

# Éléments d'astrométrie moderne

Y a n n D U C H E M I N

Version 2

Credit photographique : Yann Duchemin



Ce document a été réalisé en partie avec la collaboration de :  
l'Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Ephémérides  
l'Observatoire de Haute-Provence / CNRS, France

*Je dédie mon travail à mon fils, et souhaite que les générations futures puissent vivre pleinement sur la planète Terre.*



Contact :

[yann.duchemin@free.fr](mailto:yann.duchemin@free.fr)  
<http://yann.duchemin.free.fr/>

Version 2 [27 mai 2008]

Révision 2.1 [7 janvier 2010]



---

*Exploitation :*

© 2006 - 2010 Yann DUCHEMIN

**Reproduction et modification soumise à autorisations selon les termes définis par le code de la propriété intellectuelle**

*Toute reproduction intégrale ou partielle de ce document sans le consentement écrit de l'auteur, ou autres ayant droits, est illicite et constitue une contrefaçon.*



*Je remercie particulièrement :*

M<sup>r</sup> Jean-Eudes ARLOT, Valery LAINEY de l'Institut de Mécanique Céleste et de Calculs des Éphémérides

M<sup>r</sup> Fabio CAVICCHIO pour m'avoir fourni gracieusement son logiciel ASTROART et ses mises à jour

M<sup>r</sup> Herbert RAAB pour m'avoir fourni gracieusement son logiciel ASTROMETRICA

M<sup>r</sup> Cyril CAVADORE pour son support avancé concernant son logiciel PRISM

M<sup>r</sup> Norbert ZACHARIAS de l'U.S. Naval Observatory pour le catalogue UCAC-2 et UCAC-3

*Ainsi que tous ceux avec qui je peux échanger jours après jours et qui se reconnaîtrons...*

*A ma femme et mon fils, mes « étoiles-guides ».*



## Résumé

---

L'astrométrie est l'activité de l'astronomie dont l'objectif principal est d'étudier la position des objets célestes, leur distance et leurs mouvements tels qu'ils sont perçus par un observateur. L'astrométrie est une discipline très ancienne, puisque les premiers catalogues d'étoiles remonteraient au II<sup>ème</sup> siècle. Pour les passionnés du ciel nocturne, cela permet un repérage au fil du temps. De manière générale, ce domaine fondamental apporte de nombreuses réponses dans la compréhension de la mécanique céleste et donc des travaux essentiels pour la dynamique stellaire. D'un point de vue civil, la mesure du temps découle d'observations et des mesures de haute précision qui sont faites dans un cadre de référence ordonné par l'astrométrie.

L'évolution des moyens d'observation et leur démocratisation rend désormais possible la réalisation de travaux variés en vue d'un résultat de qualité. L'informatique apporte en ce sens un ensemble de solutions visant à simplifier et fiabiliser un travail souvent long et délicat.

Ce document a pour principal objectif d'exposer les techniques actuellement employées pour effectuer des réductions astrométriques, qu'importe l'objet (astéroïdes, comètes, planètes, etc.) , tout en ouvrant les voies d'approfondissements, pour le lecteur curieux aux problématiques complexes qui sont rencontrées. Toutefois, l'ensemble des thèmes abordés est une synthèse que l'*astrométriste* averti conservera comme référence. L'amateur pourra alors comparer ses propres observations aux différents modèles théoriques mis au point par les principaux instituts du globe, sans pour autant s'encombrer des considérations mathématiques.

L'étape suivante, sans doute plus audacieuse, permet d'envisager des observations d'un réel intérêt scientifique en combinant, pourquoi pas astrométrie/photométrie/spectrométrie ? Pour ce faire, il est dans un premier temps recommandé de parcourir les diverses publications scientifiques pour prendre connaissance des différentes voies de recherches en cours et ainsi orienter ses soirées d'observations. Une seconde étape sera de travailler en collaboration directe avec des instituts, des observatoires, associations ou autre afin d'organiser véritablement les recherches.



## Abstract

---

Astrometry is the branch of astronomy whose principal objective is to study the position of the celestial object, their distance and their movements as they are perceived by an observer. Astrometry is a very old discipline, the first stars catalog would go up around the II<sup>nd</sup> century. For all which are crazy about night sky, that allows a mark among the time. In a general way, this fundamental field brings many answers in the comprehension of the celestial mechanics and thus of an essential work for stellar dynamics. From a civil point of view, the measurement of time arises from observations and measurements highly detailed which are made within a framework of reference ordered by astrometry.

The evolution of the setups for the observations and their democratization to make from now on possible the realization of diversified works for a result of quality. Data processing brings in this direction a set of solutions aiming to simplify and make reliable, an often long and delicate work.

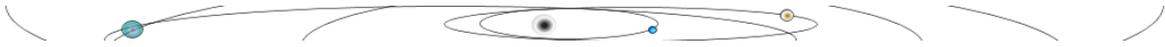
This document has for main goal to expose a couple of techniques currently employed to carry out astrometrical reductions, for some objects (asteroids, comets, planets, etc), while opening the ways of studying, for the curious reader, the complex problems which are encounter. However, the whole of the topics approached is a synthesis to be keep like a tool of informed measurer. The amateur will be able to compare his own observations with the various models developed by the majors institutes in the world, without to be bored with mathematical contributions.

The next stage, undoubtedly more daring, make it possible to consider observations with a real scientific interest while combining, why not astrometry/photometry/spectrometry? With this objective, it is initially recommended to read the various scientific publications to take note of the various ways of research in progress and thus to direct its evenings of observations. A second way will be to work in direct collaboration with institutes, observatories, associations or other in order to organize truly research.



# Table des Matières

<b>1. Introduction.....</b>	<b>7</b>
<b>2. Mise en situation.....</b>	<b>8</b>
<b>3. Aspect technique.....</b>	<b>8</b>
3.1. Capteurs C.C.D.....	9
3.2. Détermination du centre d'une source ponctuelle.....	12
3.3. Réduction astrométrique.....	14
<b>4. Étude des catalogues.....</b>	<b>15</b>
4.1. UCAC2 – Catalogue USNO CCD Version 2.....	18
4.2. USNO-B1.0 – Catalogue USNO.....	19
4.3. GSC-ACT.....	20
4.4. Comment choisir un catalogue.....	21
<b>5. Étude des Logiciels.....</b>	<b>22</b>
5.1. Tests avancés et propositions de solutions.....	22
5.2. Mesures comparées.....	24
5.3. Notes à propos de la précision.....	27
5.4. Mode Automatique ou Manuel ?.....	28
5.4.1. Exemple avec PRISM en étalonnage manuel.....	28
5.5. Astroart.....	30
5.6. Astrometrica.....	31
5.7. Prism.....	32
<b>6. Plan d'observations.....</b>	<b>33</b>
6.1. Démarche globale.....	34
6.2. Analyse rapide.....	35
6.3. Notions de photométrie.....	35
<b>7. Préparation des mesures.....</b>	<b>36</b>
<b>8. Méthodologie d'archivage des résultats.....</b>	<b>36</b>
<b>9. Analyses.....</b>	<b>37</b>
9.1. Estimations des mesures.....	37
9.2. Qualification logicielle.....	38
9.3. Analyse des résultats.....	39
<b>10. Aller plus loin.....</b>	<b>40</b>
10.1. Effets astrométriques faibles.....	40
10.1.1. Effet de parallaxe.....	40
10.1.2. Effet relativiste .....	41
10.1.3. Effet de marées.....	42
10.1.4. Effets atmosphériques.....	42
10.2. Astrométrie d'occultations.....	43
10.2.1. Occultations/éclipses.....	43
10.2.2. Phénomènes mutuels.....	43
<b>11. Conclusion.....</b>	<b>44</b>
<b>Glossaire.....</b>	<b>45</b>



## 1. Introduction

L'opportunité m'a été donnée de collaborer avec l'Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides<sup>(1)</sup> afin d'apporter quelques éléments à l'étude des satellites lointains de Jupiter et de Saturne.

Lors de mes observations, comme tous les astronomes amateurs j'utilise les coordonnées de positions relatives<sup>(2)</sup> pour trouver les objets que je souhaite observer. Il n'est pas uniquement question de la position des étoiles dont on estime la position par rapport à une date de référence, ce qui constitue les catalogues, mon objectif consiste à déterminer la position relative d'objets dynamiques (astéroïdes, satellites, planètes,...). Le travail que j'ai effectué à l'IMCCE m'a présenté ce domaine dans lequel les amateurs sont trop peu présents, ainsi par le biais de ce document, je vais vous en présenter les principaux concepts.

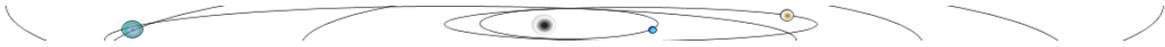
La réduction astrométrique<sup>(3)</sup> s'apparente donc à la mesure de précision d'objets célestes projetés sur une sphère imaginaire : la *voûte céleste*. La mesure des objets connus, c'est à dire pour lesquels au moins une théorie permet de prévoir leur position à une date donnée de manière plus ou moins précise, a pour objectifs l'approfondissement de notre connaissance à propos de l'univers, de son fonctionnement et de ses constituants. Ces études sont une des activités réalisées par l'IMCCE, en particulier le GAP (Groupe d'Astrométrie et de Planétologie). En effet, les études des caractéristiques physiques et dynamiques de ce type d'objets de notre système solaire sont basées sur l'observation et l'analyse à long terme. Ainsi de part la répétition des observations, et par un recoupement méticuleux des données acquises, les mesures sont plus précises et par conséquent il devient entre autre possible d'en améliorer les éphémérides. Certains corps ont un mouvement assez lent, ce qui nécessite de les observer régulièrement pendant plusieurs années, afin d'avoir une idée de la déformation au cours du temps, de leur orbite respective. C'est un travail sur la durée qui mobilise des techniciens d'observatoires, des observateurs et des ingénieurs/chercheurs, afin d'accumuler un grand nombre de données et de les traiter. **C'est pourquoi la communauté des astronomes amateurs peut apporter une collaboration significative dans ce domaine.**

*Ce document a pour objectif d'apporter les éléments essentiels d'une démarche scientifique pour le traitement/analyse des données issues de nouvelles images ou des campagnes d'observations passées. Néanmoins, il est nécessaire d'avoir les notions de bases en utilisation instrumentale (télescope ou lunette et acquisition numérique) afin de comprendre la démarche et de participer activement aux recherches. Il est important de préciser qu'il n'y a pas de besoins spécifiques que l'amateur n'aurait déjà, ce qui rend l'investissement généralement minime.*

(1) <http://www.imcce.fr>

(2) Cette notion sera explicitée dans la section [4.]

(3) Cf. glossaire



## 2. Mise en situation

Le temps des plaques photographiques et des règles graduées est révolu! Ces méthodes fonctionnaient plutôt bien, mais l'archivage était délicat, le travail fastidieux en terme de calculs et de mesures! Aujourd'hui, pour mener à bien une réduction astrométrique, diverses méthodes ont été intégrées dans des logiciels. Le principe est généralement le même, nous utilisons « des bases de données d'étoiles » qui recensent ces objets célestes dans un système de coordonnées particulier, ce sont les catalogues évoqués en introduction. La première étape consiste donc à utiliser un couple logiciel/catalogue. Le principe de mesure des images se fait en déterminant une échelle de conversion entre la position de l'objet dans l'image et sa projection dans un repère. La comparaison se fait par rapport à des éphémérides déjà conçues par des instituts spécialisés tel l'IMCCE, le Jet Propulsion Laboratory (JPL), ou encore le Minor Planet Center (MPC). Ensuite, les différences obtenues entre les éphémérides existantes (calculs) et les mesures (observations) devront être analysées. L'amoncellement des données rend la tâche ardue, l'idéal serait de développer un logiciel de traitement automatique des images acquises, comme cela existe déjà pour les grands spectrographes (qui parfois même se fait en temps réel), des projets sont en cours mais ne sont pas encore à notre disposition.

N'ayant aucun parti pris pour les logiciels disponibles auprès du public, je vais me limiter à ceux que j'ai pu utiliser, vous ferez votre propre choix en fonction de vos aspirations et budget. Toutefois une étude, tant qualitative que quantitative, devra permettre de choisir le couple logiciel et catalogue offrant une précision de mesure convenable par rapport aux objectifs qui sont d'*étudier la dynamique d'objets de notre système solaire*.

## 3. Aspect technique

L'astrométrie doit faire face à un grand nombre de contraintes qui peuvent être d'ordres optiques, mécaniques, et bien entendu liées aux problèmes atmosphériques. Les amateurs ont à disposition du matériel de plus en plus performant et dont le coût reste raisonnable, ainsi les images issues d'un capteur numérique, plus généralement un CCD (Charge-Coupled Devices) sont courantes et se prêtent exactement à cet exercice. La connaissance précise du lieu de l'observation, de la date précise, ainsi qu'une bonne approximation du champ visé (objet cible) par l'image sont indispensables. Il reste à déterminer, à l'aide des éphémérides à disposition via le réseau internet, quelles étoiles vont pouvoir servir de références aux calculs. Nous devons connaître les coordonnées du centre de l'image afin d'orienter le logiciel dans la recherche du champ à étudier, et dans le cas d'une réduction manuelle, il faut choisir un nombre d'étoiles réparties équitablement sur l'ensemble de l'image ou à défaut autour de la cible.

⇒ La démarche complète fait l'objet d'un schéma synoptique en annexe.

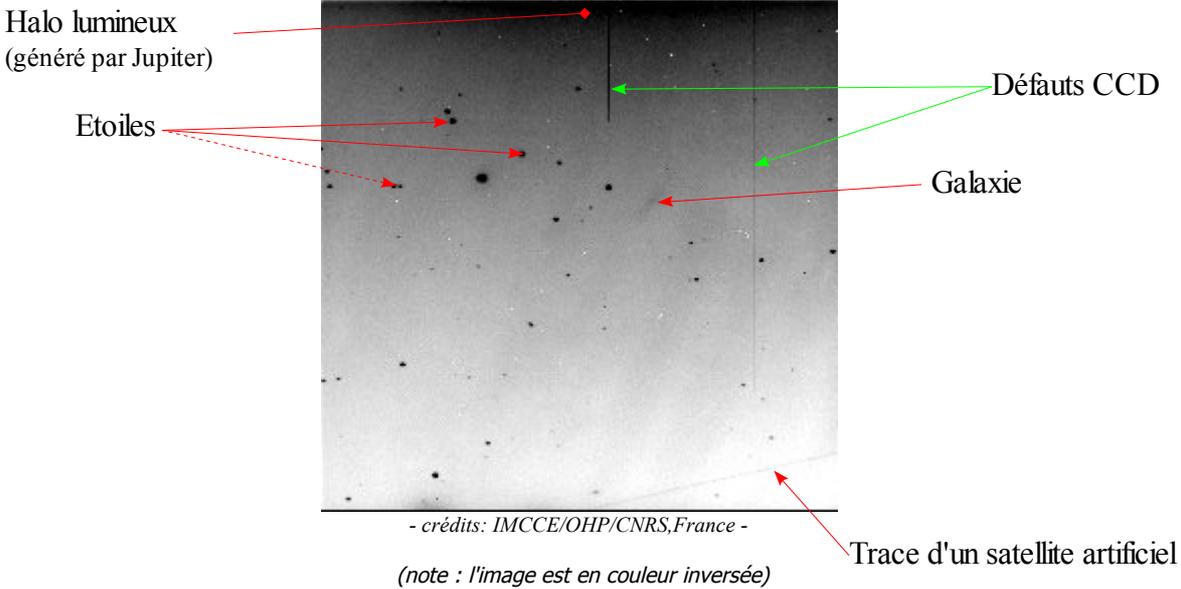


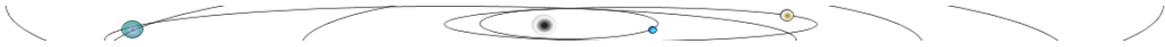
### 3.1. Capteurs C.C.D.

Un CCD est un composant électronique composé de minuscules récepteurs à semi-conducteur (capacités) appelés pixels. Chaque pixel « enregistre » les photons qui arrivent sur lui, sous la forme d'une charge électrique. Ces capteurs ont pour rôle de convertir une intensité lumineuse liée à l'arrivée des photons sur les capacités, en un niveau électrique proportionnel (tension). Un CCD comporte aussi des circuits intégrés qui permettent de lire le nombre de charges de chaque pixel. Le niveau de saturation définit les valeurs que peut prendre un pixel. Dans les exemples de ce document, du fait du capteur utilisé par l'observatoire de Haute-Provence, il pourra prendre une valeur codée sur 16 bits. Un point de couleur noir aura la valeur "0" quand il n'a détecté aucun photon. Un point blanc pourra prendre une valeur comprise entre 1 et 65535. Un point blanc sera saturé si sa valeur est 65535, alors on ne sait plus déterminer la quantité de photons reçues. Les valeurs intermédiaires sont les seuils exploitables, on parle de dynamique de l'image.

Malheureusement tout n'est pas si simple, ni l'optique ni l'électronique ne sont parfaites et l'on se rend rapidement compte qu'une image doit être « nettoyée » avant son exploitation finale. En effet, le signal issu du procédé décrit ci-dessus, est appelé image brute. Une image brute peut subir un nettoyage (une préparation), c'est un processus qualifié de pré-traitement que nous allons expliquer ci-après. Il ne faut pas confondre ces pré-traitements avec les traitements liés à l'esthétique (procédés de rendus : flou, déconvolution, colorimétrie par exemples). Nous n'appliquerons pas de traitements aux images afin de ne pas fausser les résultats (**un filtre non linéaire engendre des modifications astrométriques et photométriques**).

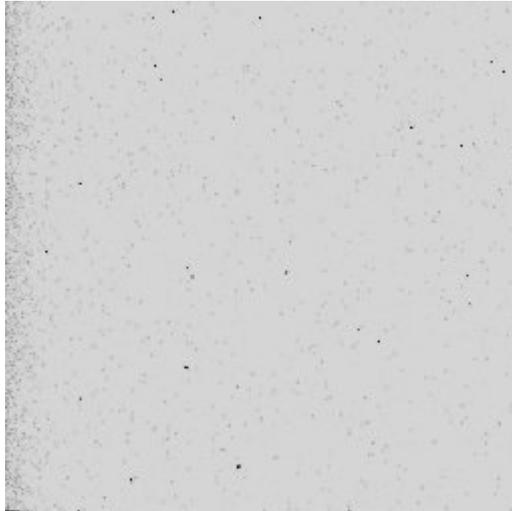
Une image brute provient directement du sujet visé : c'est le signal utile, la cible. On ne considère pas ici les problèmes atmosphériques tels que la pollution lumineuse (qui fausse le niveau du fond de ciel), ou les nuages par exemple.





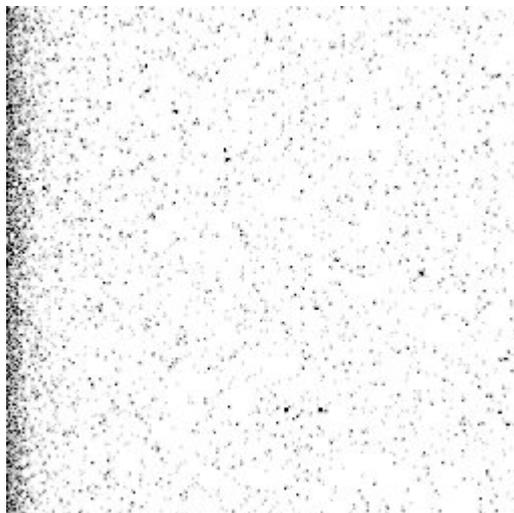
La réalisation d'une prise de vue numérique passe par l'exploitation de différents signaux :

1 – **Le signal d'offset** : pour obtenir ce signal, on effectue un temps de pose très court dans le noir (obturateur fermé). Ce signal a pour but de connaître la charge électrique de chacun des pixels du capteur CCD quand il n'a pas encore été exposé à la lumière, la tension résiduelle liée à la pureté des composants.

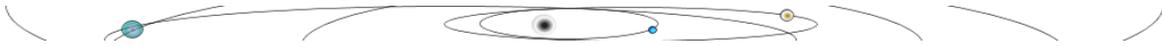


- crédits: IMCCE/OHP/CNRS,France -

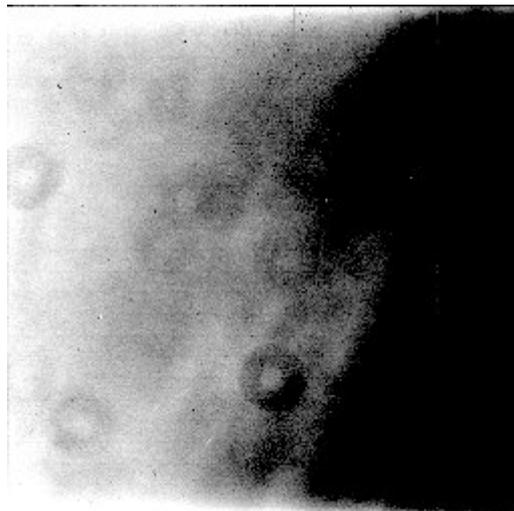
2 – **Le signal thermique** : il est dû aux *mouvements browniens* des atomes dans le récepteur. L'information relative à ce signal parasite se présente pour chaque pixel en créant un "bruit" qui croît proportionnellement au temps de pose et en fonction de la température ambiante. A ne pas confondre avec le bruit de lecture qui provient de la conversion analogique/numérique (et de l'électronique globale). La méthode pour isoler ces parasites consiste à réaliser un temps de pose équivalent à la pose du signal souhaité (photo qui sera prise finalement), mais dans l'obscurité totale (obturateur fermé). La répartition de ces charges parasites à la surface du capteur n'est pas prévisible d'une autre manière, puisqu'elle dépend des impuretés présentes dans le dopage des composants du capteur. Par cette méthode, on obtient un signal d'obscurité qui contient également le signal d'offset.



