

# MESURE DE L'UNITE ASTRONOMIQUE PAR L'ABERRATION DE LA LUMIERE

## Le projet

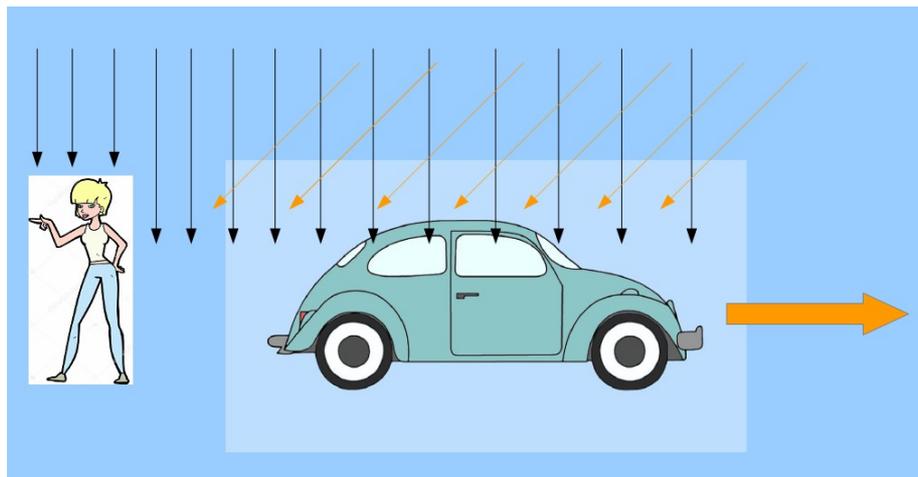
Dans le cadre d'un projet de mesure des dimensions du système solaire, il est apparu nécessaire d'estimer la longueur de l'Unité Astronomique. En effet, beaucoup des observations facilement réalisables pour la mesure des orbites des planètes du système solaire permettent d'accéder au rapport de ces orbites à celle de la Terre. La connaissance de l'UA est donc un point clef dans ce projet. C'est ce qui explique aussi pourquoi cette mesure a tenu un rôle si central dans l'astronomie.

Si de nombreuses méthodes très précises ont été développées à l'ère spatiale, les premières mesures ont été réalisées par triangulation de Vénus lors de rares transits devant le disque solaire. Une autre méthode se base sur l'aberration de la lumière (la déviation de la direction apparente d'une source lumineuse pour un observateur en mouvement par rapport à la source). Cette méthode a été mise à profit par James Bradley en 1725 pour estimer la valeur de l'UA par observation de l'étoile  $\gamma$  Draconis.

Le but de ce document est de présenter une expérience amateur de mesure de l'UA se basant sur l'aberration de la lumière mais distincte de celle de Bradley.

## Aberration de la lumière

Commençons par une analogie : imaginons un jour de pluie sans vent. Pour un observateur à l'arrêt, la pluie tombe verticalement. En revanche, un observateur placé dans une voiture en mouvement verra la pluie venir d'en « haut en face », et plus la voiture se déplacera rapidement, plus la pluie semblera venir d'en face près de l'horizon. L'angle  $\alpha$  entre la verticale et le point dont semble venir la pluie est tel que  $\text{tg}(\alpha) = \text{vitesse voiture} / \text{vitesse verticale pluie}$



Un phénomène similaire s'applique à la lumière. Un observateur se déplaçant à une vitesse éloignée de la vitesse de la lumière, verra la source se déplacer apparemment d'un angle  $\beta$  tel que  $\text{tg}(\beta) = \text{vitesse perpendiculaire à la direction de la source} / \text{vitesse de la lumière}$ .

La mesure de l'angle  $\beta$  doit, en principe permettre de mesurer une des composantes de la vitesse de

déplacement de l'observateur.

## Principe des observations

Le principe de l'observation est donc de mesurer la position précise d'une étoile à plusieurs moments de l'année et d'en déduire la vitesse de la Terre sur sa trajectoire. Si, par ailleurs, l'on mesure la durée de l'année sidérale, on pourra estimer la circonférence de l'orbite terrestre, et, en faisant l'hypothèse qu'elle est circulaire, son rayon qui est l'UA.

