

Travaux Pratiques d'ASTRONOMIE

d'application du cours sur la sphère céleste et la mesure astrométrique

"Mesure de la position d'un corps céleste: Application aux petits corps du système solaire"

Le but de ce TP est de se familiariser avec la notion de champ en astronomie de position: un télescope donne accès à un morceau de ciel, morceau de la sphère céleste (voir le cours), mais l'image donné par le télescope ne donne pas directement la position d'un corps observé. Pour cela, il est nécessaire de calculer la correspondance entre les unités mesurées sur l'image (millimètres) et les unités de repérage sur le ciel (angles: ascension droite et déclinaison). C'est la méthode du rattachement.

Nous étudierons des images de champ contenant un astéroïde. Nous ferons le calcul à la main qui est peu précis mais qui permet de comprendre la notion d'échelle (et d'orientation si nécessaire). Une comparaison avec une méthode plus précise sera fournie ainsi qu'une comparaison à l'éphéméride de l'astéroïde (position théorique déduite d'un modèle dynamique de l'objet dans le système solaire).

Plan:

- I- Les différents champs selon les télescopes utilisés
- II- Application à l'observation des astéroïdes: leur détection et leur identification
- III- Les coordonnées utilisées
- IV- La mesure de position, le calcul de l'échelle et de l'orientation
- V- Travailler avec Internet

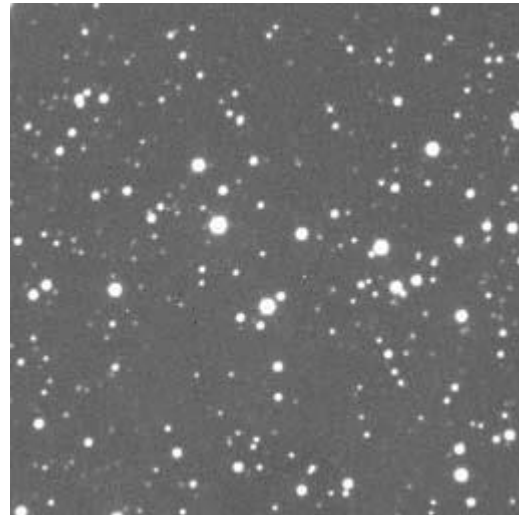
I- Les différents champs selon les télescopes utilisés

Le champ d'un télescope:

Il a été bien expliqué dans le cours que l'observateur terrestre ne pouvait mesurer que des angles sur la sphère céleste pour repérer les astres. Cependant, les télescopes fournissent des images sur lesquelles on va mesurer des distances en millimètres ou en unités arbitraires du récepteur, les "pixels". Comment se fera le passage de ces unités de distance à des unités d'angles? C'est tout le problème de la "réduction" des positions que nous allons étudier grâce à la méthode du « rattachement ».

Dans un champ observé par un télescope et matérialisé par une image photographique ou électronique, on peut repérer des étoiles et des objets inconnus ou connus dont on veut mesurer la position. Les étoiles vont servir de références pour se repérer: grâce aux catalogues d'étoiles, le ciel est "borné" par des étoiles dont la position est bien connue. Ces étoiles vont permettre de calculer l'échelle de notre image observée en secondes de degré par unité de distance sur l'image, c'est-à-dire en millimètres pour un cliché photographique ou en "pixels" pour une image électronique faite par un récepteur CCD. Ce type de récepteur, présent dans tous les caméscopes du commerce, est

composé d'une mosaïque d'éléments sensibles appelés pixels qui recomposent une image.



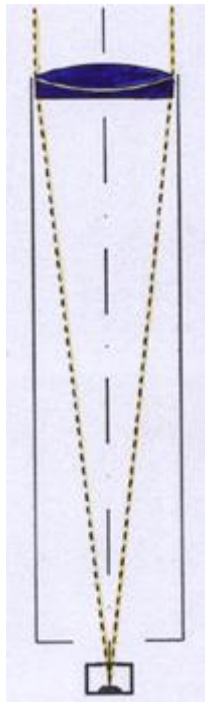
Il s'agit donc d'une matrice de valeurs numériques (chaque valeur est d'autant plus grande que la lumière reçue est importante) dont la taille peut être 512 x 512, 1024 x 1024, 2048 x 2048 pixels, ou plus. A noter que les pixels d'une cible CCD peuvent avoir une taille de 5 à 30 micromètres. La taille des cibles réceptrices est donc dans la plupart des cas de un à deux centimètres.

Ci-dessus une image réalisée à l'observatoire de Haute-Provence: la cible a une taille de 1024 x 1024 pixels qui correspond à 25 x 25 millimètres environ. Chaque pixel a donc une taille de 25 micromètres représentant 0,7 seconde de degré environ et le champ couvert est de 12 minutes de degré.

Le télescope

Le télescope est un instrument d'optique permettant d'obtenir une image d'une fraction du ciel, c'est-à-dire d'une fraction de la sphère céleste.

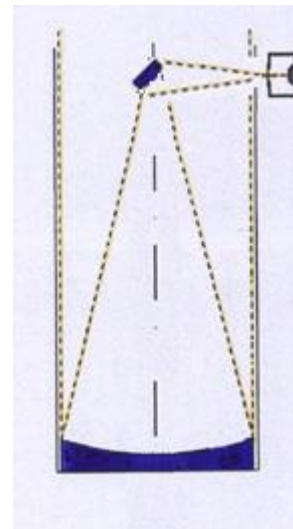
Exemples de schémas optiques de télescopes:



lunette astronomique (réfracteur):
l'objectif réfracte les rayons lumineux et forme l'image au foyer de l'instrument

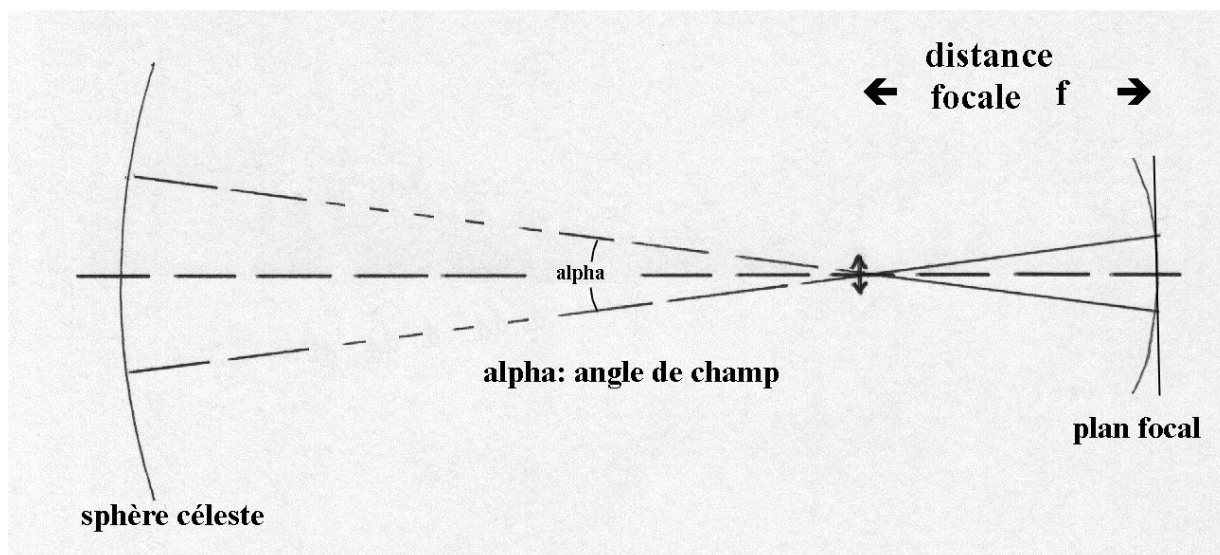


télescope Cassegrain (réflecteur):
le miroir focalise les rayons lumineux au foyer de l'instrument situé derrière le miroir percé d'un trou



télescope Newton (réflecteur):
le miroir focalise les rayons lumineux au foyer de l'instrument situé en dehors du tube du télescope sur le côté.

On appellera "champ" d'un télescope donné, la taille angulaire du morceau de ciel dont on obtient l'image sur le récepteur. Cette taille dépendra donc de la distance focale du télescope ainsi que de la taille réelle du récepteur. Il s'agit du même principe que celui de l'appareil de photo.



