Calculs astronomiques simplifiés

Les formules ci-dessous permettent d'évaluer la position du centre du Soleil dans un repère terrestre local. Les formules simples décrivent une année moyenne pour la Terre non perturbée et donnent des résultats avec une précision amplement suffisante pour des applications solaires à faible concentration. Les calculs les plus précis doivent tenir compte de multiples perturbations de l'orbite et de la rotation terrestre, ils constituent une des missions du « bureau des longitudes » de l'Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Ephémérides (IMCCE) à Paris. Pour nos recherches sur la conversion solaires photovoltaïque ou thermique nous devons conditionner nos modèles avec des mesures d'éclairement issues de stations météorologiques. Pour obtenir à toute heure une bonne cohérence entre nos calculs et ces mesures météorologiques avons ajustées les formules empiriques données ci-dessous, à toute fin utile. Basées sur les calculs de l'IMCCE, et valables pour la période 2013-2022, elles sont plus simples que les calculs astronomiques complets, et beaucoup plus précises que les formules classiques pour la Terre non perturbée. Je tiens à remercier M. Patrick Rocher astronome à l'IMCCE - UMR 8028 du CNRS - Observatoire de Paris, qui m'a fourni certaines données nécessaires.

Mouvements de la Terre

La Terre tourne autour du Soleil sur une trajectoire elliptique de faible excentricité [A][1](0,016 708 634 actuellement). Selon les lois de Kepler, le centre de gravité du Soleil se trouve à l'un des foyers de l'ellipse. La Terre se trouve le plus proche du Soleil « au périhélie »entre le 2 et le 5 janvier. Elle se trouve le plus éloignée du Soleil « à l'aphélie » entre le 3 et le 6 juillet. [A] La Terre tourne aussi sur elle-même avec un axe de rotation incliné d'environ 23,5° par rapport à la normale au plan de l'écliptique plan de l'équateur terrestre [A]. Les vecteurs « rotation orbitale » et « rotation propre » pointent du même côté du plan de l'écliptique. Imaginons un repère orthonormé direct $(O,\vec{\imath},\vec{\jmath},\vec{k})$ avec pour origine, O, le centre du Soleil, $\vec{\imath}$ pointe en direction de la position de la Terre vers l'équinoxe de septembre, $\vec{\jmath}$ pointe en direction de la position de la Terre au solstice d'hiver, le vecteur rotation orbitale est coaxial avec $\vec{k}$, le vecteur rotation propre est dans le plan vectoriel $(\vec{\jmath},\vec{k})$ et est un multiple « positif » du vecteur de coordonnées approximatives (sin(23 ,5°), cos(23,5°)). Dit de façon imagée : « la Terre tourne sur elle-même dans le même sens que sa rotation orbitale ».
A ces mouvements principaux s'ajoutent des dérives séculaires dues à la précession des équinoxes, à la nutation de l'axe de rotation terrestre, à la variation périodique de l'excentricité et à la précession planétaire [A].

Déclinaison solaire

La déclinaison, δ, correspond à l'angle que forme la direction Terre-Soleil par rapport au plan de l'équateur terrestre. C'est une des deux coordonnées équatoriales du Soleil, l'autre étant l'angle horaire défini plus loin. Aux équinoxes de printemps (vers le 20 mars) et d'automne (vers le 22 septembre) la direction Terre –Soleil est incluse dans le plan équatorial terrestre. Du fait de la rotation orbitale cette direction pointe du côté sud de l'équateur entre le 22 septembre et le 20 mars (la déclinaison est alors négative) et du côté nord entre le 20 mars et le 22 septembre (la déclinaison est alors positive). La déclinaison atteint un maximum au solstice d'été vers le 21 juin et un minimum au solstice d'hiver vers le 21décembre. Bien que la déclinaison ne suive pas rigoureusement une fonction sinusoïdale du temps, il est tentant de l'approximer très simplement ainsi comme l'a fait Cooper *(1969) :*

$$\delta = 23{,}45 \cdot \sin\left(\frac{2\cdot\pi\cdot(J+284)}{365}\right)$$

Cette formule donne la déclinaison **en degrés**, l'erreur sur δ est comprise dans l'intervalle [-1,4°;+0,5°]

J est le rang du jour dans l'année (1 pour le 1er janvier).
N.B : 23,45 exprime la déclinaison maximale en degrés, mais l'argument des fonctions trigonométriques est normalement exprimé en radians, si vous faites un choix différent, il faut remplacer 2π par 180°.

Formule approchée proposée par Chr. Perrin de Brichambaut [3] :

$$\delta = \arcsin\left[0{,}4\cdot\sin\left(\frac{2\cdot\pi\cdot(J-80)}{365}\right)\right]$$

[1] [A] renvoie aux annexes à la fin de ce document.

