Les étoiles en mouvement

auteur: F. Mignard
affiliation : Université Côte d'Azur, CNRS, OCA
référence: OCA-TN-FM-PM-VR
statut: Version 1.0, Février 2018
date: 12 mars 2018

Résumé

Historique des versions

Version	Revision	Date	Auteur	Commentaire
1	1	2018-01-20	FM	Version 1
1	0	2017-12-28	FM	Démarrage du document

Table des matières

1 Présentation **4**

2 La Sphère des Fixes **4**

2.1 Découverte du mouvement des étoiles 6

2.2 Terminologie et conséquences 8

3 Le mouvement propre au premier ordre **9**

3.1 Variation de coordonnées avec le temps 10

3.2 Ordre de grandeur 11

3.3 Composantes du mouvement propre 12

3.4 Relation avec le vitesse 13

4 Mathématique du mouvement propre **14**

4.1 Formulaire général 14

4.2 Ecart au mouvement uniforme 17

5 La vitesse radiale **18**

5.1 Mesures des vitesses radiales 21

5.2 Mesures brutes et mesures normalisées 26

5.3 Utilisation des vitesses radiales 27

1 Présentation

Au cours des longs siècles qui jalonnent l'histoire de l'astronomie les étoiles ont été rassemblées au sein de constellations dont la forme immuable ne laissait guère prise au doute. Aucun mouvement n'était décelable à l'échelle d'une vie humaine et des comparaisons d'alignements décrits par plusieurs générations d'astronomes confirmaient cette permanence. L'existence des cieux inaltérables au-delà de l'orbe lunaire avait fini par s'ériger en une doctrine difficile à contester.

Cette belle image s'est profondément altérée depuis le XVIIe siècle, à la fois pour des raisons théoriques et comme conséquence d'observations nouvelles qui remettaient en cause la fixité des cieux. Sur le plan théorique, la mécanique de Newton impliquait le mouvement permanent des astres massifs les uns par rapport aux autres dans la profondeur de l'espace, ainsi que l'instabilité d'un monde fini réglé par les lois de la gravitation. Ceci fut suivi d'observations décisives au début du siècle suivant qui prouvaient sans doute possible que les étoiles n'occupaient pas des positions relatives immuables sur la sphère céleste et que des mouvements très lents étaient décelables. A la fin du XIXe siècle l'analyse des spectres mettra définitivement fin à cette image réductrice du monde avec la mise en évidence également d'un déplacement sur la ligne de visée. Tout ceci a été largement confirmé et étendu à l'ensembles des étoiles et plus tard des galaxies avec des conséquences fondamentales sur la structure de l'Univers. Dans ce texte je retrace ces deux grandes étapes de l'astrométrie stellaire et ambitionne de montrer l'importance de ces découvertes pour la recherche moderne.

2 La Sphère des Fixes

La Sphère des Fixes n'est pas un *dogme* posé à priori pour des raisons de simplicité ou d'harmonie, mais un modèle scientifique du monde sidéral adopté à la suite d'observations soigneuses. En introduction du Livre VII de l'Almageste, Ptolémée ($\sim$ 90 ,$\sim$ 170) prend grand soin d'apporter les preuves les plus sûres de l'absence totale d'un quelconque déplacement des étoiles les unes par rapport aux autres. Utilisant principalement les observations d'alignements rapportées par Hipparque ($\sim$ -190 ,$\sim$ -120) près de trois siècles plus tôt, il ne note aucun changement perceptible durant cet intervalle conséquent. L'argument est très détaillé et porte sur plusieurs dizaines d'alignements ou de figures géométriques simples et remarquables. L'ensemble occupe cinq pages de l'ouvrage et le conduit à conclure à l'absence de mouvement sensible et à justifier le concept de la Sphère des Fixes. Par exemple Hipparque rapporte que les étoiles α Cancri (Acubens), β Cancri

(Altarf) et α CMi (Procyon) sont quasiment sur une même ligne sur le ciel et Ptolémée retrouve cet alignement. Bien entendu l'ensemble de la sphère céleste est emporté par une rotation de 24h, mais ce mouvement est de nature très différente et ne modifie pas les positions relatives, les alignements ou la forme des constellations.

Il ne s'est fait jusqu'à présent aucun changement dans la position des étoiles fixes entr'elles, et l'on observe encore les mêmes configurations que du tems d'Hipparque, non seulement dans les étoiles

Οτι μὲν οὖν οὐδεμία μετάπτωσις γέγονεν οὐδὲ μέχρι τοῦ δεῦρο τῆς πρὸς ἀλλήλους αὐτῶν θέσεως, ἀλλ' οἱ κατὰ τὸν Ιππαρχον τετηρημένοι σχηματισμοὶ καὶ νῦν ἀπαραλλάκτως οἱ αὐτοὶ θεωροῦνται,

καὶ οὐ μόνον οἱ τῶν ἐν τῷ ζωδιακῷ πρὸς ἀλλήλους, ἢ τῶν ἐξωθεν αὐτοῦ, πρὸς τοὺς ὁμοίως ἔχοντας, ὅπερ ἂν συνέβαινεν, εἰ μέτοι, καθ' ἣν ἐκτίθεται πρώτην ὑπόθεσιν ὁ Ιππαρχος, οἱ περὶ τὸν ζωδιακὸν αὐτὸν ἀστέρες ἐποιοῦντο τὴν εἰς τὰ ἑπόμενα μετάθεσιν, ἀλλὰ καὶ τῶν ἐν τῷ ζωδιακῷ πρὸς τοὺς ἐξωθεν αὐτοῦ καὶ ἀπλανεστέρω, γίνεσθαι μὲν ἂν εὐκατανόητον καὶ παντὶ τῷ βουλομένῳ προσάγειν τὴν ἐξέτασιν, καὶ φιλαληθῶς ἀναθεωρεῖν εἰ τὰ τῶν φαινόμενα συμφώνως ἔχει ταῖς κατ' ἐκεῖνον ἀναγραφαῖς.

zodiacales entr'elles, ou dans celles qui sont hors du zodiaque, relativement à celles qui gardent toujours la même position, changement qui pourtant seroit arrivé, si, suivant la première supposition d'Hipparque, les seules étoiles du zodiaque avoient un mouvement suivant l'ordre des signes; mais encore dans les positions des étoiles zodiacales, comparées à celles qui sont hors du zodiaque et aux plus éloignées, ainsi qu'on peut s'en assurer, pour peu qu'on apporte de soin et de zèle pour la vérité à examiner si les phénomènes s'accordent avec les descriptions qu'il en a faites.

Παραθησόμεθα οὖν καὶ ἐνθάδε, τῆς προχείρου πείρας ἕνεκεν, ὀλίγας τῶν ἀναγραφῶν, τὰς μάλιστα εὐκατανοήτους τε εἶναι δυναμένας, καὶ πᾶσαν τὴν σύγκρισιν ὑπ' ὄψιν ἀγαγεῖν, ἐκ τοῦ συντετηρημένους δεικνύειν τοὺς περιεχομένους σχηματισμοὺς ὑπὸ τῶν ἐξωθεν τοῦ ζωδιακοῦ, κατὰ τὸ αὐτὸ πρὸς ἀλλήλους τε καὶ τοὺς ἐν τῷ ζωδιακῷ.

Mais pour prouver ce que nous nous proposons, nous extrairons de ses mémoires quelques-unes de ces configurations les moins difficiles à appercevoir, et les plus capables de rendre cette preuve palpable, en montrant que celles qui sont formées par les étoiles hors du zodiaque, sont toujours les mêmes tant entr'elles, que relativement à celles du zodiaque.

FIGURE 2.1: Ptolémée, Almageste, Livre VII avec l'introduction de la sphère des fixes. Première traduction du grec au français par l'Abbé Halma, 1816.

Avec Copernic ($1473 - 1543$) la sphère céleste s'immobilise davantage puisque son mouvement global n'est qu'une apparence liée à la rotation de la Terre sur elle-même et non plus un mouvement réel d'une sphère cristalline. Les étoiles sont repoussées à de distances *immenses*, au sens propre (*immensus*) signifiant au-delà de toutes possibilité de mesure, alors que pour les astronomes antiques cette sphère matérielle se situait à quelques pas au-delà de la sphère de Saturne. Cet élargissement du monde était une nécessité dans le système héliocentrique pour être en accord avec l'absence de mouvement parallactique

décelable des étoiles. Il fallait qu'elles fussent à des distances sans commune mesure avec celle de l'orbe de la Terre.

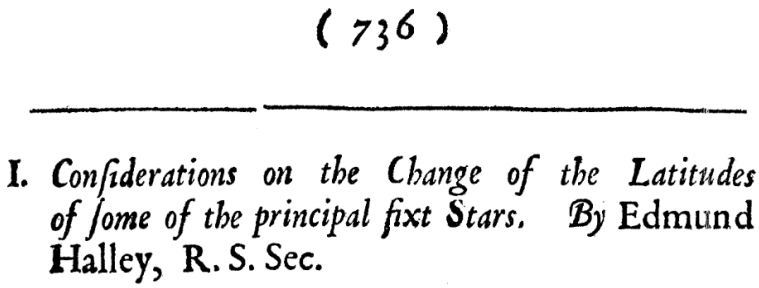
Il faudra la hardiesse intellectuelle de Giordano Bruno $(1548-1600)$ [1] pour faire éclater le monde des fixes et la finitude du monde, dans un oeuvre protéiforme plus philosophique que scientifique, vite tombée dans l'oubli et qui eut peu d'influence sur le cours de la science au moment où Tycho Brahé $(1546-1601)$ donnait la priorité à l'observation sur la spéculation et où la mesure et l'expérience devenaient les sources premières du savoir avec Galilée $(1564-1642)$. L'Univers devient infini et peuplé d'étoiles innombrables dont aucune n'est le centre du monde et le mouvement en est la règle. Son univers n'est pas seulement *infini* (ce que l'on en retient en général) il est aussi *animé* (ce qui est plus important pour le propos de ce texte).

