

Il y a cinquante ans (1) je suivais les cours du DEA d'Astronomie fondamentale à Paris. Il y a un peu plus de trente ans mon contrat de consultant avec la ci-devant Sté Matra a permis d'améliorer le schéma optique de la charge utile de la première mission d'astrométrie spatiale Hipparcos. Aujourd'hui c'est l'occasion d'une causerie. Il s'agira d'éclairer des points peu connus, parfois introuvables sur internet, mais bien présents depuis 1882 dans une publication de la Société astronomique de France, la revue *l'Astronomie*. Dans un second temps nous indiquerons où trouver des exemples d'utilisation du logiciel Aladin du Centre de Données Stellaires de Strasbourg, le CDS.

En laissant de côté tout un pan de l'histoire de l'astrométrie, à savoir la construction dès l'Antiquité de catalogues d'étoiles obtenus par des visées à l'œil nu, commençons donc par GALILÉE et sa lunette qui étaient particulièrement à l'honneur il y a neuf ans pour l'Année mondiale de l'astronomie en 2009. Il y avait à l'époque en 1609 une bonne raison de s'opposer à sa théorie héliocentrique. C'est que si la Terre fait effectivement une révolution autour du Soleil en un an, les étoiles proches doivent au cours de l'année changer de position apparente par rapport aux étoiles lointaines. Galilée est décédé en 1642 en ayant peut-être rêvé de mesurer une parallaxe. Pour l'anecdote, signalons qu'un article d'Albert BIJAOUÏ de septembre 2003 indique « Avec Mathieu, il [François Arago] a failli déterminer la première parallaxe géométrique d'une étoile » (2) . Mathieu était condisciple et beau-frère d'Arago, et d'août 1812 à novembre 1813 ils tentèrent de mesurer la parallaxe de 61 Cygni, étoile à fort mouvement propre et donc probablement étoile proche, mais il a fallu attendre 1838, pour que Bessel mesure effectivement la première parallaxe stellaire, celle justement de 61 Cygni. Dans une publication récente de l'observatoire du Vatican (3), disponible à la vente, il y a une remarque sur le fait qu'il a fallu un certain temps pour que le travail de Bessel soit vraiment connu. On peut estimer qu'il a bien fallu trois siècles pour passer du rêve à la réalité.

Après avoir donc donné un premier exemple pour justifier le titre de cette communication, restons sur le sujet de l'héliocentrisme. C'est justement en recherchant à mesurer une parallaxe avec une lunette verticale et un fil à plomb que BRADLEY vers 1728 a découvert et interprété le phénomène de l'aberration annuelle. Le matériel est exposé au musée de Greenwich, (4) photographié au cours d'un voyage organisé pour la Société astronomique de France, la SAF, par Jean-Pierre MARTIN. Bradley n'a donc pas réussi à mesurer une seule parallaxe, mais il s'est rendu compte que toutes les étoiles passant à la verticale de Greenwich étaient affectées d'un mouvement apparent sensible. Il a donc fait d'une pierre deux coups. D'une part, en introduisant dans la construction des catalogues d'étoiles la notion de correction d'aberration, il a permis d'expliquer des écarts incompréhensibles qui ne faisaient pas rêver les constructeurs de catalogues, mais au contraire leur donnaient des cauchemars. D'autre part, il a donné le premier argument irréfutable en faveur de l'héliocentrisme, ce qui réduit donc l'écart de temps entre le rêve de Galilée et la découverte de Bradley à moins d'un siècle. À ce sujet, donnons des valeurs numériques. La Terre tourne à 30 km/s autour du Soleil, la vitesse de la lumière est voisine de 300 000 km/s, l'aberration est donc $1/10\,000$, soit 20 secondes d'angle, 0,2mm au foyer d'une lunette de 2m de focale : c'était donc mesurable avec un support stable et un très bon fil à plomb comme référence de verticalité. Passons maintenant à la milliseconde d'angle en jeu dans les programmes d'astrométrie spatiale. C'est $1/20\,000$ de la quantité mesurée par Bradley, la vitesse correspondante est donc $30\,000/20\,000 = 1,5$ m/s, la vitesse d'un bon marcheur. Ceci donne une idée de la précision nécessaire sur la vitesse d'un satellite d'astrométrie spatiale.

