

Institut de Mécanique Céleste et de Calcul d'Éphémérides
Observatoire de Paris — Bureau des longitudes
UMR 8028 du CNRS

CALCUL DES CIRCONSTANCES DE L'ÉCLIPSE ANNULAIRE DE SOLEIL
DU 10 JUIN 2021

le : 25 janvier 2021

P. ROCHER

Email : rocher@imcce.fr

TABLE DES MATIÈRES

Avertissement	
Information	3
Précision dans le calcul des prédictions d'éclipses	3
Recommandation	4
Généralités et définitions	
Généralités et définitions	5
Liste des tableaux et cartes contenus dans ce document	6
Calcul des phases d'une éclipse pour un lieu donné	7
Données relatives à l'éclipse	
Éphémérides de la Lune et du Soleil le 10 juin 2021	10
Éphémérides de la Lune et du Soleil le 11 juin 2021	11
Paramètres physiques utilisés dans les calculs	12
Éléments de l'éclipse annulaire du 10 juin 2021	12
Circonstances de l'éclipse générale	12
Éléments de Bessel sous forme polynomiale	13
Éléments de Bessel (notation française)	14
Éléments de Bessel (notation américaine)	15
Exemple de calcul	
Exemple de calcul avec les éléments de Bessel	16
Ligne de centralité	
Ligne de centralité	19
Circonstances locales sur la ligne de centralité	23
Circonstances locales	
Circonstances locales pour des lieux géographiques donnés	25
Europe	
France	26
DESSINS ET CARTES	
Figures	34
Cartes générale et locale	36

AVERTISSEMENT

Information

La présente note contient les prédictions pour l'éclipse annulaire du 10 juin 2021. Cette éclipse est la seizième éclipse annulaire du XXI^e siècle et la première éclipse de l'année 2021. La bande de centralité passe par le pôle Nord, elle débute au nord-est du Canada, traverse successivement le nord-ouest du Groenland, passe au pôle, puis se termine sur l'extrême est de la Russie. Elle sera visible dans sa phase partielle dans le nord-ouest de l'Amérique du Nord, l'océan Atlantique Nord, une grande partie de l'Europe, dont la France, et dans une grande partie du nord de l'Asie. On remarquera qu'à cette période de l'année le Soleil ne se couche pas sur les régions polaires arctiques et que l'on a une éclipse centrale à minuit vrai pour le lieu de longitude $165^{\circ} 22,8'$ O et de latitude $88^{\circ} 09,0'$ N. En ce lieu le Soleil passe au méridien nord (minuit vrai) 11h 1,0m UTC une altitude de $21,2^{\circ}$, il passe au méridien sud (midi vrai) 23h 1,9m UTC à une altitude de $24,9^{\circ}$.

Précision dans le calcul des prédictions d'éclipses

Les différents organismes nationaux producteurs d'éphémérides publient dans leurs éphémérides et dans des bulletins spécifiques les circonstances générales et locales des éclipses de Lune et de Soleil. Parmi ces organismes figurent entre autres :

- l'**U.S. Naval Observatory**, qui publie l'*Astronomical Almanac*,
- la **Division Astronomie du Département d'Hydrographie de Tokyo**, qui publie les *Éphémérides Japonaises*,
- le **Département de Météorologie Indienne** qui publie les *Éphémérides Astronomiques Indiennes*,
- l'**Institut de Mécanique Céleste** qui publie la *Connaissance des Temps* et les *Éphémérides Astronomiques*. À cette liste il convient d'ajouter, la **NASA** qui publie et diffuse régulièrement des bulletins spécifiques aux éclipses de Soleil.

Si on compare les prédictions de ces différentes publications, on constate des écarts, sur les instants des conjonctions en longitudes, sur les limites des bandes de centralité et sur les circonstances locales des éclipses. Ces écarts proviennent des différences entre les paramètres utilisés dans les calculs de prédiction.

Le premier choix porte sur les éphémérides et les théories utilisées dans le calcul des positions apparentes de la Lune et du Soleil. Tous ces organismes cités ci-dessus utilisent pour le calcul des éphémérides de la Lune et du Soleil les résultats de l'intégration numérique américaine du **Jet Propulsion Laboratory**. À l'institut, nous utilisons, pour la Lune et le Soleil les résultats de l'intégration numérique INPOP06 effectuée à l'Institut (A. Fienga et al, 2008). Cette intégration numérique et les éphémérides américaines sont suffisamment proches pour ne pas entraîner des écarts dans les prédictions. Par contre tous les organismes nationaux, à l'exception de la NASA, effectuent une correction empirique en latitude et en longitude dans le calcul des éphémérides des positions apparentes de la Lune. Cette correction a pour but de passer des coordonnées du centre de masse de la Lune aux coordonnées du centre optique de la Lune. Cette correction est de $+0,50''$ en longitude et de $-0,25''$ en latitude. L'absence de cette correction dans les bulletins de la NASA, explique les écarts constatés sur les instants de conjonction et une partie des écarts dans la détermination des lignes de centralité (décalage de la ligne de centralité).

Un deuxième paramètre important dans l'explication des écarts constatés entre les différentes prédictions, est la valeur du paramètre k utilisée dans les calculs. k est la valeur du rayon moyen de la Lune exprimé en rayon terrestre. Jusqu'en 1982, on utilisait deux valeurs distinctes de k , une première ($k = 0,272\,488\,0$) dans le cas général et une spécifique ($k = 0,272\,281$) uniquement pour le calcul des quantités liées à l'ombre dans le cas des éclipses totales. Le fait d'utiliser deux valeurs différentes pour les éclipses centrales posait des problèmes de discontinuité pour les éclipses mixtes. En 1982 l'Union Astronomique Internationale a recommandé d'adopter une valeur unique pour k ($k = 0,272\,507\,6$) dans tous les calculs relatifs aux éclipses. Cette recommandation a été suivie par tous les organismes à l'exception de la NASA qui continue à utiliser deux paramètres distincts, en prenant comme première valeur de k la valeur recommandée par l'UAI ($k = 0,272\,507\,6$) et en étendant l'utilisation de la deuxième valeur de k ($k = 0,272\,281$) au cas des éclipses annulaires. Cela produit donc de nouveaux écarts entre les résultats des Bulletins de la NASA et les prédictions des autres organismes, cela se traduit dans les bulletins de la NASA par une ligne de centralité

plus large dans le cas des éclipses annulaires et moins large dans le cas des éclipses totales, de même cela affecte les calculs relatifs aux durées des phases centrales.

Ces choix sont la source des écarts observés entre les différentes publications et les bulletins de la NASA.

La valeur de l'aplatissement terrestre entre également dans les calculs des coordonnées géographiques des différentes lignes calculées. Mais les écarts produits par les variations possibles de cette valeur sont négligeables.

Par contre, les différences d'estimation de l'écart entre le temps terrestre et le temps universel affectent les résultats publiés. Cela modifie l'instant de la conjonction et les valeurs des instants et des longitudes dans les phases de l'éclipse.

Recommandation

Ces écarts entre diverses publications sont source d'erreurs et de confusions, surtout aux voisinages des limites de la bande de totalité. Il convient donc d'être prudent lors de l'utilisation ou lors des calculs des données relatives aux circonstances locales aux voisinages des limites de cette bande de centralité. En fonction de la publication utilisée, un lieu peut être ou ne pas être dans cette bande. Il faut savoir qu'en ces lieux, une variation de position de quelques kilomètres, peut changer de manière significative l'observation de la centralité. **Pour une bonne observation de l'éclipse et pour minimiser les conséquences liées aux incertitudes sur ces calculs, il convient de se rapprocher le plus possible de la ligne de centralité.** De plus pour un calcul rigoureux des instants et des positions des contacts intérieurs il est nécessaire de tenir compte de l'aspect réel du profil du limbe lunaire.

Remarque sur les coordonnées des villes

Les coordonnées géographiques des villes des différents pays sont issues d'atlas géographiques ou de bases de données : GEONet Names Server (GNS), Institut Géographique National (IGN). Ces bases de données et ces atlas géographiques ne sont pas exempts d'erreurs le nombre de villes dépassant plusieurs millions. Si vous devez vous rendre en un lieu précis pour observer une éclipse, il convient de vérifier les coordonnées du lieu afin d'être sûr que les valeurs fournies dans les circonstances locales de l'éclipse sont correctes.

De plus les cartes d'éclipses étant tracées plusieurs années en avance, elles peuvent présenter des erreurs d'ordre géopolitique, mauvais tracé d'une frontière ou ancien nom de ville ou de pays.

GÉNÉRALITÉS ET DÉFINITIONS

Définitions

Les éclipses de Soleil se produisent à la nouvelle Lune, lorsque la Terre passe dans le cône d'ombre ou dans le cône de pénombre de la Lune (Fig. 1). Lorsque la Terre passe uniquement dans la pénombre de la Lune il y a *éclipse partielle* du Soleil, lorsque la Terre passe dans l'ombre de la Lune il y a *éclipse centrale* du Soleil. La distance Terre-Lune n'étant pas constante, le diamètre apparent de la Lune est variable, il peut être plus petit ou plus grand que le diamètre apparent du Soleil, il y a donc deux types d'éclipses centrales : les *éclipses totales*, lorsque le diamètre apparent de la Lune est plus grand que le diamètre apparent du Soleil (le Soleil est complètement éclipsé), et les *éclipses annulaires* lorsque le diamètre de la Lune est plus petit que le diamètre apparent du Soleil. Il existe un cas limite lorsque le diamètre apparent de la Lune est inférieur au diamètre apparent du Soleil au début de l'éclipse, puis supérieur (autour du maximum) puis de nouveau inférieur au diamètre apparent du Soleil, dans ce cas l'éclipse est appelée *éclipse totale-annulaire*.

Durant une éclipse, l'ombre et la pénombre se déplacent sur la surface du globe terrestre par suite du mouvement synodique de la Lune et de la rotation terrestre. L'aire balayée par l'ombre, très étroite (quelques dizaines à quelques centaines de kilomètres), s'appelle la *bande de centralité*, la ligne parcourue par l'axe du cône d'ombre s'appelle la *ligne de centralité*, c'est sur cette ligne que se situe le maximum de l'éclipse. Un observateur placé dans la bande de centralité voit d'abord une éclipse partielle puis, pendant un court instant (quelques minutes) une éclipse totale ou annulaire, puis de nouveau une éclipse partielle. L'aire balayée par la pénombre, à l'intérieur de laquelle l'éclipse est vue comme partielle, est beaucoup plus large (plusieurs milliers de kilomètres).

Circonstances générales d'une éclipse

Les circonstances générales d'une éclipse correspondent aux différentes phases de l'éclipse, qui sont le commencement et la fin de l'éclipse générale, le commencement et la fin de l'éclipse totale ou annulaire, le commencement et la fin de la centralité, le maximum de l'éclipse et l'éclipse centrale à midi ou minuit vrai. Ces phases sont liées aux mouvements relatifs du Soleil, de la Lune et de la Terre. Elles correspondent chacune à un instant particulier et à un lieu unique sur Terre. Par exemple, le commencement de l'éclipse générale correspond à l'instant où la Terre entre dans le cône de pénombre de la Lune et le lieu est le point de contact de ce cône de pénombre avec la Terre (ce point est un point de la courbe "commencement au lever du Soleil"). Le maximum de l'éclipse correspond à l'instant et au lieu où l'éclipse a une grandeur maximum. Cette valeur maximum de la grandeur de l'éclipse est appelée *magnitude* de l'éclipse. L'éclipse centrale à midi ou minuit vrai correspond à l'instant et au lieu où l'éclipse est centrale et où le Soleil est au méridien.

Circonstances locales d'une éclipse

Il ne faut pas les confondre avec les circonstances générales décrites dans le chapitre précédent. Les circonstances locales d'une éclipse décrivent, en un lieu donné, les différentes phases de l'éclipse, observables par un observateur situé en ce lieu (Fig. 2 et 3).

