# Astronomie amateur : carte du ciel

Jean-Christophe Filliâtre

`filliatr@lri.fr`

## 1 Description

Le but de ce projet est de réaliser une application affichant une carte du ciel, étant donnés un point d'observation à la surface de la Terre et un instant précis. Une carte du ciel est une projection de la demi-sphère céleste située au dessus de l'observateur sur un disque : le bord de ce disque correspond à l'horizon et son centre au point situé à la verticale au dessus de l'observateur (appelé zénith).

Les objets pouvant apparaître sur une carte du ciel sont nombreux. Il y a bien sûr les étoiles, mais on peut également y faire figurer le Soleil, la Lune, les planètes du système solaire autres que la Terre, des comètes, etc. Une carte du ciel est d'un intérêt immédiat pour l'astronome amateur : elle indique où pointer son télescope ou plus simplement parfois où regarder à l'oeil nu.

### 1.1 Systèmes de coordonnées

Il existe plusieurs systèmes de coordonnées pour indiquer la position d'un objet céleste. Du point de vue de l'observateur situé à la surface de la Terre, un point sur la sphère céleste est repéré par un *azimut* (compté à partir du Sud en direction de l'Ouest) et une *hauteur* (l'angle entre l'horizon et le point observé, dans le plan de l'azimut ; la hauteur est donc comprise entre 0° et 90°). L'azimut et la hauteur forment ce que l'on appelle les *coordonnées horizontales locales*. Ce sont ces coordonnées que l'on trouve sur une carte du ciel. D'une manière générale, les positions des objets célestes ne s'expriment pas facilement comme fonctions du temps dans ce système de coordonnées. On lui préfère d'autres systèmes de coordonnées, tous géocentriques.

Dans le système de *coordonnées équatoriales*, le plan de référence est une projection de l'équateur terrestre sur la sphère céleste. Dans ce plan, l'angle équivalent à la longitude terrestre est appelé *ascension droite*. Son point de référence est le *point vernal*, correspondant à l'un des deux points d'intersection de la trajectoire apparente du Soleil (appelée *écliptique*) avec l'équateur céleste (celui correspondant à l'équinoxe de Printemps pour être précis). L'équivalent de la latitude terrestre est appelé *déclinaison*. Si l'on omet le mouvement de l'axe de rotation de la Terre (mouvements de précession et de nutation), les étoiles ont donc des coordonnées équatoriales *constantes*.

Dans le système de *coordonnées écliptiques*, la Terre est toujours au centre du repère mais le plan de référence est maintenant le plan dans lequel la Terre orbite autour du Soleil.

Dans ce plan, on parle de *longitude écliptique*, et le point de référence est toujours le point vernal. L'autre coordonnée est appelée *latitude écliptique*. L'intérêt du système écliptique réside (entre autres) dans la donnée de fonctions approchées de la position de la Lune et du Soleil. On notera en particulier que, par définition du système écliptique, la latitude du Soleil y vaut toujours 0°.

Il existe enfin un dernier système de coordonnées, dit *galactique*. Le plan de référence est celui de notre galaxie (la Voie Lactée), incliné de presque 60° avec l'équateur céleste. Le point de référence se trouve dans la direction du centre de notre galaxie.

Les formules permettant de passer d'un système de coordonnées à un autre sont données en annexe.

## 1.2 Temps

Le temps intervient dans les calculs astronomiques sous la forme du *jour julien* : c'est un nombre de jours, avec fraction, écoulés depuis un instant référence. Le jour julien, noté $JJ$, se calcule ainsi.

