GAIA et le Système Solaire

D. Hestroffer ; hestro@bdl.fr

Institut de mécanique céleste, Observatoire de Paris

77 Av. Denfert Rochereau 75014 PARIS

Abstract

L'analyse des propriétés physiques des petits corps du systèmes solaire, de leur évolution dynamique et collisionnelle, de leur distribution en taille, etc., sont autant d'aspects liés à la connaissance de la formation de notre Système Solaire. Les petits corps, tels les astéroïdes présentent un avantage spécifique pour la connaissance des planétésimaux originels lors du stade d'accrétion planétaire. La mission GAIA apportera des renseignements précieux sur la formation et l'évolution du Système Solaire. En effet la couverture complète du ciel en 5 ans jusqu'à la magnitude $V \leq 20$ permettra d'obtenir un recensement, jusque là impossible, de ces corps et ce sur un vaste domaine de distances héliocentriques. Il sera possible de déterminer des orbites de grande précision et la classe taxonomique pour la quasi-totalité des corps observés, ainsi que la masse, le diamètre et la densité d'un bon nombre d'entre eux. À partir d'observations simultanées de sources extra-galactiques (QSOs) et d'astéroïdes, GAIA permettra de plus d'effectuer certains tests de relativité générale et de rattacher directement les systèmes quasi-inertiels dynamique et géométrique avec une précision bien meilleure que le millième de seconde de degré.

1 Introduction

Je présenterai ici quelques points sur le contexte actuel de nos connaissances du Système Solaire dans lequel vont s'effectuer les observations GAIA. Je préfère m'étendre sur les problèmes liés à la connaissance de la formation et de l'évolution du Système Solaire, ainsi qu'aux problèmes liés à la théorie de la relativité accessibles à partir d'observations photométriques ou astrométriques d'astéroïdes. Étant limité par la place, je ne présenterai ici pas les détails des résultats de diverses simulations obtenus jusqu'ici par moi-même ou d'autres collaborateurs.

Les découvertes de planètes extra-solaires et de systèmes planétaires gravitant autour d'autres étoiles que notre Soleil posent des questions fondamentales sur la formation et la stabilité de tels systèmes. Plus proche de nous, la formation et l'évolution de notre Système Solaire est un domaine de recherche d'un intérêt scientifique croissant dont les différents aspects ne sont pas encore totalement élucidés. Il est généralement admis que les petits corps de la ceinture principale situés entre Mars et Jupiter ont connus une faible évolution thermique depuis les premiers instants d'accrétion planétaire. Les astéroïdes sont par conséquent représentatifs de la population originelle des planétésimaux formés dans cette région du système solaire il y a environ 4.5 Gyr. De plus, du fait qu'ils sont répartis sur une zone allant d'environ 2.1 à 3.3 AU, les astéroïdes de la bande principale MBA (pour Main Belt Asteroids) devraient avoir une composition (a) variant avec leur distance héliocentrique et (b) intermédiaire entre les objets intérieurs et extérieurs du système solaire. C'est pourquoi l'étude de l'origine et de l'évolution du Système Solaire nécessite la connaissance des propriétés physiques des astéroïdes comme leur classe taxonomique, leur forme et rotation, leur masse, taille et densité, ce en fonction de leur distance héliocentrique. Les données spectro-photométriques actuelles montrent une transition qui tend à confirmer l'hypothèse de la présence d'un gradient de composition pour les planétésimaux allant de corps rocheux pour la partie intérieure à des corps formés de glaces pour la partie extérieure du système solaire. Cependant certains points cruciaux restent à être déterminés :