Faisons maintenant un bond en restant dans le même sujet, et passons de l'année mondiale de l'astronomie en 2009 au centenaire de la relativité générale en 2015. Après le coup d'éclat de la mesure de la déflexion gravitationnelle au cours de l'éclipse de Soleil de 1919, Einstein avait été reçu (5) à une séance de la SAF le 5 avril 1922 dans l'amphithéâtre Richelieu, à la Sorbonne, beaucoup trop petit pour contenir tous les sociétaires venus en foule à cette réunion. Le compte rendu a été publié dans le fascicule de mai 1922, disponible à la consultation sur le site Gallica et à la vente au siège de la SAF. L'année précédente, un autre physicien, MICHELSON, assistait à l'assemblée générale annuelle du 1^{er} juin 1921. Il s'inscrivait comme membre de la SAF en 1922. (6) Dans le discours prononcé à cette occasion, publié dans le fascicule d'août 1921 (7), il est mentionné que « M. Michelson pense même qu'il sera possible de constater [par une méthode interférométrique semblable à celle qui lui avait permis de mesurer le diamètre apparent de Bételgeuse] le léger déplacement apparent qu'une étoile voisine de Jupiter doit subir du fait de l'action du champ de gravitation de cette grosse planète (effet Einstein) ». Il se trouve qu'un peu moins d'un siècle plus tard, le traitement des données des missions astrométriques Hipparcos et GAIA a effectivement pris en compte cet effet. Dans le premier cas, pour Hipparcos, c'est la déflexion gravitationnelle même à plus de 60° du Soleil qui doit être prise en compte ; pour Gaia, il en est de même aussi avec Jupiter. La diapo (8) montre dans une vitrine du musée de Greenwich le miroir double du télescope Hipparcos. Ce miroir scié en deux matérialisait l'idée initiale du directeur de l'observatoire de Stasbourg à l'origine de la mission Hipparcos, à savoir observer avec un même télescope des étoiles de grande séparation angulaire. Mon apport a été de montrer dans un rapport de consultant qu'en décentrant un peu le schéma optique dans la bonne direction, celle correspondant par chance à un trait de scie épais, on améliorerait les taches images. Il n'y a aucune recombinaison dans le schéma optique. Même si la méthode de mesure avec Hipparcos comme avec Gaia est globale à pleine pupille et non pas locale avec des pupilles distantes comme pour les mesures interférométriques imaginées par Michelson, il est cependant clair que sa remarque était prémonitoire. Pour ce qui est de la mesure des étoiles doubles par méthode interférométriques, la prévision de Michelson s'est également avérée prémonitoire, même si là encore la méthode interférométrique d'Antoine LABEYRIE pour la mesure des étoiles doubles serrées, publiée en 1975, utilise toute l'ouverture d'un télescope. Pour ce qui est des mouvements propres et des parallaxes, même remarque : dans les mesures d'Hipparcos comme de Gaia la lumière vient de deux directions différentes sans aucune interférence. Sauf méconnaissance de ma part, il reste à savoir si l'interférométrie spatiale passera un jour du rêve à la réalité.

Nous venons donc de citer deux exemples, avec Galilée-Bradley et Michelson-Gaia, où des affirmations voisines du rêve sont passées au stade de réalité en moins d'un siècle. Passons maintenant à une note de 1979 d'un astronome français, Fernand CHOLLET, publié dans les comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris.(9) Les CR ne sont pas tous numérisés (10), mais une version papier a été trouvée à la cave au siège de la SAF rue Beethoven. (11) Il s'agit de mesurer la masse d'une étoile non pas en mesurant l'orbite d'une étoile double physique, mais par effet de déviation gravitationnelle. On considère le cas où un couple d'étoile n'est pas physique, mais optique. Les deux étoiles, proches apparemment sur notre ligne de visée, sont en fait très éloignées l'une de l'autre. Si les mouvements propres apparents de ces deux étoiles ne sont pas parallèles, mais tels que la séparation apparente des deux étoiles passe par un minimum au cours du temps, la trajectoire apparente relative des deux étoiles sera infléchiée par la masse de l'étoile la plus proche. Après avoir donné les formules adéquates, le nombre de couples optiques susceptibles de permettre

des mesures est estimé à une vingtaine. Presque quarante ans plus tard, il n'y a à ma connaissance pas eu d'application effective de cette méthode. Le rêve ne s'est pas transformé en réalité. Passons maintenant (12) à un article de 1993 de Jean-Marie MARRIOTTI sur « L'apport de l'interférométrie à la recherche des planètes extra-solaires ». Deux projet de satellites astrométriques interférométriques de la Nasa sont mentionnés (13). Vingt cinq ans après il n'en reste guère de traces de ces autres rêves. Là aussi, la prévision de l'application dans le domaine visible des méthodes interférométriques par Michelson n'a à ce jour pas été validée. Cependant, il y a une autre prédiction de la relativité restreinte indiquant que la lumière émise par un objet se déplaçant à une vitesse proche de celle de la lumière doit apparaître plus intense dans la direction du mouvement. L'application à la détection et à la mesure des planètes extrasolaires n'est pas triviale, il faut prendre en compte deux autres effets de nature géométrique. Il s'est avéré qu'une exoplanète a été découverte grâce à cet effet dans les données du satellite américain *Kepler*, avec l'avantage par rapport à la méthode des passages que la minuscule variation de luminosité due à l'effet relativiste peut être observée même si la planète ne passe pas devant son étoile. Le point important est que cette détection acrobatique a été confirmée, à l'observatoire de Haute-Provence, par la méthode des vitesses radiales. Tout ceci est expliqué par Roger FERLET à la rubrique actualité dans le n° 63 de juillet-août 2013 de *l'Astronomie*, numéro du passage du format A4 au format 225x285mm, passage faisant le désespoir des amateurs de volumes annuels reliés. Même si les mesures du satellite *Kepler* ne sont pas de l'astrométrie de position, mais de la photométrie, on peut donc ajouter Chollet-*Kepler* (le satellite !) à Galilée-Bradley et Michelson-Gaia. En revenant aux mesures de position sur le ciel, on rêvait depuis longtemps de mesurer des mouvements propres dans les galaxies proches de la notre. Les premières mesures, optiques, au sol, sur un intervalle de temps de plusieurs dizaines d'années, donnaient des résultats assez imprécis. Le télescope spatial *Hubble* a permis d'améliorer la situation, mais surtout il y a dans les compte-rendus du colloque UAI 248 de 2008 (14) « Un pas de géant : l'astrométrie de la milli à la microseconde d'angle » le résultat d'un traitement soigné des enregistrement radio interférométriques transcontinentaux qui donne directement sur quelques années seulement des mouvements propres de sources très ponctuelles dans des galaxies du groupe local (15). Ce résultat peut laisser rêveur, mais il s'agit de réalité. En prenant alors arbitrairement comme point de départ un article de 1906 de POINCARÉ intitulé « La Voie lactée et la théorie des gaz » (16), on peut ajouter un quatrième exemple de passage du rêve à la réalité : Galilée-Bradley, Michelson-Gaia, Chollet-*Kepler* (le satellite !) et Poincaré-VLBI.