L'erreur sur δ est comprise dans l'intervalle [-1,9°;+0,8°]

Une de ces deux formules fait l'affaire pour les calculs d'énergétique de précision moyenne.
Pour plus de précision, on peut facilement ajuster une fonction périodique composée de la somme de deux (ou plus si le besoin de précision le justifie) fonctions sinusoïdales et d'un terme constant sur les données calculées (à quelques 10^{-4} secondes d'arc près) par le Bureau des Longitudes. Par exemple, pour la période 2013 - 2023, on trouve en degrés :

$$\delta = 0{,}38 + 23{,}26 \sin(2\pi J'/365{,}24 - 1{,}395) + 0{,}375 \sin(4\pi J'/365{,}24 - 1{,}47)$$

J' vaut 1 au premier janvier 2013, 366 au premier janvier 2014, 731 au premier janvier 2015, 1096 au premier janvier 2016, 1462 au premier janvier 2017,etc…On a tenu compte du fait que 2016 sera une année bisextile.
Cette fonction est comparée avec les calculs du bureau des longitudes à la figure 1 [1]. L'erreur, non décelable à l'échelle du graphique, reste toujours inférieure à 0,20° (11,8'). Un développement avec des termes supplémentaires permettrait de réduire encore l'erreur résiduelle.
Notez que le terme constant n'est pas un artefact : il résulte du fait que la période pendant laquelle la déclinaison est positive est plus longue (186 j) que celle où la déclinaison est négative (179 j).

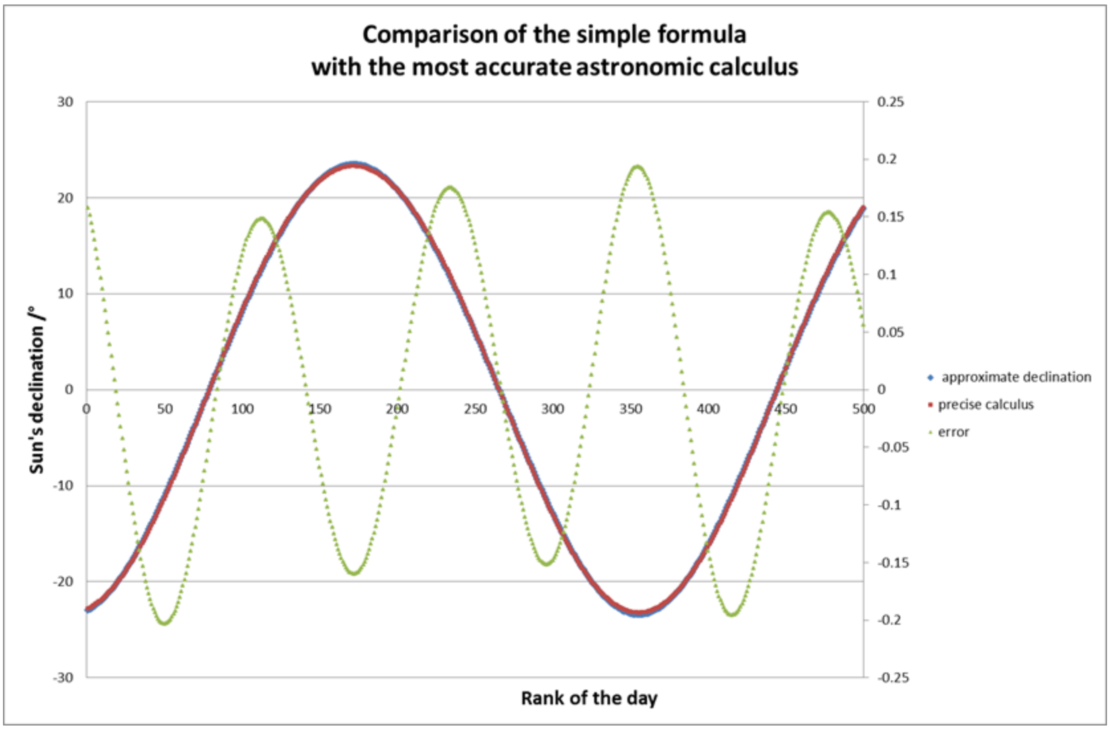


Figure 1 : Ecart entre la déclinaison calculée par la fonction à deux termes sinusoïdaux et les calculs précis de l'IMCCE (l'écart est indiqué sur l'échelle de droite)

Durée du jour

La durée du jour est par définition le temps pendant lequel le centre du disque solaire est apparent depuis un lieu situé sur un terrain « plat » à perte de vue (on dit qu'il n'y a pas de masque à l'horizon). Cela ne se produit qu'en mer, ou sur de très grandes plaines non vallonnées. En terrain accidenté on peut voir le Soleil plus ou moins longtemps selon le lieu (sommet ou vallée). Attention en raison de la diffusion de la lumière par l'atmosphère, il fait jour, au sens commun, avant le lever et après le coucher du soleil et ceci dépend des conditions météorologiques. La formule approchée suivante, exacte pour une planète sphérique sans atmosphère, ne prend pas, bien sûr, ce phénomène de diffusion atmosphérique en compte :

$$T_j = 24 \cdot \left[1 - \frac{\arccos(\tan\delta \cdot \tan\lambda)}{\pi}\right]$$

T_j est la durée du jour exprimée en h, précision meilleure que 4%. λ est la latitude du lieu.

L'arc cosinus doit être exprimé en radian ou bien il faut remplacer π par 180. On trouve dans Duffie&Beckman [2] une formule rigoureusement équivalente :

$$T_j = \frac{2}{15}\arccos(-\tan\delta\cdot\tan\lambda)$$

N.B. : dans cette deuxième formule arccos est exprimé en degré.