- crédits: IMCCE/OHP/CNRS,France -



3 – **La plage de lumière uniforme** : le dernier problème, lié à la conception de ces fabuleux circuits électroniques, est la non-uniformité de réponse du capteur. Selon les lois de la physique des composants, chacun des pixels va se comporter d'une manière qui lui est propre : chaque pixel a sa propre sensibilité. Pour un flux donné de photons, la lecture de chacun des pixels indiquera un niveau en sortie différent. Ceci a pour conséquence de décaler le niveau moyen (seuil d'intensité) pour différentes zones de l'image, et par la même occasion, ceci modifie l'interprétation des mesures astrométriques que nous allons réaliser. Pour obtenir une carte de correction, il est nécessaire d'effectuer une pose, d'un temps équivalent à celle du signal utile, sur une lumière dite uniforme. Par exemple, il est possible de réaliser une prise de vue d'une zone de ciel crépusculaire, où l'on suppose l'ensemble des points équivalents en intensité. Chaque pixel du capteur reçoit donc le même flux lumineux. L'image obtenue, appelée plage de lumière uniforme (PLU), a un second avantage qui est d'éliminer les défauts de la chaîne optique (par exemple les poussières). Avant de l'utiliser sur les images finales, il est important de lui soustraire les images du signal d'offset et du signal thermique. Il ne restera plus qu'à diviser l'image brute, par cette image de champ uniforme.



- crédits: IMCCE/OHP/CNRS,France -

Le pré-traitement, souvent indispensable avant l'exploitation d'une photo numérique, se résume comme suit :

$$image\ traitée = \frac{image\ brute - signal\ thermique - signal\ d'\ offset}{PLU - (PLU - signal\ thermique) - signal\ d'\ offset}$$

Ces opérations étant purement arithmétiques, l'ensemble des logiciels étudiés peuvent réaliser ces opérations fastidieuses de manière très efficace. Toutefois, une attention particulière doit être portée afin de ne pas supprimer d'informations pertinentes.

On veillera à moyenner l'ensemble de ces différents signaux, ceci permettant d'améliorer significativement le rapport signal sur bruit avant leur application à l'image brute. Cette loi statistique est vérifiée puisque le bruit diminue avec la racine carrée du nombre d'images.



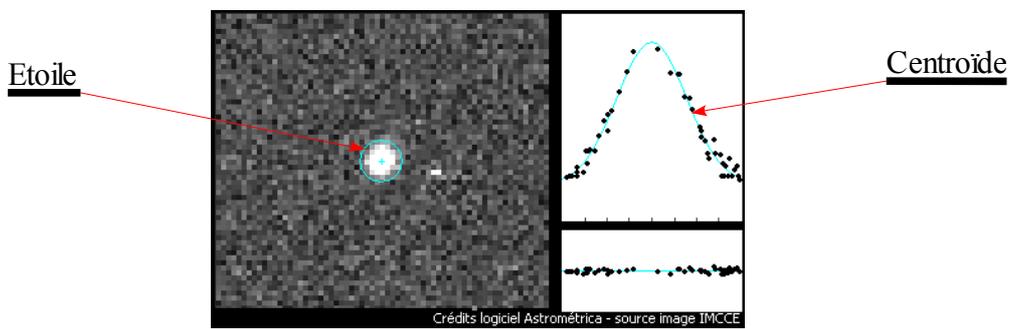
### 3.2. Détermination du centre d'une source ponctuelle

Le capteur CCD étant une matrice de pixels à deux dimensions  $x$  et  $y$ , il faut trouver très précisément la position des étoiles présentes dans l'image. Ces objets sont les seules références connues à l'aide des catalogues. Ce n'est seulement qu'après cette étape qu'il sera possible de passer des coordonnées en pixels,  $P(x,y)$  en coordonnées célestes, par exemple l'ascension droite (notée  $RA$  ou  $\alpha$ ) et la déclinaison (notée  $Dec$  ou  $\delta$ ). A la condition que la source de lumière initiant l'information sur le capteur soit ponctuelle, ce qui est le cas pour les étoiles quand le suivi est correct, les algorithmes utilisent généralement une méthode dite « Gaussienne ». Il faudra veiller à ne pas retenir d'étoiles dont le seuil est à la valeur maximale de la dynamique de l'image soit  $2^n$  (avec  $n$  le nombre de bits du convertisseur analogique/numérique).

Ce profil particulier, résultant de la modélisation d'une étoile, est caractéristique de la distribution surfacique de la lumière sur le capteur. Cela suit la densité de probabilité d'une loi normale qui est donnée par :

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{\left(\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)} \text{ avec } \sigma^2 \text{ comme paramètre de variance,}$$

et  $\mu$  la moyenne (ou espérance)



- Exemple de centroïde d'étoile -

Remarque : Il est possible à partir de cette analyse d'obtenir un paramètre particulier la  $FWHM$ , qui signifie : « Full Width Half Maximum », ou largeur à mi-hauteur. La forme est également une courbe en cloche exprimée par :

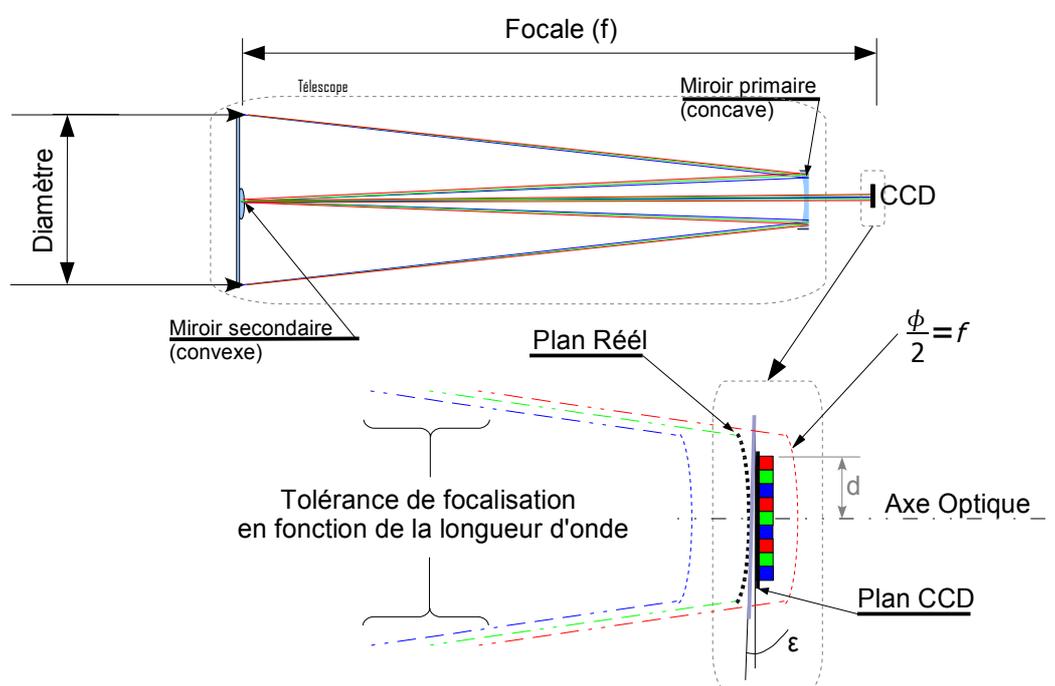
$$FWHM = 2\sigma \sqrt{2 \ln(2)}$$

Dans un cas optimal, on obtient des étoiles parfaitement rondes et contrastées et donc globalement une grande finesse d'image. Pourtant une détermination précise du photo-centre de l'image réclame un grand nombre de pixels éclairés et donc des images de qualité moyenne afin de ne pas avoir de pixels trop « francs », mais au contraire modérément étalés. Ceci dans le but d'améliorer le calcul du centroïde et donc d'améliorer statistiquement la position calculée, notion qui est détaillée en section [5.6.].



Si l'ajustement d'une gaussienne n'est pas réalisable, ce qui est souvent le cas si la source n'est pas ponctuelle (ovoïde), on procédera alors par un calcul du barycentre. Dans ce dernier cas, chaque pixel est alors associé à un « niveau de lumière » proportionnel à la résolution du convertisseur analogique/numérique.

Ces méthodes de détections vont nous permettre de trouver les étoiles dans l'image. A partir de cette étape il faudra examiner une par une l'ensemble des étoiles qui ont été reconnues de manière automatique. Ceci afin de les approuver comme « fiables », à savoir que ce sont les bons objets avec les bonnes coordonnées, avant de démarrer les calculs de transformations. Il est inutile de préciser que les images d'étoiles ne sont jamais parfaitement rondes puisqu'un certain nombre de paramètres déforme l'image. En plus de la turbulence atmosphérique, s'ajoutent les problèmes optiques :



*Dans ce schéma de la chaîne optique, nous pouvons remarquer qu'en fonction des différentes longueurs d'ondes, l'image ne va pas se former sur un même plan. Ceci constitue une difficulté supplémentaire pour trouver les étoiles. C'est pourquoi, l'image brute est souvent filtrée à sa source (Noir et blanc, Rouge, Vert ou Bleu) en fonction des caractéristiques physiques du capteur (sensibilité, épaisseur,...) utilisé pour améliorer la mise au point et la sensibilité pour une longueur d'onde donnée.*

D'autre part, la voûte céleste étant sphérique, son image dans le plan de focale l'est également. Dans notre cas, c'est un problème lié à la précision des mesures, puisque le capteur que nous utilisons est un plan. La courbure de champ d'un instrument s'évalue par le rayon (R) de la sphère où se forme l'image la plus nette. En partant de l'axe optique, le défaut de mise au point ( $\zeta$ ) à la distance  $d$  s'évalue par :

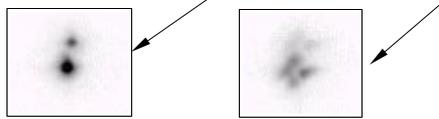
$$\zeta = \frac{d^2}{2R}$$

De plus, il est tout à fait vraisemblable que le capteur ne soit pas rigoureusement perpendiculaire à l'axe du télescope. On parle alors de défaut de perpendicularité d'angle «  $\epsilon$  ». Conjointement, cela crée une déformation géométrique (aberration) qu'il faudra prendre en compte pour obtenir des mesures de grande précision. Une image



est également déformée par le miroir qui est d'une qualité variable inhérente à sa fabrication et caractérisé, entre autre, par le front d'onde :  $\lambda/n$  avec  $n$  paramètre de diffraction et  $\lambda$  la longueur d'onde. On obtient alors d'une étoile, la tâche de diffraction également appelée tâche d'Airy<sup>(\*)</sup>.

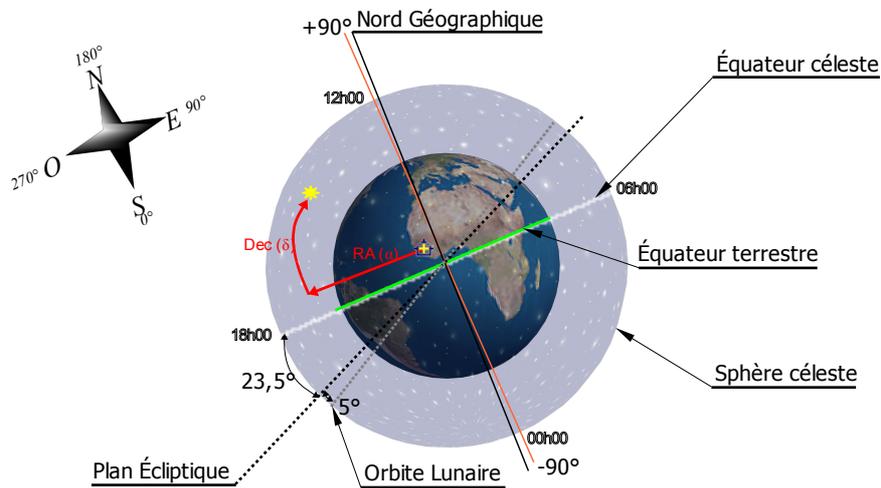
Par exemple, voici une étoile observée, dans des conditions idéales à gauche et moyennes à droite :



- Crédits photographiques C.BUJIL -

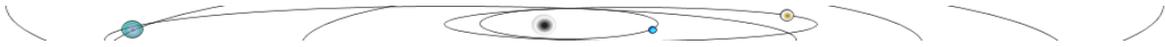
### 3.3. Réduction astrométrique

Notre but est de trouver la position d'un astre en fonction de la date et du lieu d'observation. Ceci sous entend d'utiliser un système de coordonnées astronomiques parfaitement défini, c'est généralement le *système équatorial* dans la sphère céleste. En d'autres termes, nous recherchons l'ascension droite et la déclinaison :



Une réduction astrométrique assistée par l'informatique considère deux plans. Le premier est tangent à la sphère céleste, « l'endroit » où se situe l'ensemble des objets visibles. Le second plan est la réalité observée. Il faut donc effectuer une transformation d'un plan à l'autre. Une transformation est représentée par une équation polynomiale dont les variables sont les coordonnées des astres dans chaque plan. Les constantes des polynômes définissent la transformation, et sont liées à l'image étudiée. Le terme « réduction » provient que l'on a de multiples références pour déterminer au final la position d'un seul objet. Nous nous intéressons ici qu'un à type particulier d'astrométrie qui présente l'avantage d'être réalisable par tous et dans un ordre de précision allant de 0,03 à 0,1 seconde d'arc. Il est possible d'obtenir une précision nettement supérieure lors de phénomènes d'occultations, mais les mesures sont beaucoup plus complexes et nécessitent de prendre en compte des effets perturbateurs très faibles (cf. section [10]).

Remarque : en astronomie les mesures célestes sont rapportées à des angles (projection), car nous n'avons aucun moyen simple d'apprécier les distances, que ce soit par rapport à l'observateur ou entre les corps observés.

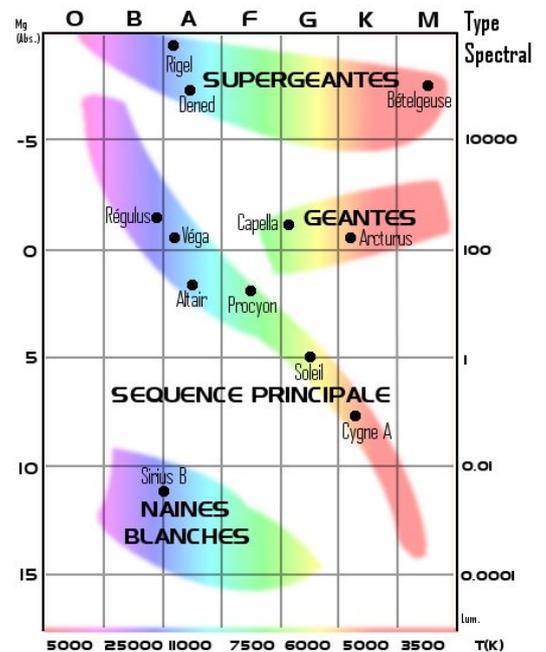


## 4. Étude des catalogues

La référence utilisée par l'Union Astronomique Internationale (UAI) est le ICRS pour International Celestial Reference System. En effet, à ce jour le seul moyen de déterminer une position dans l'espace est de choisir un point fixe; c'est d'ailleurs un réel problème pour l'exploration spatiale, puisque les sondes que nous envoyons sont en quelque sorte « téléguidées » depuis la Terre. On utilise comme origine pour ce système le barycentre de notre système solaire. Les directions des axes de ce repère sont données par des quasars (objets quasi-stellaires) lointains. Ces sources à hautes énergies ont fait l'objet d'un très grand nombre de mesures sur plusieurs années. Le résultat est une précision de l'ordre de la milliseconde d'arc (<1 mas).

De nombreux catalogues sont disponibles, ils sont réalisés par divers moyens terrestres ou satellitaires. La mise en oeuvre de ceux-ci est parfois longue, et nécessite de ce fait des corrections de coordonnées pour les étoiles ainsi mesurées. De plus, une étoile se caractérise par un ensemble de paramètres complexes comme par exemple leur magnitude apparente<sup>(\*)</sup> (en quelque sorte la façon dont elles brillent à nos yeux), leur âge, leur distance ou encore leur température. Ceci aboutit sur une classification qui peut être par exemple le schéma de Hertzsprung-Russell. De ce fait, nous pouvons les observer dans diverses longueurs d'ondes autres que le domaine du visible (pour l'œil humain de ~400 nm à ~700 nm). Ceci fait, que tous les catalogues n'ont pas le même nombre d'étoiles répertoriées. L'inventaire d'une telle quantité d'informations étant d'une extrême complexité, un ciblage existe, divers recoupements par filtrage en fonction de la longueur d'onde ( $\lambda$ ).

Certains catalogues, du fait qu'ils ne contiennent pas suffisamment d'étoiles, ou qu'ils soient clairement déconseillés (obsolètes), ne sont pas utilisables. Le choix des catalogues d'étoiles se fera en fonction de sa précision, et de la densité d'objets importante pour le champ considéré et de la longueur d'onde répertoriée (Le champ étant bien entendu la zone du ciel photographiée, et limitée par la petite taille du capteur CCD, soit quelques minutes d'arc).

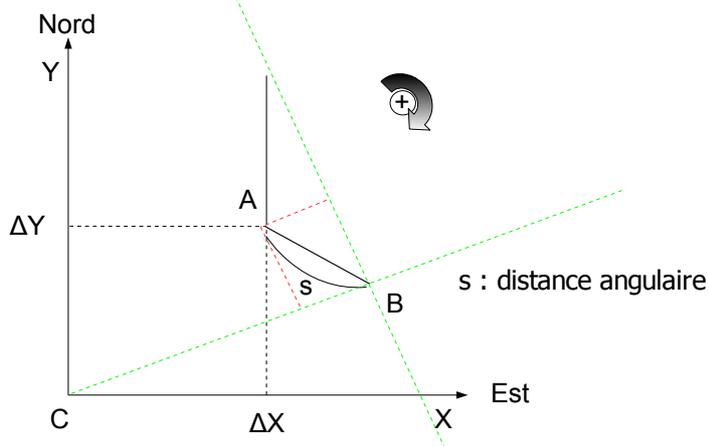


- Diagramme de classification -

Les catalogues les plus courants, et dont la taille est raisonnable peuvent se télécharger gratuitement via internet. Il est à noter que certains organismes professionnels, comme le U.S. Naval Observatory (USNO), peuvent envoyer une copie électronique pour les plus gros fichiers. Enfin, les plus complets, c'est à dire ceux qui contiennent un très grand nombre d'étoiles sur la quasi-totalité du ciel visible à partir d'un observatoire terrestre, peuvent s'utiliser « en ligne » via des applications internet ou encore directement à partir de logiciels.



Explications : Les objets que nous mesurons sont définis dans un plan :



Les coordonnées du point  $A$ , si  $C$  est le centre du repère et  $B$  un objet de référence, peuvent s'exprimer de manière différentielles telles que :

$$\begin{aligned} \Delta X_A &= (\alpha_A - \alpha_C) \cos \delta_C & \Delta X_B &= (\alpha_B - \alpha_C) \cos \delta_C \\ \Delta Y_A &= \delta_A - \delta_C & \Delta Y_B &= \delta_B - \delta_C \end{aligned}$$

avec  $\alpha$  et  $\delta$  respectivement les coordonnées du repère choisi pour l'objet à mesurer,  $\alpha_c$  et  $\delta_c$  les coordonnées du centre du repère de l'objet à mesurer (centre de l'image),  $\Delta$  désignant le repère dans le plan de mesure.

ou bien de manière tangentielles telles que :

$$\begin{aligned} \Delta X &= \frac{\cos \delta \sin(\alpha - \alpha_C)}{\sin \delta \sin \delta_C + \cos \delta \cos \delta_C \cos(\alpha - \alpha_C)} \\ \Delta Y &= \frac{\sin \delta \cos \delta_C - \cos \delta \sin \delta_C \cos(\alpha - \alpha_C)}{\sin \delta \sin \delta_C + \cos \delta \cos \delta_C \cos(\alpha - \alpha_C)} \end{aligned}$$

Nous conserverons qu'un objet est défini dans un plan, en fait l'image, de telle sorte que l'on obtienne les positions

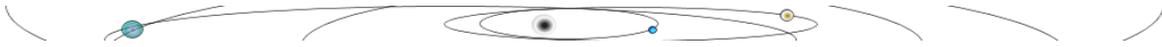
$$X_{astre} = \Delta \alpha \cdot \cos(\delta) \quad \text{et} \quad Y_{astre} = \Delta \delta \quad \text{en secondes d'arc (que l'on note du symbole ")}$$

On peut alors écrire une transformation de la forme :

$$\begin{aligned} X_{astre} &= a_{n0} x^n + a_{0n} y^n + \dots + a_{ij} x^i y^j + \dots + a_{00} \\ Y_{astre} &= b_{n0} x^n + b_{0n} y^n + \dots + b_{ij} x^i y^j + \dots + b_{00} \end{aligned}$$

Dans la pratique, afin de simplifier les modèles de calculs, nous considérons que la transformation est limitée par une différence d'échelle, une rotation et une translation de l'image par rapport aux coordonnées référencées par les catalogues. On obtient alors, pour un modèle à quatre constantes :

$$\begin{aligned} X &= ax + by + c \\ Y &= -bx + ay + d \end{aligned}$$



Ceci ne fonctionne que si les positions de références et que les mesures d'un nombre limité d'objets sont sans erreur, ce qui s'avère peu fiable. Il faudra généralement prendre un plus grand nombre d'étoiles de références et améliorer le calcul par des méthodes statistiques (par exemple celle des moindres carrés).

