

Gaia : un nouvel âge d'or pour l'étude de la binarité stellaire

Résumé :

L'analyse des étoiles binaires vient elle aussi d'entrer dans l'ère du big data. La troisième publication des données Gaia contient un catalogue d'environ 800 000 solutions concernant des binaires non résolues astrométriques, spectroscopiques, à éclipses, ou des orbites conjointes. De quoi donner du travail aux duplicistes en attendant... les futurs catalogues Gaia.

Abstract :

The field of binary stars has also entered the Big Data era. The third Gaia data release (DR3) contains a catalogue of about 800,000 solutions for unresolved astrometric, spectroscopic, eclipsing binaries, or common orbits. The catalogue content is described together with a few applications.

Gaia est une ambitieuse mission, Pierre Angulaire de l'Agence Spatiale Européenne (ESA), dont le satellite a été lancé le 19 décembre 2013 de Kourou. Depuis le début des opérations, le 25 juillet 2014, environ 70 millions de sources sont détectées puis observées chaque jour produisant en moyenne 16 époques d'observation par source et par année d'observation.

Véritable observatoire complet en orbite, Gaia combine ses données astrométriques, photométriques, spectroscopiques et les paramètres astrophysiques qui en sont déduits, pour apporter une moisson inédite d'informations sur les étoiles de notre Galaxie, permettant ainsi une étude détaillée de sa structure et de sa cinématique en trois dimensions, ainsi que de son origine et de son évolution. Gaia recense également des sources sous-stellaires, des astéroïdes, des supernovæ et des galaxies et apporte une contribution à la détermination de l'échelle des distances extragalactiques et au système de référence. Il n'est ni possible ni souhaitable de donner dans ce court article un résumé des résultats scientifiques obtenus avec l'aide de Gaia : déjà plus de 9 000 articles scientifiques citent la mission ! Pour plus d'informations, on se réfèrera au site Gaia à l'Observatoire de Paris, gaia.obspm.fr, ou aux présentations en ligne [1].

Tandis que l'ESA gère les opérations du satellite, c'est le DPAC, un consortium de scientifiques et ingénieurs européens, qui est responsable des traitements scientifiques. La communauté française représente environ 1/5 du DPAC ; le centre de calcul de notre agence spatiale, le CNES, y contribue en prenant en charge environ 40% des traitements. Au moment où ces lignes sont écrites, 3 061 jours se sont écoulés depuis le début des opérations, c'est à dire 1 244 jours au-delà des 5 ans initialement prévus, et plus de 2 100 milliards d'observations dans les CCD astrométriques et 41 milliards de spectres CCD ont déjà été collectés. L'ESA a approuvé une extension indicative de la mission jusqu'à fin 2025 si bien que, si les réserves à bord le permettent et que le satellite reste en plein forme, les observations pourraient durer en tout 11 ans. L'intérêt d'une longue mission est d'une part la précision astrométrique qui s'améliore en $t^{-1.5}$ avec le temps pour les mouvements propres et en $t^{-0.5}$ pour les parallaxes,

grâce au nombre d'observations ; une longue mission profite également à l'étude de la variabilité stellaire, aux binaires ou exoplanètes et aux astéroïdes, en augmentant la plage des périodes accessibles et en améliorant l'échantillonnage.

Le 13 juin 2022, une étape fondamentale était franchie avec la publication du troisième Catalogue Gaia (DR3) qui utilise les 34 premiers mois de données de la mission et où la plupart des chaînes de traitements scientifiques ont maintenant été activées [2, 3]. L'apport de ce Catalogue est considérable en astronomie, citons juste un résultat : grâce à la spectrophotométrie, des paramètres astrophysiques sont donnés pour près d'un demi-milliard d'étoiles, dont une estimation de la masse et de l'âge pour cent millions d'entre elles. Pour mettre ceci en perspective, non seulement la distance de la plupart de ces étoiles n'était pas accessible directement il y a quelques décennies, mais on ignorait, sauf à mobiliser des observations complémentaires, si elles étaient naines ou géantes, ce qui ne permettait pas une estimation photométrique de leur distance.