Si le principe de la mesure est simple, sa mise en application est rendue délicate pour différentes raisons :

- l'amplitude du mouvement est de quelques dizaines de secondes d'arc
- l'amplitude est à mesurer tout au long d'une année, ou au moins durant 6 mois, à des dates bien spécifiques. Les variations d'un jour à l'autre sont donc très faibles
- la réfraction atmosphérique, phénomène variable, est sensiblement plus grande (de l'ordre de 100x) que l'effet à mesurer et interfère avec la mesure de la position apparente des étoiles
- la méthode de Bradley nécessite de fixer rigidement un télescope dédié à l'observation pendant toute la durée des mesures : si l'instrument bouge, ne serait-ce que de quelques mm, toute l'observation est à reprendre de zéro

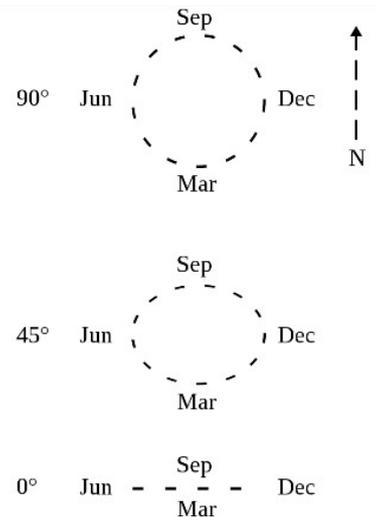
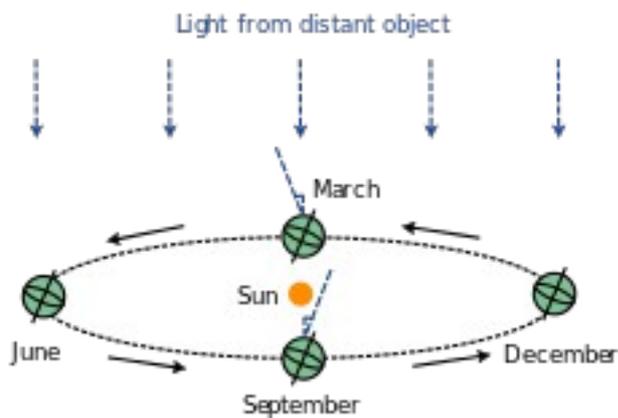
Pour ces raisons, j'ai donc imaginé une méthode alternative à celle de Bradley: elle se base sur la mesure de la position du pôle céleste apparent et son mouvement au cours de l'année.

Pour une nuit et un lieu d'observation donnés un premier observateur placé sur une Terre semi-fixe (pas de rotation autour du Soleil, seulement une rotation de la Terre sur elle-même) et sans atmosphère verrait les étoiles tourner autour d'un point fixe dans le ciel : le pôle céleste.

Si un second observateur est placé sur une Terre mobile (en orbite autour du Soleil et en rotation sur elle même), mais toujours sans atmosphère, le mouvement de translation de la Terre fera que les étoiles ne seront plus exactement aux mêmes endroits dans le ciel que pour le premier observateur. Au cours de l'année, la Terre décrivant un cercle autour du Soleil, les étoiles décriront des petits cercles dans le ciel. Le rayon de ces cercles dépend de la vitesse de la Terre le long de son orbite (et de la position de l'étoile par rapport au plan de l'orbite de la Terre). Pour cet observateur, lié à la Terre et à son axe de rotation passant par les pôles géographiques, le pôle céleste va donc lui aussi se décrire un petit cercle au cours de l'année.

Pour un troisième observateur placé sur une Terre mobile et avec une atmosphère, l'observation sera semblable à celle du second observateur mais entachée d'un décalage perpendiculaire à l'horizon nord. L'amplitude de ce décalage est variable en fonction de la latitude de l'observateur ainsi que des conditions météorologiques au moment de l'observation (principalement température et pression). Pour cet observateur, le pôle céleste va décrire le même petit cercle que pour le second observateur, mais en plus, la mesure sera toujours déplacée d'une quantité variable vers le haut par rapport à l'horizon.