Prenons un modèle à six constantes pour écrire :

$$\begin{aligned} X &= ax + by + c \\ Y &= dx + ey + f \end{aligned}$$

Il s'avère nécessaire dans certains cas de complexifier les équations menant à la réduction pour pouvoir prendre en compte des déformations non-linéaires. Cependant cela demande une vigilance particulière quand à l'interprétation physique de ces équations afin de ne pas avoir un comportement absurde.

On se rend compte qu'il est primordial d'avoir des références d'une grande fiabilité, ce qui permet de déterminer des valeurs de constantes d'autant plus précises. Alors le calcul des nouvelles positions à partir des observations, se fera d'autant plus précisément.

Ceci va nous permettre, en recoupant les résultats des divers modèles, d'estimer leur fiabilité par rapport aux observations. On parle de résidus en *alpha* et en *delta*. En itérant le procédé il devient possible de déterminer des termes correctifs qui permettent de faire converger les modèles vers ce que l'on a effectivement observé.

Une approche de la modélisation consiste donc à partir des observations à résoudre le système suivant :

$$P_o - P_c = \sum_{i=1}^n \frac{\partial P}{\partial P_i} \Delta P_i$$

P : positions observées / calculées,  $\Delta P$  : les résidus (terme correctif) et  $n$  représentant le nombre d'observations (3 au minimum, par rapport au nombre d'inconnues de l'équation initiale). Ce qui débouche sur l'approximation d'une fonction au voisinage des points observés par un polynôme de degrés  $n$  (complexification de l'ordre de l'équation de réduction).

Nous qualifierons nos résultats avec un couple de paramètres (ascension droite et déclinaison) appelés « résidus ». **C'est ce couple [Observations – Calculs] noté O-C**, qui détermine la différence de la mesure liée aux observations et la position calculée par les éphémérides actuellement en vigueur.

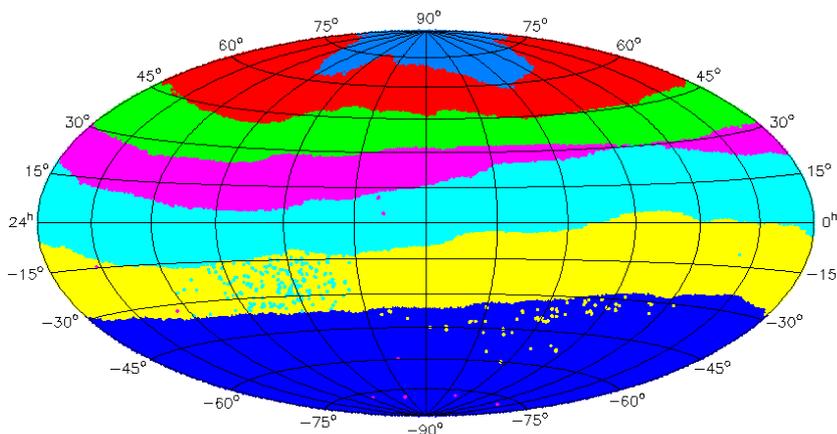


## 4.1. UCAC2 – Catalogue USNO CCD Version 2

L'UCAC2 est un catalogue constitué de 48 millions d'étoiles dont la gamme de magnitude est comprise entre 8 et 16 pour la majorité. Les positions sont basées sur des observations récentes prises par l'observatoire de Cerro Tololo au Chili et l'observatoire de Flagstaff en Arizona (USA), en utilisant un appareil de mesure de l'USNO (astrographe de 8 pouces). Les mouvements propres (dérive de la position réelle dans le temps) pour les étoiles plus brillantes, c'est à dire une magnitude d'environ 12,5, ont été dérivés comme pour les étoiles composant le catalogue Tycho-2. A noter que Tycho-2 regroupe les données de Hipparcos (observations satellitaires) et de Tycho dans sa première version. Pour les étoiles plus faibles, ont été utilisées les positions dans le catalogue "Yellow Sky", basé sur des mesures des plaques photographiques de Lick Northern Proper Motion (NPM) et Yale/San Juan Southern Proper Motion (SPM). Les exactitudes de positions sont de 20 à 70 mas (millisecondes d'arc, soit  $7,71605 \cdot 10^{-10}$  SI), dépendants principalement de la magnitude. Les erreurs des mouvements propres sont comprises entre 1 et 7 mas/an, et dépendent également de la magnitude. Toutes les étoiles à "problème", comme des images mélangées ou des galaxies prolongées ont été exclues de cette version éliminant ainsi cette source d'incertitude. L'utilisation photométrique se limitant à une seule couleur, il est recommandé de n'utiliser ce catalogue que pour l'identification. Ceci en fait donc un excellent catalogue particulièrement adapté à nos besoins. Ce catalogue nous a été directement fourni par l'observatoire naval américain. Ce catalogue a une taille de 2Go.

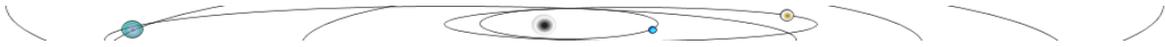
(\*)

UCAC: 85158 survey fields completed as of May 18, 2004



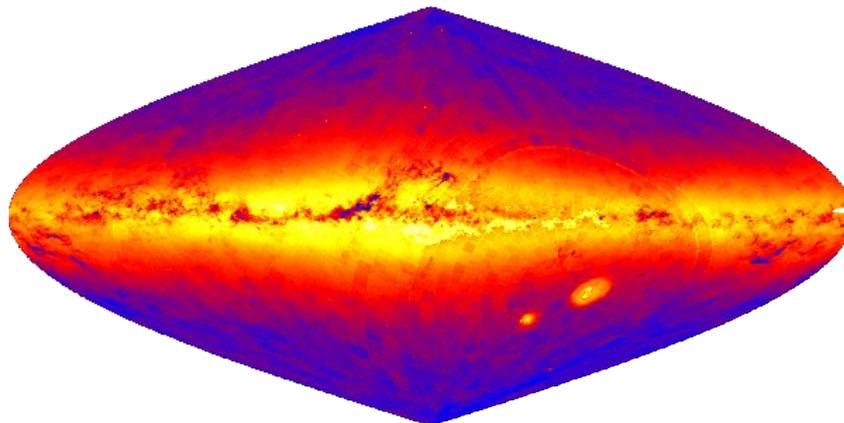
*Ce graphique nous montre que la totalité du ciel de l'hémisphère Sud est prise en compte. La limite pour l'hémisphère Nord est fonction de l'ascension droite du lieu d'observation (de +40° à +52°). Il s'agit de l'ensemble des données collectées jusque dans la nuit du 18 mai 2004.*

<sup>(\*)</sup> Le type de projection utilisé pour ces cartes est explicité en annexes

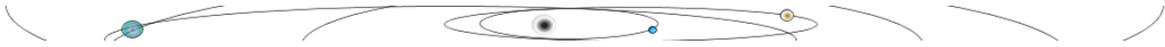


## 4.2. USNO-B1.0 – Catalogue USNO

L'USNO-B1.0 est en fait une extension du catalogue USNO-A. Les différences principales entre ces deux catalogues se situent sur le nombre d'étoiles et la prise en charge des mouvements propres. Ce catalogue est particulièrement complet avec 1.042.618.261 objets. Celui-ci comprend les étoiles et les galaxies détectées dans les images numérisées à la suite de plusieurs campagnes photographiques d'observations du ciel. Le résultat est de taille avec 80 Go de données, ce qui le rend presque impossible à télécharger! La conséquence est l'obligation de l'utiliser en ligne si l'application de traitement le permet ou alors de ne télécharger que la partie du ciel concernée par l'image à étudier. Plusieurs observatoires astronomiques permettent cette utilisation en ligne. Les coordonnées en ascensions droites et en déclinaison sont très bonnes et prennent en compte les mouvements propres et les magnitudes apparentes. Si l'on se réfère à la période actuelle (J2000.0), l'erreur est estimée à près de 200mas. Le catalogue USNO-A2.0 contient 526.230.881 étoiles qui ont été détectées dans les images numérisées de trois campagnes photographiques du ciel. Pour le ciel Nordique entier et le ciel méridional au-dessous de  $-30^\circ$  de déclinaison, les plaques photographiques utilisées provenaient de l'observatoire du Mont Palomar, le Palomar Optical Sky Survey (POSS-I). Des photographies ont été prises sur les émulsions sensibles au bleu et rouge. Seules ces étoiles correspondant à ces longueurs d'ondes ont été incluses. Le reste du ciel méridional a été couvert par l'enquête du Science Research Council (SRC)-J et de l'European Southern Observatory (ESO)-R. De plus, seules les étoiles apparaissant dans les couleurs rouge et bleue ont été retenues pour le catalogue final. USNO-A2.0 nécessite 10 CD-ROM, donne une bonne ascension droite et déclinaison, il en est de même pour la magnitude bleue et rouge. L'erreur de position à l'époque des plaques est à peu près de 250 mas. Notez qu'aucun mouvement propre n'est donné. Désormais il est recommandé d'utiliser l'USNO-B1.0 qui est l'évolution directe de l'USNO-A2.0. L'erreur de ce catalogue étant très grande, il n'est pas judicieux de choisir ce catalogue.

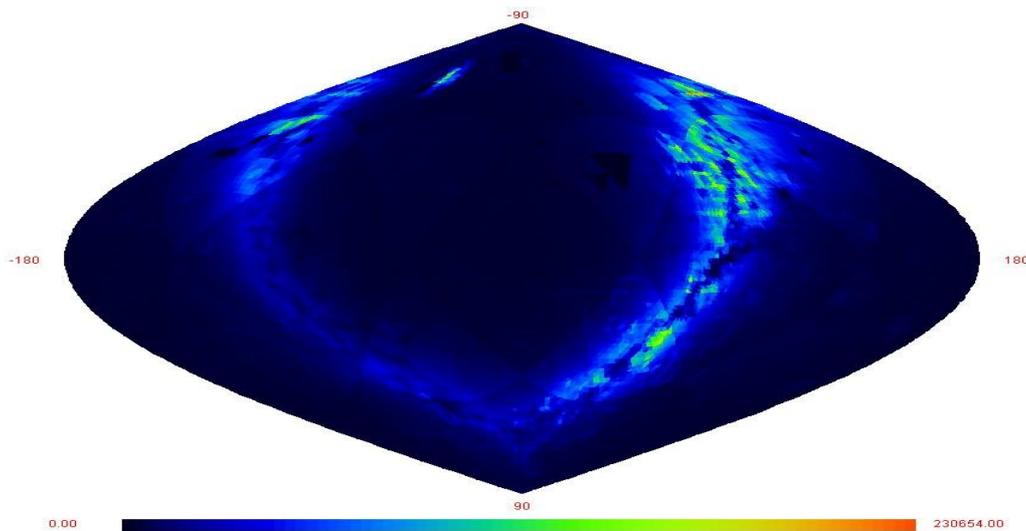


*L'image ci-dessus montre le nombre d'étoiles par degrés carrés. Le jaune correspond à la plus grande densité, soit environ 150000 étoiles par degrés carrés. La zone bleue représente la densité la plus faible avec seulement 500 étoiles par degrés carrés. La zone centrale de cette carte, en jaune brillant, très dense, est en fait la "voie lactée". C'est précisément le plan de notre galaxie. Les zones plus sombres, qui découpent cette ligne plane de notre galaxie, sont des nuages de poussières et de gaz qui nous masquent les étoiles. Notez les deux "tâches" brillantes, à droite du centre. Ce sont là le grand et le petit nuage de Magellan, parfaitement visibles dans l'hémisphère Sud.*



### 4.3. GSC-ACT

Bien que considéré comme obsolète pour de nombreux usages, le GSC-ACT possède un intérêt historique. Ce catalogue est issu d'un projet de correction de la calibration du catalogue initial le Hubble Guide Star Catalog (version 1.1). Ainsi bien que des catalogues meilleurs en précision et en nombre d'étoiles existent (GSC-2.2, UCAC-2, B1.0 et A2.0), le GSC-ACT est constitué de plaques (d'épreuves photographiques) avec une distorsion de troisième ordre par rapport au GSC1.1. De ce fait, on peut inclure davantage de constantes pour notre réduction astrométrique, ce qui en améliore les résultats. L'autre point est que ce catalogue est facilement accessible par sa taille modérée (300Mo) et est pris en charge par de nombreux logiciels. Les sources de données pour la constitution du GSC sont Tycho-2 et SkyMap pour les objet très lumineux. L'utilisation de ces catalogues *GSC* est rendue délicate par le paramétrage exigé. Cela provient du fait que seule une position et une grandeur par longueur d'onde qualifie un objet dans le ciel. Le GSC-2 avoisine le milliard d'étoiles pour un volume de 40 Go. Ce catalogue est, lui-aussi, en évolution permanente ce qui permet d'apporter des corrections.



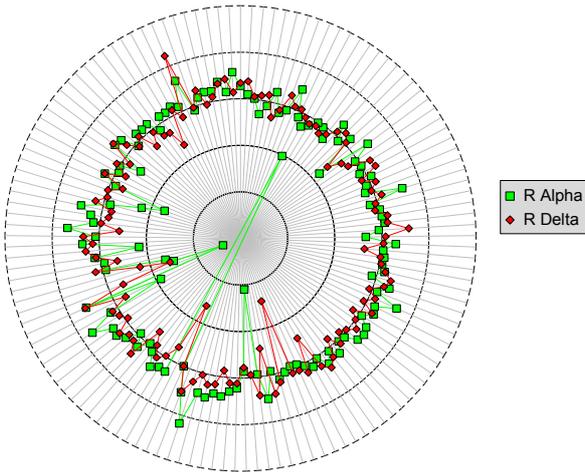
*L'image ci-dessus montre la densité d'étoiles pas degrés carrés, intégrée dans le GSC-2. La précision pour les positions est de 0,15" d'arc. L'erreur de mouvement oscille entre 5 et 20 mas/an. Et l'erreur de magnitude se situe à 0,2.*



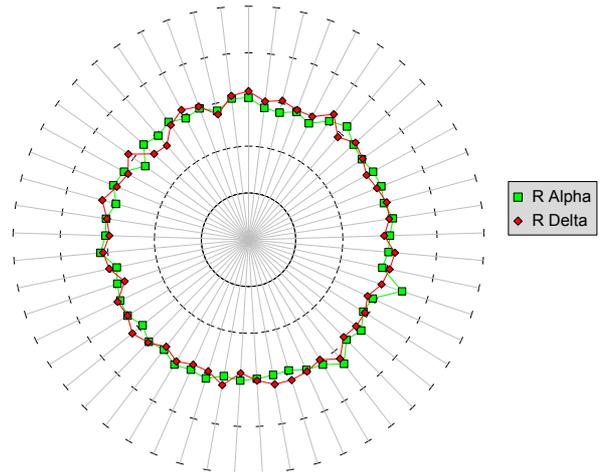
#### 4.4. Comment choisir un catalogue

Les catalogues d'étoiles ont différents objectifs, celui qui nous intéresse est la précision astrométrique dans les longueurs d'ondes détectables par la caméra CCD et effectivement utilisées (filtre sélectif). Le test a été réalisé avec une même image pour chacun des catalogues. Ces graphes montrent le nombre de références dans l'image en fonction de la précision atteinte en Alpha et Delta pour chacune des étoiles identifiées et comparées à leur position de référence.

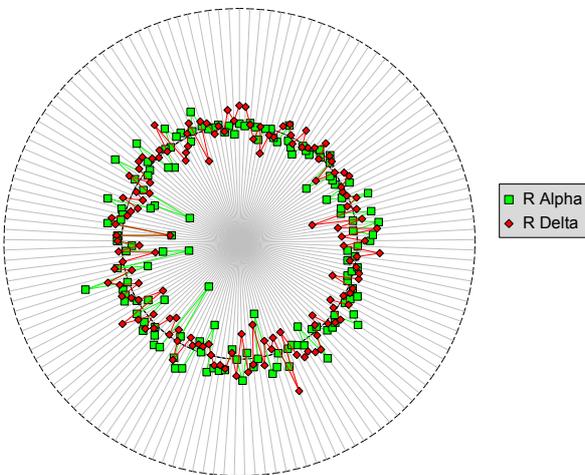
Résidus USNO-B1



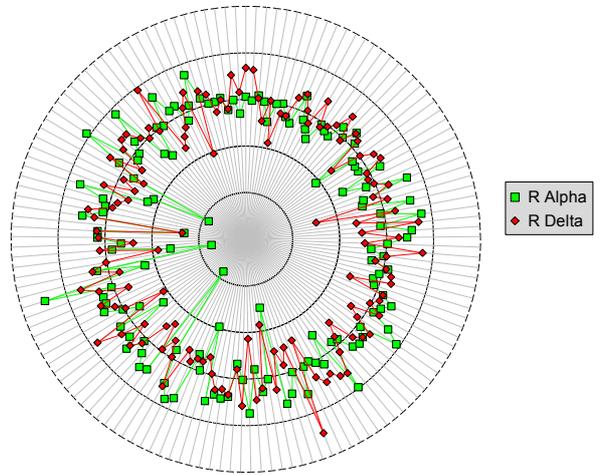
Résidus UCAC-2



Résidus USNO-A2



Résidus USNO-SA2



Il apparaît clairement pour une même image, le nombre d'étoiles pouvant être utilisées comme références est plus important avec l'USNO. Cependant, la différence avec l'UCAC2, est la plus grande précision des positions des étoiles qui a été favorisée. De ce fait, une réduction étant basée sur un calcul polynomial, qui atténue la valeur résiduelle quand le degré augmente, il est donc préférable d'avoir moins d'étoiles mais qu'elles soient plus fiables. Ainsi, le degré de polynôme utilisé est plus petit, mais le calcul final plus précis. Le critère de « fiabilité » est généralement paramétrable dans les logiciels. *L'UCAC3 apporte une couverture totale du ciel.*

Note sur la précision relative (pour l'époque de référence respective au catalogue) :

**USNO-A2.0** :  $\pm 0,25''$

**USNO-B1.0** :  $\pm 0,20''$

**UCAC-2.0** :  $\pm 0,02''$

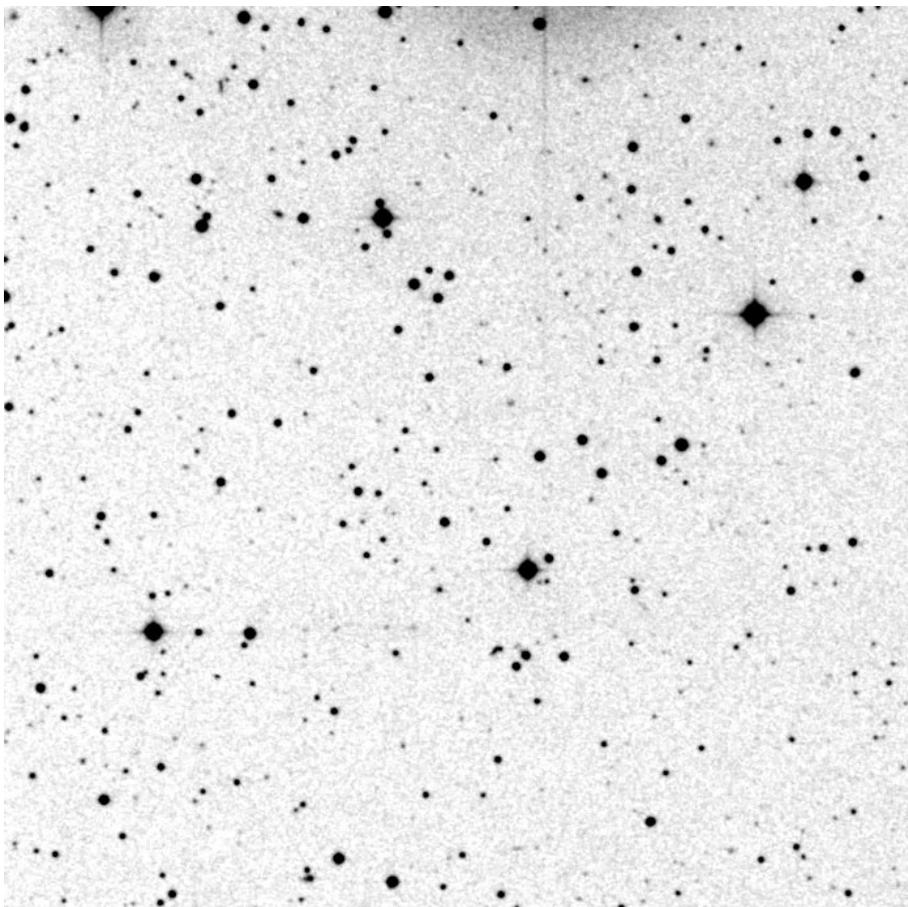
( $0,07''$  pour les magnitudes  $> 14$ )