Mais ce qui nous intéresse principalement ici, c'est le premier catalogue des étoiles non simples (NSS, non single stars) de Gaia, qui sont pour la DR3 des sources non résolues : les binaires résolues, qui posent des problèmes spécifiques de traitement, ne figureront que dans la prochaine publication DR4. L'ensemble des solutions obtenues est décrit dans la Table 1, ordonné approximativement par période orbitale, et est détaillé ci-dessous. Pour une description plus approfondie ainsi qu'un aperçu des principales applications scientifiques, on peut se référer à [4].

Table 1. Liste des solutions pour les étoiles binaires dans la publication Gaia DR3

Nom de la solution	Nombre	Description
EclipsingBinary	86 918	Orbites de binaires à éclipses
EclipsingSpectro	155	Combinaisons orbitales spectroscopiques + éclipses
SB1 or SB2	186 905	Orbites spectroscopiques à un ou 2 spectres
SecondDegreeTrendSB1	32 725	Solutions SB1 avec deuxième dérivée de la vitesse radiale
FirstDegreeTrendSB1	24 083	Solutions SB1 avec première dérivée de la vitesse radiale
AstroSpectroSB1	33 467	Combinaisons orbitales astrométriques + spectroscopiques
OrbitalTargetedSearch*	533	Orbites astrométriques, sources provenant d'une liste prédéfinie
Orbital	134 598	Orbites astrométriques
OrbitalAlternative*	629	Orbites astrométriques obtenues avec un algorithme alternatif
Acceleration9	91 268	Solutions astrométriques avec 3 ^{ème} dérivée de la position (= à-coup)
Acceleration7	246 947	Solutions astrométriques avec 2 ^{ème} dérivée (= accélération)
VIMF	870	Solutions astrométriques d'étoiles variables binaires fixes (VIMF)

Tout d'abord, pour ce qui concerne l'astrométrie, il faut rappeler que ce que Gaia observe, c'est principalement le photocentre de plusieurs sources non résolues, donc les orbites astrométriques concernent le mouvement de ce photocentre. Les solutions de la DR3 sont de trois principaux types : à accélération, orbitales, VIMF. Quand la période orbitale d'un couple est très nettement supérieure aux 34 mois de données de la DR3, l'astrométrie peut cependant être sensible à une faible courbure du mouvement, une accélération (*Acceleration7* : deux coordonnées angulaires de position, deux pour le mouvement propre, deux pour l'accélération et enfin la parallaxe). Pour des périodes orbitales comparables à l'extension temporelle des observations, une solution *orbitale* (estimant l'ensemble des paramètres orbitaux) peut parfois être trouvée. Pour des périodes un peu supérieures à celles-ci, c'est à dire entre solutions orbitales et simple courbure du mouvement, il est possible

d'obtenir une solution *Acceleration9*. Parmi les modèles plus « exotiques », mentionnons les *VIM* (Variable Induced Movers) : ce sont des binaires détectées grâce à la variabilité d'une des deux composantes : en effet, la position du photocentre change avec la variation de la magnitude d'une des deux composantes ; pour DR3, seules quelques-unes sans mouvement orbital apparent ont échappé au filtrage. Au total, le nombre d'orbites astrométriques est de plus d'un ordre de grandeur supérieur à celles qui étaient auparavant connues !

Il s'agit là de considérations théoriques. En pratique, comme on peut s'en douter, le traitement des binaires astrométriques n'est pas très simple [5]. Initialement, on ne sait quel modèle peut convenir à des données astrométriques perturbées, voire même s'il ne s'agirait pas simplement d'un problème de mauvais étalonnage ou bien d'artéfacts : avec plus d'un milliard et demi de sources, on rencontre tous les ennuis possibles et imaginables ! La méthode utilisée suit un principe similaire au rasoir d'Ockham : les différents modèles de solutions sont successivement évalués, du plus simple (avec le moins de paramètres libres) jusqu'au plus complexe, en s'arrêtant au premier qui procure un ajustement correct aux données.