- Les masses des astéroïdes ne sont connues que pour 11 objets (souvent les plus gros) et souvent avec une précision insuffisante (pouvant aller jusqu'à 50%). Même les valeurs trouvées par différents auteurs pour la masse de (1) Ceres ne sont pas en total accord, prouvant que la justesse avec laquelle on la connaît est en fait de l'ordre de quelques pour cent. Encore souvent négligé, la masse des astéroïdes est par ailleurs un paramètre important pour la construction d'éphémérides planétaires modernes [13]. En effet les effets des perturbations mutuelles astéroïde-astéroïde et même astéroïde-planète principale deviennent significatifs par rapport aux précisions des mesures et des théories ;
- Directement relié au point précédent, la densité des astéroïdes nous est pratiquement inconnue. Notre connaissance sur la taille des petites planètes est elle aussi fortement limitée et est largement fondée sur des méthodes de détermination indirectes nécessitant une calibration. La densité est un paramètre important pour la caractérisation physique des astéroïdes. Nous ne savons pas si celle-ci est corrélée avec la classe taxonomique des objets, quelle proportion d'entre eux est formée de "rubble-piles" c'est-à-dire des objets très peu dense formés d'éléments agglomérés par la force gravitationnelle, quelle est l'énergie dégagée lors d'un probable impact avec la Terre d'un astéroïde géo-croiseur, ... ;
- La classification taxonomique, directement reliée à la composition minéralogique de la surface, est connue pour un échantillon restreint d'objets et est biaisée en faveur des objets les plus gros et les plus brillants. Il est cependant important de connaître la distribution des classes taxonomiques en fonction de la distance héliocentrique et de la taille, et par conséquent d'étendre cet échantillon aux plus petits corps. En particulier ceci permettra de mieux définir l'origine des chondrites ordinaires et leur érosion suite aux vents solaires, rayons cosmiques et micro-impacts ;
- Les processus d'évolution dynamique et collisionnelle, les familles. La distribution en taille de la population astéroïdale, et donc la connaissance des diamètres ou indirectement des albédos, fournit des conditions aux limites aux modèles d'évolution collisionnelle, principal mécanisme d'évolution ayant affecté cette population depuis les premiers instant de sa formation. Les familles dynamiques d'astéroïdes sont supposées être la principale source de

fragments injectés dans les résonances donnant naissance aux NEAs [7]. Ces familles dont on suppose qu'elles résultent de collisions, apportent des informations sur la physique lors d'impacts catastrophiques entraînant la rupture du corps parent. La population des NEOS appelés souvent NEAs (pour Near Earth Asteroid) est formée principalement d'astéroïdes de la bande principale ayant étés apportés dans la région proche de la Terre à la suite de résonances. Une portion toutefois est supposée avoir une origine cométaire. Les processus de diffusion, les lois de distributions, la densité, l'albédo et le nombre de ces objets restent autant de points mal connus. Les différentes hypothèses et simulations numériques sur l'évolution dynamique et collisionnelle, pour être validées, ont besoin d'être confrontées à des données d'observations portant essentiellement sur les distributions.

- Les objets de la bande d'Edgeworth-Kuiper, KBOs (pour Kuiper Belt Objects) comme source des comètes à petite période et de Centaures [19]. Environ 200 objets de cette bande ont étés découverts depuis le début de cette décennie, dont seulement une cinquantaine possèdent actuellement une détermination d'orbite suffisamment fiable. La couverture du ciel balayé jusqu'à présent reste cependant faible. Bien que la planète Pluton soit 3 fois plus grande que les KBOs connus actuellement et qu'elle possède une fine atmosphère, il n'est pas impossible qu'elle ne soit pas unique dans cette région éloignée du Soleil. Deux scénarios expliquant son origine sont encore plausibles : (a) Pluto a été formée dans la région 30-50 AU ou bien, (b) elle a été formée dans une autre région, soit plus proche soit plus éloignée, du système solaire puis s'est vu être transportée dans la résonance 3:2. En tout état de cause de nombreuses questions restent sans réponse pour cette zone du système Solaire : quelle est la distribution en taille dans la bande d'Edgeworth-Kuiper, combien existe-t-il de gros objets ($D > 100 - 200\,\mathrm{km}$), y-a-t'il une valeur maximale pour leur diamètre, quelle à été l'évolution dynamique et collisionnelle au-delà de Neptune, quelle a été la masse initiale et comment cette région s'est-elle dépeuplée, quel est l'albédo de ces objets, quelle est l'origine des Centaures,...?
  La situation concernant les Centaures ($5 \leq a \leq 30$) est encore plus dramatique. Actuellement 14 objets sont répertoriés dont une poignée sont plus brillants que $V \leq 20$; on estime qu'il pourrait y en avoir environ 100 [16]. Ces objets présentent un intérêt spécifique puisqu'ils se trouvent dans une zone dynamiquement instable et offrent donc un lien dynamique entre les KBO et les comètes à courte période. Par ailleurs, certains d'entre-eux présentent des particularitésés proches des comètes. Cependant leur taille semble excessive pour un noyau cométaire et leur activité cométaire se déclenche à des distances du Soleil relativement importantes.