## 5. Étude des Logiciels

### 5.1. Tests avancés et propositions de solutions

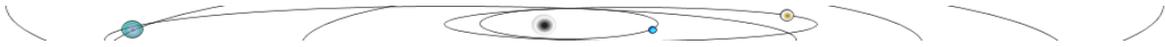
Il existe de nombreux logiciels sur le marché, et l'objectif de ce documents n'est pas de les tester tous, il convient à chacun de se procurer les « bons outils », c'est à dire ceux qui sont le mieux maîtrisés pour le résultat escompté. Le choix implique la possibilité d'utiliser le catalogue UCAC2. Pour ces tests avancés, une série d'images du 12 au 14 avril 2005<sup>(1)</sup> a été choisie concernant *Phoebe (S-IX)*, un satellite lointain de Saturne. Le champ des images est approximativement 11,7' d'arc. Tout d'abord, voici une identification du champ pour la date du 14,8234 (JD 2453475,3234493057) :



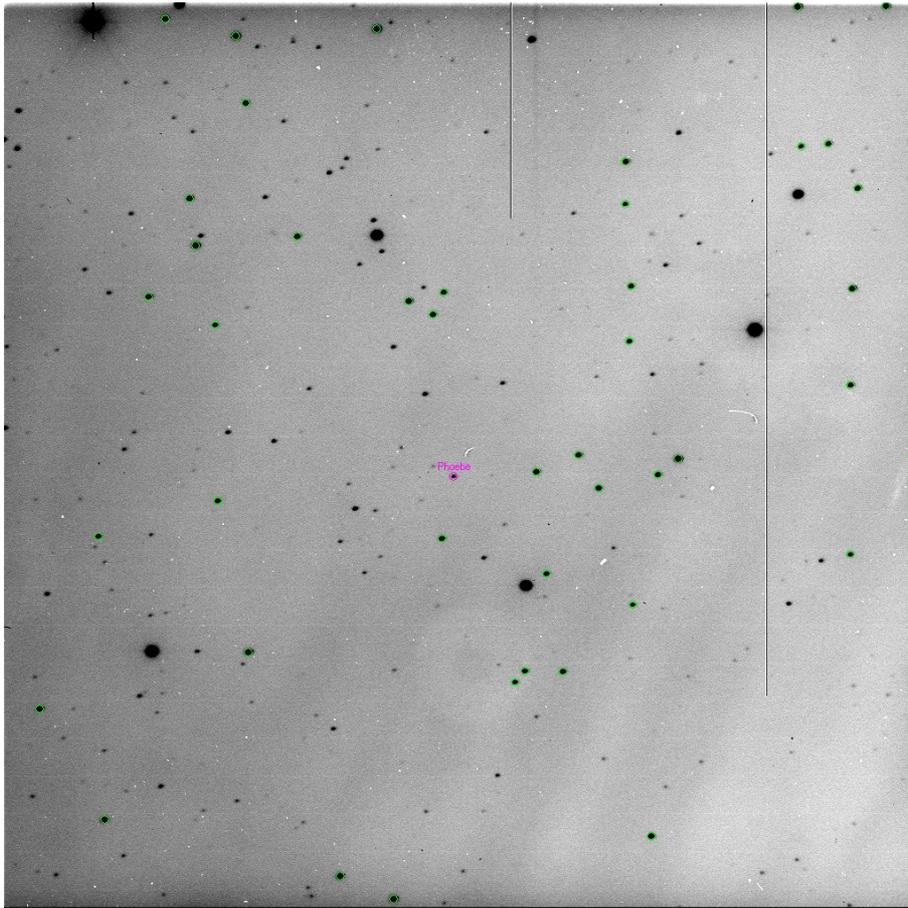
- Crédits: *Digitized Sky Survey* -

*Cette image montre les étoiles visibles dans le champ photographique étudié. Ainsi il est plus simple de retrouver l'objet à étudier parmi tous ces « points » par comparaison avec l'observation.*

(1) les images et données correspondantes ne sont pas libres de droits – crédits IMCCE/OHP/CNRS, France



Ci-dessous, une image réelle réduite avec l'objet identifié pour comparaison avec l'image précédente :



*Cette image a été réalisée avec le logiciel Astrometrica, les étoiles entourées de vert ont servi aux calculs de position du satellite. Les éphémérides de l'IMCCE ont été utilisés pour la détermination grossière du centre de l'image, à savoir : Theory IMCCE/SAT for main satellites (S1-S8) by Harper and Taylor.*

*L'objectif de ces tests est de quantifier la performance et la fiabilité des outils à notre disposition. Diverses fonctions connexes sont pratiques. Par exemple, sur l'image qui va suivre, le repérage de Phoebe n'est pas immédiat. Une fonction telle que le « blinking » (ou clignotement), entre deux ou plusieurs images est alors une aide essentielle pour éviter toute confusion, l'objet se déplaçant d'une image à l'autre.*



Pour ce qui est du degré de polynôme à utiliser pour une image donnée, il faut considérer le nombre d'étoiles servant de référence pour le champ photographique. Généralement un polynôme de degré trois est un bon compromis et s'applique en général à un champ supérieur à 10 minutes d'arc. A titre d'illustration, voici le résultat de quelques essais :

Pol	R-Alpha	R-Delta	Etoiles	F	Angle
1	0,03	0,04	50	7230,31	0,24
2	0,03	0,04	50	7229,79	0,23
3	0,03	0,03	50	7232,64	0,23
4	0,02	0,03	50	7230,22	0,17
5	0,02	0,03	50	7225,96	0,19
6	0,02	0,02	50	7230,43	1,72
7	0,01	0,02	50	6646,73	14,63
8	0,86	3,03	50	4974,76	-19,22

} A ne pas utiliser du fait des valeurs obtenues

Si l'on observe le résidu moyen en alpha et en delta, un ordre quatre semble plus approprié. Ceci semble confirmé par un angle de rotation de l'image pour un ordre 4 qui est inférieur l'angle de l'ordre 3. Il est donc à supposer que la déformation est minimisée. Pour confirmer cette hypothèse, une série d'images a donc été testée pour le troisième et quatrième ordre. Dans chaque cas le résultat de la mesure était différent à **moins de 0,01"** d'arc. De ce fait, pour le tableau de synthèse des mesures effectuées avec Prism, l'ordre considéré sera le quatrième.

## 5.2. Mesures comparées

L'analyse des mesures passent systématiquement par une comparaison des éphémérides. Dans l'exemple suivant, les théories de l'IMCCE et du JPL sont prises en compte :

Latitude d'observation

PHOEBE S-IX  
Catalogue : UCAC-2

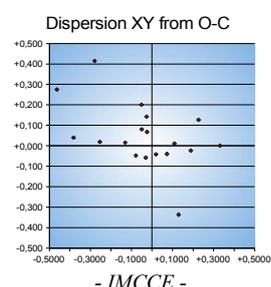
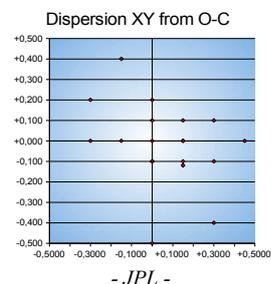
Fichier FITS	Date (UTC)	Heure (UTC)	Éphémérides calculées			
			JPL - [DE405]		IMCCE (/sat) - [DE405]	
			Alpha	Delta	Alpha	Delta
p27455f1	2005-04-12	19:30:18,670	07:27:24,250	22:01:21,400	07:27:24,262	22:01:21,332
p27456f1	2005-04-12	19:36:17,580	07:27:24,290	22:01:21,300	07:27:24,302	22:01:21,258
P27457f1	2005-04-12	19:41:00,840	07:27:24,330	22:01:21,200	07:27:24,333	22:01:21,199
P27458f1	2005-04-12	19:45:44,250	07:27:24,360	22:01:21,200	07:27:24,365	22:01:21,140
P27459f1	2005-04-12	19:50:27,820	07:27:24,390	22:01:21,100	07:27:24,397	22:01:21,081
P27460f1	2005-04-12	19:55:11,780	07:27:24,420	22:01:21,100	07:27:24,429	22:01:21,022
p27532f1	2005-04-13	19:37:29,280	07:27:34,470	22:01:03,700	07:27:34,475	22:01:03,648
P27533f1	2005-04-13	19:42:14,400	07:27:34,500	22:01:03,600	07:27:34,509	22:01:03,585
P27534f1	2005-04-13	19:46:59,520	07:27:34,530	22:01:03,600	07:27:34,541	22:01:03,525
P27535f1	2005-04-13	19:51:44,640	07:27:34,570	22:01:03,500	07:27:34,575	22:01:03,460
P27536f1	2005-04-13	19:55:03,360	07:27:34,590	22:01:03,400	07:27:34,599	22:01:03,416
P27537f1	2005-04-13	19:56:21,120	07:27:34,600	22:01:03,400	07:27:34,608	22:01:03,399
P27538f1	2005-04-13	20:01:06,240	07:27:34,630	22:01:03,400	07:27:34,641	22:01:03,336
P27539f1	2005-04-13	20:05:51,360	07:27:34,670	22:01:03,300	07:27:34,675	22:01:03,273
P27582f1	2005-04-14	19:22:08,760	07:27:44,970	22:00:45,300	07:27:44,979	22:00:45,285
P27583f1	2005-04-14	19:26:52,370	07:27:45,010	22:00:45,200	07:27:45,013	22:00:45,219
P27585f1	2005-04-14	19:36:19,330	07:27:45,080	22:00:45,100	07:27:45,083	22:00:45,089
P27586f1	2005-04-14	19:41:02,800	07:27:45,110	22:00:45,100	07:27:45,117	22:00:45,024
P27587f1	2005-04-14	19:45:46,020	07:27:45,150	22:00:45,000	07:27:45,152	22:00:44,958

Attention, tous les éphémérides n'offrent pas la même précision !



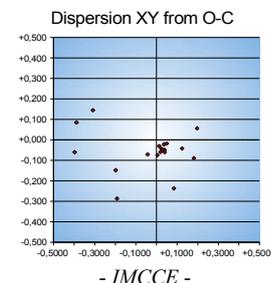
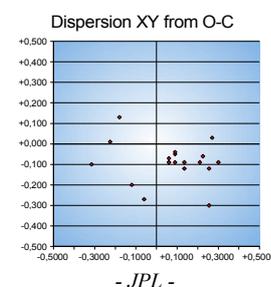
Puis les calculs des résidus correspondants, propres à chaque logiciels. Le tableau de gauche montre la synthèse des mesures en ascension droite et en déclinaison, le résidus calculés par rapport aux éphémérides de références. Les courbes de droites tracent les résidus afin de mettre en évidence la répartition des écarts effectifs.

Astroart					
Mesures		JPL		IMCCE (/sat)	
Alpha	Delta	R $\alpha$	R $\delta$	R $\alpha$	R $\delta$
07:27:24,260	22:01:21,400	+0,1500	0,000	-0,0245	+0,068
07:27:24,300	22:01:21,400	+0,1500	+0,100	-0,0264	+0,142
07:27:24,330	22:01:21,400	0,0000	+0,200	-0,0517	+0,201
07:27:24,370	22:01:21,100	+0,1500	-0,100	+0,0725	-0,040
07:27:24,380	22:01:21,100	-0,1500	0,000	-0,2538	+0,019
07:27:24,430	22:01:20,980	+0,1500	-0,120	+0,0191	-0,042
07:27:34,470	22:01:03,600	0,0000	-0,100	-0,0784	-0,048
07:27:34,490	22:01:04,000	-0,1500	+0,400	-0,2794	+0,415
07:27:34,510	22:01:03,800	-0,3000	+0,200	-0,4631	+0,275
07:27:34,550	22:01:03,500	-0,3000	0,000	-0,3822	+0,040
07:27:34,590	22:01:02,900	0,0000	-0,500	-0,1319	-0,516
07:27:34,630	22:01:03,400	+0,4500	0,000	+0,3312	+0,001
07:27:34,650	22:01:03,000	+0,3000	-0,400	+0,1292	-0,336
07:27:34,690	22:01:03,400	+0,3000	+0,100	+0,2270	+0,127
07:27:44,970	22:00:45,300	0,0000	0,000	-0,1307	+0,015
07:27:45,010	22:00:45,300	0,0000	+0,100	-0,0506	+0,081
07:27:45,090	22:00:45,100	+0,1500	0,000	+0,1095	+0,011
07:27:45,130	22:00:45,000	+0,3000	-0,100	+0,1892	-0,024
07:27:45,150	22:00:44,900	0,0000	-0,100	-0,0309	-0,058



Attention il est impératif d'utiliser la version 4.0 d'Astroart (au minimum) qui possède des améliorations notables des fonctions d'astrométrie, et principalement qui rend possible l'utilisation de l'UCAC-2.

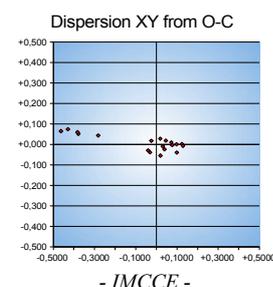
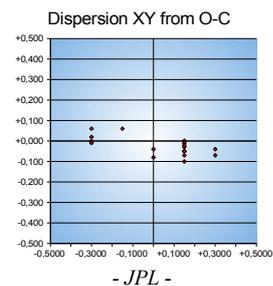
Astrometrica					
Mesures		JPL		IMCCE (/sat)	
Alpha	Delta	R $\alpha$	R $\delta$	R $\alpha$	R $\delta$
07:27:24,264	22:01:21,310	+0,2100	-0,090	+0,0355	-0,022
07:27:24,305	22:01:21,240	+0,2250	-0,060	+0,0486	-0,018
07:27:24,336	22:01:21,150	+0,0900	-0,050	+0,0383	-0,049
07:27:24,366	22:01:21,110	+0,0900	-0,090	+0,0125	-0,030
07:27:24,394	22:01:21,010	+0,0600	-0,090	-0,0438	-0,071
07:27:24,437	22:01:20,980	+0,2550	-0,120	+0,1240	-0,042
07:27:34,462	22:01:03,500	-0,1200	-0,200	-0,1984	-0,148
07:27:34,488	22:01:03,730	-0,1800	+0,130	-0,3094	+0,145
07:27:34,515	22:01:03,610	-0,2250	+0,010	-0,3881	+0,085
07:27:34,549	22:01:03,400	-0,3150	-0,100	-0,3972	-0,060
07:27:34,586	22:01:03,130	-0,0600	-0,270	-0,1919	-0,286
07:27:34,620	22:01:03,310	+0,3000	-0,090	+0,1812	-0,089
07:27:34,647	22:01:03,100	+0,2550	-0,300	+0,0842	-0,236
07:27:34,688	22:01:03,330	+0,2700	+0,030	+0,1969	+0,057
07:27:44,979	22:00:45,210	+0,1350	-0,090	+0,0043	-0,075
07:27:45,016	22:00:45,160	+0,0900	-0,040	+0,0394	-0,059
07:27:45,084	22:00:45,030	+0,0600	-0,070	+0,0195	-0,059
07:27:45,119	22:00:44,980	+0,1350	-0,120	+0,0242	-0,044
07:27:45,154	22:00:44,910	+0,0600	-0,090	+0,0291	-0,048



Astrometrica offre une précision au 1/1000 en alpha et au 1/100 en delta, toutefois il faut regarder dans le fichier lié à l'analyse de l'image. Attention le fichier rapport MPC tronque cette précision qui est alors du même ordre qu'Astroart. Le fichier d'analyse, au format « texte brut » est très riche en détails, ce qui est une aide précieuse pour l'analyse.



PRISM					
Mesures		JPL		IMCCE(/sat)	
Alpha	Delta	R $\alpha$	R $\delta$	R $\alpha$	R $\delta$
07:27:24,260	22:01:21,350	+0,1500	-0,050	-0,0245	+0,018
07:27:24,310	22:01:21,260	+0,3000	-0,040	+0,1236	+0,002
07:27:24,340	22:01:21,200	+0,1500	0,000	+0,0983	+0,001
07:27:24,370	22:01:21,150	+0,1500	-0,050	+0,0725	+0,010
07:27:24,400	22:01:21,100	+0,1500	0,000	+0,0462	+0,019
07:27:24,430	22:01:21,050	+0,1500	-0,050	+0,0190	+0,028
07:27:34,450	22:01:03,700	-0,3000	0,000	-0,3784	+0,052
07:27:34,480	22:01:03,660	-0,3000	+0,060	-0,4294	+0,075
07:27:34,510	22:01:03,590	-0,3000	-0,010	-0,4631	+0,065
07:27:34,550	22:01:03,520	-0,3000	+0,020	-0,3822	+0,060
07:27:34,580	22:01:03,460	-0,1500	+0,060	-0,2819	+0,044
07:27:34,610	22:01:03,390	+0,1500	-0,010	+0,0312	-0,009
07:27:34,650	22:01:03,330	+0,3000	-0,070	+0,1292	-0,006
07:27:34,680	22:01:03,270	+0,1500	-0,030	+0,0769	-0,003
07:27:44,980	22:00:45,230	+0,1500	-0,070	+0,0193	-0,055
07:27:45,020	22:00:45,180	+0,1500	+0,020	+0,0994	-0,039
07:27:45,080	22:00:45,060	0,0000	-0,040	-0,0405	-0,029
07:27:45,120	22:00:45,000	+0,1500	-0,100	+0,0392	-0,024
07:27:45,150	22:00:44,920	0,0000	-0,080	-0,0309	-0,038



Prism offre une précision équivalente à Astroart, à l'usage il démontre une excellente correction des positions qui lui donne une réelle stabilité dans les mesures, les graphes le montre de manière évidente. Les fichiers d'analyses, également au format « texte brut » sont également très complets et paramétrables. L'algorithme de reconnaissance du champ est quelque fois capricieux, et c'est alors que l'usage de plusieurs logiciels devient très utile pour, par exemple, corriger les coordonnées du centre de l'image et rendre possible la réduction.

*Ces comparaisons, ne sont qu'un exemple de méthode permettant un aperçu du fonctionnement d'un logiciel de mesure, c'est également l'occasion d'en comprendre les fonctionnements, et le paramétrage. Je ne peux que conseiller de prendre pour référence des images d'objets connus des éphémérides, c'est à dire dont le modèle est fiable pour l'observation considérée, et de faire ce genre de test. Il est important d'avoir le plus grand nombre possible d'images, ce qui n'est pas le cas ici, et pour cette autre raison, je ne recommanderais pas plus l'un que l'autre des logiciels que je mentionne ci-dessus.*

Ces tableaux sont disponibles sous forme de fichiers et sont à la disposition des observateurs au format OpenOffice2, voir sur mon site internet : <http://yann.duchemin.free.fr/>  
Les courbes seront détaillées un peu plus loin en section [9.2.]



### 5.3. Notes à propos de la précision

Rappel :

$$AngleParPixel = \frac{206 \times TaillePixel_{\mu m}}{Focale_{mm}} \quad \text{soit dans notre cas} \quad \frac{206 \times 24}{7200} \approx 0,7'' \text{ d'arc}$$

Remarque : La valeur « 206 » provient du rapport d'angle :  $\left(\frac{180}{\pi} \times 3600\right) \times \frac{1}{1000}$  soit environ 206,265

La formule proposée utilise une taille de pixel en « μm » alors on divise par 1000 pour conserver la focale en « mm ». Ceci étant du au fait que pour de petits angles, mesurés en radians, la tangente est très proche de la valeur de l'angle lui-même. On à donc le nombre de secondes de degrés pour angle (ou arc) de un radian (cf. annexes).

Par exemple, si notre étoile à une taille de 100 pixels (10 par 10), la précision est de  $\frac{0.7}{\sqrt{100}}$  soit 0,07''

Cette valeur est proportionnelle au nombre d'étoiles de références.

Prenons le cas où 50 étoiles ont été utilisées pour la réduction, nous obtenons :  $\frac{0.07}{\sqrt{50}} = 0,01''$

**Ceci implique, donc pour un angle au centième d'arc, d'utiliser une base de calcul au millième pour garantir les résultats !**

Attention au nombre d'étoiles de références , par exemple pour 3 étoiles, un degré 1 donne des résidus nuls puisque nous avons 6 équations à 6 inconnues ! Par contre, comme les images contiennent beaucoup d'étoiles connues, les résidus s'améliorent en diminuant celles dont le résidus est élevé (>0,1'') et en ré-itérant le processus.