Du côté spectroscopique, maintenant, il faut mentionner que Gaia DR3 publie des vitesses radiales pour plus de 33 millions de sources : historiquement, jamais un nombre aussi considérable de vitesses radiales a été obtenu. Parmi les étoiles les plus brillantes et qui ont suffisamment de mesures à plusieurs époques, de nombreuses binaires spectroscopiques (SB) ont ainsi pu être détectées, environ 45 fois plus de sources que celles répertoriées dans le catalogue S_B^9 [6]. Ce sont soit des *SB1*, où seul le déplacement des raies spectrales de la primaire est observé, soit, plus rarement, des *SB2* trahissant le mouvement des deux composantes. Pour des systèmes avec une période orbitale de plusieurs années, les paramètres de l'orbite ne sont pas obtenus, mais une accélération peut être détectée (solutions *TrendSB1*).

Il faut noter que la Table 1 décrit le nombre de solutions obtenues, mais que celui-ci est supérieur au nombre des sources concernées ; par exemple, des sources peuvent avoir reçu à la fois une orbite astrométrique *et* une orbite spectroscopique, mais qui n'étaient pas compatibles. En revanche, quelques dizaines de milliers de solutions compatibles ont pu être combinées, ce sont les solutions nommées *AstroSpectroSB1*. En matière d'exploitation scientifique, ce sont probablement les sources les plus prometteuses car brillantes et donnant de l'information à la fois sur l'étoile primaire via la spectroscopie et sur le photocentre via l'astrométrie.

Pour terminer dans la description des différents types de binaires, parmi les 2.1 millions de binaires à éclipses détectées par le groupe du DPAC en charge de la variabilité stellaire, des dizaines de milliers d'orbites ont pu être calculées grâce au développement d'un logiciel complexe. Une très petite fraction d'entre elles, les solutions *EclipsingSpectro*, ont pu être combinées avec une orbite spectroscopique.

La distribution des différents types de solutions orbitales en fonction de la magnitude et de la période est représentée Figure 1. Comme on peut s'y attendre, les binaires à éclipses sont faibles (car distantes) et à courtes périodes, les binaires astrométriques couvrent les périodes allant de 100 jours jusqu'à la durée des observations, mis à part pour les périodes

autour d'un an où l'effet parallactique est difficile à découpler de la période orbitale. Plus surprenant, les binaires spectroscopiques couvrent toute la plage des périodes ; le déficit qui apparaît à très courtes périodes, là où on s'attendrait à en avoir le plus, est dû aux filtrages effectués.

C'est en effet le moment de préciser le principal problème rencontré pendant le traitement, qui est de nature instrumentale. La loi de balayage du satellite est très régulière, si bien que la recherche de phénomènes périodiques (orbites de binaires ou bien variabilité stellaire périodique), conduit (très) fréquemment à des périodes liées aux propriétés de ce balayage, produisant des fausses solutions qui sont en réalité des artefacts instrumentaux. Pour supprimer ces solutions qui touchent tous les types de binaires, il a fallu adopter des critères de filtrage très stricts, limitant drastiquement le nombre des solutions publiées. Il faut cependant se méfier, il reste des mauvaises solutions dans le catalogue.