Ces phases sont les suivantes :

- le début de l'éclipse partielle, appelé également *premier contact* (parfois premier contact extérieur),
- le début de l'éclipse totale ou annulaire (si l'observateur est dans la bande de centralité), appelé également *deuxième contact* (parfois premier contact intérieur),
- le maximum de l'éclipse, instant où la grandeur est maximum en ce lieu,
- la fin de l'éclipse totale ou annulaire (si l'observateur est dans la ligne de centralité), appelée également le *troisième contact* (parfois deuxième contact intérieur),
- la fin de l'éclipse partielle, appelée également *quatrième contact* (parfois deuxième contact extérieur).

Pour chacun des contacts, en plus des instants du contact, on donne *l'angle au pôle P* et *l'angle au zénith Z*.

L'angle au pôle P d'un contact est l'angle de la direction *SN* (partie boréale du cercle horaire du centre *S* du Soleil) avec l'arc de grand cercle joignant les centres *S* et *L* du Soleil et de la Lune, compté positivement dans le sens nord-est-sud-ouest (Fig. 4).

L'angle au zénith Z d'un contact a une définition analogue à celle de P , en remplaçant le cercle horaire du centre S du Soleil par le vertical du même point (Fig. 5).

Pour le maximum on donne également la *grandeur de l'éclipse*, le *degré d'obscuration*, la *hauteur h* et l'*azimut a* du Soleil.

À un instant donné la *grandeur g* de l'éclipse est l'inverse du rapport du diamètre du Soleil sur la distance du bord du Soleil le plus rapproché du centre de la Lune au bord de la Lune le plus rapproché du centre du Soleil (Fig. 6).

Le *degré d'obscuration* est le pourcentage de la surface du disque solaire éclipsé par la Lune (Fig. 7).

La *hauteur h* du Soleil est l'angle de la direction du Soleil et du plan horizontal, compté en degrés de -90° à $+90^\circ$. Dans nos tableaux, on ne tient pas compte de la réfraction atmosphérique.

L'*azimut* est l'angle formé par la projection de la direction du Soleil dans le plan horizontal avec la direction du Sud, compté en degré dans le sens rétrograde (sud = 0° , ouest = 90° , nord = 180° , est = 270°).

Les circonstances locales d'une éclipse peuvent être calculées à l'aide des éléments de Bessel.

LISTE DES TABLEAUX ET CARTES CONTENUS DANS CE DOCUMENT

Tous les instants publiés sont en **Temps universel**, toutes les longitudes sont comptées à partir du **méridien de Greenwich, positivement vers l'ouest et négativement vers l'est**.

Pour chaque éclipse de Soleil on publie les renseignements suivants :

- Les éphémérides de la Lune et du Soleil le jour et le lendemain de l'éclipse, ce sont les coordonnées équatoriales géocentriques apparentes calculées à l'aide des éphémérides du Bureau des Longitudes BDL82. On donne également l'écart en ascension droite entre la Lune et le Soleil.

- Les différents paramètres utilisés dans le calcul, notamment la valeur ΔT_e qui est la différence estimée entre le Temps Terrestre et le Temps Universel le jour de l'éclipse.

- Les circonstances générales de l'éclipse.

- Les éléments de Bessel sous forme polynômiale et sous forme tabulée (notation française et américaine).

- Les limites de la bande de centralité (limites nord et sud de l'ombre), la ligne de centralité, la durée de l'éclipse sur la ligne de centralité, ainsi que la hauteur (h) du Soleil au moment du maximum.

- Les circonstances locales sur la ligne centrale. Pour un instant donné on fournit : la durée de la phase centrale (totale ou annulaire), L la largeur de l'ombre sur la Terre dans la direction perpendiculaire à son déplacement, le degré d'obscuration (Obs.), la grandeur de l'éclipse (g), la hauteur (h) et l'azimut (a) du Soleil, les coordonnées géographiques du point correspondant. Pour chaque contact on donne : l'instant du contact, l'angle au pôle P et l'angle au zénith Z . Toutes ces données tiennent compte de l'aplatissement du globe terrestre mais ne tiennent pas compte de l'altitude des lieux au-dessus du niveau de la mer.

- Des tableaux de circonstances locales pour différents pays. Pour chaque ville on donne les coordonnées géographiques de la ville (en degré et minute de degré), le nom de la ville, la durée de la phase centrale (si elle existe), l'instant du maximum avec le degré d'obscuration (Obs.), la grandeur de l'éclipse (Mag.), la hauteur (h) et l'azimut (a) du Soleil. Pour chaque contact l'instant du contact ; on donne également : l'angle au pôle P et l'angle au zénith Z . Toutes ces données tiennent compte de l'aplatissement du globe terrestre mais ne tiennent pas compte de l'altitude des lieux au-dessus du niveau de la mer. Dans ce document, on donne uniquement les circonstances locales pour les plus grandes villes des pays. Les circonstances locales pour toutes les villes comprises dans les bandes de centralité se trouvent dans des documents spécifiques, ces documents pouvant être très volumineux en fonction de la densité de l'urbanisation.

Remarque : l'utilisation du formulaire et des éléments de Bessel permettent des calculs plus précis, tenant compte d'une meilleure précision dans la latitude et longitude du lieu, ainsi que de l'altitude du lieu.

Corrections liées à l'échelle de temps utilisée

Ce sont les corrections à effectuer pour tenir compte d'une meilleure connaissance de l'écart Temps terrestre (TT) - Temps universel (UT).

En effet, tous les calculs sont faits à partir d'une estimation de cet écart ΔT_e . Les prévisions étant parfois faites de nombreuses années à l'avance, il arrive que la valeur réelle de cet écart ΔT_r diffère de sa valeur estimée. Dans ce cas on doit corriger les résultats publiés de la manière suivante :

Soit $\delta t = \Delta T_r - \Delta T_e$ la différence entre la valeur réelle et la valeur estimée.

Les instants des phénomènes doivent être corrigés de $-\delta t$, et les longitudes géographiques des phénomènes doivent être corrigées de $\delta\lambda = -1,002738 \times \delta t$ (λ et δt étant dans la même unité). Attention, on corrige les longitudes des lieux liés aux différentes phases et courbes et non les longitudes des lieux des villes dans les tableaux de circonstances locales.

Cartes générales et locales

En fin de document on trouvera une carte générale de l'éclipse. Sur cette carte on fait figurer les courbes suivantes : la bande de centralité (lorsqu'elle existe), les limites boréale et australe de l'éclipse, les courbes de commencement, de fin et de maximum aux lever et coucher du Soleil, ainsi que les courbes de commencement et fin pour un instant donné (toutes les heures en général). Sur les cartes locales, lorsqu'elles sont présentes, on donne, en plus, les courbes de commencement, de fin et de maximum à un instant donné (avec un pas plus adapté à la carte), et parfois la projection de l'ombre à des instants donnés.

CALCUL DES PHASES D'UNE ÉCLIPSE POUR UN LIEU DONNÉ

Définition des éléments de Bessel

Pour un lieu donné il y a lieu de déterminer :

Les instants des différents contacts.

L'instant du maximum de l'éclipse et la valeur de ce maximum.

Les angles au pôle et au zénith de chacun des contacts.

Le lieu d'observation est défini par sa longitude λ (positive à l'ouest et négative à l'est du méridien de Greenwich), sa latitude φ et son altitude h au-dessus du niveau de la mer.

On définit à chaque instant un système de coordonnées $Oxyz$ de sens direct, dans lequel :

O est le centre de la Terre.

L'axe Oz est parallèle à l'axe des cônes de pénombre et d'ombre, le sens positif étant celui qui va de la Terre à la Lune.

L'axe Ox est l'intersection du plan fondamental Oxy perpendiculaire à Oz et du plan de l'équateur terrestre, le sens positif étant vers l'est.

L'axe Oy est normal à Ox dans le plan fondamental, le sens positif étant vers le Nord.

En utilisant comme unité de longueur le rayon équatorial terrestre, les éléments de Bessel sont définis de la manière suivante :

x, y, z sont les coordonnées du centre de la Lune.

d et H sont la déclinaison de l'axe Oz et son angle horaire par rapport au méridien de Greenwich.

f_e et f_i sont les demi-angles au sommet des cônes de pénombre et d'ombre, f_e étant pris par convention positif et f_i négatif.

u_e et u_i sont les rayons des sections circulaires des cônes de pénombre et d'ombre par le plan fondamental Oxy et s'obtiennent par les formules suivantes :

$$\begin{aligned} u_e &= z \cdot \tan f_e + k \cdot \sec f_e, \\ u_i &= z \cdot \tan f_i + k \cdot \sec f_i, \end{aligned}$$

où k est le rayon de la Lune exprimé en rayon équatorial terrestre.

Les coordonnées ξ, η, ζ du lieu d'observation dans le système $Oxyz$ sont :

$$\begin{aligned} \xi &= \rho \cdot \cos \varphi' \cdot \sin(H - \lambda), \\ \eta &= \rho \cdot \sin \varphi' \cdot \cos d - \rho \cdot \cos \varphi' \cdot \sin d \cdot \cos(H - \lambda), \\ \zeta &= \rho \cdot \sin \varphi' \cdot \sin d + \rho \cdot \cos \varphi' \cdot \cos d \cdot \cos(H - \lambda), \end{aligned}$$

avec :

$$\begin{aligned} \rho \cdot \cos \varphi' &= \cos u + \frac{h}{r_0} \cdot \cos \varphi, \\ \rho \cdot \sin \varphi' &= (1 - f) \cdot \sin u + \frac{h}{r_0} \cdot \sin \varphi, \end{aligned}$$

et

$$\tan u = (1 - f) \cdot \tan \varphi,$$

où h est l'altitude du lieu exprimée en mètres, r_0 est le rayon équatorial terrestre exprimé en mètres et f l'aplatissement de l'ellipsoïde terrestre ($f = 1/298,257 = 0,003\,352\,81$).

Les variations horaires $\dot{\xi}, \dot{\eta}, \dot{\zeta}$ de ces coordonnées sont fournies avec une précision de l'ordre de la seconde de temps par les formules suivantes :

\dot{H} étant exprimé en radians par heure,

$$\begin{aligned} \dot{\xi} &= \dot{H} \cdot \rho \cdot \cos \varphi' \cdot \cos(H - \lambda), \\ \dot{\eta} &= \dot{H} \cdot \xi \cdot \sin d, \\ \dot{\zeta} &= -\dot{H} \cdot \xi \cdot \cos d. \end{aligned}$$

Les rayons l_e et l_i des sections circulaires des cônes de pénombre et d'ombre par le plan mené par le lieu d'observation parallèlement au plan fondamental s'obtiennent par les formules suivantes :

$$\begin{aligned} l_e &= u_e - \zeta \cdot \tan f_e, \\ l_i &= u_i - \zeta \cdot \tan f_i. \end{aligned}$$

Calculs des circonstances locales

Chaque élément de Bessel b est représenté sur un intervalle de temps (t_0, t_1) par des coefficients de développements en polynômes du temps, à l'exception des valeurs $\tan f_e$ et $\tan f_i$ qui sont considérées comme constantes sur l'intervalle. Un élément de Bessel se calcule à un instant t par la formule :

$$b = b_0 + b_1 \cdot T + b_2 \cdot T^2 + b_3 \cdot T^3.$$

avec $T = t - t_0$.

T , exprimé en heure, représente le temps écoulé depuis l'instant origine t_0 .

La variation horaire \dot{b} d'un élément de Bessel se calcule par la formule :

$$\dot{b} = b_1 + 2b_2 \cdot T + 3b_3 \cdot T^2.$$

Soient :

$$\begin{aligned} U &= x - \xi, & \dot{U} &= \dot{x} - \dot{\xi}, \\ V &= y - \eta, & \dot{V} &= \dot{y} - \dot{\eta}. \end{aligned}$$

— Calcul de la grandeur maximale :

On prend comme valeur de départ t_d l'époque du maximum de l'éclipse, l'instant du maximum t_m se calcule en ajoutant à t_d la valeur τ_m donnée par :

$$\tau_m = - \frac{U\dot{U} + V\dot{V}}{\dot{U}^2 + \dot{V}^2} .$$

On doit réitérer le calcul en prenant comme nouvelle valeur de départ la valeur de t_m .