2.1 Découverte du mouvement des étoiles

Cependant la véritable rupture vécue comme telle par les astronomes praticiens et concernant le déplacement vrai des étoiles arrive en 1716 lorsque E. Halley $(1656-1742)$ met en doute l'immobilité des étoiles à partir d'observations et non sur une base spéculative. Dans une courte communication à la Royal Society *Considerations on the Change of the Latitudes of Some of the Principal Fixed Stars* le célèbre astronome attire l'attention sur les changements de positions des étoiles Sirius, Arcturus et Aldébaran, dans l'intervalle de 1800 ans [2] séparant les mesures récentes de celles rapportées par Ptolémée. Les données se concentrent sur la latitude écliptique qui contrairement à la longitude ou aux coordonnées équatoriales n'est pas sujette aux changements et incertitudes venant de la précession. Ces étoiles avaient changé de latitude en un sens contraire au changement de toutes les autres et dans une direction inverse à ce que l'on pouvait attendre en raison du mouvement de l'écliptique.

Halley estimait que ces trois étoiles présentaient en 1717 un changement de latitude vers le sud respectivement de $20'$, $22'$, et $33'$. Mais dans l'intervalle de 18.5 siècles l'écliptique s'est déplacé par rapport aux étoiles et une fois effectuée cette correction il reste un mouvement vers le sud de l'écliptique de $37'$, $42'$, et $33'$, soit typiquement des variations de l'ordre de la seconde de degré par an. A noter que les positions dans le Catalogue de Ptolémée ont une précision de l'ordre de $20'$ et donc le mouvement pointé par Halley est juste significatif pour une étoile mais prend du sens par sa répétition sur plusieurs sources

1. Le Banquet des Cendres, *(La Cena de le Ceneri)*, IIIe dialogue.
2. Halley considère que les coordonnées de l'Almageste sont en fait des valeurs prises chez Hipparque environ en 130 BC



(736)

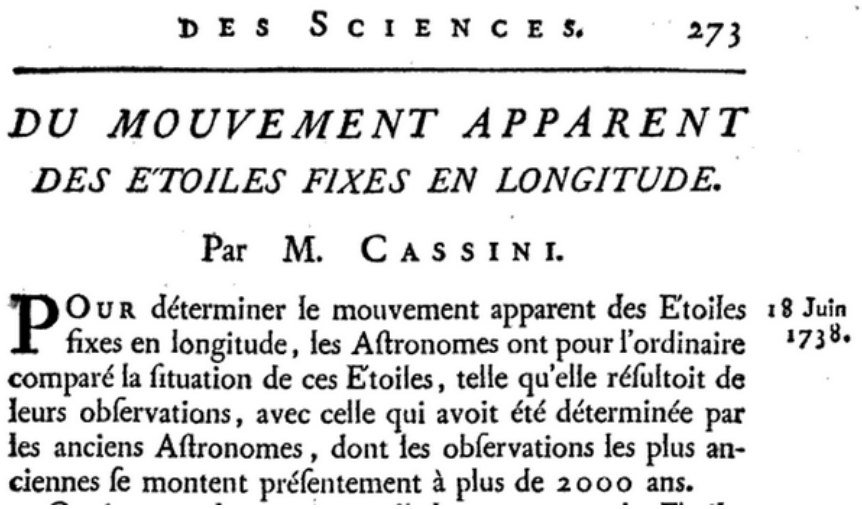
I. *Conſiderations on the Change of the Latitudes of ſome of the principal fixt Stars.* *By* Edmund Halley, R. S. Sec.

FIGURE 2.2: Titre de l'article de E. Halley au Philosophical Transactions dans lequel il annonce le changement de latitude écliptique de quelques étoiles.

indépendantes.

Il reviendra à Jacques Cassini $(1677 - 1756)$ d'apporter la preuve quantitative du déplacement des fixes dans un mémoire présenté à l'Académie en 1738 dans lequel il compare des positions d'Arcturus de Tycho Brahé (~ 1580), d'autres obtenues par J. Richer $(1630 - 1696)$ lors de son voyage à Cayenne en 1672 et ses propres mesures effectuées à l'Observatoire de Paris. Il trouva qu'entre 1672 et 1738, Arcturus s'était rapprochée de l'écliptique de $2'$, soit un changement de près $182''$par siècle. Par comparaison avec des étoiles voisines Cassini établit définitivement qu'il ne s'agit pas d'une conséquence du changement du plan de l'écliptique, qui aurait affecté les étoiles proches de la même quantité, mais bien d'un déplacement de l'étoile par rapport au fond du ciel.

Tobias Mayer$(1723 - 1762)$ malgré la brièveté de sa vie scientifique s'est illustré par des travaux de premier ordre sur le mouvement de la Lune et la sélénographie et apporta une contribution décisive à la question des mouvements propres. L'astronome et historien de l'astronomie J.B. Delambre, peu prolixe en éloges, le qualifiait *non seulement de plus grand astronome du XVIIIe siècle, mais de tous les temps et de tous les pays.* T. Mayer dans un communication lue à l'académie de Gottingen en 1760 rapporte qu'il est parvenu à mesurer un mouvement de plus de $15''$ pour une quinzaine étoiles, sur une liste de 80, par comparaison à des positions obtenues par O. Roemer 50 ans plus tôt. Pour les autres le mouvement propre était probable mais pas établi alors que pour quelques unes comme Sirius, Arcturus, Prycon, Altaïr le changement de position était si sensible qu'il ne laissait aucun doute sur l'existence du mouvement. Dans son traité *Commentary on the proper motion of the fixed stars* il considère que le Soleil pourrait avoir un mouvement dans l'espace et que dans ce cas cela devrait être observable par une divergence du déplacement des étoiles dans la direction du mouvement du système solaire. C'est bien ce que trouvera W. Herschel peu de temps après à partir des données laissées par T. Mayer.



DES SCIENCES. 273

DU MOUVEMENT APPARENT
DES ETOILES FIXES EN LONGITUDE.

Par M. CASSINI.

POUR déterminer le mouvement apparent des Etoiles fixes en longitude, les Aſtronomes ont pour l'ordinaire comparé la ſituation de ces Etoiles, telle qu'elle réſultoit de leurs obſervations, avec celle qui avoit été déterminée par les anciens Aſtronomes, dont les obſervations les plus anciennes ſe montent préſentement à plus de 2000 ans. 18 Juin 1738.

FIGURE 2.3: Début de l'article de J. Cassini dans l'Histoire de l'Académie des Sciences pour l'année 1738, dans lequel il établit de façon définitive l'existence d'un mouvement relatif des étoiles.

2.2 Terminologie et conséquences

Ce déplacement des étoiles dans le temps les unes par rapport aux autres est qualifié de *mouvement propre*, pour le distinguer des mouvement apparents comme l'aberration ou l'effet parallactique, qui proviennent du mouvement de l'observateur ou ceux liés à la précession qui sont totalement artificiels et résultent de la rotation du système de référence équatorial par rapport aux axes de Copernic. Le mouvement propre correspond à un mouvement réel de l'étoile (il lui est *propre*) et/ou du soleil et se manifeste par un changement des coordonnées des étoiles dans le temps, lorsque ces dernières sont rapportées à un système de référence unique pour les différentes époques. Avec le temps les positions relatives changent et la figure des constellations se déforme, comme on le voit pour la Grande Ourse sur la Fig. 2.4, dont les positions il y a 100,000 ans ont été calculées à partir des données du Catalogue Hipparcos, des vitesses radiales et en utilisant un mouvement uniforme dans l'espace (cf. Sec. 4).

Il s'agit bien ici d'une découverte majeure de l'astronomie de position avec de nombreuses conséquences. Tout d'abord sur le plan pratique elle impliquait qu'un catalogue donnant la position des étoiles devait être mis à jour régulièrement. Plus précisément aux deux coordonnées de position (ascension droite et déclinaison par exemple) il fallait rajouter les deux composantes du déplacement annuel, c'est à dire la dérivée première des coordonnées, permettant de propager la position à une date différente de celle de la construction du catalogue.

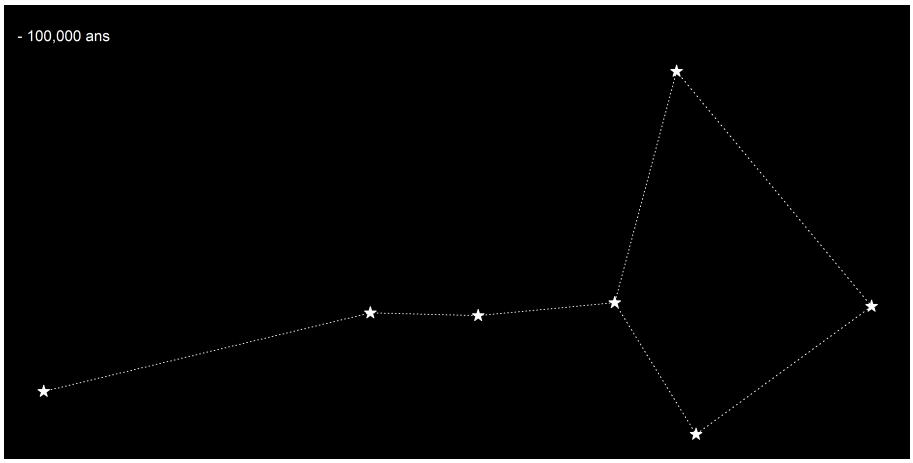


FIGURE 2.4: La constellation de la Grande Ourse telle qu'elle apparaissait y a environ 100,000 ans. Les positions sont rapportées à δ Uma (intersection du manche et du quadrilatère). Les mouvements propres sont tous de l'ordre de $0''.1$/an.