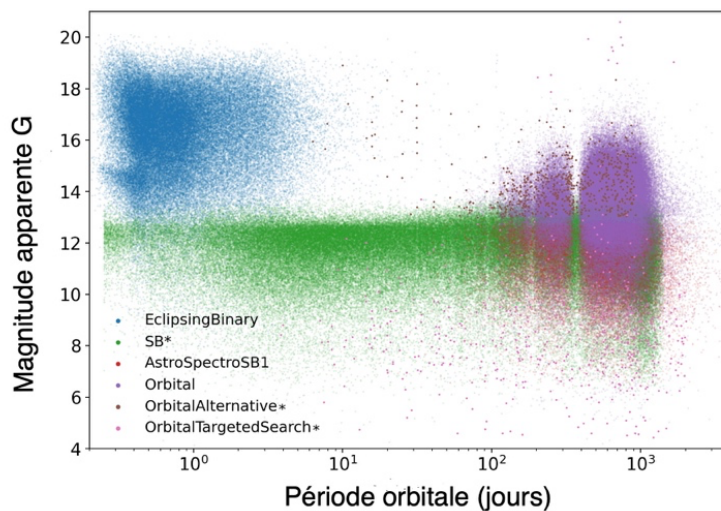


Figure 1. Magnitude apparente dans la bande G de Gaia en fonction de la période orbitale pour les systèmes binaires de différents types. D'après la Figure 3 de l'article Gaia Collaboration, Arenou et al. [4]

La Figure 2 indique la répartition spatiale des binaires. Comme le demi-grand axe angulaire décroît avec la distance, les binaires astrométriques sont principalement détectées au voisinage solaire, jusqu'à quelques milliers d'al uniquement. En revanche, l'excellente précision photométrique de Gaia permet de détecter les binaires à éclipses au-delà du centre galactique. Entre les deux, c'est la limitation en magnitude apparente des étoiles mesurables par le spectrographe qui implique que la plupart des binaires spectroscopiques détectées sont situées à moins d'environ 10 000 al.

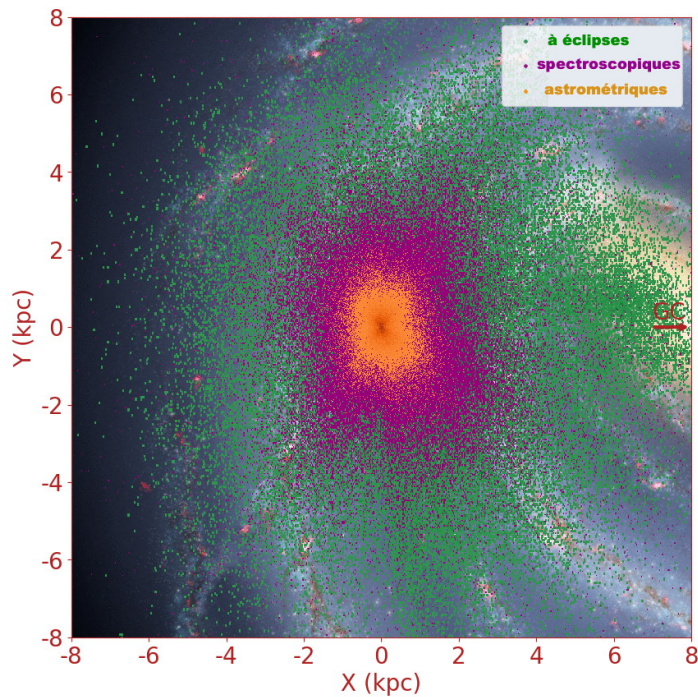


Figure 2. Projection sur une image d'artiste du plan galactique des binaires astrométriques (orange), spectroscopiques (violet) et à éclipses (vert). Le système solaire est au centre et le centre galactique est indiqué à droite. Crédit ESA/Gaia/DPAC Nathalie Bauchet.

Parmi les nombreuses possibilités d'exploitation scientifique directe [4], il est évident que l'estimation des masses des composantes est fondamentale. Très peu de solutions permettent une estimation uniquement orbitale de ces masses, et il faut utiliser des contraintes provenant des données spectro-photométriques où l'on peut jouer avec la position dans le diagramme de Hertzsprung-Russel, les masses et le rapport de luminosité. Si l'on s'intéresse uniquement aux sources dont la luminosité de la secondaire est négligeable devant celle de la primaire, il est intéressant de constater que le pic de masse des compagnons correspond à la valeur typique ($0.6 M_{\odot}$) des naines blanches.