La grandeur maximale est donnée par :

$$g = \frac{l_e - l_m}{l_e - l_i} ,$$

pour une éclipse annulaire ou totale au lieu considéré, ou :

$$g = \frac{l_e - l_m}{2l_e - 0,5465} ,$$

pour une éclipse partielle, avec :

$$l_m = \sqrt{U^2 + V^2} .$$

— Calcul des contacts :

On prend comme valeurs de départ t_d des premier et quatrième contacts (contacts extérieurs) des valeurs approchées déduites de la carte de l'éclipse et l'on prend comme valeurs de départ des second et troisième contacts (contacts intérieurs), lorsqu'ils existent, la valeur t_m du maximum calculée précédemment.

Pour chaque valeur t_d de départ on calcule les quantités suivantes :

$$\beta = \frac{U\dot{U} + V\dot{V}}{\dot{U}^2 + \dot{V}^2}, \quad \gamma = \frac{U^2 + V^2 - l^2}{\dot{U}^2 + \dot{V}^2}, \quad \theta = \pm \sqrt{\beta^2 - \gamma} ,$$

avec $l = l_e$ ou $l = l_i$ et θ étant du signe de β .

Les instants des premier et quatrième contacts se calculent par la formule :

$$t = t_d - \beta + \theta$$

et les instants des second et troisième contacts se calculent par les formules :

$$t = t_d - \beta - |\theta| \text{ pour le second contact,}$$

et :

$$t = t_d - \beta + |\theta| \text{ pour le troisième contact.}$$

Comme pour le calcul du maximum on doit réitérer les calculs en prenant comme nouvelles valeurs de départ les valeurs t .

— Calcul de l'angle au pôle et de l'angle au zénith :

La valeur de l'angle au pôle P d'un point de contact est donnée par :

$$\text{tg } P = \frac{U}{V} ,$$

où $\sin P$ a le signe de U , sauf pour les second et troisième contacts (contacts intérieurs) d'une éclipse totale pour lesquels $\sin P$ est de signe contraire à U .

L'angle au zénith Z d'un point de contact est donné par :

$$Z = P - \Gamma ,$$

en désignant par Γ l'angle parallactique défini d'une façon approchée par :

$$\tan \Gamma = \frac{\xi}{\eta} ,$$

$\sin \Gamma$ étant du signe de ξ .

ÉPHÉMÉRIDES DE LA LUNE ET DU SOLEIL LE 10 JUIN 2021

Instants en UT.	Coordonnées équatoriales géocentriques apparentes du Soleil			Coordonnées équatoriales géocentriques apparentes de la Lune			Écart en ascension droite Lune – Soleil
	ascension droite	déclinaison		ascension droite	déclinaison		
h	h m s	°	' "	h m s	°	' "	h m s
0	5 13 40,5187	+23	0 36,9393	4 52 6,7128	+22	51 23,2280	– 0 21 33,8381
1	5 13 50,8779	+23	0 48,3790	4 54 13,3948	+22	57 30,2016	– 0 19 37,5154
2	5 14 1,2374	+23	0 59,7765	4 56 20,3034	+23	3 30,9786	– 0 17 40,9664
3	5 14 11,5974	+23	1 11,1318	4 58 27,4372	+23	9 25,5148	– 0 15 44,1926
4	5 14 21,9578	+23	1 22,4448	5 0 34,7948	+23	15 13,7663	– 0 13 47,1956
5	5 14 32,3185	+23	1 33,7156	5 2 42,3744	+23	20 55,6895	– 0 11 49,9768
6	5 14 42,6797	+23	1 44,9442	5 4 50,1744	+23	26 31,2410	– 0 9 52,5379
7	5 14 53,0412	+23	1 56,1306	5 6 58,1931	+23	32 0,3780	– 0 7 54,8808
8	5 15 3,4031	+23	2 7,2747	5 9 6,4286	+23	37 23,0582	– 0 5 57,0073
9	5 15 13,7654	+23	2 18,3765	5 11 14,8791	+23	42 39,2392	– 0 3 58,9192
10	5 15 24,1281	+23	2 29,4361	5 13 23,5424	+23	47 48,8796	– 0 2 0,6186
11	5 15 34,4911	+23	2 40,4534	5 15 32,4166	+23	52 51,9381	– 0 0 2,1075
12	5 15 44,8546	+23	2 51,4284	5 17 41,4994	+23	57 48,3738	+ 0 1 56,6118
13	5 15 55,2184	+23	3 2,3611	5 19 50,7887	+24	2 38,1465	+ 0 3 55,5372
14	5 16 5,5826	+23	3 13,2515	5 22 0,2820	+24	7 21,2164	+ 0 5 54,6664
15	5 16 15,9471	+23	3 24,0996	5 24 9,9771	+24	11 57,5440	+ 0 7 53,9968
16	5 16 26,3120	+23	3 34,9055	5 26 19,8714	+24	16 27,0904	+ 0 9 53,5262
17	5 16 36,6773	+23	3 45,6690	5 28 29,9624	+24	20 49,8174	+ 0 11 53,2519
18	5 16 47,0429	+23	3 56,3901	5 30 40,2475	+24	25 5,6872	+ 0 13 53,1712
19	5 16 57,4089	+23	4 7,0690	5 32 50,7239	+24	29 14,6624	+ 0 15 53,2816
20	5 17 7,7753	+23	4 17,7055	5 35 1,3890	+24	33 16,7063	+ 0 17 53,5802
21	5 17 18,1420	+23	4 28,2996	5 37 12,2398	+24	37 11,7829	+ 0 19 54,0642
22	5 17 28,5091	+23	4 38,8515	5 39 23,2734	+24	40 59,8566	+ 0 21 54,7307
23	5 17 38,8765	+23	4 49,3609	5 41 34,4868	+24	44 40,8923	+ 0 23 55,5767

ÉPHÉMÉRIDES DE LA LUNE ET DU SOLEIL LE 11 JUIN 2021

Instants en UT.	Coordonnées équatoriales géocentriques apparentes du Soleil			Coordonnées équatoriales géocentriques apparentes de la Lune			Écart en ascension droite Lune – Soleil
	ascension droite	déclinaison		ascension droite	déclinaison		
h	h m s	°	' "	h m s	°	' "	h m s
0	5 17 49,2443	+23	4 59,8280	5 43 45,8770	+24	48 14,8558	+ 0 25 56,5991
1	5 17 59,6125	+23	5 10,2527	5 45 57,4409	+24	51 41,7134	+ 0 27 57,7948
2	5 18 9,9809	+23	5 20,6350	5 48 9,1753	+24	55 1,4321	+ 0 29 59,1606
3	5 18 20,3498	+23	5 30,9750	5 50 21,0768	+24	58 13,9793	+ 0 32 0,6932
4	5 18 30,7190	+23	5 41,2725	5 52 33,1422	+25	1 19,3233	+ 0 34 2,3894
5	5 18 41,0885	+23	5 51,5277	5 54 45,3681	+25	4 17,4332	+ 0 36 4,2458
6	5 18 51,4583	+23	6 1,7404	5 56 57,7510	+25	7 8,2784	+ 0 38 6,2588
7	5 19 1,8285	+23	6 11,9107	5 59 10,2875	+25	9 51,8294	+ 0 40 8,4250
8	5 19 12,1991	+23	6 22,0386	6 1 22,9739	+25	12 28,0572	+ 0 42 10,7408
9	5 19 22,5700	+23	6 32,1241	6 3 35,8066	+25	14 56,9335	+ 0 44 13,2026
10	5 19 32,9412	+23	6 42,1672	6 5 48,7820	+25	17 18,4309	+ 0 46 15,8068
11	5 19 43,3127	+23	6 52,1678	6 8 1,8963	+25	19 32,5227	+ 0 48 18,5495
12	5 19 53,6846	+23	7 2,1259	6 10 15,1458	+25	21 39,1828	+ 0 50 21,4271
13	5 20 4,0568	+23	7 12,0416	6 12 28,5265	+25	23 38,3861	+ 0 52 24,4356
14	5 20 14,4293	+23	7 21,9148	6 14 42,0347	+25	25 30,1082	+ 0 54 27,5711
15	5 20 24,8021	+23	7 31,7456	6 16 55,6663	+25	27 14,3255	+ 0 56 30,8299
16	5 20 35,1753	+23	7 41,5339	6 19 9,4174	+25	28 51,0150	+ 0 58 34,2078
17	5 20 45,5488	+23	7 51,2797	6 21 23,2841	+25	30 20,1549	+ 1 0 37,7010
18	5 20 55,9226	+23	8 0,9830	6 23 37,2622	+25	31 41,7240	+ 1 2 41,3052
19	5 21 6,2967	+23	8 10,6439	6 25 51,3476	+25	32 55,7018	+ 1 4 45,0165
20	5 21 16,6712	+23	8 20,2622	6 28 5,5363	+25	34 2,0689	+ 1 6 48,8307
21	5 21 27,0459	+23	8 29,8380	6 30 19,8240	+25	35 0,8067	+ 1 8 52,7436
22	5 21 37,4210	+23	8 39,3713	6 32 34,2066	+25	35 51,8972	+ 1 10 56,7511
23	5 21 47,7963	+23	8 48,8621	6 34 48,6798	+25	36 35,3236	+ 1 13 0,8490
24	5 21 58,1720	+23	8 58,3104	6 37 3,2395	+25	37 11,0698	+ 1 15 5,0329

PARAMÈTRES PHYSIQUES UTILISÉS DANS CES CALCULS

- la parallaxe horizontale du Soleil à une unité astronomique : $\pi_0 = 8,794\,143''$.
 - le demi-diamètre solaire : $s_0 = 15' 59,63''$.
 - le rapport du rayon lunaire sur le rayon équatorial terrestre : $k = 0,272\,507\,6$.
 - le rayon équatorial terrestre : $r_0 = 6\,378\,136,60$ m
 - le carré de l'ellipticité de l'ellipsoïde terrestre : $e^2 = 0,006\,694\,40$.
 - la différence estimée entre le Temps terrestre (TT) et le Temps universel (UT) : $\Delta T_e = 69,184$ s
- Remarque : les instants sont donnés en Temps universel et les longitudes sont comptées à partir du méridien de Greenwich, positivement vers l'ouest et négativement vers l'est.
- Pour tenir compte des écarts entre le centre optique et le centre de masse de la Lune les positions de la Lune ont été corrigées de $0,50''$ en longitude et de $-0,24''$ en latitude.

Les éphémérides utilisées pour le calcul des positions du Soleil et de la Terre sont les éphémérides INPOP06 (A. Fienga et al., 2008) élaborées à l'IMCCE. Pour ce calcul la valeur du TE – TU a été exceptionnellement forcée. Pour le calcul des positions apparentes nous avons utilisé les théories suivantes : La théorie de la précession UAI 2000, la théorie de la nutation 2000A (2003) et la formule du calcul du temps sidéral UAI 2000.

ÉLÉMENTS DE L'ÉCLIPSE ANNULAIRE DU 10 JUIN 2021

Instant de la conjonction géocentrique en ascension droite
le 10 juin 2021 à 11h 1m 3,962s UT.

Ascension droite du Soleil	: 5h 15m 34,672s.
Déclinaison du Soleil	: $+23^\circ 2' 40,65''$.
Ascension droite de la Lune	: 5h 15m 34,672s.
Déclinaison de la Lune	: $+23^\circ 52' 57,18''$.
Parallaxe équatoriale du Soleil	: $8,66''$.
Parallaxe équatoriale de la Lune	: $54' 14,63''$.
Demi-diamètre vrai du Soleil	: $15' 45,16''$.
Demi-diamètre vrai de la Lune	: $14' 46,82''$.