Exemple avec PRISM :

CCD	modèle-CCD	CCD-fond	modèle
Degré = 2    Iteration(s) = 4    Rayon Fenetre = 8 pixels			
CentreX = 496.002 ±0.012		FwhmL = 4.19	
CentreY = 524.998 ±0.012		FwhmH = 4.00	
Reshift = 1,0		FwhmM = 4.10	
		Angle = -61.7° L/H= 1.05	
Flux = 29506.3 ±654.2		Signal / Bruit = 69.28	
		Observ-Calc = 22.4	

Influence de la taille de fenêtre sur la mesure de centroïde (Ordre 4) :

Fenêtre à 8 pixels:

X=496.003 ±0.012 Y=524.995 ±0.012 FWHML= 4.15 FWHMH= 3.97 Angle= -61.1° Flux= 28873.1 ±694.3 S/N= 67.43

Fenêtre à 10 pixels:

X=496.001 ±0.012 Y=525.002 ±0.012 FWHML= 4.25 FWHMH= 4.06 Angle= -61.4° Flux= 30459.8 ±648.7 S/N= 68.01



## 5.4. Mode Automatique ou Manuel ?

Le mode de calcul automatique signifie que le choix des étoiles de référence est laissé au logiciel. Suivant le nombre de références restantes, il est permis de choisir le degré du polynôme de manière interactive. L'objectif est de comparer la position obtenue entre les deux méthodes. Une différence implique une recherche d'explication, qui pourrait être par exemple une mauvaise répartition des étoiles dans le champ, ou une limite résiduelle moyenne trop élevée (paramétrage). Dans ce cas, il convient de procéder de manière itérative en ajustant de manuellement la sélection des étoiles. Prism et Astroart ont la possibilité de choisir le mode, Astrometrica permet seulement un réajustement manuel en cas d'incertitude de la reconnaissance du champ.

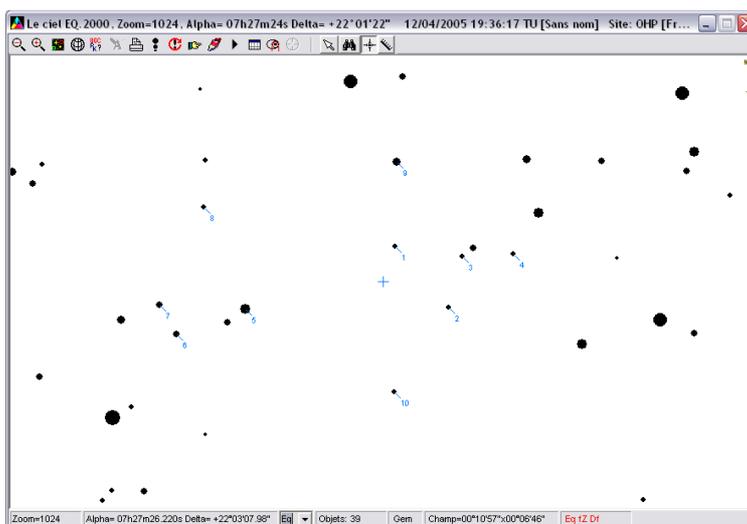
La méthode de travail demande une très grande régularité, chaque image doit être traitée avec une méthode rigoureuse et identique sur la totalité du lot. C'est pourquoi avant un plan d'observation il est préférable d'écrire des procédures de paramétrage, de traitement, et de mise en forme des données obtenues.

### 5.4.1. Exemple avec PRISM en étalonnage manuel

Nous obtenons ces quelques valeurs de références :

Catalogue : UCAC-2			Prism						Résidus O - C		
Fichier	Référence	Heure (UTC)	Références Manuelles		Références Auto 2 <sup>nd</sup>		Références Auto 3 <sup>rd</sup>		NB. Ref.	RD $\alpha$	RD $\delta$
			Alpha	Delta	Alpha	Delta	Alpha	Delta			
P27456f1.fits	Référence 1	19h36m17.58s	07:27:23,870	22:00:45,420	07:27:33,880	22:00:45,500	07:27:33,880	22:00:45,500	7	00:00:10,010	00:00:00,080
	Référence 2		07:27:18,990	22:01:44,340	07:27:18,990	22:01:44,640	07:27:18,990	22:01:44,630	7	00:00:00,000	00:00:00,290
	Référence 3		07:27:35,310	22:03:11,380	07:27:35,320	22:03:11,570	07:27:35,320	22:03:11,570	7	00:00:00,010	00:00:00,190
	Référence 4		07:27:27,670	22:03:18,750	07:27:17,650	22:03:17,310	07:27:17,650	22:03:17,300	7	-00:00:10,020	-00:00:01,450
	Référence 5		07:27:23,280	21:59:42,690	07:27:23,280	21:59:42,690	07:27:23,280	21:59:42,690	7	00:00:00,000	00:00:00,000
	Référence 6		07:27:32,770	22:00:57,260	07:27:32,770	22:00:57,260	07:27:32,770	22:00:57,260	7	00:00:00,000	00:00:00,000
	Référence 7		07:27:35,430	22:02:28,510	07:27:35,430	22:02:28,510	07:27:35,430	22:02:28,510	7	00:00:00,000	00:00:00,000

et voici l'aperçu des étoiles sélectionnées dans la carte du ciel à l'époque donnée (J2000.0):



Étalonnage manuel :

**Alpha : 07h27m24,310s      Delta : +22°01'20,40"**

Étalonnage Automatique Ordre 2 :

**Alpha : 07h27m24,300s      Delta : +22°01'21,25"**

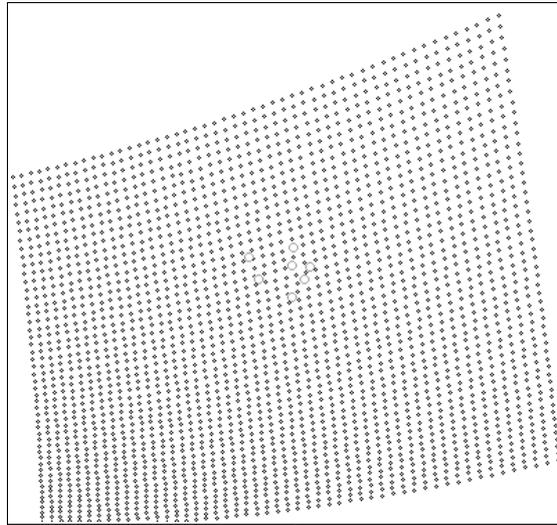
Étalonnage Automatique Ordre 3 :

**Alpha : 07h27m24,300s      Delta : +22°01'21,25"**

} Selon le nombre de références  
Faible influence du degrés polynomial



On peut remarquer que l'ordre du polynôme n'a pas eu d'influence sur le résultat, à noter qu'il s'agit d'une mesure par gaussienne. Par contre la différence avec la mesure manuelle est importante, probablement due à un nombre trop peu important d'étoiles de référence et donc un calcul trop « approché ». C'est ce que l'on voit sur la carte de distorsion ci dessous :



Cette image représente la déformation existant entre le plan original et le plan réduit.

Valeur des résidus moyens :

Nombre d'étoiles =7, degré max du polynôme =2  
 Degré du polynôme  
 2  
 Résidu en alpha (") = 0.008391  
 Résidu en delta (") = 0.01603  
 Nombre d'étoiles utilisées = 7  
 Angle de rotation N/S :0.698906°

Étalonnage Manuel

Nombre d'étoiles =59, degré max du polynôme =9  
 Degré du polynôme  
 2  
 Résidu en alpha (") = 0.02673  
 Résidu en delta (") = 0.03766  
 Nombre d'étoiles utilisées = 50  
 Focale du télescope :7229.79  
 Angle de rotation N/S :0.23289°

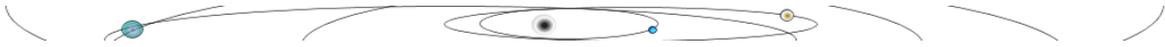
Étalonnage Auto.

Nombre d'étoiles =59, degré max du polynôme =9  
 Degré du polynôme  
 3  
 Résidu en alpha (") = 0.02533  
 Résidu en delta (") = 0.03426  
 Nombre d'étoiles utilisées = 50  
 Focale du télescope :7232.64  
 Angle de rotation N/S :0.229277°

Étalonnage Auto.

En Étalonnage manuel, le calcul de la focale n'est plus possible, puisque la zone utilisée pour le calcul est trop réduite. Quand à la différence de focale résultante d'un calcul du second ou troisième degrés, elle est en majeure partie due au fait que l'échelle n'est pas isotrope, d'où la déformation. Il est donc nécessaire, pour valider une mesure, de connaître la valeur des résidus moyens sur chaque axe. Ainsi, en cas d'erreur importante sur la comparaison Observation/Calcul, il sera nécessaire de refaire une série de mesures. Une sélection manuelle des étoiles de références et une comparaisons des résultats un à un permettra d'affiner le relevé de la position observée.

Généralement la répartition des références autour du point de mesure n'étant pas satisfaisante pour les calculs appliqués, le mode manuel est imprécis (problème d'anisotropie d'échelle). Je ne recommande donc pas l'étalonnage manuel, toutefois cela peut-être intéressant pour certaines données à vérifier.



## 5.5. Astroart

Ce logiciel est une suite complète qui permet le traitement d'images, l'acquisition, le guidage et plus encore en utilisant les outils de développements qui sont téléchargeables gratuitement. Les fonctionnalités d'astrométrie et de photométrie permettent l'envoi de rapport au « minor planet center » via un mode d'analyse manuel ou automatique. Les catalogues utilisables sont l'USNO et l'UCAC et le GSC est fourni sur le CDRom. On peut pour la reconnaissance automatique d'objet passer par le catalogue MPCORB (fichier regroupant les éléments orbitaux d'un grand nombre de petits objets tels que les astéroïdes) qui se met à jour via internet quotidiennement. Les mises à jour sont régulières, au moins une fois par an et fournies gratuitement pour la version achetée sous forme de « service pack ». Pour ce qui est de la programmation il est important de souligner qu'Astroart est très peu gourmand en ressource informatique et laisse envisager une utilisation raisonnable sur une configuration légèrement obsolète. Ce dernier point passe par une programmation en langage machine (assembleur) et ne manifeste aucun problème en matière de gestion de périphérique tout en faisant profiter l'utilisateur d'une puissance maximale, doublement intéressant quand certains systèmes utilisent des connections d'anciennes générations, telle que le série (RS232), et qui ont disparues des configurations récentes !

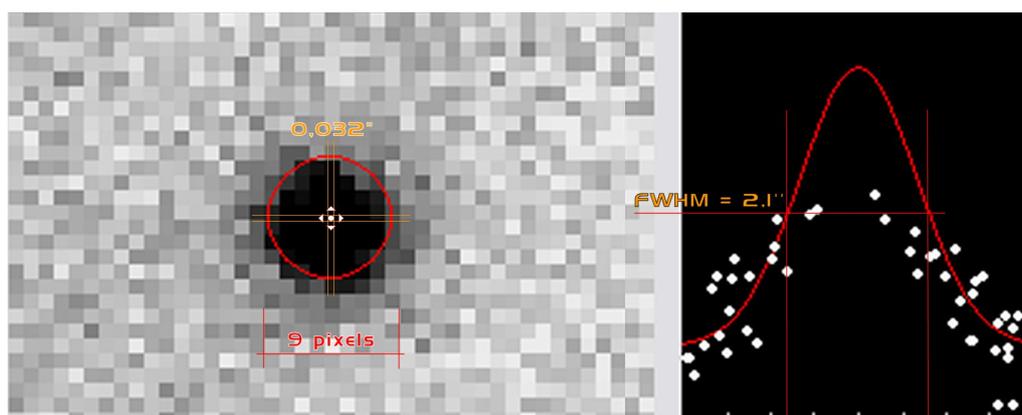
Pour les spécificités de l'astrométrie, il est bon d'avoir sous les yeux une carte du ciel, en fait un atlas, créée à partir de la base du catalogue. Les étoiles prises en compte pour la reconnaissance et donc pour l'étalonnage sont détournées. Le résultat de cette reconnaissance est indiquée dans un tableau qui permet un contrôle sur le choix des références et les résidus au catalogue. Les calculs d'échelles basés sur la réduction polynomiale s'effectue dans une fenêtre à part ce qui permet d'appréhender la qualité de la mesure. La méthode s'acquiert assez vite ce qui permet de traiter beaucoup d'image en un temps raisonnable. Il est indispensable d'utiliser la version 4.0 au minimum, puisque précédemment l'UCAC-2 n'était pas pris en charge. Un « service pack » version 3 permet d'utiliser l'UCAC-3 et d'apporter quelques améliorations, cette mise à jour est gratuite.

Un dernier point pour la documentation qui est vraiment bien faite, elle permet d'acquérir les notions indispensables rapidement. Des articles, et traduction sont disponibles en français en cherchant sur internet.



## 5.6. Astrometrica

Ce logiciel dédié à l'astrométrie est très simple d'utilisation. Toutefois les résultats ne sont pas forcément fiables, le problème est par exemple l'interpolation faite par le logiciel dans la mesure du centre de l'objet dont, rappelons le, la précision recherchée est de l'ordre du  $\frac{1}{2}$  pixel! La précision d'Astrometrica passe par l'explication qui va suivre. Le rayon centré autour d'un groupe de pixels brillants (centre approximatif d'une étoile détectée, paramètre : Aperture Radius).

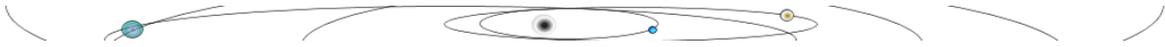


- crédits: Y.DUCHEMIN / H. RAAB / Astrometrica -

Tous les pixels sont regroupés afin de calculer les centroïdes<sup>(\*)</sup> et l'intensité des seuils de détections. La valeur doit être choisie précisément en fonction des objets recherchés :

- > Trop grande, le calcul englobera 2 objets fins qui seraient trop rapprochés et/ou de trop faible éclat, le centre (donc les coordonnées) serait faussé.
- > Trop petite, le centre calculé ne correspondra pas au centre réel de l'objet.

Sur l'exemple ci-dessus, la taille « réelle » (diamètre apparent) de l'objet est le point central (curseur orange). Du fait des déformations engendrées entre autre, par l'optique, la turbulence atmosphérique, ou encore le rendement du capteur CCD<sup>(\*)</sup>, l'information effectivement enregistrée est celle entourée en rouge. Cette zone de détection correspond à la tâche de diffraction<sup>(\*)</sup> qui n'a pas de relation directe avec le diamètre apparent. L'application doit alors modéliser cette étoile afin d'en déterminer le centre le plus probable, c'est une des causes de la dispersion observée. Une approximation propose que le rayon du modèle doit se situer aux environs du double de la FWHM. Ce paramètre de largeur à mi-hauteur permet au logiciel de rejeter une présence de « pixels chauds », c'est à dire de fausses étoiles créées par des problèmes électroniques, ou bien par un rayon cosmique, par exemple. Si une série donne une FWHM à 3" pour une échelle de 0,7" d'arc par pixel, on peut prendre 4 pixels de détection, estimée par  $[2(E_{image} \times FWHM)]$ . Enfin, le seuil limite de détection est le rapport signal/bruit minimal pour le pixel au centre de la zone détectée. La valeur généralement admissible est entre 4 et 5. Pour les images très bruitées on peut augmenter ce seuil. De même pour détecter des objets très peu visibles, on peut descendre jusqu'à 3, à condition d'avoir une très bonne image (pré-traitements indispensables).



## 5.7. Prism

Ce logiciel se veut comme la trousse à outils de l'astronome et tente de répondre à tous les besoins ! Le travail représenté par cette tâche est monumental pour obtenir au final un produit fini remarquable tant les fonctionnalités sont nombreuses et d'une qualité irréprochable. Malheureusement, lorsque l'on en a pas l'habitude, tout ceci est assez déconcertant, entre les menus dynamiques, les paramétrages, une gestion de licence stricte...

La méthode de reconnaissance est basée sur l'identification triangulaire<sup>(1)</sup>. C'est à dire que l'algorithme utilise, à partir d'une extraction des étoiles du catalogue reliées à l'image analysée, une construction de N triangles par la relation :

$$N_{triangle} = \frac{N_{Objets} \times (N_{Objets} - 1) \times (N_{Objets} - 2)}{6}$$

Prism construit donc pour chaque étoile un triangle avec toutes les autres, en se limitant aux objets les plus brillants dans un premier temps. Un algorithme de comparaison des longueurs des côtés de ces triangles permet d'obtenir un graphique à deux dimensions : Petit Côté / Grand Côté et, Moyen Côté / Grand Côté, la marge d'erreur revient à quantifier la différence de chacun de ces rapports. C'est le paramètre le plus important, exprimé en pixels. Par cette méthode, Prism identifie les étoiles de l'image à celles du catalogue en comparant le nombre de triangles obtenus. Si ce nombre est proche, les étoiles sont probablement identiques, les écarts étant dus aux distorsions géométriques.

La dernière étape est la transformation polynomiale. Pour cela les coordonnées de l'objet de référence sont définis par le couple (X,Y) et les coordonnées de l'objet détecté sont définis par le couple (X',Y'). Ceci donne une équation à 6 inconnues (cf. annexes). Les « triangles » ayant servis à déterminer les objets en commun, le logiciel effectue ce calcul par la méthode des moindres carrés. La solution détermine un résidu pour chacun d'entre eux. Le degré du polynôme est à choisir par approximation mais avec soin pour ne plus être modifié pour une série d'images donnée. (Pour tous les détails, se référer à l'aide fournie avec le logiciel).

Une dernière remarque d'importance est liée à l'orientation de l'image. En effet, pour reconnaître le champ il est important de définir la tolérance que l'on accorde à l'orientation prévue de l'image entre  $0,01^{\text{rad}}$  et  $\pi$ . Une valeur proche de  $\pi$  augmente les temps de calcul, mais permet souvent d'éviter un problème de reconnaissance du champ et donc la non-réduction de l'image.

---

(1) Cf. Documentation Prism, également consultable sur le site [internet officiel](#)



## 6. Plan d'observations

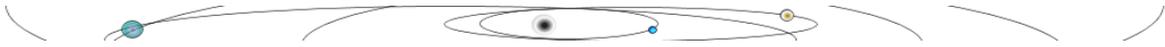
L'ordre des opérations à réaliser peut être le suivant :

- a. Calcul des positions théoriques de l'objet à l'aide des éphémérides
- b. Repérer le champ concerné par l'image (la zone de ciel observée)
- c. Déduire les coordonnées approximatives du centre photographique
- d. Repérer l'objet visé (le satellite)
- e. Mesurer la position de cet objet à l'aide de logiciels spécialisés
- f. Calcul des écarts entre les positions théoriques et les positions observées

Ces mesures se font dans un repère de référence, c'est à dire à partir de corps de références (planètes, étoiles, pulsars, ...) pour une date donnée ( $J2000.0$ , soit la date julienne 2451545) dans un système de référence fixé par l'Union Astronomique Internationale.

L'amélioration d'un modèle passe par sa comparaison aux observations physiques afin de corriger les conditions initiales, dans un premier temps. Les écarts issus de cette comparaison permettent la qualification des logiciels de mesures, comme nous le verrons par la suite. Il est ainsi possible de relever des erreurs humaines qui seraient une cause de mesure aberrante, ce point sera détaillé ultérieurement. Enfin, d'un point de vue mathématique, il existe diverses méthodes afin de compenser la modélisation en vue d'une convergence optimale vers les prédictions de positions.

Les orbites des petits corps du système solaire ont des excentricités significatives. Leur mouvement est soumis à de fortes influences, la force de gravitation, notamment solaire, mais surtout de tous les autres corps plus proches ! De ce fait, les modèles doivent prendre en compte un grand nombre de paramètres tels que : l'obliquité planétaire, l'attraction des satellites principaux et l'attraction des autres planètes. De plus, les périodes de révolution peuvent durer de quelques mois à plusieurs années. Par conséquent, les méthodes numériques contemporaines d'intégrations font tout leur possible pour simuler ces mouvements sur la base de leurs observations. Ceci implique une continuité dans leur étude, car il est difficile d'observer une périodicité dans leurs caractéristiques. (*source : Sternberg Astronomical Institute - SAI, Moscow university*)

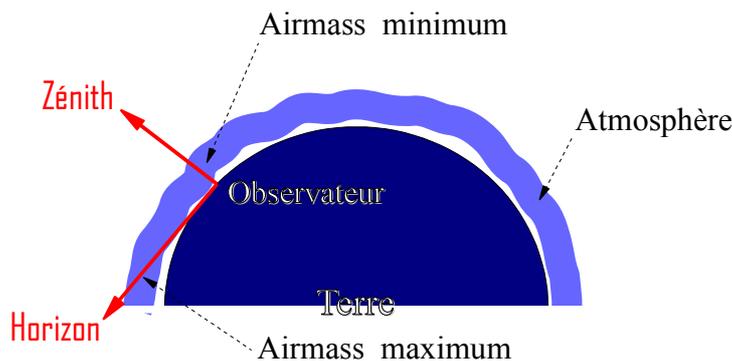


## 6.1. Démarche globale

L'avantage immédiat des astronomes amateurs sur les professionnels est l'utilisation de moyens personnels, ce qui les dispense des contraintes de « demandes de temps ». Toutefois il est recommandé, pour joindre l'utile à l'agréable, de se fier aux propositions des chercheurs dont il est aisé de suivre les demandes en utilisant les cahiers de disponibilités des grands télescopes et ainsi suivre les programmes en cours, ou encore de feuilleter les diverses publications (Cf. liens en annexes). Dans l'avenir un réseau de communication serait à envisager pour structurer aux mieux l'ensemble des moyens entre le milieu professionnel et amateur.