Mais on trouve également un certain nombre de sources dont les compagnons sont plus massifs que la primaire tout en n'étant pas (ou moins) lumineux. La communauté s'est bien entendu mobilisée pour étudier ces sources. Dans la plupart des cas, il s'agit de systèmes dégénérés. Mais [7], en vérifiant à l'aide d'observations spectroscopiques complémentaires, a prouvé que le compagnon de Gaia DR3 4373465352415301632, une étoile banale similaire au Soleil, est effectivement un trou noir dormant de $9.6 M_{\odot}$, et par ailleurs le plus proche de nous connu, à 1 560 al de la Terre.

Parmi les autres compagnons invisibles, mais cette fois-ci de petite masse, on peut s'attendre à trouver des naines brunes et des exoplanètes. À l'origine, il n'était pas prévu de publier les exoplanètes de Gaia avant la dernière publication, celle avec 5 ans de données, car le signal attendu est très faible. Et pourtant, il se trouve que Gaia a détecté dès la DR3 plusieurs dizaines de candidates, et de plus, avec chacun de ses instruments :

astrométrie, transit planétaire devant l'étoile [8], et même vélocimétrie grâce à l'excellent travail d'étalonnage des vitesses radiales.

Ce ne sont que quelques dizaines de candidates. Parmi elles, une exoplanète est déjà connue, HD 81040b et l'orbite astrométrique permet de fixer la masse du compagnon planétaire (Figure 3). Bien entendu, toutes les candidates non déjà connues restent à confirmer.

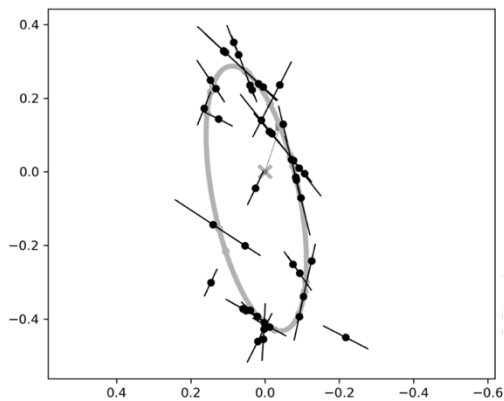


Figure 3. Orbite astrométrique de l'étoile HD 81040 avec les données de Gaia DR3. $P=850.8d$, $1.2 M_{\odot} + 7.53 M_{Jup}$. https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/iow_20220131. Crédit: ESA/Gaia/DPAC Johannes Salzman

Car un autre problème, de nature astrophysique cette fois, touche les orbites astrométriques. En effet, une étoile accompagnée d'une exoplanète ou bien deux étoiles quasiment jumelles possèdent un photocentre qui aura un très faible mouvement orbital, si bien qu'on ne sait a priori pas si une petite orbite provient du premier ou du second cas (cf. Figure 4).

L'orbite astrométrique donne seulement accès à la fonction de masse $f(M) = a_0^3/P^2 = (B-\beta)^3(M_A+M_B)$ en M_{\odot} où a_0 est le demi-grand axe (en au) du photocentre, $B = M_B/(M_A+M_B)$ la masse fractionnaire de la secondaire, $\beta = L_B/(L_A+L_B) = 1/(1+10^{0.4\Delta G})$ la fraction de luminosité entre les composantes où ΔG est la différence de magnitude. Quand la luminosité de la secondaire est négligeable, cette fonction de masse se simplifie en $M_B^3 / (M_A+M_B)^2$ donnant ainsi accès à la masse de la secondaire pour autant que l'on possède une estimation de la masse de la primaire ; on comprend ici l'importance mentionnée ci-dessus d'avoir une estimation spectro-photométrique de cette masse. À nouveau, cependant, le rapport de luminosité n'est a priori pas connu et il faut faire appel à des observations complémentaires pour pouvoir déterminer les masses et luminosités des composantes.