Orientation du flux solaire direct par rapport à une surface terrestre quelconque

Le flux solaire direct correspond aux rayons qui arrivent du disque solaire sans être diffusés : ils sont seulement réfractés légèrement par l'atmosphère, phénomène que nous négligerons dans nos modèles simples.
Le plan méridien local est le plan qui contient le lieu qui nous intéresse et l'axe de rotation de la Terre. C'est donc un plan vertical orienté Nord – Sud.

Angle horaire

ω: angle horaire, deuxième coordonnée équatoriale du Soleil, défini dans ce cours comme l'angle, compté positivement vers l'Est, entre la position actuelle du plan méridien local et la position de ce même méridien à midi vrai (ou entre le plan méridien local et le plan méridien qui contient le centre du Soleil à l'instant qui nous concerne).

$$\omega = \frac{\pi\cdot(12-H)}{12} = \pi\cdot\left(1-\frac{H}{12}\right) \text{ en radians}$$

$$\omega = \frac{180\cdot(12-H)}{12} = 15\cdot(12-H) \text{ en degrés}$$

H est l'heure solaire vraie, 12h quand le centre du Soleil passe dans le plan méridien local. La détermination de l'heure vraie (TSV) est expliquée au titre suivant.

NB : certains auteurs utilisent, de façon tout aussi valable, un angle horaire avec pour origine 0 à 0h et une valeur de π à midi vrai. Vous vérifierez aisément que cet angle ω' est relié à ω et H par :

$$\omega' = \pi - \omega = \frac{\pi\cdot H}{12}$$

Et que dans les formules données ci-après il faut faire les remplacements suivants :

$$cos(\omega) \rightarrow -cos(\omega') \;\; et \;\; sin(\omega) \rightarrow sin(\omega')$$

Temps local, temps moyen, temps vrai

L'heure solaire vraie diffère de l'heure donnée par nos montres, qui constitue un temps conventionnel local, basé sur le temps moyen qui s'écoule régulièrement tout au long de l'année (temps universel coordonné – UTC) [A].

Equation du temps

La période de rotation sidérale de la Terre vaut environ 23h56mn04s (=23,9344h), mais pour que le Soleil revienne dans le plan méridien local il faut en moyenne 24h. En effet pendant que la Terre tournait sur elle-même, elle s'est aussi déplacée sur son orbite d'environ (360/365,25 = 0,986°), pour réaliser une rotation de 360,986 ° il lui faut (360,986/360*23,9344 = 24,0000) heures. Tout serait simple[2], si la vitesse orbitale était constante, et si l'axe de rotation de la Terre était orthogonal au plan de l'écliptique. Mais, la vitesse orbitale de la Terre, n'est pas régulière, celle-ci étant plus fortement accélérée quand elle s'approche du Soleil, de plus l'axe de rotation est incliné par rapport à la normale au plan de la trajectoire.
L'angle au-delà de 360° que la rotation de la Terre doit couvrir pour que le Soleil revienne dans le plan méridien local varie, au cours de l'année, autour d'une valeur moyenne proche d'un degré. De ce fait le temps vrai s'écarte de façon périodique du temps moyen : cet écart est décrit par l'équation du temps, E, qui donne l'avance du temps moyen sur le temps vrai en fonction du jour de l'année. Au premier ordre, E dépend de l'excentricité de l'orbite et de l'inclinaison de l'axe de rotation.
C'est l'origine de la formule traditionnelle, somme de 3 fonctions sinusoïdales, qui donne, en minutes, l'avance du temps moyen sur le temps solaire, pour une Terre non perturbée :

---

[2] Mathématiquement parlant, pour ce qui est de la vie, en l'absence du phénomène des saisons, elle aurait peut-être émergé, mais elle aurait peut-être pris d'autres formes que celles que nous connaissons

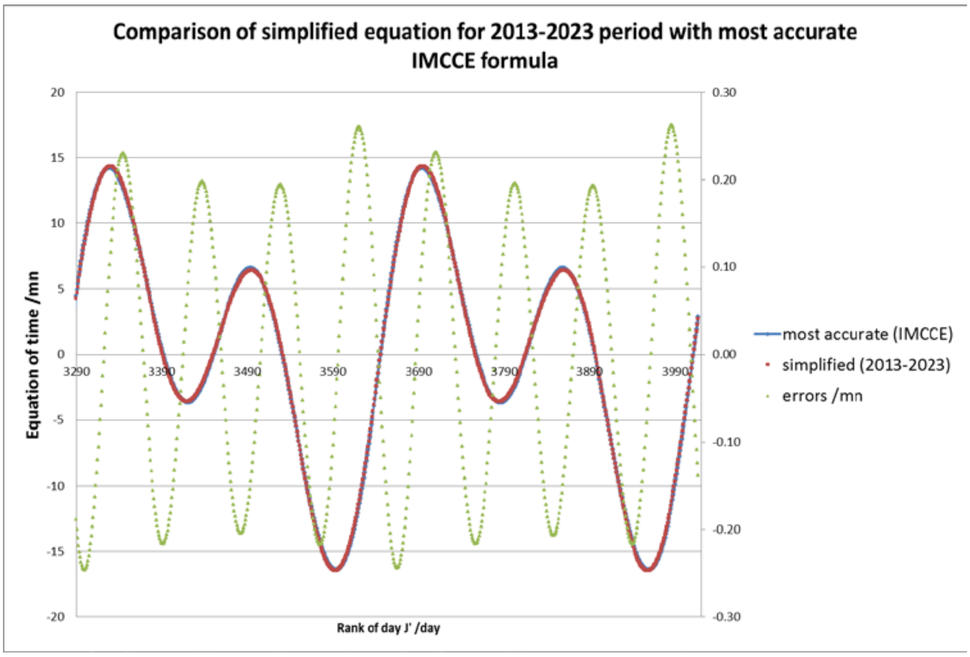
$$E_{cl} = +7.53\cos(B) + 1.5\sin(B) - 9.87\sin(2B)$$