Sont présentées dans la suite les possibilités offertes par le télescope GAIA, option monolithique[1], pour l'étude des astéroïdes. Les données sur les satellites naturels, les comètes et les planètes principales (Pluton-Charon par exemple) ne sont pas spécifiquement analysées ici. La géométrie des observations, le type de mesures, et le type de corps observables sont présentés dans la Section 2 ; quelques applications possibles sont développées dans la Section 3 ; l'avantage de la mission GAIA pour l'étude du système solaire ainsi que les problèmes spécifiques à l'observation de ces corps, et qui restent à être analyser, sont donnés dans la Section 4.

[1] L'interféromètre de 2.5 m de base permettrait un pouvoir de résolution légèrement meilleur au détriment d'une magnitude limite $V \lesssim 19$ plus faible.

2 Observation–Détection

2.1 Généralités

Suite à la loi particulière de balayage du ciel par le satellite, les objets en orbite autour du soleil sont observés au voisinage des quadratures (l'angle d'élongation solaire est compris entre 35 et 145°). Ainsi aucune observation ne peut avoir lieu à l'opposition lorsque l'angle de phase est nul et que l'objet se trouve être le plus brillant. En revanche il sera plus facile d'observer des corps proche de la Terre comme les Atens. Un objet se déplaçant plus rapidement que 40 mas/s environ peut ne pas être détecté par l'ASM (Astrometric Sky Mapper). La vitesse, dans le champ, d'un corps en orbite circulaire observé à la quadrature est généralement dirigée vers l'est et inférieure en module à 40 mas/s. Puisqu'il n'y aura pas de sélection à priori (catalogue d'entrée), GAIA permettra d'observer un nombre impressionnant d'objets du système solaire plus brillant que la magnitude $V \leq 20$. Cependant, vu leur diversité (taille, magnitude, vitesse) et les caractéristiques du satellite (télescope, loi de balayage), il ne sera pas possible d'obtenir des conditions d'observation optimales pour chacun d'entre-eux. D'un autre coté il faut noter que les observations GAIA pourront aussi servir de test à l'existence de certains objets ou systèmes. Bien qu'ayant un caractère négatif, leur non détection impliquera alors des contraintes et conditions aux limites sur les différents modèles théoriques d'évolution (dynamique et collisionnelle) ou de formation (physique) aussi précieux que ne le seraient une véritable détection. Ceci concernera plus particulièrement les objets de la ceinture d'Egeworth-Kuiper et les systèmes d'astéroïdes.

2.2 Objets

Planètes, satellites, comètes : Trop proches du Soleil, Mercure et Vénus n'entreront pas ou occasionnellement dans le champ du télescope. Pour les planètes extérieures dont la brillance par unité de surface est importante (Mars, Jupiter, Saturne), il faudra, comme pour les étoiles brillantes, s'assurer de diminuer le temps d'exposition afin de minimiser les effets de saturation des CCD. Une grande partie des satellites de ces planètes seront alors observés, ce qui par ailleurs est préférable d'un point de vue astrométrique à une observation directe de la planète. Uranus, Neptune, Pluton, Charon, de nombreux satellites ainsi que certaines comètes seront observés.
NEOs : Les campagnes de détection à partir du sol sont limitées aux régions voisines de l'opposition. C'est pourquoi les NEOS dont l'orbite est intérieure la Terre (IEO) ne sont pas détectés. Pourtant ceux-ci constitueraient une fraction non négligeable de corps orbitant au voisinage de la Terre [21]. La probabilité de découverte d'Atens est augmentée dès lors que les observations sont faites à de faibles élongations solaire [5], [30]. Nous ne connaissons pas de manière précise le pourcentage de comètes parmi les NEAs, celles-ci pourraient en outre être détectées à partir d'effets non gravitationnels suite à un dégazage. L'efficacité de l'instrument GAIA pour la détection par l'ASM de tels objets n'a pas été analysée en détail.
MBAs : À ce jour environ 40 000 objets de la ceinture principale sont recensés. Les modèles théoriques prédisent que la distribution en taille suit grossièrement une loi en puissance $N(d < D) \propto D^{-p}; p \sim 2.5$, ce qui implique qu'environ $10^5 - 10^6$ objets seront détectés au voisinage des quadratures. Cela correspond à une densité de 10^2 astéroïdes/deg^2, en accord avec les résultats de Scholl [26] compte tenu des biais observationnels [17]. Leur déplacement apparent sur le ciel, de l'ordre de 10–15 mas/s, permet leur détection par l'ASM.
KBOs et Centaures : Les objets de la ceinture de Kuiper sont généralement peu brillants. Néanmoins la partie du ciel profond balayée jusqu'à présent est très restreinte et proche du