L'objectif est de mesurer un objet, donc un signal particulier, pour alimenter les travaux de recherche fondamentale tels que la modélisation ou l'élaboration d'hypothèses liées à notre univers. Voilà qui est bien vaste ! Ce qu'il faut avoir à l'esprit est que nous travaillons avec un signal et de ce fait il est soumis à divers traitements dans le but d'une exploitation rigoureuse. Une observation devra donc prendre en compte un maximum de paramètres que sont, entre autres, les conditions météorologiques, le matériel utilisé, le lieu d'observation, une base de temps précise. Bien sûr, les longues nuits d'hiver sont propices à observer des cibles multiples, mais pas n'importe comment. Il est important de préparer sa nuit selon les heures de lever des cibles prévues, c'est pourquoi il est utile de connaître l'heure sidérale du lieu. En effet, tout serait plus simple si l'atmosphère terrestre ne modifiait pas notre vision céleste, en fait les déformations dues aux effets de turbulence. On parle d'« airmass » (ce qui correspond à « l'épaisseur » d'atmosphère traversée). Si l'on considère un angle  $z$  de  $0^\circ$  lorsque l'on pointe le zénith et  $90^\circ$  à l'horizon, alors un calcul approximatif nous donne une airmass  $A^{(*)}$  :

$$A = \frac{1}{\cos z}$$



*Il est recommandé d'éviter les observations pour les objets dont l'airmass est supérieur à 2 ( $z=60^\circ$ ). Une remarque cependant en ce qui concerne la diffusion qui dépend de la longueur d'onde d'observation. (Cf. section [10.1.4.]*

*En définitive, un objet aura une observation optimale (nuits et heures) quand le **temps sidéral local** avoisine l'**ascension droite**. La hauteur d'un astre dépend de sa déclinaison en fonction de la latitude et de la date du lieu d'observation. Le temps sidéral local dépend de la longitude et de la date du lieu d'observation.*



## 6.2. Analyse rapide

En cours d'observation il est recommandé de vérifier les acquisitions, d'une part pour vérifier que l'objet est bien dans le champ acquis, et d'autre part pour s'assurer de l'exploitation finale du signal. Le logiciel *Astrometrica* est tout à fait indiqué pour cette tâche, il ne demande que peu de ressource sur l'ordinateur et de ce fait peut être utilisé simultanément à la panoplie des programmes d'acquisitions. Dans l'idée d'une exploitation photométrique, il est également préférable de pratiquer une série d'acquisition dans un laps de temps où les conditions météorologiques sont similaires, ce qui n'est pas forcément le cas avec un système automatisé tel que le propose Prism en utilisant des scripts. Toutefois, des matériels de quantification de la couche nuageuse peuvent pallier efficacement à cette contrainte<sup>(1)</sup>.

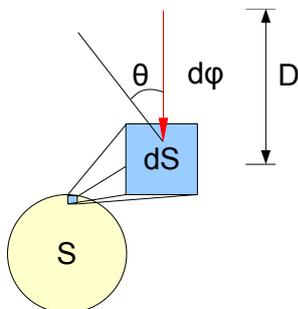
## 6.3. Notions de photométrie

La photométrie consiste à quantifier la quantité d'énergie contenue dans un flux d'onde électromagnétique. Un *bolomètre* est utilisé quand on mesure cette énergie (en  $W.m^2.Hz^{-1}$ ) dans un flux complet, c'est à dire sans différencier les différentes longueurs d'ondes (un spectre complet). Cette information est importante pour l'étude des astéroïdes et nous renseigne sur les états de surfaces. Le principe est généralement le même qu'en astrométrie, on utilise un catalogue et on procède par un calcul différentiel des valeurs nominales pour déduire la valeur sur le signal observé. Un étalonnage est à effectuer lors de chaque observation afin de déterminer un facteur de correction applicable à une même série d'image. La pertinence des résultats à obtenir en astrométrie devrait passer par une mesure photométrique, cela caractérise par exemple les valeurs dites de « fond de ciel » est garantissent par exemple la constante des conditions de prises de vues.

Lorsque l'on observe les astres visuellement on parle de magnitude apparente. Les écarts importants entre les différents objets du ciel ont imposé l'utilisation d'une échelle logarithmique (loi de *Norman Pogson*). Pour une source ponctuelle ou considérée comme telle (on décompose en sous éléments ainsi définis) on écrit :

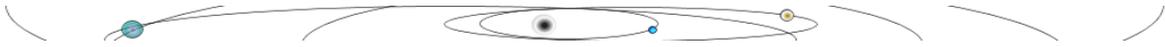
$$E_{\lambda} = h \nu = \frac{hc}{\lambda} \quad \nu \text{ la fréquence, } \lambda \text{ la longueur d'onde et } h \text{ la constante de Planck que l'on s'accorde à sommer}$$

pour toute les longueurs d'ondes considérées dans un flux donné reçu chaque seconde sur une surface  $S$ .



$$Intensité = \frac{d \varphi}{(dS \cos \Theta) / D^2} \text{ en stéradians (sr)}$$

(1) [Astronomical society of Australia](#) ou [Kitt Peak national observatory](#)



## 7. Préparation des mesures

La préparation des mesures logicielles doit passer par quelques calculs simples mais répétitifs, comme sur les dates de prises de vues. Une page internet, développée en *Javascript*, est disponible sur mon site<sup>(1)</sup> ce qui permet d'accélérer cette phase du travail. Cette application est développée en langage « Javascript » et peut donc se sauvegarder localement sur un ordinateur pour être utilisée hors connexion. De plus, celle-ci permet de formater les résultats afin de les intégrer directement dans un fichier de type tableur. L'interrogation des serveurs d'éphémérides s'en trouve accélérée puisqu'il n'y plus qu'à procéder par quelques copier/coller. Mais ces opérations sont longues, dépendantes des temps de réponses des serveurs et comportent un risque d'erreur élevé par la multiplication des fichiers de données à manipuler, il faut donc être particulièrement vigilant ! La suite est beaucoup plus « automatique » et bien souvent réalisée par les logiciels.

## 8. Méthodologie d'archivage des résultats

La méthode d'archivage que je propose est la suivante :

Un fichier contenant l'ensemble des données de la réduction d'une image (date et heure associées, ascension droite et déclinaison, taille de la focale, liste des étoiles trouvées et utilisées pour effectuer la réduction, résidus pour chacune de ces étoiles, ...). Finalement, l'historique de toutes les réductions effectuées dans un répertoire du nom de l'objet, puis dans un sous répertoire portant le nom rapporté à la date.

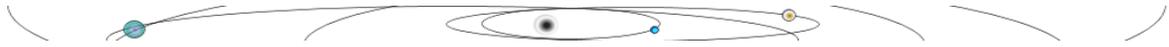
Ces fichiers portent le nom de l'image traitée et sont de type texte brute (ASCII) pour limiter tout problème de compatibilité lors de la relecture à court et moyen terme.

D'autre part, un **fichier texte** unique pour chaque objet, contenant le résultat complet de toutes les réductions (synthèse). Il comporte une ligne par image et contient les informations suivantes :

- Nom de l'image
- Date moyenne de la prise de vue
- Ascension Droite et Déclinaison mesurée avec le logiciel
- Ascension Droite et Déclinaison calculée par l'éphéméride(s)

---

(1) <http://yann.duchemin.free.fr/astro/studies/mesures.htm>

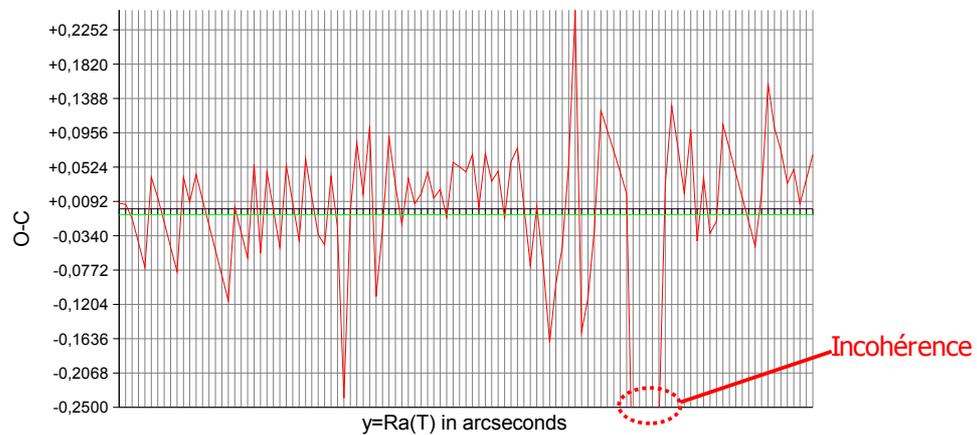


## 9. Analyses

### 9.1. Estimations des mesures

Dans le cas d'images correctement exploitables, et en partant du postulat que les mesures ont été rigoureusement faites, si une erreur dans la méthode ou un mauvais paramétrage logiciel altère les mesures, la divergence causée devrait être absorbée en moyennant sur une période pseudo-continue (une linéarisation du phénomène). Le résultat est donc un ensemble de mesures associées à un logiciel et à un catalogue.

Une mesure discrète n'ayant aucune signification, il convient d'effectuer une vérification par lots. La première étape consiste à calculer l'écart typique par rapport aux éphémérides existantes, un pic pourrait signifier une erreur de datation ou une mauvaise réduction. Un seuil critique du résidu devrait se situer au plus à quelques secondes d'arcs.



L'évaluation par rapport à un modèle sur une période de plusieurs mois, nous permet de calculer un écart-type. Nous considérons pour cela l'ensemble des valeurs consécutives à une série et faisons le calcul suivant :

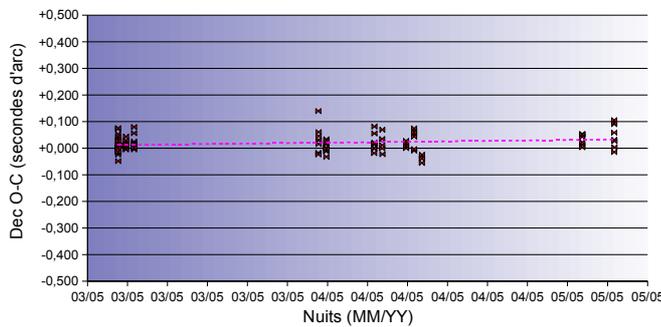
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(O-C) - (\overline{O-C})]^2}{n-1}}$$

Nous déterminons de cette manière une incertitude globale, c'est à dire l'écart entre les Observations et les Calculs, rapportés à la moyenne des carrés (pour une valeur supérieure à 1, d'où le n-1). Une mesure très supérieure à l'écart type peut être considérée comme aberrante et est donc à éliminer (ou à reprendre). Ceci nous renseigne sur la variation des résidus sur la période considérée, élément important pour la comparaison finale avec les éphémérides. Normalement, les mesures devraient être réparties autour d'une droite. On peut aisément le distinguer sur un graphe rapportant les O-C pour les déclinaisons et les ascensions droites.

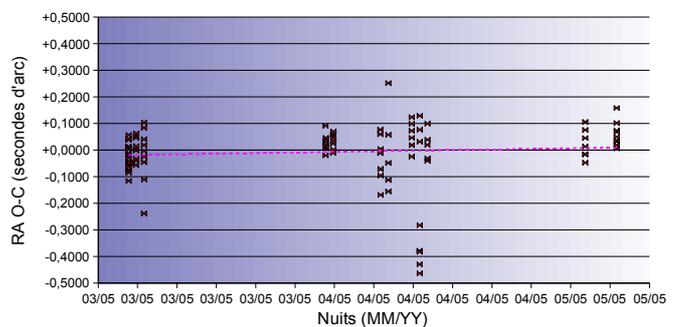


Prenons un exemple :

*Résidus Déclinaison*



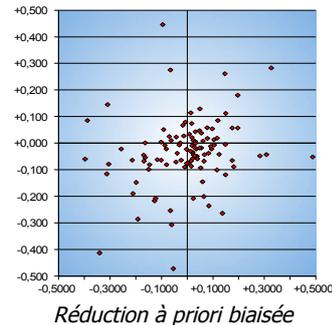
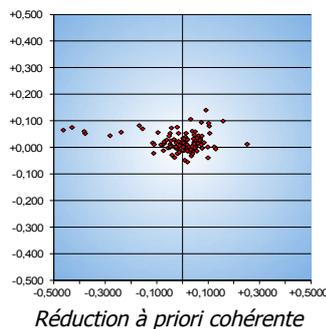
*Résidus Ascension droite*



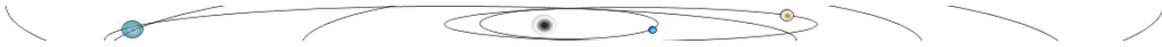
Ces graphiques montrent les O-C en fonction du temps et permettent de qualifier rapidement une campagne d'observations. En effet, lorsque les points semblent s'écarter de l'origine de l'axe des abscisses cela démontre un problème soit au niveau des images pour une date, dans le cas où la déviation est isolée, soit un divergence du modèle pour un écart cyclique ou simplement évolutif. La droite de régression linéaire (en fushia) donne la tendance, a fortiori si le nombre d'observations est grand ET régulier.

## 9.2. Qualification logicielle

Il existe bien évidemment des différences de mesures parmi tous les logiciels pour des raisons évidentes. Certains logiciels sont très simples d'utilisation en premier abord puisque les paramétrages « fins » sont plus obscurs, d'autres nécessitent une phase non négligeable de prise en main de de réglages pour ensuite parvenir à des mesures très régulières en terme de précision. De manière globale, un graphe de type XY correspondant aux résidus dans les deux axes de l'objet d'une même image, devrait tendre vers une zone dense (*faible dispersion*) pour le modèle le plus fiable, comme l'exemple ci-dessous (l'échelle est en secondes d'arc) :



*Il est possible qu'une erreur de paramétrage engendre ce genre d'éparpillement, une comparaison avec des données de référence peut garantir ce point. Une série d'images peut être corrompue par de mauvaises conditions de prise de vue, dans l'absolu un recoupement des mesures est préférable, ce qui est envisageable par la création de groupes de travail, ou le développement d'applications spécifiques.*



### 9.3. Analyse des résultats

Avant d'analyser des données il est nécessaire de prendre en compte plusieurs types d'erreurs qui viennent influencer les mesures. Au minimum, nous prenons un critère  $\Delta_1$  pour la *précision* qui est lié à la résolution de l'image et caractérise le rapport signal/bruit. Un second critère  $\Delta_2$  pour la *dispersion*, qui est la précision des mesures et quantifie le niveau de confiance des valeurs obtenues. Et enfin, un critère  $\Delta_3$  lié à l'erreur systématique, qui détermine la *fiabilité*. Pour ce dernier il convient de prendre en compte la qualité intrinsèque de l'image, un paramètre sur lequel nous ne pouvons pas intervenir. Mais il faut également tenir compte de la qualité des mesures, ou facteur humain lié au logiciel (configuration et développement). Pour une même série on peut supposer que les critères  $\Delta_1$  et  $\Delta_2$  sont linéaires et peuvent donc être éliminés pour un grand nombre d'échantillons mesurés. Il reste  $\Delta_3$  qui, pour être absorbé, nous impose de conserver la même démarche pour les mesures d'où la définition de procédures.

Plusieurs voies d'analyses sont possibles. On peut, à partir d'un ensemble de mesures proches, effectuer une estimation de la position à venir limitée à une courte période. Ce calcul est réalisable à l'aide de logiciels existants tel que *find\_orbit* (<http://www.projectpluto.com>). Prism permet également d'effectuer un calcul approché à partir d'une série de trois mesures. Toutefois ce genre d'interprétation ne permet pas de qualifier les modèles existants entres eux.

Ce qui est intéressant est de comparer les mesures avec des modèles tels que :

1. Le Jet Propulsion Laboratory (**NASA**)
2. L' Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides
3. Le Minor Planet Center (à préférer pour les astéroïdes)

**Remarque** : Les positions des planètes sont rapportées à un repère moyen pour une époque. Les différences sont, un repère inertiel dans le cas du VSOP87, ou tournant pour les autres (DExxx); ainsi que des différences de masses pour les géantes gazeuses, ou bien encore la prise en compte de plus ou moins d'interactions d'objets.

L'IMCCE, bien qu'utilisant des théories planétaire identiques au JPL, propose des résultats avec un plus grand nombre de décimales. De plus, l'IMCCE permet le calcul automatique des résidus en fonction des mesures obtenues, ce qui valide les résultats ([site des éphémérides de l'IMCCE](#)).

L'apport de nouvelles données sont cruciales pour augmenter l'intervalle de validité des modèles existants par la possibilité d'ajustements pour obtenir une nouvelle solution des mouvements de ces ensembles de corps. De même, un modèle est basé sur l'environnement gravitationnel de la planète (Jupiter ou Saturne selon le cas). Il est donc possible d'écrire mathématiquement les équations de cette dynamique. C'est ce processus incrémental qui permet d'obtenir des éphémérides de plus en plus précises. Ce qui est plus délicat, ce sont les erreurs propagées par les calculs d'*intégration numérique*, que les erreurs de mesures viennent fausser. Il est donc impératif d'avoir le plus grand nombre possible d'observations et donc de continuer ces campagnes.

Un ensemble de courbes peut permettre une comparaison visuelle des résultats obtenus, et la détection d'incohérences notables. L'astrométrie est un domaine important pour la compréhension de l'univers et permet de



connaître, grâce à la théorie, la composition de certains objets, de prévoir les mouvements et bien d'autres choses encore.

Ensuite, ce qui est intéressant c'est la comparaison de l'évolution des résidus dans le temps, si les échantillons de données ne sont pas trop éloignés les uns par rapport aux autres. Alors dans ce cas on peut prendre en compte deux cas de figure : soit les résidus sont liés aux erreurs d'observations, soit c'est la théorie qui en est la cause. On peut dire que si la moyenne des résidus par année est importante, alors c'est un problème dû à la théorie. A l'opposé, si les écarts-type des résidus à la moyenne sont importants, c'est un problème lié aux observations.

Et enfin, il est possible de classer les objets pour lesquels les modèles ont été les meilleurs. Ainsi en rapprochant le nombre d'observations et en fonction de la facilité de réduction (objet plus ou moins brillant), il devient plus simple de se faire une idée de la qualité d'une éphéméride. Cela peut être le fait qu'un objet est mieux connu, car plus observé ou bien au contraire qu'il soit nécessaire d'améliorer le modèle.

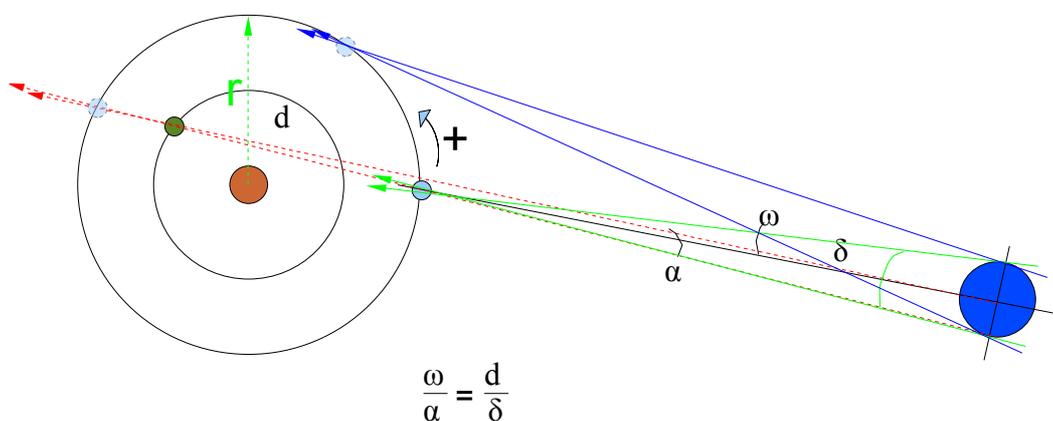
## 10. Aller plus loin

Si nous résumons les méthodes d'observation des positions d'objets stellaires, nous avons en premier lieu les observations photographiques/CCD, les phénomènes d'éclipses et les phénomènes mutuels. La précision des mesures obtenues n'est pas équivalente, mais la complexité des moyens nécessaires est à la source de la performance visée. Les phénomènes d'éclipses et mutuels impliquent une mesure temporelle très fiable, disons de l'ordre du 1/10<sup>ème</sup> de seconde et l'analyse devra s'effectuer avec une expertise des effets photométriques sur l'ensemble de la chaîne d'acquisition, c'est à dire de l'objet à l'optique.

### 10.1. Effets astrométriques faibles

#### 10.1.1. Effet de parallaxe

Il est indispensable de prendre en compte la position exacte de l'observateur terrestre, c'est pourquoi nous travaillons en coordonnées topocentriques.



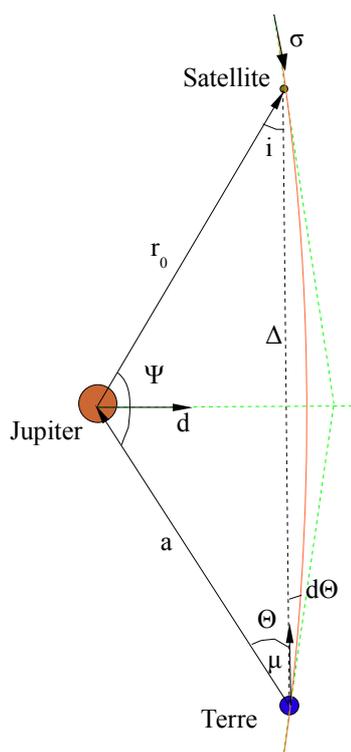


Le parallaxe correspond donc à l'angle depuis lequel un observateur peut voir un objet situé à une distance  $d$  dite de référence. On distingue la parallaxe diurne, qui est l'angle sous lequel on mesure le rayon terrestre partant du centre de la Terre au lieu d'observation depuis un astre. Cet angle est négligeable pour les étoiles considérées à une distance infinie (rapport distance objet sur diamètre terrestre). Cependant, il n'en est pas de même lorsque l'on se situe dans le système solaire. C'est le rapport entre la parallaxe horizontale équatoriale moyenne du Soleil et la parallaxe horizontale d'un astre que l'on détermine la distance nous séparant de ce même astre. D'autre part la parallaxe annuelle d'une étoile correspond à l'angle sous lequel on verrait, depuis cette étoile, le demi grand axe de l'orbite terrestre.