Mais ce n'est pas là le point le plus important. Regardons plus près de chez nous le changement qu'apporte une vision dynamique par rapport à une vision statique de la Terre. On peut avoir une longue liste de coordonnées des différentes villes, ports, montagnes dans les différents continents et reporter cette information pour en faire une carte de haute précision, bien suffisante pour tous les besoins de la navigation maritime ou aérienne. Mais s'apercevoir au moyen de mesures géodésiques réalisées à 10, 20, 100 ans d'intervalle que les distances entre des points situés de part et d'autre des océans changent dans le temps est une découverte de première grandeur et fait passer de la vision statique du globe à une monde mouvant avec des continents en déplacements relatifs. La portée est considérable, même si sur le plan pratique de la navigation les conséquences sont mineures. Il en va de même avec les étoiles : mettre à jour les catalogues est secondaire, mais comprendre que les étoiles ont un mouvement dans l'espace, que ce mouvement obéit probablement à des lois, qu'il y a probablement une cause sous-jacente commune, est une grande avancée dans la compréhension du monde et une mission spatiale comme Gaia se propose d'y contribuer.

3 Le mouvement propre au premier ordre

3.1 Variation de coordonnées avec le temps

Soit une époque de référence t_0 et la position d'une étoile rapportée au barycentre du système solaire par ses coordonnées équatoriales α_0, δ_0. Si l'on note,

$$\dot{\alpha} = \frac{d\alpha}{dt} \tag{3.1}$$

$$\dot{\delta} = \frac{d\delta}{dt} \tag{3.2}$$

la propagation au premier ordre de la position à une époque t s'écrit,

$$\alpha(t) = \alpha_0 + \dot{\alpha}(t - t_0) \tag{3.3}$$

$$\delta(t) = \delta_0 + \dot{\delta}(t - t_0) \tag{3.4}$$

ce qui constitue la forme la plus élémentaire de l'application des mouvements propres. Les coordonnées à l'instant t sont obtenues dans le même système de référence que les coordonnées de départ et, selon le besoin, il se peut que l'on doive rajouter un changement d'équinoxe entre les deux époques. Les unités sont souvent une source de difficultés et d'erreurs dans ces calculs, puisque l'on manipule des degrés, voire des heures sexagésimales, pour les coordonnées, et des taux de variations pour les dérivées qui sont exprimés en secondes d'arc (ou de temps) par an ou par siècle. L'équation (3.3) peut également être utilisée pour estimer les mouvements propres à partir de positions mesurées à deux époques distinctes, avec de nouveau la condition qu'elles soient données dans le même système de référence, donc corrigées des effets de précession entre les deux époques.

Les valeurs typiques de $\dot{\alpha}$ et $\dot{\delta}$ sont de $0''.01$ à $0''.1$ par an, et exceptionnellement plus grandes que $1''$ par an. La plus grande valeur observée est celle de l'Etoile de Barnard avec un déplacement annuel de $10''.3$, soit environ de diamètre lunaire en deux siècles. Si cette étoile avait été plus brillante, nulle doute que Ptolémée aurait noté son mouvement avec les conséquences que l'on peut imaginer sur la Sphère des Fixes.

La liste des étoiles du Catalogue Hipparcos ayant les plus grands mouvements propres se trouve dans la Table 3.1. On remarquera que ce sont toujours des étoiles très proches [3], mais pas nécessairement brillantes. Le mouvement général d'une étoile simple sur le ciel pour un observateur terrestre est la résultante du mouvement propre, pratiquement rectiligne uniforme (cf. Eqs. 4.11 - 4.12 pour la question de l'accélération) et du déplacement

3. Lors des premières tentatives de mesure de la parallaxe stellaire, il était important de se concentrer sur des objets proches, ayant donc une parallaxe sensible . . . , laquelle n'était justement pas connue. Le choix s'est porté sur les étoiles à grand mouvement propre considéré, à juste raison, comme un indicateur de proximité.

TABLE 3.1: Liste des étoiles ayant les mouvements propres les plus importants dans le catalogue Hipparcos

HIP	α deg	δ deg	V mag	π mas	μ_α mas/an	μ_δ mas/an	V_T km s^{-1}	Nom
87937	269.454	+04.668	9.54	549.01	-797.84	10326.93	89.43	Barnard
24186	77.897	-45.004	8.86	255.26	6506.05	-5731.39	161.02	Kapteyn
57939	178.233	+37.733	6.42	109.21	4003.69	-5813.00	306.38	Groombr. 1830
114046	346.447	-35.856	7.35	303.90	6767.26	1326.66	107.57	Lacaille 9352
439	1.335	-37.352	8.56	229.33	5634.07	-2337.94	126.09	CD -37 15492
104214	316.712	+38.741	5.20	287.13	4155.10	3258.90	87.18	61Cyg-A
104217	316.717	+38.734	6.05	285.42	4107.40	3143.72	85.91	61Cyg-B
54035	165.836	+35.981	7.49	392.40	-580.20	-4767.09	58.01	Lalande 21185
108870	330.823	-56.780	4.69	275.76	3959.97	-2538.84	80.86	ϵ Ind
54211	166.384	+43.524	8.82	206.94	-4410.79	943.32	103.32	
19849	63.823	-07.645	4.43	198.24	-2239.33	-3419.86	97.75	o^2 Eri
70890	217.449	-62.681	11.01	772.33	-3775.64	768.16	23.65	α Cen-C

parallactique annuel qui est un effet apparent optique (parallaxe au sens strict) provenant du mouvement de l'observateur autour du Soleil et de la distance finie des étoiles. La figure 3.1 en donne une illustration qualitative.

3.2 Ordre de grandeur

Le mouvement propre étant le résultat visible du déplacement relatif des étoiles par rapport au Soleil, on peut facilement avoir un ordre de grandeur du phénomène en considérant que les étoiles ont un mouvement d'ensemble autour du centre galactique (la rotation galactique) auquel se superpose une vitesse particulière de chaque étoile (l'équivalent d'une agitation thermique pour un gaz en mouvement). La vitesse de la rotation galactique au niveau du Soleil est d'environ 220 km s^{-1} à une distance de 8.5 kpc du centre de la Galaxie. Il y a donc un gradient de vitesse typiquement de $220/8.5 \sim 26\,\mathrm{km\,s^{-1}kpc^{-1}}$, c'est à dire que des étoiles situées à 1 kpc du Soleil ont par rapport à lui une vitesse différentielle de l'ordre de 26 km s^{-1}. Lorsque ce mouvement différentiel s'effectue à peu près sur la plan du ciel, cela correspond à un mouvement propre angulaire d'environ,

$$\frac{26 \times (3.1 \times 10^7)}{3.1 \times 10^{16}} \times (2 \times 10^8) \simeq 5.2 \text{ mas/yr} \tag{3.5}$$

avec 3.1×10^7 pour le nombre de secondes par an, 3.1×10^{16} pour la distance de 1 kpc en km et finalement la conversion des radians en mas. Cette valeur dépend faiblement de

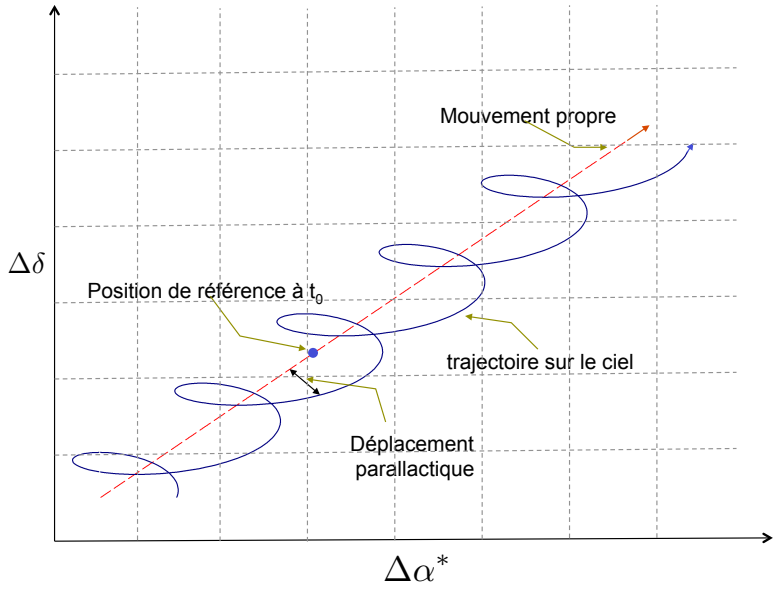


FIGURE 3.1: Déplacement sur le ciel dans un système de référence inertiel d'une étoile simple. Le mouvement apparent sur le plan du ciel est la résultante d'un déplacement systématique pratiquement uniforme (le mouvement propre) et des boucles annuelles de l'effet parallactique venant du mouvement de la Terre autour du Soleil.

la distance, puisque la vitesse différentielle croit linéairement avec la distance, alors que la vitesse angulaire décroît de la même manière.

Par rapport aux étoiles proches, le Soleil possède un mouvement *propre* (non lié à la rotation galactique) également de l'ordre de 20 km s^{-1} découvert par W. Herschell (1738−1822). En admettant qu'il en va de même pour les étoiles, il y a donc une contribution au mouvement propre qui décroît avec la distance d'amplitude,

$$\frac{20 \times (3.1 \times 10^7)}{3.1 \times 10^{13}\, d} \times (2 \times 10^8) \simeq \frac{4}{d}\ ''/\mathrm{yr} \tag{3.6}$$

si d est la distance exprimée en pc. Pour les mêmes raisons, les vitesses radiales des étoiles seront également typiquement de $10 - 30$ km s^{-1}, sauf à très grande distance lorsque la rotation galactique est dominante.