CIRCONSTANCES DE L'ÉCLIPSE GÉNÉRALE

magnitude : 0,9721

	UT	Longitude	Latitude
Commencement de l'éclipse générale	: le 10 à 8h 12,3m	+ $43^\circ 56,2'$	+ $23^\circ 38,4'$
Commencement de l'éclipse annulaire	: le 10 à 9h 49,8m	+ $86^\circ 10,3'$	+ $48^\circ 22,1'$
Commencement de l'éclipse centrale	: le 10 à 9h 54,9m	+ $89^\circ 30,5'$	+ $50^\circ 9,6'$
Maximum de l'éclipse	: le 10 à 10h 41,9m	+ $66^\circ 41,4'$	+ $80^\circ 49,8'$
Éclipse centrale à midi ou minuit vrai	: le 10 à 11h 1,1m	+ $165^\circ 23,6'$	+ $88^\circ 9,0'$
Fin de l'éclipse centrale	: le 10 à 11h 28,7m	– $156^\circ 31,7'$	+ $63^\circ 34,0'$
Fin de l'éclipse annulaire	: le 10 à 11h 33,8m	– $151^\circ 1,2'$	+ $62^\circ 26,5'$
Fin de l'éclipse générale	: le 10 à 13h 11,4m	– $94^\circ 6,5'$	+ $41^\circ 27,2'$

ÉLÉMENTS DE BESSEL SOUS FORME POLYNOMIALE
(notation française)

Les séries suivantes représentent un ajustement polynomial par la méthode des moindres carrés des éléments de Bessel de la page suivante. Pour calculer la valeur de ces coefficients pour un instant T , prendre $t = (T - 8\text{h}) + \delta T/3600$, T est exprimé en heures et fraction d'heure. Ces équations ne sont valides que sur l'intervalle $8\text{h} < T < 14\text{h}$, ne pas les utiliser pour des valeurs extérieures à cet intervalle. δT représente la différence entre ΔT_r et ΔT_e , ΔT_e représente la différence estimée de TT-UT et ΔT_r la différence réelle de TT-UT.

Remarque : H est donné en degré par rapport au méridien de Greenwich.

$$\begin{aligned}
 x &= -1,512\,137\,83 + 0,500\,873\,13 \times t + 0,000\,085\,22 \times t^2 - 0,000\,005\,71 \times t^3 \\
 y &= 0,659\,848\,93 + 0,089\,817\,76 \times t - 0,000\,169\,59 \times t^2 - 0,000\,001\,13 \times t^3 \\
 \sin d &= 0,391\,273\,53 + 0,000\,046\,16 \times t - 0,000\,000\,09 \times t^2 \\
 \cos d &= 0,920\,274\,42 - 0,000\,019\,62 \times t + 0,000\,000\,04 \times t^2 \\
 H &= -59,871\,476\,56 + 14,999\,203\,79 \times t - 0,000\,000\,53 \times t^2 - 0,000\,000\,02 \times t^3 - 0,004\,178\,07 \delta T \\
 u_e &= 0,564\,476\,71 + 0,000\,003\,25 \times t - 0,000\,009\,79 \times t^2 \\
 u_i &= -0,018\,001\,11 - 0,000\,003\,24 \times t + 0,000\,009\,74 \times t^2
 \end{aligned}$$

Dans ces expressions $\delta T, \Delta T_r$ et ΔT_e sont exprimées en secondes de temps.

ÉLÉMENTS DE BESSEL (notation française)

Instant UT	Coordonnées de l'axe dans le plan fondamental		Direction de l'axe du cône d'ombre			Rayons des ombres dans le plan fondamental	
	x	y	$\sin d$	$\cos d$	H	u_e	u_i
h m					°		
8 0	-1,512 138	0,659 849	0,391 274	0,920 274	300,128 52	0,564 477	-0,018 001
8 10	-1,428 657	0,674 814	0,391 281	0,920 271	302,628 39	0,564 477	-0,018 001
8 20	-1,345 171	0,689 769	0,391 289	0,920 268	305,128 26	0,564 477	-0,018 001
8 30	-1,261 681	0,704 715	0,391 297	0,920 265	307,628 13	0,564 476	-0,018 000
8 40	-1,178 186	0,719 652	0,391 304	0,920 261	310,127 99	0,564 475	-0,017 999
8 50	-1,094 688	0,734 579	0,391 312	0,920 258	312,627 86	0,564 473	-0,017 997
9 0	-1,011 185	0,749 496	0,391 320	0,920 255	315,127 73	0,564 470	-0,017 995
9 10	-0,927 679	0,764 404	0,391 327	0,920 252	317,627 59	0,564 467	-0,017 992
9 20	-0,844 169	0,779 302	0,391 335	0,920 248	320,127 46	0,564 464	-0,017 988
9 30	-0,760 656	0,794 190	0,391 343	0,920 245	322,627 33	0,564 460	-0,017 984
9 40	-0,677 139	0,809 069	0,391 350	0,920 242	325,127 19	0,564 455	-0,017 979
9 50	-0,593 619	0,823 938	0,391 358	0,920 239	327,627 06	0,564 450	-0,017 974
10 0	-0,510 096	0,838 797	0,391 365	0,920 235	330,126 93	0,564 444	-0,017 969
10 10	-0,426 571	0,853 646	0,391 373	0,920 232	332,626 80	0,564 438	-0,017 962
10 20	-0,343 042	0,868 486	0,391 381	0,920 229	335,126 66	0,564 431	-0,017 956
10 30	-0,259 512	0,883 316	0,391 388	0,920 226	337,626 53	0,564 424	-0,017 948
10 40	-0,175 978	0,898 136	0,391 396	0,920 222	340,126 40	0,564 416	-0,017 940
10 50	-0,092 443	0,912 945	0,391 404	0,920 219	342,626 26	0,564 407	-0,017 932
11 0	-0,008 906	0,927 745	0,391 411	0,920 216	345,126 13	0,564 398	-0,017 923
11 10	0,074 634	0,942 535	0,391 419	0,920 213	347,626 00	0,564 389	-0,017 914
11 20	0,158 175	0,957 315	0,391 426	0,920 209	350,125 86	0,564 379	-0,017 904
11 30	0,241 717	0,972 085	0,391 434	0,920 206	352,625 73	0,564 368	-0,017 893
11 40	0,325 261	0,986 845	0,391 442	0,920 203	355,125 60	0,564 357	-0,017 882
11 50	0,408 807	1,001 595	0,391 449	0,920 200	357,625 46	0,564 345	-0,017 870
12 0	0,492 353	1,016 334	0,391 457	0,920 197	0,125 33	0,564 333	-0,017 858
12 10	0,575 900	1,031 064	0,391 464	0,920 193	2,625 20	0,564 320	-0,017 845
12 20	0,659 448	1,045 783	0,391 472	0,920 190	5,125 06	0,564 307	-0,017 832
12 30	0,742 997	1,060 492	0,391 479	0,920 187	7,624 93	0,564 293	-0,017 818
12 40	0,826 546	1,075 190	0,391 487	0,920 184	10,124 79	0,564 279	-0,017 804
12 50	0,910 096	1,089 879	0,391 495	0,920 180	12,624 66	0,564 264	-0,017 789
13 0	0,993 645	1,104 557	0,391 502	0,920 177	15,124 53	0,564 248	-0,017 774
13 10	1,077 195	1,119 224	0,391 510	0,920 174	17,624 39	0,564 232	-0,017 758
13 20	1,160 744	1,133 882	0,391 517	0,920 171	20,124 26	0,564 216	-0,017 741
13 30	1,244 293	1,148 528	0,391 525	0,920 168	22,624 13	0,564 198	-0,017 724
13 40	1,327 842	1,163 165	0,391 532	0,920 164	25,123 99	0,564 181	-0,017 707
13 50	1,411 389	1,177 791	0,391 540	0,920 161	27,623 86	0,564 162	-0,017 688
14 0	1,494 936	1,192 406	0,391 547	0,920 158	30,123 72	0,564 144	-0,017 670

$$\tan f_e = +0,004 605 95$$

$$\tan f_i = -0,004 583 01$$

$$H' = +0,261 785 43 \text{ rd/h}$$

$$d' = +0,000 049 57 \text{ rd/h}$$

ÉLÉMENTS DE BESSEL (notation américaine)

Instant UT	Coordonnées de l'axe dans le plan fondamental		Direction de l'axe du cône d'ombre			Rayons des ombres dans le plan fondamental	
	x	y	$\sin d$	$\cos d$	μ	l_e	l_i
h m					°		
8 0	-1,512 138	0,659 849	0,391 274	0,920 274	300,128 52	0,564 477	0,018 001
8 10	-1,428 657	0,674 814	0,391 281	0,920 271	302,628 39	0,564 477	0,018 001
8 20	-1,345 171	0,689 769	0,391 289	0,920 268	305,128 26	0,564 477	0,018 001
8 30	-1,261 681	0,704 715	0,391 297	0,920 265	307,628 13	0,564 476	0,018 000
8 40	-1,178 186	0,719 652	0,391 304	0,920 261	310,127 99	0,564 475	0,017 999
8 50	-1,094 688	0,734 579	0,391 312	0,920 258	312,627 86	0,564 473	0,017 997
9 0	-1,011 185	0,749 496	0,391 320	0,920 255	315,127 73	0,564 470	0,017 995
9 10	-0,927 679	0,764 404	0,391 327	0,920 252	317,627 59	0,564 467	0,017 992
9 20	-0,844 169	0,779 302	0,391 335	0,920 248	320,127 46	0,564 464	0,017 988
9 30	-0,760 656	0,794 190	0,391 343	0,920 245	322,627 33	0,564 460	0,017 984
9 40	-0,677 139	0,809 069	0,391 350	0,920 242	325,127 19	0,564 455	0,017 979
9 50	-0,593 619	0,823 938	0,391 358	0,920 239	327,627 06	0,564 450	0,017 974
10 0	-0,510 096	0,838 797	0,391 365	0,920 235	330,126 93	0,564 444	0,017 969
10 10	-0,426 571	0,853 646	0,391 373	0,920 232	332,626 80	0,564 438	0,017 962
10 20	-0,343 042	0,868 486	0,391 381	0,920 229	335,126 66	0,564 431	0,017 956
10 30	-0,259 512	0,883 316	0,391 388	0,920 226	337,626 53	0,564 424	0,017 948
10 40	-0,175 978	0,898 136	0,391 396	0,920 222	340,126 40	0,564 416	0,017 940
10 50	-0,092 443	0,912 945	0,391 404	0,920 219	342,626 26	0,564 407	0,017 932
11 0	-0,008 906	0,927 745	0,391 411	0,920 216	345,126 13	0,564 398	0,017 923
11 10	0,074 634	0,942 535	0,391 419	0,920 213	347,626 00	0,564 389	0,017 914
11 20	0,158 175	0,957 315	0,391 426	0,920 209	350,125 86	0,564 379	0,017 904
11 30	0,241 717	0,972 085	0,391 434	0,920 206	352,625 73	0,564 368	0,017 893
11 40	0,325 261	0,986 845	0,391 442	0,920 203	355,125 60	0,564 357	0,017 882
11 50	0,408 807	1,001 595	0,391 449	0,920 200	357,625 46	0,564 345	0,017 870
12 0	0,492 353	1,016 334	0,391 457	0,920 197	0,125 33	0,564 333	0,017 858
12 10	0,575 900	1,031 064	0,391 464	0,920 193	2,625 20	0,564 320	0,017 845
12 20	0,659 448	1,045 783	0,391 472	0,920 190	5,125 06	0,564 307	0,017 832
12 30	0,742 997	1,060 492	0,391 479	0,920 187	7,624 93	0,564 293	0,017 818
12 40	0,826 546	1,075 190	0,391 487	0,920 184	10,124 79	0,564 279	0,017 804
12 50	0,910 096	1,089 879	0,391 495	0,920 180	12,624 66	0,564 264	0,017 789
13 0	0,993 645	1,104 557	0,391 502	0,920 177	15,124 53	0,564 248	0,017 774
13 10	1,077 195	1,119 224	0,391 510	0,920 174	17,624 39	0,564 232	0,017 758
13 20	1,160 744	1,133 882	0,391 517	0,920 171	20,124 26	0,564 216	0,017 741
13 30	1,244 293	1,148 528	0,391 525	0,920 168	22,624 13	0,564 198	0,017 724
13 40	1,327 842	1,163 165	0,391 532	0,920 164	25,123 99	0,564 181	0,017 707
13 50	1,411 389	1,177 791	0,391 540	0,920 161	27,623 86	0,564 162	0,017 688
14 0	1,494 936	1,192 406	0,391 547	0,920 158	30,123 72	0,564 144	0,017 670

$$\tan f_1 = +0,004 605 95$$

$$\tan f_2 = +0,004 583 01$$

$$\mu' = +0,261 785 43 \text{ rd/h}$$

$$d' = +0,000 049 57 \text{ rd/h}$$

Exemple de calcul avec les développements en séries des éléments de Bessel

Calculer à Lille (France), les époques des contacts extérieurs et du maximum de l'éclipse.