plan de l'écliptique. GAIA permettra de balayer l'ensemble du ciel et d'observer les KBOs les plus brillants. L'albédo et la taille maximale de ces objets sont inconnus. Il est donc dès lors possible de spéculer sur l'existence d'objets brillants et/ou de taille importante ($\sim$1 000 km). Si, d'un autre coté, on extrapole la loi de distribution en magnitude vers les valeurs plus faibles, on obtient une densité de surface de l'ordre de 0 à $10^{-2.5}$ objets/deg^2 plus brillants que $V \leq 20$ selon que l'on considère que le diamètre maximal est de 500 ou 2000 km [18]. Par ailleurs, les simulations effectuées par Stern [29] attestent la formation de nombreux corps de taille 1000–2000 km entre 30 et 50 AU. Que sont-ils devenus? C'est ce type – hypothétique – de corps de la ceinture d'Edgeworth-Kuiper que GAIA pourrait directement détecter. Il sera alors possible de donner des contraintes précises sur la distribution en taille et en magnitude des corps les plus brillants, ainsi qu'éventuellement sur la largeur de la bande de Kuiper et l'existence d'autres Plutons. Les Centaures seront plus facilement accessible au satellite GAIA car plus proches.

2.3 Astrométrie–Photométrie

Les simulations effectuées ont montré qu'il serait possible d'obtenir la position sur la durée du temps d'exposition d'un CCD (env. 1 s) avec une précision, fonction de la magnitude de l'objet, de l'ordre de 0.1–1 mas. Les positions des étoiles étant par la suite données avec une précision de l'ordre de 10 μas, GAIA fournira des positions environ 100 fois plus précises que des observations visuelles faites actuellement à partir du sol. La variation de cette précision avec la taille de l'objet reste marginale pour des diamètres apparents inférieurs à $\phi \lesssim 150$ mas. Les positions astrométriques des objets du système solaire pourront ensuite être réduites sur la durée d'un passage, ce qui aura pour effet d'améliorer la précision d'un facteur 4. Nous disposerons ainsi d'environ 100 positions normales par objet réparties sur les 5 ans de la mission en environ 10 époques.
Les mesures CCD permettront par ailleurs d'obtenir la magnitude des objets dans différentes bandes du visible et ce avec une bonne précision. Le fait que chaque astéroïde sera observé plusieurs fois durant la mission et avec une instrumentation unique fournira des résultats meilleurs en précision et en homogénéité que des observations au sol (y compris celles adoptés par l'IMPS pour le calcul de l'albédo). Les mesures au sol sont généralement limitées à quelques nuits, et les plus anciennes, effectués avec un filtre B, sont converties en magnitude V en adoptant une valeur standard pour l'indice de couleur B-V. Ceci entraînera une meilleure détermination de l'albédo pour les objets dont le diamètre est ou sera connu. En revanche la construction de courbes de lumière devient plus complexe puisque l'objet n'est pas observé pendant la totalité de sa période de rotation.