3.3 Composantes du mouvement propre

La dérivée instantanée des coordonnées n'est pas la quantité physique la plus pertinente, même si elle a son utilité pour les calculs. Le mouvement propre étant la composante projetée sur la sphère céleste d'un mouvement à trois dimensions, il est plus intéressant d'utiliser les projections du vecteur vitesse sur les axes locaux que les variations des coor-

données. Il s'agit ici de la vitesse angulaire, c'est à dire la vitesse divisée par la distance, on verra plus bas la relation avec la vitesse cinématique. On a alors les composantes du mouvement propre telles qu'elles apparaissent dans les catalogues modernes (Hipparcos, Tycho, Gaia),

$$\mu_\alpha = \frac{d\alpha}{dt}\cos(\delta) \tag{3.7}$$

$$\mu_\delta = \frac{d\delta}{dt} \tag{3.8}$$

et on utilise aussi fréquemment la notation μ^*_α pour indiquer qu'il s'agit de la composante physique incluant le terme en $\cos\delta$. On peut alors écrire au premier ordre la variation des coordonnées entre deux époques,

$$\Delta\alpha\cos\delta = \mu_\alpha(t - t_0) \tag{3.9}$$

$$\Delta\delta = \mu_\delta(t - t_0) \tag{3.10}$$

Les notations ne sont pas universelles et il faut s'assurer du contenu précis des champs. Ces quantités expriment un déplacement annuel sur un grand cercle de la sphère et non une variation des coordonnées. On voit que près du pôle céleste on peut avoir une forte variation annuelle de l'ascension droite, sans que cela traduise un déplacement important sur ciel. Pour cette même étoile rapportée à des coordonnées écliptique, la singularité serait absente. La valeur de ces deux composantes dans un système de coordonnées écliptiques ou galactiques s'obtiendrait par une simple rotation autour du rayon vecteur, alors que les variations des coordonnées entre les deux systèmes ne se réduisent pas à des transformations aussi simples.

3.4 Relation avec le vitesse

Soit $\mathbf{V}_\perp$ la vitesse tangentielle réelle (en km s^{-1}) d'une l'étoile sur la sphère céleste et r sa distance en km. La vitesse angulaire en radian par seconde est alors,

$$\boldsymbol{\mu} = \frac{\mathbf{V}_\perp}{r} \tag{3.11}$$

Pour avoir les unités usuelles des astronomes, il faut avoir les distances en parsec et les mouvements propres en $''$/an ou mas/an. Soit donc ϖ sa parallaxe exprimée en seconde de degré ou en mas ($0''.001$). Sa distance en parsec (resp. kpc) est alors $\rho = 1/\varpi$. Pour ne pas perdre l'homogénéité des équations il faut partir de la définition de la parallaxe,

$$\varpi = \frac{a}{r} \tag{3.12}$$

où a est le demi-grand axe de l'orbite terrestre, donc une longueur comme r. Alors,

$$\mathbf{V}_\perp = \frac{\boldsymbol{\mu}}{\varpi} a \tag{3.13}$$

qui est une équation homogène dans laquelle les unités angulaires sont libres. En adoptant des km s^{-1} pour l'unité de vitesse et l'année pour l'unité de temps dans les mouvements propres, on a,

$$\mathbf{V}_\perp = A \frac{\boldsymbol{\mu}}{\varpi} \tag{3.14}$$

avec $A = (1\text{au/an}) \times 1\text{s}$, soit la distance parcourue en une seconde à la vitesse de une unité astronomique par an, ce qui donne en km,

$$A = 149597870/(365.25 \times 86400) = 4.740470 \text{ km} \tag{3.15}$$

Exemple : vitesse tangentielle de Véga :

$$\varpi = 129 \text{ mas} \tag{3.16}$$
$$\mu_\alpha = 201 \text{ mas/yr} \tag{3.17}$$
$$\mu_\delta = 287 \text{ mas/yr} \tag{3.18}$$
$$|\boldsymbol{\mu}| = 350 \text{ mas/yr} \tag{3.19}$$
$$\tag{3.20}$$

$$|\mathbf{V}_\perp| = A \frac{|\boldsymbol{\mu}|}{\varpi} = 12.9 \text{ km s}^{-1} \tag{3.21}$$

qui est la composante tangentielle du déplacement annuel de Véga par rapport au Soleil.

4 Mathématique du mouvement propre

4.1 Formulaire général

Le déplacement sur la sphère céleste est la partie visible par des mesures angulaires d'un mouvement plus général dans l'espace à trois dimensions. Avec un modèle de ce déplacement, on peut relier les composantes du vecteur vitesse aux quantités observables (les deux composantes du mouvement propre, la vitesse radiale) et ajuster des paramètres du modèle, et plus généralement d'un modèle cinématique de la Galaxie lorsque l'étude porte sur un grand nombre d'étoiles. Pour une étoile simple isolée (hors d'un amas compact par exemple) et des durées de quelques milliers d'années on n'a pas encore remarqué d'écart à un mouvement rectiligne uniforme. Ce n'est bien entendu pas le cas pour une étoile

double dont le mouvement orbital n'est pas uniforme et rectiligne et donc la courbure ou l'accélération se détecte en quelques années. Nous allons partir de ce modèle cinématique très simple pour relier le mouvement dans l'espace au mouvement angulaire projeté sur le plan tangent.

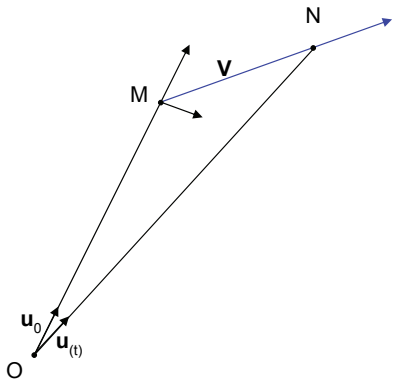


FIGURE 4.1: Modèle cinématique du déplacement d'une étoile simple dans l'espace à trois dimensions.

Le mouvement spatial et les notations sont donnés sur la figure (4.1) pour un déplacement rectiligne et uniforme de vecteur vitesse $\mathbf{V}$. On a pour l'équation du mouvement,

$$\mathbf{ON}(t) = \mathbf{OM} + \mathbf{V}\,t \tag{4.1}$$

et

$$|\mathbf{OM}| = r \tag{4.2}$$

pour la distance à l'époque initiale. En notant respectivement $\mathbf{u}_0$ et $\mathbf{u}$ les vecteurs unitaires dans la direction de l'étoile aux instants $t_0 = 0$ et t, on a,

$$\frac{\mathbf{ON}}{r} = \mathbf{u}_0 + \frac{\mathbf{V}}{r}\,t \tag{4.3}$$

et en exprimant la vitesse en unités angulaires avec $\mathbf{W} = \mathbf{V}/r$,

$$\frac{\mathbf{ON}}{r} = \mathbf{u}_0 + \mathbf{W}\,t \tag{4.4}$$

et finalement avec $W = |\mathbf{W}|$,

$$\begin{aligned} \mathbf{u}(t) &= \frac{\mathbf{u}_0 + \mathbf{W}\,t}{|\mathbf{u}_0 + \mathbf{W}\,t|} \\ &= (\mathbf{u}_0 + \mathbf{W}\,t)\left(1 + 2\mathbf{u}_0 \cdot \mathbf{W}\,t + W^2\,t^2\right)^{-1/2} \end{aligned} \tag{4.5}$$

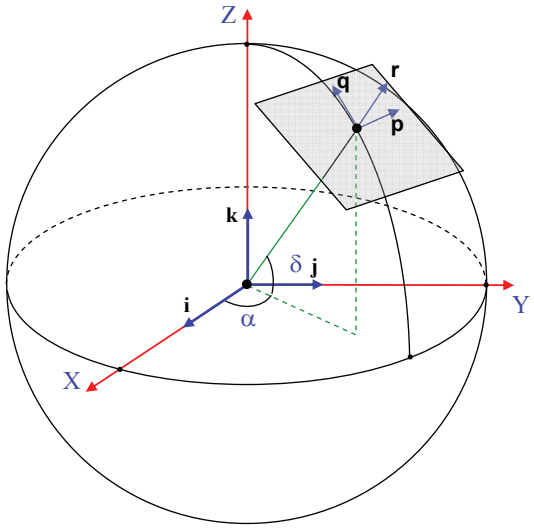


FIGURE 4.2: Coordonnées globales dans le système inertiel et système de référence local associé à une direction.

On décompose $\mathbf{W}$ en la somme d'un vecteur sur le plan du ciel et d'un vecteur radial,

$$\mathbf{W} = \mathbf{W}_\perp + W_r\,\mathbf{u}_0 \tag{4.6}$$

où $W_r = v_r/r$ est le *le mouvement propre radial*. Alors au deuxième ordre du temps,

$$\begin{aligned}\mathbf{u}(t) &= \mathbf{u}_0 + \mathbf{W}_\perp\, t \\ &+ \left[\left(3W_r^2 - W^2\right)\mathbf{u}_0 - 2W_r\,\mathbf{W}\right]\frac{t^2}{2}\end{aligned} \tag{4.7}$$

Il faut ensuite projeter sur le plan tangent (Fig. (4.2), avec

$$\mu_\alpha = \mathbf{W}_\perp \cdot \mathbf{p} = \dot{\alpha}_{(t=t_0)}\,\cos\delta_0 \tag{4.8}$$

$$\mu_\delta = \mathbf{W}_\perp \cdot \mathbf{q} = \dot{\delta}_{(t=t_0)} \tag{4.9}$$

$$\mu_r = W_r = v_r/r \tag{4.10}$$

et enfin $\mu^2 = \mu_\alpha^2 + \mu_\delta^2$ (mouvement propre tangent).