Les coordonnées de Lille sont les suivantes :

$$\varphi = 50^\circ 39' 0,0'' \text{ N} \quad \lambda = 0 \text{ h } 12 \text{ m } 20,0 \text{ s E} \quad h = 0,0 \text{ m},$$

ce qui donne $\rho \sin \varphi' = 0,769 65$ et $\rho \cos \varphi' = 0,635 33$.

Voici les résultats des deux premières approximations, les calculs intermédiaires sont fournis avec cinq chiffres décimaux. À la fin de la deuxième approximation on peut estimer que la précision est de l'ordre de quelques secondes de temps.

Première approximation :

	1 ^{er} contact extérieur	Maximum	2 ^e contact extérieur
t (UT.)	9 h 0 m	10 h 0 m	11 h 0 m
H	-44,872 27°	-29,873 07°	-14,873 87°
$\sin d$	0,391 32	0,391 37	0,391 41
$\cos d$	0,920 25	0,920 24	0,920 22
x	-1,011 19	-0,510 10	-0,008 91
ξ	-0,423 38	-0,286 35	-0,129 82
$U = x - \xi$	-0,587 81	-0,223 74	0,120 91
y	0,749 50	0,838 80	0,927 75
η	0,522 91	0,486 30	0,464 82
$V = y - \eta$	0,226 59	0,352 49	0,462 93
$\dot{U} = \dot{x} - \dot{\xi}$	0,377 02	0,352 68	0,338 42
$\dot{V} = \dot{y} - \dot{\eta}$	0,132 85	0,118 46	0,102 07
l_e	0,561 08	0,560 65	0,560 37
β	-1,198 52	-0,268 40	0,705 67
γ	0,513 53		-0,681 08
$\theta = \pm \sqrt{\beta^2 - \gamma}$	-0,960 69		1,085 84
$\tau = -\beta + \theta$	0,237 83 h		0,380 17 h
$\tau_m = -\beta$		0,268 40 h	
$t + \tau$	9 h 14 m 16,2 s		11 h 22 m 48,6 s
$t + \tau_m$		10 h 16 m 6,3 s	

Deuxième approximation :

	1 ^{er} contact extérieur	Maximum	2 ^e contact extérieur
t (UT.)	9 h 14 m 16,2s	10 h 16 m 6,3s	11 h 22 m 48,6 s
H	-41,304 99°	-25,847 23°	-9,171 65°
$\sin d$	0,391 33	0,391 38	0,391 43
$\cos d$	0,920 25	0,920 23	0,920 21
x	-0,892 02	-0,375 58	0,181 65
ξ	-0,393 08	-0,245 83	-0,067 38
$U = x - \xi$	-0,498 94	-0,129 75	0,249 03
y	0,770 77	0,862 71	0,961 47
η	0,512 95	0,478 97	0,460 96
$V = y - \eta$	0,257 82	0,383 73	0,500 51
$\dot{U} = \dot{x} - \dot{\xi}$	0,370 39	0,347 81	0,335 87
$\dot{V} = \dot{y} - \dot{\eta}$	0,129 66	0,114 22	0,095 54
l_e	0,560 96	0,560 56	0,560 31
β	-0,982 93	-0,009 70	1,078 10
γ	0,004 75		-0,011 65
$\theta = \pm \sqrt{\beta^2 - \gamma}$	-0,980 51		1,083 49
$\tau = -\beta + \theta$	0,002 42 h		0,005 39 h
$\tau_m = -\beta$		0,009 70 h	
$t + \tau$	9 h 14 m 24,9s		11 h 23 m 8,0 s
$t + \tau_m$		10 h 16 m 41,2s	
g		0,270 6	
P	297,3°		26,5°
Γ	322,5°		351,7°
$Z = P - \Gamma$	334,8°		34,8°

LIGNE DE CENTRALITÉ

CIRCONSTANCES LOCALES SUR LA LIGNE DE CENTRALITÉ

Rappel des notations

- h : hauteur du Soleil au moment du maximum.
- L : largeur de l'ombre dans la direction perpendiculaire à son déplacement.
- Obs. : degré d'obscurité.
- g : grandeur de l'éclipse.
- a : azimut du soleil au moment du maximum.
- v : vitesse de l'ombre (ou de son prolongement) à la surface terrestre.
- P : angle au pôle.
- Z : angle au zénith.

LIGNE DE CENTRALITÉ

Instant UT	Limite nord		Ligne centrale		Limite sud		Ligne centrale	
	Latitude	Longitude	Latitude	Longitude	Latitude	Longitude	Durée	h
h m	° /	° /	° /	° /	° /	° /	m s	°
Limites	+52 18,0	+ 93 35,3	+50 9,6	+ 89 30,5	+48 11,0	+ 86 3,2	3 34,1	...
9 55	+50 26,8	+ 89 52,2	+50 48,8	+ 88 13,6	+55 25,5	+ 74 38,2	3 34,6	1
10 0	+52 11,5	+ 93 21,9	+57 39,9	+ 78 3,6	+59 9,6	+ 70 22,6	3 39,6	10
10 5	+59 33,9	+ 82 52,5	+61 22,3	+ 74 13,9	+62 16,0	+ 67 21,0	3 41,9	14
10 10	+63 20,3	+ 79 27,5	+64 29,2	+ 71 37,7	+65 4,0	+ 64 54,9	3 43,6	17
10 15	+66 29,8	+ 77 26,2	+67 18,8	+ 69 40,8	+67 41,0	+ 62 49,5	3 45,0	19
10 20	+69 21,6	+ 76 14,8	+69 58,2	+ 68 10,7	+70 11,0	+ 60 56,8	3 46,0	21
10 25	+72 2,9	+ 75 45,5	+72 31,2	+ 67 2,8	+72 36,5	+ 59 11,5	3 46,8	22
10 30	+74 37,5	+ 76 1,2	+75 0,2	+ 66 16,9	+74 59,1	+ 57 29,1	3 47,4	23
10 35	+77 7,2	+ 77 16,3	+77 26,9	+ 65 57,4	+77 20,1	+ 55 45,2	3 47,8	23
10 40	+79 32,7	+ 80 3,6	+79 52,5	+ 66 17,2	+79 40,8	+ 53 53,5	3 48,0	23
10 45	+81 52,5	+ 85 37,9	+82 17,9	+ 67 49,2	+82 2,0	+ 51 42,7	3 47,9	23
10 50	+84 0,1	+ 96 57,6	+84 42,8	+ 72 12,8	+84 24,8	+ 48 44,5	3 47,7	23
10 55	+85 32,8	+120 22,9	+87 2,0	+ 86 31,6	+86 49,7	+ 43 6,3	3 47,3	22
11 0	+85 38,4	+156 18,0	+88 18,9	+147 33,8	+89 10,6	+ 10 0,3	3 46,6	21
11 5	+83 58,8	-176 56,5	+86 34,2	-160 26,2	+87 55,9	-114 31,3	3 45,7	20
11 10	+81 14,6	-164 11,5	+83 47,5	-148 54,5	+85 13,3	-124 56,0	3 44,5	18
11 15	+77 41,9	-158 52,5	+80 35,5	-145 54,4	+82 16,7	-129 20,0	3 43,0	16
11 20	+72 51,6	-158 1,7	+76 51,0	-145 59,9	+79 1,1	-132 48,0	3 41,0	13
11 25	+64 27,6	-161 31,4	+71 59,3	-148 28,9	+75 13,8	-136 26,4	3 38,2	9
11 28	+63 52,3	-158 0,8	+67 9,2	-152 34,5	+72 29,2	-139 6,3	3 35,3	4
Limites	+64 45,6	-163 29,9	+63 34,0	-156 31,7	+62 19,2	-150 41,5	3 33,2	...

CIRCONSTANCES LOCALES SUR LA LIGNE DE CENTRALITÉ

Instant		Maximum de l'éclipse						Ligne centrale				Premier contact						
UT		Durée	L	Obs.	g	h	a	v	Latitude		Longitude		UT	P	Z			
h	m	m	s	km	%	°	°	m/s	°	'	°	'	h	m	s	°	°	
Limites		3	34,1	683	88,0	0,969	...	232	≥ 10000	+50	9,6	+ 89	30,5	...	...	...	...
9	55	3	34,6	683	88,1	0,969	1	233	≥ 10000	+50	48,8	+ 88	13,6	...	...	...	...
10	0	3	39,6	655	88,5	0,970	10	243	1953	+57	39,9	+ 78	3,6	9	1	24,5	256	283
10	5	3	41,9	627	88,7	0,971	14	248	1383	+61	22,3	+ 74	13,9	9	4	43,8	256	281
10	10	3	43,6	601	88,9	0,971	17	252	1166	+64	29,2	+ 71	37,7	9	8	27,3	256	280
10	15	3	45,0	580	88,9	0,972	19	255	1052	+67	18,8	+ 69	40,8	9	12	25,2	256	278
10	20	3	46,0	561	89,0	0,972	21	259	985	+69	58,2	+ 68	10,7	9	16	33,9	257	276
10	25	3	46,8	547	89,1	0,972	22	262	944	+72	31,2	+ 67	2,8	9	20	51,5	257	275
10	30	3	47,4	535	89,1	0,972	23	265	919	+75	0,2	+ 66	16,9	9	25	17,4	257	273
10	35	3	47,8	527	89,1	0,972	23	268	906	+77	26,9	+ 65	57,4	9	29	50,9	258	271
10	40	3	48,0	521	89,2	0,972	23	269	903	+79	52,5	+ 66	17,2	9	34	32,1	258	269
10	45	3	47,9	518	89,2	0,972	23	270	909	+82	17,9	+ 67	49,2	9	39	21,1	258	267
10	50	3	47,7	517	89,2	0,972	23	268	924	+84	42,8	+ 72	12,8	9	44	18,0	259	264
10	55	3	47,3	520	89,1	0,972	22	256	949	+87	2,0	+ 86	31,6	9	49	23,5	259	262
11	0	3	46,6	525	89,1	0,972	21	197	987	+88	18,9	+147	33,8	9	54	38,1	260	260
11	5	3	45,7	535	89,0	0,972	20	148	1043	+86	34,2	-160	26,2	10	0	3,1	261	258
11	10	3	44,5	548	89,0	0,972	18	138	1126	+83	47,5	-148	54,5	10	5	40,1	261	255
11	15	3	43,0	566	88,9	0,971	16	137	1260	+80	35,5	-145	54,4	10	11	32,0	262	253
11	20	3	41,0	591	88,7	0,971	13	139	1506	+76	51,0	-145	59,9	10	17	44,7	263	251
11	25	3	38,2	628	88,5	0,970	9	143	2147	+71	59,3	-148	28,9	10	24	34,7	263	248
11	28	3	35,3	663	88,3	0,970	4	148	4010	+67	9,2	-152	34,5	10	29	36,5	264	246
Limites		3	33,2	684	88,1	0,969	...	152	≥ 10000	+63	34,0	-156	31,7	10	31	54,4	264	246