En fait, les objets ne vont pas décrire des petits cercles au cours de l'année, mais, en règle générale, des petites ellipses. Ceci s'explique par le fait que seule la composante de la vitesse de déplacement de la Terre perpendiculairement à la direction Terre-Etoile entre en compte dans l'aberration de la lumière, comme l'indique le schéma ci-dessous :



## Principe de réalisation des mesures

La détermination du pôle céleste apparent est assez simple : il suffit d'observer avec un instrument fixe dans la direction du pôle pendant un certain temps (disons 1 heure) et d'estimer la position du centre commun de rotation des étoiles du champ. Pour ce faire, on prend 3 images : 1 à  $T_0$ , une seconde à  $T_0+10$  minutes et une 3ème à  $T_0+1$  heure. L'analyse de ces images permettra de déterminer de façon assez précise la position du pôle céleste apparent pour le jour en question. Cette méthode d'observation présente plusieurs avantages :

- il n'est pas nécessaire d'avoir un télescope fixe pendant toute la durée de l'expérience
- le pointage n'a pas besoin d'être précis (il faut en gros toujours avoir la région du pôle dans le champ)
- pas besoin de monture précise car les observations se font moteur à l'arrêt
- pas besoin de prise de vue à très haute résolution (un échantillonnage de l'ordre de la seconde / pixel est amplement suffisant). Un champ de l'ordre du degré est parfait
- il est possible de changer de télescope / caméra en cours d'expérience (d'année)
- chaque observation dure environ 1 heure et peut être effectuée au crépuscule
- la présence de nombreuses étoiles permet d'améliorer la qualité de la mesure

En revanche, la méthode ne nous affranchit pas de l'interférence due à la réfraction atmosphérique. Pour la corriger, il faut :

- avoir connaissance de la date et l'heure des prises de vue (date/heure de création des fichiers)
- noter les conditions de température et pression (en fait, les variations de ces paramètres ont une influence de second ordre seulement sur la réfraction atmosphérique. Si l'on n'est dans l'impossibilité d'avoir accès à ces informations, on pourra soit faire appel à un site internet de météorologie qui conserve ces informations, soit estimer une réfraction standard identique pour toutes les nuits de l'année)

## Réalisation pratique : prises de vues

Pour cette expérience, j'ai utilisé un télescope Takahashi Epsilon 160ED et un choix de caméras : ASI 1600MM, ASI 294MC et Moravian C1x26000. Ces 3 caméras offrent des champs et des échantillonnages différents. Si le premier paramètre est sans grande importance, il est facile de prendre en compte le second pour normaliser les observations.