3 Applications notoires

3.1 Résolution

L'interférométrie des tavelures, les occultations d'étoile, ou les observations HST ont permis de déterminer la taille de quelques d'astéroïdes. À ce jour, l'IRAS Minor Planet Survey (IMPS) a fournit la base de donnée la plus étendue (2000 objets). Celle-ci possède cependant quelques limitations dues à la détermination de l'albédo à partir de magnitude visuelle non simultanée, et la calibration du modèle thermique de distribution de température à la surface. En dépit des différentes corrections et améliorations apportées, il est admis qu'une grande partie des

données est altérée par des erreurs systématiques. Les observations en imagerie directe GAIA, bien qu'ayant une résolution spatiale modeste, permettront de déterminer de manière directe la taille d'une grande partie des petites planètes IRAS et d'affiner la calibration utilisée.
Les simulations effectuées montrent qu'à partir d'une observation sur un CCD, GAIA fournira des informations sur la taille d'astéroïdes plus large qu'environ 25–30 mas. Sur la durée de la mission, il sera possible de déterminer les diamètres moyens d'environ 1000 objets avec une précision meilleure que le pourcent, et éventuellement de déterminer leur forme. Ceci permet de tester l'hypothèse de corps en équilibre triaxial comme conséquence d'une ré-accumulation à la suite d'un impact impliquant un fort transfert de moment angulaire [6]. Des objets plus petits ($\phi \approx$10–20 mas) ne seront pas résolus sur la durée du passage à travers un CCD. En revanche on pourra fournir un diamètre moyen de ces quelques 2000 objets supplémentaires en combinant les données sur l'ensemble de la mission. D'une manière similaire, GAIA fournira les diamètres apparents moyens d'une centaine d'étoiles. Celles-ci étant généralement brillantes, le rapport [signal/bruit] sera suffisant pour obtenir une précision de l'ordre de 1–5%. Par ailleurs, de par son balayage complet du ciel, GAIA fournira des contraintes sur l'existence de satellites de petites planètes ou l'existence d'astéroïdes binaires. Enfin, la connaissance de l'albédo ou indirectement de la classe taxonomique et de la magnitude absolue d'un astéroïde permettra de déduire, de manière indirecte cette fois, son diamètre. Ainsi GAIA fournira la distribution en taille de la majorité des familles dynamiques d'astéroïdes.

3.2 Détermination de masse et densité

Il existe peu de techniques permettant de déterminer la masse d'un astéroïde ; la plus prometteuse en termes de nombre d'objets accessibles est celle basée sur les perturbations mutuelles lors de rencontres proches, cf. [31]. Des positions précises obtenues sur une courte période de temps proche de la date de minimum de distance peuvent être suffisantes [1]. Une première analyse sur la période 2004–2015, comprenant 729 astéroïdes tests ($D \geq 50$ km), a montré qu'une trentaine d'astéroïdes perturbateurs sur 174 ($D \geq 120$ km) étaient impliqués dans une rencontre proche à fort paramètre d'impact. En tenant compte du rapport signal sur bruit des observations, on peut estimer que GAIA fournira la masse de 20 astéroïdes avec une bonne précision, et d'une centaine avec une précision moindre. Des observations au sol en visible avec une précision moindre (10–50 mas), ou avec une précision similaire suite à une re-réduction de clichés CCD avec le catalogue d'étoiles GAIA, ou bien encore à partir de radars, permettraient de compléter avantageusement les données GAIA. Il sera alors possible de connaître la densité d'une centaine de petites planètes pour diverses classes taxonomique et différentes distances héliocentrique. Le paramètre d'impact permet une sélection des astéroïdes perturbateurs, mais ne fournit pas directement une estimation de la précision obtenue sur la masse. Une prochaine étape de cette étude consiste en une simulation plus détaillée de la précision que l'on pourra atteindre, et l'analyse de l'apport d'observations extérieures.