CIRCONSTANCES LOCALES SUR LA LIGNE DE CENTRALITÉ

Instant maximum UT	Deuxième contact				Troisième contact				Quatrième contact						
	UT			<i>P</i>	<i>Z</i>	UT			<i>P</i>	<i>Z</i>	UT			<i>P</i>	<i>Z</i>
h m	h	m	s	°	°	h	m	s	°	°	h	m	s	°	°
Limites	9	53	9,9	256	289	9	56	44,0	76	110	10	52	33,9	75	114
9 55	9	53	12,7	256	289	9	56	47,3	76	110	10	53	2,5	75	114
10 0	9	58	10,2	255	287	10	1	49,8	75	107	11	1	58,8	75	109
10 5	10	3	9,0	255	284	10	6	50,9	75	105	11	8	41,3	75	106
10 10	10	8	8,2	256	282	10	11	51,8	76	102	11	14	52,6	75	103
10 15	10	13	7,5	256	280	10	16	52,5	76	100	11	20	44,8	76	100
10 20	10	18	7,0	256	278	10	21	53,0	76	98	11	26	22,6	76	98
10 25	10	23	6,6	257	276	10	26	53,4	77	96	11	31	48,4	76	95
10 30	10	28	6,3	257	273	10	31	53,7	77	93	11	37	3,6	77	93
10 35	10	33	6,1	257	271	10	36	53,9	77	91	11	42	9,2	77	91
10 40	10	38	6,0	258	269	10	41	54,0	78	89	11	47	5,6	78	88
10 45	10	43	6,0	258	267	10	46	54,0	78	87	11	51	53,3	78	86
10 50	10	48	6,1	259	265	10	51	53,8	79	85	11	56	32,4	79	84
10 55	10	53	6,3	259	263	10	56	53,6	79	83	12	1	3,0	79	83
11 0	10	58	6,7	260	261	11	1	53,3	80	81	12	5	24,7	80	81
11 5	11	3	7,1	261	259	11	6	52,8	81	79	12	9	37,0	81	79
11 10	11	8	7,7	261	257	11	11	52,2	81	77	12	13	38,7	81	78
11 15	11	13	8,5	262	255	11	16	51,5	82	75	12	17	27,6	82	77
11 20	11	18	9,5	262	253	11	21	50,5	82	73	12	20	58,7	82	76
11 25	11	23	10,9	263	251	11	26	49,1	83	72	12	23	57,1	83	75
11 28	11	26	12,3	264	250	11	29	47,6	84	71	12	24	53,7	83	75
Limites	11	26	56,4	264	250	11	30	29,6	84	71	..	..	...	...	...

CIRCONSTANCES LOCALES POUR DES LIEUX GÉOGRAPHIQUES DONNÉS

CIRCONSTANCES LOCALES POUR DES LIEUX GÉOGRAPHIQUES DONNÉS
Chefs lieux des départements français

n°	Position		Nom du lieu	Durée de la phase centrale	Maximum de l'éclipse									
	Latitude	Longitude			UT	Obs.	<i>g</i>	<i>h</i>	<i>a</i>					
	°	'	°	'	m	s	h	m	s	%	°	°		
1	+46	12	- 5	13	Bourg-en-Bresse	..	..	10	11	46,6	6,8	0,151	61	315
2	+49	34	- 3	37	Laon .....	..	..	10	15	31,7	13,6	0,242	58	318
3	+46	34	- 3	20	Moulins .....	..	..	10	8	58,2	8,6	0,177	59	312
4	+44	5	- 6	14	Digne .....	..	..	10	9	26,5	3,3	0,092	63	313
5	+44	33	- 6	5	Gap .....	..	..	10	10	6,6	3,9	0,104	62	314
6	+43	42	- 7	16	Nice .....	..	..	10	10	50,9	2,3	0,073	64	315
7	+44	44	- 4	36	Privas .....	..	..	10	7	30,3	5,0	0,123	61	311
8	+49	46	- 4	44	Charleville .....	..	..	10	17	53,1	13,2	0,237	59	321
9	+42	57	- 1	35	Foix .....	..	..	9	57	53,1	4,5	0,114	59	301
10	+48	18	- 4	5	Troyes .....	..	..	10	13	52,2	11,0	0,209	59	317
11	+43	13	- 2	21	Carcassonne .....	..	..	9	59	53,2	4,4	0,112	60	303
12	+44	21	- 2	34	Rodez .....	..	..	10	2	48,2	5,8	0,135	60	306
13	+43	18	- 5	22	Marseille .....	..	..	10	5	57,8	2,8	0,082	62	309
14	+49	11	+ 0	22	Caen .....	..	..	10	8	10,3	15,8	0,269	56	309
15	+44	56	- 2	26	Aurillac .....	..	..	10	3	50,2	6,7	0,149	59	307
16	+45	40	- 0	10	Angoulême .....	..	..	10	1	29,8	9,4	0,189	57	304
17	+46	10	+ 1	0	La Rochelle .....	..	..	10	0	42,0	11,1	0,211	56	303
18	+47	5	- 2	23	Bourges .....	..	..	10	8	20,6	10,1	0,198	59	311
19	+45	16	- 1	46	Tulle .....	..	..	10	3	22,1	7,6	0,164	59	306
20	+41	55	- 8	43	Ajaccio .....	..	..	10	10	23,1	0,2	0,015	66	315
21	+42	41	- 9	26	Bastia .....	..	..	10	13	41,4	0,5	0,027	66	319
22	+47	20	- 5	2	Dijon .....	..	..	10	13	42,7	8,7	0,179	60	317
23	+48	31	+ 2	45	Saint-Brieuc .....	..	..	10	3	9,7	16,6	0,278	54	304
24	+46	10	- 1	52	Guéret .....	..	..	10	5	29,5	9,0	0,182	58	308
25	+45	12	- 0	44	Périgueux .....	..	..	10	1	25,5	8,3	0,173	58	304
26	+47	14	- 6	2	Besançon .....	..	..	10	15	26,9	7,9	0,168	61	320
27	+44	56	- 4	54	Valence .....	..	..	10	8	31,2	5,1	0,125	61	312
28	+49	3	- 1	11	Evreux .....	..	..	10	10	22,5	14,4	0,252	57	312
29	+48	27	- 1	30	Chartres .....	..	..	10	9	40,1	13,1	0,236	57	312
30	+48	0	+ 4	6	Quimper .....	..	..	10	0	6,7	16,8	0,280	53	301
31	+43	50	- 4	21	Nîmes .....	..	..	10	5	4,4	4,0	0,105	61	308
32	+43	37	- 1	26	Toulouse .....	..	..	9	59	7,3	5,5	0,130	59	302
33	+43	40	- 0	36	Auch .....	..	..	9	57	46,4	6,1	0,140	58	300
34	+44	52	+ 0	30	Bordeaux .....	..	..	9	58	37,3	8,7	0,178	57	301
35	+43	36	- 3	53	Montpellier .....	..	..	10	3	38,9	3,9	0,104	61	307
36	+48	6	+ 1	40	Rennes .....	..	..	10	3	52,5	14,9	0,259	55	305
37	+46	49	- 1	41	Châteauroux .....	..	..	10	6	33,6	10,2	0,199	58	309
38	+47	23	- 0	42	Tours .....	..	..	10	6	5,9	11,8	0,220	57	308
39	+45	11	- 5	43	Grenoble .....	..	..	10	10	40,7	5,0	0,123	62	315
40	+46	41	- 5	33	Lons-le-Saunier .....	..	..	10	13	24,5	7,3	0,159	61	317
41	+43	54	+ 0	30	Mont-de-Marsan .....	..	..	9	56	26,7	7,2	0,157	57	299
42	+47	36	- 1	20	Blois .....	..	..	10	7	37,0	11,7	0,219	58	310

CIRCONSTANCES LOCALES POUR DES LIEUX GÉOGRAPHIQUES DONNÉS
Chefs lieux des départements français

n°	1 ^{er} contact					2 ^e contact					3 ^e contact					4 ^e contact				
	UT			P	Z	UT			P	Z	UT			P	Z	UT			P	Z
	h	m	s	°	°	h	m	s	°	°	h	m	s	°	°	h	m	s	°	°
1	9	21	14,6	308	350	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	5	22,8	14	28
2	9	15	27,6	300	338	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	19	34,5	24	33
3	9	15	43,6	305	348	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	5	48,4	17	33
4	9	28	18,3	315	358	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	10	52	40,0	6	26
5	9	26	39,5	313	356	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	10	55	52,7	8	26
6	9	33	31,5	318	0	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	10	49	48,8	3	23
7	9	21	19,6	311	355	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	10	56	26,6	10	31
8	9	17	54,0	300	338	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	21	38,0	24	31
9	9	14	15,7	311	0	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	10	44	20,6	8	40
10	9	16	46,2	302	342	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	14	43,0	21	32
11	9	16	22,3	311	360	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	10	46	8,6	8	38
12	9	15	30,7	309	356	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	10	53	13,7	11	36
13	9	27	4,7	316	1	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	10	46	48,5	4	29
14	9	7	12,5	297	338	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	13	51,0	25	42
15	9	14	31,0	307	353	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	10	56	31,0	13	36
16	9	8	7,2	303	350	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	10	58	57,2	17	42
17	9	5	19,6	301	347	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	0	30,3	19	44
18	9	13	4,9	303	346	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	7	31,0	19	36
19	9	12	24,3	306	352	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	10	57	56,8	14	38
20	9	52	19,8	330	10	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	10	28	39,9	351	19
21	9	49	45,8	327	6	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	10	38	8,3	355	17
22	9	19	40,8	305	346	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	11	7,2	17	29
23	9	2	26,7	296	339	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	8	57,3	26	48
24	9	12	9,7	304	349	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	2	39,0	17	37
25	9	9	43,1	305	351	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	10	56	57,9	15	41
26	9	22	28,2	306	346	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	11	33,2	16	26
27	9	21	58,6	311	354	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	10	57	49,3	11	30
28	9	10	16,0	298	339	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	14	54,2	24	39
29	9	10	52,1	300	341	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	12	45,8	23	38
30	8	59	44,5	295	340	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	5	43,7	25	51
31	9	22	4,4	313	358	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	10	50	32,8	8	32
32	9	12	55,5	309	358	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	10	48	27,7	10	40
33	9	10	24,6	308	357	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	10	48	30,7	11	42
34	9	6	43,8	304	352	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	10	54	31,7	16	44
35	9	20	54,3	313	359	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	10	48	53,4	7	33
36	9	4	17,9	297	341	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	8	18,2	24	45
37	9	11	28,2	303	347	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	5	39,5	19	38
38	9	9	6,3	301	344	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	7	24,3	21	40
39	9	24	12,1	311	354	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	10	59	47,8	11	27
40	9	21	40,4	307	348	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	8	15,5	15	27
41	9	7	10,8	306	355	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	10	49	25,8	13	44
42	9	10	30,9	301	344	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	8	56,3	21	38