On obtient alors la relation entre des différences de positions entre deux époques, et les composantes du mouvement propre. Ces équations constituent le modèle de propagation au deuxième ordre du temps permettant de calculer la position d'un étoile au temps t à partir de sa position et de son mouvement propre au temps t_0.

$$\Delta\alpha\cos\delta_0 = \mu_\alpha\, t - \left[\mu_r\,\mu_\alpha - \tan\delta_0\,\mu_\alpha\,\mu_\delta\right]\,t^2 + \mathcal{O}(t^3) \tag{4.11}$$

$$\Delta\delta = \mu_\delta\, t - \left[\mu_r\, \mu_\delta + \frac{\tan\delta_0}{2}\, \mu_\alpha^2\right]\, t^2 + \mathcal{O}(t^3) \tag{4.12}$$

On remarquera, qu'au premier ordre on retrouve les expressions Eqs. (3.9). Bien que la vitesse dans l'espace soit uniforme, donc que l'accélération 3D soit nulle, ce n'est pas le cas du mouvement projeté, puisque des termes en t^2 apparaissent dans le développement. Ils dépendent de la vitesse radiale et traduisent un effet géométrique de perspective dont l'existence de principe avait été indiqué en 1844 l'astronome F. W. Bessel $(1784-1846)$ [4] avant d'être formulée plus simplement pour l'observation par F.Schlesinger en 1917. Pour les étoiles très proches ($d < 10$ pc) et l'astrométrie de haute précision (< 0.1 mas) ces effets ne sont pas négligeables et le modèle astrométrique doit en tenir compte. L'inversion des équations (4.11-4.12) permet d'obtenir les composantes μ_α, μ_δ à partir des différences de positions $\Delta\alpha\cos\delta_0$ et $\Delta\delta$.

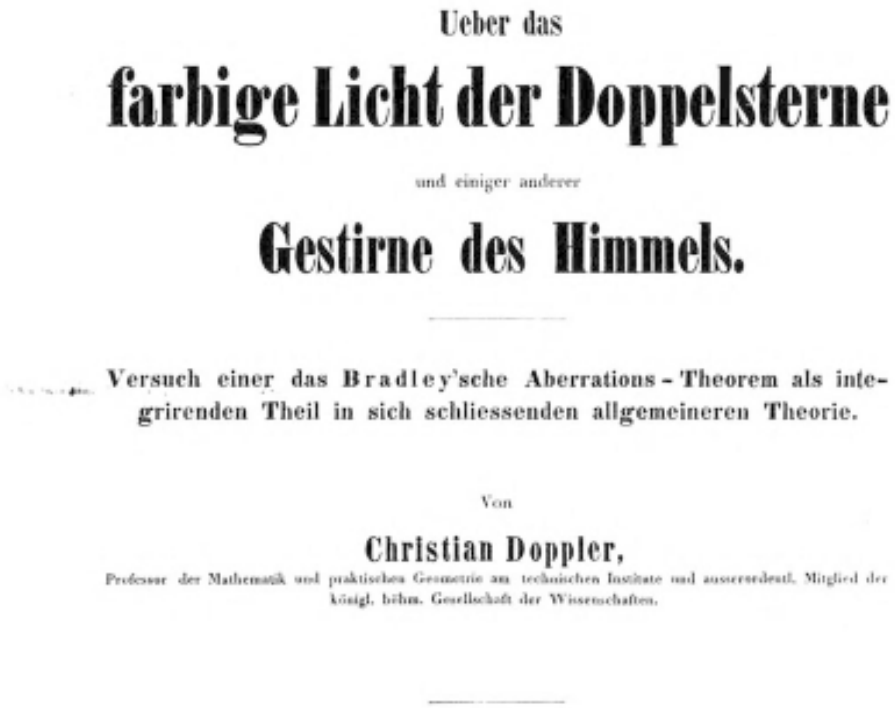
4.2 Ecart au mouvement uniforme

Ainsi même dans le cas d'un mouvement uniforme dans l'espace, le déplacement sur le ciel comporte des termes d'accélération.

4. Über Veränderlichkeit der eigenen Bewegungen der Fixterne, Astronomische Nachrichten, volume 22, 1844 (Variabilité du mouvement propre des étoiles fixes)

5 La vitesse radiale

On appelle vitesse radiale d'un astre la composante de sa vitesse sur la ligne de visée. Elle est généralement notée v_r et est exprimée en $\mathrm{km\,s^{-1}}$. Elle est positive dans le cas d'un éloignement et négative si l'astre se déplace vers l'observateur. Alors que la vitesse tangentielle n'est pas directement accessible (l'observation ne donne que le déplacement angulaire), la vitesse radiale peut être mesurée en tant que vitesse par l'effet Doppler-Fizeau et non déduite de la variation de la distance (ce qui est théoriquement possible, mais est encore hors de portée de l'astrométrie moderne).



Ueber das

farbige Licht der Doppelsterne

und einiger anderer

Gestirne des Himmels.

Versuch einer das Bradley'sche Aberrations-Theorem als integrirenden Theil in sich schliessenden allgemeineren Theorie.

Von

Christian Doppler,

Professor der Mathematik und praktischen Geometrie am technischen Institute und ausserordentl. Mitglied der königl. böhm. Gesellschaft der Wissenschaften.

FIGURE 5.1: Page de titre de l'article de H.C. Doppler dans les Comptes Rendus de la Société Scientifique de Bohême de l'année 1843 (*Abhandlungen der Königlichen Böhmischen Gesellschaft der Wissenschaften*)

L'effet du mouvement de l'observateur sur la fréquence d'une onde a été introduit sur une base théorique en 1842 pas Hans Christian Doppler $(1803-1853)$ dans le mémoire *Über das farbige Licht der Doppelsterne und einiger anderer Gestirne des Himmels* (Sur la lumière colorée des étoiles doubles et de quelques autres corps célestes). Doppler justifiait l'effet sur la lumière par une analogie avec les ondes acoustiques. L'effet fut confirmé

expérimentalement et quantitativement pour les ondes sonores en 1845 par C.H. Buys-Ballot, mais bien plus tardivement pour la lumière au moyen de mesures astronomiques et son existence resta controversée et fut l'objet de polémiques pendant plusieurs décennies. C.H. Buys-Ballot, très connu dans le monde de la météorologie pour des lois qui portent son nom relatives au sens de rotation de l'air autour des anticyclones et des dépressions, employa des musiciens pour jouer une note bien précise sur la plate-forme d'un train. Pour une oreille exercée placée sur le quai de la gare, le décalage (connaissant la note émise au repos) était parfaitement audible et sûrement quantifiable.

Concernant la lumière elle-même et la couleur des étoiles, Doppler commet deux grosses erreurs dans cette étude. La couleur des étoiles n'est pratiquement pas affectée par le déplacement radiale en raison du transfert du rayonnement IR ou UV vers le visible qui compense le déplacement de la partie visible. De plus les vitesses nécessaires, proches de $100,000$ km s^{-1}, sont sans rapport avec les vitesses orbitales des composantes des étoiles doubles. A noter que ce mémoire ne fait aucune allusion à la mesure des vitesses radiales et encore moins sur la nécessité de travailler sur des spectres de raies et non sur le spectre continu.

La formulation correcte pour les ondes lumineuses revient au physicien Armand Hippolyte Fizeau $(1819-1896)$ dans un travail totalement indépendant présenté à la Société Philomatique de Paris en 1848, mais seulement publié en 1870 sous le titre *Effet du mouvement sur le ton des vibrations sonores et sur la longueur d'onde des rayons de lumière.* [5] Fizeau, le premier, insiste sur la différence entre la couleur d'une source provenant de l'émission continue et peu influencée par le mouvement de l'observateur ou de la source, et le cas des raies spectrales qui sont déplacées vers le bleu ou le rouge et produisent un effet mesurable. L'extrait du texte de la Fig. 5.2 montre bien que le physicien avait conscience des applications astronomiques fondamentales qui découleraient de la mesure du décalage spectral. L'effet est toujours appelé Doppler-Fizeau en France, et cette dénomination était commune (voire même effet Fizeau tout court) dans toutes les publications de vitesses radiales de la fin du XIXe siècle, avant que l'habitude ne soit prise de n'y faire référence que par l'appellation tronquée d'effet Doppler.

A noter que Ernst Mach $(1838-1916)$ discute également en 1860 de l'effet du mouvement sur la longueur d'onde de la lumière en des termes similaires à ceux de Fizeau.

Le principe fondamental de l'effet Doppler-Fizeau est purement lié à la cinématique de la propagation d'un signal émis à partir d'une source mobile par rapport à un observateur.

5. Annales de chimie et de physique, Vol. 19, Serie IV, 1870, p. 211-221.

On remarquera que le résultat ne dépend que de la vitesse du corps lumineux et nullement de sa distance. De semblables observations pourraient donc conduire à des données sur les vitesses propres des astres les plus éloignés, et, dans certains cas, sur leurs distances ; pour certaines étoiles doubles, par exemple, dont on connaît les éléments et la durée de la révolution, il suffirait de connaître leurs vitesses propres pour pouvoir déterminer leurs distances.

FIGURE 5.2: Extrait de l'article de H. Fizeau de 1870 dans les Ann. de Chimie et Physique, correspondant à sa communication de 1848 à la Société Philomatique de Paris.