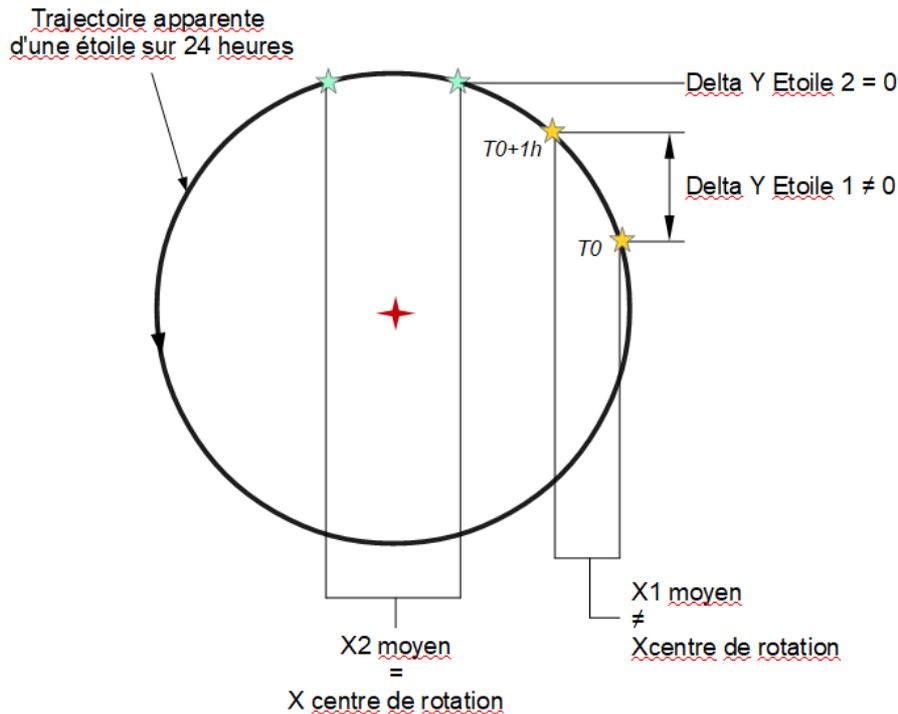


Trois prises de vue donc pour chaque nuit d'observation, avec des poses assez courtes (5 secondes) afin de ne pas avoir de trainée même sur les étoiles en bord de champ. On superpose les images d'une même nuit pour obtenir des images telles que celle ci-dessous :

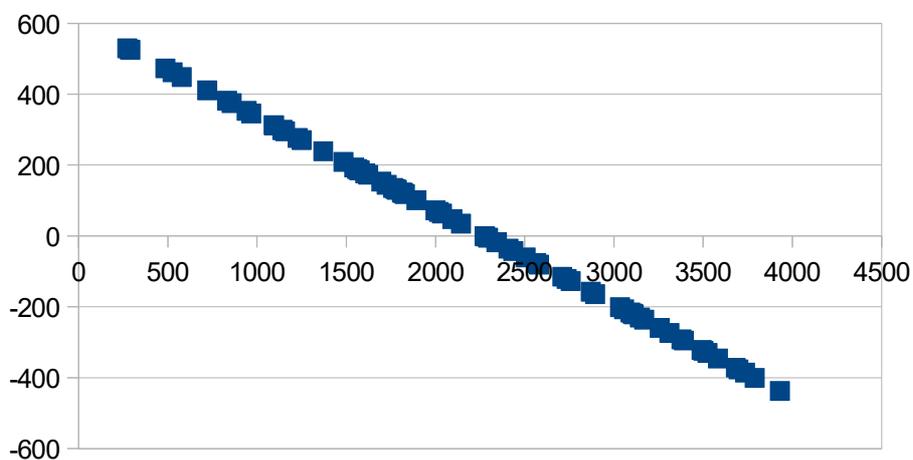


### Analyse des images

J'ai ensuite utilisé PixInsight (fonction Dynamic PSF) pour mesurer précisément la position du centre de rotation pour un grand nombre d'étoiles (environ une soixantaine pour chaque nuit). Pour ce faire, j'ai mesuré la position en pixelX /pixelY d'étoiles à T0 et T0+1heure. La position à T0+10min aide à bien repérer les couples T0/T0+1h et sert aussi de détrompeur pour le sens du mouvement.



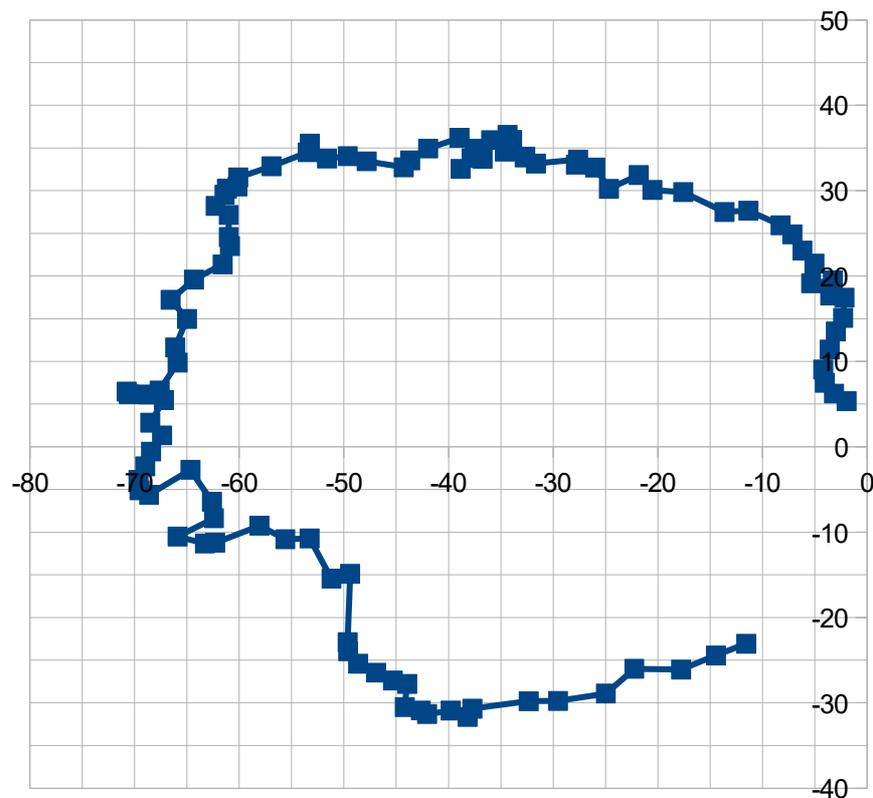
Les positions en X/Y sont alors reportées dans un tableur qui trace les courbes DeltaX/Y et DeltaY/X pour la soixantaine de couples d'étoiles. Ces courbes sont en fait des droites. Le point de croisement avec l'axe des abscisses fournit les coordonnées du centre commun de rotation (voir le schéma ci-dessous).