3.3 Taxonomie

La colorimétrie permettra une classification taxonomique pour l'ensemble des objets plus brillants que ($V \lesssim 18$) ce qui entraînera une augmentation considérable, en particulier pour les petits corps, de la base de donnée actuelle comprenant 1200 objets. Il sera possible d'analyser la distribution des classes taxonomiques en fonction de la taille des objets et de leur distance héliocentrique. Ceci apportera des informations sur l'origine des NEOs et des météorites, en particulier la relation controversée entre chondrites ordinaires et astéroïdes de classe S. Ceci permettra aussi de confirmer les données IMPS qui suggèrent une dépendance entre albédo et taille. Les densités connues pour une poignée d'astéroïdes montrent une transition entre les planètes telluriques et géantes ; il sera possible d'analyser la relation entre classe taxonomique et densité des astéroïdes. Nous ne savons pas à l'heure actuelle si la taxonomie (interprétée comme étant reliée à la composition minéralogique) peut être reliée à la densité. Si tel était le cas il serait possible d'obtenir une bonne estimation de la densité de chaque objet à partir de la connaissance de sa classe taxonomique.

3.4 Astrométrie indirecte post-GAIA

Un volet non négligeable des possibilités offertes par la mission GAIA pour l'étude des objets du système solaire concerne non pas les observations directes obtenues par le télescope GAIA, mais les observations CCD extérieures à la mission (re-)réduites à partir du catalogue d'étoiles fournit par la mission. Actuellement la précision des mesures est de l'ordre de 50 mas et est limitée principalement par le produit [densité $\times$ précision] du catalogue utilisé pour la réduction. Le catalogue astrométrique GAIA permettra d'améliorer cette précision par un facteur $\gtrsim 50$. Ceci ouvre un vaste domaine d'exploitation en particulier pour l'astrométrie des objets qui ne pouvaient être observés directement par GAIA de façon optimale ou parce qu'ils étaient trop faible, pour l'amélioration des prédictions d'occultations stellaires et donc la détermination de la taille des objets même les plus petits, pour l'obtention de positions précises sur une grande échelle de temps (effets relativistes, effets non gravitationnels), etc...

3.5 Relativité, Systèmes de référence, Cosmologie

Environ 400 astéroïdes parmi les 40 000 connus ont une avance relativistique du périhélie supérieure à 10 mas/an. Pour une dizaine d'entre-eux cette avance est supérieure à 100 mas/an (à comparer aux 430 mas/an pour Mercure). Cet effet doit donc être incorporé dans les éphémérides. De plus il sera possible de donner une contrainte aux paramètres du formalisme PPN. Hormis les résultats obtenus à partir de Mercure, ce type d'étude ne s'est fait jusqu'à présent, et avec un succès limité, qu'à partir de données astrométriques sur (1566) Icarus antérieures à 1987, cf. [27]. Notons aussi que cet effet peut-être très important pour des satellites naturels (2"7/an pour J1-Io, 7"2/an pour 1980S28). Ce type de données permettra en particulier de séparer les effets relativistes à ceux encore très mal connus dus au moment quadrupolaire J_2 du soleil [11], principale limite dans les résultats actuels [32]. De même l'effet de précession Lense-Thirring sur un satellite dû au moment angulaire des planètes principales est au moins 100 fois plus important que pour n'importe quel objet gravitant autour du soleil [28]. L'astrométrie des astéroïdes Troyens de Jupiter ou de ceux en résonance 2:1 permet par ailleurs de tester le principe d'équivalence [24], [25]. Il est de plus théoriquement possible de donner une borne à la constante cosmologique à partir d'une telle analyse [9], ou au paramètre $l_\odot$ pour une théorie non-symétrique [8]. GAIA nous fournira des positions au moins 100 fois plus précises que celles utilisées jusqu'ici, dans un repère exempt d'erreurs zonales, et ce pour un grand nombre de corps. D'un autre coté, d'autres effets systématiques pourront devenir sensibles (déplacement du photocentre, perturbations mutuelles,...) et il faudra pouvoir les modéliser ou les déterminer avec une précision similaire. De plus, ces astéroïdes à forte excentricité ne seront pas toujours

