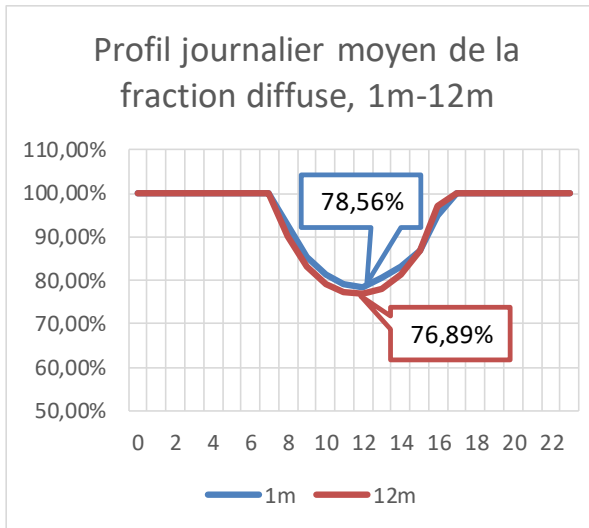


Figure 17 : Fraction diffuse horaire, 1m-12m

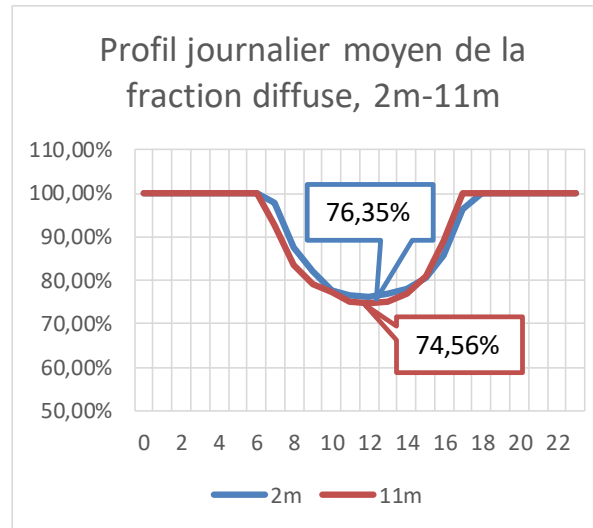


Figure 18 : Fraction diffuse horaire, 2m-11m

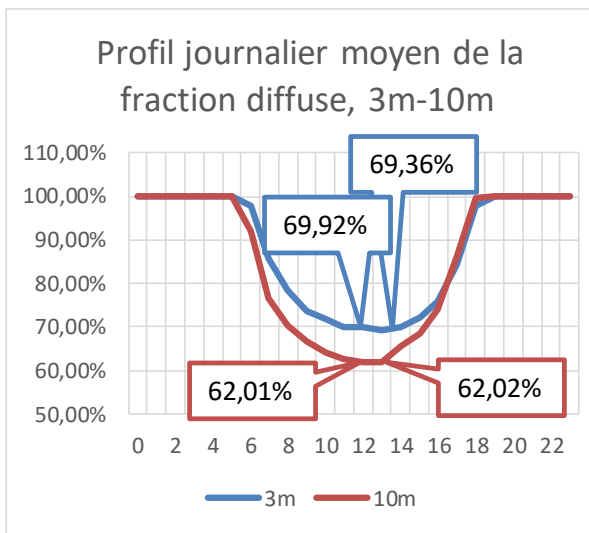


Figure 19 : Fraction diffuse horaire, 3m-10m

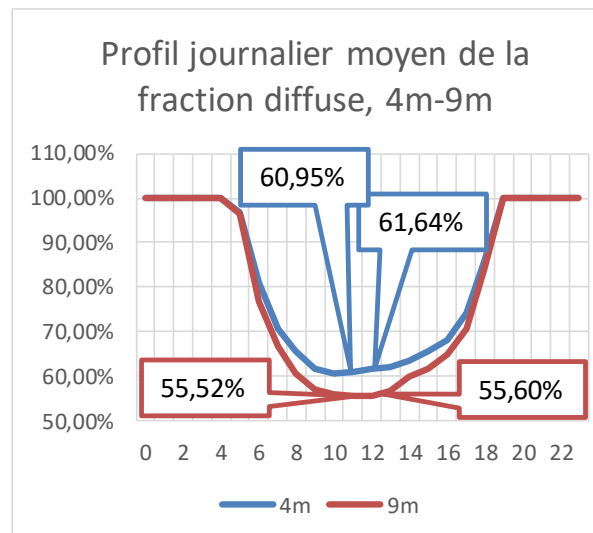


Figure 20 : Fraction diffuse horaire, 4m-9m

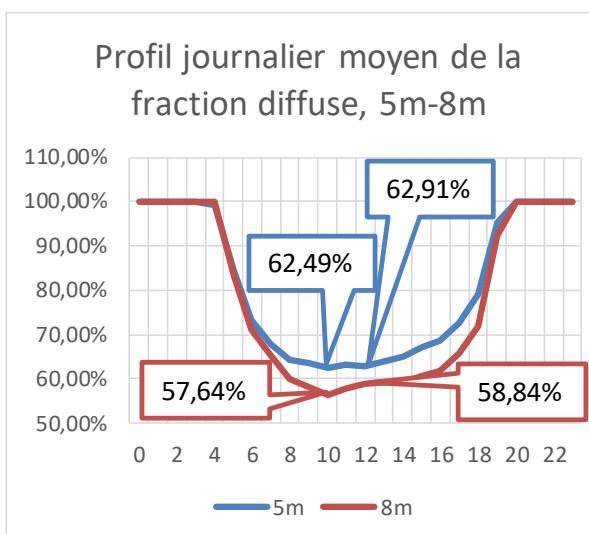


Figure 21 : Fraction diffuse horaire, 5m-8m

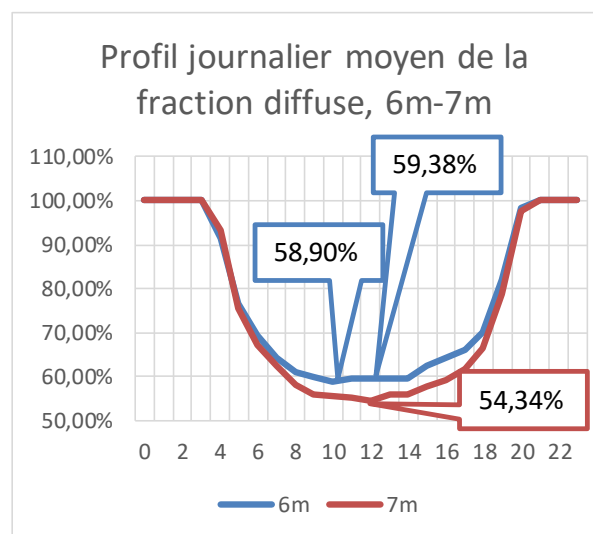


Figure 22 : Fraction horaire diffuse, 6m-7m



4.3 Données journalières pour l'éclairement diffus

Comme pour l'éclairement total, nous analysons les données journalières d'éclairement diffus en éliminant les données des périodes réputées nocturnes, pour lesquelles l'éclairement total est inférieur à $2,3 \text{ W/m}^2$.

La moyenne journalière de la fraction diffuse diurne donne une figure assez agitée. Même portée sur une année milésienne, la symétrie générale n'est que peu marquée.

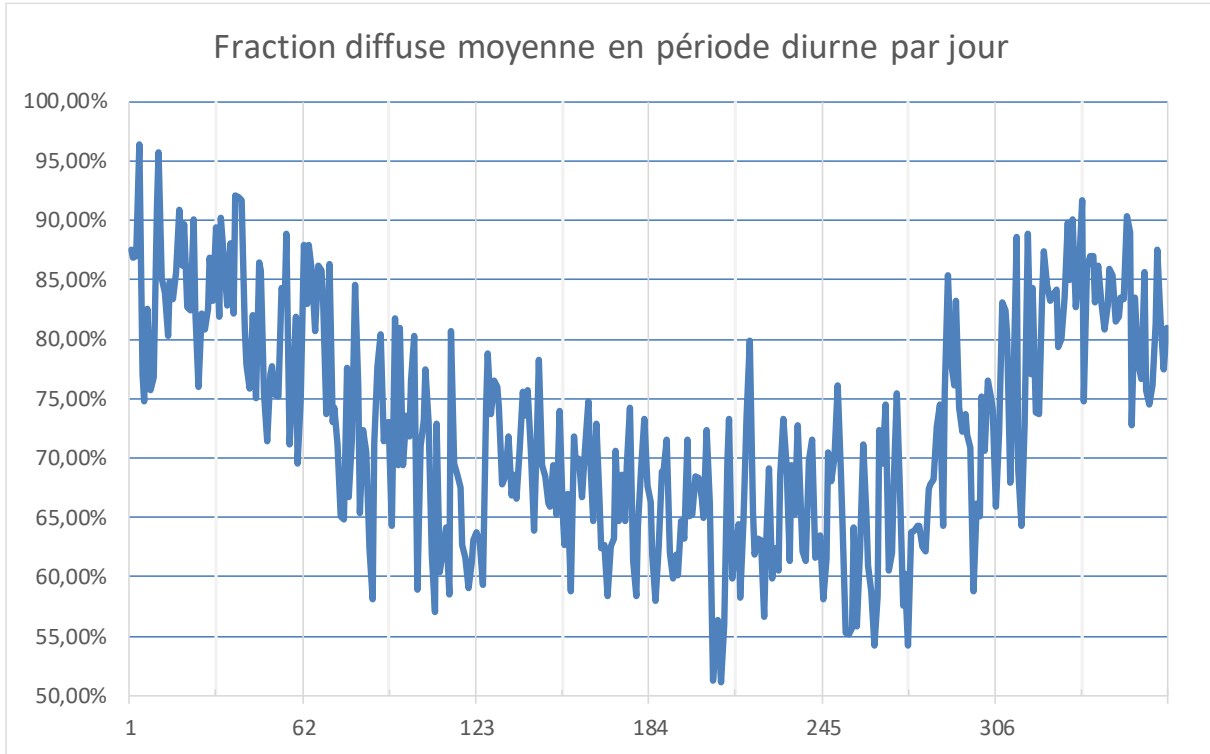


Figure 23 : Fraction diffuse moyenne de l'éclairement en période diurne, par jour

La symétrie est bien perceptible sur la donnée de base, l'éclairement diffus par jour :