L'angle de champ α sur le ciel se transforme en un champ de diamètre (α *radian* x f *millimètres*) en millimètre sur le récepteur au foyer du télescope.
 La longueur d'un arc de cercle de rayon R sous tendu par un angle α est : $R \times \alpha$ *radian*
 (rappel : 180 degrés = 12 heures = π radians)

Connaissant la distance focale du télescope, le calcul de l'échelle est simple: la distance focale correspond au rayon de la sphère céleste, donc à un radian. Un angle d'un radian sera représenté par une distance identique à la focale au foyer du télescope. Dans le cas de l'image ci-dessus, la focale étant de 7 mètres, un radian sera représenté par une image de 7 mètres de large! L'image reçue par le récepteur ayant une dimension de 20 millimètres, il correspondra à 25 mm x 1 radian x 57 degrés x 60 minutes/7000 mm, soit 12 minutes de degré. La connaissance de la focale de l'instrument n'est, en général, pas suffisamment précise et l'étalonnage du champ est indispensable.

Des exemples de champs



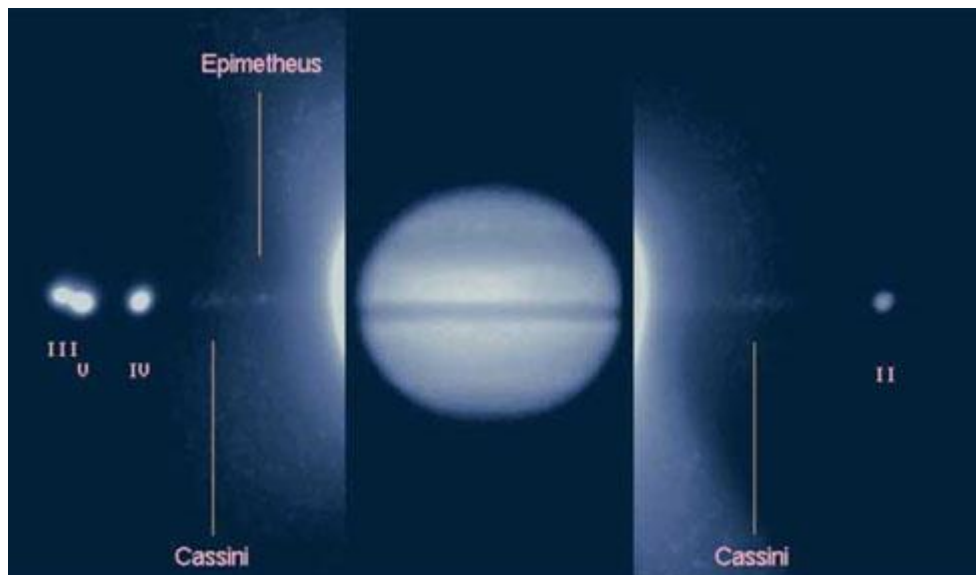
Pour obtenir une image d'une comète passant près de la Terre et visible à l'œil nu dans le ciel, il n'est point besoin d'un télescope. Au contraire il ne faut qu'une très courte focale (un appareil de photo normal) pour réaliser un bon cliché dont le champ atteint plus de 10 degrés.

Ci-contre la comète Hale-Bopp qui est passée près de la Terre en 1997. L'image représente un champ de plusieurs degrés.

Ci-contre une image de la Lune. Le champ est d'environ un degré puisque la Lune a un diamètre apparent de 30 minutes de degré. On utilise un appareil de photo muni d'un téléobjectif (une focale longue pour un appareil de photo) ou une petite lunette astronomique (focale inférieure à 1 mètre).



Le champ occupé par Jupiter et ses satellites galiléens atteint 15 minutes de degré (soit une demi-Lune) et il faut utiliser une lunette astronomique ou un télescope de courte focale (de 1 à 3 mètres) pour en obtenir une image telle que ci-dessus.



Ci-dessus un champ d'une minute de degré (le diamètre apparent de la planète Saturne est de l'ordre de 20 secondes de degré) montrant Saturne et ses satellites proches. L'image a été prise avec le télescope de 1 mètre d'ouverture du Pic du Midi et de focale 20 mètres, nécessaire pour ce type d'image.

II- Application à l'observation des astéroïdes et autres petits corps du système solaire

Leur détection et leur identification

Ayant vu comment l'image se formait derrière un télescope, on va choisir le télescope adéquat pour obtenir des images permettant d'effectuer les mesures.

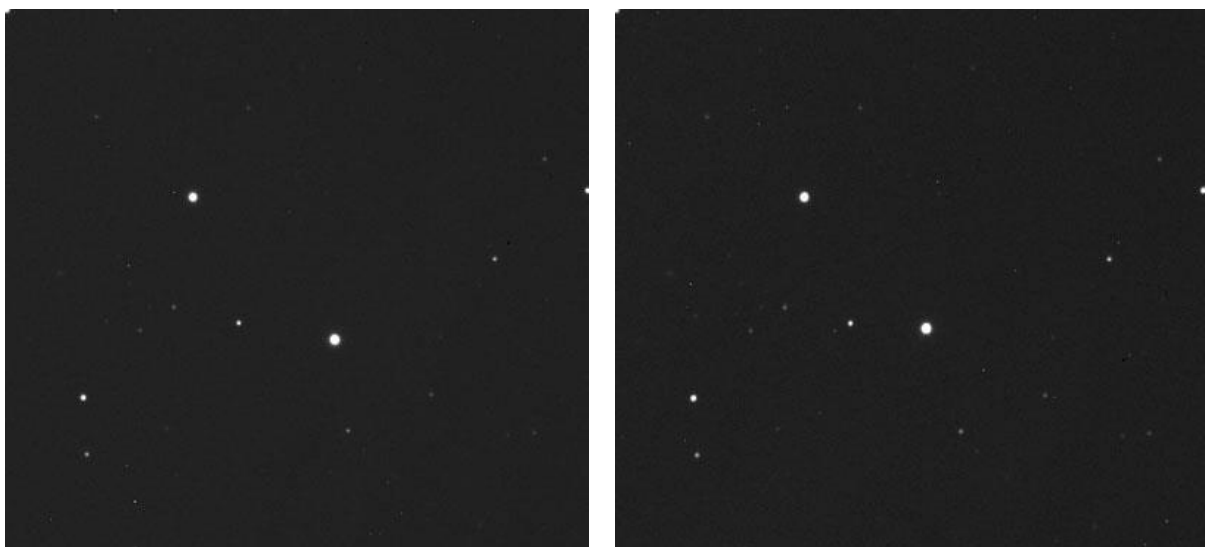
La mesure de la position des astéroïdes, des satellites des planètes et des comètes est essentielle à plusieurs titres:

- étude dynamique de leur mouvement: les observations permettent de valider les modèles dynamiques théoriques construits (éphémérides);
- prédictions de leurs positions, en particulier dans le cas des astéroïdes s'approchant de la Terre et pouvant présenter un danger;
- étude de la distribution des astéroïdes dans le système solaire afin d'avoir des informations sur l'origine et la stabilité à long terme de ce système.

Nous allons donc étudier des images de ces corps, détecter ceux-ci, les identifier et mesurer leurs positions.

Ces objets ne sont visibles depuis la Terre que comme des petits points lumineux sans diamètre apparent semblables aux étoiles. Seul leur mouvement trahit leur présence et c'est le changement de position en quelques minutes qui va trahir leur présence. Les comètes sont souvent entourées d'un halo lumineux : la chevelure et la queue.

Le repérage des astéroïdes : leur détection grâce à leur mouvement et leur position théorique calculée



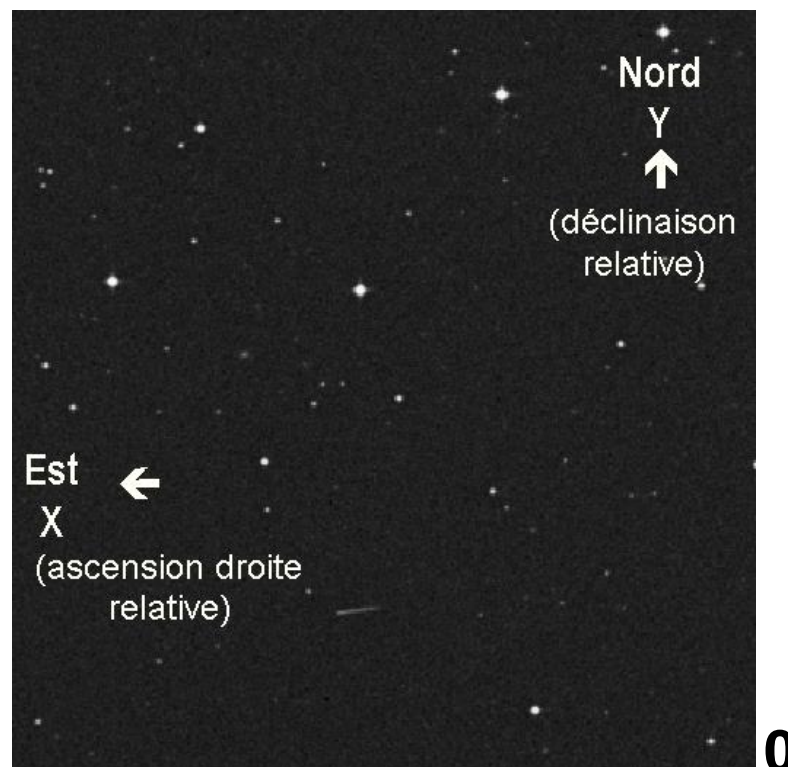
Ci-dessus, deux images de l'astéroïde (53) Kalypso prises le 22 septembre 2000 à une demie heure d'intervalle. On détecte l'astéroïde grâce à son déplacement entre les

deux poses. Les éphémérides donnent aussi sa position qui permet de le retrouver parmi les étoiles.