CIRCONSTANCES LOCALES POUR DES LIEUX GÉOGRAPHIQUES DONNÉS
Chefs lieux des départements français

n°	Position		Nom du lieu	Durée de la phase centrale	Maximum de l'éclipse				
	Latitude	Longitude			UT	Obs.	<i>g</i>	<i>h</i>	<i>a</i>
	° /	° /		m s	h m s	%	°	°	
1	+45 26	- 4 23	St.-Etienne . . . . .	.. ..	10 8 33,9	6,2	0,141	61	312
2	+45 3	- 3 53	Le Puy . . . . .	.. ..	10 6 47,5	5,9	0,137	60	310
3	+47 14	+ 1 35	Nantes . . . . .	.. ..	10 2 7,5	13,4	0,240	55	304
4	+47 54	- 1 54	Orléans . . . . .	.. ..	10 9 12,4	11,8	0,220	58	312
5	+44 28	- 1 26	Cahors . . . . .	.. ..	10 1 1,1	6,7	0,149	59	304
6	+44 12	- 0 38	Agen . . . . .	.. ..	9 59 1,8	6,8	0,152	58	302
7	+44 32	- 3 30	Mende . . . . .	.. ..	10 4 57,0	5,4	0,130	60	308
8	+47 29	+ 0 32	Angers . . . . .	.. ..	10 4 18,6	13,0	0,235	56	306
9	+49 7	+ 1 5	St. Lô . . . . .	.. ..	10 6 55,5	16,3	0,274	55	308
10	+48 58	- 4 22	Châlons-sur-Marne . . . . .	.. ..	10 15 41,6	12,0	0,222	59	319
11	+48 7	- 5 8	Chaumont . . . . .	.. ..	10 15 26,9	10,0	0,196	60	319
12	+48 4	+ 0 45	Laval . . . . .	.. ..	10 5 13,0	14,2	0,249	56	307
13	+48 42	- 6 12	Nancy . . . . .	.. ..	10 18 35,3	10,3	0,200	60	323
14	+48 46	- 5 10	Bar-le-Duc . . . . .	.. ..	10 16 46,2	11,1	0,211	60	320
15	+47 40	+ 2 44	Vannes . . . . .	.. ..	10 1 20,4	15,1	0,260	54	302
16	+49 7	- 6 11	Metz . . . . .	.. ..	10 19 20,1	11,0	0,210	60	324
17	+47 0	- 3 9	Nevers . . . . .	.. ..	10 9 32,3	9,4	0,189	59	312
18	+50 39	- 3 5	Lille . . . . .	.. ..	10 16 42,2	16,0	0,271	57	319
19	+49 26	- 2 5	Beauvais . . . . .	.. ..	10 12 38,6	14,4	0,252	57	315
20	+48 25	- 0 5	Alençon . . . . .	.. ..	10 7 16,7	14,1	0,249	56	309
21	+50 17	- 2 46	Arras . . . . .	.. ..	10 15 27,9	15,5	0,265	57	318
22	+45 47	- 3 5	Clermont-Ferrand . . . . .	.. ..	10 6 51,5	7,5	0,162	60	310
23	+43 18	+ 0 22	Pau . . . . .	.. ..	9 55 18,2	6,3	0,143	57	298
24	+43 14	- 0 5	Tarbes . . . . .	.. ..	9 55 54,5	5,9	0,137	58	299
25	+42 42	- 2 54	Perpignan . . . . .	.. ..	9 59 45,3	3,4	0,094	60	303
26	+48 35	- 7 45	Strasbourg . . . . .	.. ..	10 21 24,0	9,1	0,185	61	327
27	+48 5	- 7 21	Colmar . . . . .	.. ..	10 19 41,0	8,5	0,176	61	325
28	+45 46	- 4 50	Lyon . . . . .	.. ..	10 10 8,1	6,4	0,145	61	314
29	+47 38	- 6 9	Vesoul . . . . .	.. ..	10 16 27,4	8,5	0,176	61	321
30	+46 18	- 4 50	Macon . . . . .	.. ..	10 11 14,2	7,2	0,157	61	315
31	+48 0	- 0 12	Le Mans . . . . .	.. ..	10 6 35,3	13,3	0,239	57	308
32	+45 34	- 5 55	Chambéry . . . . .	.. ..	10 11 52,4	5,4	0,130	62	316
33	+45 54	- 6 7	Annecy . . . . .	.. ..	10 12 57,4	5,8	0,136	62	317
34	+48 52	- 2 20	Paris . . . . .	.. ..	10 11 55,6	13,2	0,238	58	314
35	+49 26	- 1 5	Rouen . . . . .	.. ..	10 10 59,7	15,2	0,261	57	313
36	+48 32	- 2 40	Melun . . . . .	.. ..	10 11 49,5	12,4	0,227	58	314
37	+48 48	- 2 8	Versailles . . . . .	.. ..	10 11 27,1	13,2	0,238	58	314
38	+46 19	+ 0 27	Niort . . . . .	.. ..	10 1 54,7	10,9	0,209	57	304
39	+49 54	- 2 18	Amiens . . . . .	.. ..	10 13 56,0	15,1	0,261	57	316
40	+43 56	- 2 8	Albi . . . . .	.. ..	10 1 5,4	5,4	0,130	59	304
41	+44 1	- 1 20	Montauban . . . . .	.. ..	9 59 50,4	6,1	0,140	59	302
42	+43 32	- 6 28	Draguignan . . . . .	.. ..	10 8 46,2	2,5	0,077	63	313

CIRCONSTANCES LOCALES POUR DES LIEUX GÉOGRAPHIQUES DONNÉS
Chefs lieux des départements français

n°	1 ^{er} contact					2 ^e contact					3 ^e contact					4 ^e contact				
	UT			P	Z	UT			P	Z	UT			P	Z	UT			P	Z
	h	m	s	°	°	h	m	s	°	°	h	m	s	°	°	h	m	s	°	°
1	9	19	41,1	309	352	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	0	29,6	13	31
2	9	18	39,0	309	354	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	10	57	58,8	12	32
3	9	4	12,3	299	344	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	4	46,4	22	45
4	9	11	46,2	301	343	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	10	47,5	21	37
5	9	12	5,4	307	354	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	10	53	23,8	13	39
6	9	10	3,8	307	355	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	10	51	32,9	13	41
7	9	18	8,4	310	355	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	10	54	43,4	11	34
8	9	6	26,1	299	343	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	6	45,1	22	43
9	9	5	48,9	296	338	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	12	52,5	26	44
10	9	17	14,1	301	340	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	17	55,1	22	31
11	9	19	25,7	304	343	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	14	57,5	19	29
12	9	6	6,3	298	342	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	9	0,7	23	43
13	9	21	45,8	304	341	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	18	45,1	20	26
14	9	19	11,5	302	341	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	17	55,3	21	29
15	9	2	4,6	297	342	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	5	35,6	24	48
16	9	21	29,5	303	340	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	20	34,3	21	27
17	9	15	0,9	304	346	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	7	47,3	18	34
18	9	14	24,9	297	335	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	23	8,0	27	35
19	9	12	11,3	299	338	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	17	22,5	24	37
20	9	7	53,0	298	341	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	11	14,4	23	41
21	9	13	42,8	298	336	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	21	24,5	26	35
22	9	15	36,6	306	351	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	1	33,8	15	34
23	9	7	57,8	307	357	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	10	46	7,2	11	44
24	9	9	18,6	308	358	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	10	45	50,7	11	43
25	9	19	13,4	314	2	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	10	42	38,6	5	36
26	9	25	50,5	305	341	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	19	56,0	19	22
27	9	25	14,7	306	343	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	17	6,6	18	23
28	9	20	37,4	308	351	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	2	41,2	13	30
29	9	22	25,2	306	345	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	13	40,4	17	26
30	9	20	2,1	307	349	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	5	37,5	15	29
31	9	8	3,2	299	342	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	9	37,1	22	41
32	9	24	12,9	310	352	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	2	15,0	12	27
33	9	24	19,9	310	351	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	4	21,2	12	26
34	9	12	41,0	300	340	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	15	20,7	23	36
35	9	10	8,5	298	338	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	16	18,9	25	39
36	9	13	26,1	301	341	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	14	17,3	22	35
37	9	12	15,0	300	340	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	14	51,8	23	36
38	9	6	33,7	301	347	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	1	36,7	19	43
39	9	12	42,1	298	337	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	19	25,8	25	36
40	9	14	41,2	309	357	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	10	50	34,8	10	38
41	9	12	12,5	308	356	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	10	50	47,4	11	40
42	9	30	46,9	317	1	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	10	48	32,0	4	26

CIRCONSTANCES LOCALES POUR DES LIEUX GÉOGRAPHIQUES DONNÉS
Chefs lieux des départements français

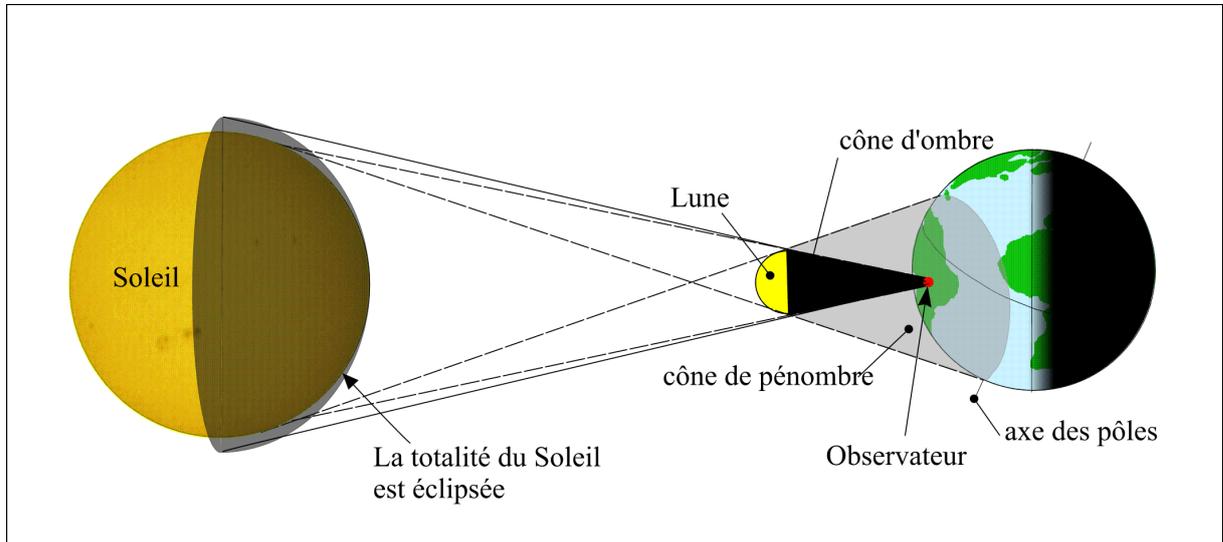
n°	Position		Nom du lieu	Durée de la phase centrale	Maximum de l'éclipse									
	Latitude	Longitude			UT	Obs.	<i>g</i>	<i>h</i>	<i>a</i>					
	°	'	°	'	m	s	h	m	s	%		°	'	
1	+43	56	- 4	48	Avignon . . . . .	..	..	10	6	11,1	3,8	0,103	62	310
2	+46	40	+ 1	25	La Roche-sur-Yon	..	..	10	1	8,6	12,3	0,226	56	303
3	+46	35	- 0	20	Poitiers . . . . .	..	..	10	3	46,5	10,8	0,207	57	306
4	+45	50	- 1	15	Limoges . . . . .	..	..	10	3	41,9	8,9	0,181	58	306
5	+48	10	- 6	28	Epinal . . . . .	..	..	10	18	5,7	9,2	0,186	61	322
6	+47	48	- 3	35	Auxerre . . . . .	..	..	10	11	57,7	10,5	0,203	59	315
7	+47	38	- 6	52	Belfort . . . . .	..	..	10	17	52,2	8,1	0,170	61	322
8	+48	38	- 2	34	Evry . . . . .	..	..	10	11	51,3	12,6	0,230	58	314
9	+48	53	- 2	13	Nanterre . . . . .	..	..	10	11	45,7	13,3	0,239	58	314
10	+48	55	- 2	27	Bobigny . . . . .	..	..	10	12	13,6	13,2	0,238	58	315
11	+48	47	- 2	28	Créteil . . . . .	..	..	10	11	59,2	13,0	0,235	58	314
12	+49	2	- 2	3	Cergy-Pontoise . .	..	..	10	11	47,0	13,7	0,244	57	314

CIRCONSTANCES LOCALES POUR DES LIEUX GÉOGRAPHIQUES DONNÉS
Chefs lieux des départements français