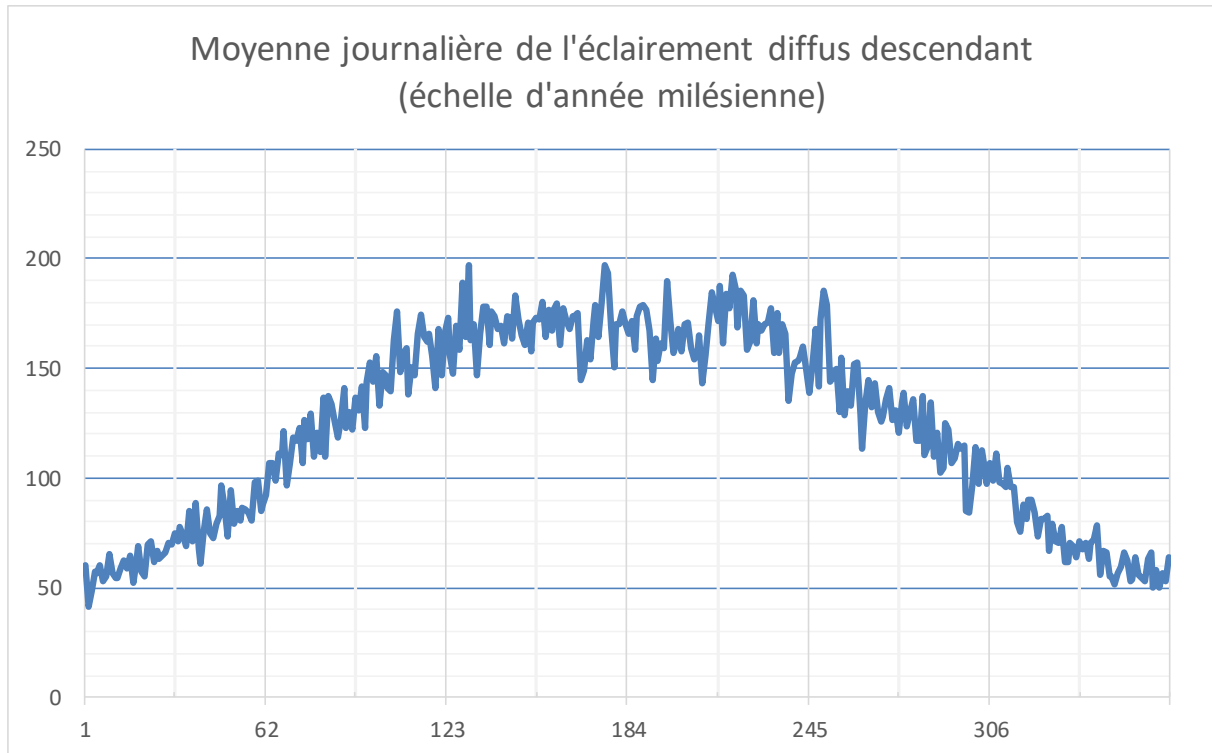


Figure 24 : Moyenne journalière de l'éclairement diffus descendant en échelle milésienne

À titre de comparaison, la même courbe sur une échelle d'année grégorienne ; on perçoit, dans cette seconde figure, que l'axe de symétrie est à gauche de la graduation centrale.

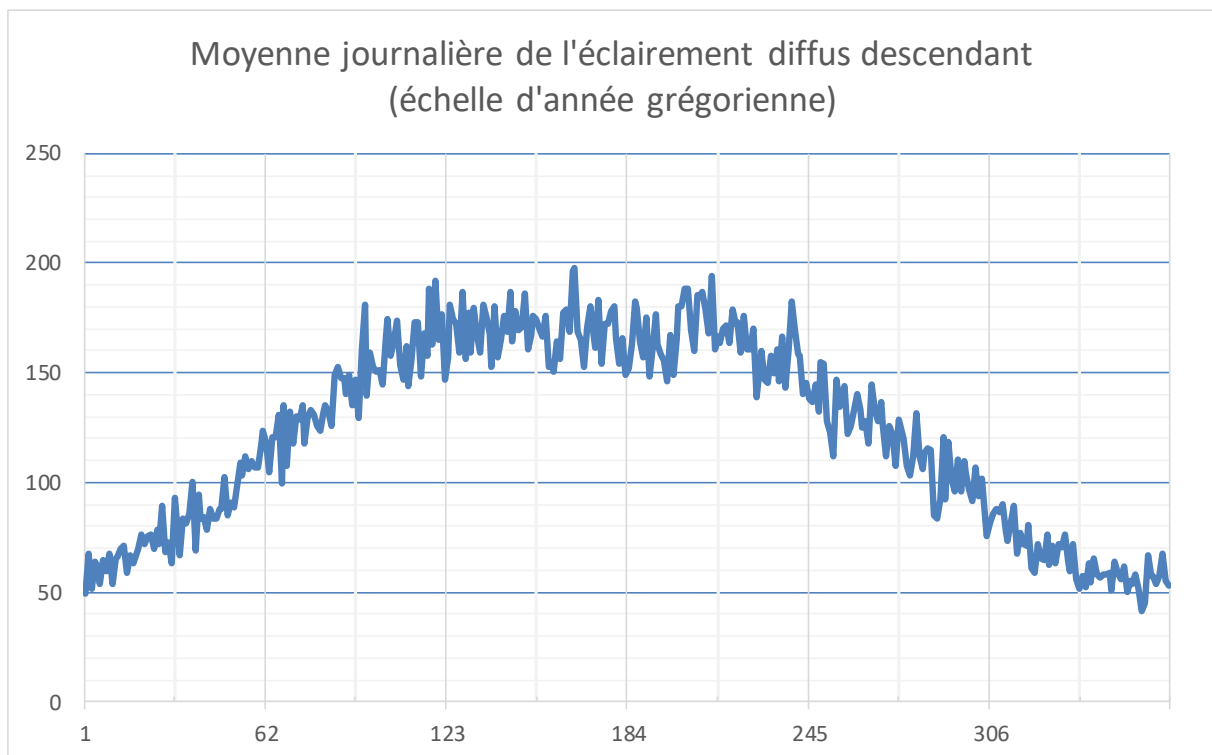


Figure 25 : Moyenne journalière de l'éclairement diffus descendant en échelle d'année grégorienne



4.4 Données consolidées par mois

Sur le graphique suivant, la fraction diffuse moyenne en période diurne par mois milésien est affichée sur une échelle commençant à 50%.

Ici nous ne prenons que les données en période diurne, nous évitons ainsi la pondération par la longueur des jours. Les mois 1m avec 12m et 2m avec 11m présentent une certaine symétrie. Globalement les mois descendants ont une moyenne diurne de fraction diffuse plus faible que les montants. Mais il est intéressant de noter que quintème est en retrait par rapport aux autres mois de printemps, et octème par rapport au reste de l'été. Ces écarts sont visibles également sur les données de la Figure 21 par rapport à celles des deux figures voisines.

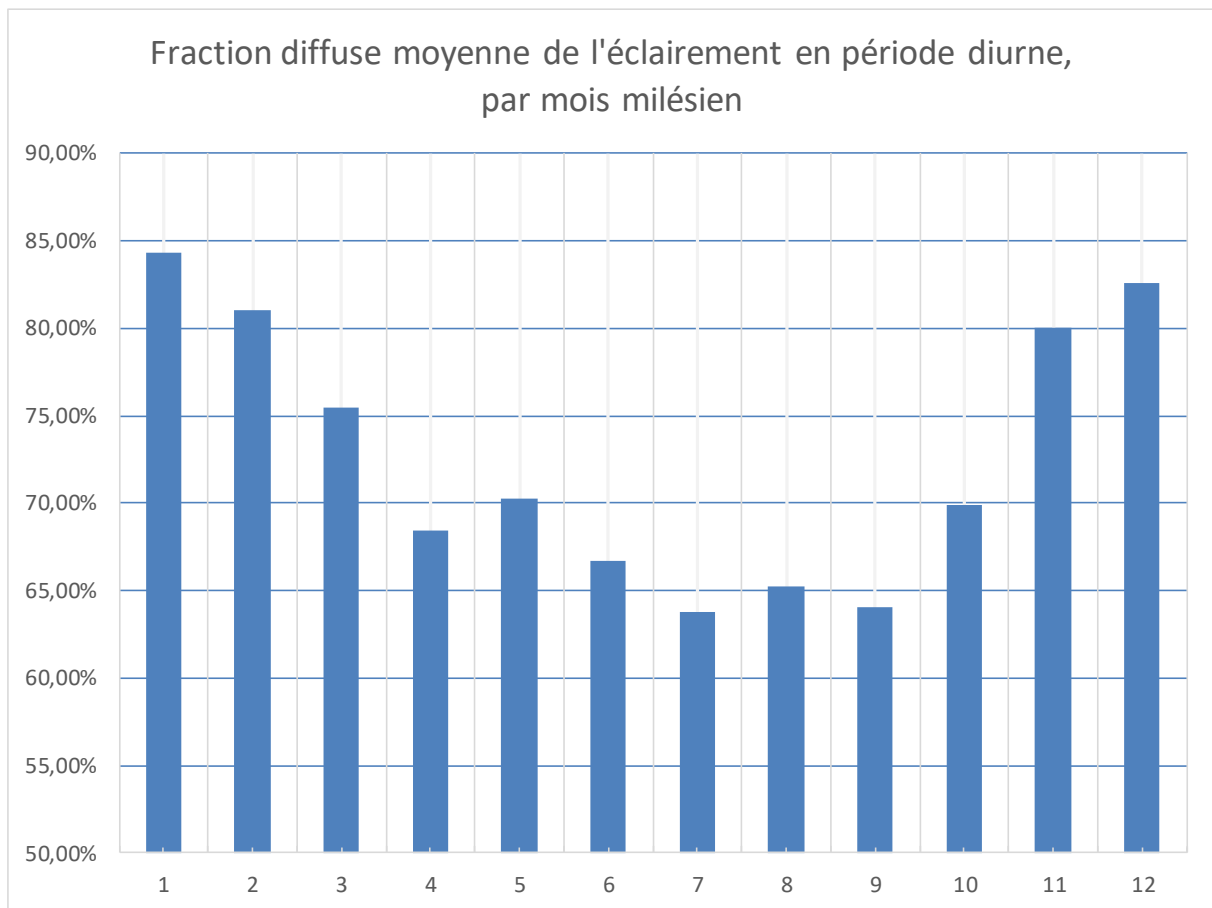


Figure 26 : Fraction diffuse moyenne en période diurne, par mois milésien



Les mêmes données consolidées par mois grégorien sont difficiles à interpréter. On serait bien en peine de comprendre la raison de la différence significative entre les mois montants et les mois descendants.