Pour une nuit donnée, cette analyse fournit la position pixelX/pixelY du pôle céleste apparent dans l'image de la nuit. Il faut alors reporter cette mesure dans une image de référence (celle de la première nuit par exemple) afin d'estimer le mouvement d'une nuit sur l'autre. Pour ce faire, je fais une petite conversion géométrique dans un tableur en repérant 3 étoiles de référence entre l'image de la nuit et l'image de référence ce qui permet de replacer le pôle céleste de la nuit dans l'image de référence.

### Premier résultat

Cette méthode, appliquée au cours d'une année entière (112 mesures) donne un premier résultat, comme indiqué sur le schéma ci-dessous (axes en seconde d'arc).



Ce résultat présente deux défauts :

- les mesures sont entachées d'un bruit de mesure important. J'y ai remédié partiellement en faisant une moyenne roulante de plusieurs mesures.
- L'effet de la réfraction atmosphérique n'est pas encore pris en compte

### Correction de la réfraction atmosphérique

Comme indiqué plus haut, la réfraction est caractérisée par une amplitude variable mais par une direction fixe dans le repère Alt-Az de l'observateur.

La valeur de l'amplitude est donnée de façon empirique par différentes formules. J'ai adopté la formule suivante :

$$R = 3600 * (21,5 * \text{Pression} * \text{Cot}(\text{Altitude})) / (273 + \text{Température})$$

où la pression est exprimée en mm de mercure et la température en °C. L'altitude est la hauteur de l'objet sur l'horizon. R est en seconde d'arc

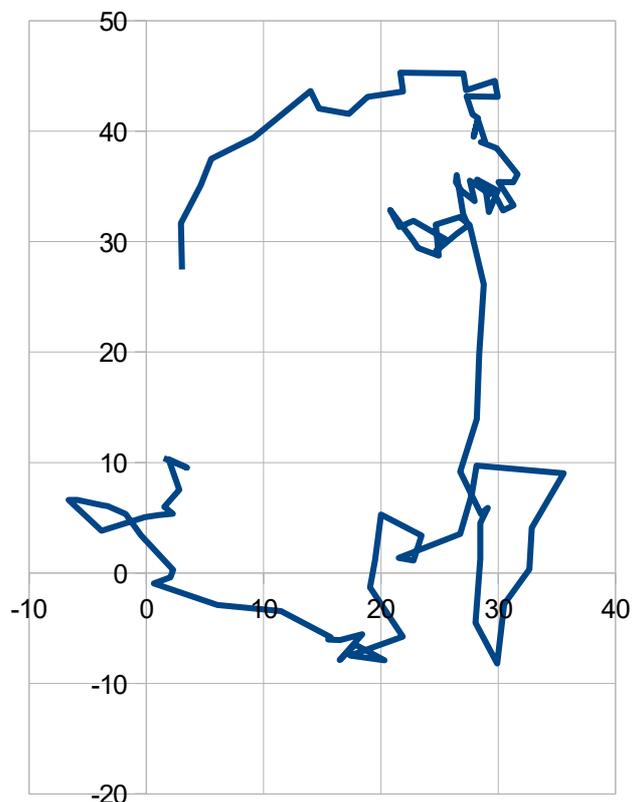
On peut voir que, sur un champ de l'ordre du degré au niveau de la Polaire, la différence de réfraction entre le haut et le bas l'image est de l'ordre de 1 pixel avec un échantillonnage d'environ 1,5"/pixel, ce qui veut dire que les étoiles décrivent presque des cercles et non des patatoïdes autour du pôle (bonne nouvelle... mais on le savait déjà!).