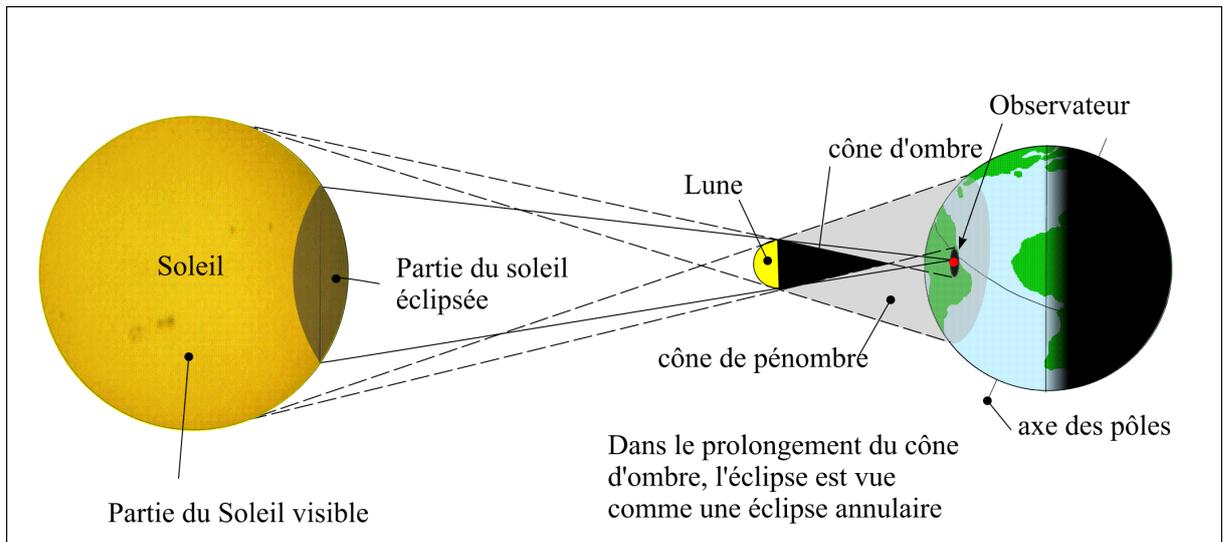
n°	1 ^{er} contact					2 ^e contact					3 ^e contact					4 ^e contact				
	UT			<i>P</i>	<i>Z</i>	UT			<i>P</i>	<i>Z</i>	UT			<i>P</i>	<i>Z</i>	UT			<i>P</i>	<i>Z</i>
	h	m	s	°	°	h	m	s	°	°	h	m	s	°	°	h	m	s	°	°
1	9	23	26,8	313	358	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	10	51	19,2	7	30
2	9	4	26,9	300	346	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	2	26,8	21	45
3	9	8	19,9	302	347	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	3	27,7	19	41
4	9	10	44,9	304	350	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	0	32,0	16	39
5	9	22	49,0	305	343	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	16	34,6	19	25
6	9	15	44,7	303	344	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	11	57,4	20	33
7	9	24	22,4	306	345	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	14	23,2	17	24
8	9	13	12,2	300	341	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	14	36,6	22	35
9	9	12	25,9	300	340	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	15	17,6	23	36
10	9	12	56,2	300	340	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	15	40,4	23	36
11	9	12	58,5	300	340	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	15	8,2	23	36
12	9	12	4,8	299	340	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	11	15	44,1	24	37

DESSINS ET CARTES

Les éclipses de Soleil



a : cas d'une éclipse totale.



b : cas d'une éclipse annulaire

Fig. 1. Les éclipses centrales de Soleil (les distances ne sont pas respectées).

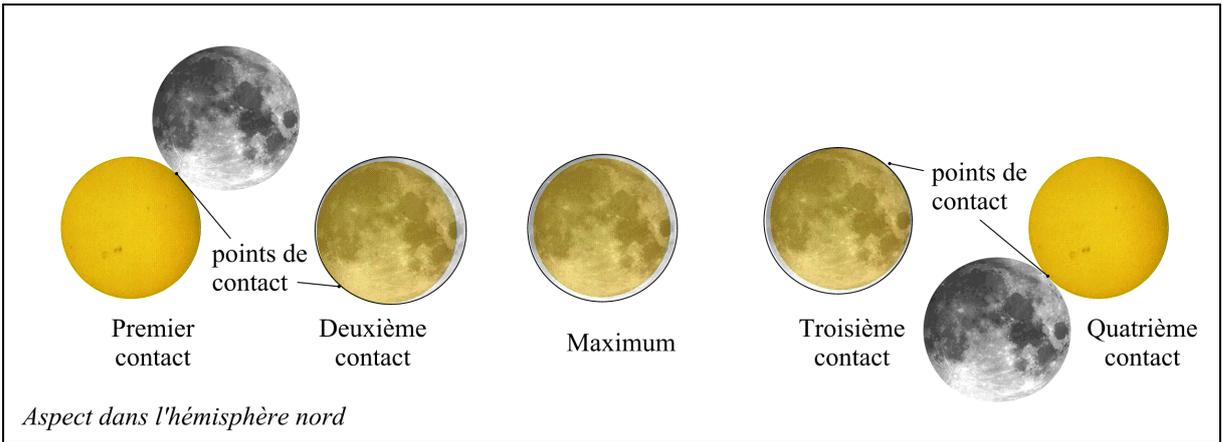


Fig.2. Phases locales d'une éclipse totale.

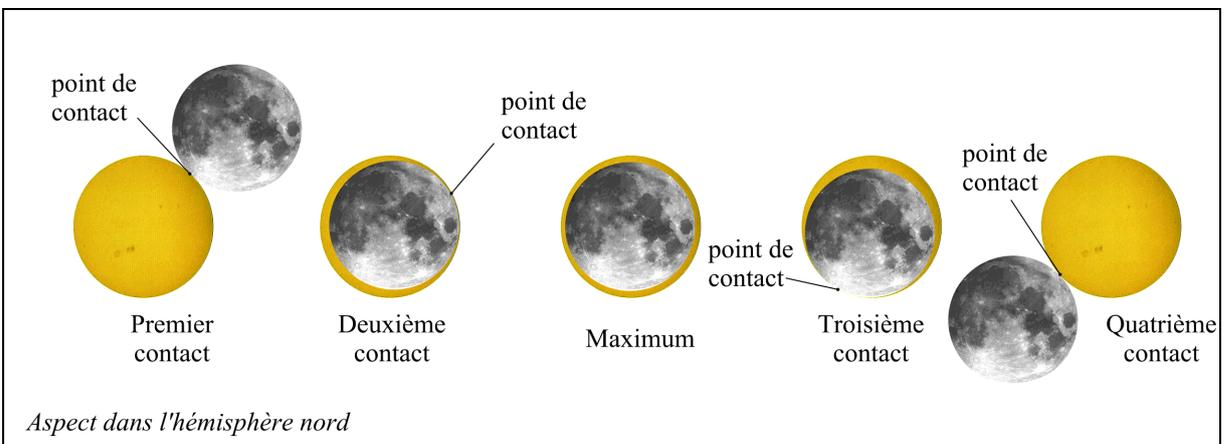


Fig.3. Phases locales d'une éclipse annulaire.

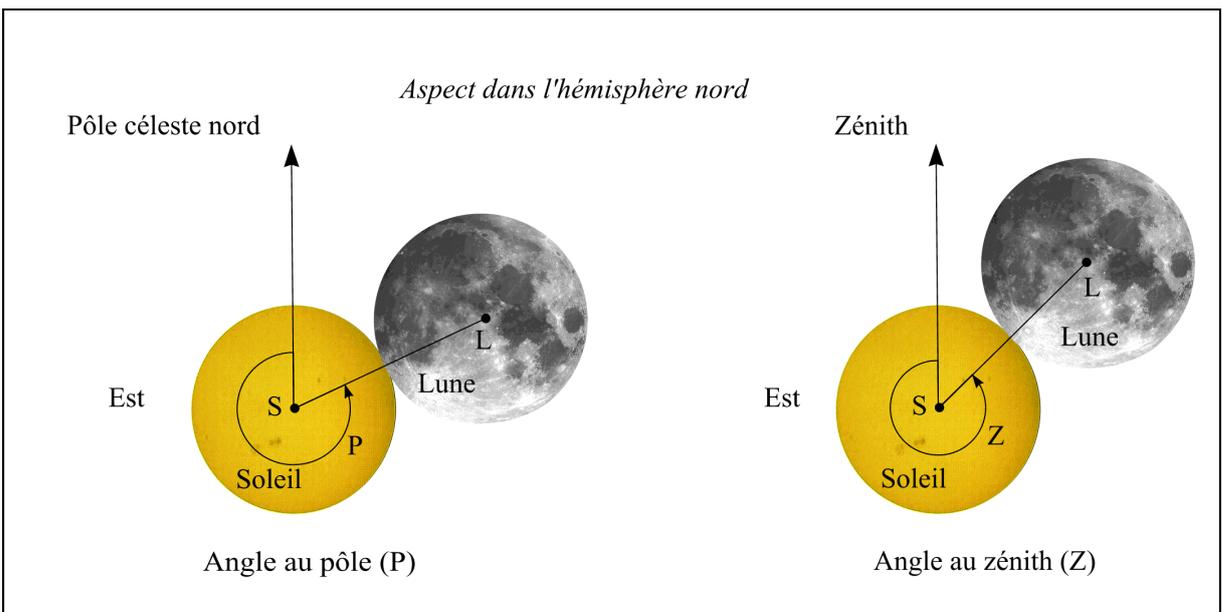


Fig.4 et Fig.5. Angle au pôle et angle au zénith.

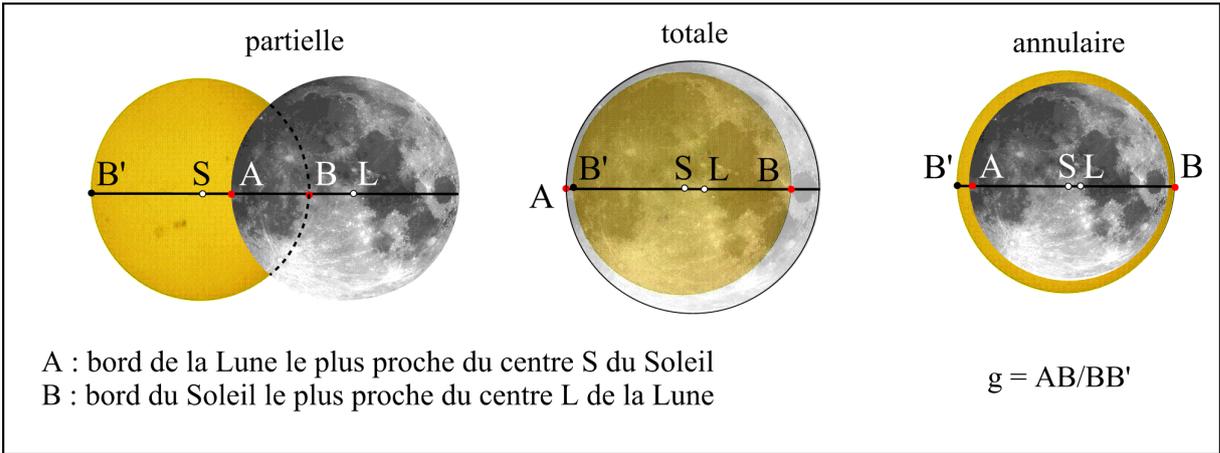


Fig. 6. Grandeur ou magnitude d'une éclipse de Soleil.

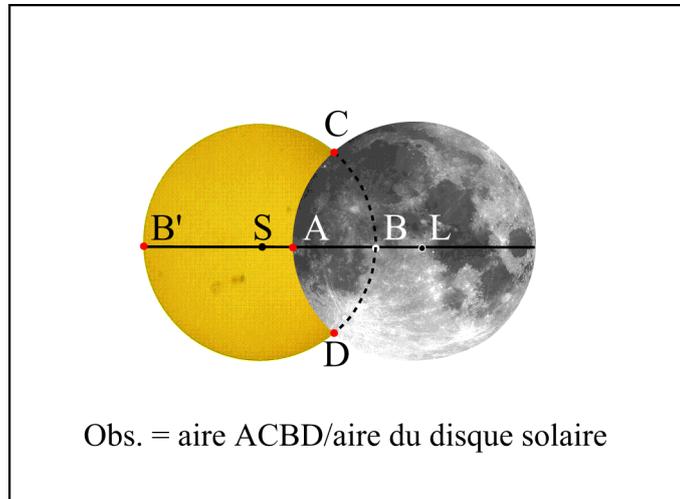


Fig.7. Degré d'obscurité d'une éclipse de Soleil.

Éclipse annulaire du Soleil le 10 juin 2021