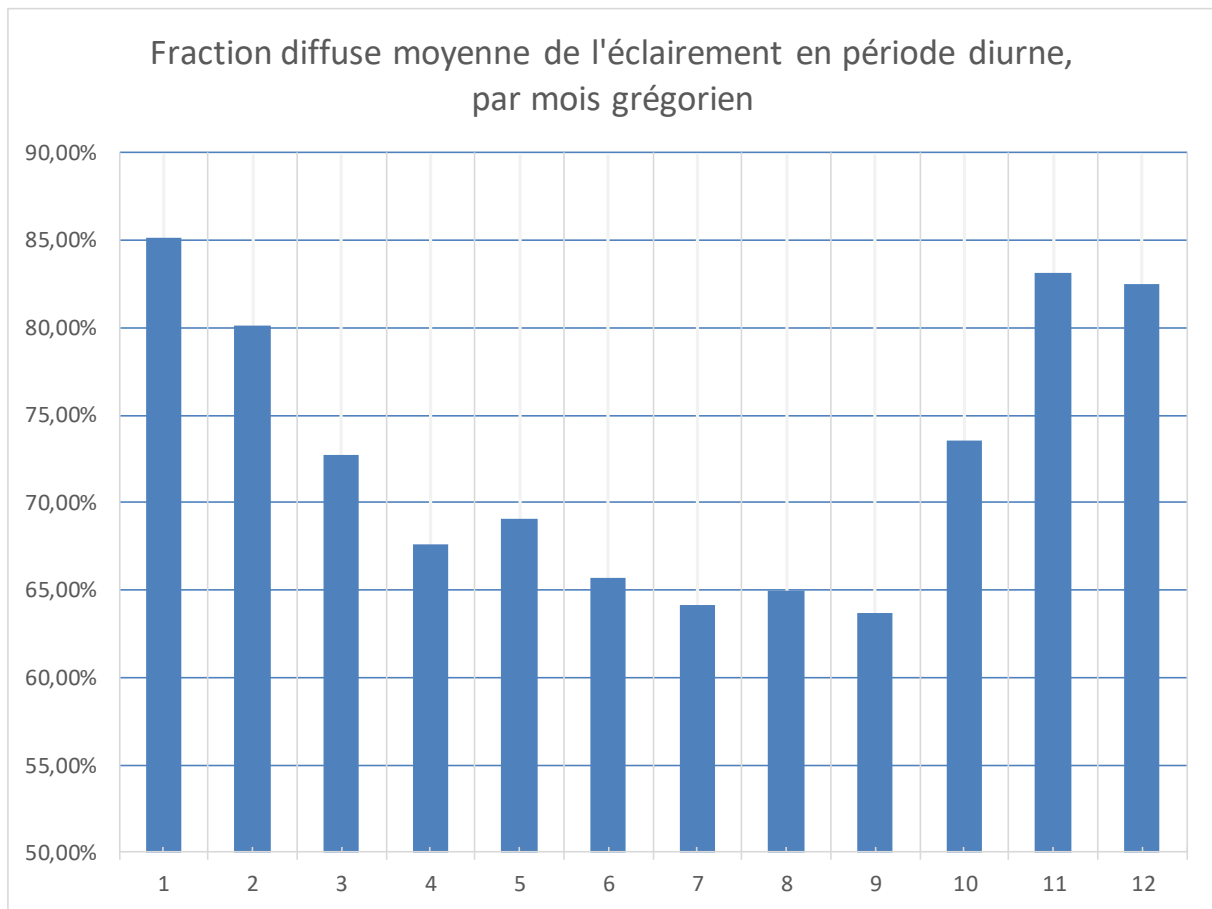


Figure 27 : Fraction diffuse moyenne, par mois grégorien



5 Éclairément infrarouge tellurique descendant.

5.1 Données journalières moyennes et détection d'événements instrumentaux

L'éclairément infrarouge tellurique descendant rend compte du rayonnement renvoyé par l'atmosphère réchauffée par le sol. On mesure là un effet induit par le rayonnement solaire, qui suit un cycle propre. La puissance mesurée ne varie que dans une bande étroite de valeurs : le minimum enregistré est de 178,8 W/m², le maximum de 481,1 W/m². En particulier, ce rayonnement ne cesse pas pendant la nuit.

Nous avons représenté ci-dessous les valeurs moyennes, minimales et maximales journalières sur une échelle d'année milésienne.

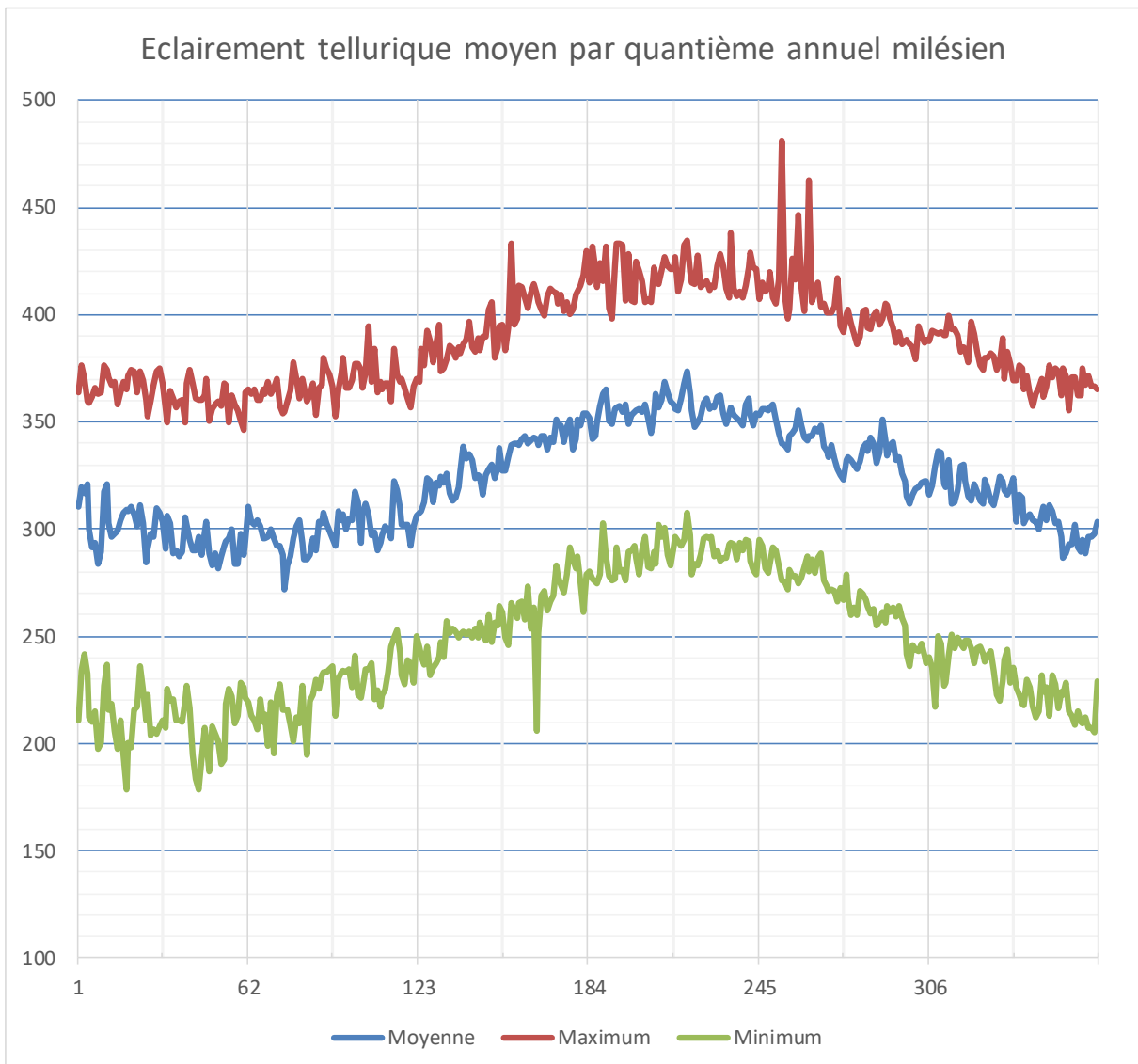


Figure 28 : Éclairément tellurique moyen, par jour milésien

Les mesures moyennes suivent un cours peu agité. On perçoit une saisonnalité, retardée par rapport au cycle solaire. Le cycle apparaît déséquilibré : le minimum pourrait être le début de tertème, alors que le maximum ressort au début d'octème, cinq mois plus tard.



Les courbes de minimum et de maximum présentent des accidents auxquels nous nous sommes intéressés.

5.1.1 Incident instrumental du 13 sextème 2015 (3 juin 2015)

Le décrochage de la courbe du minimum est observé sur la seule journée 165 de l'année 2015, soit le mercredi 13 6m 2015 (3 juin 2015). Pour une raison inexplicée, la mesure reste fixée aux alentours de 210 W/m² de 14 heures à 23 heures. La chronique des mesures les 13 et 14 6m (jours 165 et 166 de l'année milésienne) est donnée ci-après.

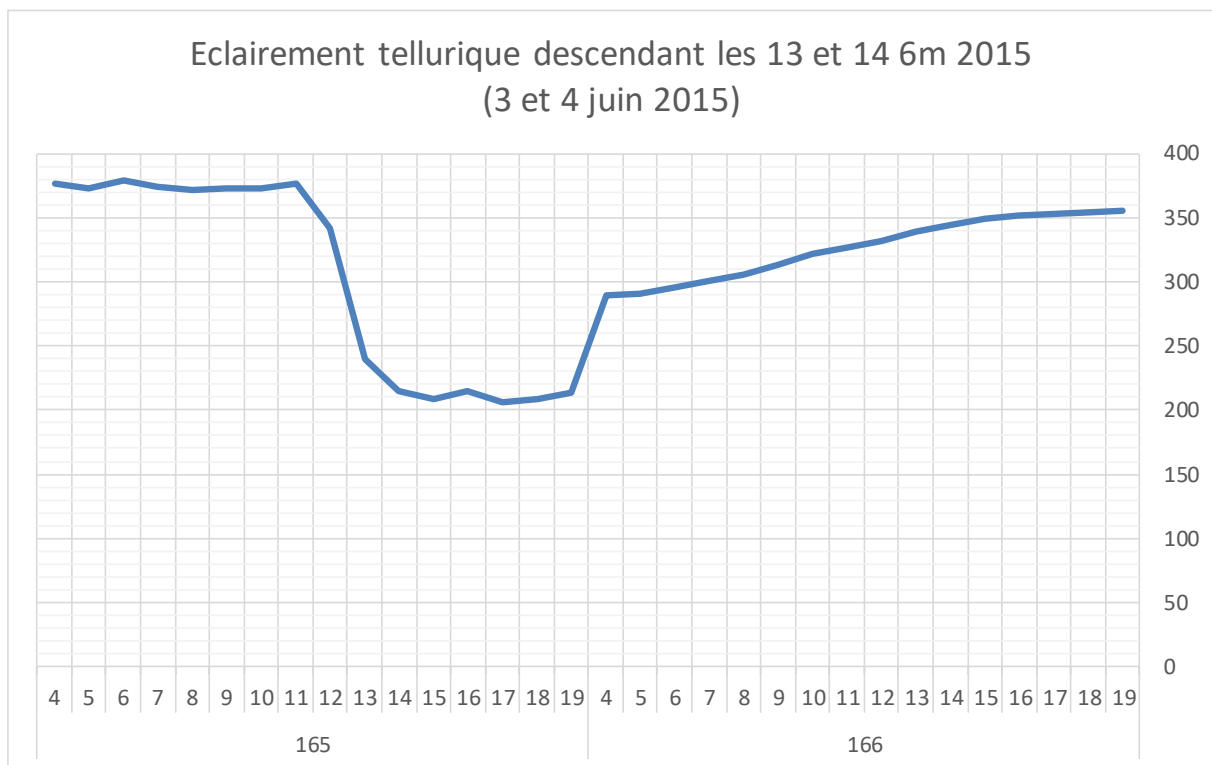


Figure 29 : Éclairément tellurique les 13 et 14 6m 2015

Ce décrochage à une date tout-à-fait inattendue, avec retour à la normale à minuit, mérite une analyse particulière. La valeur particulièrement basse d'environ 210 W/m² n'est apparemment pas corroborée par tous les appareils.