Il y a actuellement des articles sur le traitement de mesures astrométriques de précision meilleure que la micro seconde d'angle. Cela reste du domaine du rêve, mais les méthodes de traitement des mesures semblent déjà être au point.

Revenons maintenant à l'intervalle de presque trois siècles séparant la promotion de l'héliocentrisme par Galilée avec des arguments comme l'observation des phases de Vénus et des satellites de Jupiter et la mesure effective d'une parallaxe stellaire avec un cercle méridien. La dernière parution, n° 42, de la publication du Groupement des astronomes amateurs courriérois, le GAAC, contient un article bien documenté de dix pages intitulé « Les lunettes méridiennes Instruments de mesure du ciel et de mesure du temps ». On y voit qu'à la fin du XIX^e siècle la lunette méridienne était au point. À l'observatoire de Bordeaux l'instrument méridien a été considérablement perfectionné pour établir le catalogue d'entrée du projet d'astrométrie spatiale Hipparcos. C'est Yves REQUIÈME, sociétaire SAF n° 29 054, un peu avant Thierry MIDAVAINÉ n° 29066, qui dans les années 1970 a conçu, mis au point et exploité un micromètre automatique indispensable pour mesurer le grand nombre d'étoiles

requis. Il n'en reste pas moins que pour bien étalonner l'instrument, il convient d'effectuer deux opérations, la visée verticale vers le bas sur un bain de mercure et le retournement de la lunette (17). La seconde opération est nettement plus délicate que la première. En visitant récemment la salle méridienne de l'observatoire de Bordeaux, la contemplation du matériel utilisé pour retourner la lunette méridienne est plus impressionnante que l'examen de cette diapo. De son côté, en 1979, Jean TEXEREAU avait fait remarqué dans une note aux compte-rendus de l'Académie des sciences de Paris, présentée par Jean-Claude PECKER, qu'il était possible de réaliser des cercles méridiens puissants et compacts (18), éliminant le besoin de l'opération de retournement. Ayant été chassé de son laboratoire d'optique dans la salle Cassini de l'observatoire de Paris, il ne lui a pas été possible de passer du rêve à la réalité, ce qui aurait fait un cinquième passage.

Au moment de relire le document préparé sur cet exposé, une recherche sur internet a montré que la mission GAIA avait d'ores et déjà permis d'en savoir effectivement plus sur la cinématique des étoiles de la Galaxie. En consultant l'article daté du 20 septembre 2018 (19), on apprend que sur plus de sept millions d'étoiles dont la position et la vitesse à trois dimensions sont maintenant connues, il y en a une vingtaine qui ont une cinématique à grande vitesse (20). Le risque de collision avec le Système solaire semble faible. Là aussi, le communiqué de presse fait rêver (21).

Après être passé avant-hier sur les stands des Rencontres, il faut dire un mot (22) de ce qui est présenté par Jean MOUETTE et Thierry LEGAULT au stand n°1. C'est un film en couleur et en relief sur des aurores boréales, obtenu en combinant des prises de vue à 7 km de distance avec des objectifs prenant une demi-sphère céleste. C'est Éric HIVON qui a fourni le logiciel astrométrique adéquat pour cela. Les premières mesures datant de 1916, on voit qu'on a changé de mode de présentation en un siècle.

Après cet exposé bibliographique, signalons que des indications sur l'utilisation du logiciel Aladin du Centre de Données stellaires de Strasbourg, le CDS, seront données tout à l'heure à 17h15 au cours de la présentation intitulée *Les plaques de Ferdinand QUÉNISSET de l'observatoire de Juvisy*.

La diapo suivante (23) donne des indications pour en savoir plus sur les sujets abordés dans mes deux présentations.

(24) Je vous remercie de votre attention.