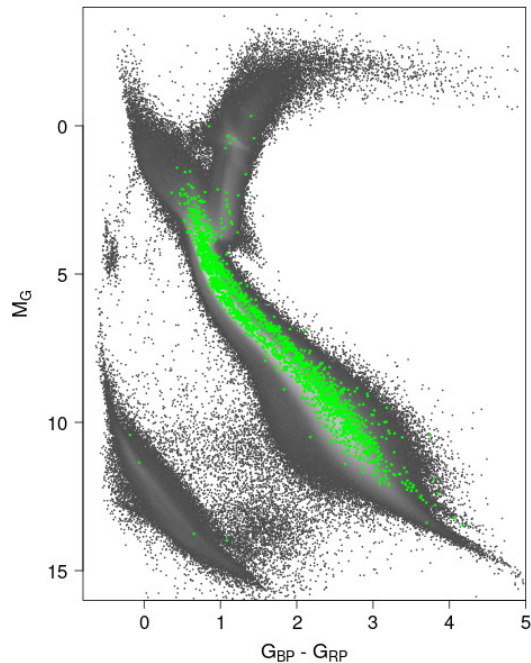


Figure 4. Binaires astrométriques avec une fonction de masse inférieure à 0.001 (vert) superposées aux étoiles DR3 (noir) dans un diagramme Hertzsprung-Russel. Deux séquences apparaissent, correspondant respectivement à des couples (étoile + compagnon sous-stellaire) et à des couples de jumelles. D'après la Figure 47 de l'article Gaia Collaboration, Arenou et al. [4].

Avec un si grand nombre de binaires, il faut bien entendu s'attendre à ce qu'une fraction significative soit en réalité membre d'un système de multiplicité supérieure à 2. L'article [4] propose deux façons de procéder pour trouver les systèmes multiples. Tout d'abord, on peut chercher parmi les sources possédant plusieurs solutions binaires avec des périodes incompatibles. Elles sont formées typiquement d'une orbite spectroscopique interne et d'une orbite externe astrométrique, que celle-ci soit orbitale ou bien à accélération ; plusieurs centaines de sources sont dans ce cas. Une autre méthode consiste à effectuer l'intersection entre ce catalogue de binaires Gaia non résolues et le catalogue de El Badry et al. [9] de binaires Gaia résolues : une dizaine de milliers de sources sont membres d'un système au moins triple, certaines d'entre elles au moins quadruples puisque les deux composantes du système résolu sont également binaires non résolues.

La préparation de Gaia DR4 (fin 2025) a déjà commencé depuis des mois. Grâce à une meilleure élimination des artéfacts instrumentaux et aux 66 mois d'observation, on peut s'attendre à une forte augmentation du nombre de binaires, essentiellement astrométriques, ainsi qu'aux premiers traitements des binaires résolues. Gaia DR3 a mis la barre si haute qu'à court terme seuls Gaia DR4 puis DR5 pourront la remonter.

En attendant, la communauté des amateurs et des professionnels peut, avec un minimum de créativité, exploiter, voire améliorer, les connaissances acquises avec ce catalogue. Il faut en effet rappeler que la fonction d'un grand relevé automatique est la détection de sources, les aiguilles dans la botte de foin, qui serait une perte d'énergie avec les instruments au sol. La complémentarité sol-espace est évidente puisqu'il est par la suite possible de consacrer à ces cibles le temps d'observation nécessaire au sol, tandis que le

temps d'observation de Gaia et donc également sa précision sont contraints par sa loi de balayage.

Certes, une partie des sources est trop faible pour de petits instruments, mais pas toutes. En vrac, quelques pistes peuvent être suggérées. Tout d'abord, même si l'on ne dispose pas d'instruments adéquats, le premier travail de recherche possible est l'exploitation de cette base de données. Quelles sont les observations qui étaient déjà connues auparavant ? Comment combiner les informations ? Et puis, si les observations manquent, comment en obtenir ? Quel instrument, à quelle date ?