5.1.2 Incident instrumental de novème 2005

Les trois pics de la courbe du maximum sont dus aux mesures de novème 2005. La chronique des mesures du mois de novème 2005 est extrêmement chaotique. Beaucoup de mesures manquent, et plusieurs se situent à des niveaux anormalement hauts. Les graphiques des minimums, moyennes et maximums journaliers fait apparaître ces irrégularités.

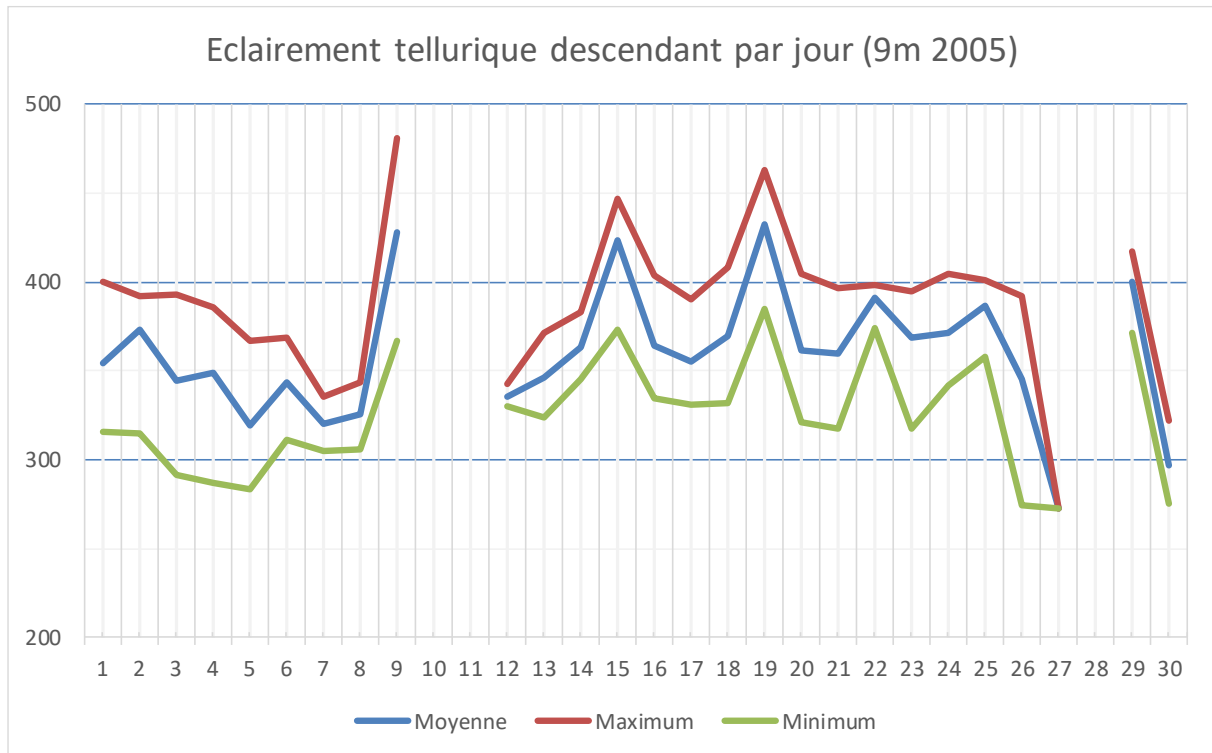


Figure 30 : Éclairage tellurique par jour en 9m 2005

Dans la même période, les mesures d'éclairage solaire sont souvent manquantes.

Sous réserve d'analyse approfondie du journal d'événements de septembre 2005, nous pensons devoir remettre en question les mesures des 9, 15, 19, 27 et 29 novème (30 août, 5, 9, 17 et 19 septembre), voire de toute la période du 9 au 29 novème inclus (30 août au 19 septembre).

Comme pour les autres mesures, nous avons finalement pris le parti de garder toutes ces données et d'analyser des moyennes.



5.2 Cycle journalier de l'éclairement tellurique

Le cycle journalier moyen de l'éclairement tellurique peut être mis en évidence en moyennant les mesures heure par heure sur toute la période.

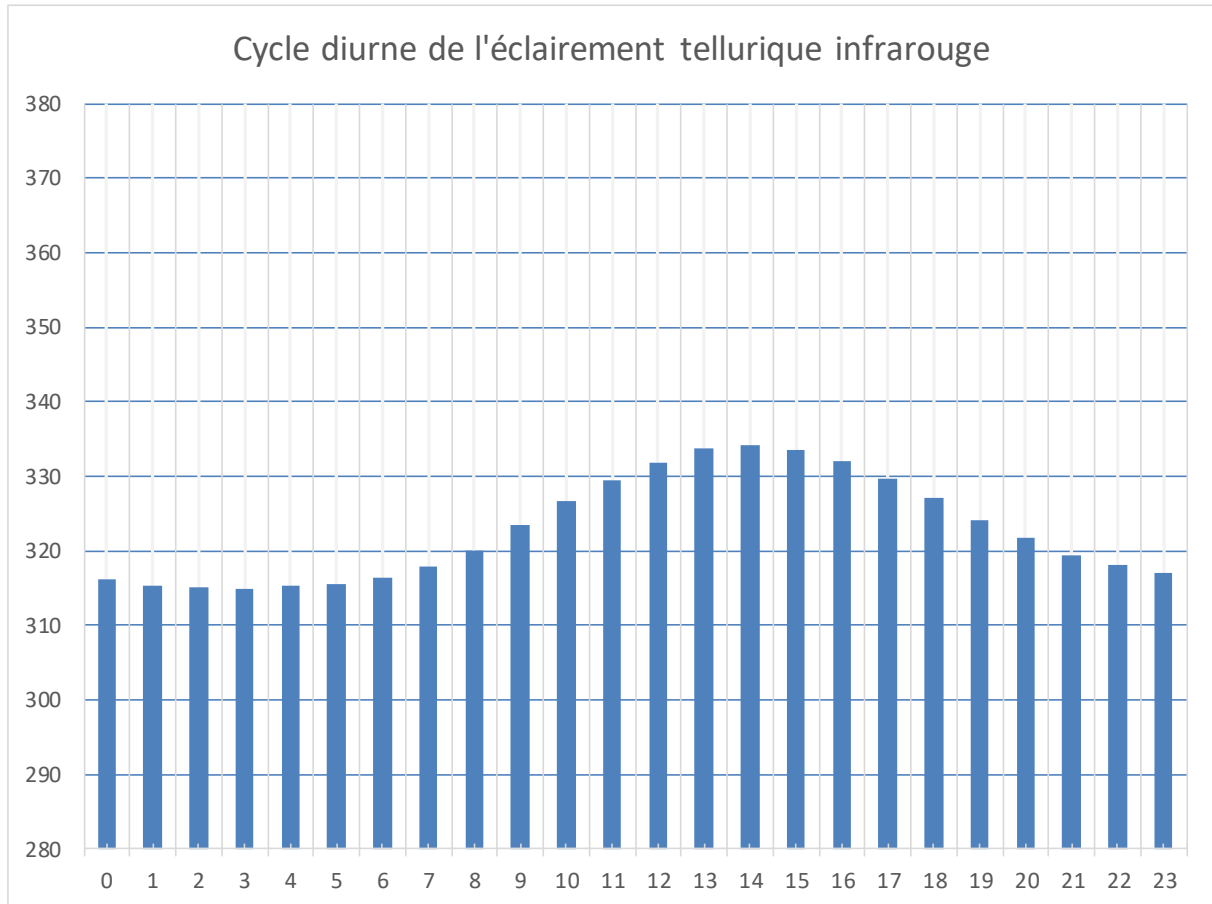


Figure 31 : Cycle diurne moyen de l'éclairement tellurique

L'on voit bien le décalage de ce cycle par rapport au cycle solaire moyen : le minimum est à 3 heures (3 à 4 heures), le maximum est à 14 heures.

Il est important de noter que chaque moyenne est faite sur plus de 5230 données, ce qui permet d'obtenir une courbe d'aspect régulier. L'analyse sur un seul jour, ou à la même date sur les quinze années, ne donne rien de lisible.

Nous nous proposons d'analyser ce cycle diurne pour chaque mois milésien. L'analyse porte alors sur des moyennes de plus de 400 mesures chacune, au mieux 465 mesures pour un mois de 31 jours sans mesure manquante. Les graphiques sont portés sur un même quadrillage.