### 10.1.2. Effet relativiste

Bien que faibles, les effets relativistes de la lumière engendrés par les géantes gazeuses, telles que Jupiter et Saturne, lors des observations de leurs satellites devrait être pris en compte pour obtenir une précision de l'ordre millième de seconde d'arc.

A titre d'information, il est intéressant de savoir que cet effet à été quantifié dans la thèse de **Daniel Hestroffer** (1994) et s'exprime, dans le cas d'un corps situé à une distance finie, par la relation :



$$d\Theta = 2 \frac{m}{a} \frac{\sin \Psi}{(1 + \cos \Psi)}$$

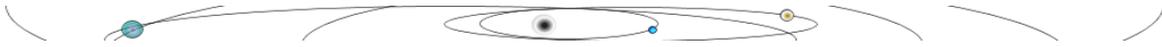
$m$  est le rayon relativiste de Jupiter soit  $1,4m^{(1)}$ ,  $a$  est la distance Terre-Jupiter,  $\Psi$  l'angle de direction Jupiter-Terre et Jupiter-Satellite. D. Hestroffer rapporte que les effets sur l'observation des satellites proches de Jupiter sont de l'ordre de  $0,06mas$  ( $d\Theta$ ) dans le cas maximal. En outre les effets considérés sur Saturne et Uranus sont d'autant plus faibles que les satellites sont éloignés des observations terrestres. A ce jour sur Terre, même avec un grand télescope de type « VLT » (voir le [site internet de l'ESO](#)), la précision n'atteint pas plus de  $1mas$ . Mais dans le cas d'observations spatiales, comme prochainement avec « GAIA », la précision se situera vers  **$1\mu as$**  d'un point de vue de la position, du parallaxe et du mouvement propre des étoiles. Il devient alors impératif, lors du suivi du signal (lumière en provenance de l'objet étudié) de prendre en compte les variations de trajectoires dues à la courbure de l'espace-temps du système solaire.

Déviation relativiste/D. Hestroffer/IMCCE

*Il est évident que l'astrométrie amateur, telle qu'elle est proposée dans ce document, peut se soustraire à ces calculs.*

(1) Le rayon relativiste est donné par  $m = \frac{GM}{c^2}$  avec  $G$  la constante de gravitation,  $M$  la masse et  $c$  la vitesse de la lumière

(référence : **P. Descamps**/ Astrométrie de haute précision, dynamique et planétologie)



### 10.1.3. Effet de marées

Parmi les effets dynamiques applicables par la planète mère sur ces satellites, les effets de marées sont de loin les plus notables, ce qui leur vaut de nombreuses études. Ce qu'il faut retenir dans ce cas, est l'influence engendrée par ce type de force sur l'excentricité des orbites. *La résultante est une accélération (très faible) qui se traduit par un décalage en longitude au cours du temps.* Cependant les périodes de révolution des objets étudiés ne facilite pas la détermination des termes à inclure dans les théories dynamiques. Cela ne peut être fait que sur la durée pour laquelle l'on dispose d'observations (d'où l'importance numériques de celles-ci). Des recherches en cours tentent de modéliser au mieux ses influences en fonction d'un grand nombre de critères tels que les masses, la composition, les distances et les positions; ceci devra permettre une estimation de ces termes pour des périodes non observées.

Autre fait intéressant, l'existence de ces accélérations est trahit par des activités sismiques telles qu'on peut les constater sur Io. Il s'agit de la conséquence directe de l'énergie engendrée à l'intérieur des corps qui sont soumis à ces accélérations. Ainsi, les surfaces présentant des traces d'activités récentes prouvent qu'une source énergétique existe. L'étude de ces forces permet de comprendre les étapes d'activités volcaniques et de déterminer si il s'agit d'un phénomène de résonance entre 2 corps ce qui tend à proposer une activité cyclique ou bien au contraire à une évolution discrète plutôt en extinction. Dernier point important concernant l'activité volcanique, il est possible lors d'occultation observées en proche-infrarouge de localiser un séisme de surface et d'en donner les caractéristiques comme les dimensions ou la température.

### 10.1.4. Effets atmosphériques

La section [6.2.] a abordé la notion d'airmass qui lie la qualité d'une observation à « l'épaisseur » de l'atmosphère traversée. Cette notion est généralement suffisante, car les modèles sont dit « *airless* » c'est à dire qu'ils ne prennent pas en compte, tout comme les catalogues d'étoiles, les phénomènes de réfractions. Lorsque l'on a besoin de la position apparente, on doit ajouter des corrections prenant en compte le lieu, et la date de l'observation.

On distingue en premier lieu le phénomène d'*absorption*, qui d'un point de vue général détermine un *facteur de transmission* définissant l'affaiblissement d'un signal du à la traversée d'un signal dans un corps absorbant (atmosphère, verre, ...). Les nuages composé d'eau absorbent la lumière et nous apparaissent ainsi gris.

La *diffusion* atmosphérique, proche du phénomène d'absorption caractérise la manière dont un corps va diffuser un flux électromagnétique en fonction de la longueur d'onde de celui-ci. Pour l'anecdote le bleu est 16 fois plus diffusé que le rouge par notre atmosphère ce qui fait que nous le percevons ainsi qu'il est. De même, lorsque la couche d'air est épaisse, comme au raz de l'horizon, les objets nous apparaissent plus rouge.

La *réfraction* atmosphérique fait qu'un objet observé dans une direction apparente à l'observateur est en fait déviée par rapport à sa direction vraie d'un facteur dépendant de la composition chimique ainsi que de la pression qu'exerce le corps traversé. La correction dépend de la position de l'objet par rapport au zénith et c'est par exemple ce qui distingue les heures de lever/coucher du soleil (civil, maritime, astronomique).



## 10.2. Astrométrie d'occultations

L'astrométrie du mouvement par rapport à un champ d'étoiles permet dans un premier temps la correction des conditions initiales (comparaison modèles dynamiques / observations). Une astrométrie de précision (de l'ordre de 0,01" d'arc) fournit des informations sur la structure, la forme ou encore les dimensions. A précision peut être grandement améliorées par la mesure de certains phénomènes naturels que sont les occultations ou les phénomènes mutuels. Tout ceci en vue de déterminer les paramètres indispensables aux modélisations dynamiques.

### 10.2.1. Occultations/éclipses

L'astrométrie d'occultation est utile pour les astéroïdes et l'amélioration de la connaissance de leur orbite. Malheureusement les situations exploitables sont assez rares et nécessite une excellente prévision du phénomène. La richesse scientifique de telles observations requiert une collaboration d'observateurs multiples (éloignés géographiquement), ce qui sous entend une coordination internationale. Deux organisations existent : **EAON** (*European Asteroidale Occultation Network*) et **IOTA** (*International Occultation Timing Association*)<sup>(1)</sup>.

### 10.2.2. Phénomènes mutuels

Ces phénomènes, où au moins deux des satellites de Jupiter (*Phému*), ou de Saturne (*PhéSat*) sont dans le plan équatorial de la planète, de la Terre et du Soleil. Cette situation n'apparaît que cycliquement, mais il est permis d'obtenir une très grande précision sur les réductions astrométriques correspondantes. Toutefois, il est indispensable de connaître au mieux les effets lumineux engendrés à la surfaces de ces petits corps. Ces paramètres de surfaces sont liés aux propriétés physiques de ceux-ci et on parle de l'albédo, de la porosité, de la rugosité ou tout « simplement » de la forme. La mesure photométrique doit se faire entre 0,1 et 1 seconde, du fait de la vitesse relative des satellites, avec une possibilité de détecter une différence de magnitude de l'ordre de 0,1

Remarque à propose du chronométrage qui intervient grandement en astrométrie. La variation de distance peut se mesurer dans un champ stellaire, de différente manière, par exemple avec la parallaxe mais mieux encore entre l'objet et l'observateur. Ainsi, la mesure de cette variation est faite à partir d'un temps  $\Delta t$ , qui correspond à la durée qu'à mis la lumière pour nous parvenir depuis l'objet. Le plus simple est alors d'estimer la variation d'un signal périodique, dans ce cas  $\Delta t$  est alors le retard, ou l'avance, du temps  $T$  d'arrivée du signal par rapport à un temps nominal  $T_0$ , dit « signal non perturbé ». C'est pourquoi, les pulsars sont intéressant pour la génération d'un signal impulsionnel (« *pulse* ») car ils sont d'une très grande précision dans les émissions de ce signal et extrêmement éloignés.

---

(1) Liens internet > [EAON](#), [IOTA](#)



## 11. Conclusion

Au travers de ce document un grand nombre de notions complexes sont abordées, certaines beaucoup trop rapidement ce qui m'incitera, dans l'avenir, à développer certaines parties voire à en ajouter.

Mon objectif est d'apporter aux astronomes amateurs les éléments essentiels pour réaliser des observations exploitables garantissant une collaboration amateurs/pros, j'espère y parvenir! Cependant, cette collaboration passe bien évidemment par un partage des connaissances qui devra forcer d'une part les amateurs à structurer leurs observations, ce qui en soit n'est pas une réelle contrainte et bien au contraire cela offre un attrait supplémentaire à la passion. D'autre part, les professionnels devront être capables de formuler une expression de besoins claire et idéalement de créer des cellules, ou groupe de travail permettant cet échange d'informations. D'autres domaines ont déjà prouvé l'intérêt de cette collaboration, c'est notamment le cas en spectrométrie, voir le site de Christian BUIL (<http://www.astrosurf.com/buil> ou <http://www.astrosurf.com/aras/>).

Ce système d'observations collaboratives est très motivante pour les amateurs, et extrêmement utile pour certains travaux qui ne peuvent pas trouver de place dans des structures professionnelles plus contraintes. Pour les professionnels, au delà de l'investissement en temps passé pour la diffusion d'informations et l'organisation générale, c'est une disponibilité accrue de ressources variées et idéalement réparties géographiquement.

Pour terminer n'hésitez pas à me contacter pour partager les travaux engagés dans le domaine de l'astrométrie ou tout simplement pour me faire part de votre point de vue sur l'astronomie amateur en général.

La page d'entrée de mon site qui est consacrée à l'astrométrie, se trouve à l'adresse suivante :

<http://yann.duchemin.free.fr/astro/studies/astrometrie.htm>



**ADU** : Analog to Digital Unit est l'unité de mesure d'un pixel, qui exprime la tension de lecture de celui-ci en comparaison à la tension maximale du convertisseur analogique vers numérique.

**Airy** (tâche d') : ou tâche de diffraction qui correspond à l'image d'une étoile au travers d'un objectif. Idéalement, cette forme circulaire de rayon  $\rho = \frac{1,22 \lambda F}{D}$  représente près de 98% de l'énergie d'une source ponctuelle.

**Astrométrie** : Définit la position observée en coordonnées sphériques d'un objet projeté sur la sphère céleste, se rapportant à un système de référence.

**Coordonnées** : Les positions absolues sont données la plupart du temps en Ascension Droite et Déclinaison dans un plan équatorial. Le centre équatorial peut être le lieu d'observation, on parle alors de coordonnées topocentriques, ou bien le centre de la Terre on parle alors de coordonnées géocentriques. Ces coordonnées dépendent de l'équateur et de l'équinoxe définis dans un système de référence.

**CCD** : Couple Charged Device, composant électronique qui permet d'enregistrer numériquement des objets très faiblement visible avec des temps de poses raisonnables.

**Centroïde** : Détermine le centre de l'objet par rapport aux pixels de l'image, sorte de barycentre en fonction de l'intensité d'une zone.

**Diffraction** : Déformation de la fréquence initiale liés a des interférences. Dans notre cas, la lumière nous parvenant d'un astre est déformée du fait de son passage dans l'atmosphère terrestre qui est plus ou moins transparent et perturbé par les différences de température créant ainsi des mouvements.

**Éphéméride** : Modèle prévisionnel issu des observations. Toutefois il convient de distinguer deux types d'éphémérides, ceux dit de *position* qui caractérisent la trajectoire, une présence dans un champ ou servant au dénombrement d'objets. D'autre part les éphémérides *physiques* qui caractérisent l'orientation, la forme d'objet pour une date donnée.

**FITS** : "Flexible Image Transport System", format scientifique d'image standardisé, voir : <http://fits.gsfc.nasa.gov/>

**Réduction** : Dans notre cas, calculs des coordonnées relatives en utilisant un catalogue de référence permettant d'améliorer significativement la précision.

**Étalonnage d'une image** : Repérer le champ correspondant à l'image étudiée par rapport à un catalogue de références d'étoiles afin de déterminer la focale de la chaîne optique dont l'on déduit l'échelle de l'image, la rotation de champ éventuelle, et finalement la position des objets présents.



**Magnitude** : Mesure de l'éclat d'un objet. On distingue la magnitude apparente et la magnitude absolue. La première mesure l'éclat tel que réellement observé par un observateur (terrestre). La seconde permet de comparer les éclats intrinsèques de plusieurs objets quelle que soit leur distance par rapport à l'observateur. Elle correspond à la magnitude apparente qui serait mesurée si l'objet se trouvait à une distance de 10 parsecs de l'observateur. Remarque : plus la magnitude est élevée, moins l'objet est lumineux.

**mas** : Milliarcseconde, unité de mesure rapportée à un angle.

**Parsec** : Distance à laquelle une unité astronomique (ua : 149 597 870 691 Km, soit la distance moyenne Terre-Soleil) sous-tend à un angle d'une seconde d'arc.

**Pixel** : Plus petite représentation de l'information sur un écran cathodique ou image numérique. Ce mot provient de l'anglais « picture element » ou « élément d'image ».

**Radiale (vitesse)** : La vitesse radiale correspond à la vitesse d'un objet dans la direction de l'observateur. Cette propriété généralement mesurée à l'aide d'un spectromètre.

**Résidus** : La différence entre les éphémérides issues des observations (résultats des mesures logiciels) et les éphémérides calculées.

**Seeing** : Quantifie la qualité d'une image par le rendu d'une source ponctuelle. Cette caractéristique se mesure à partir de la FWHM (cf. section [\[3.2.\]](#)) que l'on multiplie par la résolution de l'image. *Exemple, pour une image avec une résolution de 0,7" d'arc par pixel, si la FWHM mesurée est de 5,5 alors le « seeing » est de 3,85" ce qui est plutôt médiocre.* Dans des conditions d'observations idéales, le rendu d'une étoile est inversement proportionnel au diamètre du télescope, on cherchera donc une FWHM la plus faible possible.



# Annexes



- crédit U.S. Naval Observatory -



**Synthèse de mesures des principaux logiciels :**

Objet : **Himalia (J6)**  
 Taille : **85Km de rayon**  
 Découverte : **1904 (Perrine)**  
 Date Prise de Vue : **2005 04 13, 21:41:21 UT**  
 Observatoire : **Haute Provence (511)**

mesures

Logiciel	Catalogue	Informations Images						Himalia Mesure							
		Centre			Focale	Rotation	Ra			Dec					
		H	M	S			D	M	S	H	M	S	D	M	S
Astrometrica Version 4	UCAC-2	12	49	24,69	-4	2	9	7231,4	-0,23	12	49	26,88	-4	1	19,6
	USNO-A2	12	49	24,71	-4	2	8,7	7231,9	-0,24	12	49	26,92	-4	1	19,4
	USNO-B1	12	49	24,7	-4	2	8,9	7231,1	-0,26	12	49	26,89	-4	1	19,5
	USNO-SA2	12	49	24,72	-4	2	8,8	7232,7	-0,25	12	49	26,9	-4	1	19,4
Prism Version 6	USNO-A2									12	49	26,9	-4	1	19,4
	UCAC-2									12	49	28,88	-4	1	19,6
	GSC									12	49	26,89	-4	1	20
Iris Version 5	USNO-A2									12	49	26,89	-4	1	19,4
AstroArt Version 3	USNO-A2	*								12	49	26,87	-4	1	20,14
	USNO-SA1/2	*								12	49	24,21	-4	1	33,27

\* Non corrigé !

Planet: Jupiter (DE405)  
 Satellite: J6 Himalia (Jacobson (2000) Astron.J., v.120)  
 Observatory N: 511 - Haute Provence  
 Timescale: UTC  
 Mean equator and equinox of J2000.  
 Coordinates astrometric

Year	M	D	H	M	S	alpha (h m s)	delta (° ' ")
2005	4	13	21	41	21.50	12 49 26.891527	-4 1 19.616310

Present field : 12° x 12°  
 Time moment: 2005 4 13 21 41 21.50 (UTC)  
 Observatory: 511 - Haute Provence

IMCCE/SAI. Natural Satellites Ephemeris Server. MULTI-SAT.  
 Satellites of Jupiter

Reference body: Jupiter  
 Marked satellite: J6 Himalia  
 Epoch of equator and equinox J2000  
 Differential coordinates

Refresh image  
 With 12" field scale  
 One time step of 1.0000 days  
 Back  
 Non  
 Forward

Marked satellite: J6 Himalia

Center of the field:  
 $\alpha = 12^{\text{h}} 48^{\text{m}} 47.393^{\text{s}}$   
 $\delta = -3^{\circ} 30' 40.38''$   
 $H = 22^{\text{h}} 43^{\text{m}} 50.186^{\text{s}}$   
 Object : h = 39.716°  
 Sun : h = -30.740°

Coordinates and magnitudes

Ci-contre la configuration des satellites extérieurs de Jupiter et l'éphéméride d'Himalia à comparer avec le tableau de mesures.

(Attention les données sont présentées en superposition à la différence du serveur internet de l'IMCCE qui utilise 2 pages).

Le tableau ci-dessus apporte simplement une perspective des résultats des mesures par le biais de différents catalogues de références sur une seule image. Remarquez que les résultats fournis pour *AstroArt* ne prennent pas en compte l'UCAC-2 déjà présentés dans ce document pour la version 4. Toutefois ces données ne sont pas suffisantes pour tirer des conclusions sur le comportement de chaque logiciel, cela montre simplement la cohésion existante entre chaque algorithme comparés au modèle d'un objet plutôt bien connu.



**Tableau récapitulatif des logiciels :**

<b>Iris</b>	
Catalogues utilisables	<i>Tycho2 GSC, GSC-ACT USNO-A2 USNO-SA2</i>
Avantages	<i>langue français/anglais utilisable par menu ou par interpréteur de commandes très performant (rapidité d'exécution) possibilité d'utiliser des scripts de commandes mise à jour fréquente</i>
Inconvénients	<i>Prise en main délicate, mais bonne documentation Sélection des étoiles manuelles</i>
Précision relative	<i>RA: 0,04 s - Dec: 0,7s</i>
Pré-requis(indicatif)	<i>Ordinateur de type PC Pentium 233Mhz – 64Mo de RAM – MS-Windows<sup>tm</sup> 98</i>
Licence	<i>Gratuit</i>

<b>Astrometrica</b>	
Catalogues utilisables	<i>UCAC2 / 3 USNO-B1 (en ligne) USNO-A2 USNO-SA2</i>
Avantages	<i>Utilisable par menu, grande simplicité (attention aux paramétrages) très performant (rapidité d'exécution) Utilise des catalogues en ligne Visualisation de la courbe de Gauss de chaque étoile identifiée</i>
Inconvénients	<i>Impossibilité d'utiliser des scripts langue anglaise Une fenêtre différente pour visualiser les propriétés de chaque étoile identifiée</i>
Précision relative	<i>RA: 0,05 s - Dec: 0,7 s</i>
Pré-requis (indicatif)	<i>Ordinateur de type PC Pentium III 800Mhz – 256Mo de RAM – MS-Windows<sup>sm</sup> 98</i>
Licence	<i>Commercial – 25€</i>

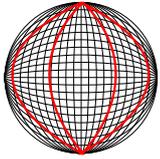


<b>Astroart</b>	
Catalogues utilisables	GSC USNO-A2 USNO-SA1 USNO-SA2 UCAC-2 / 3
Avantages	Validation automatique des étoiles trouvées à l'aide d'un atlas Cet atlas contient les étoiles du catalogue utilisé Vérification visuelle de la correspondance champ observé – champ de référence Résultats fiables Langue français/anglais Manuel d'utilisation
Inconvénients	Pas de calcul automatique des résidus Choix de catalogues limité Visualisation délicate sur un écran standard (2 écrans recommandés)
Précision relative	RA: 0,04 s - Dec: 1,02 s
Pré-requis (indicatif)	Ordinateur de type PC Pentium 75Mhz avec 32Mo de RAM et 256 couleurs – MS-Windows <sup>sm</sup> 98
Licence	Commercial – 185\$ U.S. (Il existe une licence multi-poste)

<b>Prism</b>	
Catalogues utilisables	Hipparcos BSC UCAC 1,2 USNO SA, A1,A2 Tycho 1,2 GSC GSC-ACT
Avantages	Validation automatique des étoiles trouvées Présentation des résidus obtenus Langue français/anglais Manuel d'utilisation assez complet Aide en ligne Grand choix de catalogues
Inconvénients	Prix des licences pour utiliser les seules fonctions d'astrométrie
Précision relative	RA: 0,04 s - Dec: 0,35 s
Pré-requis (indicatif)	Ordinateur de type PC Pentium 1Ghz, Carte graphique Super-VGA 1024x768, 16M couleurs, 600 Mo d'espace libre sur le disque dur, 256Mo de mémoire RAM – MS-Windows <sup>sm</sup> 2000
Licence	Commercial - à partir de 49 €

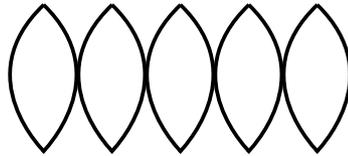


*Remarque sur la représentation des cartes célestes :*



Sphère  
Céleste

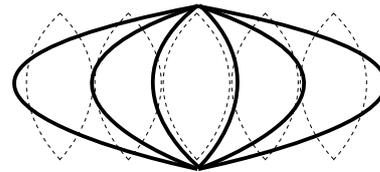
Les étoiles nous apparaissent sur une sphère : la voûte céleste dont le centre est la Terre.