Avec $B = \frac{2\pi(J-81)}{365}$.

Cette formule est précise à quelques secondes près (erreur moyenne 25s, erreur max un peu plus d'une minute). Pour atteindre une précision meilleure que la seconde sur la période de 2 siècles de 1900 à 2100, les astronomes de l'IMCCE ont établi une formule en tenant compte des principales perturbations planétaires [4]. Cette formule contient 12 termes sinusoïdaux et 2 termes pseudo périodiques permettant de tenir compte des variations séculaires.
En vue des applications à la conversion de l'énergie solaire nous préférons utiliser une formule simplifiée valable pour la période 2013-2023 que nous avons ajustée numérique sur l'équation du temps calculée par la formule complète de l'IMCCE [1].

$$E = 7{,}36 \cdot sin\left(\frac{2\pi J'}{365{,}242} - 0{,}071\right) + 9{,}92 \cdot sin\left(\frac{4\pi J'}{365{,}242} + 0{,}357\right) + 0{,}305 \cdot sin\left(\frac{6\pi J'}{365{,}242} + 0{,}256\right)$$

Avec J' le rang du jour compté à partir du premier janvier 2013.
Cette formule, beaucoup plus simple que l'équation complète de l'IMCCE, permet de déterminer l'équation du temps avec une erreur absolue moyenne de 8,4 s et une erreur absolue maximum de 16 s.



La figure 2, présente sur deux années successives la comparaison entre cette équation et l'équation complète.

Figure 2 : comparaison entre l'équation simplifiée et l'équation complète.

L'erreur absolue suit la distribution représentée figure 3. Sur cette figure on constate que 30% des jours on calculera l'équation du temps avec une erreur inférieure à 0,1 mn (6 s), 77% avec une erreur inférieure à 0,2 mn (12 s), 90% avec une erreur inférieure à 0,22 mn (13,2 s), 95% avec une erreur inférieure à 0,24 mn (14,4 s), 99% avec une erreur inférieure à 0,26 mn (15,6 s) et 100% avec une erreur inférieure à 0,27 mn (16,2 s).

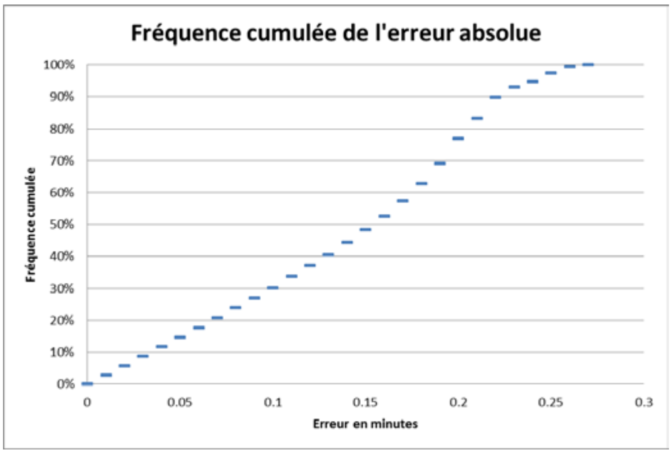


Figure 3 : Fréquence cumulée de l'erreur absolue de l'équation simplifiée.

Calcul du temps solaire vrai (Solar time)

L'heure locale est liée à un fuseau horaire de référence. Les différents territoires sont rattachés à l'un des 24 fuseaux horaires en fonction de considérations géographiques et politiques. Le fuseau zéro correspond en théorie à l'espace situé entre 7,5°E et 7,5°O par rapport au méridien origine passant par Londres-Greenwich (et Bordeau). En pratique, l'Angleterre, l'Irlande, l'Ecosse, le Portugal, le Maroc, la Mauritanie, Le Mali, le Sénégal, les 2 Guinées, la Sierra Léone, le Libéria, la Côte d'Ivoire, le Burkina Faso, le Ghana, le Togo sont situés dans le fuseau zéro. En revanche, l'Espagne, la France, la Belgique, les Pays-Bas bien que situés majoritairement dans le fuseau zéro sont rattachés avec la plupart des pays d'Europe occidentale au fuseau horaire +1 (GMT+1) situé 15° plus à l'Est. Cela signifie que par rapport au méridien géographique le plus proche l'heure y subie une avance locale ΔH_l d'une heure par rapport à l'heure du méridien référence du fuseau local (le méridien zéro). Qui plus est, pour des raisons économiques (afin de mettre mieux en correspondance les périodes diurnes d'activité économique avec les périodes de jour solaire) on augmente ce décalage d'une heure en été, ce qui fait que l'heure locale s'approche de l'heure vraie du méridien +2 (celui du Caire).
Enfin à l'intérieur d'un fuseau horaire on peut être situé entre 7,5° Est +1/2 h et 7,5° Ouest -1/2h par rapport au méridien central du fuseau. Cela doit être pris en compte par un terme de décalage « géographique » : ΔH_g est le décalage horaire dû à l'écart de longitude entre le méridien local et le méridien central du fuseau (avance de 4 mn par degré de décalage de longitude vers l'Est, et retard de 4mn par degré vers l'Ouest).
Finalement, l'heure vraie peut être déduite de l'heure locale par la formule suivante :