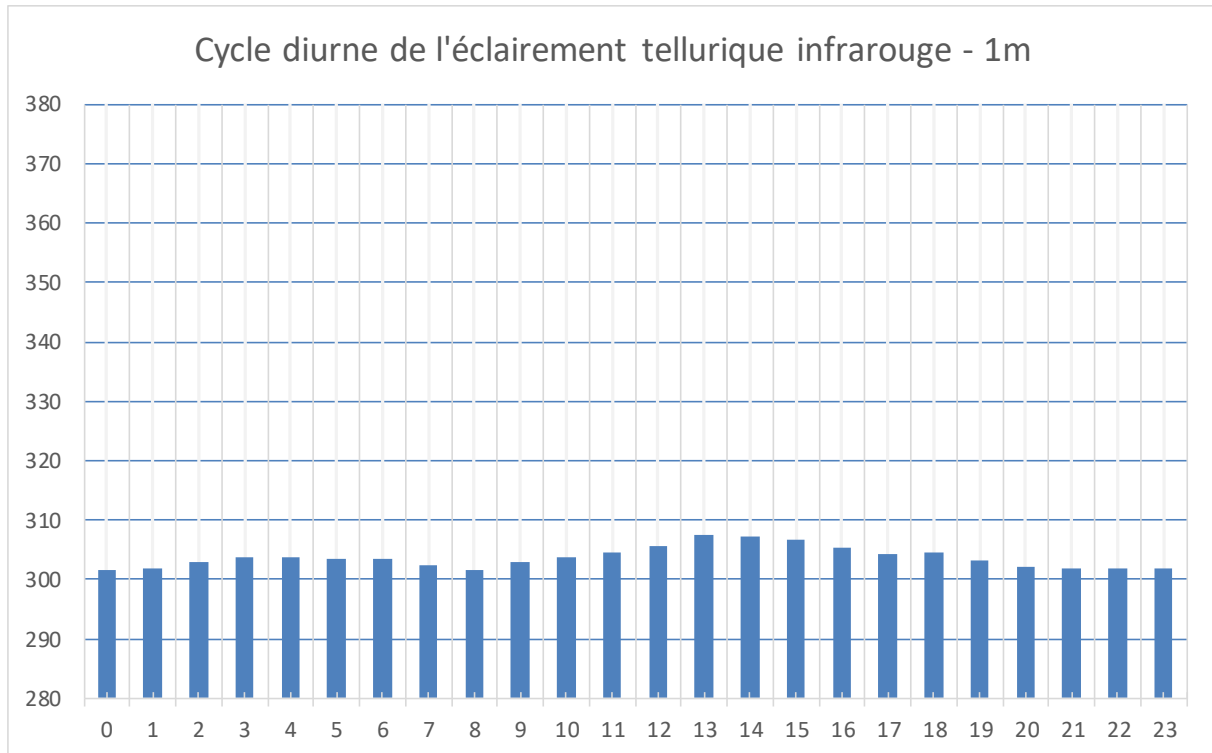


Figure 32 : Cycle diurne de l'éclairage tellurique en unème

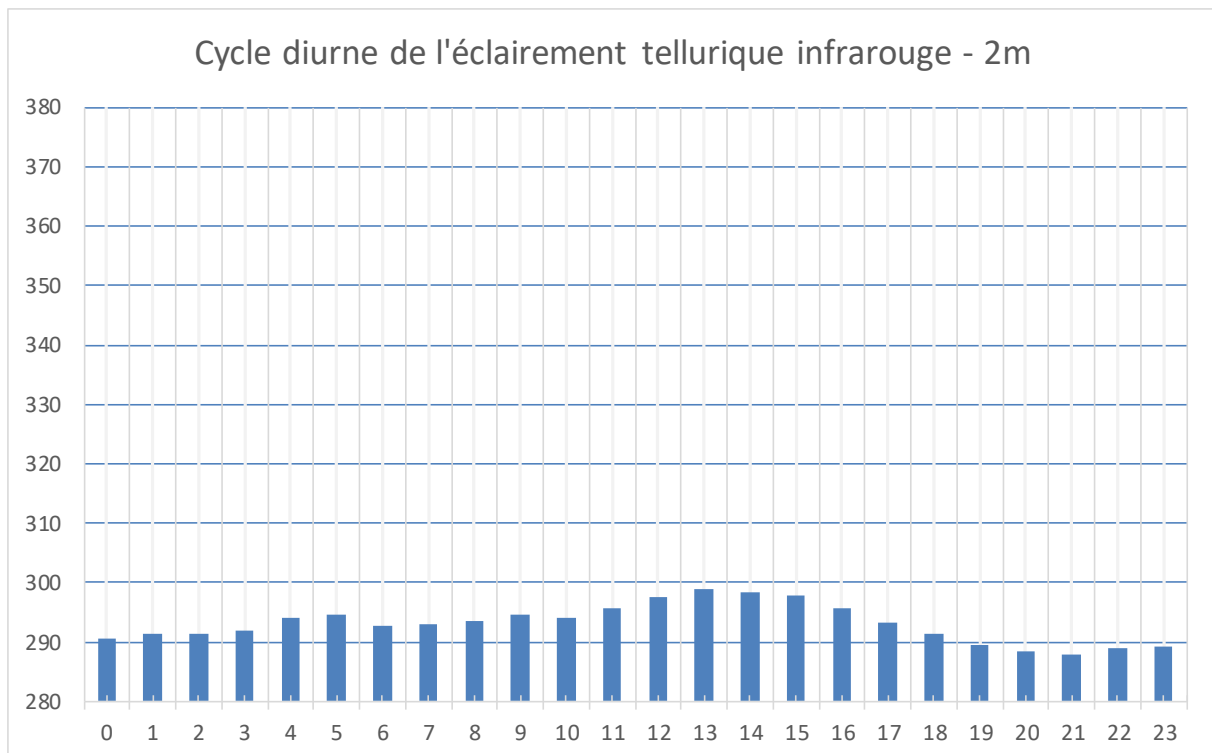


Figure 33 : Cycle diurne de l'éclairage tellurique en secondème

En unème et secondème, l'émergence de puissance entre 11 et 16 heures est à peine perceptible. Le minimum est à 21 heures, et un maximum local apparaît entre 3 et 5 heures. Ces valeurs moyennes se situent toutes dans une étroite bande d'à peine 10 W/m², bornée par 310 ou 300 W/m². Les valeurs les plus faibles sont enregistrées en secondème.

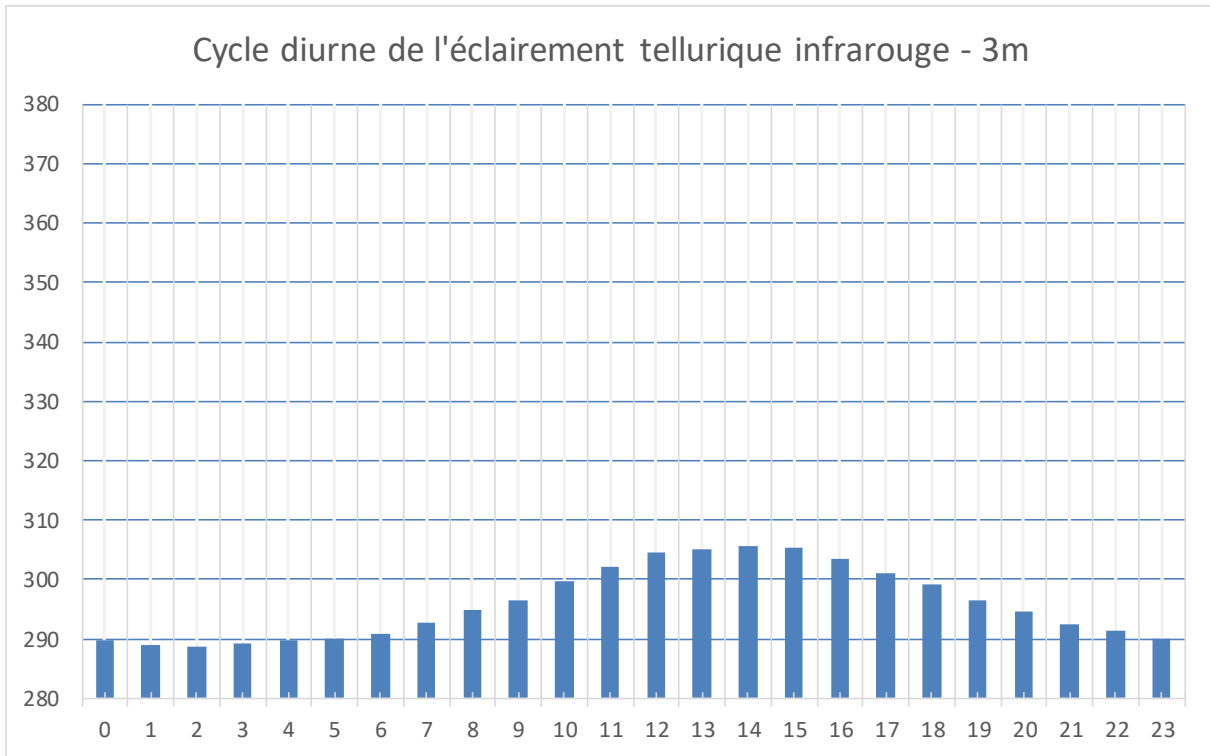


Figure 34 : Cycle diurne de l'éclairage tellurique en tertème

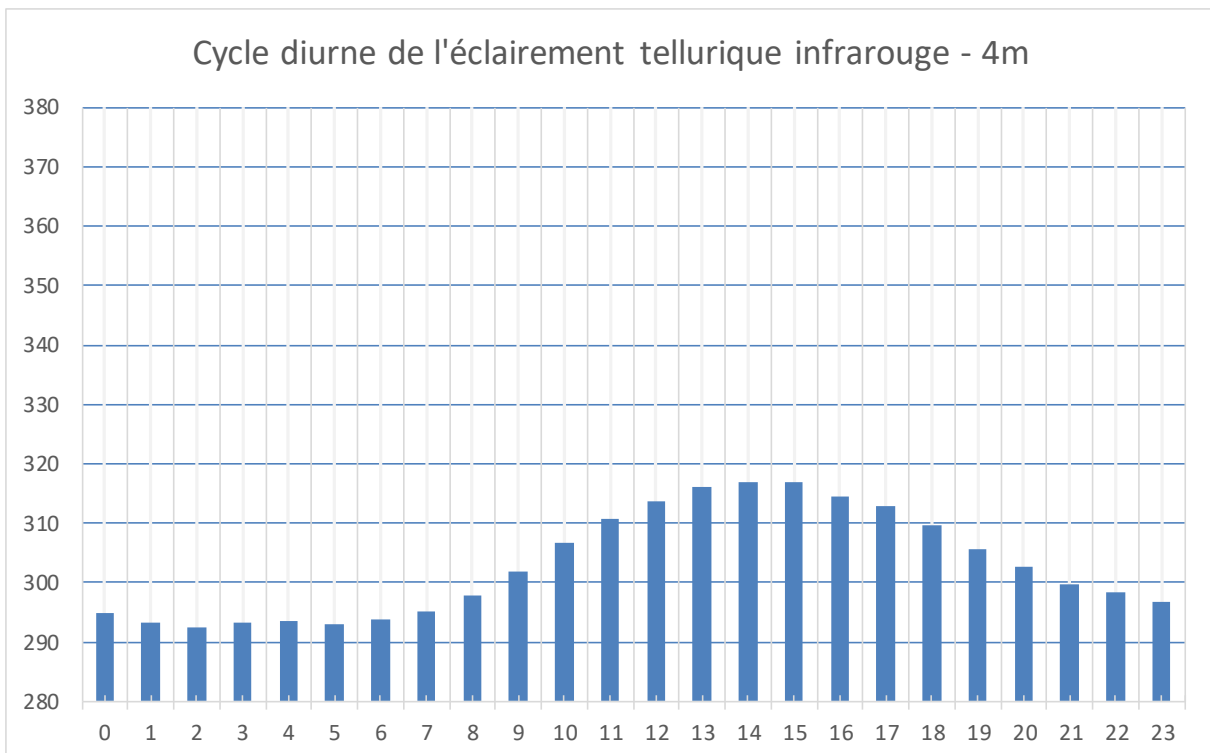


Figure 35 : Cycle diurne de l'éclairage tellurique en quartème

En tertème, bien que les valeurs minimales soient proches de secondème, le profil caractéristique apparaît avec son maximum à 14 heures. En quartème, le profil est bien visible, et la plage de valeurs est d'environ 29 W/m², pratiquement le double de celle de tertème (15 W/m²).