III- Les coordonnées utilisées:

La sphère céleste et le champ observé

Nous avons vu dans le cours que la mesure d'une position sur la sphère céleste était semblable à la mesure d'une position géographique sur Terre. La différence réside dans le fait que la « longitude » devient l' « ascension droite » que l'on compte positivement vers l'Est en heures, minutes, secondes (de 0 à 24h) et que la « latitude » devient la « déclinaison » comptée positivement vers le Nord en degrés, minutes secondes (de -90° à $+90^\circ$). Sur une image de champ comme celles présentées ci-dessus, la mesure se fait en millimètres (ou autre unité) en X et en Y. La coordonnée X (ascension droite relative) est donc comptée positivement vers l'Est, à gauche sur les images et la coordonnée Y (déclinaison relative) est comptée positivement vers le Nord, en haut sur les images.



Comment effectuer les mesures sur une image :

les unités peuvent être des millimètres ou des « pixels » et comptées dans un repère relatif X,Y dont l'origine peut être n'importe où mais que l'on choisira en bas à droite.

IV- La mesure de position:

Identification d'un corps du système solaire parmi les étoiles et le principe du rattachement à ces étoiles

La technique photographique ou d'imagerie électronique se pratique donc avec un télescope fournissant une image d'une partie du ciel, un "champ" dont la dimension est mesurée en angle sur le ciel.

Bien que l'on connaisse a priori la distance focale du télescope utilisé, celle-ci n'est pas connue avec suffisamment de précision pour transformer des mesures en millimètres sur l'image en angles sur le ciel. Pour cela, il est nécessaire d'avoir une image de l'objet inconnu entouré d'images d'étoiles de catalogue dont on connaît très précisément les coordonnées. Le processus de réduction astrométrique va permettre de calculer l'échelle de l'image qui transformera des millimètres en angle et l'orientation qui indiquera la direction de l'est selon l'équateur céleste. Cela nous conduira aux positions en ascension droite et déclinaison cherchées. Ce processus de réduction astrométrique doit être appliqué pour chaque image pour plusieurs raisons:

-l'image réalisée est plane alors que l'image d'un morceau de sphère céleste au foyer d'un télescope est sphérique. Il faut tenir compte de la projection réalisée;

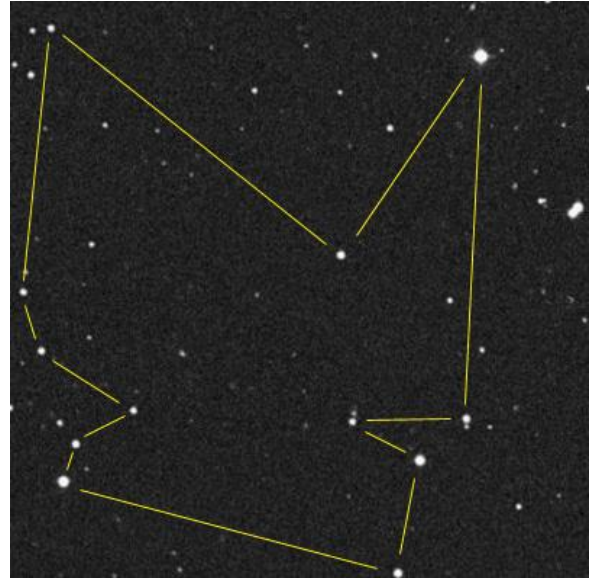
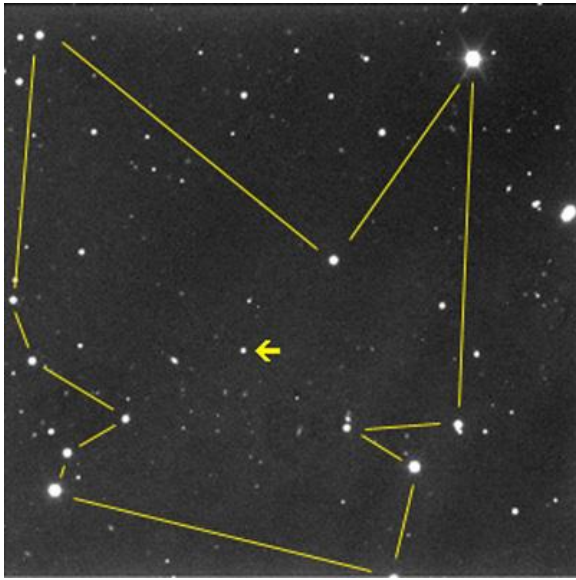
-l'optique du télescope n'est pas parfaite et engendre des déformations du champ (pas d'isotropie de l'échelle ni de l'orientation) et les caractéristiques du télescope (focale de l'optique) ont la fâcheuse tendance à se modifier avec la température;

-la réfraction atmosphérique rapproche les astres du zénith: une correction spécifique est aussi nécessaire et dépend de l'état de l'atmosphère au dessus du télescope.

Ces effets sont pris en compte en introduisant des inconnues dans le processus de réduction. Un plus grand nombre d'étoiles de rattachement est alors nécessaire pour étalonner le champ observé. La haute précision astrométrique est à ce prix.

Les catalogues d'étoiles ont beaucoup progressé au cours des dernières années et on dispose actuellement d'un "bornage" dense du ciel par les étoiles de catalogue.

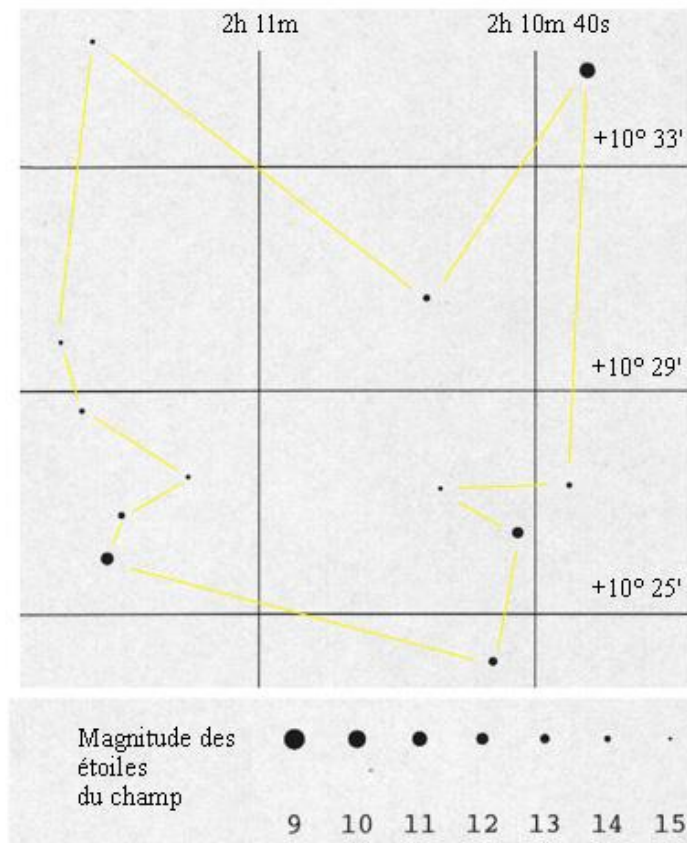
On trouvera ci-dessous le processus d'identification d'objet et de choix d'étoiles d'étalonnage dans le cas du satellite Phoebe de Saturne (que l'on observe comme un astéroïde).