On note par $\mathrm{ENT}(x)$ la « fausse » partie entière de $x$, définie par

$$\mathrm{ENT}(x) = \begin{cases} \lfloor x \rfloor & \text{si } x \geq 0 \\ \lceil x \rceil & \text{si } x < 0 \end{cases}$$

On se donne une date sous la forme d'une année $Y$, d'un mois $M$ (compris entre 1 et 12) et d'un jour $D$. Le jour n'est pas nécessairement entier, ses décimales exprimant une fraction de jour. Ainsi, le 16 février 2003 à 6 heures, on a $Y = 2003$, $M = 2$ et $D = 16.25$. On est dans le calendrier Grégorien si la date est supérieure ou égale au 15 octobre 1582.

Si $M$ est plus grand que 2, on pose $y = Y$ et $m = M$ ; si $M = 1$ ou 2, on prend $y = Y - 1$ et $m = M + 12$. Le jour julien est alors

$$JJ = \mathrm{ENT}(365.25\, y) + \mathrm{ENT}(30.6001\,(m+1)) + D + 1\,720\,994.5$$

Si de plus on est dans le calendrier Grégorien, il faut ajouter $B = 2 - A + \mathrm{ENT}(A/4)$ avec $A = \mathrm{ENT}(y/100)$.

Les dates sont exprimées dans le Temps Universel (UT). Pour obtenir l'heure locale en France, il faut ajouter au temps universel une heure l'hiver et deux heures l'été.

## 1.3 Données fournies

Le catalogue des 3141 étoiles les plus brillantes est fourni[1]. Il s'agit d'un fichier ASCII donnant une étoile par ligne, mis à part les lignes débutant par le caractère `#` qui doivent être ignorées. Le format d'une ligne est le suivant :

nom de l'étoile`,`ascension droite`,`déclinaison`,`magnitude`,`type spectral

[1] `http://www.enseignement.polytechnique.fr/profs/informatique/Jean-Christophe.Filliatre/stars.dat`

Le nom de l'étoile peut contenir des espaces. L'ascension droite et la déclinaison sont données en radians (elles sont valables pour notre époque seulement ; les considérer plusieurs millénaires en arrière ou en avant dans le temps n'a pas de sens). La magnitude et le type spectral doivent être utilisés pour calculer la couleur d'affichage, selon une formule empirique donnée en annexe.

Pour confronter votre application à l'observation, voici les coordonnées géographiques de la commune de Palaiseau : 02° 15' 02" longitude Est / 48° 43' 09" latitude Nord.

## 2 Travail demandé

Votre programme devra permettre de :
- spécifier un lieu d'observation (point à la surface de la terre) et une date ;
- afficher la carte du ciel correspondante, montrant les positions des étoiles, de la Lune et du Soleil ;
- afficher, lorsque l'on clique sur la carte, le nom de l'étoile la plus proche du pointeur de la souris ;
- faire avancer ou reculer le temps (d'un intervalle de temps pouvant être lui-même spécifié), permettant ainsi une animation de la sphère céleste.

Il est notamment demandé d'apporter une solution algorithmique satisfaisante au problème de la détermination de l'étoile la plus proche du pointeur, même si le nombre d'étoiles affichées n'est que de l'ordre de quelques milliers. On pourra par exemple consulter [2].

Voici quelques vérifications simples pour tester votre programme :
- visualiser la (quasi) immobilité apparente de l'étoile polaire et le fait que sa hauteur est égale à la latitude du point d'observation (dans l'hémisphère Nord) ;
- confronter l'heure du lever ou du coucher du Soleil donnée par votre programme avec l'observation ;
- visualiser l'éclipse de Soleil qui fût visible en France le 11 août 1999.

## 3 Pour aller plus loin

Votre programme pourra également permettre de :
- visualiser l'apparence de la Lune, à savoir la forme et l'inclinaison de sa portion éclairée ;
- visualiser la position des planètes du système solaire autres que la Terre.

On se référera par exemple à l'ouvrage de Jean Meeus [1] pour ces calculs.

Quelques vérifications simples :
- confronter la phase de la Lune observée à celle donnée par votre programme ;
- visualiser la conjonction (i.e. apparente proximité) de la Lune et de Jupiter dans la nuit du 15 au 16 février 2003 (à l'exclusion, bien sûr, de lieux tels le pôle Sud d'où la Lune et Jupiter n'étaient pas visibles).