$$H = H_l - \Delta H_l + \Delta H_g - E$$

H_l est l'heure locale (administrative), ΔH_l est l'avance de l'heure locale sur l'heure normale du fuseau géographique : en France 2h en heure d'été – du dernier dimanche de mars au dernier dimanche d'octobre – 1h en heure d'hiver.

Exemple de calcul : lieu Strasbourg : 48°35'N, 7°48'E, H_l =11h43mn, 13 juin 2014.
Nous sommes en heure d'été si bien que $\Delta H_l = +2h$; $\Delta H_g = +(7+48/60)\cdot 4 = 31{,}2$ *mn soit 31mn et 12 s.*
L'équation du temps peut être calculée (en secondes) approximativement par l'une ou l'autre des formule ci-dessus.
La formule classique donne $E_{cl} \approx -0{,}215 \pm 1$ mn (-12,9 s) avec J = 164 (2014 est une année normale) et $B \approx 1{,}429$ rd.
La formule simplifiée basée sur les calculs de l'IMCCE donne $E \approx 0{,}181 \pm 0{,}27$ mn, soit 10,9 s avec J' = 529.

N.B. : La formule complète de l'IMCCE donne E = 0,0519 mn soit 3,1±1s. Toutes les formules sont cohérentes avec une équation du temps proche de 0.

Finalement, l'heure vraie à Strasbourg vaut alors :

$$H = 11+43/60-2+(31{,}2-0{,}052)/60 \approx 10{,}24 \text{ soit } 10\text{h}14\text{mn}$$

Angle d'incidence sur une surface

On définit les angles suivants pour l'orientation de la surface de réception du flux solaire :
s : « inclinaison », angle entre la surface et le plan horizontal
γ : azimut local de la surface, défini comme l'angle entre la normale à cette surface et le plan méridien local et compté positivement vers l'Est.
On calcule la déclinaison δ, on détermine la latitude du lieu λ, une fois déterminé le temps solaire vrai, il est aisé de calculer l'angle horaire ω.
Le cosinus de l'angle (θ) entre les rayons solaires et la normale à la surface est alors donné par :

$$\boxed{\begin{aligned}\cos(\theta) = {} & \sin(\delta)\cdot\sin(\lambda)\cdot\cos(s) - \sin(\delta)\cdot\cos(\lambda)\cdot\sin(s)\cdot\cos(\gamma) + \cos(\delta)\cdot\cos(\lambda)\cdot\cos(s)\cdot\cos(\omega) + \\ & + \cos(\delta)\cdot\sin(\lambda)\cdot\sin(s)\cdot\cos(\gamma)\cdot\cos(\omega) + \cos(\delta)\cdot\sin(s)\cdot\sin(\gamma)\cdot\sin(\omega)\end{aligned}}$$

N.B. : Cette formule est grandement simplifiée pour une surface horizontale car sin(s) = 0, pour une surface verticale car cos(s) = 0, pour une surface face au Sud car sin(γ) = 0, ou pour une surface à l'équateur car sin(λ) = 0.

Coordonnées horizontales du Soleil : hauteur angulaire et azimut, en fonction de l'heure

Une formule déduite de la formule générale donnant l'orientation des rayons directs par rapport à une surface quelconque peut être utilisée :

$$\sin(h) = \sin(\delta)\cdot\sin(\lambda) + \cos(\delta)\cdot\cos(\lambda)\cdot\cos(\omega)$$

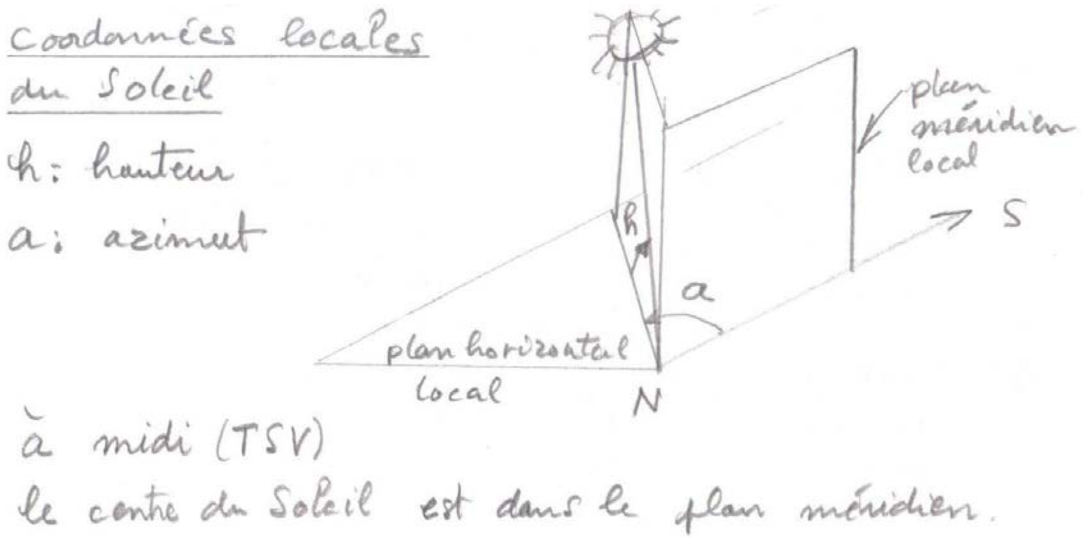
h est la hauteur angulaire du Soleil sur l'horizon.