Ci-dessus à gauche, le champ du satellite Phœbé de Saturne, pris le 21 mars 1998 à 2h 52m UTC à l'observatoire de Haute Provence (champ de 12 minutes de degré, télescope de 120cm). On identifie l'astre mobile de deux manières:

- par son déplacement entre deux poses successives;
- l'astre n'est pas présent sur une image de référence de même champ faite avec un télescope de Schmidt à une autre date (à droite). Cette image est disponible sur Internet sur le site du DSS (Digitized Sky Survey).

L'objet mobile Phoebe est indiqué par la flèche jaune.

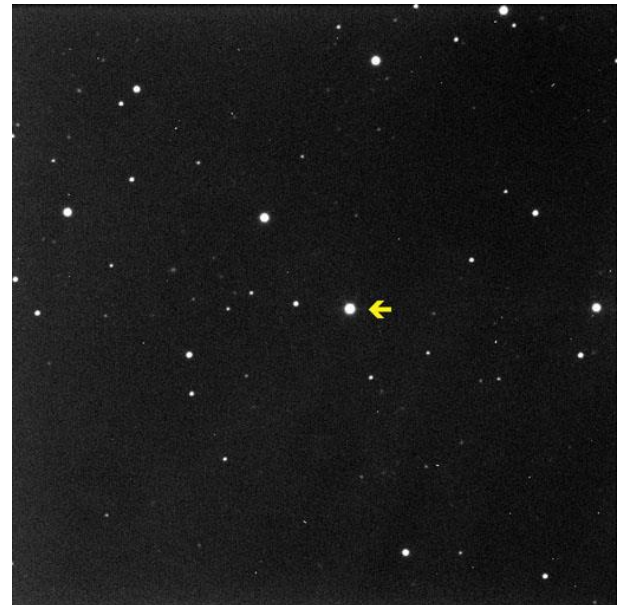


Il reste à identifier des étoiles connues de catalogue qui permettront d'étalonner le champ (détermination de l'échelle en angle par millimètre et de l'orientation par

rapport au repère équatorial des ascensions droites et des déclinaisons). Ci-dessus une carte de champ extraite du "Guide Star catalogue", un catalogue très dense d'étoiles construit pour permettre le pointage du Télescope Spatial.

Nous allons appliquer cette méthode au champ de l'astéroïde Kalypso et utiliser le catalogue USNO A2 à la place du Guide Star Catalogue qui ne contient pas assez d'étoiles pour ce champ.

Le champ d'un télescope: application à l'identification de l'astéroïde (53) Kalypso parmi les étoiles



Ci-dessus à droite le champ de l'astéroïde (53) Kalypso pris le 22 septembre 2000 avec le télescope de 120 cm de l'observatoire de Haute-Provence. le champ fait 12 x 12 minutes de degré. l'astéroïde est brillant (magnitude 12) et aisément identifiable. Sur l'image de droite prise à une autre date (DSS), l'astéroïde n'est pas présent.

Mesure de la position de l'astéroïde Kalypso:

Identification des étoiles du champ appartenant à un catalogue

Connaissant la position approchée de l'astéroïde, on peut tracer une carte des étoiles du champ observé à partir d'un catalogue. Il faudra identifier les étoiles du catalogue sur l'image observée pour pouvoir effectuer le rattachement de la position de l'astéroïde aux étoiles connues. Ces étoiles vont nous permettre d'étalonner le champ, d'en déterminer les constantes.

Nous utiliserons le catalogue USNO A2 qui contient 526 millions d'étoiles et donc un grand nombre d'étoiles de notre champ. Le tracé de ces étoiles est fourni ci-après dans le troisième document servant à la réalisation du TP. L'objet brillant au centre, non reconnu comme étoile du catalogue, est l'astéroïde (53) Kalypso

Ce type de carte de champ peut être obtenu sur le serveur du [Centre de Données Astronomiques de Strasbourg](#). On lui fournit les coordonnées du centre du champ et on visualise une image du champ avec les étoiles de catalogue.

Quel catalogue d'étoiles utiliser ?

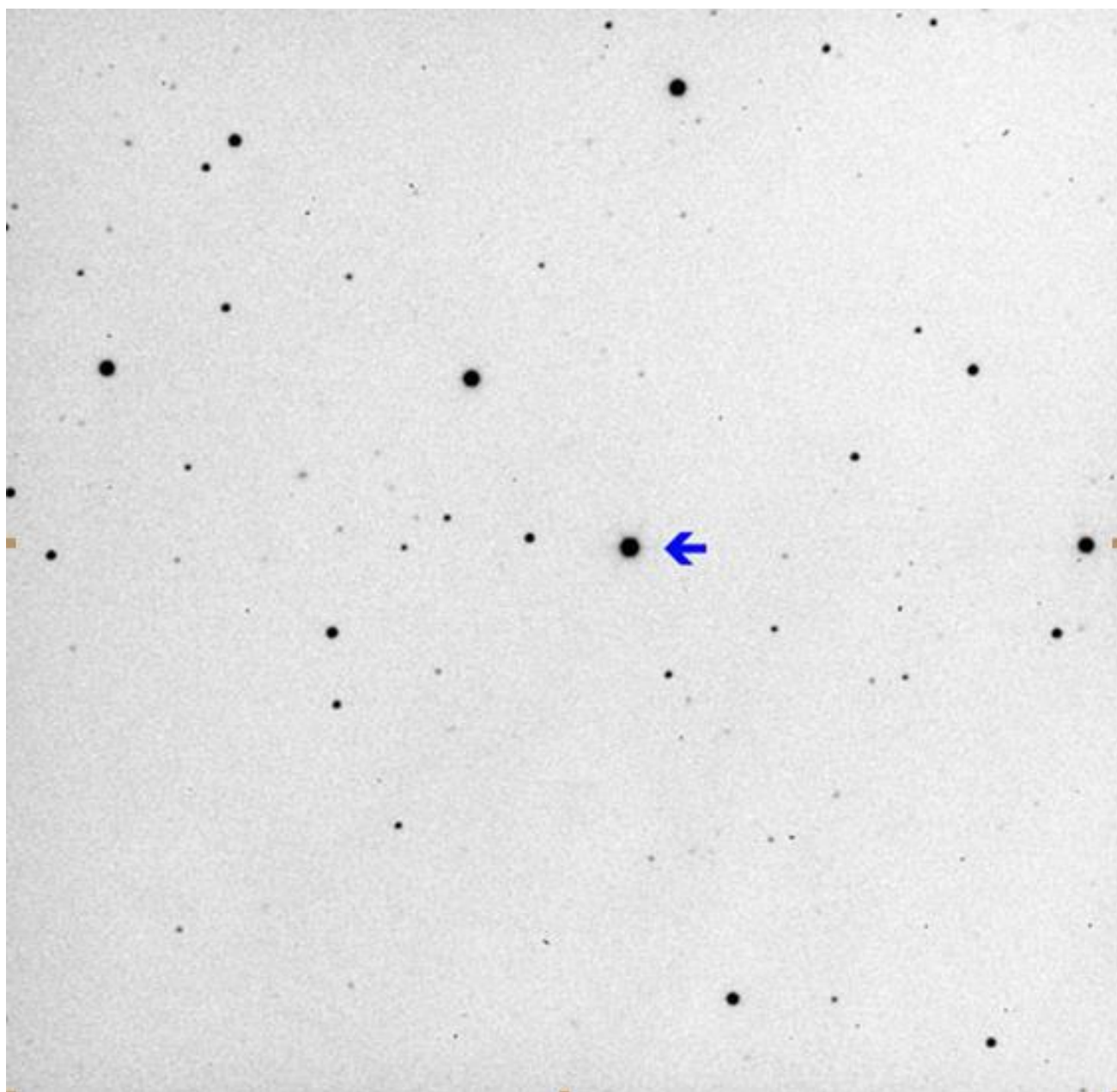
Nous avons choisi ci-dessus le catalogue USNO A2 parce qu'il y avait suffisamment d'étoiles dans le champ étudié. En fait, il y a de nombreux catalogues que l'on choisit en fonction du nombre d'étoiles cataloguées et de la précision de positionnement de chacune des étoiles. Ci-dessous quelques exemples de catalogues :

- Catalogue USNO A2, créé par des chercheurs de l'Observatoire Naval américain, contient environ 500 millions d'étoiles avec une précision astrométrique de 0,4 seconde de degré
- Hubble Space Telescope Guide Star catalogue : catalogue créé à l'origine pour aider au pointage du télescope spatial. L'astrométrie de 20 millions d'étoiles est disponible à une précision de 0,4 seconde de degré
- Catalogue Hipparcos : catalogue réalisé par la mission spatiale Hipparcos entre 1989 et 1993 dont le but premier était de mesurer précisément la parallaxe d'environ 120 000 étoiles avec une précision de 0,001 seconde de degré. Un catalogue TYCHO (1 et 2) a été réalisé avec une précision astrométrique d'une précision de 0,07 seconde de degré pour plus de deux millions d'étoiles.
- Catalogue UCAC, UCAC est un programme d'observations astrométriques commencé en 1998 au CTIO. Les observations ont été effectuées à l'Observatoire national à Flagstaff. Moins dense que le catalogue USNO, sa précision est d'environ 0,05 seconde de degré pour 50 millions d'étoiles.
- Catalogue Gaia : Gaia est un satellite de l'Agence Spatiale Européenne qui a été lancé le 19 décembre 2013. Gaia observera pendant 5 ans des astres jusqu'à la magnitude 20 avec une précision astrométrique de l'ordre de 0,0001 seconde de degré.