De plus, il est parfois possible de « jouer avec le temps », avec deux acceptions différentes. La première consiste à compenser des observations imprécises par des mesures précises de temps ; la seconde à utiliser la durée des observations comme un bras de levier. Pour illustrer simultanément ces deux points, prenons l'exemple des binaires à éclipses : avec 2 millions de binaires à éclipses dans le catalogue Gaia, la recherche de cible devrait être simplifiée. Le « petit » nombre d'observations de Gaia fait que la courbe de lumière est forcément mal couverte et peut donc grandement être améliorée, aidant à déterminer l'orbite. Ensuite, pour les binaires à éclipses qui sont également binaires astrométriques, d'étudier s'il y aurait une variation de la date des minima, dû au temps de trajet de lumière [10] ; et pour les autres, de rechercher d'éventuels compagnons cachés grâce à cette méthode.

Pour continuer avec les binaires astrométriques, existe-t-il une source proche avec un mouvement perturbé, ce qui en ferait un couple ? Ou bien y aurait-il un moyen de résoudre ces binaires non résolues (occultation, tavelure, etc.) ? Et, parmi celles qui ont une inclinaison favorable et une période pas trop longue, certaines auraient-elles des éclipses ?

En résumé, la dimension du catalogue Gaia permet d'affirmer sans aucun doute qu'un immense nouveau terrain de jeu vient d'ouvrir pour les amateurs de système binaires !

Références

- [1] [Conférence](https://www.youtube.com/watch?v=L-krz4XpDyA) Gaia à la Cité des Sciences (25 juin 2022) : <https://www.youtube.com/watch?v=L-krz4XpDyA>
- [2] [Retransmission](https://www.youtube.com/watch?v=HytshOXpD5I) sur youtube de la publication DR3 (13 juin 2022) : <https://www.youtube.com/watch?v=HytshOXpD5I>
- [3] “Gaia Data Release 3 : Summary of the content and survey properties”, Gaia collaboration (A. Vallenari et al.), A&A sous presse, <https://arxiv.org/abs/2208.00211>
- [4] “Gaia Data Release 3 : Stellar multiplicity, a teaser for the hidden treasure”, Gaia collaboration, (F. Arenou et al.), A&A sous presse, <https://arxiv.org/abs/2206.05595>
- [5] “Gaia Data Release 3 : Astrometric binary star processing”, J-L. Halbwachs, A&A sous presse, <https://arxiv.org/abs/2206.05726>
- [6] “The Ninth Catalogue of Spectroscopic Binary Orbits”, D. Pourbaix et al., A&A 424, 727 (2004)

- [7] “A Sun-like star orbiting a black hole”, K. El-Badry et al., MNRAS 518, 1057 (2022), <https://arxiv.org/abs/2209.06833>
 - [8] “The detection of transiting exoplanets by Gaia”, A&A 663, A101 (2022), <https://arxiv.org/abs/2205.10197>
 - [9] “A million binaries from Gaia eDR3: sample selection and validation of Gaia parallax uncertainties”, K. El-Badry, H.-W. Rix, & T. M. Heintz, 2021, MNRAS, 506, 2269
 - [10] [https://wwwhip.obspm.fr/~arenou/Wiki/Binaire TTL.html](https://wwwhip.obspm.fr/~arenou/Wiki/Binaire_TTL.html)
-

Frédéric Arenou



Ingénieur de recherche du CNRS, je travaille à l'Observatoire de Paris depuis 1983. Les aspects scientifiques du satellite astrométrique Hipparcos m'ont initié à la duplicité (stellaire) puis conduit à soutenir une thèse concernant la validation des données d'Hipparcos. Depuis 1998, je me consacre essentiellement à la mission Gaia, successivement la prospective scientifique, le traitement des données à bord, la simulation des binaires, la responsabilité de la validation des catalogues et je suis maintenant en charge du traitement des étoiles non simples (CU4/NSS). Mes autres intérêts scientifiques concernent le traitement statistique des paramètres stellaires, ainsi que des systèmes binaires (et plutôt deux fois qu'une).