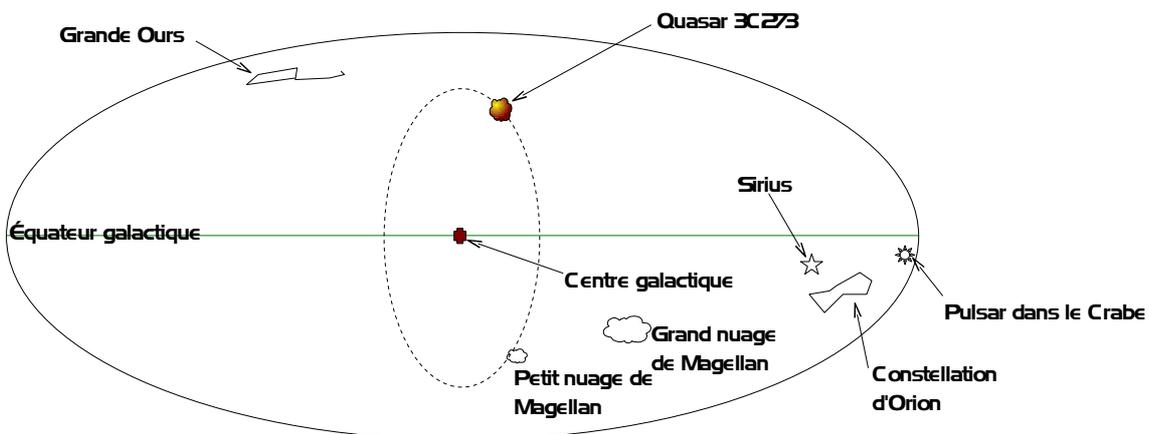
Découpage en « quartiers »

Cette sphère imaginaire est également découpée en quartiers pour obtenir une vision dans le plan.

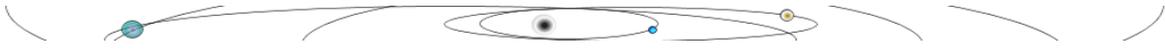
Une projection particulière permet un regroupement des parties supérieures tout en conservant un regroupement de l'axe horizontal.



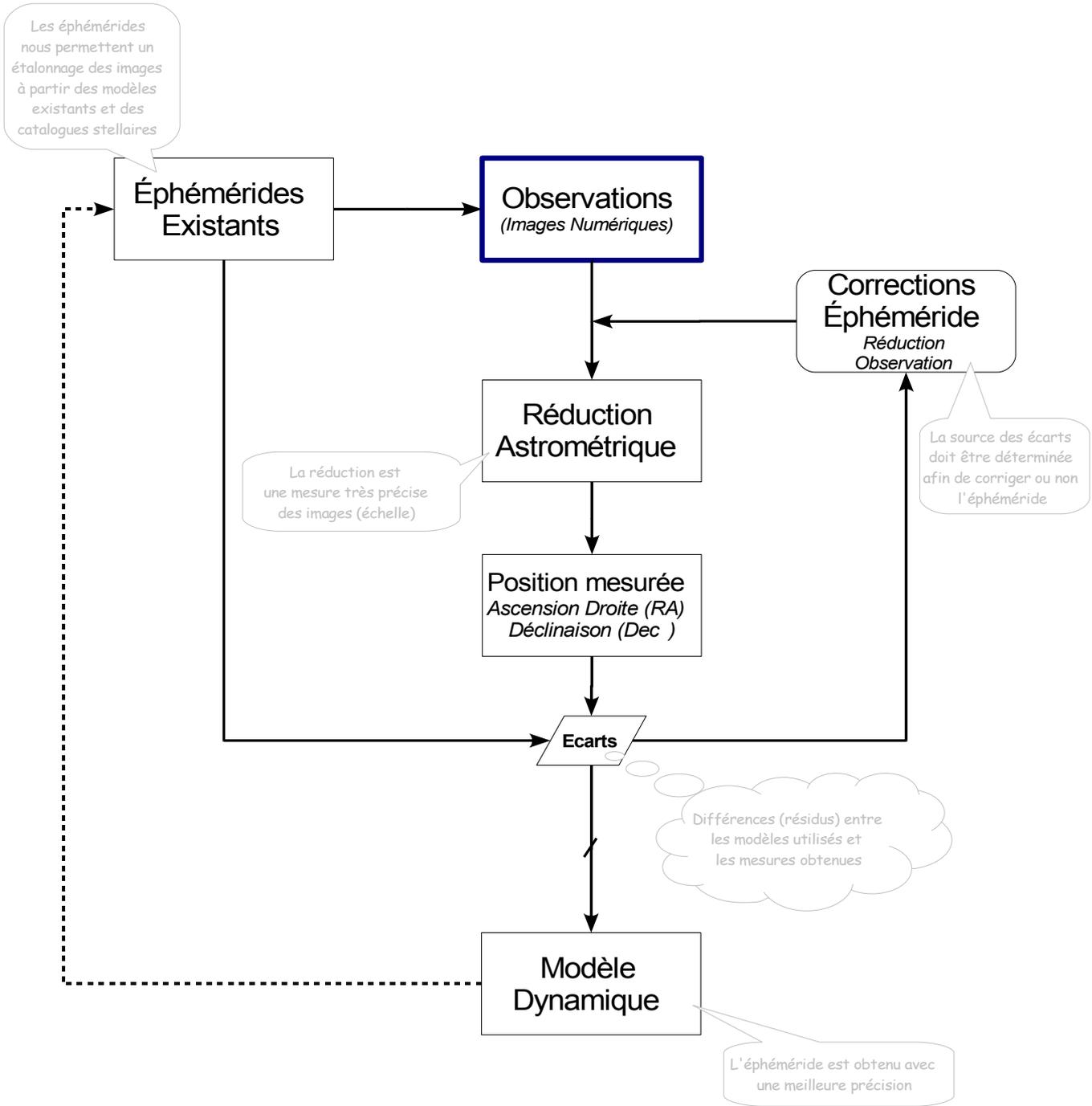
Projection



Quelques points de repères



# Réduction astrométrique Synoptique Général





*Quelques formules utiles :*

Calcul de l'échantillonnage en sec/pixel, des images :  $E_{image} = 206 \times \left( \frac{Taille_{pixel}}{focale} \right)$  focale, pixel en mm

Calcul approché de l'angle par pixel :  $\alpha \simeq \left( \frac{\pi}{180} \right) \times \frac{\phi_{ouverture}}{focale}$  en secondes d'arc

Calcul du champ résultant en minutes d'arc :  $Champ = \left( \frac{(\text{Nombre}_{pixels} \times Taille_{pixel}) \times 180}{focale \cdot \pi} \right) \times 60$

ou plus simplement  $Champ = \frac{\alpha \times Taille_{capteur}}{60}$  en minutes d'arc

Calcul du diamètre apparent de l'objet à mesurer :  $\Phi_{app} = \frac{\Phi_{obj} \times 180}{Distance \cdot \pi} \times 3600$  en secondes d'arc

Calcul du pouvoir séparateur :  $Airy^{radians} = \frac{1,22 \times \lambda}{\Phi_{instrument}}$  avec  $\lambda$  pour longueur d'onde

Calcul de magnitude apparente :  $m_{app} = -2,5 \cdot \log \left( \frac{4L}{\pi D^2} \right)$  avec  $L$  la luminosité ( $W$ )



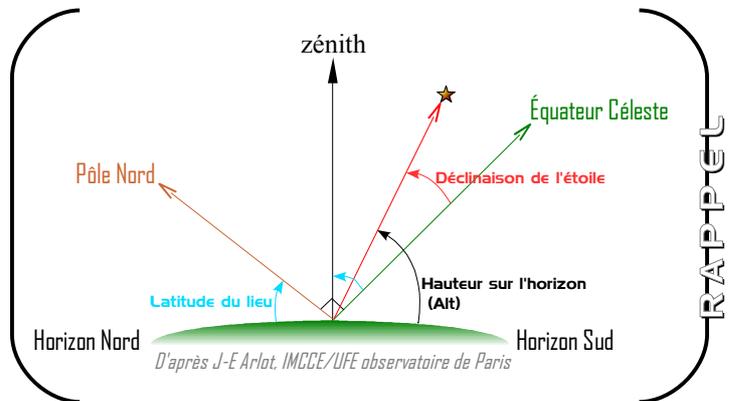
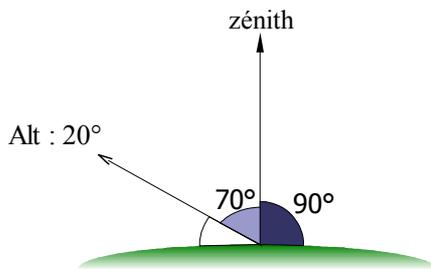
**Algorithme de calcul de l'AirMass :**

Source **Bruce L. Gary** (Document : *Exoplanet observing for amateurs*)

1. Soustraire 2451545 du Jour Julien (observation)
2. Multiplier par 24,065709824419 et additionner 18,697374558
3. soustraire 24 \* Partie\_Entière( résultat #2 / 24 )
4. Ajouter la Longitude Est / 15 [ GMST – Temps Sidéral Moyen à Greenwich ]
5. Si #4 < 0 , additionner 24 [ LST – Temps Sidéral Local ]
6. Multiplier par 15 et soustraire L'ascension Droite RA en degrés [ LHA – Angle Horaire Local ]
7. Si LHA > 180, soustraire 360
8. Calculer le COSINUS ( LHA )<sup>Rad</sup>
9. Multiplier par le COSINUS ( LATITUDE )
10. Multiplier par le COSINUS ( Déclinaison Dec )
11. Additionner SINUS ( Dec ) multiplier par le SINUS ( LATITUDE )

Lorsque l'observation est proche du zénith, la formule approchée de la section [6.1.] est suffisante.

Exemple :



.....

.....

.....

.....

.....

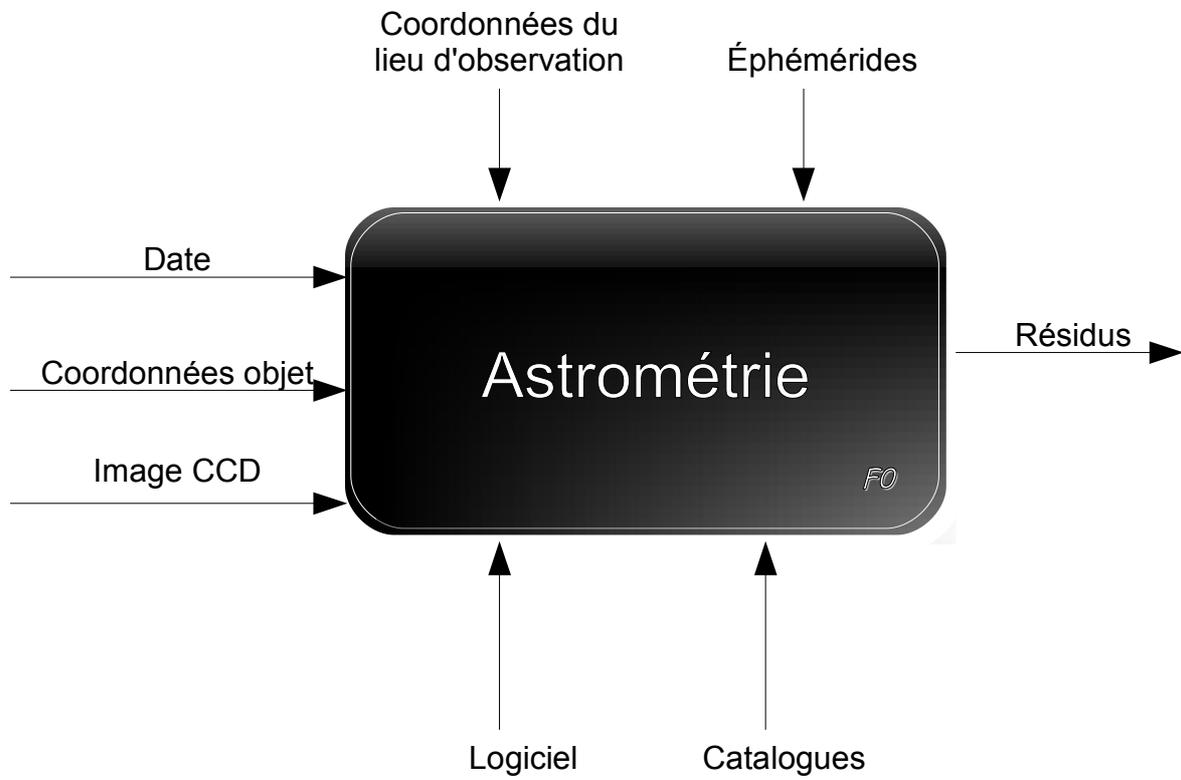
.....

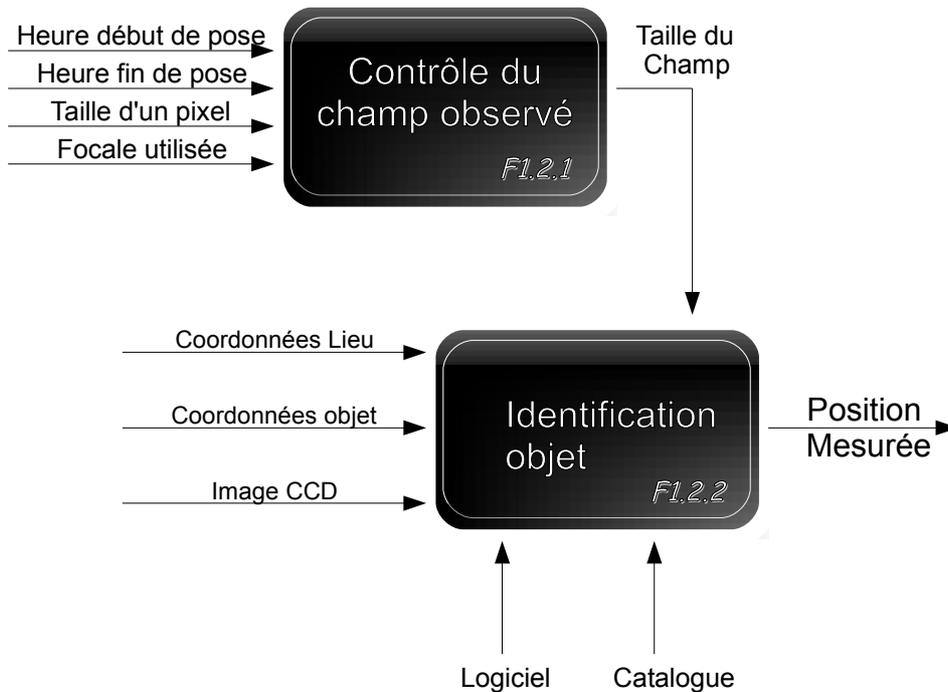
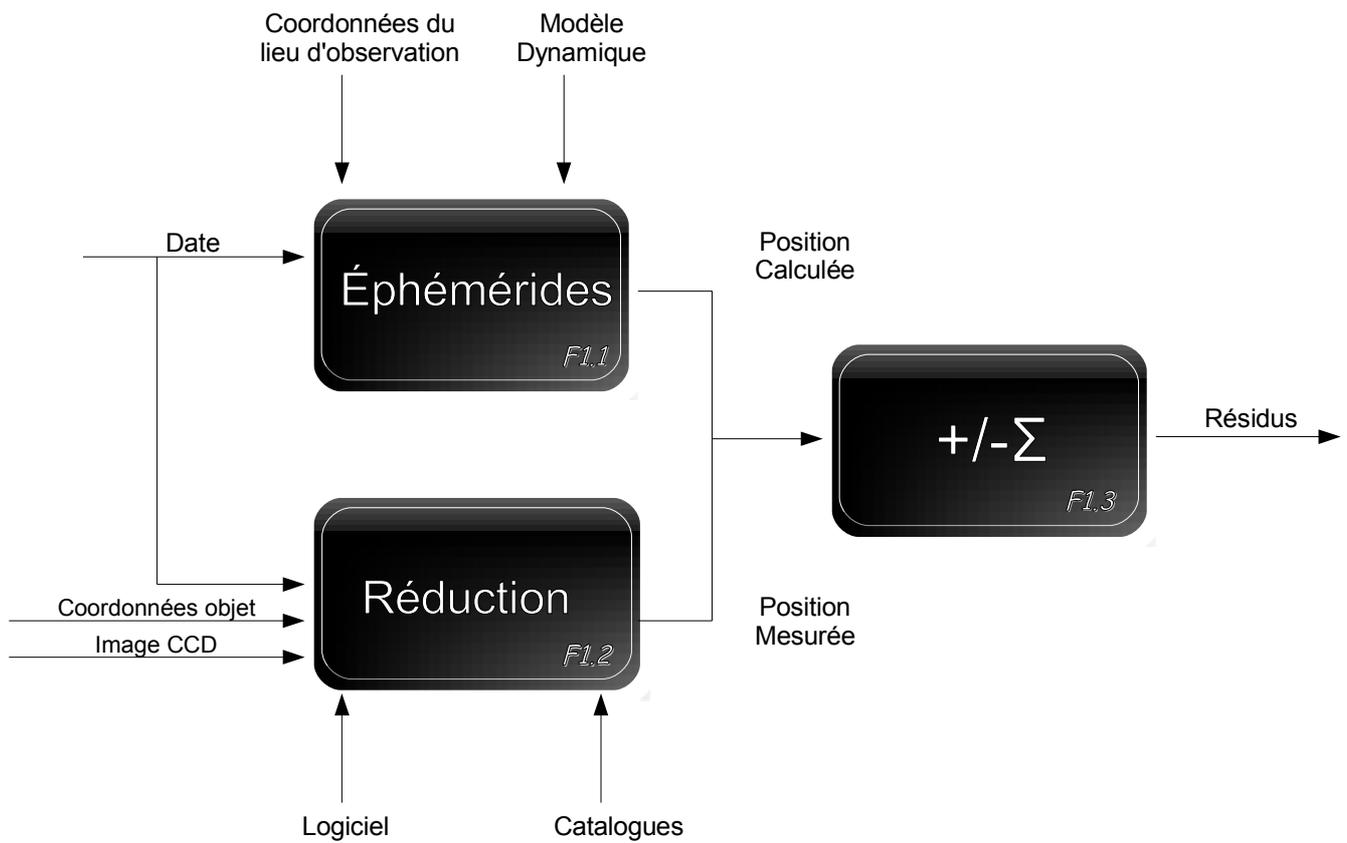
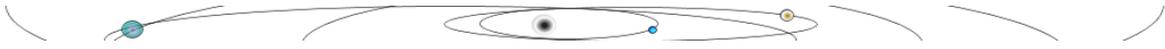
.....

.....



*Schémas fonctionnels :*







### Quelques liens utiles :

#### Éphémérides :

Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides : <http://www.imcce.fr/>  
et plus précisément : [Ephem generator and residuals](#)

Jet Propulsion Laboratory : Ephemeris > <http://ssd.jpl.nasa.gov/?ephemerides>

Minor Planet & Comet Ephemeris > <http://www.cfa.harvard.edu/iau/MPEph/MPEph.html>

#### Logiciels :

MSB-Software/Astroart : <http://www.msb-astroart.com/>

Astrometrica : <http://www.astrometrica.at/>

Prism : <http://www.prism-astro.com/>

SAOImage DS9 : <http://hea-www.harvard.edu/RD/ds9/>

Iris : <http://www.astrosurf.com/buil/>

#### Publications :

Astronomy & Astrophysics : <http://www.aanda.org/>

Cornell University Library : <http://arxiv.org/>

Hyper Articles en Ligne : <http://hal.archives-ouvertes.fr/>

#### Observatoires :

Observatoire de Haute-Provence : <http://www.obs-hp.fr/>

Observatoire de Paris : <http://www.obspm.fr/>

#### Autres ressources :

Positional Astronomy : <http://star-www.st-and.ac.uk/~fv/webnotes/index.html>

USNO CCD Astrograph Catalog : <http://ad.usno.navy.mil/ucac/>

Giant Planet Satellite Page : <http://www.ifa.hawaii.edu/~sheppard/satellites/>

Guide to Minor Body Astrometry : <http://cfa-www.harvard.edu/iau/info/Astrometry.html>