L'azimut, *a*, est défini comme l'angle entre le méridien local et la projection au sol de la droite issue du point d'observation passant par le centre du Soleil et est compté positivement vers l'Est. Il est donné par :

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta)\cdot\sin(\omega)}{\cos(h)}$$

$$\cos(a) = \frac{\cos(\delta)\cos(\omega)\sin(\lambda) - \sin(\delta)\cos(\lambda)}{\cos(h)}$$

L'angle complémentaire de h est appelé angle zénithal (ZSA) et souvent noté θ.



Correction de distance Terre-Soleil en fonction de la période dans l'année : k_D

k_D est le facteur par lequel il faut multiplier la constante solaire (1353 à 1380 W/m² selon les auteurs, la valeur actuelle la plus précise étant 1367,0+/- 0,1 W/m²) pour trouver la densité de flux extraterrestre (le flux à travers une surface normale aux rayons à la limite supérieure de l'atmosphère).
Comme la déclinaison et la distance Terre-Soleil sont liées (aux phénomènes de précession et de nutation près), on peut donner une formule approchée de la correction de distance basée sur la valeur de la déclinaison [3] :

$$k_D = 1 - \frac{\sin(\delta)}{11{,}5}$$

Cette formule est équivalente à :

$$k_D = 1 - \frac{4}{115}\cdot sin\left[\frac{2\cdot\pi\cdot(J-80)}{365}\right]$$

Cette formule est assez imprécise (erreur inférieure à 1% tout de même).
Dans la même référence l'auteur propose une autre formule beaucoup plus précise (erreur inférieure à 0,15%):

$$k_D = 1 - 0{,}034\cdot sin\left[\frac{2\cdot\pi\cdot(J-94)}{365}\right]$$

On peut aussi évaluer k_D à partir de la formule suivante un peu moins précise (mieux que 0,2% près) utilisée par K. Danel, L. Gautret[5] :

$$k_D = 1 + 0{,}034 \cos\left(\frac{2\pi J}{365}\right)$$

Cependant la somme d'une constante et d'une sinusoïde ne peut pas décrire parfaitement le facteur de correction qui par essence est égal à :

$$k_D = \left(\frac{R_m}{R(J)}\right)^2$$

Où R_m et $R(J)$ sont la distance moyenne Terre-Soleil (l'unité astronomique) et la distance moyenne pour la journée J considérée. On peut faire le calcul à partir de la distance Terre-Soleil calculée elle-même en résolvant les équations de l'orbite. Par exemple d'après les données IMCCE on peut calculer à mieux que 0,013% près, pour n'importe quel jour de la période 1/1/2013 – 1/1/2023 le facteur de correction par la formule suivante où J' vaut 1 au premier janvier 2013 et augmente chaque jour d'une unité :

$$k_D = 1{,}000138 + 0{,}03341 \cos\left[\frac{2\pi J'}{365{,}2422} - 0{,}051\right] + 0{,}000699 \sin\left[\frac{4\pi J'}{365{,}2422} + 1{,}474\right] + 0{,}000062 \sin\left[\frac{12{,}37 \cdot 2\pi J'}{365{,}2422} + 2{,}2\right]$$

La période est égale à l'année tropique, le périhélie à lieu vers le 3 janvier[3], l'aphélie vers le 4 juillet [A].
On notera que pour une orbite non perturbée k_D est supérieur à l'unité entre le 5 octobre et le 2 avril (et pas entre les deux équinoxes comme cela aurait presque été le cas -à 2 à 3 jours près- si le périhélie se trouvait au solstice d'hiver, vers le 21 décembre).
Sur le graphe (figure 4), sont représentées en fonction de *J'* les valeurs de *kD* calculées à partir de *R(J') (données IMCCE- 2013-2023)* et par la formule ci-dessus. On constate que la formulation à 3 fonctions sinusoïdales se superpose quasi parfaitement avec la valeur calculée à partir de la distance Terre-Soleil *R(J)*. Le troisième terme sinusoïdal provient de l'influence de l'attraction lunaire sur la distance Terre-Soleil.