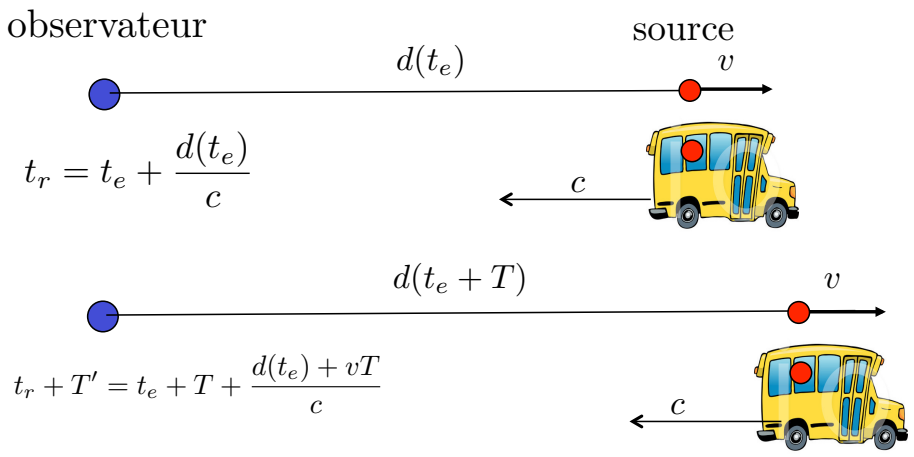


FIGURE 5.3: Principe de l'effet Doppler-Fizeau à partir d'une source en mouvement produisant un signal périodique se propageant jusqu'à l'observateur. L'intervalle entre deux émissions (T) est différent de l'intervalle entre deux réceptions (T').

La notion d'onde est secondaire car tout autre moyen de propagation à vitesse constante convient comme cela est illustré sur la Figure 5.3. Si deux signaux sont séparés par un intervalle T_0 dans le référentiel de la source, alors l'intervalle de réception de ces deux mêmes signaux (flash de lumière, crête d'une onde, paquet postal, coup de canon, éclipse des satellites de Jupiter, etc.) est donné par,

$$T = T_0 \left(1 + \frac{v}{c}\right) \tag{5.1}$$

avec v pour la vitesse radiale de la source et c la célérité de la propagation par rapport à l'observateur. Dans le cas d'un signal ondulatoire de fréquence ν_0 ou de longueur d'onde λ_0 dans le référentiel de la source, on a les quantités équivalentes pour l'observateur,

$$\nu = \frac{\nu_0}{1+\frac{v}{c}} \simeq \nu_0 \left(1 - \frac{v}{c}\right) \tag{5.2}$$

$$\lambda = \lambda_0 \left(1 + \frac{v}{c}\right) \tag{5.3}$$

et l'expression la plus courante pour les vitesses radiales en astronomie,

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v_\mathrm{r}}{c} \tag{5.4}$$

L'effet étant fondamentalement lié à la cinématique de l'espace, la relativité restreinte fournit le cadre le plus naturel pour son expression dans le cas des ondes électromagnétiques et l'absence d'un milieu privilégié pour la propagation.

$$\nu = \nu_0 \frac{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{1/2}}{1 + \frac{v_\mathrm{r}}{c}} \tag{5.5}$$

avec v pour la vitesse de la source et v_r pour la composante le long de la ligne de visée (vitesse radiale). A noter l'existence d'un effet transverse lié à la transformation relativiste du temps entre les deux référentiels présente même lorsque $v_\mathrm{r} = 0$. Pour un mouvement purement radial, la formule se simplifie avec $v = v_\mathrm{r}$,

$$\nu = \nu_0 \frac{\left(1 - \frac{v}{c}\right)^{1/2}}{\left(1 + \frac{v}{c}\right)^{1/2}} \tag{5.6}$$

5.1 Mesures des vitesses radiales

Avec une vitesse radiale comparable à celle de la Terre autour du Soleil, soit $30\,\mathrm{km\,s^{-1}}$, le décalage des raies $\Delta\lambda/\lambda$ est de l'ordre de 10^{-4}, ce qui nécessite des spectroscopes ou spectrographes avec un pouvoir de résolution élevé, d'autant plus que l'objectif est d'atteindre des précisions meilleures que le $\mathrm{km\,s^{-1}}$.

5.1.1 Spectroscopie physique et cinématique

Avant toute chose il convient de noter le décalage historique entre l'irruption de la spectroscopie, et son acceptation, dans le milieu astronomique et l'obtention des premières vitesses radiales digne de confiance.

La spectroscopie astronomique s'est tout d'abord préoccupée de l'analyse des spectres pour comprendre la physique de l'atmosphère des étoiles et des nébuleuses (s'agissait-il d'étoiles agglomérées ou de nuages de gaz chaud ?) et reconnaître la composition chimique des astres. J. Fraunhofer $(1787-1826)$ en a été le déchiffreur initial sur le spectre solaire, mais le véritable pionnier de la spectroscopie astronomique stellaire est le britannique Sir W. Huggins $(1824-1910)$ à partir de 1863. Ce n'est pas un astronome au sens classique du terme et il a dû faire face au scepticisme des astronomes du sérail pour imposer une technique totalement nouvelle, venant d'une autre discipline, qui s'est avérée aussi féconde pour la connaissance des astres que l'arrivée des lunettes et des télescopes dans les siècles précédents.

Les aspects théoriques concernant l'absorption et l'émission par les gaz chauds sont l'oeuvre de G. Kirchhoff $(1824-1887)$ and R. Bunsen $(1811-1899)$ en 1859 et 1860 à l'Université de Heidelberg. Ce travail exceptionnel marque le véritable début de l'astrophysique et une évolution irréversible de l'astronomie.

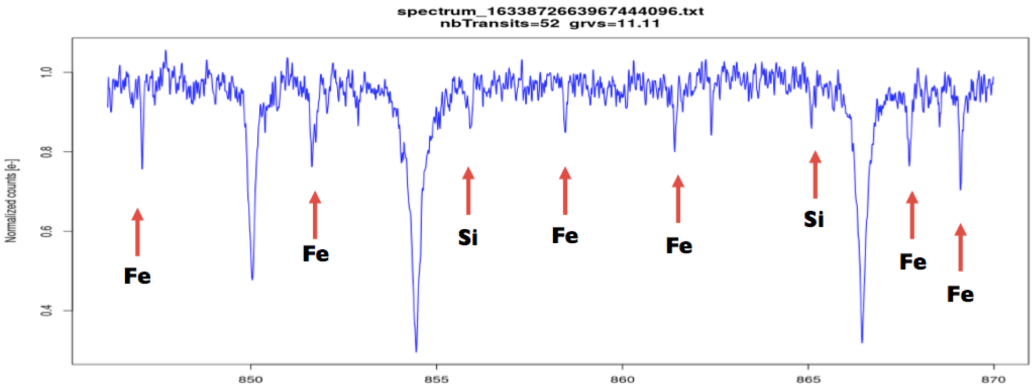


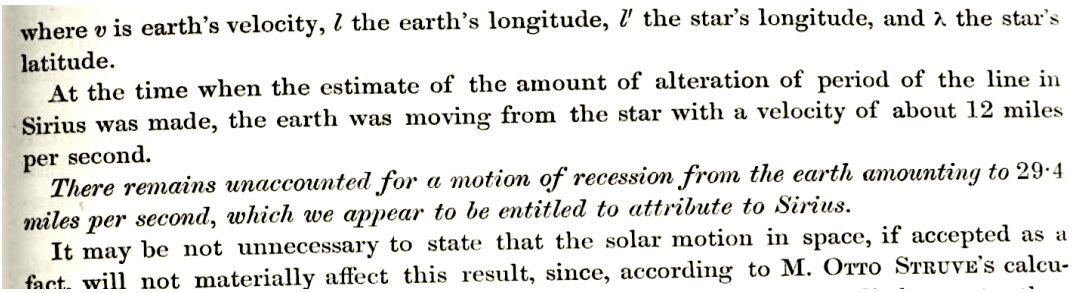
FIGURE 5.4: Exemple de spectre produit par le spectroscope placé à bord du satellite Gaia. Les trois raies les plus profondes proviennent du calcium. Les longueurs d'onde sont en nm. Crédit : ESA/Gaia/DPAC/CU6.

Alors qu'aucune vitesse radiale réaliste n'avait encore été mesurée, le premier catalogue spectroscopique avait vu le jour pour 4051 étoiles (Vogel, 1883) et quelques années plus tard le premier Catalogue de Draper (Harvard, 1890) en contenait 10,351 jusqu'à la magnitude 8. Dans le même temps Sr W. Huggins avait examiné le spectre d'au moins 70

nébuleuses pour conclure qu'au moins 1/3 étaient gazeuses. Cela témoigne de la grande différence entre le fait d'acquérir et d'exploiter les spectres pour la physique stellaire et la capacité à détecter et mesurer le décalage des raies. La profondeur, la forme, voire la position relative des raies, (Fig. 5.4) sont plus importants pour déterminer la composition chimique et les conditions physiques des atmosphères stellaires que l'étalonnage précis en longueur d'onde des spectres, indispensable pour leur exploitation cinématique. Six décennies de labeur seront nécessaires pour atteindre les 10,000 vitesses radiales, alors que la classification spectrale des étoiles avait atteint sa maturité dès le début du XXe siècle.

5.1.2 Mesures visuelles

Dès 1867, les premiers essais ont été entrepris pour détecter un éventuel décalage spectral entre le spectre d'une étoile et un spectre de référence produit en laboratoire. La méthode était visuelle et le manque de lumière sur un spectre fortement dispersé rendait la mesure extrêmement difficile, voire impossible, très exigeante pour la vue des observateurs, et de toutes façons uniquement envisageable pour les étoiles les plus brillantes. Huggins communique un premier résultat en 1868 [6] avec la vitesse radiale de Sirius à $+47$ km s^{-1}, corrigée de la vitesse de la Terre autour du Soleil (Fig. 5.5). Bien que totalement erronée en signe et en valeur, c'est bien la première tentative de détermination à partir de l'effet Doppler-Fizeau, à un moment où la réalité de l'effet n'était pas établie. Avec une meilleur instrument il donnera en 1872 pour Sirius une vitesse radiale comprise entre $+29$ et $+35$ km s^{-1}.



where v is earth's velocity, l the earth's longitude, l' the star's longitude, and λ the star's latitude.