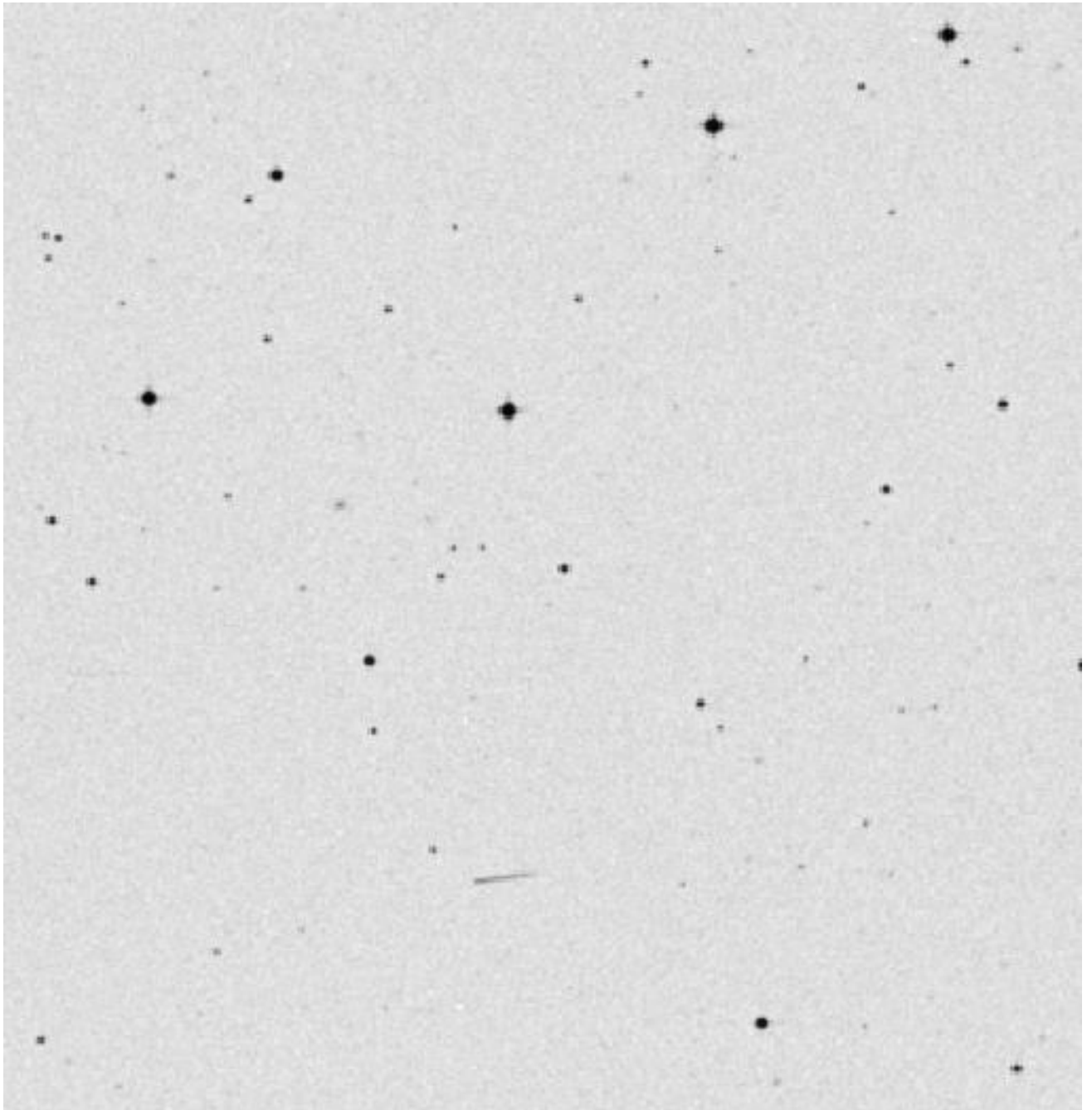
Mesure de la position de l'astéroïde Kalypso: le calcul à la main

Pour effectuer le calcul à la main de la position de l'astéroïde Kalypso, on utilisera les documents papiers accompagnant le TP. Ces documents, présentés ici, pourront être photocopiés ou imprimés à partir des fichiers. Pour des raisons pratiques, les images du champ sont maintenant proposées en négatif, les étoiles et autres objets apparaissant comme des points noirs sur fond blanc, ce qui facilitera la mesure.

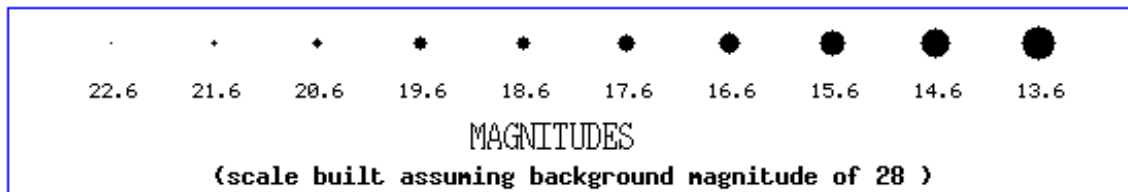
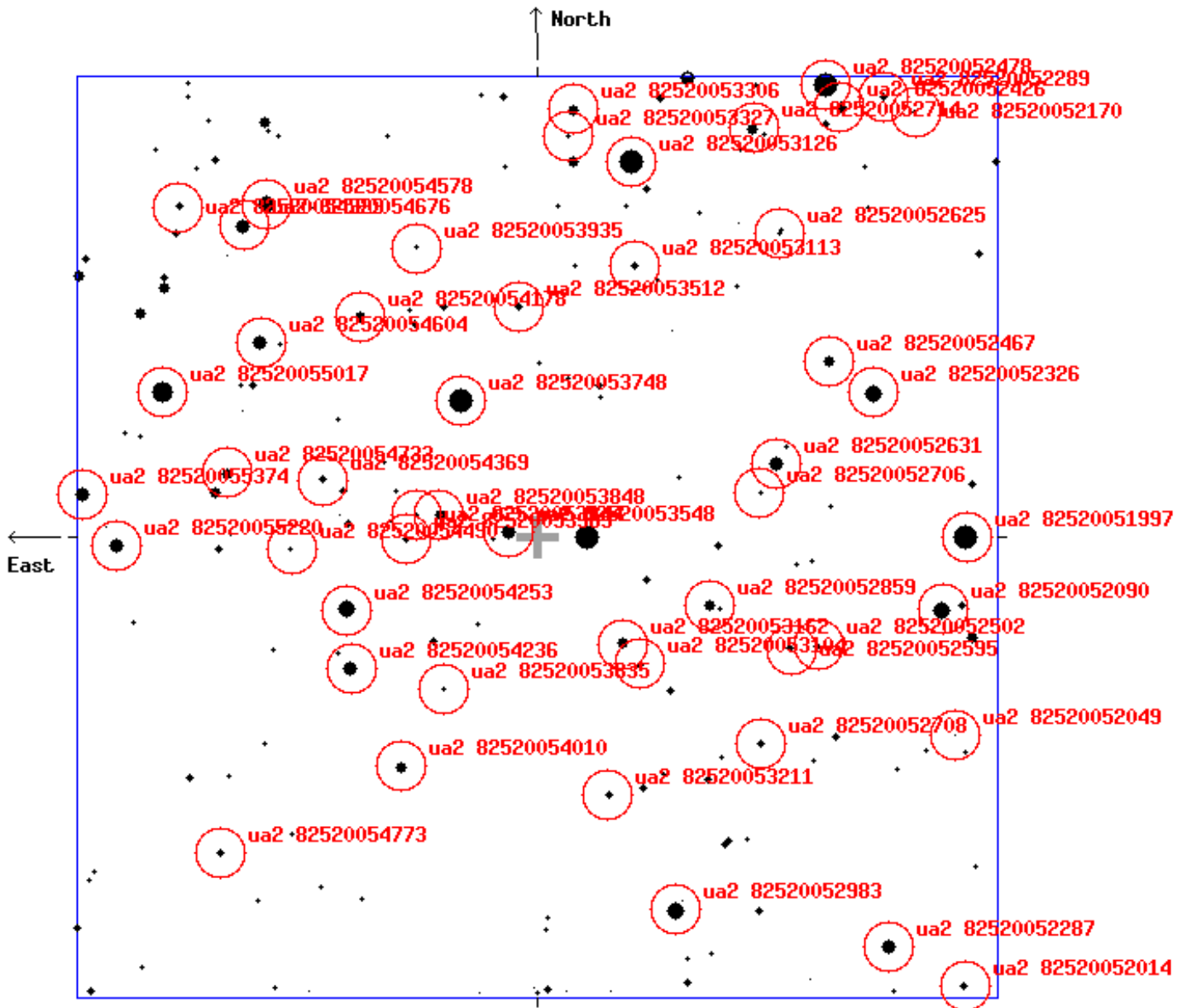
Premier document: image du champ de Kalypso sur lequel on identifiera l'astéroïde et les étoiles d'étalonnage et sur lequel on effectuera les mesures avec un double décimètre ou un quadrillage transparent. On supposera l'orientation du champ correcte, la coordonnée Y est positive vers le Nord (en haut de l'image) et la coordonnée X est positive vers l'Est (à gauche de l'image –attention, cela ne correspond pas aux orientations habituelles).