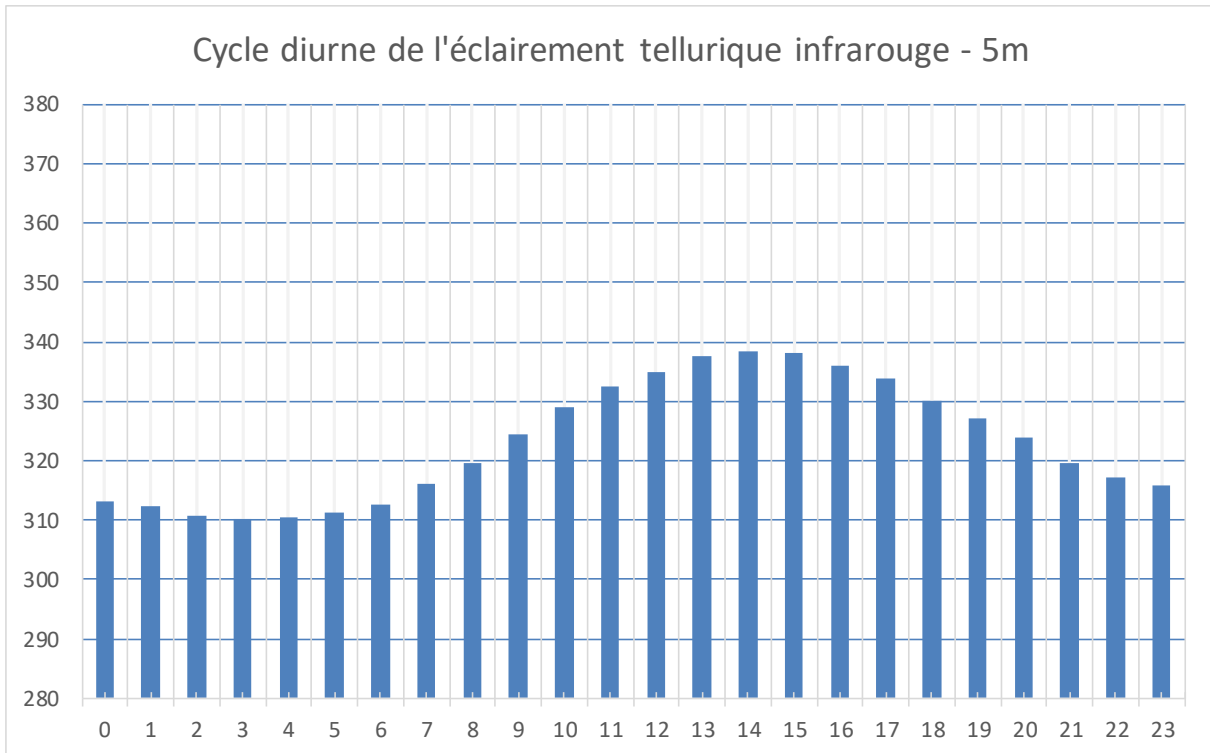


Figure 36 : Cycle diurne de l'éclairage tellurique en quintème

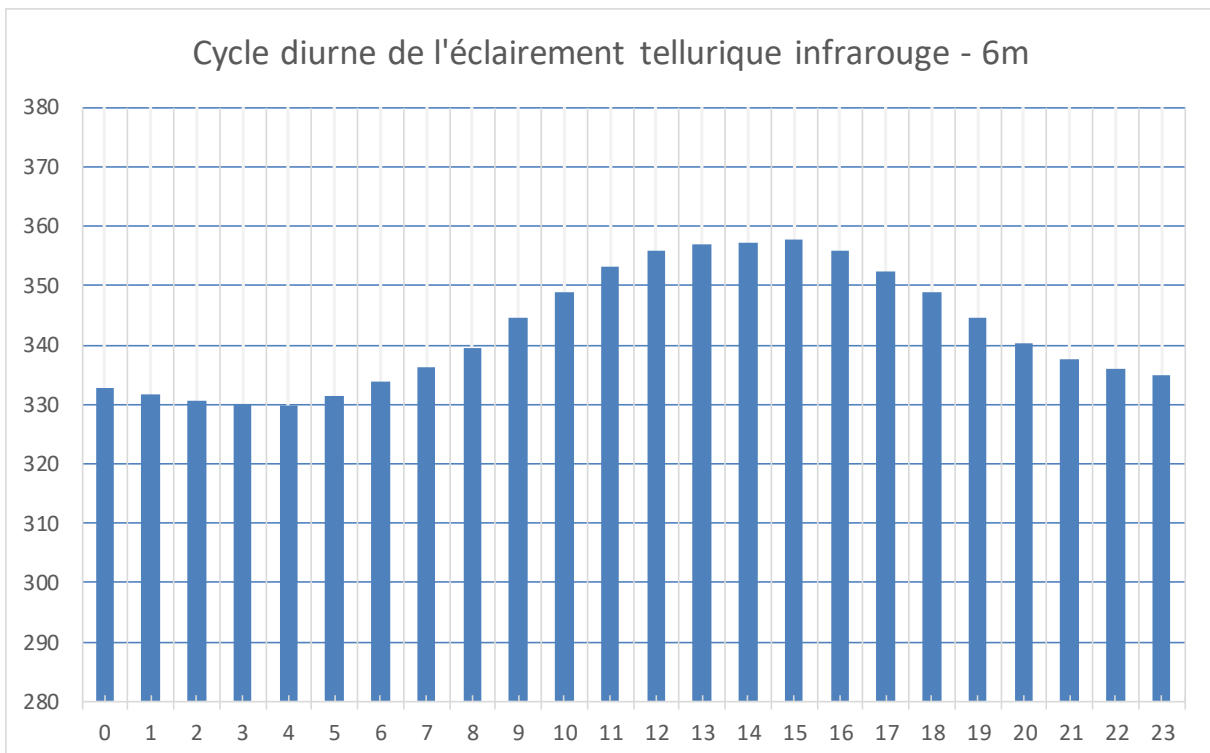


Figure 37 : Cycle diurne de l'éclairage tellurique en sextème

Les profils de quintème et sextème se ressemblent, à un écart près de 20 W/m², alors que le niveau minimal de quintème, 310 W/m², est déjà à 18 W/m² au-dessus de celui de quartème.