Dans mes conditions d'observation, au cours de l'année, dans la direction du pôle céleste, la réfraction a varié entre 52,7" et 58,7". Rappelons que la réfraction a pour effet de « lever » les objets vers le haut.

Reste donc à traiter le problème de l'orientation du déplacement qui est fixe dans le système Alt-Az mais donc variable si l'on se réfère au fond du ciel. Dans la méthode de réduction des images, je repositionne le pôle apparent de chaque nuit dans l'image de référence. Il suffit donc de déterminer l'angle de l'horizon dans cette image de référence pour chaque nuit d'observation. Pour ce faire, il suffit d'estimer l'angle de l'horizon lors de la première nuit (nuit de référence) et de calculer le nombre de jours sidéraux entre les deux dates d'observation. Un nombre entier donnera la même orientation pour l'horizon, une fraction de jour sidéral donnera pour l'horizon une rotation dans le sens inverse de la rotation céleste. On pourra alors calculer, dans l'image de référence le vecteur de déplacement du pôle apparent.

### Résultat corrigé de la réfraction

En appliquant cette méthode, on obtient cette courbe pour le déplacement du pôle céleste apparent :



*Les axes sont gradués en secondes d'arc.*

## Estimation de la vitesse de la Terre

Même en appliquant une moyenne roulante, les mesures sont assez bruitées. Le mouvement du pôle est affecté principalement par :

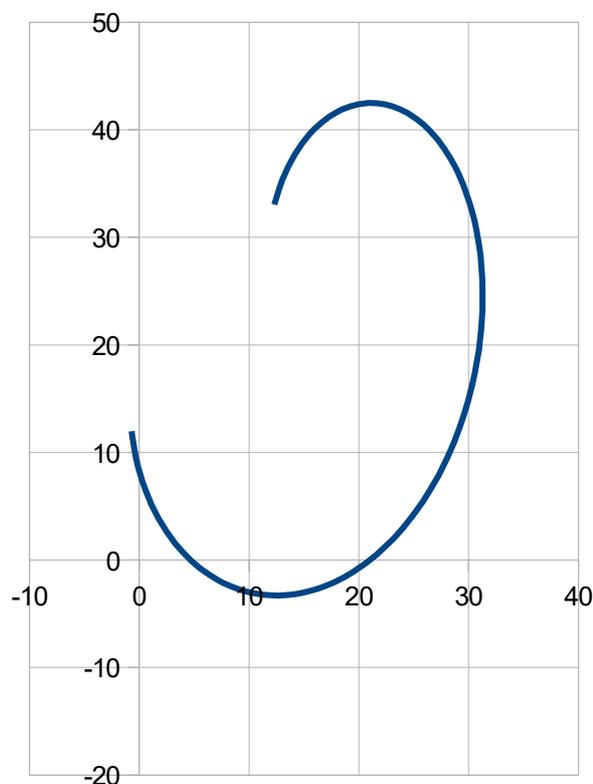
- le mouvement de la Terre autour du Soleil que l'on cherche à quantifier
- le mouvement de précession de l'axe de rotation de la Terre

Le mouvement de nutation est, quant à lui d'un ordre de grandeur inférieur et sa période est d'environ 18 ans, je l'ai donc ignoré au vu du bruit des mesures.

Le mouvement de précession est un mouvement le long d'un cercle de rayon important sur la voute céleste et selon une période longue (>50,000 années). Je le considère donc comme un simple mouvement linéaire sur une année.