Deuxième document: image du même champ SANS l'astéroïde, issu des archives du DSS accessible par Internet. C'est ce document qui permet d'identifier sans peine l'astéroïde sur le premier document et de repérer les étoiles de catalogue (on a toujours le Nord vers le haut et l'Est vers la gauche).



Troisième document: carte du champ où apparaissent les étoiles du catalogue. En comparant avec le premier document on sélectionnera deux étoiles d'étalonnage du champ. On les choisira de façon à être sûr de l'identification (éviter les étoiles trop proches) et bien réparties autour de Kalypso.



Object :	53 kalipso / R Cousins / 30.02 s		Rotation angle :	0.342 degrees
Catalogue(s) :	ua2+act		Scale factor in x :	-0.68462 "/pix
Right-Ascension :	23 h 54m 48.721s		Scale factor in y :	0.68431 "/pix
Declinaison :	-05 d 43' 04.10"		fit RMS :	0.0057 pixels
Size of field :	701.05088" x 700.73344"			

Quatrième document: la table des positions des étoiles du catalogue destinées au calcul de l'échelle.

Catalogue d'étoiles:

positions théoriques des étoiles du catalogue USNO A2 repérées sur l'image

Explications du contenu des colonnes:

-ID: numéro d'identification des étoiles que l'on retrouvera sur la carte précédente

-Ascension droite, déclinaison: position théorique de l'étoile

-Magnitude: brillance de l'étoile pour aider à l'identification (plus le nombre est élevé, plus l'étoile est faiblement brillante)

Identificateur	Ascension droite	Déclinaison	Magnitude
82520053748	23 54 52.542	-05 41 20.51	12.40
82520053126	23 54 43.819	-05 38 19.71	12.50
82520052478	23 54 33.875	-05 37 21.41	12.50
82520051997	23 54 26.803	-05 43 06.50	12.80
82520055017	23 55 07.756	-05 41 12.72	13.30
82520052983	23 54 41.765	-05 47 48.88	13.90
82520054578	23 55 02.377	-05 38 51.13	14.30
82520052326	23 54 31.498	-05 41 15.74	14.70
82520054253	23 54 58.399	-05 43 59.81	14.90
82520052090	23 54 28.026	-05 44 01.35	15.00
82520052287	23 54 30.910	-05 48 17.70	15.30
82520055220	23 55 10.202	-05 43 09.38	15.70
82520053548	23 54 50.166	-05 43 00.56	15.80
82520052631	23 54 36.460	-05 42 09.80	15.80
82520055374	23 55 11.900	-05 42 30.74	15.90
82520052714	23 54 37.482	-05 37 54.20	16.10
82520054604	23 55 02.720	-05 40 35.10	16.20
82520054676	23 55 03.555	-05 39 06.47	16.20
82520054236	23 54 58.238	-05 44 44.29	16.40
82520053162	23 54 44.374	-05 44 26.35	16.40
82520052426	23 54 33.115	-05 37 38.89	16.60
82520053306	23 54 46.732	-05 37 39.43	16.70
82520054010	23 54 55.667	-05 45 58.29	16.70
82520052467	23 54 33.765	-05 40 51.53	16.90
82520052859	23 54 39.897	-05 43 57.57	17.10
82520053989	23 54 55.368	-05 43 06.07	17.20

82520053848	23 54 53.706	-05 42 47.13	17.20
82520054369	23 54 59.647	-05 42 20.52	17.30
82520054733	23 55 04.462	-05 42 14.82	17.30
82520052502	23 54 34.472	-05 44 27.53	17.40
82520053512	23 54 49.552	-05 40 09.49	17.50
82520054773	23 55 04.940	-05 47 03.27	17.60
82520054929	23 55 06.888	-05 38 52.18	17.60
82520052014	23 54 27.025	-05 48 48.26	17.70
82520054178	23 54 57.649	-05 40 16.77	17.90
82520052708	23 54 37.362	-05 45 42.49	18.00
82520052595	23 54 35.776	-05 44 31.15	18.00
82520053211	23 54 45.163	-05 46 20.79	18.10
82520053113	23 54 43.660	-05 39 38.96	18.50
82520052625	23 54 36.232	-05 39 14.89	18.50

Cinquième document: la feuille de calcul. Cette feuille donne la succession des étapes de calcul afin d'arriver à la position de l'astéroïde Kalypso par interpolation des mesures effectuées sur le premier document.

Feuille de calcul de position

Cette feuille permet d'effectuer les calculs qui permettront de déterminer les positions $\alpha(a)$ et $\delta(a)$ de l'astéroïde à partir de ses positions mesurées X_a et Y_a et des positions théoriques des deux étoiles choisies $\alpha(i)$, $\alpha(j)$ et $\delta(i)$, $\delta(j)$ grâce aux formules suivantes:

$$\alpha(a) = \alpha(i) + \{(\alpha(j)-\alpha(i))/(X_j-X_i)\} \times (X_a-X_i)$$

$$\delta(a) = \delta(i) + \{(\delta(j)-\delta(i))/(Y_j-Y_i)\} \times (Y_a-Y_i)$$

Valeurs de i, j (étoiles choisies)	calcul en ascension droite	valeurs numériques	calcul en déclinaison	valeurs numériques
	$\alpha(i)$ <i>sexagésimal</i>		$\delta(i)$ <i>sexagésimal</i>	
	$\alpha(i)$ <i>décimal</i>		$\delta(i)$ <i>décimal</i>	
	$\alpha(j)$ <i>sexagésimal</i>		$\delta(j)$ <i>sexagésimal</i>	
	$\alpha(j)$ <i>décimal</i>		$\delta(j)$ <i>décimal</i>	
	$\alpha(j)-\alpha(i)$ <i>décimal</i>		$\delta(j)-\delta(i)$ <i>décimal</i>	
	X_i		Y_i	
	X_j		Y_j	
	X_j-X_i		Y_j-Y_i	
Position mesurée de l'astéroïde:	X_a		Y_a	
	X_a-X_i		Y_a-Y_i	
Echelles de l'image:	échelle en ascension droite: $(\alpha(j)-\alpha(i))/(X_j-X_i)$		échelle en déclinaison: $(\delta(j)-\delta(i))/(Y_j-Y_i)$	
	$\alpha(a)$ <i>décimal</i> = $\alpha(i)+\text{échelle} \times (X_a-X_i)$		$\delta(a)$ <i>décimal</i> = $\delta(i)+\text{échelle} \times (Y_a-Y_i)$	
Résultat:	$\alpha(a)$ <i>sexagésimal</i>		$\delta(a)$ <i>sexagésimal</i>	

Note sur la page de calcul :

La page de calcul détaille ligne à ligne les opérations à effectuer. On rencontre le problème des opérations entre les angles exprimés en quantités sexagésimales, heures, minutes, secondes pour les ascensions droites de 0h à 24h et degrés, minutes secondes pour les déclinaisons de -90° à $+90^\circ$.