# Références

[1] Jean Meeus. *Calculs astronomiques à l'usage des amateurs*. Société astronomique de France, 1986.

[2] Robert Sedgewick. *Algorithms*. Addison-Wesley, 1990.

# Annexe : Calculs astronomiques

**Symboles**

| | |
|---|---|
| $JJ$ | jour julien |
| $T$ | siècles juliens |
| $\Theta_0$ | temps sidéral à Greenwich |
| $L$ | longitude de l'observateur (positive à l'Ouest de Greenwich) |
| $\Phi$ | latitude de l'observateur |
| $A$ | azimut |
| $h$ | hauteur sur l'horizon |
| $\alpha$ | ascension droite |
| $\delta$ | déclinaison |
| $\lambda$ | longitude écliptique |
| $\beta$ | latitude écliptique |
| $\epsilon$ | obliquité de l'écliptique |

Les angles donnés dans les formules ci-dessous le sont en degrés et décimales, sous la forme $23°.44$. Il est important de noter qu'il s'agit bien de 23.44 degrés, et non de 23 degrés et 44 minutes.

**Siècles juliens**

$$T = \frac{JJ - 2\,415\,020.0}{36\,525}$$

**Temps sidéral à Greenwich** Il exprime la rotation de la Terre, et est donné en heures. On peut le ramener dans l'intervalle 0–24. Attention : le multiplier par 15 s'il doit représenter un angle, comme dans la formule donnant $H$ plus loin.

On commence par calculer le temps sidéral à Greenwich à 0h UT pour la date considérée :

$$\theta_0 = 6.646\,065\,6 + 2\,400.051\,262\,T + 0.000\,025\,81\,T^2$$

Dans le calcul ci-dessus, $T$ — et donc $JJ$ — sont calculés pour la date considérée *à 0h UT*. Puis si $f$ désigne le temps écoulé depuis 0h UT, exprimé en heures, on a

$$\Theta_0 = \theta_0 + 1.002\,737\,908\,f$$

**Obliquité de l'écliptique** C'est l'angle $\epsilon$ entre l'écliptique et l'équateur céleste.

$$\epsilon = 23°.452\,294 - 0°.013\,012\,5\,T - 0°.000\,001\,64\,T^2 + 0°.000\,000\,503\,T^3$$

**Transformation des coordonnées**

– Transformation des coordonnées écliptiques en coordonnées équatoriales

$$\begin{aligned}\tan\alpha &= \frac{\sin\lambda\cos\epsilon - \tan\beta\sin\epsilon}{\cos\lambda}\\ \sin\delta &= \sin\beta\cos\epsilon + \cos\beta\sin\epsilon\sin\lambda\end{aligned}$$

– Transformation des coordonnées équatoriales en coordonnées horizontales locales

$$\begin{aligned}H &= \Theta_0 - L - \alpha\\ \tan A &= \frac{\sin H}{\cos H\sin\Phi - \tan\delta\cos\Phi}\\ \sin h &= \sin\Phi\sin\delta + \cos\Phi\cos\delta\cos H\end{aligned}$$

*Remarque importante* : lorsqu'un angle $\theta$ est donné par sa tangente sous la forme $\tan\theta = \frac{N}{D}$, il doit être considéré dans le quadrant contenant le point de coordonnées cartésiennes $(D, N)$, comme dans une conversion de coordonnées rectangulaires vers polaires.