At the time when the estimate of the amount of alteration of period of the line in Sirius was made, the earth was moving from the star with a velocity of about 12 miles per second.

There remains unaccounted for a motion of recession from the earth amounting to 29·4 *miles per second, which we appear to be entitled to attribute to Sirius.*

It may be not unnecessary to state that the solar motion in space, if accepted as a fact, will not materially affect this result, since, according to M. Otto Struve's calcu-

FIGURE 5.5: Extrait de l'article fondateur de W. Huggins de 1868 contenant la première estimation visuelle de la vitesse radiale d'une étoile à partir de l'effet Doppler-Fizeau.

Huggins discute le réalisme de cette vitesse en la comparant à la vitesse tangentielle déduite du mouvement propre et de la parallaxe. Selon la source de la parallaxe il obtient

6. W. Huggins, *Further observations on the spectra of some the stars and nebulæ, with an attempt to determine therefrom whether these bodies are moving towards or from the earth*, Philosophical Transactions,1868, vol. 158, pp. 529-554

une vitesse sur le plan du ciel de 38 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ ou 68 $\mathrm{km\,s^{-1}}$, parfaitement compatible avec la vitesse le long de la ligne de visée. A noter que la contribution à la vitesse radiale du mouvement orbital de Sirius au sein du système double qu'il forme avec Sirius-B n'est que de -1 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ en 1868.

Plus tard l'erreur probable des mesures visuelles a été estimée à environ $20\,\mathrm{km\,s^{-1}}$, un niveau qui les rendait marginalement utiles pour l'astronomie. Les erreurs systématiques étaient probablement encore plus élevées. Si l'on prend par exemple les 48 étoiles mesurées au Temple Observatory dans les années 1880, elles aboutissent à de grandes valeurs toutes négatives, ce qui est pour le moins suspect.

Un programme est mis en place à l'Observatoire de Greenwich en 1874 sous la direction de E. W. Maunder ($1851-1928$), plus connu pour ses travaux en physique solaire que stellaire. Pendant près de quinze ans il publiera tous les ans une liste de vitesses radiales estimées visuellement sur les spectres d'étoiles brillantes. La grande variabilité des résultats firent douter de leur valeur et ce programme fut interrompu vers 1890 lorsque les méthodes photographiques eurent démontré leur supériorité. Ces échecs répétés sur la durée et le manque de fondement théorique du principe Doppler-Fizeau pour les ondes lumineuses renforcèrent la position du camp des sceptiques sur la possibilité de réellement mesurer le déplacement radial des étoiles avec la spectroscopie. [7]

5.1.3 Mesures photographiques

Ce n'est qu'avec le couplage des spectroscopes et de la photographie (donc la construction des spectrographes) que des résultats réalistes, précis et reproductibles furent obtenus dans les années 1890 à Potsdam par H.C. Vogel ($1841-1907$) et J. Scheiner ($1858-1914$), les véritables fondateurs de la spectrographie des vitesses radiales. Dès 1887 ils tentèrent d'enregistrer photographiquement le déplacement des raies spectrales et furent rapidement convaincus du bien fondé de la méthode. En 1888 leur premier spectrographe fit passer l'erreur probable d'environ $20\,\mathrm{km\,s^{-1}}$ pour les observations visuelles de Greenwich à environ $3\,\mathrm{km\,s^{-1}}$ avec l'instrument de Potsdam. La mise en évidence directe de la rotation du Soleil par la différence des vitesses radiales aux deux bords et la modulation des vitesses radiales par le mouvement orbital de la Terre apportèrent la confirmation ultime de la réalité de l'effet Doppler-Fizeau et de sa relation avec les mouvement radiaux des sources relativement aux observateurs.

Mais la découverte la plus extraordinaire faite par Vogel a été la détection des étoiles binaires spectroscopiques et la preuve que les variations d'éclat de l'étoiles variable Algol

7. Voir J.B. Hearnshaw, The analysis of starlight, Cambridge

était en relation avec un mouvement orbital d'un astre peu lumineux qui passait périodiquement devant le disque d'Algol. Les systèmes binaires spectroscopiques sont des étoiles doubles non résolues visuellement et dont le mouvement orbital est mis en évidence par la variation périodique de la vitesse radiale, donc par la spectroscopie. En 1894 [8] A.A. Belopolsky ($1854 - 1934$) avec la grande lunette de 76 cm de l'Observatoire de Pulkovo démontra l'existence d'une variation périodique entre -19 et +24 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ de la vitesse radiale de l'étoile δ Cephei en parfait accord avec la période de variation de la courbe de lumière photométrique de 5.4 j découverte en 1784 par J. Goodricke. De longues années seront nécessaires pour comprendre qu'il ne pouvait s'agir du mouvement d'une étoile binaire, mais bien d'une pulsation de l'étoile elle-même.

La détection des planètes extra-solaires par la méthode des vitesses radiales est une méthode tout à fait similaire, mais avec une répétabilité meilleure que le $\mathrm{m\,s^{-1}}$. A noter que l'on cherche ici des *variations* de vitesse au cours du temps et que l'exactitude est moins importante que la précision. Un biais *constant* sur la vitesse radiale n'empêche pas la détection de la modulation de la vitesse au cours du mouvement orbital de la planète.

Une première liste de vitesses radiales rapportées au Soleil est publiée en 1892 pour 51 étoiles [9], avec une précision de $2 - 3\ \mathrm{km\,s^{-1}}$, soit d'un seul coup une amélioration d'un ordre de grandeur par rapport aux mesures visuelles. A titre d'illustration la vitesse radiale de Sirius est trouvée par Vogel à $-13.8\ \mathrm{km\,s^{-1}}$ et celle de Véga à $-14.1\ \mathrm{km\,s^{-1}}$ alors que les valeurs modernes sont respectivement de -7.6 et $-13.9\,\mathrm{km\,s^{-1}}$. La précision estimée par les auteurs est 2.6 $\mathrm{km\,s^{-1}}$.

C'est le démarrage d'une collecte laborieuse et à faible rendement à laquelle vont s'atteler la plupart des grands observatoires en Europe, en Russie et aux Etats-Unis. La découverte d'étoiles présentant des vitesses radiales $> 75\,\mathrm{km\,s^{-1}}$ en relation avec leur position dans le plan galactique est à l'origine de la découverte de la rotation galactique, un résultat fondamental dans l'histoire de l'astronomie. Au début des années 1920, les vitesses radiales sont connues pour environ 2000 étoiles avec un accroissement annuel de 250 nouvelles étoiles. Le catalogue général des vitesses radiales contient les résultats pour ~ 7000 étoiles en 1931, puis $15,000$ dans les années 1960 et environ $50,000$ autour de l'an 2000 avant l'arrivée des relevés à plus grand champ et l'obtention simultanée de nombreux spectres. En 2015 on connait les vitesses radiales pour un maximum de 500,000 étoiles et Gaia va en fournir plusieurs millions en 2018 et probablement 100 millions en 2022.

8. Das Spectrum von δ Cephei, Astronomische Nachrichten, 1894, volume 136, n. 17, p.281 et la version anglaise dans Astrophysical Journal, 1895, 1, 160-161

9. H.C. Vogel, Publikationen des Astrophysikalischen Observatoriums zu Potsdam, 1892, vol. 7, pp.152-154 et également Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 52, p.541

152 H. C. VOGEL, 152

Publikationen des Astrophysikalischen Observatoriums zu Potsdam, vol. 7, pp.152-154

Verzeichniss

der

Eigenbewegungen im Visionsradius von 51 Sternen.

Das nachstehende Verzeichniss der Eigenbewegungen im Visionsradius giebt in den Columnen 6 und 7 bei den Sternen, deren Spectra nur mit Anwendung der ersten Methode ausgemessen sind, die auf den Seiten 96 bis 99 gefundenen Mittelwerthe unverändert, während an die auf Seite 99 bis 104 gegebenen Mittelwerthe der Beobachtungen nach der zweiten Methode vor Aufnahme in das Verzeichniss bei Vogel die Correction + 0.12, bei Scheiner — 0.38 Meilen (s. Seite 109) angebracht ist. Eine Ausnahme hiervon bildet β Orionis, bei welchem keine Correction angebracht wurde wegen nicht strenger Durchführung der zweiten Messmethode. Bei Sternen, die von mir nach verschiedenen Methoden gemessen sind, erfolgte die Mittelbildung (Columne 6) nach Massgabe der Anzahl der bei jeder Methode benutzten Platten.

Nr.	Stern	Grösse	Spectral-Classe	Epoche der Beobachtung	Geschwindigkeit relativ zur Sonne			
					Vogel	Scheiner	Mittel	Gewicht
1	*α Andromedae*	2.0	Ia	1889.93	+ 0.26	+ 0.96	+ 0.6	3
2	*β Cassiopejae*	2.1	Ia—IIa	1889.04	+ 0.18	+ 1.21	+ 0.7	1
3	*α Cassiopejae*	var.	IIa	1890.14	— 2.01	— 2.10	— 2.1	4
4	*γ Cassiopejae*	2.0	Ic	1888.89	+ 0.54	— 1.49	— 0.5	1
5	*β Andromedae*	2.3	IIa	1889.26	+ 1.21	+ 1.80	+ 1.5	3
6	*α Ursae minoris*	2.0	IIa	1888.90	— 3.44	— 3.53	— 3.5	4
22	*α Canis majoris*	1	Ia	1890.09	— 1.83	— 2.72	— 2.1	6
45	*α Lyrae*	1	Ia	1889.64	— 1.89	— 2.22	— 2.1	8

FIGURE 5.6: Première liste de vitesses radiales publiée en 1892 par H.C. Vogel dans les annales de l'Observatoire de Potsdam. Les vitesses sont rapportées au Soleil et données en mille de Prusse par seconde (1 Preußische Meile = 7.532 km).