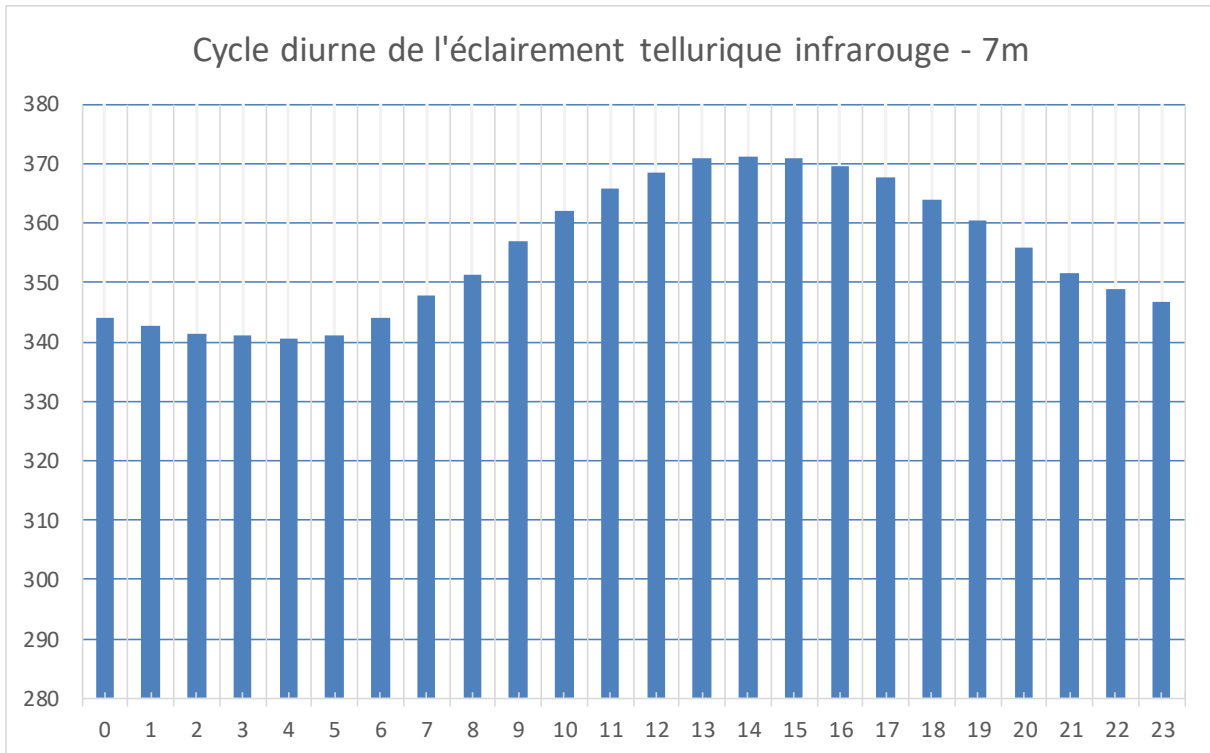


Figure 38 : Cycle diurne de l'éclairage tellurique en septème

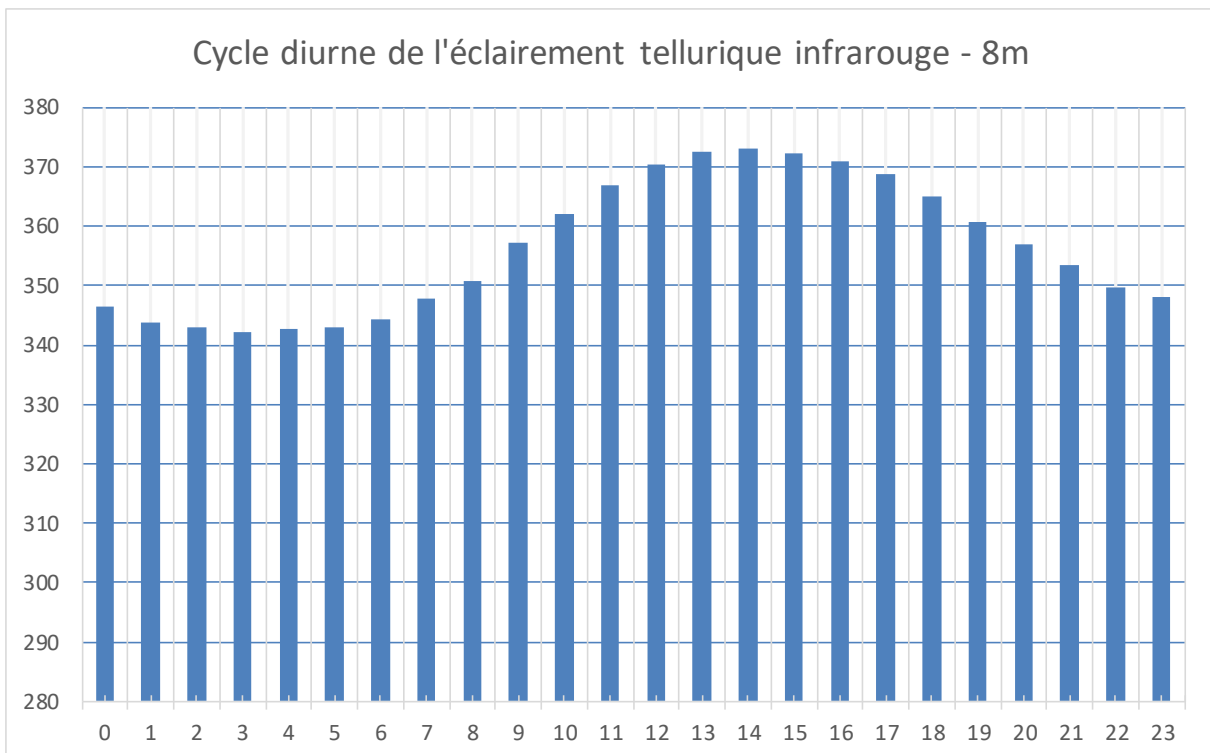


Figure 39 : Cycle diurne de l'éclairage tellurique en octème

Les profils moyens de septème et octème sont pratiquement superposables. Les valeurs minimales dépassent de 10 W/m² celles de sextème. Octème présente les valeurs les plus élevées et la plage de valeurs la plus large (plus de 30 W/m²).

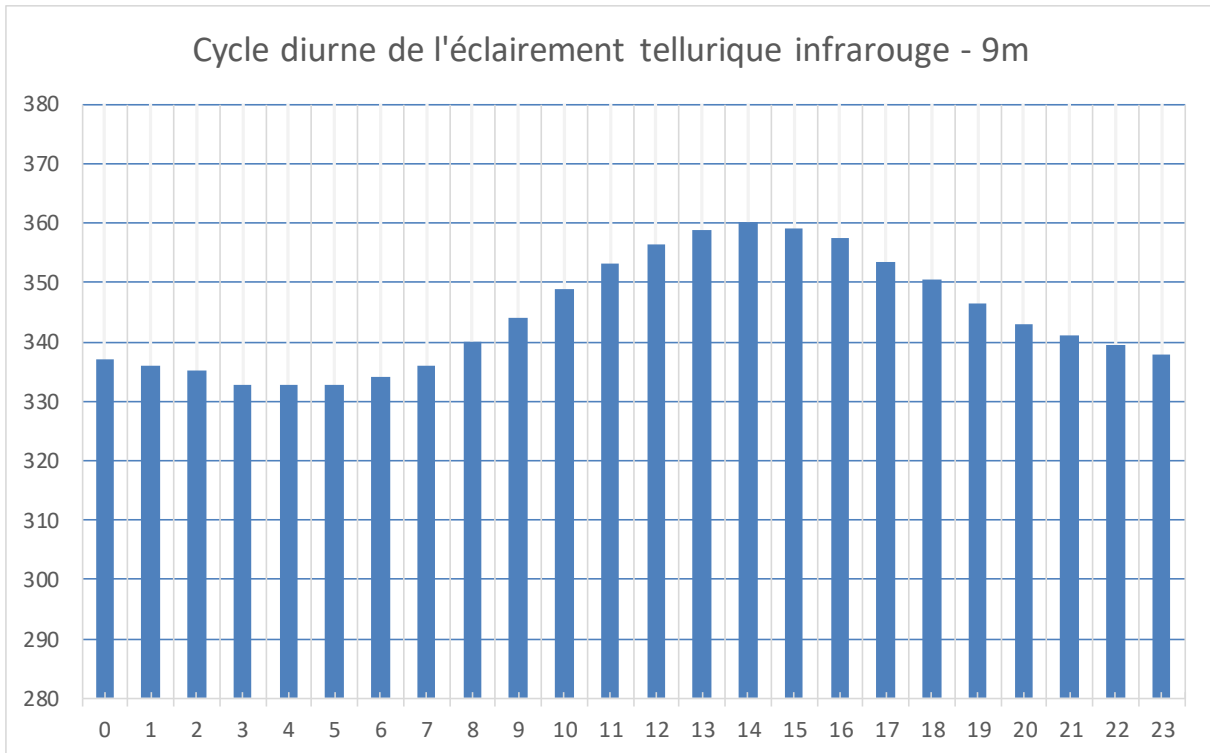


Figure 40 : Cycle diurne de l'éclairage tellurique en novème

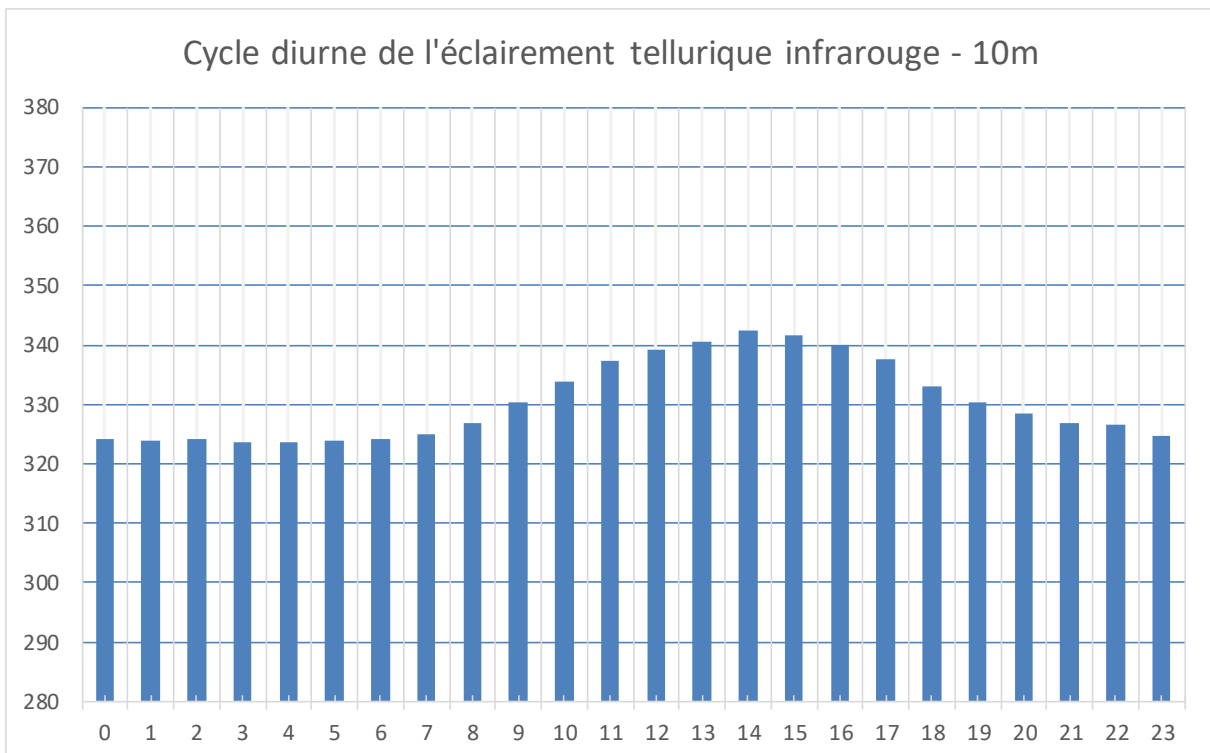


Figure 41 : Cycle diurne de l'éclairage tellurique en décème

Le profil de novème dépasse à peine celui de sextème, et reste légèrement plus contrasté. Au contraire, la plage de valeurs de décème régresse en dessous de 20 W/m². Les niveaux nocturnes restent très soutenus à environ 324 W/m², sans minimum visible.