assez brillants pour être détectés par le télescope. La précision avec la quelle on pourrait déterminer le paramètre β, le quadrupole du Soleil J_2, le paramètre η de Nordtvedt, une limite à la constante cosmologique Λ, et les diverses corrélations entrant en jeu grâce à GAIA n'ont pas encore été analysées. On peut au moins espérer obtenir des résultats compétitifs avec ceux obtenus actuellement par LLR [23].
Par ailleurs toute mesure de position ou de vitesse dans notre Univers nécessite d'avoir à notre disposition un repère de référence. L'ICRS, matérialisé par les positions de sources extra-galactiques QSOs observées en VLBI, est la meilleure solution à l'heure actuelle ; et l'on peut raisonnablement penser qu'il en sera encore ainsi dans le futur. Cependant la matérialisation de ce système géométrique est totalement découplée des lois de la dynamique, et l'on suppose, jusqu'à preuve du contraire, qu'il est non tournant (quasi-inertiel). En revanche, les astéroïdes pouvant-être assimilés à des sources quasi-ponctuelles permettent de matérialiser le système de référence dynamique et son rattachement à l'ICRF. Les mesures Hipparcos de 48 astéroïdes ont permis un rattachement de l'ordre du mas et mas/an [14], [2], résultats comparables à ceux obtenus par VLBI et LLR [12]. Les mesures GAIA fourniront un bras de levier impressionnant : au moins 100 fois plus de positions avec une précision 100 fois meilleure et ce sur durée égale à la période de révolution moyenne d'un MBA. On peut donc espérer obtenir une matérialisation de l'écliptique et de l'équinoxe dynamique avec une précision atteignant celle du repère GAIA matérialisé par les étoiles les plus précises, et par conséquent tester l'existence d'une rotation (vortex) de l'Univers avec une précision de l'ordre de $10^{-12} - 10^{-11}$ rad/an. Cette précision peut être améliorée en combinant ces données à des mesures au sol ou spatiales (Hipparcos, SIM) de précision similaire et réparties sur une plus grande échelle de temps, permettant une confrontation aux résultats obtenus par des techniques indirectes [4], [20] ou aux limites imposées par des travaux théoriques [10], [3].

4 Discussion

La mission GAIA permettra un essor important sur la connaissance de notre Système Solaire. Cependant certains problèmes spécifiques restent à être traiter. Un point délicat qui n'a pas encore été étudié est celui de l'identification des objets. Pour les objets déjà connus à la date de la mission il serait possible d'avoir à notre disposition une éphéméride donnant les positions des corps à tout instant. Pour les objets découvert par GAIA la situation est plus délicate. S'il ne nous est pas possible de retrouver sans confusion cet objet (mais ce point de ré-identification n'a pas encore été étudié) suite à quelques passages dans le champ du télescope, il faudra pouvoir s'appuyer sur des mesures spécifiques de suivi au sol afin d'améliorer les prédictions d'orbite. Cette situation risque plus particulièrement d'apparaître pour des objets proches de la Terre dont la vitesse est plus importante. Des objets se déplaçant trop rapidement sur le ciel ne seront pas détectés par l'instrument ; ceci introduira un biais sur la complétude du catalogue des NEOs. La sensibilité et l'efficacité de l'instrumentation pour ce type de corps n'a pas encore été étudiée. On préférera publier des positions astrométriques, c.à.d. corrigées de la parallaxe de la plate-forme GAIA ; celle-ci n'est applicable qu'à condition de connaître les distances Terre-GAIA-objet. Les contraintes sur l'orbitographie du satellite risquent d'être trop forte ; quand à l'astéroïde, sa distance doit être connue avec une précision de l'ordre de 30 km [22]. En attendant une analyse plus détaillée, on peut distinguer deux solutions : (1) dans le meilleur des cas, on pourra déterminer cette distance à partir d'une première analyse interne des données GAIA (amélioration des éphémérides) ; (2) dans le "pire" des cas on pourra fournir les directions satellito-centriques observées et les éphémérides du satellite au cours de la mission.

Une mission comme GAIA apportera des informations capitales sur notre Système Solaire. Informations sur sa formation, son évolution dynamique et collisionnelle, ainsi que d'ordre planétologique (forme, taille, masse, densité, propriétés physiques de corps) ce sur un large intervalle de distances héliocentriques. Par ailleurs le catalogue astrométrique GAIA, de par sa densité et sa précision, entraînera un bond considérable sur la précision des futures observations au sol. Ceci permettra de compléter les données GAIA soit pour des objets qui n'auraient pas été détectés ou observés de façon optimale, soit en accumulant des observations sur une plus grande échelle de temps, soit en fournissant des prévisions d'occultations stellaires plus sûres,... Finalement la grande qualité des mesures astrométriques d'astéroïdes et de satellites naturels fournira un ensemble de données de grande valeur pour tester la théorie de la relativité générale ou la présence de vortex dans notre Univers.