Le mouvement du pôle se résume donc, avec ces hypothèses, à un mouvement elliptique sur une année sidérale + une translation constante : c'est pour cela que la courbe ne se « referme pas » sur la période de mes observations.

La réduction des données de mesure fait aussi entrer en ligne de compte des angles et des phases propres aux conditions et aux dates d'observation. Sans rentrer dans les détails, il est possible de s'en affranchir et d'estimer le grand axe de l'ellipse par la méthode des moindres carrés. La méthode permet d'obtenir la courbe de meilleur fit suivante :



Grâce aux paramètres de cette courbe, on peut déduire le grand axe de l'ellipse comme étant de 39" : c'est donc le double de l'aberration de la lumière pour la vitesse de la Terre (1 fois dans un sens + 1 fois dans l'autre sens, 6 mois plus tard). On en déduit donc la vitesse de translation correspondante grâce à l'équation :

$$V = \text{aberration} \times \text{vitesse de la lumière}$$

avec aberration =  $39''/2 = 9,45 \times 10^{-5}$  radian, et donc on obtient :

$$V_{\text{Terre}} = \mathbf{28,4 \text{ km/s}} \quad \text{le long de son orbite}$$

## Principe de mesure de l'année sidérale

La dernière étape du projet consiste à mesurer la durée de l'année sidérale.

Le principe de cette mesure est simple : au cours d'une année sidérale, l'ensemble de la voûte céleste fait un tour complet par rapport à un observateur qui regarde le ciel toujours à la même heure (solaire, c'est à dire celle donnée par une montre). Étant donné les sens de rotation, l'année sidérale compte une journée de plus que l'année solaire car pour notre observateur, la voûte céleste aura fait un tour complet de plus que le Soleil durant cette période.

Une autre façon de voir le même phénomène est d'observer qu'une étoile va faire un tour complet autour de l'observateur en un peu moins de 24 heures, qui est le temps moyen que le Soleil met à tourner apparemment autour de l'observateur. L'étoile va donc, chaque jour, prendre un peu d'avance par rapport au Soleil. Au fur et à mesure, ces avances vont finir par s'accumuler pour donner un jour complet : c'est la durée de ce phénomène qui donne la durée de l'année sidérale.

## Réalisation de la mesure de l'année sidérale

François, du club Ciel d'Aunis de La Rochelle, a réalisé cette mesure. Pour cela, lors de la première nuit d'observation, il a pointé une étoile à la frontière des constellations de l'Eridan et de la Baleine, sans suivi par la monture. Grâce à une caméra ASI294MC, il a réalisé une première vidéo du transit de l'étoile dans le champ de sa lunette 102/715. Sur chaque image, l'heure précise de prise de vue est incrustée.

Sans bouger le télescope, François a réalisé la même observation à deux autres reprises, à 3 et 4 jours d'intervalle.

Pour la première observation, en date du 21 janvier 2022, l'heure de passage de l'étoile au centre du champ était de 18h 21min 4,828s TU

Le 24 janvier, l'heure de passage était de 18h 9min 17,811s TU

Enfin, le 25 janvier : 18h 5min 20,912s TU

Ces mesures permettent donc d'estimer le jour sidéral à 23h 56min 4,021s (pour une valeur admise de 23h 56min 4,091s, soit un écart de  $7/100^{\text{ème}}$  de seconde), et donc l'année sidérale à 366,134 jours sidéraux.

## Estimation de l'Unité Astronomique

Grâce aux résultats précédents, il est donc possible d'estimer la valeur de l'Unité Astronomique. En effet, la circonférence de l'orbite terrestre (supposée circulaire) est de  $V * A$ , où  $V$  est la vitesse de la Terre le long de son orbite et  $A$  la durée de l'année. On obtient alors :

$$\begin{aligned}\text{Circonférence} &= 28,4 \text{ km/s} * 366,134 \text{ jours sidéraux} * 86164 \text{ seconde/jour sidéral} \\ &= 895,9 \text{ millions de km}\end{aligned}$$

et donc l'UA obtenue en divisant la circonférence par  $2\pi$  :

<b>1 UA = 142,6 millions de km</b>
------------------------------------

Cette valeur est à comparer à la valeur admise de 149,6 millions de km, soit une erreur de 5%