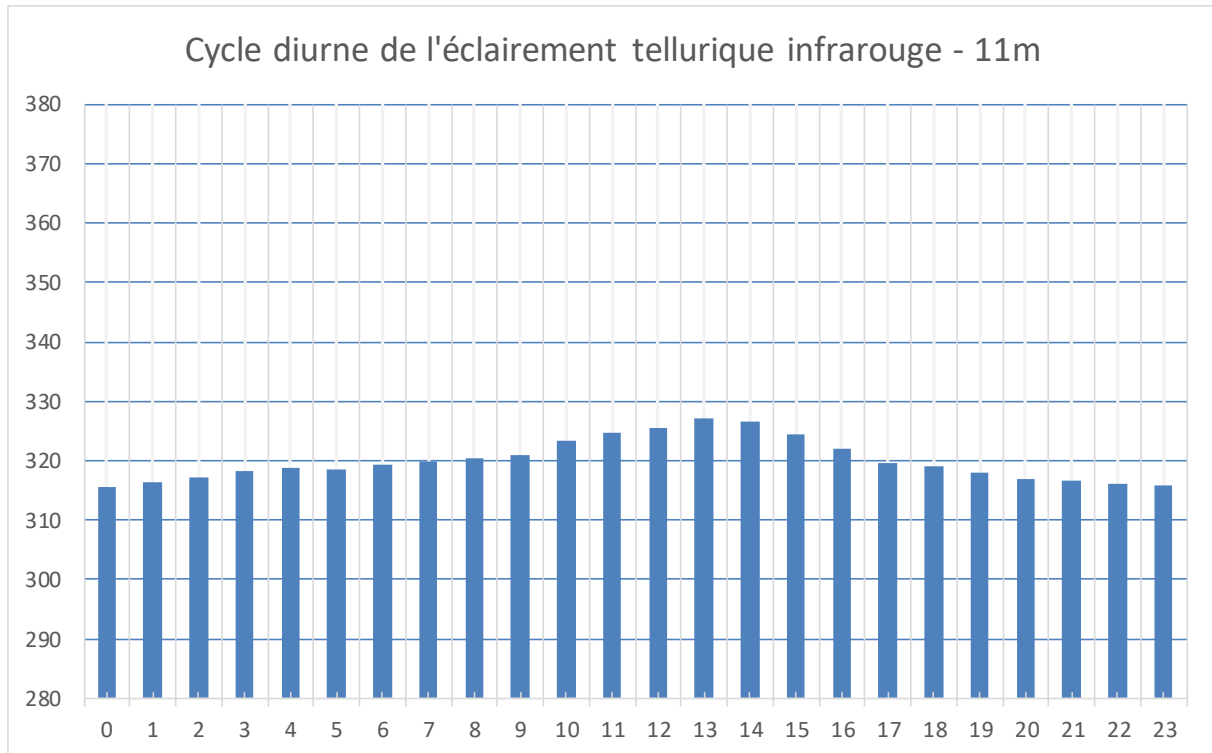


Figure 42 : Cycle diurne de l'éclairage tellurique en onzème

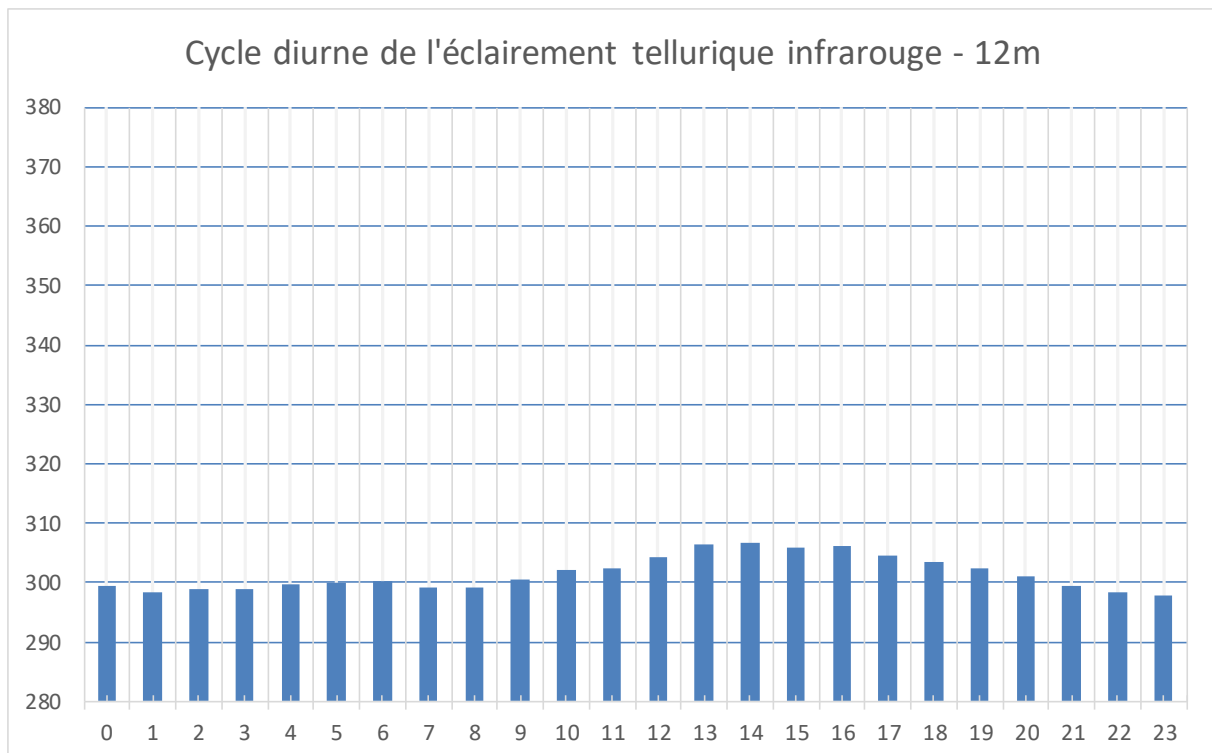


Figure 43 : Cycle diurne de l'éclairage tellurique en douzème

Dès onzème, le profil moyen n'est plus reconnaissable. La plage de valeur se réduit à 12 W/m², avec des valeurs minimales comparables à celles de quintème. En douzème, les valeurs minimales passent sous la barre de 300 W/m², et la plage de valeurs est inférieure à 9 W/m². Ce dernier profil ne diffère pratiquement pas d'unème.



5.3 Analyse des moyennes par mois milésiens

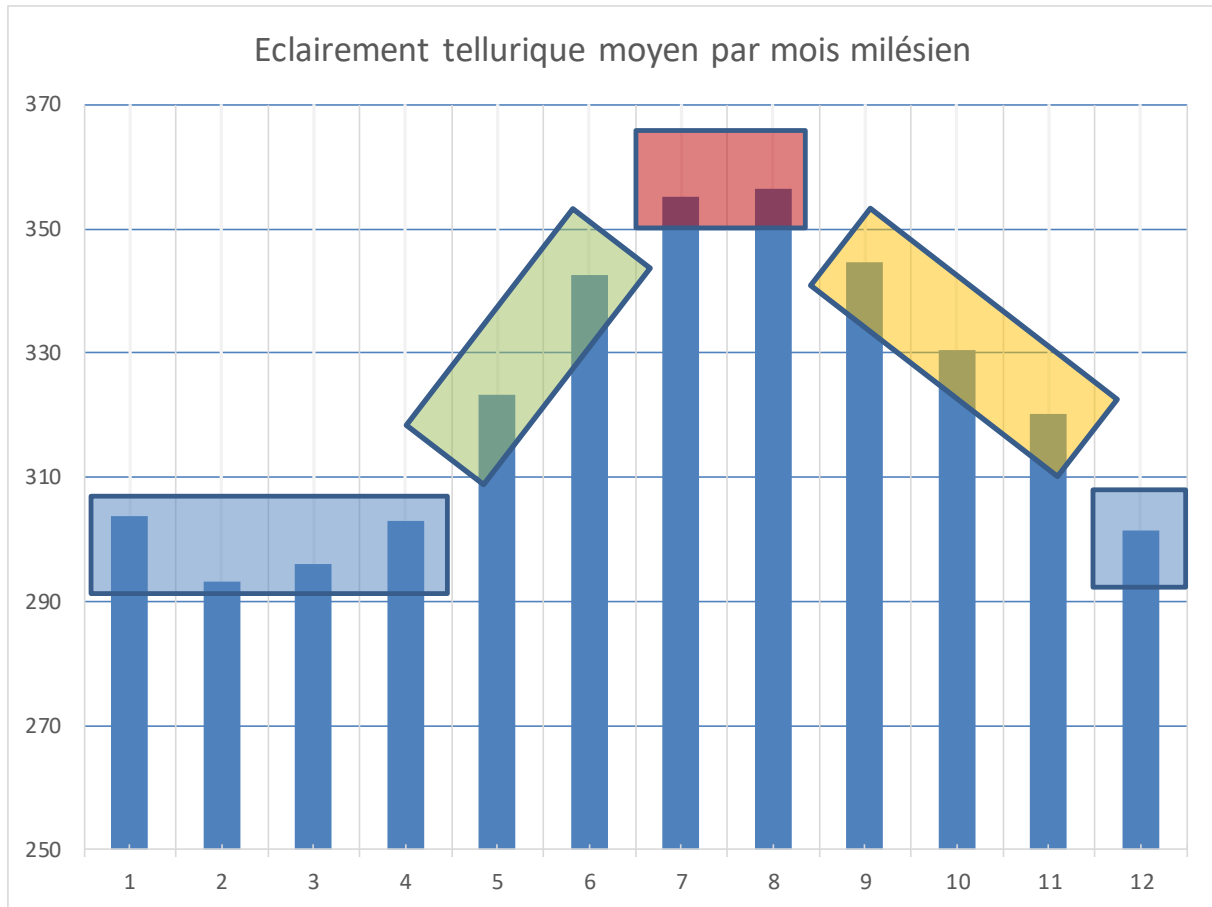


Figure 44 : Eclairage tellurique moyen par mois milésien

Ce graphique représente les valeurs moyennes sur chaque mois milésien des quinze années. Chaque valeur est donc une moyenne de 10 800 ou 11 160 mesures, pour les mois de respectivement 30 ou 31 jours n'ayant aucune mesure manquante. Même si, en réalité, certains mois ont une représentation un peu moindre, il s'agit d'échantillons statistiquement représentatifs.

L'allure générale identifiée en 5.1 page 26 se confirme.

Quatre zones, que l'on pourrait baptiser « saisons », se dégagent :

- Une saison « froide » de douzième à quatrième, où l'éclairage moyen reste autour de 300 W/m², en moyenne journalière 272 à 320 W/m².
- Deux saisons « intermédiaires », la « montante », quintème et sextème, la « descendante » novème à onzième, où l'on passera d'un plancher de 320 à 340 W/m² ou réciproquement.
- Une saison « chaude » réduite à septième-octème à 340 – 360 W/m².



6 Conclusions provisoires et pistes d'approfondissement

De même que le mille marin est plus pertinent que le kilomètre comme unité de longueur pour une route maritime ou aérienne, la division de l'année solaire en mois milésiens plutôt que grégoriens est plus efficace pour analyser les phénomènes d'éclairement étroitement corrélés à la trajectoire du soleil. On a pu voir ici que les cycles des données d'éclairement sont plus simples à restituer selon le référentiel milésien, et que cette restitution permet de distinguer des **écarts du second ordre** susceptibles d'orienter vers de nouvelles études. Tout particulièrement, les consolidations mensuelles donnent des résultats plus intéressants avec des mois milésiens que grégoriens.

Pour l'analyse de phénomènes en décalage par rapport au cycle solaire, comme l'éclairement infrarouge tellurique, le référentiel milésien permet de caractériser le cycle décalé par rapport à un cycle connu. De même que l'on caractérise le cycle journalier de l'éclairement infrarouge par rapport à l'heure moyenne, on caractérise le cycle annuel de cet éclairement par rapport au cycle des saisons grâce aux mois milésiens : ceux-ci jouent pour l'année tropique le même rôle que l'heure moyenne pour le jour solaire.

La présente étude suggère de possibles voies de recherche :

- Comment interpréter les différences de moyennes et d'écart-type de l'éclairement solaire entre mois montants et descendants ?
- Y a-t-il lieu d'approfondir notre compréhension du cycle journalier moyen de l'éclairement infrarouge tellurique ? Y aurait-il superposition de plusieurs cycles ? Quelle pourrait être la relation avec le cycle de la température de surface des océans aux latitudes tempérées ?

Par ailleurs, le calendrier milésien paraît un référentiel intéressant pour les études de site de production solaire, et plus généralement pour toute étude climatique ou météorologique dans laquelle le cycle solaire joue un rôle prééminent.

Les algorithmes permettant de classer les données dans les référentiels milésiens existent dans différents langages et sont disponibles selon les règles du logiciel libre. Qu'il nous soit permis d'espérer qu'ils seront bientôt directement accessibles dans la panoplie des outils de traitement de données du SIRTA et d'autres organismes de recherche climatiques et météorologiques.

Louis-Aimé de Fouquières,
15 septembre 2023 (31 sextème 2019).
Corrections du 29 juin 2019 (8 septème 2019)

Remerciements : l'auteur remercie le SIRTA, et tout particulièrement **Jordi Badosa**, pour les échanges et conseils à l'occasion de cette étude.