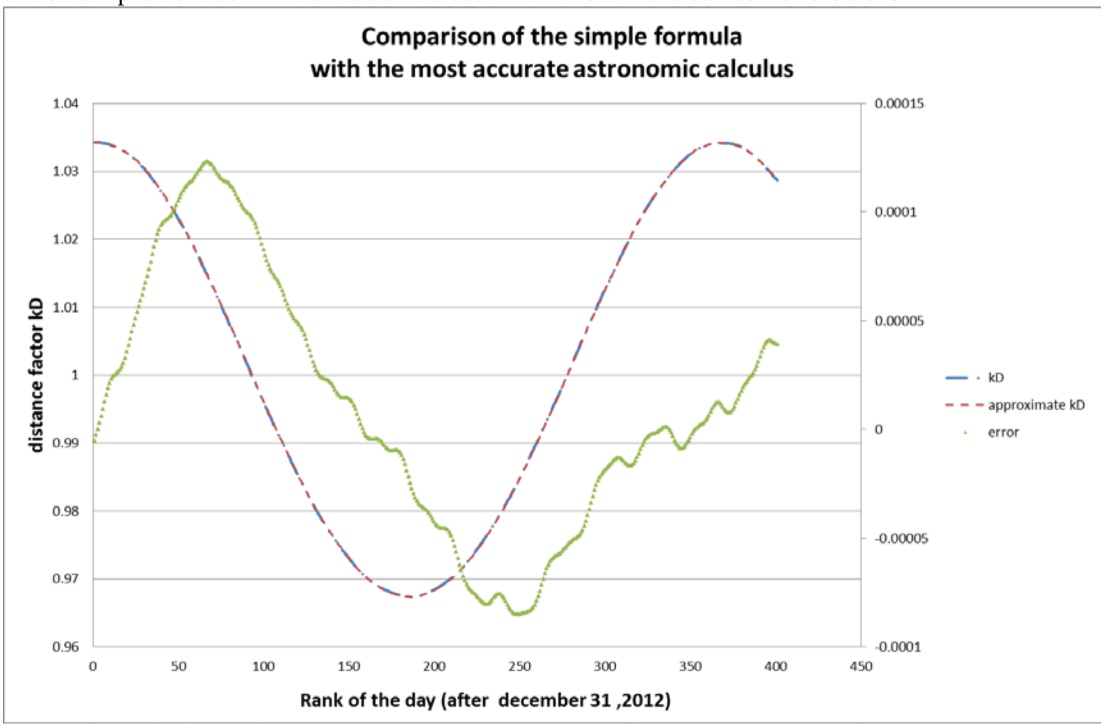


Figure 4 : Erreur relative de l'équation à 3 fonctions sinusoïdales pour le calcul de k_D.

[3] La rotation du grand axe de l'ellipse de la trajectoire terrestre, appelée « précession planétaire », est extrêmement lente (0,47'' par an il faut donc plus de 7000 ans pour décaler le périhélie d'une journée). Les fluctuations autour du 3 janvier sont dues aux perturbations par la lune et les autres planètes.

Annexes

Quelques définitions et compléments

Année sidérale :

Période de rotation orbitale de la Terre autour du Soleil égale au temps écoulé entre deux instants où le centre de la Terre est à la même position angulaire par rapport au Soleil dans le repère des étoiles fixes (deux instants où on pointe, depuis la Terre, le Soleil dans la même direction par rapport aux étoiles fixes). L'année sidérale vaut environ 365 j 6 h 9 mn 9,5 s.

Année tropique :

Période de rotation orbitale de la Terre autour du Soleil égale au temps écoulé entre deux instants où le centre de la Terre se trouve au point vernal. Période entre deux équinoxes de printemps. Le point vernal a un mouvement rétrograde sur l'orbite si bien que l'année tropique est plus courte d'environ 20 mn 23 s que l'année sidérale : environ 365 j 5 h 48 mn 46 s. Pour éviter un décalage progressif des saisons (20 mn par an, soit 1 jour tous les 71 ans), c'est l'année tropique qui sert à la définition de notre calendrier.

Année anomalistique :

Période de rotation orbitale de la Terre autour du Soleil égale au temps écoulé entre deux instants où le centre de la Terre se trouve au périhélie. Le grand axe de la quasi ellipse de l'orbite terrestre a un mouvement de rotation (~11,6''/an) dans le plan de l'écliptique dans le même sens que la Terre si bien que l'année anomalistique est plus longue d'environ 4 mn 43 s que l'année sidérale : elle vaut environ 365 j 6 h 13 mn 53 s.

Année civile :

L'année tropique vaut un peu moins de 365 j ¼ , pour éviter d'utiliser des jours décalé d'environ 6h, 12h puis 18h par rapport au cycle diurne, on fixe l'année civile à 365 j (année « commune ») ou 366 j (année « bissextile ») environ une année sur 4. Pour éviter le décalage résiduel, le calendrier grégorien (Grégoire XIII- 1582) supprime 3 jours en 4 siècles : les années bissextiles séculaires dont le millésime n'est pas divisible par 400 deviennent communes (exemple : 1900 était commune, mais 2000 était bissextile). L'année moyenne du calendrier grégorien vaut 365,2425 j soit un décalage de 3/10000 j/an par rapport à l'année tropique : il reste à rattraper 3 jours en 10000 ans. Aujourd'hui on réalise périodiquement des rattrapages d'une seconde pour rester synchrone avec les horloges atomiques : le temps civil utilisé correspond au temps universel coordonné UTC synchronisé sur les saisons et sur les horloges atomiques (TAI).