5.2 Mesures brutes et mesures normalisées

Le décalage spectral mesuré depuis un observatoire terrestre conduit à la vitesse radiale de la source par rapport à l'observateur à l'époque de la mesure. L'observateur est entrainé par la rotation de la Terre, par le mouvement orbital de la Terre autour du Soleil et par le petit mouvement de la Terre autour du barycentre du système Terre-Lune, autant de corrections à effectuer pour parvenir à une vitesse radiale standard, qui se rapporte à un point *moins mobile*, ou plus précisément dont la vitesse de déplacement n'est pas soumise

à des variations rapides. Le point de référence choisi est le barycentre du système solaire, puisque sa position et sa vitesse par rapport aux étoiles n'est l'objet de changements notables que sur des durées très longues associées à la rotation galactique. Les ordres de grandeur de ces effets sont aisés à estimer :

— Mouvement de rotation da la terre : $V \sim 0.460 \cos\phi \,\mathrm{km\,s^{-1}}$, fonction de la latitude ϕ.
— Mouvement orbital de la Terre $V \sim 29.8 \,\mathrm{km\,s^{-1}}$, dans le plan de l'écliptique et légèrement variable ($\pm 0.5 \,\mathrm{km\,s^{-1}}$) au cours de l'année.
— Mouvement du Soleil autour du barycentre du système solaire, de l'ordre de grandeur de $0.02 \,\mathrm{km\,s^{-1}}$ et dominé par la période orbitale de Jupiter.
— Mouvement autour du barycentre du système Terre-Lune : variation mensuelle d'amplitude $0.012 \,\mathrm{km\,s^{-1}}$.

Toutes ces vitesses doivent être projetées sur la ligne de visée pour chaque observation et comptées avec le bon signe ! En pratique les trois dernières contributions apparaissent automatiquement dans la vitesse de la Terre prise dans une éphéméride de bonne précision rapportée au barycentre du système solaire. D'autres corrections proviennent de l'étoile elle-même, puisque la champ de gravitation est aussi la source d'un petit décalage spectral (dilation du temps en fonction du potentiel gravitationnel), et que la surface de l'étoile est agitée par des mouvements convectifs de matière dont la moyenne n'est pas nulle. Des mesures répétées au cours des mois et des années mettent en évidence des variations de vitesses radiales pour de nombreuses étoiles provenant cette fois-ci du mouvement variable de l'étoile si le système est multiple ou bien si elle est accompagnée par un système planétaire.

5.3 Utilisation des vitesses radiales

Je me concentre ici sur les vitesses radiales, mais la spectroscopie en astronomie est bien plus riche que l'aspect cinématique et touche à la composition des astres, à l'évolution des étoiles et des galaxies, à l'histoire de l'Univers, de nombreux domaines qui exploitent les spectres mais pas nécessairement les décalages spectraux.

5.3.1 Parallaxes statistiques

En premier lieu la vitesse radiale fournit la troisième composante du mouvement, le long de la ligne de visée., comme une mesure réelle et non comme une projection angulaire. Considérons un grand nombre d'étoiles dont on possède la mouvement tangentiel angulaire et la vitesse radiale en $\mathrm{km\,s^{-1}}$. Statistiquement, la valeur du mouvement tangentiel

en km s^{-1}, ne doit pas être très différente de la vitesse radiale. Donc avec les Eqs. 3.14 − 3.15 on peut obtenir une estimation statistique de la parallaxe, donc de la distance. L'application à des étoiles individuelles est limitée, mais la méthode est très efficace pour les étoiles groupées en amas dont les directions de déplacement dans l'espace sont parallèles les unes aux autres.

5.3.2 Etoiles binaires spectroscopiques

Il s'agit ici de système comportant deux étoiles trop proches l'une de l'autre pour que les composantes puissent être résolues par une observation télescopique mais dont le mouvement orbital (d'une seule ou des deux composantes) est décelé par la variation périodique de la vitesse radiale. Considérons une étoile binaire avec des composantes de masses respectives M_1 et M_2 en orbite autour du centre de gravité du système. La théorie du mouvement elliptique dans l'espace donne pour la vitesse radiale d'une composante (ici la composante M_1) la valeur,

$$v_{\rm r}(t) = v_{\rm G} + \frac{n a_1 \sin i}{\sqrt{1-e^2}} \left[\cos(f(t)+\omega) + e\cos\omega\right] \tag{5.7}$$

où n est le moyen mouvement, a_1 le demi-grand axe de l'orbite absolue de M_1, e l'excentricité de l'orbite, ω la longitude périastre et f l'anomalie vraie. Ici $V_{\rm G}$ est la vitesse radiale globale du système (du centre de masse) par rapport au Soleil. Au cours de la période orbitale $P = 2\pi/n$, l'anomalie f varie de 2π et la vitesse radiale est une fonction périodique du temps, d'autant plus irrégulière que l'orbite est excentrique. L'équation (5.7) est également la relation fondamentale de détection des exo-planètes par la méthode des vitesses radiale. Le coefficient d'amplitude est homogène à une vitesse et est toujours exprimé en km s^{-1}.

L'allure des courbes de vitesses correspondant à l'équation (5.7) est illustrée sur la figure (5.7), pour différents valeurs de l'excentricité ou de la position du périastre. L'amplitude est prise égale à 10 km s^{-1} et $v_{\rm G} = 0$. Le tracé de ces courbes passe par les lois du mouvement keplérien pour faire le lien entre le temps (phase orbitale) et l'anomalie vraie $f(t)$. Cela implique également la résolution de l'équation de Kepler.

Si le spectre de l'étoile M_1, ou des deux étoiles M_1 et M_2 est observable, on parvient à suivre les variations de la vitesse radiale au cours de l'orbite et à déterminer la période P ainsi que les éléments géométriques de l'orbite et finalement à une contrainte sur les masses. L'inclinaison de l'orbite sur le plan du ciel ne permet pas d'avoir la dimension réelle de l'orbite, mais seulement $a_1 \sin i$ et éventuellement $a_2 \sin i$ et cette ambiguité ne peut être levée que pas des mesures astrométriques complémentaires, ou photométriques

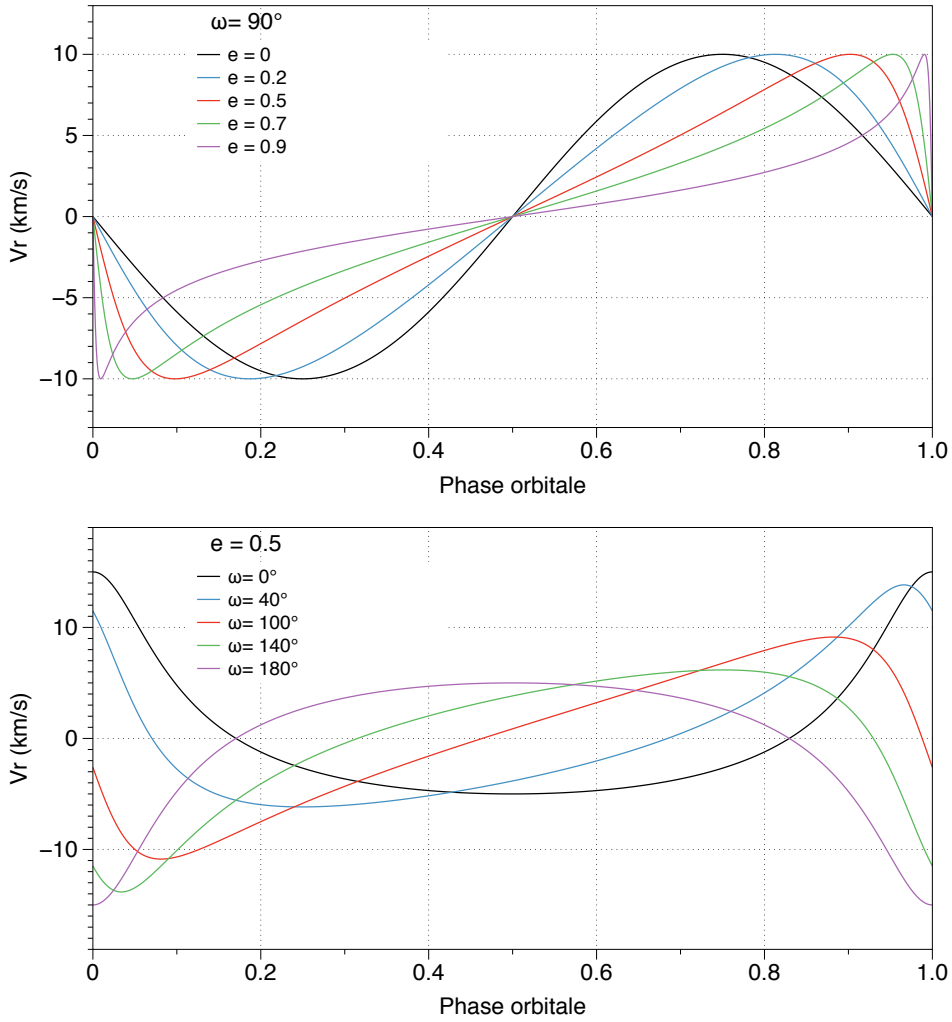


FIGURE 5.7: Courbes de la vitesse radiale d'une composante d'une étoile binaire spectroscopique pour différentes valeurs de l'excentricité ou de la longitude du périastre.

si l'étoiles est également une binaire à éclipse, comme Algol.