Remerciements : Je tiens à remercier D. Carollo, M. Gai, M. Lattanzi, P. Tanga, V. Zappalà (OATO, Turin), P. Michel, F. Mignard, A. Morbidelli (OCA), M. Rapaport, B. Viateau (Obs. de Bordeaux), J-E. Arlot, J-F. Bange, A. Bec-Borsenberger, J. Berthier, A. Doressoundiram, A. Fienga, Ph. Robutel (Obs. de Paris) pour leurs divers apports et contributions dans l'élaboration de ce papier.

References

[1] Bange, J.F., 1998, A&A **340**, L1–L4.

[2] Bange, J.F., Bec-Borsenberger, A., Bougeard, M.L., 1997, in: IAUJD 7, 22 Aug. 1997, Kyoto, Japan.

[3] Barrow, J.D., Juszkiewicz, R., Sonoda, D.H., 1985, MNRAS **213**, 917–943.

[4] Birch, P., 1982, Nature **298**, 451–454.

[5] Boattini, A., Carusi, A., 1997, Vistas in Astronomy **41**, 527–541.

[6] Cellino, A., Zappalà, V., Davis, D.R. et al., 1990, Icarus **87**, 391–402.

[7] Cellino, A., Dell'Oro, A., Michel, P. et al., 1998, DPS **30**, 10.03.

[8] Campbell, L., Mc Down, J.C., Moffat, J.W., Vincent, D., 1983, Nature **305**, 508–510.

[9] Cardona, J., Tejeiro, J., 1998, AJ **493**, 52–53.

[10] Collins, C.B., Hawkins, S.W., 1973, MNRAS **162**, 307–320.

[11] Dicke, R.H., 1974, Science **184**, 419–429.

[12] Folkner, W.M., Charlot, P., Finger, M.H. et al., 1994, A&A **287**, 279–289.

[13] Hilton, J.L., 1999, AJ **117**, 1077–1086.

[14] Hestroffer, D., 1994, Ph.D. Thesis, Obs. de Paris, France.

[15] Hestroffer, D., 1998, Resolution power of GAIA. Technical report, OATo.

[16] Jedicke, R., Herron, J.D., 1997, Icarus **127**, 494–507.

[17] Jedicke, R., Metcalfe, T.S., 1998, Icarus **131**, 245–260.

[18] Jewitt, D.C., Luu, J., Trujillo, C., 1998, AJ **115**, 2125–2135.

[19] Levison, H.F., Duncan, M.J., 1997, Icarus **127**, 13–32.

[20] Li, L.X., 1998, GRG **30**, 497–507.

[21] Michel, P., Zappalà, V., Cellino, A., Tanga, P., Abundance of Atens and IEOs, submitted.

[22] Mignard, F., Ephemeris requirements for GAIA. SAG_FM_004, Technical report, OCA/CERGA.

[23] Müller, J., Schneider, M., Soffel, M., Ruder, H., 1991, ApJ **382**, L101–L103.

[24] Orellana, R.B, Vucetich, H., 1988, A&A **200**, 248–254.

[25] Plastino, A.R., Vucetich, H., 1992, A&A **262**, 321–325.

[26] Scholl, H. 1999, ce volume.

[27] Sitarski, G., 1992, AJ **104**, 1226–1229.

[28] Soffel, M.H., 1989, Relativity in Astrometry, Celestial Mechanics and Geodesy. Astronomy and Astrophysics Library, Springer-Verlag.

[29] Stern, S.A., 1991, Icarus **90**, 271–281.

[30] Tholen, D.J., Whiteley, R.J., 1998, DPS **30**, 16.03.

[31] Viateau, B., Rapaport, M., 1998, A&A **334**, 729–735.

[32] Will, C.M., 1993, Theory and experiment in gravitational physics. Cambridge University Press.