Pour réaliser les opérations sur ces nombres, on transforme les heures, minutes, secondes en heures et fraction décimale d'heure ; de même pour les degrés.

heure et fraction décimale d'heure = heure + minute/60 + seconde/3600

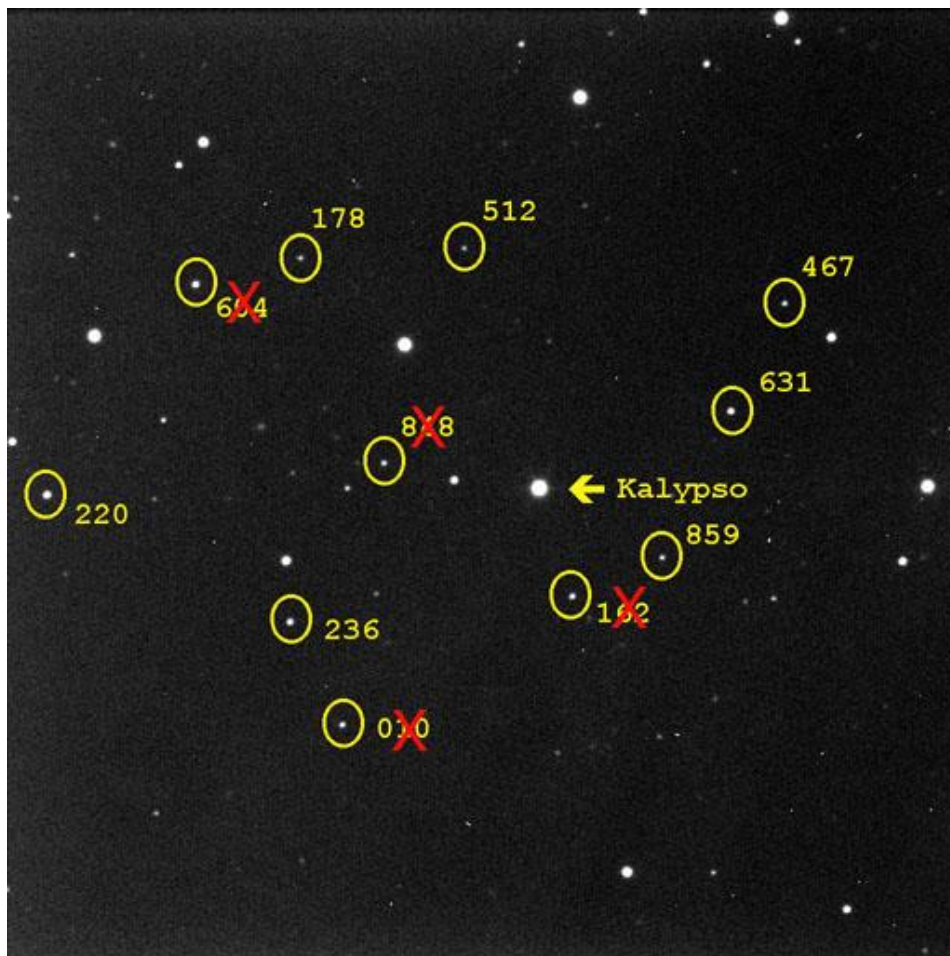
En fin de calcul on revient aux heures, minutes, secondes par l'opération inverse. Certaines calculatrices effectuent ces deux transformations.

Les pages qui suivent ne sont plus à imprimer pour la réalisation du TP : on va maintenant voir le résultat du calcul précis qui a été effectué en étalonnant le champ comme indiqué dans le cours à l'aide de constantes de cible pour déterminer l'échelle, l'orientation et les déformations éventuelles du champ.

Notons que si un grand nombre de calcul à la main sont réalisés simultanément avec des étoiles et des mesures différentes, on constatera que la majorité des résultats seront proches du bon résultat.

On comparera également les résultats aux valeurs théoriques calculées avec les modèles dynamiques du mouvement de l'astéroïde Kalypso (grâce aux serveurs sur Internet indiqués sur la page des liens Internet). Ces valeurs théoriques, données dans les pages suivantes avec la valeur observée précise, montrent qu'elles diffèrent selon le modèle utilisé et qu'il est donc utile d'effectuer des observations qui aideront à améliorer les modèles utilisés.

Mesure de la position exacte de l'astéroïde Kalypso: choix des étoiles devant servir au rattachement et à l'étalonnage du champ



Le catalogue USNO A2 contient beaucoup d'étoiles et toutes ne sont pas susceptibles de servir pour l'étalonnage du champ: il faut choisir des étoiles bien ponctuelles (pour en déterminer la position avec précision), pas trop brillantes (les étoiles brillantes ont souvent un fort mouvement propre dont nous ne tenons pas compte ici) et bien situées par rapport à Kalypso (on diminue l'erreur sur la mesure en choisissant des étoiles éloignées mais situées de part et d'autre de Kalypso).

Les étoiles dans un cercle jaune sont les étoiles sélectionnées pour l'étalonnage; les étoiles barrées d'une croix rouge sont celles qui se sont avérées mauvaises, comme on le verra dans l'algorithme de calcul présenté à la page suivante.

Le calcul de l'échelle et de l'orientation du cliché (passage des positions mesurées en millimètres aux positions angulaires -ascension droite et déclinaison-) se fait à partir des positions des étoiles du catalogue. Deux étoiles suffisent mais l'emploi d'un plus grand nombre d'étoiles et la moyenne des mesures vont augmenter la précision.

Mesure de la position de l'astéroïde Kalypso:

le calcul automatique astrométrique précis (la "réduction")

Une fois les mesures sur l'image réalisées et les étoiles de catalogue choisies, le logiciel va déterminer la transformation (étalonnage des déformations du champ par un polynôme de degré supérieur à 1 qui fera passer des millimètres sur l'image aux positions angulaires sur le ciel. La précision et la qualité du calcul sera estimée grâce aux étoiles en surnombre: comme nous avons plus de données que nécessaires, le logiciel doit résoudre un système comportant plus d'équations que d'inconnues. La méthode des moindres carrés est une méthode statistique qui va minimiser les erreurs commises. Chaque étoile va se positionner par rapport aux autres avec un "résidu" d'autant plus grand que la position théorique ou mesurée de l'étoile est mauvaise, c'est-à-dire incompatible avec celle des autres étoiles.

Premier calcul de positions:

```
#-----  
# > Parametres de la réduction :  
# + Date : 22/09/2000  
# + Heure (UTC) : 22 h 22 m 37,9 s  
# + Jour julien : 2451810.432383  
#  
# + Nombre d'objets réduits : 1  
# + Nombre d'étoiles choisies : 11  
# + Degré du polynôme : 1  
# + Nombre de coefficients de la transformation : 2x4  
#  
# > Solution astrométrique (position alpha et delta de Kalypso) :  
ascension droite: 23h 54m 46,1440s déclinaison: -05° 43' 4,547"  
#  
# > Constantes de la transformation:  
# + en X : A(1) = 0.00139 +/- 0.27833  
# A(2) = -0.00439 +/- 0.00170  
# A(3) = 0.68412 +/- 0.00120 constante donnant l'échelle en X (est-ouest) de l'image en  
secondes de degré par pixel  
# A(4) = 0.00000 +/- 0.00001  
# + en Y : B(1) = -0.01200 +/- 0.17874  
# B(2) = 0.68352 +/- 0.00109 constante donnant l'échelle en Y (nord-sud) de l'image en  
secondes de degré par pixel  
# B(3) = 0.00328 +/- 0.00077  
# B(4) = 0.00000 +/- 0.00001  
#  
# > Résidus pour chaque étoile (en secondes de degré en ascensuin droite et en déclinaison) :  
# alpha delta  
2 1.80590 0.12206 UA2_082520053848  
2 0.31413 -0.45747 UA2_082520053162  
2 -0.74127 0.93308 UA2_082520054010  
2 -0.32438 -0.78833 UA2_082520054236  
2 0.31699 0.02706 UA2_082520055220  
2 -1.25452 0.43274 UA2_082520054604  
2 0.34332 -0.38676 UA2_082520054178
```

```

2  0.03323  0.40231  UA2_082520053512
2  -0.28936 -0.19379  UA2_082520052467
2  -0.24685  0.45504  UA2_082520052631
2  -0.11133  0.10896  UA2_082520052859