Constante solaire :

Puissance solaire incidente sur un mètre carré (éclairement énergétique en W/m²) situé hors atmosphère, normal au flux solaire, à une distance du Soleil égale à la distance moyenne Terre-Soleil.

Déclinaison solaire :

Angle que forme la direction Terre-Soleil avec le plan de l'équateur terrestre.

Equateur terrestre :

Plan orthogonal à l'axe de rotation terrestre qui contient le centre de gravité de la Terre et qui partage la Terre en deux hémisphères. L'intersection de ce plan avec la surface terrestre est communément appelé « équateur ».

Equation du temps :

Excès du temps solaire moyen sur le temps solaire vrai.

Excentricité :

Rapport de la distance des foyers à la longueur du grand-axe de l'ellipse. L'excentricité de l'orbite terrestre vaut 0,016 708 634 actuellement mais on sait qu'elle connaît des variations entre 0 et 0,06 avec deux périodes caractéristiques 100 000 ans et 413 000 ans.

Nutation :

L'inclinaison de l'axe des pôles sur le plan de l'écliptique (23°26'21,409'' actuellement) varie entre 21°5' et 24°9' depuis 1 million d'année. C'est le mouvement de nutation dont la période vaut approximativement 41 000 ans.

Plan de l'écliptique :

Le plan de la trajectoire terrestre (et de celle de presque toutes les planètes).

Pôles géographiques :

Intersections entre l'axe de rotation propre de la Terre (appelé de ce fait l'axe polaire) et la surface terrestre. Le pôle situé du coté positif du vecteur rotation est appelé pôle Nord, le pôle opposé est le pôle Sud. Notez que les pôles magnétiques se décalent lentement ne sont pas confondus avec les pôles géographiques. Ils se sont inversés plusieurs fois dans l'histoire de la Terre pour des raisons encore incertaines.

Précession des équinoxes :

L'axe de rotation de la Terre est incliné par rapport à la normale au plan de l'écliptique et tourne lentement autour de cette normale (un peu comme une toupie) avec une période d'environ 26 000 ans. De ce fait le plan équatorial tourne aussi, et le point vernal correspondant à l'équinoxe de printemps possède un mouvement rétrograde le long de l'orbite.

Précession planétaire :

Les interactions entre planètes provoquent des perturbations de l'orbite terrestre et aussi la rotation très lente (0,47''/an) du plan de l'écliptique appelée « précession planétaire ». L'effet actuel de la précession planétaire est de décaler le point vernal de 0,10''/an augmentant ainsi son mouvement rétrograde sur l'orbite terrienne pour conduire à une précession dite générale égale à 5029,10'' par siècle julien.

Unité astronomique (U. A . ou u. a. ou Au) :

Unité de distance égale au demi-grand axe de l'orbite autour du Soleil d'une planète de masse négligeable, non perturbée, dont la période de révolution sidérale serait de 365,256 898 326 3 j. Ceci correspond à 149 597 871 km. Soit à peu près la distance moyenne Terre-Soleil.

Périhélies et aphélies pour la période 2013-2022

	périhélie			aphélie		
	date	distance /u.a.	Kd	date	distance /u.a.	Kd
2013	02-janv	0.9832907	1.0342752	05-juil	1.01670846	0.96740231
2014	04-janv	0.9833347	1.0341827	04-juil	1.016681	0.96745458
2015	04-janv	0.9832776	1.0343029	06-juil	1.01668188	0.9674529
2016	02-janv	0.9833045	1.0342463	04-juil	1.01675079	0.96732177
2017	04-janv	0.9833095	1.0342357	03-juil	1.01667531	0.9674654
2018	03-janv	0.9832845	1.0342882	06-juil	1.01669593	0.96742616
2019	03-janv	0.9833013	1.0342529	04-juil	1.01675378	0.96731609
2020	05-janv	0.9832437	1.0343742	04-juil	1.01669426	0.96742934
2021	02-janv	0.9832571	1.0343460	05-juil	1.01672872	0.96736376
2022	04-janv	0.9833366	1.0341787	04-juil	1.01671531	0.96738928
moyennes	03-janv	0.9832940	1.0342683	04-juil	1.0167085	0.9674022

Bibliographie

[1] Q. LIU, V. BOURDIN, P. HOANG, G. CARUSO, V. ARCHAMBAULT, « Coupling optical and thermal models to accurately predict PV panel electricity production », Photovoltaic Technical Conference - Thin Film & Advanced Silicon Solutions 22th to 24th of May 2013 Aix-en-Provence

[2] J. A. Duffie and W. A. Beckman – "Solar Energy Thermal Processes" – John Wiley and Sons – 1974

[3] Chr. Perrin de Brichambaut in « Énergie solaire – conversion et applications », G. Chassagne, C. Dupuy, M. Levy eds, pp. 135-170, CNRS éditions (1978)

[4] Guide des données astronomiques (Annuaire du bureau des longitudes), EDP Sciences.

[5] K. Danel, L. Gautret, « Génération du disque solaire des communes de l'Ouest », ARER, Mars- Août 2008.