**Position du Soleil** La longitude écliptique apparente du Soleil, notée $\odot_{\text{app}}$, est donnée par les calculs suivants :

$$\begin{aligned}L &= 279^\circ.696\,68 + 36\,000^\circ.768\,92\,T + 0^\circ.000\,302\,5\,T^2\\ M &= 358^\circ.475\,83 + 35\,999^\circ.049\,75\,T - 0^\circ.000\,150\,T^2 - 0^\circ.000\,003\,3\,T^3\\ C &= (1^\circ.919\,460 - 0^\circ.004\,789\,T - 0^\circ.000\,014\,T^2)\sin M\\ &+ (0^\circ.020\,094 - 0^\circ.000\,100\,T)\sin(2M)\\ &+ 0^\circ.000\,293\,\sin(3M)\\ \Omega &= 259^\circ.18 - 1\,934^\circ.142\,T\\ \odot_{\text{app}} &= L + C - 0^\circ.005\,69 - 0^\circ.004\,79\,\sin\Omega\end{aligned}$$

**Position de la Lune** Déterminer la position de la Lune nécessite de prendre en compte des *centaines* de termes périodiques. Nous donnons ici quelques termes seulement, offrant une précision limitée, mais suffisante dans un premier temps. Pour une plus grande précision, on consultera [1].

Les coordonnées écliptiques $\lambda$ et $\beta$ de la Lune se calcule selon les formules suivantes. $M$ désigne l'anomalie moyenne du Soleil donnée au paragraphe précédent.

$$\begin{aligned}L' &= 270^\circ.434\,164 + 481\,267^\circ.883\,1\,T - 0^\circ.001\,133\,T^2 + 0^\circ.000\,001\,9\,T^3\\ M' &= 296^\circ.104\,608 + 477\,198^\circ.849\,1\,T + 0^\circ.009\,192\,T^2 + 0^\circ.000\,014\,4\,T^3\\ D &= 350^\circ.737\,486 + 445\,267^\circ.114\,2\,T - 0^\circ.001\,436\,T^2 + 0^\circ.000\,001\,9\,T^3\\ F &= 11^\circ.250\,889 + 483\,202^\circ.025\,1\,T - 0^\circ.003\,211\,T^2 - 0^\circ.000\,000\,3\,T^3\\ \Omega &= 259^\circ.183\,275 - 1\,934^\circ.142\,0\,T + 0^\circ.002\,078\,T^2 + 0^\circ.000\,002\,2\,T^3\end{aligned}$$

$$
\begin{aligned}
\lambda &= L' + 6^\circ.288\,750 \sin M' \\
&+ 1^\circ.274\,018 \sin(2D - M') \\
&+ 0^\circ.658\,309 \sin(2D) \\
&+ 0^\circ.213\,616 \sin(2M') + \ldots
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
B &= 5^\circ.128\,189 \sin F \\
&+ 0^\circ.280\,606 \sin(M' + F) \\
&+ 0^\circ.277\,693 \sin(M' - F) \\
&+ 0^\circ.173\,238 \sin(2D - F) + \ldots
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
\omega_1 &= 0^\circ.000\,466\,4 \cos \Omega \\
\omega_2 &= 0^\circ.000\,075\,4 \cos(\Omega + 275^\circ.05 - 2^\circ.30\,T) \\
\beta &= B \times (1 - \omega_1 - \omega_2)
\end{aligned}
$$

**Couleur et luminosité apparentes d'une étoile** Les composantes RGB de la couleur apparente d'une étoile sont données en fonction de son type spectral par le tableau suivant :

| type spectral | Rouge | Vert | Bleu |
|---|---|---|---|
| O | 0.8 | 0.8 | 1.0 |
| B | 0.9 | 0.9 | 1.0 |
| A | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| F | 1.0 | 1.0 | 0.8 |
| G | 1.0 | 1.0 | 0.7 |
| K | 1.0 | 0.9 | 0.8 |
| M, C, S | 1.0 | 0.6 | 0.6 |
| W, P | 1.0 | 1.0 | 1.0 |

Ces trois composantes doivent ensuite être multipliées par le facteur

$$
\min\left(1, \frac{3 \times 2.42}{(2.46 + m) \times 2.42}\right)
$$

où $m$ désigne la magnitude de l'étoile.