```

Deuxième calcul:

l'étoile UA2_082520053848 ayant un résidu très fort, on va recommencer le calcul en l'éliminant

```

#-----
# > Parametres de la réduction : :
# + Date          : 22/09/2000
# + Heure (UTC)   : 22 h 22 m 37,9 s
# + Jour julien   : 2451810.432383
#
# + Nombre d'objets réduits      : 1
# + Nombre d'étoiles choisies   : 10
# + Degré du polynôme           : 1
# + Nombre de coefficients de la transformation: 2x4
#
# > Solution astrométrique (position alpha et delta de Kalypso) :
# 1 ascension droite: 23h 54m 46,1328s déclinaison: -05° 43' 4,552"
#
# > Constantes de la transformation:
# + en X : A(1) =  0.00087 +/-  0.19587
#         A(2) = -0.00433 +/-  0.00115
#         A(3) =  0.68396 +/-  0.00081  constante donnant l'échelle en X (est-ouest) de l'image
#         A(4) =  0.00000 +/-  0.00001
# en secondes de degré par pixel
# + en Y : B(1) = -0.01304 +/-  0.20234
#         B(2) =  0.68353 +/-  0.00118  constante donnant l'échelle en Y (nord-sud) de l'image
#         B(3) =  0.00327 +/-  0.00083
#         B(4) =  0.00000 +/-  0.00001
#
# > Résidus pour chaque étoile (en secondes de degré en ascension droite et en déclinaison) :
#   alpha      delta
# 2  0.48937  -0.45143  UA2_082520053162
# 2 -0.52822   0.94044  UA2_082520054010
# 2 -0.10951  -0.78090  UA2_082520054236
# 2  0.56728   0.03574  UA2_082520055220
# 2 -1.03071   0.44049  UA2_082520054604
# 2  0.54311  -0.37985  UA2_082520054178
# 2  0.19516   0.40790  UA2_082520053512
# 2 -0.19164  -0.19043  UA2_082520052467
# 2 -0.12136   0.45936  UA2_082520052631
# 2  0.04638   0.11439  UA2_082520052859
#-----

```

Troisième calcul:

on va éliminer les trois étoiles UA2_082520054010 UA2_082520053162
UA2_082520054604 qui ont un résidu trop important

```

#-----
# > Paramètres de la réduction :

```

```

# + Date : 22/09/2000
# + Heure (UTC) : 22 h 22 m 37,9 s
# + Jour julien : 2451810.432383
#
# + Nombre d'objets réduits : 1
# + Nombre d'étoiles choisies : 7
# + Degré du polynôme : 1
# + Nombre de coefficients de la transformation : 2x4
#
# > Solution astrométrique (position alpha et delta de Kalypso) :
# 1 ascension droite: 23h 54m 46,1381s déclinaison: -05° 43' 4,635"
#
# > Constantes de la transformation :
#
# + en X : A(1) = 0.03729 +/- 0.05869
# A(2) = -0.00371 +/- 0.00040
# A(3) = 0.68499 +/- 0.00022 constante donnant l'échelle en X (est-ouest) de l'image en
secondes de degré par pixel
# A(4) = 0.00000 +/- 0.00000
# + en Y : B(1) = 0.00032 +/- 0.21348
# B(2) = 0.68418 +/- 0.00145 constante donnant l'échelle en Y (nord-sud) de l'image en
secondes de degré par pixel
# B(3) = 0.00277 +/- 0.00079
# B(4) = 0.00000 +/- 0.00001
#
# > Résidus pour chaque étoile (en secondes de degré en ascension droite et en déclinaison) :
# alpha delta
# 2 -0.17783 -0.36279 UA2_082520054236
# 2 0.13728 0.47162 UA2_082520055220
# 2 -0.03863 -0.40857 UA2_082520054178
# 2 -0.10602 0.38440 UA2_082520053512
# 2 0.04433 -0.20424 UA2_082520052467
# 2 -0.01781 0.42496 UA2_082520052631
# 2 0.05272 0.10933 UA2_082520052859
#-----

```

Les résidus sont maintenant convenables et on va adopter la position calculée de Kalypso:

alpha = 23h 54m 46,1381s; delta = -05° 43' 4,635"

On pourra comparer les valeurs trouvées à la main précédemment avec cette valeur ou avec les valeurs calculées par les serveurs d'éphémérides de l'[Institut de mécanique céleste](#) (IMCCE), du [Jet Propulsion Laboratory](#) (NASA) ou du [MPC](#) (Minor Planet Center).

Valeur de l'IMCCE: alpha = 23h 54m 46,09s; delta = -5° 43' 5,13"

Valeur du MPC: alpha = 23h 54m 46s; delta = -5° 43' 0"

Valeur du JPL: alpha = 23h 54m 45,53s; delta = -5° 43' 9,6"

On remarque que les trois modèles ne donnent pas une même position pour l'astéroïde et que la position observée diffère aussi de ces trois valeurs. La différence atteint plusieurs secondes de degré ce qui peut provenir de deux causes :

- Les éphémérides sont mauvaises et doivent être revues
- L'observation n'est pas bonne

Pour savoir d'où vient cette différence, il faut recommencer l'observation plusieurs jours de suite : les étoiles utilisées pour la réduction ne seront plus les mêmes, les conditions d'observation non plus et si la différence entre les éphémérides et les observations subsistent, l'erreur sera identifiée comme venant des éphémérides à revoir. A noter que la précision de l'observation dépend grandement de la qualité du catalogue d'étoiles. La précision du catalogue utilisé ici est de l'ordre de 0,3 seconde de degré mais certaines zones du ciel sont moins bonnes que d'autres. Certains catalogues comme l'UCAC ont une précision de 0,05 seconde de degré mais contiennent beaucoup moins d'étoiles. Le futur catalogue Gaia contiendra un milliard d'étoiles (deux fois plus que le catalogue utilisé ici) ayant une précision meilleure que 0,001 seconde de degré. La limite de la précision ne viendra plus du catalogue d'étoiles comme actuellement mais de la mesure elle-même et de l'observation.

V- Travailler avec Internet

Tout ce qui a été effectué dans les pages précédentes peut être refait en utilisant Internet. On peut:

- aller chercher des images nouvelles d'astéroïdes ou d'autres objets sur des serveurs sur le serveur ftp de l'IMCCE : <ftp://ftp.imcce.fr/pub/observations/astrometrie/>
- visualiser n'importe quel champ d'étoiles de la sphère céleste avec le Digitized Sky Survey : <http://archive.eso.org/dss/dss>
- aller consulter des catalogues sur le site du CDS de Strasbourg : <http://cdsweb.u-strasbg.fr/index-fr.gml>
- faire fonctionner les serveurs de calcul d'éphémérides :
IMCCE : <http://www.imcce.fr/langues/fr/ephemerides/>
JPL : <http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>
MPC : <http://www.minorplanetcenter.net/iau/MPEph/MPEph.html>
- utiliser les serveurs donnant les objets du système solaire présents dans un champ particulier avec :
Skybot : <http://vo.imcce.fr/webservices/skybot/?conesearch>
MPC Checker : <http://www.minorplanetcenter.net/cgi-bin/checkmp.cgi>

Conclusions sur le TP:

Mesure astrométrique de la position d'un corps céleste

Le but de ce TP est de faire connaissance avec les petits corps du système solaire et avec la façon de mesurer leur position sur la sphère céleste. On manipule ainsi des images et des catalogues d'étoiles. Le matériel distribué pendant le TP -qui peut être imprimé à partir de [la page "calcul à la main"](#)- complète la documentation.

Ce travail peut être fait en classe en utilisant du matériel comme celui distribué avec le TP et en travaillant sur des champs imprimés sur lesquels on superpose du papier millimétré. Les calculs font appel à la notion d'échelle et au maniement des nombres sexagésimaux. La notion d'orientation sera plus difficile à aborder. On abordera aussi la notion de statistique: chaque élève ou groupe d'élèves peut faire le calcul avec, pour chacun, un couple d'étoiles différent et on comparera ensuite les résultats. La moyenne de tous les résultats est une bonne approximation à condition d'éliminer les résultats "aberrants". On comparera les résultats au calcul théorique donné par les serveurs d'éphémérides ou dans l'annuaire du Bureau des longitudes (Ephémérides astronomiques).

Ce travail peut également se faire en récupérant tout le matériel et en utilisant des serveurs sur Internet comme indiqué dans le chapitre 4.

Merci de nous faire part de vos commentaires et suggestions par e-mail à: arlot @ imcce.fr.